



Matthias Ruetz, BSc

**Particle Image Velocimetry (PIV) Messungen
am Modellversuch
Wasserschloss Krespa**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Das Wasserschloss Krespa ist Bestandteil des Pumpspeicherkraftwerks Obervermuntwerk II in Vorarlberg, Österreich. Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit Geschwindigkeitsmessungen im Steigschacht des Modellversuchs des Wasserschlosses Krespa im Labor des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Graz. Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgen mit der Methode Particle Image Velocimetry (PIV) und liefern ein Geschwindigkeitsvektorenfeld der Strömung im oberen Abschnitt des Steigschachts. Mittels der Messungen wird die Eintragstiefe von Luftblasen bestimmt, welche durch einen Wasserfall aus der Oberkammer in den Steigschacht eingebracht werden. Aufgrund der Froude'schen Modellskalierung sind die Lufteintragstiefe im Modellversuch und die in der Naturanlage (Prototyp) zu erwartende Eintragstiefe verschieden. Im Modellversuch wird diese unterschätzt, da die Luftblasen nicht wie die Geometrie des physikalischen Versuches und die hydrodynamischen Strömungszustände skaliert dargestellt werden. Durch die PIV Messungen kann der Faktor zwischen den beiden Lufteintragstiefen bestimmt werden.

Durch die PIV Messungen wird die Strömungsgeschwindigkeit indirekt über die Verschiebung von Partikeln innerhalb definierter Zeitschritte ermittelt. Neben den PIV Messungen ist auch die Entwicklung des Messkonzepts und die automatisierte Auswertung der Messdaten Teil dieser Masterarbeit. Außerdem werden das Projekt Obervermuntwerk II und der Modellversuch Wasserschloss Krespa beschrieben. Die Funktion von Wasserschlossern und das Messverfahren Particle Image Velocimetry werden erläutert. Eine Literaturrecherche zum Luftblaseneintrag, ausgelöst durch Wasserfälle, befindet sich ebenfalls in dieser Arbeit.

Abstract

The surge tank Krespa is a part of the pumped-storage hydropower plant Obervermuntwerk II in Vorarlberg, Austria. This master thesis deals with velocity measurements in the main shaft of the surge tank Krespa in a physical model test in the laboratory of the Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management at Graz University of Technology. The velocity measurements are made with the Particle Image Velocimetry (PIV) method and provide a velocity field of the flow in the upper part of the main shaft. A waterfall from the upper chamber to the main shaft introduces air bubbles into the water cushion. The penetration depth of air bubbles is determined by the measurements. The model test Krespa is operated by the similarity law of Froude, therefore the penetration depth of air bubbles is underestimated in the model. Due to not scalable air bubbles the expected air bubble penetration depth in the prototype is greater than in the model. With the PIV measurements the factor between the two air entry depths can be determined.

In PIV the flow rate is detected indirectly through the displacement of particles within defined time steps. Apart from the PIV measurements the development of the measurement concept and the automated plot of the measurement data are part of this thesis. The project Obervermuntwerk II and the model test surge tank Krespa are also described. The function of surge tanks in general and the Particle Image Velocimetry measurement method are discussed, a literature research for bubble entrainment by waterfalls is also a part of this thesis.

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung - Einleitung	1
2. Abkürzungen und Begriffsbestimmungen	3
2.1 Abkürzungen.....	3
2.2 Begriffsbestimmungen	3
3. Projekt Obervermuntwerk II	5
3.1 Anlagehauptdaten.....	5
3.2 Zeitplan.....	5
3.3 Beschreibung der Kraftwerksanlage	6
3.3.1 Beschreibung der Anlage Obervermuntwerk II oberwasserseitig.....	9
3.3.2 Kraftkaverne und maschinelle Ausrüstung	12
3.3.3 Energieableitung	14
3.4 Das Obervermuntwerk II im Onlineauftritt	14
4. Wasserschlösser im Allgemeinen	15
4.1 Grundlegendes	15
4.2 Schwingungen im Triebwassersystem	16
4.3 Aufgaben des Wasserschlosses	17
4.3.1 Druckstoß.....	21
4.3.2 Stabilitätskriterium.....	21
4.4 Wasserschlosstypen	22
4.4.1 Schachtwasserschloss	24
4.4.2 Kammerwasserschloss	24
4.4.3 Differentialwasserschloss	26
4.4.4 Druckluftwasserschloss.....	27
4.5 Anforderungen an Wasserschlösser in der derzeitigen Situation am europäischen Strommarkt.....	27
4.5.1 Große Volumen:.....	28
4.6 Spezialfall Wasserfall im Wasserschloss mit langer Oberkammer	28
4.7 Modellversuch Krespa	31
4.7.1 Bemessungslastfall für den Wasserfall aus der Oberkammer.....	31
4.7.2 Dämpfungselement für den Wasserfall aus der Oberkammer	32

4.7.3	Fotos vom Modellversuch	34
5.	Luftetrugstiefe in der Literatur	37
5.1	Maximale Luftetringtiefe	37
5.2	Berechnungsmöglichkeiten für die maximale Luftetrugstiefe	38
5.2.1	Nach Clanet & Lasheras	38
5.2.2	Diagramm nach Ervine & Falvey	39
5.2.3	Vergleich der Methoden nach Ervine & Falvey und Clanet & Lasheras	40
5.2.4	Diskussion.....	41
6.	Particle Image Velocimetry	42
6.1	Allgemeines	42
6.2	Messprinzip.....	43
6.3	Korrelation	45
6.4	Tracer-Partikel (Seeding).....	46
6.4.1	Zugegebenes Seeding	47
6.4.2	Natürliches Seeding	47
6.4.3	Seeding im Rohrsystem des Wasserbaulabors der TU Graz:.....	47
6.5	PIV System des Wasserbaulabors der TU Graz	48
6.6	Lasersicherheit	51
7.	PIV Messungen am Modellversuch Krespa	54
7.1	Allgemeines	54
7.2	Ziel der PIV-Messungen.....	54
7.3	Vorbereitungen und Versuchsumbau	54
7.3.1	Neue Zulaufleitung	54
7.3.2	Sicherheitsmaßnahmen	55
7.3.3	PIV-Box.....	55
7.4	Kalibrierung.....	56
7.4.1	Vorgangsweise bei der manuellen Einrichtung des Lasersheets	57
7.4.2	Kamera	57
7.5	PIV-Messungen	57
7.5.1	Generelle Angaben	57
7.5.2	Angaben zu den gemessenen Lastfällen.....	58
7.5.3	PIV-Bilder.....	60
7.6	Auswertung.....	61
7.6.1	Software Dynamic Studio®	61

7.6.2	Datenplot im Programm Matlab®	62
7.7	Ergebnisse und Interpretation	62
7.7.1	Lastfall 1.....	62
7.7.2	Lastfall 2.....	73
7.7.3	Verhältnis der Lufteintragstiefe Modell zu Prototyp.....	78
8.	Resümee.....	81
8.1	Zusammenfassung	81
8.2	Ausblick	82
	Literaturverzeichnis	85
	Abbildungsverzeichnis	88
	Tabellenverzeichnis	91
	Anhang.....	92

1. Aufgabenstellung - Einleitung

Das Wasserschloss Krespa ist Teil des Projektes Pumpspeicherkraftwerk Obervermunt II. Es wurde im Wasserbaulabor der TU Graz im Maßstab 1:30 errichtet und wird nach dem Froude'schen Modellgesetz betrieben. Bei bestimmten Mehrfachschaltfällen kommt es dazu, dass sich ein Abreißen der Wassersäule am Übergang der Oberkammer in den Steigschacht einstellt. Die Folge daraus ist, dass sich ein instationärer Wasserfall von der Oberkammer in den Steigschacht ergibt. Der Wasserfall verursacht den Eintrag von Luftblasen in den Wasserkörper des Steigschachts. Beim Eindringen der Fallstrahlen des Wasserfalls auf die Wasseroberfläche werden Luftblasen im Wasser eingeschlossen und durch den verbleibenden Impuls des Jets nach unten getragen. Die Fragestellung ist nun, wie tief die Luftblasen eindringen. Deswegen befasst sich die vorliegende Masterarbeit mit Geschwindigkeitsmessungen im Steigschacht des Modellversuchs Wasserschloss Krespa. Es ergeben sich folgende Ziele für die Masterarbeit:

- Erarbeitung der Vorgehensweise für die Messung
- Adaptierung des Modellversuchs
- Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung im Steigschacht für spezifische Lastfälle
- Messung mit der Methode Particle Image Velocimetry (PIV)
- Evaluierung der maximalen Lufteintragstiefe im Modell
- Verhältnis der Lufteintragstiefe Modell zu Prototyp
- Darstellung der Versuchsergebnisse mit der Software Matlab

Die Forschungsfragen lauten: Wie tief dringen Luftblasen in den Steigschacht des Wasserschloss Krespa ein und in welchem Verhältnis steht die Luftblaseneindringtiefe im Modell zum Prototyp? Weiters wird der Zusammenhang der Lufteindringtiefe mit dem Froude'schen Modellmaßstab untersucht.

Die Beantwortung der Forschungsfragen erfolgt mit Hilfe der folgenden Kapitel:

3. Projekt Obervermuntwerk II
4. Wasserschlösser im Allgemeinen

5. Lufteintragstiefe in der Literatur
6. Particle Image Velocimetry
7. PIV Messungen am Modellversuch Krespa
8. Resümee

In Kapitel 3 wird das Pumpspeicherkraftwerksprojekt Obervermuntwerk II beschrieben. In Abschnitt 4 folgen allgemeine Angaben zu Wasserschlossern als Teil einer Wasserkraftwerksanlage. Außerdem wird auch das Wasserschloss Krespa in der Natur und als Modellversuch näher erläutert. Der Abschnitt 5 berichtet über die Erkenntnisse einer Literaturrecherche über die Lufteintragstiefe von Fallstrahlen. Die Geschwindigkeitsmessmethode Particle Image Velocimetry (PIV) wird in Teil 6 dieser Masterarbeit erklärt. Das Kapitel 7 widmet sich den PIV Messungen am Modellversuch Krespa, sowie deren Auswertung und der Interpretation der Versuchsergebnisse. Im Resümee werden die Ergebnisse aus den PIV Messungen zusammengefasst und ein Ausblick auf eventuell noch folgende Untersuchungen mittels PIV am Modellversuch Wasserschloss Krespa wird gegeben.

2. Abkürzungen und Begriffsbestimmungen

2.1 Abkürzungen

AZ	Absenkziel
LF	Lastfall
müA.	Meter über Adria
ms	Millisekunden
MW	Megawatt
OVW II	Obervermuntwerk II
PIV	Particle Image Velocimetry
PSKW	Pumpspeicherkraftwerk
SZ	Stauziel
WS	Wasserschloss

2.2 Begriffsbestimmungen

CCD-Kamera

Die Abkürzung CCD bedeutet Charged Coupled Device. Eine CCD-Kamera ist eine Kamera mit CCD-Sensor. Für die PIV Messungen wird eine Highspeed CCD-Kamera verwendet.

Hydraulischer Kurzschluss

Dieser bedeutet, dass das Triebwasser im kurzen Kreislauf zwischen Turbine und Pumpe geführt wird. In Kauf genommen werden hohe Energieverluste durch enge Radien der Leitungsführung. Der Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerks im hydraulischen Kurzschluss dient dazu, den Pumpbetrieb regelbar zu machen. Eine Pumpe hat eine bestimmte Leistungsaufnahme. Diese Leistung ist immer gleichbleibend (Kopswerk2, 2014). Ist die vom Netz zur Verfügung gestellte Leistung für das Pumpen zu gering, wird die Differenzleistung durch Abarbeiten von Triebwasser direkt an der Turbine zur Verfügung gestellt (Projekt Obervermuntwerk II, 2014).

Nd:YAG-Laser

Nd:YAG ist die Abkürzung für Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat. Ein solcher Laser ist ein Festkörperlaser, ein Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall fungiert hier als aktives Medium (Nd:YAG-Laser, 2014). Im aktiven Medium erfolgt die Anregung von Atomen (Pumpen) durch Energiezufuhr. Das Resultat daraus sind Lichtteilchen (Photonen). Ein solcher Laser wird für die PIV verwendet. In Abbildung 1 ist dieses Prinzip veranschaulicht:

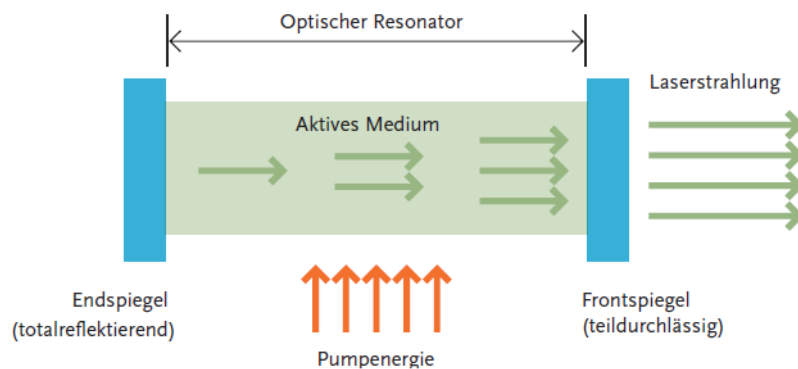


Abbildung 1: Prinzip eines Lasers (Udovicic, 2010)

Pumpspeicherkraftwerk

Ein Pumpspeicherkraftwerk nutzt das Wasser aus zwei Speicherbecken. Es kann das Wasser sowohl über die Turbinen als auch über die Pumpen abarbeiten. Bei Strombedarf wird das Wasser vom oberen ins untere Becken geleitet und Strom erzeugt. Ist zu viel Strom im Netz vorhanden, wird das Wasser vom tieferen in den höher gelegenen Speicher gepumpt und überschüssige Energie gespeichert. Pumpspeicherkraftwerke können kurzfristig elektrische Leistung zur Verfügung stellen, sowie Strom sehr effizient speichern.

3. Projekt Obervermuntwerk II

Das Pumpspeicherkraftwerk Obervermunt II (OVW II) ist ein Projekt der Vorarlberger Illwerke AG. Dieses wird im Montafon im Bereich Bieler Höhe zwischen den beiden bestehenden Speicherseen Silvretta und Vermunt errichtet.

Derzeit besteht bereits das Speicherkraftwerk Obervermuntwerk I. Das neue Pumpspeicherkraftwerk Obervermuntwerk II wird derzeit parallel dazu ausgeführt. Für beide Kraftwerke ist der Silvrettasee das Oberbecken und der Vermuntsee das Unterbecken. Das neue OVWII erhöht den Ausnutzungsgrad des vorhandenen Wasserkraftpotentials zwischen Silvretta- und Vermuntsee erheblich. (Projekt Obervermuntwerk II, 2014)

3.1 Anlagehauptdaten

Die wichtigsten Kraftwerksdaten sind in Tabelle 1 angeführt:

Tabelle 1: Kennzahlen OVWII (Projekt Obervermuntwerk II, 2014)

Engpassleistung im Turbinenbetrieb	360 MW
Max. Leistungsaufnahme im Pumpbetrieb	360 MW
Leistung je Turbine	180 MW
Leistung je Speicherpumpe	180 MW
Max. Durchfluss im Turbinenbetrieb	150 m ³ /s
Max. Durchfluss im Pumpbetrieb	135 m ³ /s
Fallhöhe	291 m

3.2 Zeitplan

Das in Zukunft zweitgrößte Kraftwerk der Illwerke soll zusätzliche Regelenergie liefern und wird zur Zwischenspeicherung verwendet. Die Kriterien für den Kraftwerksbetrieb sind: möglichst schnelle Regulierbarkeit, die Möglichkeit der Pumpspeicherung und damit die Integration erneuerbarer Energien wie

Photovoltaik und Windkraft. Es wird kein zusätzliches Triebwasser beigeleitet, sondern nur auf die Inhalte der bereits bestehenden Speicher Silvretta und Vermunt zurückgegriffen. Das Kraftwerksprojekt hat eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchlaufen. Der Baubeginn für dieses Projekt war im Mai 2014. Die Inbetriebnahme des Obervermuntwerks II ist im Jahr 2018 geplant (Projekt Obervermuntwerk II, 2014).

3.3 Beschreibung der Kraftwerksanlage

Das Obervermuntwerk II besteht aus folgenden Anlagenteilen:

- oberwasserseitig:
 - Einlaufbauwerk Silvretta
 - Schützenschacht mit Belüftung
 - Druckstollen
 - **Wasserschloss Krespa** (Gegenstand dieser Masterarbeit)
 - Druckschacht
 - Verteilrohrleitung zu den beiden Maschinensätzen
- Kraftkaverne
- unterwasserseitig
 - Unterwasserschützen im Bereich der Krafthauskaverne
 - Unterwasserstollen
 - Auslaufbauwerk Vermuntsee

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht vom Projekt Obervermuntwerk II:

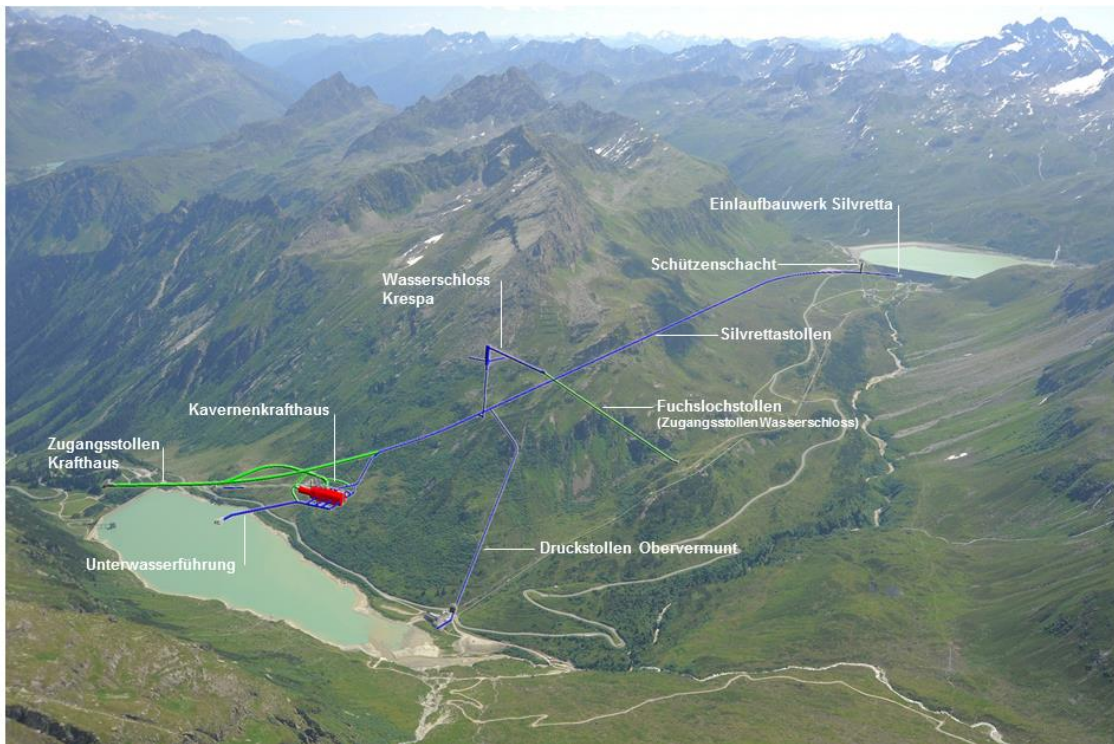


Abbildung 2: Projektübersicht Obervermuntwerk II (Projekt Obervermuntwerk II, 2014)

Die Abbildung 3 zeigt die Anlagenteile des Obervermuntwerks II im Längenschnitt:

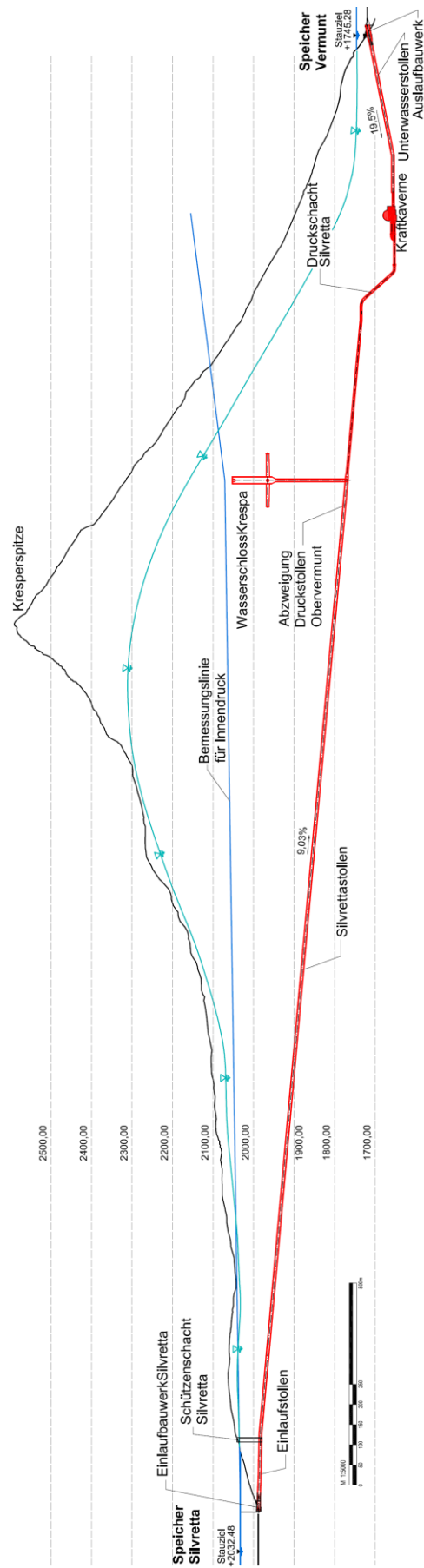


Abbildung 3: Längenschnitt Obervermuntwerk II, (Zenz et al., 2014)

3.3.1 Beschreibung der Anlage Obervermuntwerk II oberwasserseitig

Der Triebwasserweg für das Obervermuntwerk II besteht aus einem etwa 3,7 km langen Stollen. Das bestehende Obervermuntwerk I nutzt in Zukunft den oberen Teil des neuen Triebwassersystems. Die derzeitige oberirdische Druckrohrleitung des Obervermuntwerks I wird nach Fertigstellung der neuen Anlage OVWII rückgebaut. Es ist möglich beide Kraftwerke (OVWI & II) unabhängig voneinander zu betreiben.

Die Abbildung 4 zeigt die oberirdische Stahldruckrohrleitung des Obervermuntwerks I am Almboden der Alpe Vermunt. Rechts ist auch noch die Staumauer des Silvrettasees zu sehen.



Abbildung 4: derzeitige Druckrohrleitung Obervermuntwerk I, links Blick in Fließrichtung, rechts Blick gegen die Fließrichtung: Druckrohrleitung und Staumauer Silvrettasee

Der Triebwasserweg beginnt beim Einlaufbauwerk Silvretta. Danach folgt der Einlaufstollen (Länge 170 m) und der Schützenschacht. Im Schützenschacht befinden sich zwei hintereinander liegende, notschlusstaugliche Rollschütze. Diese sind notwendig, um den Wasserfluss im Falle einer Revision oder für das Auslösen des hydraulischen Schutzes unterbrechen zu können. Anschließend gelangt das Triebwasser über den ca. 2,8 km langen und ca. 10 % fallenden Druckstollen (Silvrettastollen) bis zum Beginn des Druckschachtes. Der Innendurchmesser des Druckstollens beträgt 6,80 m. Der Druckschacht ist gepanzert, 110 m lang und hat einen Innendurchmesser von 4,50 m. Nach dem Druckschacht fließt das Wasser durch die Verteilrohrleitung bis zu den Maschi-

nensätzen in der Kraftkaverne. Etwa 500 m oberhalb des Knicks zum Druckschacht zweigt der Druckstollen zum bestehenden Obervermuntwerk I ab. Er wird als Rohrstollen ausgeführt und hat eine Länge von ca. 1,3 km und einen Durchmesser von 1,80 m. Ca. 60 m nach dieser Abzweigung beginnt der Verbindungsstollen zum Wasserschloss Krespa (Projekt Obervermuntwerk II, 2014).

Wasserschloss Krespa

Das Kammerwasserschloss Krespa besteht von unten nach oben aus

- dem mit 2 % geneigten Verbindungsstollen (rd. 1770 müA, $D_i = 6,8$ m), inklusive Krümmer
- der hydraulisch asymmetrischen Drossel
- dem Vertikalschacht ($D_i = 6,3$ m, $H = 188$ m) inkl. Übergang zum Steigschacht
- den drei unteren Wasserschlosskammern (Unterkante 1978,0 müA, Geometrie: beim Übergang Steigschacht in Unterkammer vertikale Aufweitung von $D = 7$ m auf 9 m – Verzug der vertikalen Aufweitung bis Stollende auf $D = 7$ m, $L = 70$ m),
- dem vertikalen Steigschacht ($D_i = 17,0$ m, von 1970 müA bis 2048 müA Höhe = 78 m),
- der Kopfkaverne (Unterkante 2048 müA, $D_i = 20,3$ m) und
- der Oberkammer ($D_i = 7,0$ m, $L = 320$ m von Achse Steigschacht bis Übergangsbauwerk zum Belüftungsstollen, Neigung 1,5 %, Unterkante 2048,0 müA).

Die Abbildung 5 zeigt das Wasserschloss Krespa als Längenschnitt, die Abbildung 6 als 3D-Darstellung:

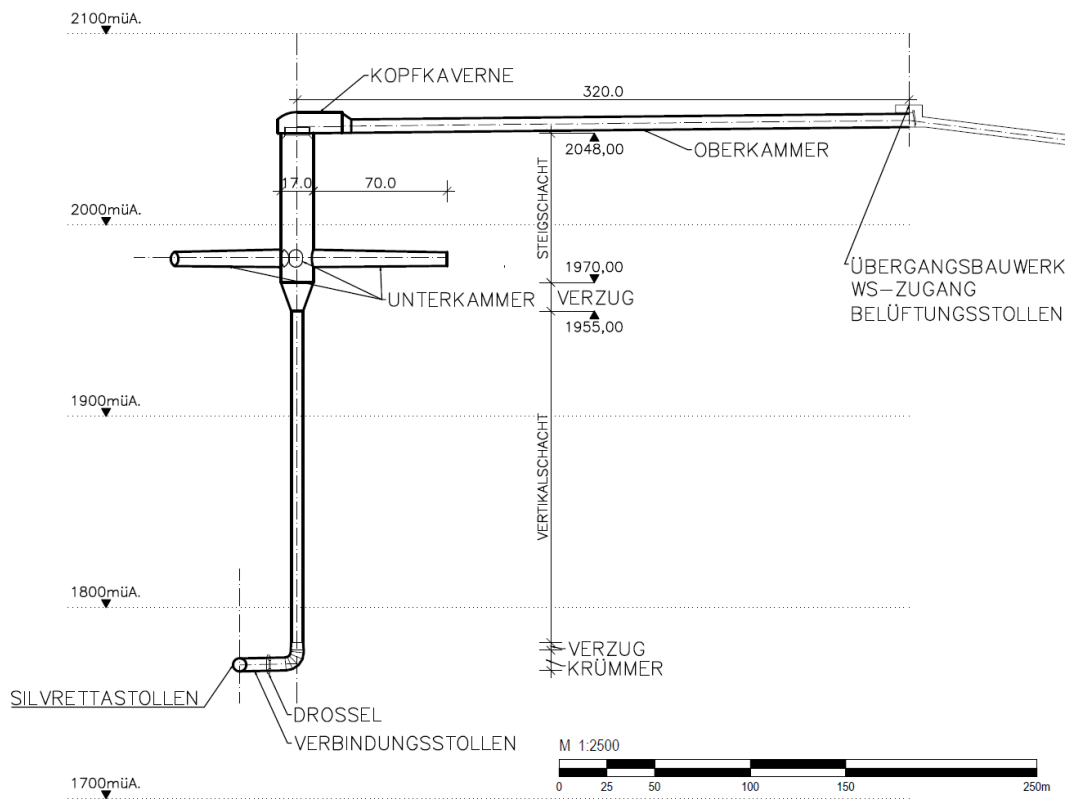


Abbildung 5: Längsschnitt Wasserschloss Krespa, (Zenz et al., 2014)

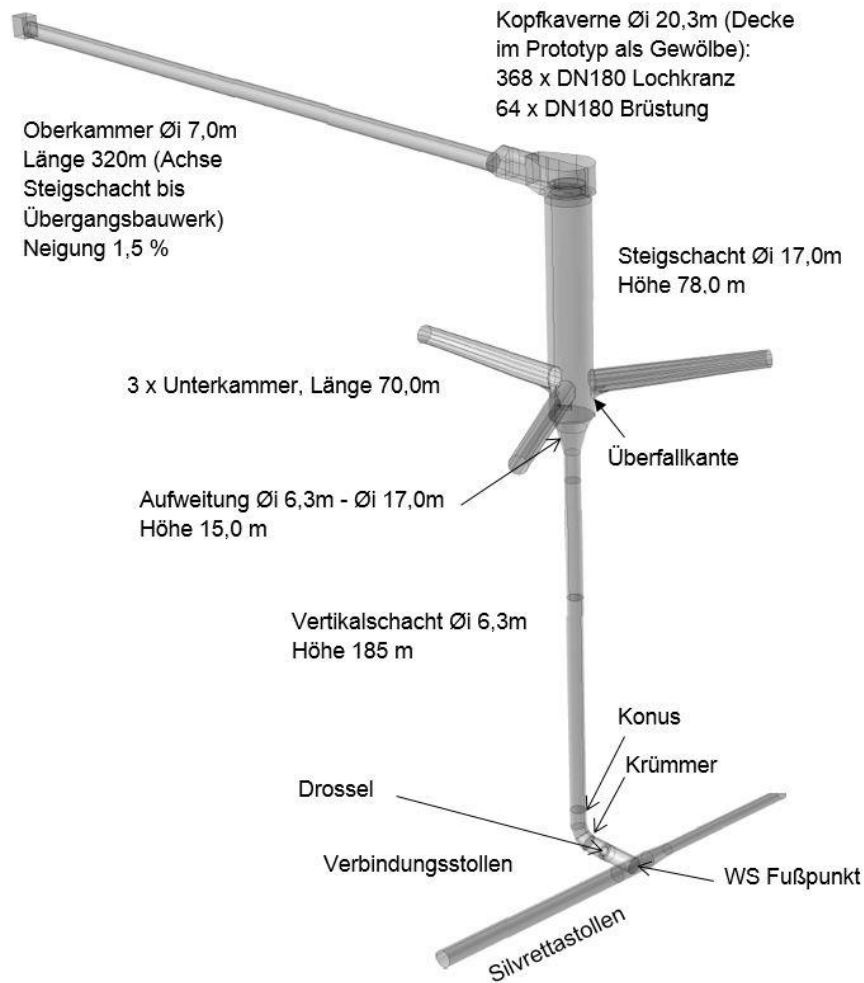


Abbildung 6: 3D-Darstellung Wasserschloss Krespa, (Zenz et al., 2014)

3.3.2 Kraftkaverne und maschinelle Ausrüstung

Das Obervermuntwerk II wird als Kavernenkraftwerk ausgeführt. Die Kaverne ist 117 m lang, 25 m breit und 35 m hoch.

In der Kraftkaverne befinden sich zwei horizontale, ternäre Maschinensätze. Sie bestehen jeweils aus der Turbine mit Kupplung, dem Motor-Generator und der Speicherpumpe mit hydraulischem Anfahrwandler. Die Nennleistung beträgt jeweils 180 MW. Der Betrieb der Maschinen im hydraulischen Kurzschluss ist durch die ternären (3 Grundeinheiten: Turbine, Generator u. Speicherpumpe) Maschinensätze möglich. Als Turbinen kommen zwei Francisturbinen zum Einsatz. Diese sind kuppelbar, das heißt vom Laufrad besteht keine direkte Verbindung zum Generator. Die Pumpe bzw. die Turbine kann an den Generator an- und abgekuppelt werden. Bei einer direkten Verbindung müsste die Turbine bei gewissen Betriebszuständen ausgeblasen werden. Dies würde eine große

Kompressoranlage erfordern und bedeutet einen höheren technischen Gesamtaufwand. Deswegen wird beim Projekt Obervermuntwerk II die Kupplung zwischen Generator und Turbine bzw. Pumpe angeordnet. Bei Zukupplung muss die Turbine zuerst auf die gleiche Drehzahl wie die des Generators gebracht werden (Projekt Obervermuntwerk II, 2014).

Die beiden nun folgenden Abbildungen zeigen die Kraftkaverne und die Unterwasserführung.

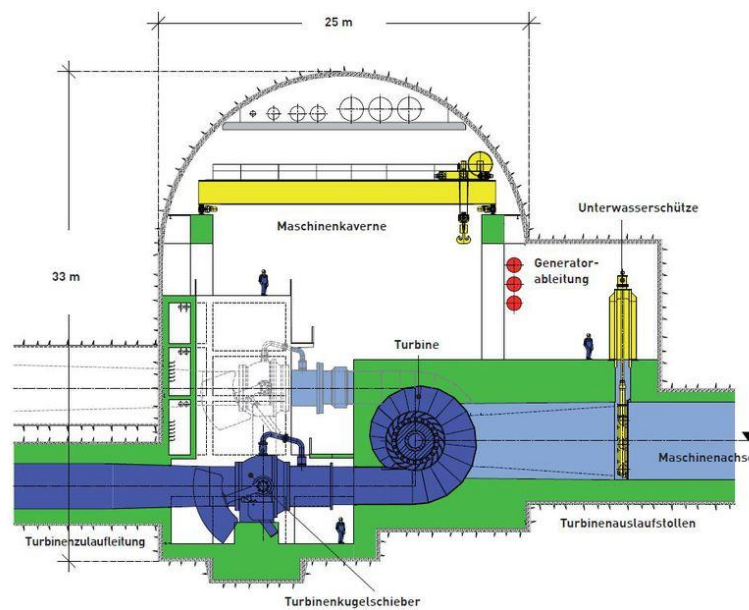


Abbildung 7: Kraftkaverne OVWII (Projekt Obervermuntwerk II, 2014)

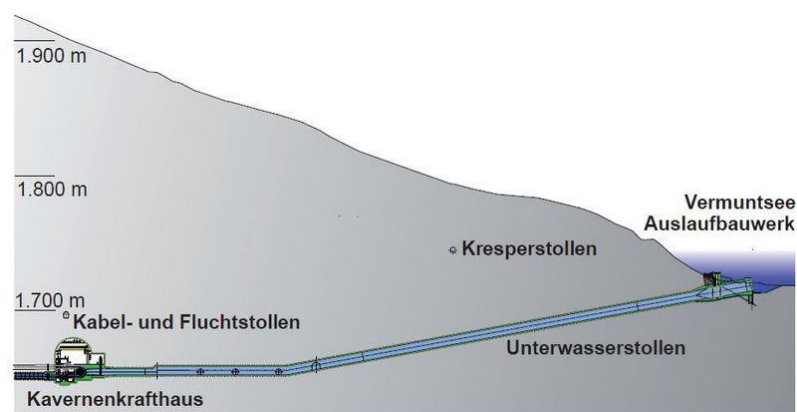


Abbildung 8: Unterwasserführung (Projekt Obervermuntwerk II, 2014)

3.3.3 *Energieableitung*

Der in der Kraftwerkskaverne erzeugte Strom muss in das Stromleitungsnetz eingespeist werden. Die Energieableitung lässt sich in vier verschiedene Bereiche unterteilen: Zuerst verläuft sie durch den Kabel- und Fluchtstollen aus der Kraftkaverne hinaus. Anschließend folgt ein erdverlegter Abschnitt. Dann gelangen die Energiefortleitungskabel in den Trommierstollen, wo schon die Kabel des bestehenden Obervermuntwerks I verlegt sind. Den Abschluss der Energiefortleitung bildet die Steilstrecke von Trommier nach Partenen. Die Energie kommt nun zur 220 kV Schaltanlage des Kopswerks I in Partenen (Projekt Obervermuntwerk II, 2014).

3.4 Das Obervermuntwerk II im Onlineauftritt

Weitere Informationen, Bilder und Videos zum Kraftwerksprojekt gibt es online:

www.obervermuntwerk2.at oder



4. Wasserschlosser im Allgemeinen

Das nun folgende Kapitel dient zur Erläuterung von theoretischen Grundlagen im Zusammenhang mit Wasserschlossern. Neben der niederfrequenten Wasserschloss- und der hochfrequenten Druckstoßschwingung werden die Aufgaben eines Wasserschlosses erläutert. Außerdem wird auf die verschiedenen Bauformen von Wasserschlossern eingegangen. Die Anforderungen an Wasserschlosser aufgrund sehr hoher Durchflüsse im Druckstollen werden neben dem möglichen Auftritt eines Wasserfalls im Zuge von spezifischen Schaltvorgängen dargestellt. Wasserschlosser werden häufig auch in physikalischen Modellversuchen untersucht. Als Beispiel dafür wird der Modellversuch Wasserschloss Krespa im Wasserbaulabor der TU Graz beschrieben.

4.1 Grundlegendes

Der Begriff Wasserschloss hat seine Ursprünge im Lateinischen. Fast jede römische Wasserleitung hatte ihr Castellum Divisorium. Die Römer haben darunter Endbehälter oder Verteilerbauwerke bei Wasserversorgungsnetzen verstanden. Wasser war ein kostbares Gut und daher die Bezeichnung des Schlosses. (Giesecke et al., 2009)

Das Wasserschloss ist ein Standrohr oder Speicherbecken am unteren Ende eines geschlossenen Rohrleitungssystems. Es bietet Schutz vor übermäßigem Druckanstieg in der Leitung wegen einer plötzlichen Verringerung des Durchflusses. Weiters stellt das Wasserschloss schnell Wasser bereit, wenn die Verschlussorgane vor den Turbinen geöffnet werden. Das heißt es muss nicht gewartet werden, bis das Wasser in der oft langen Zuleitung beschleunigt ist (Johnson, 1908). Um einen sicheren und zweckmäßigen Betrieb zu ermöglichen ist auf bewegliche Teile im Wasserschloss zu verzichten. Zusatzkonstruktionen wie Drosseln oder Wehrüberfälle sollten daher unbeweglich ausgeführt werden (Seeber, 1970).

Ist das Wasserschloss Teil eines Wasserkraftwerks, so wird dieses meist am Übergang zwischen dem flach geneigten Druckstollen und dem steileren Kraft-

abstieg angeordnet. Es kann als oberirdisches Ausgleichsbecken oder unterirdisch im Berg ausgeföhrt werden (Giesecke et al., 2009).

4.2 Schwingungen im Triebwassersystem

Zwei Schwingungen werden hinsichtlich ihrer Frequenz unterschieden. Falls der Kugelschieber vor den Turbinen geschlossen wird, treten im System kurz- und langfrequente Druckänderungen auf. Die hochfrequenten Schwingungen resultieren aus der Kompressibilität des Wassers und der Verformungsfähigkeit des Rohres. Sie sind besser unter der Bezeichnung Druckstoß bekannt. Niederfrequente Schwingungen sind auf die Massenträgheit des Wassers zurückzuführen. Eine andere Bezeichnung für diese Bewegung ist Massenschwingung oder Wasserschlossschwingung (Giesecke et al., 2009).

Je kürzer die Schließzeiten und je länger der Druckschacht, desto größer werden die Druckstöße. An der freien Oberfläche im Wasserschloss wird der ankommende Druckstoß mit umgekehrtem Vorzeichen reflektiert. Die Wasserschlossschwingung bedeutet eine pendelnde Bewegung des Wasserspiegels im Wasserschloss. Beim Schließvorgang folgt ein Ausweichen der Druckwelle ins Wasserschloss und die Energieumwandlung von kinetischer in potentielle Energie. Der Wasserspiegel steigt und bewirkt einen Gegendruck auf das aus dem Druckstollen nachströmende Wasser, bis sich ein neues Gleichgewicht einstellt. Der Wasserspiegel im Wasserschloss sinkt beim Öffnen eines Schiebers und somit entsteht auch das zur Beschleunigung der Wassersäule benötigte Gefälle. Die Wasserschlossschwingung ist eine träge Massenschwingung. Ihre Schwingungszeit ist im Vergleich zum Druckstoß und zu den Schließzeiten von Regelorganen groß. (Blind et al., 1987)

Die Schwingungsdauer der Wasserschlossschwingung für plötzliches Schließen in einem Druckstollen beträgt (Giesecke et al., 2009):

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{l_s * A_w}{g * A_s}} \quad (4.1)$$

T Schwingungsdauer bzw. Schwingungsperiode [s]

l_s Stollenlänge [m]

A_w Wasserschlossquerschnitt [m²]

A_s Querschnittsfläche des horizontalen Zuleitungsdruckstollens [m²]

g Erdbeschleunigung [m/s²]

4.3 Aufgaben des Wasserschlosses

Die Aufgaben eines Wasserschlosses lassen sich auf vier Kernpunkte zusammenfassen (Giesecke et al., 2009):

- *hydraulische Trennung des Druckstollens vom Kraftabstieg*
- *Dämpfung der Druckstoßentwicklung*
- *Verbesserung der Regelbarkeit der Wasserkraftanlage*
- *beschleunigter Ausgleich der Wasservolumina*

Die wichtigste Aufgabe ist die **hydraulische Trennung des Druckstollens vom Kraftabstieg**, da sich der Druckstoß (engl. water hammer) wegen des Wasserschlosses hauptsächlich auf den gepanzerten Kraftabstieg beschränkt. Die Massenschwingung (engl. mass oscillation) spielt sich nur im Bereich des Druckstollens ab (Giesecke et al., 2009). Jede Änderung des Durchflusses in Druckrohrleitungen löst Druckstöße aus. Die Turbinenregelung oder der Schnellschluss des Absperrorgans infolge einer Betriebsstörung verursachen unter anderem einen Druckstoß, wodurch die kinetische Energie im Druckstollen erhöht wird.

Der maximale Druckstoß ist der sogenannte Joukowsky-Stoß. Er gilt für das plötzliche Schließen eines Absperrorgans. Dieser kann mit folgender Formel berechnet werden (Giesecke et al., 2009):

$$\max h_{a,jou} = \pm \frac{a * \Delta v}{g} \quad (4.2)$$

$\max h_{a,jou}$ maximale Druckstoßhöhe infolge Joukowsky-Stoß [m]

a Druckwellengeschwindigkeit [m/s]

Δv Geschwindigkeitsänderung [m/s]

g Erdbeschleunigung [m/s²]

Für ein Abreißen der Wassersäule bei Dampfdruck und anschließendem Zusammenschlagen der Wassersäulen, können Druckstöße größer als der Joukowskistoß auftreten. Daher sind diese Lastfälle zu vermeiden (Bergant et al., 2006). Die wichtigsten Aufgaben des Wasserschlosses sind die Dämpfung des Überdrucks und die Verhinderung Unterdrucks, und es soll eine schnelle Reflektion der Wassermassen und eine schnelle Regelung der Kraftwerksanlage gewährleisten (Johnson, 1908).

Der Druckstoß muss entweder bei der Dimensionierung der Auskleidung berücksichtigt werden, oder durch konstruktive Maßnahmen abgemindert werden. Eine konstruktive Vorkehrung ist die Platzierung eines Wasserschlosses zwischen Druckstollen und Kraftabstieg. Der meist lange Druckstollen wird nicht durch den Druckstoß belastet, da die kinetische Energie im Stollen in das Wasserschloss entweichen kann und im Wasserschloss in potentielle Energie umgewandelt wird. Der Druckstollen wird demnach auf die Druckhöhe, welche sich am Wasserschlossfußpunkt ergibt, ausgelegt (bei Drosselung liegt die Druckhöhe über dem maximalen Wasserspiegel in der Kammer).

Die Folge aus einem Erreichen einer höheren Höhenlage im Wasserschloss als dem Stauziel im Reservoir ist ein Rückschwingen des Wassers vom Wasserschloss in den Stollen. Im Wesentlichen sind nur der Druckschacht, die Verteilrohrleitung und die Verschlussorgane dem Druckstoß ausgesetzt und müssen bei oberflächennaher Leitungsführung gepanzert werden, da der Überdruck nicht im Gleichgewicht mit der Gebirgsüberlagerung steht.

Die Darstellung der hydraulischen Trennung des Triebwassersystems ist in der Abbildung 9 zu sehen:

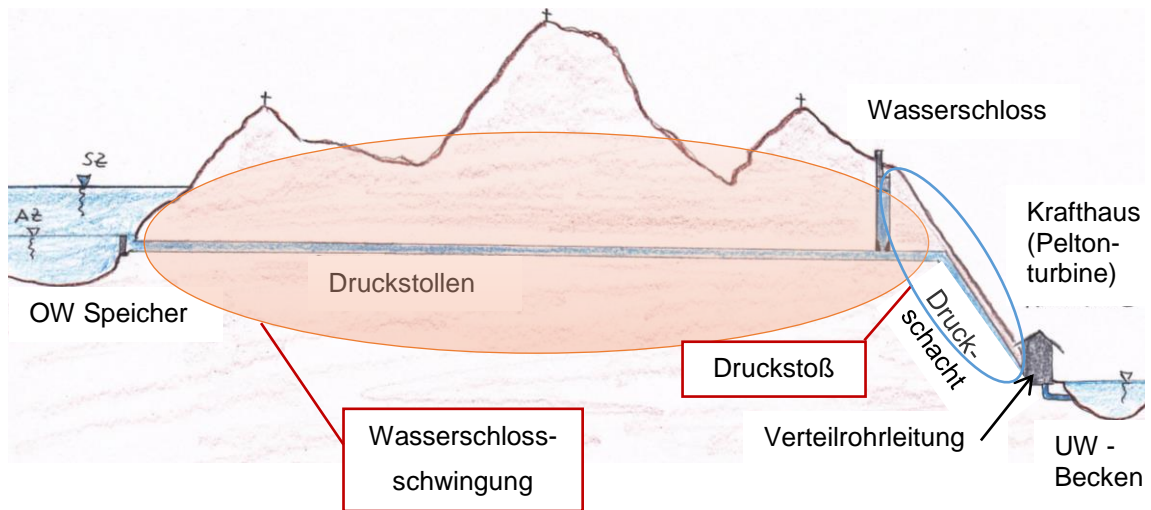


Abbildung 9: hydraulische Trennung des Triebwassersystems

Des Weiteren führt ein Wasserschloss zur **Dämpfung der Druckstoßentwicklung** im Kraftabstieg, da die hochfrequenten Druckschwankungen am Wasserschloss reflektiert werden und deswegen kein so großer Druckstoß entsteht. (Giesecke et al., 2009). Das Wasserschloss wirkt als Dämpfer für den Druckstoß. Nach einem Schnellschluss des Absperrorgans, kann das Wasser weiterströmen (Trägheit) und in die Wasserschlosskammer ausweichen. Es findet eine Energieumwandlung statt. Aus der kinetischen Energie des Druckstollens wird potentielle Energie im Wasserschloss. Es entsteht ein Gegendruck durch den Anstieg der statischen Druckhöhe in der Kammer, der die Fließgeschwindigkeit des Wassers im Druckstollen allmählich verringert. Es bildet sich die sogenannte Wasserschlossschwingung (oszillierende Bewegung) im Wasserschloss aus. Diese wird durch die hydraulischen Verluste im Stollen und gegebenenfalls an der Drossel gedämpft. Die Wasserschlossschwingung ist kein Druckstoß, sondern eine träge und deswegen langsame Massenschwingung. Der maximale Druck im Stollen ist durch den höchsten Wasserstand im Wasserschloss gegeben, jedoch deutlich geringer als die Werte des Druckstoßes (Strobl & Zunic, 2006). Falls eine Drossel im Wasserschloss situiert ist, liegt der maximale Druck um die Verlusthöhe der Drossel über dem maximalen Wasserpiegel im Wasserschloss.

Außerdem verbessert ein Wasserschloss die **Regelbarkeit der Wasserkraftanlage**. Das heißt die Laufzeiten der kurz- und langwelligen Wasserschwingun-

gen werden verkleinert und dadurch können die Maschinen stabiler betrieben werden (Giesecke et al., 2009).

Ein Wasserschloss beschleunigt den **Ausgleich der Wasservolumina**. Gerade beim Anfahren (Einschalten) eines Wasserkraftwerks ergeben sich daraus Vorteile. Das Wasser fließt zuerst aus dem Wasserschloss heraus Richtung Turbine und anschließend kommt Wasser aus dem Speicher nach. Es kann deswegen früher Energie erzeugt werden, da nicht gewartet werden muss, bis das Wasser im meist langen Druckstollen beschleunigt ist (Giesecke et al., 2009). Durch das Öffnen der Turbinen (Zuschalten) folgen ein Absinken des Spiegels im Wasserschloss und die Erhöhung der Fallhöhe zwischen Speicher und Wasserschloss. Es fließt eine größere Triebwassermenge durch den Druckstollen, als von den Turbinen bewältigt werden kann. Die Wasserschloss-Schwallkammer wird wieder angefüllt und die periodische Schwingbewegung klingt rasch ab. Durch das Abschalten der Turbinen entsteht ein kleinerer Abfluss aus dem Wasserschloss. Das im Druckstollen zuströmende Wasser füllt das Wasserschloss, bis gegenüber dem Speicher eine Druckdifferenz entsteht und das Wasser dorthin zurück fließt. Nachfolgend läuft ein gedämpfter Schwingungsvorgang ab. Das Wasserschloss wird auf den größten Wasserspiegelanstieg (beim Abschalten) über dem Stauziel und die tiefste Absenkung des Wasserspiegels (beim Zuschalten) unter dem Absenkziel im Speichersee bemessen. Die maximalen Ausschläge der Schwingung hängen mit den Abmessungen des Druckstollens und des Wasserschlossschachtquerschnitts zusammen (Bretschneider et al., 1993).

Der höchste Spiegelausschlag für plötzliches Schließen beträgt (Giesecke et al., 2009):

$$z_{\max} = Q_{s,0} * \sqrt{\frac{l_s * A_w}{g * A_s}} \quad (4.3)$$

z_{\max} höchster Spiegelausschlag [m]

$Q_{s,0}$ Durchfluss im Stollen [m³/s]

l_s Stollenlänge [m]

A_w Wasserschlossquerschnitt [m²]

gErdbeschleunigung [m/s²]

Werden Speicherkraftwerke zur Netzregulierung eingesetzt, so müssen Leistungsschwankungen innerhalb kurzer Zeit (Sekunden, Minuten) bewältigt werden. Zu berücksichtigen sind dabei Schaltvorgänge (Lastabwurf oder Lastaufnahme der Turbinen) zu einem ungünstigstem Zeitpunkt, das heißt die Schwingungen im Wasserschloss haben einen kritischen Punkt erreicht. Die Auslegung des Wasserschlosses für Schaltfälle, die in ungünstigen Zeitpunkten aufeinander folgen, ist Voraussetzung für ein Spitzenkraftwerk mit voller Leistung im Regelbetrieb (Seeber, 1970).

4.3.1 *Druckstoß*

Jeder Regelungsvorgang (Öffnen oder Schließen eines Verschlussorgans, Anfahren einer Turbine oder Pumpe oder Lastabfall vom Netz) erzeugt einen Druckstoß, weil sehr schnell eine Veränderung des Durchflusses im Triebwassersystem passiert. Die Reaktion auf die Veränderung des Durchflusses im System sind Druckwellen, die sich mit Schallgeschwindigkeit im Wassermedium abhängig von der Elastizität des Gebirges, des Rohrmaterials und der des Wassers ausbreiten. Die Druckwelle wird an der freien Oberfläche des Wasserschlosses reflektiert. Die Druckwelle wandert danach bis zum Reservoir und wird an der dortigen freien Oberfläche ebenfalls reflektiert. Die Antwortwelle vom Wasserschloss dämpft die gespannte Wassersäule im Druckschacht. Die maximale Druckhöhe des Druckstoßes am Krafthaus ist abhängig von der Laufzeit der Schwallwelle. Ist der Hauptschacht (Steigschacht) des Wasserschlosses direkt mit dem Druckstollen verbunden, wird die Weitergabe der Druckwelle durch die Unterkammern ausgelassen und die Reaktionszeit verringert. (Richter et al., Hybrid modelling and development of a long upper chamber in a surge tank, 2013)

4.3.2 *Stabilitätskriterium*

Neben der Ermittlung der maximalen und minimalen Wasserspiegellagen gehört zur Wasserschlossberechnung auch der Nachweis der ausreichenden hydrodynamischen Stabilität. Das heißt der Querschnitt muss groß genug sein,

damit eine Sicherheit gegen mögliche Resonanzerscheinungen herrscht. Die unter Einwirkung der Regelungsvorgänge entstehenden Schwingungen müssen gedämpft (Stabilität) werden und nicht angefacht (Resonanz) werden (Blind et al., 1987). Daher gilt das sogenannte Thoma-Kriterium (Giesecke et al., 2009) nach (Thoma, 1910):

$$A_{Th} = \frac{Q_{s,0}^2}{2g * A_s} * \frac{l_s}{h_{v,s0} * h_{f,0}} \quad (4.4)$$

A_{Th} minimaler Thoma-Querschnitt [m²]

$Q_{s,0}$ Durchfluss im Stollen [m³]

A_s Querschnittsfläche des horizontalen Zuleitungsdruckstollens [m²]

g Erdbeschleunigung [m/s²]

l_s Stollenlänge [m]

$h_{v,s0}$ Verlusthöhe im stationären Betrieb [m]

$h_{f,0}$ Fallhöhe im stationären Betrieb [m]

Das Thoma-Kriterium besagt, dass der Querschnitt des Wasserschlosses um den Faktor η_{Th} größer als der minimale Thoma-Querschnitt sein muss. Diese Forderung gilt, damit ein stabiles Triebwassersystem entsteht:

$$A_w = \eta_{Th} * A_{Th} \quad (4.5)$$

A_w Wasserschlossquerschnitt [m²]

η_{Th} Sicherheits- oder Vergrößerungsfaktor ($\eta_{Th} = 1,5-1,8$) [-]

4.4 Wasserschlosstypen

Es gibt vier Haupttypen von Wasserschläslern:

- Schachtwasserschloss
- Kammerwasserschloss
- Differentialwasserschloss
- Druckluftwasserschloss

Alle Typen können zusätzlich gedrosselt ausgeführt werden. Die Abbildung 10, die Abbildung 11 und die Abbildung 12 und die geben einen groben Überblick über die Bauformen von Wasserschlössern:

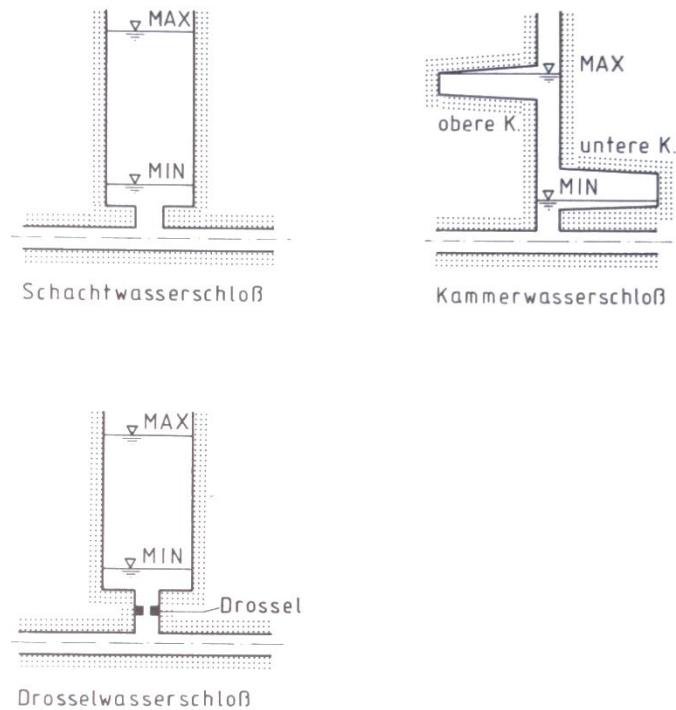


Abbildung 10: Wasserschlössertypen (Prinzipzeichnungen) (Blind et al., 1987)

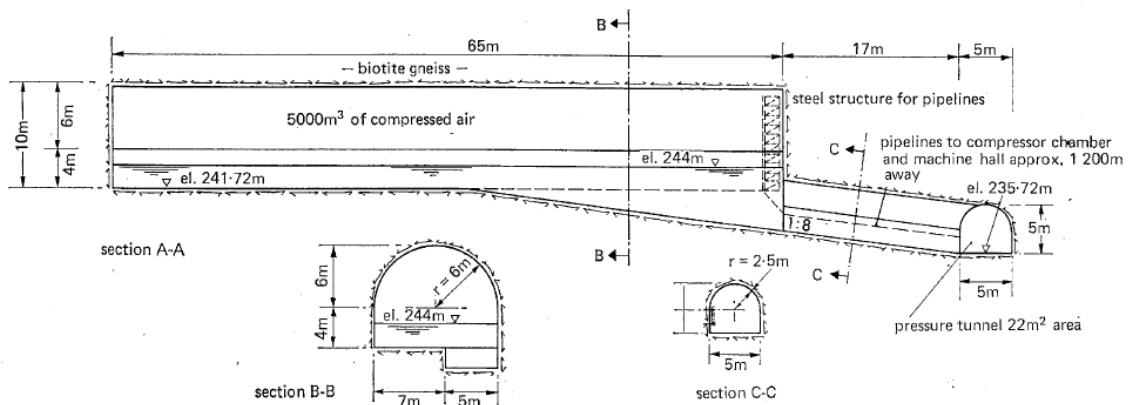


Fig. 4. Final design of the surge facilities at Driva

Abbildung 11: Druckluftwasserschloß (Anlage in Driva, Norwegen), (Rathe, 1975)

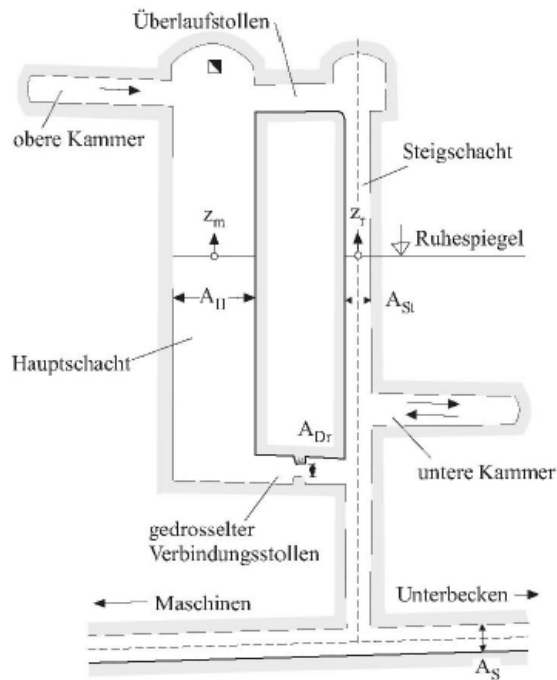


Abbildung 12: Differentialwasserschloss mit getrennter Anordnung von Steigschacht und gedrosselter Kammer (Giesecke et al., 2009)

In Abbildung 12 verhindert die untere Kammer das zu schnelle Ausrinnen des Wasserschlosses und damit das Abfallen der Wassersäule und den möglichen Eintrag von Luft in den Druckstollen.

4.4.1 Schachtwasserschloss

Die einfachste Bauform ist das Schachtwasserschloss. Eine ungehinderte Bewegung der Massenschwingung zwischen dem Schacht und dem Druckstollen passiert, bis diese ausgeschwungen ist. Die Abmessungen des Druckstollens und die des Schachtes sind verantwortlich für die maximalen Ausschläge der Wasserschlossschwingung (Strobl & Zunic, 2006).

4.4.2 Kammerwasserschloss

Beim Kammerwasserschloss wird das maximale Aufschwingen bzw. Absinken des Wasserspiegels limitiert, weil durch die mehreren Wasserschlosskammern ein größeres Volumen zur Aufnahme der Wassermassen geschaffen wird (Blind et al., 1987). Ein Zweikammerwasserschloss besteht aus der sogenannten Ober- und Unterkammer. Eine Anpassung des Wasserschlosses an das Gelän-

de ist möglich. Auch Einsparungen bezüglich der Ausbruchskubatur durch Kombination verschiedener Bauformen sind durchführbar. (Bretschneider et al., 1993) Das Kammerwasserschloss ist ein sogenanntes hohes Wasserschloss und kommt bei großen Schwankungen der Wasserspiegel - im Speicher und folglich auch im Wasserschloss - zum Einsatz (Seeber, 1970).

Nach dem Aufschwingen (Spiegelanstieg) im Wasserschloss fließt das Wasser zum Speicher zurück. Eine volle Lastaufnahme (Zuschalten der Turbinen) zu dieser Zeit bedeutet, dass ein sehr großes Unterkammervolumen erforderlich wird. Damit der Wasserspiegel nicht zu weit absinkt und ein Unterdruck im Druckstollen entsteht. Es ist ein größeres Unterkammervolumen als beim Anfahren aus dem Stillstand notwendig. Für die Unterkammer ergibt sich ein größeres erforderliches Volumen wegen dem Zuschalten beim Rückschwingen des Wassers zum Speicher. Bei der Oberkammer ergibt sich ein großes erforderliches Volumen wegen dem Abschalten der Maschinensätze beim Vorschwingen. Das heißt das Triebwasser bewegt sich gerade in Richtung der Turbinen (Seeber, 1970).

Laut (Seeber, 1970) gibt es folgende Möglichkeiten zur Verringerung des Kammervolumens: Die Wassermenge im Stollen bewegt sich zum Speicher, muss gebremst und in Richtung Maschinensätze beschleunigt werden. In diesem Fall ist mehr Energie notwendig, als zum Beschleunigen aus dem Stillstand. Eine Alternative zur Vergrößerung der Unterkammer ist die Schwingung abzufangen und das Wasser im Wasserschloss zurückzuhalten. Das Zurückschwingen des Wassers zum Speicher wird gedrosselt und somit ist keine Vergrößerung der Unterkammer notwendig.

Eine Überfallmauer als Sperre beim Eintritt in die Oberkammer sorgt für eine bessere Dämpfung der Wasserschlossschwingung. Der maximale Wasserspiegel stellt sich nicht so schnell ein wie beim Differentialwasserschloss nach (Johnson, 1908), da der Wasserschlossschacht aus Stabilitätsgründen einen größeren Durchmesser aufweist. Doch die aufschwingende Wassermasse wird hinter der Überfallkammer gespeichert (Retention) und dann gedrosselt, langsam und eventuell auch durch kleine Durchlässe wieder abgegeben. Das bedeutet, dass das Zurückschwingen der Wassermassen stark gedämpft wird.

Allerdings ist zu gewährleisten, dass die Oberkammer zum Zeitpunkt der Wiederbefüllung bereits komplett entleert ist. Generell ergeben kleine Fallhöhen einen großen erforderlichen Stabilitätsquerschnitt des Schachtes. Das Wasser im Schacht kann eine Gegenschwingung hervorrufen. Neben dem Ausfluss aus der Oberkammer besteht auch die Möglichkeit den Abfluss aus dem Schacht stark zu drosseln, damit keine größere Gegenschwingung passiert. Dies geschieht durch eine möglichst unsymmetrische (asymmetrische) Drossel (Seeber, 1970).

Eine Querschnittsverengung im Fußpunkt (Drossel) führt zu einem schnelleren Aufbau des Gegendruckes und die Massenschwingung wird deswegen effektiver gedämpft (Strobl & Zunic, 2006).

4.4.3 *Differentialwasserschloss*

Beim Differentialwasserschloss steigt das Wasser im schmalen Steigschacht schnell an und deswegen baut sich rasch der Gegendruck auf (Strobl & Zunic, 2006). Nach dem rasanten Anstieg im Steigschacht folgt der Überfall auf das langsam steigende Wasser im Hauptschacht. Dies bedeutet zusätzlich die Abbremsung der Schwingungen im Hauptschacht (Bretschneider et al., 1993).

Das Differentialwasserschloss nach (Johnson, 1908) besteht aus dem Hauptschacht und dem kleineren Steigschacht (ohne Drossel). Der Wasserspiegel bekommt schnell Extremwerte. Das Zurückfließen aus dem Hauptschacht kann gedrosselt werden. Der Wasserspiegel im Steigschacht, der gleich der Drucklinie ist, wird dadurch oberhalb des Stollenniveaus gehalten. Ähnlich verhält sich die Positionierung einer asymmetrischen Drossel zwischen der Unterkammer und dem Steigschacht. Die Drossel hält das Wasser im Hauptschacht zurück und kann schärfer bemessen werden, da bei Lastaufnahme das Wasser unge-drosselt aus der Unterkammer kommt. Ein Belüftungsschacht verhindert das Abreißen der Wassersäule in der Unterkammer (Seeber, 1970).

4.4.4 Druckluftwasserschloss

Eine andere Bezeichnung für das Druckluftwasserschloss ist Windkessel. Dieser kommt vor allem bei Trinkwasserversorgungssystemen zum Einsatz. Der Kessel ist im Allgemeinen luftdicht abgeschlossen. In Norwegen sind Druckluftwasserschlösser in großen Hochdruckwasserkraftanlagen seit den 1970-iger Jahren in Betrieb.

Besonders die Baukosten und Ausbruchsmassen sind bei der Wahl des Wasserschlösstyps ein wichtiger Faktor. Alle Arten von Wasserschlössern müssen eine ausreichende Belüftung und Entlüftung haben. (Blind et al., 1987) Die Be- und Entlüftung dient zur Sicherstellung eines freien Wasserspiegels. Des Weiteren ist ein Überschwappen von Wasser am Be- und Entlüftungsbauwerk im Zuge eines Aufschwingvorganges im Wasserschloss zu verhindern.

4.5 Anforderungen an Wasserschlösser in der derzeitigen Situation am europäischen Strommarkt

Derzeit sind in den Alpen einige Pumpspeicherprojekte in Bau bzw. in Planung. In Zeiten von Stromüberschuss kann damit die Energie gespeichert werden. Das heißt es wird Wasser in den höher liegenden Speicher gepumpt. Bei Strommangel werden die Turbinen zugeschaltet und es wird Strom erzeugt. Pumpspeicherkraftwerke sind daher wichtige Betriebsanlagen für das europäische Strom-Verbundnetz. Diese können innerhalb kurzer Zeit regelnd eingreifen. Die folgenden Beispiele PSKW Kopswerk II und PSKW Malta verdeutlichen dies:

Um bestmöglich auf Verbrauchsspitzen und Netzschwankungen reagieren zu können wurde bei der Konzipierung des Kopswerks II großes Augenmerk auf schnelles Anfahren der Turbinen gelegt. Eine Dauer von nur 20 Sekunden für das Hochfahren der Leistung von 0 auf 100 Prozent wurde vom Betreiber gefordert. (Wegeler & Gerstner, 2008)

Beim Pumpspeicherkraftwerk Malta werden bis zu 6-mal in der Stunde die Pumpen angefahren, um regelnd auf Schwankungen im Netz zu reagieren. (Bauer, 2014)

Dies bedeutet, dass für jede Kraftwerksanlage individuelle Wasserschlosstypen konstruiert werden. Insbesondere auch im Hinblick der stets speziellen geometrischen Zugänglichkeiten und geologischen Gegebenheiten.

4.5.1 *Große Volumen:*

Neue (geplante, bzw. in Bau befindliche) Pumpspeicheranlagen haben oft einen sehr hohen Ausbaudurchfluss. Der hohe Durchfluss bedeutet, dass Wasserschläsler mit einem größeren Volumen benötigt werden. Dies hängt auch von der Länge des Druckstollens ab. Ein viel größerer Durchfluss im Vergleich zum Ausbaudurchfluss wird durch einen Resonanzlastfall zwischen Speicher und Wasserschloss erzeugt. Der Resonanzdurchfluss entsteht durch spezifisches Schalten der Pumpen und Turbinen während des maximalen Durchflusses im Triebwasserweg. Durch den Resonanzschaltfall wird das Wasserschloss dimensioniert. (Richter et al., Hybrid modelling and development of a long upper chamber in a surge tank, 2013)

Der Anstieg der Durchflussmenge bedeutet auch den größeren Einfluss von sekundären Effekten auf das Fließverhalten des Wassers in Wasserschläslern. Diese Effekte sind: Interaktion von Wasser und Luft, Schwallwellen in den Kammern und verstärkt die Wirkung des Differentialeffekts in der Oberkammer. (Richter et al., Hybrid modelling and development of a long upper chamber in a surge tank, 2013)

4.6 Spezialfall Wasserfall im Wasserschloss mit langer Oberkammer

Dieser Sonderfall kann in einem Kammerwasserschloss mit langer Oberkammer entstehen. Die Oberkammer wird im Zuge des Aufschwingens mit Wasser gefüllt. Beim anschließenden Abspringen teilt sich die Wassersäule an der Überfallkante zwischen Oberkammer und Steigschacht. Das Wasser verbleibt in der Oberkammer und der Wasserspiegel im Schacht sinkt inzwischen. Das

zurückgebliebene Oberkammerwasser fällt nun wie ein Wasserfall in den Steigschacht. Die Strahlen des Wasserfalls bringen Luftblasen in den Wasserkörper des Steigschachts ein. Wird die Unterkammer durchflossen, und ist diese ausreichend lang, so kann eine ausreichende Entgasung des Luft-Wasser-Gemisches stattfinden. Dieser Differentialeffekt der Oberkammer entsteht durch die Separation der Wassersäule am Oberkammerüberfall. Dadurch ergibt sich ein positiver Dämpfungseffekt auf die Massenschwingung (Richter et al., Hybrid modelling and development of a long upper chamber in a surge tank, 2013). Falls die Unterkammer nicht durchflossen wird, ist die Lufteindringtiefe im Steigschacht zu untersuchen.

Die Abbildung 13 zeigt den Spezialfall Wasserfall beim Modellversuch Krespa im Wasserbaulabor der TU Graz. Zu sehen ist der Überfallbereich von der Kopfkaverne in den Wasserschlosssteigschacht.

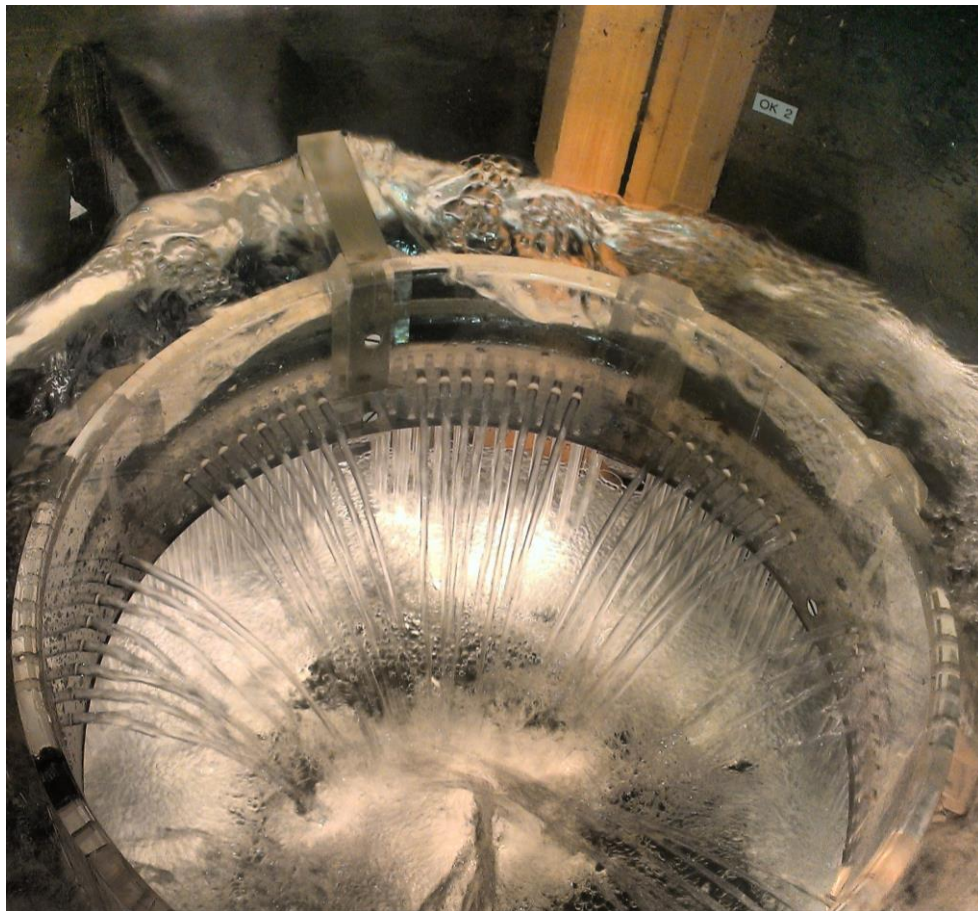


Abbildung 13: Wasserfall - Überfallbereich in der Kopfkaverne im Modellversuch Krespa

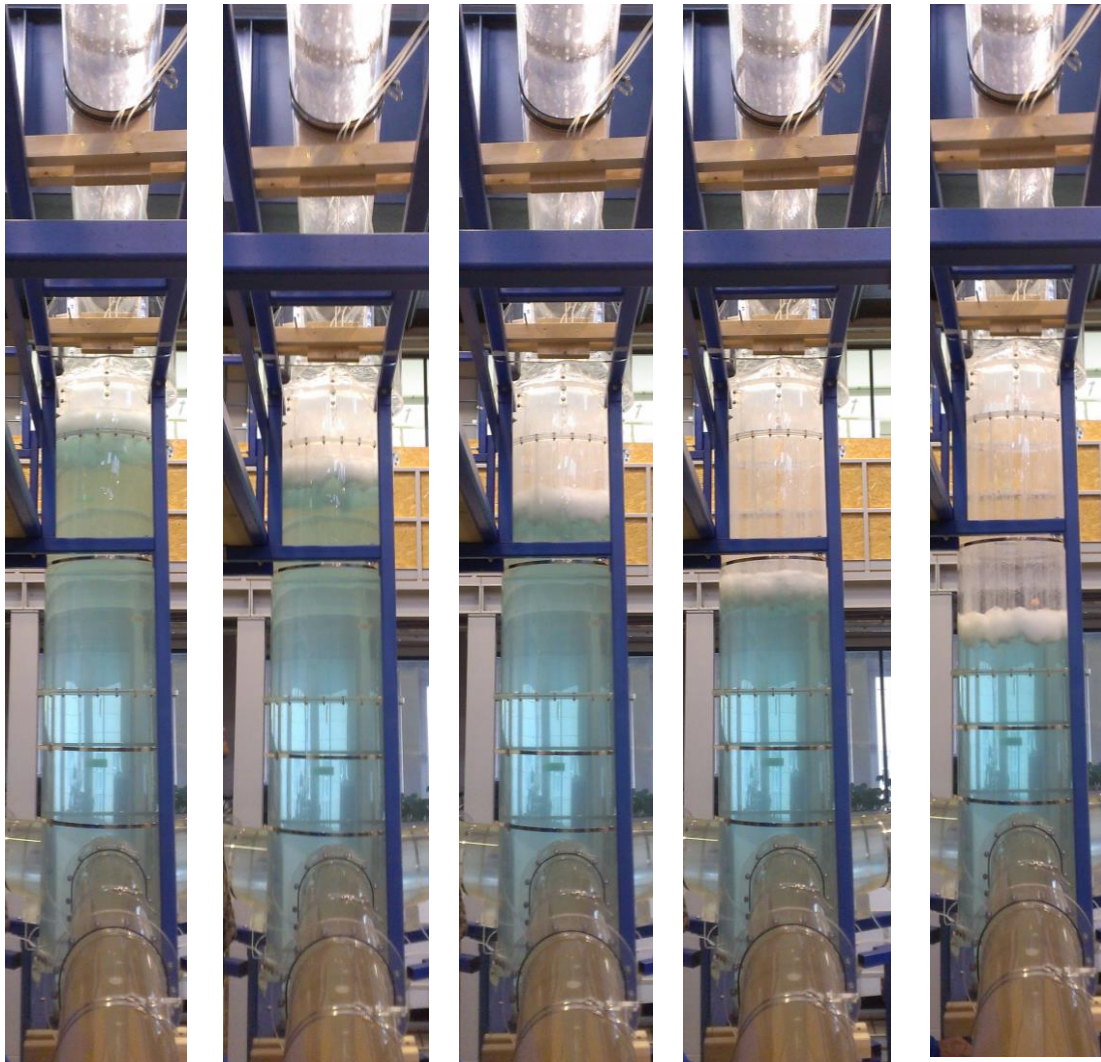


Abbildung 14: Bildfolge Wasserfall Modellversuch Krespa

In Abbildung 14 wird der Wasserfall in den Steigschacht mit einer Bildfolge veranschaulicht. Es zeigt sich eine konstante Lufteindringtiefe im Modell. Im Zuge des Anstiegs des Wasserspiegels wegen des Aufschwingens im Wasserschloss wird die Oberkammer durchflossen. Das Wasser wird am Ende der Oberkammer reflektiert und fließt wieder in Richtung des Steigschachtes zurück. Aufgrund der großen Länge (311 m im Prototyp) der Oberkammer ist bei gewissen Lastfällen der Wasserspiegel im Steigschacht bereits abgesunken, wenn das in der Oberkammer reflektierte Wasser an der Überfallkante ankommt. Es entsteht dadurch der Wasserfall. Der Wasserspiegel im Steigschacht sinkt nach unten, das Wasser aus der Oberkammer fällt in den Steigschacht.

4.7 Modellversuch Krespa

Im Zuge der Planungsphase für das Pumpspeicherprojekt Obervermuntwerk II wird das zugehörige Wasserschloss Krespa am Wasserbaulabor der TU Graz mittels eines Modellversuchs untersucht.

Der Modellversuch Krespa wird nach dem Froude'schen Ähnlichkeitsgesetz im Maßstab 1:30 errichtet. Die instationären Strömungsvorgänge und die Darstellung der Massenschwingung werden simuliert.

Für die Untersuchungen gibt es folgende Lastfälle:

- Oberkammerlastfall, Stauziel im oberen Speicherbecken.
- Unterkammerlastfall, Absenkziel im oberen Speicherbecken.

Für beide Lastfälle werden jeweils Resonanzschaltfälle mit spezifischen Zeitpunkten für das Ein- und Ausschalten der Pumpen und Turbinen gefahren, um ein Maximum der Beschleunigung im Druckstollen zu erreichen. (Richter et al., Hybrid modelling and development of a long upper chamber in a surge tank, 2013)

4.7.1 Bemessungslastfall für den Wasserfall aus der Oberkammer

Um die Situation des Wasserfalls aus der Oberkammer in den Steigschacht untersuchen zu können, wird der maßgebende Wasserfall-Lastfall ermittelt: Das Wasser wird am Belüftungsgebäude der Oberkammer reflektiert und stürzt anschließend in den Steigschacht ab. Die Fallhöhe des Wasserfalls beträgt 3 m, der maximale Durchfluss etwa 80 m³/s. Der maßgebende Bemessungslastfall für den Wasserfall entsteht durch einen Resonanzschaltfall bei einem Wasserspiegel von 2025 müA. im Speicher Silvretta. Das Aufschlagen des Wasserfalls auf den Wasserspiegel im Steigschacht bedeutet den Eintrag von Luftblasen. Es werden 3D-numerische Berechnungen angestellt, um die maximale Lufteintragstiefe über den Jet im Wasserpolster zu berechnen. Die Geschwindigkeit im Steigschacht wurde ermittelt und mit der Aufstiegs geschwindigkeit (ca. 0,2 m/s) von Luftblasen verglichen. Dies geschieht deswegen mittels numerischer Simulation, weil in einem Froude Modell der Luftblasenaufstieg nicht maßstabsgetreu dargestellt wird. Der Blasen aufstieg findet im Modell zu schnell statt, deswegen

wird die Lufteintragstiefe für den Prototyp unterschätzt (Richter et al., Hybrid modelling and development of a long upper chamber in a surge tank, 2013). Die Geschwindigkeit des Wasserfalls am Eintrittspunkt in den Wasserkörper im Steigschacht ergibt sich aus der nachfolgenden Formel (Torricelli-Formel). Für die gerade beschriebenen Randbedingungen ergibt sich v zu 7,70 m/s.

$$v = \sqrt{2gH} \quad (4.6)$$

vEindringgeschwindigkeit [m/s]

gErdbeschleunigung [m/s²]

HFallhöhe [m]

Die eben beschriebenen Beobachtungen am Modellversuch Krespa kommen zu folgendem Ergebnis: Der Einfluss der Unterkammern auf den Entgasungsprozess kann vernachlässigt werden. Ein Dämpfungselement für den Wasserfall und die Aufweitung des Kopfes des Steigschachts werden eingeführt. Die Lufteintragstiefe des Wasserfalls konnte mit dem Dämpfungselement um ein Drittel verringert werden. (Richter et al., Hybrid modelling and development of a long upper chamber in a surge tank, 2013)

4.7.2 Dämpfungselement für den Wasserfall aus der Oberkammer

Das Dämpfungselement (Abbildung 18) besteht aus einem Betonring (Balkonbrüstung) und einer Bodenplatte (Balkonboden) mit zylindrischen Aussparungen. Die Aussparungen haben einen Durchmesser von 0,18 m. Davon sind 368 Stück im Balkonboden und 64 Stück in der Balkonbrüstung angeordnet (Zenz et al., 2014). Durch die Balkonbrüstung wird das Wasser im Zuge des Ausflussvorgangs aus der Oberkammer zurückgehalten. Die Durchlässe stellen einen verzögerten Abfluss in den Steigschacht sicher. Dadurch wird die Wasserschlossschwingung gedämpft und der Wasserfall in den Steigschacht wird abgeschwächt, d.h. die Fließgeschwindigkeit nimmt ab. Dadurch wird die Lufteintragstiefe im Steigschacht kleiner.

Die Abbildung 15 und die Abbildung 16 zeigen das eben beschriebene Dämpfungselement in der Draufsicht und im Schnitt:

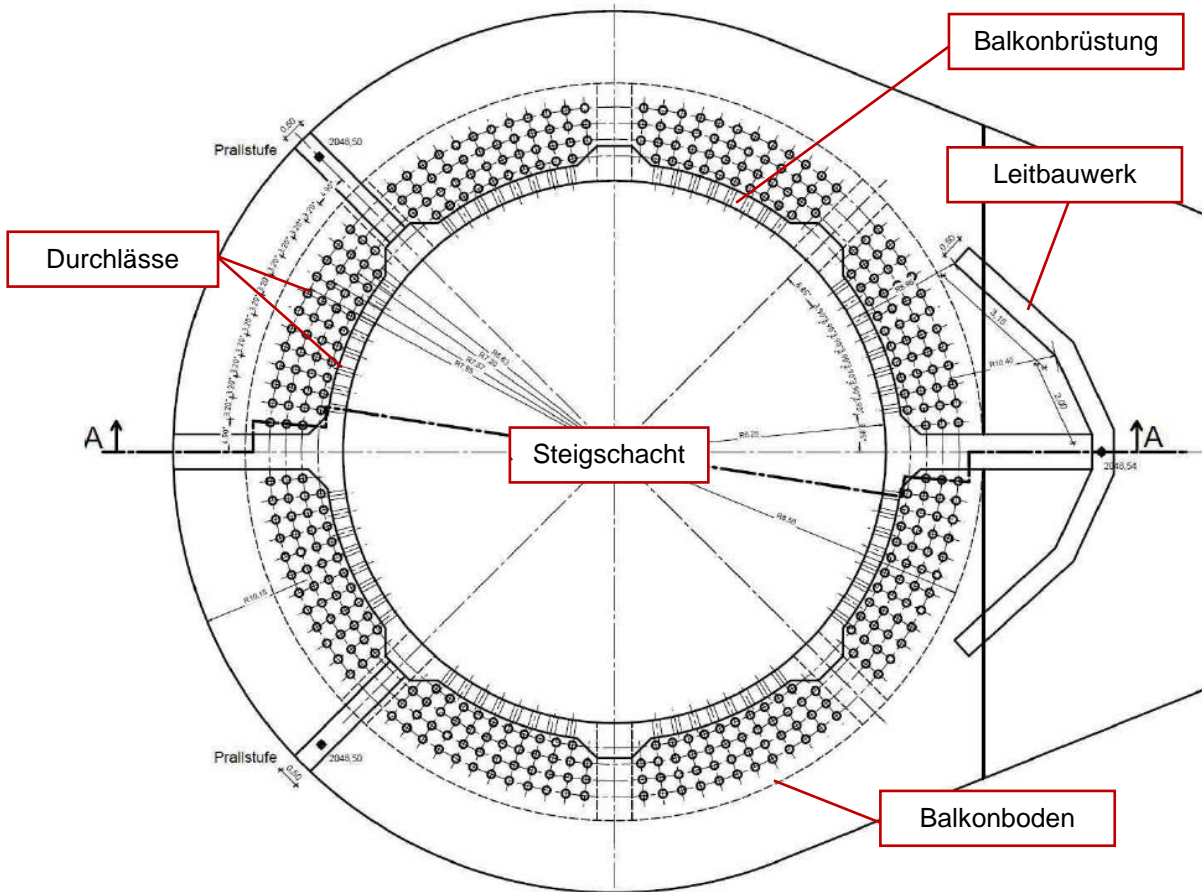


Abbildung 15: Dämpfungselement in der Draufsicht (Zenz et al., 2014)

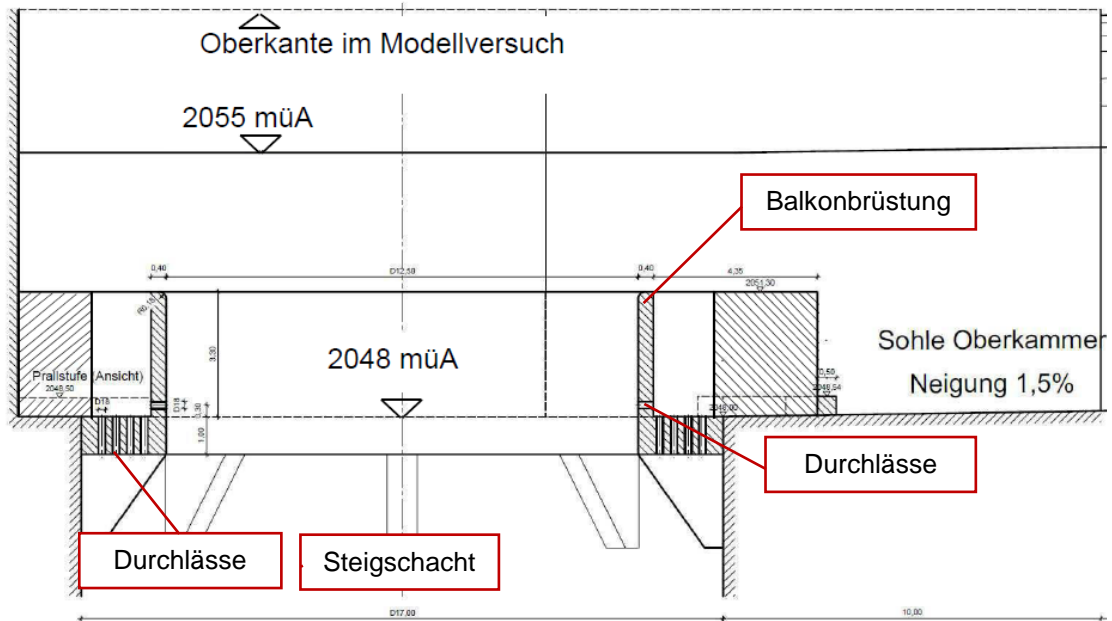


Abbildung 16: Schnitt A-A: Kopfkaverne mit Balkon und Lochdurchbrüchen (Zenz et al., 2014)

4.7.3 Fotos vom Modellversuch

Die folgenden Abbildungen zeigen den Modellversuch Krespa im Wasserbaulabor der TU Graz:

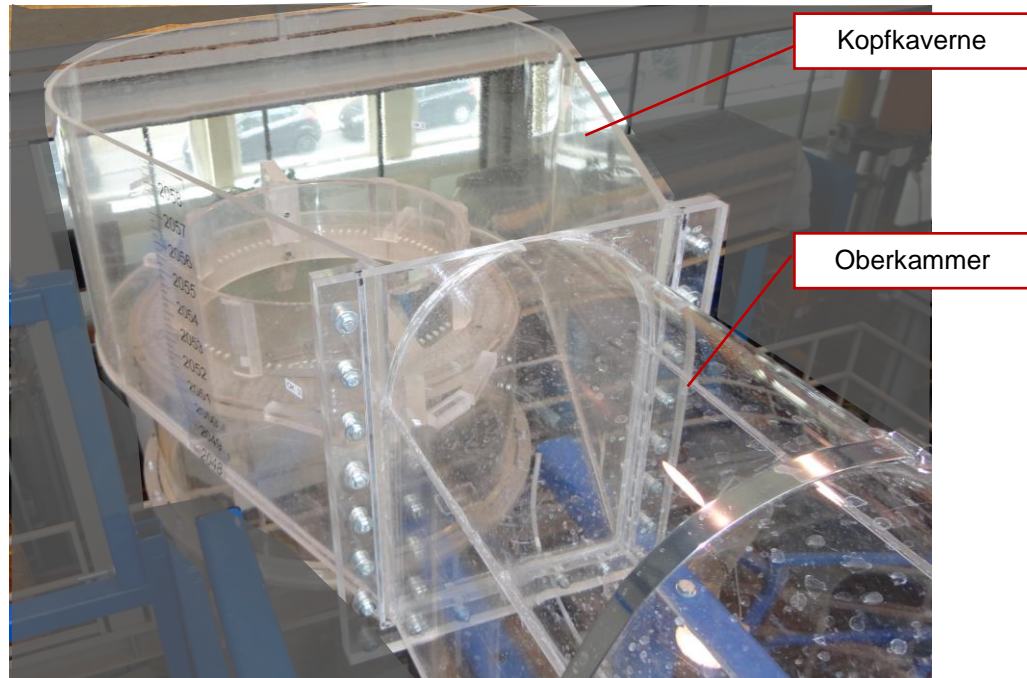


Abbildung 17: Übergang Oberkammer zur Kopfkaverne

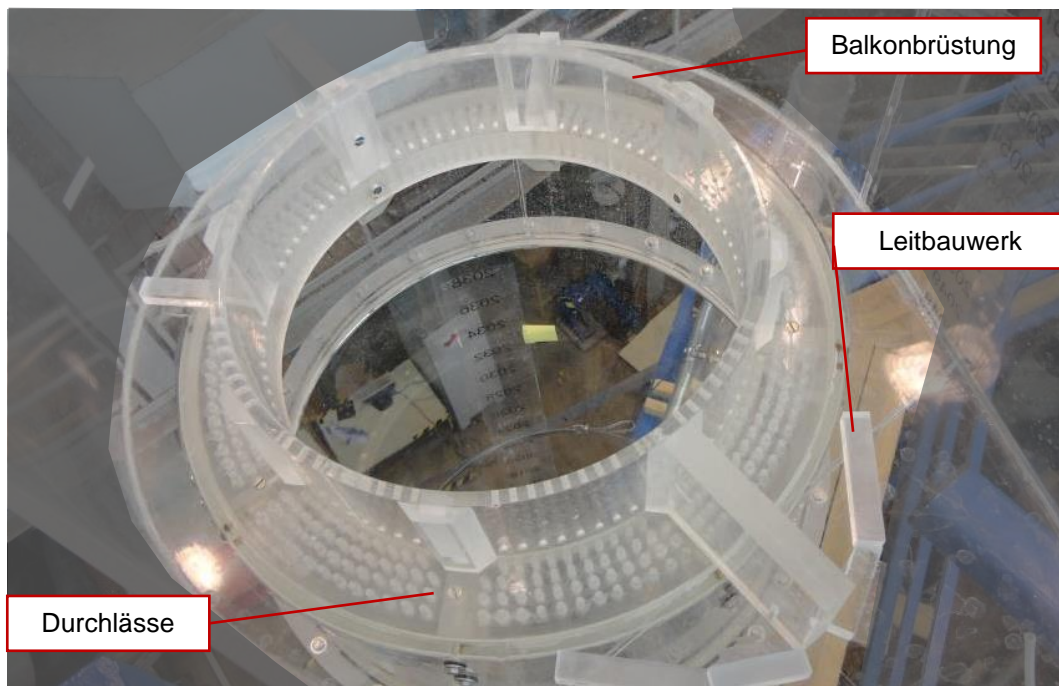


Abbildung 18: Dämpfungselement am Übergang der Kopfkaverne in den Steigschacht

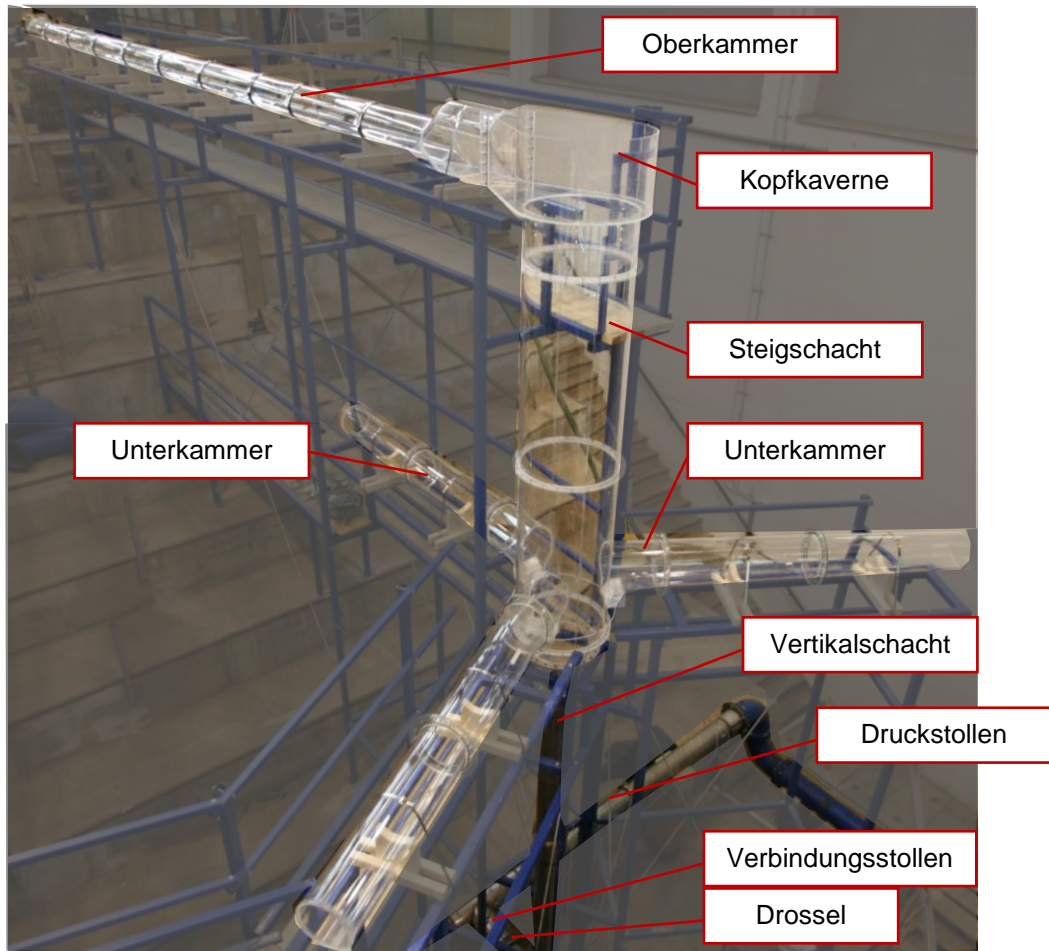


Abbildung 19: Modellversuch Krespa (Foto TU Graz, Richter W.)

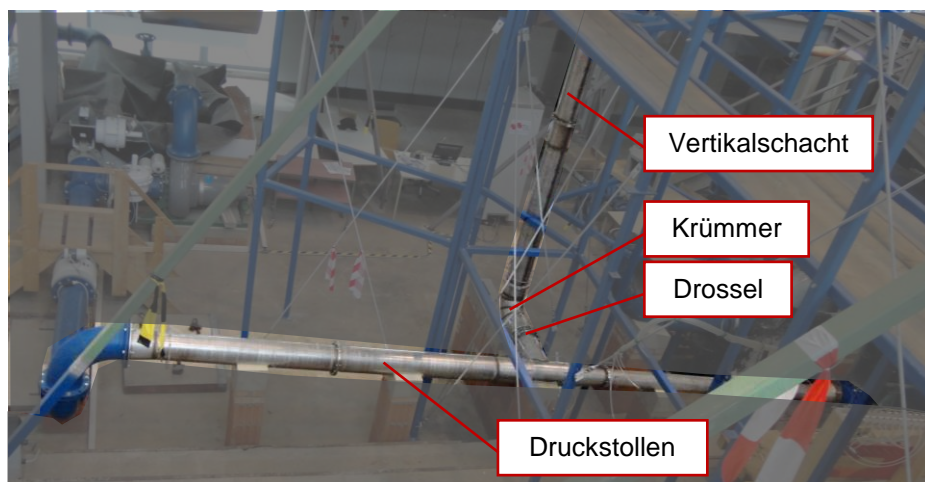


Abbildung 20: Druckstollen mit Abzweigung ins Wasserschloss

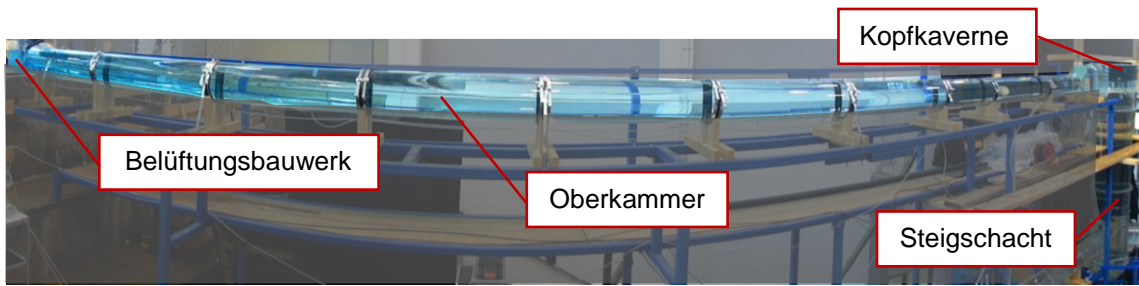


Abbildung 21: Oberkammer

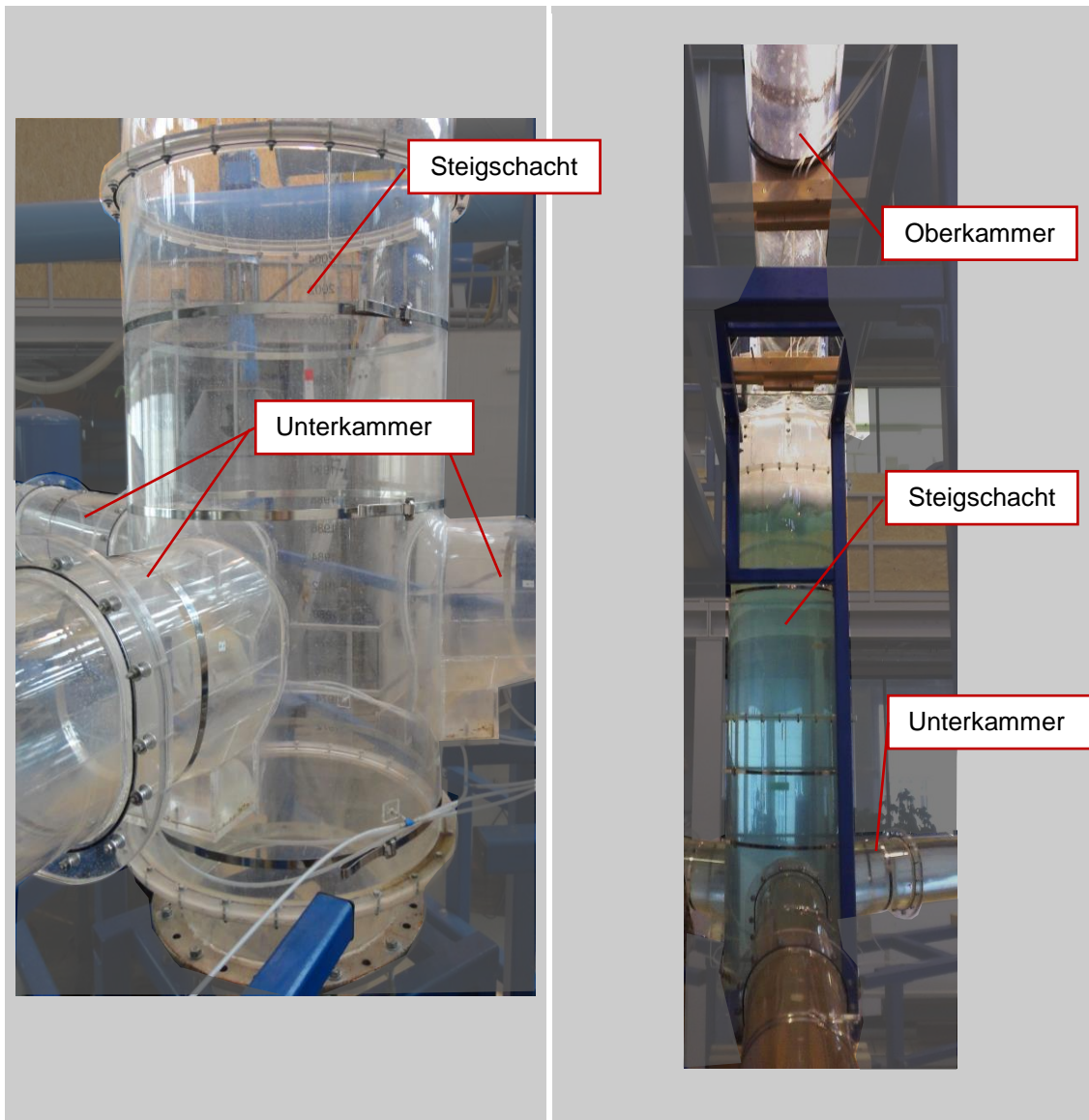


Abbildung 22: links Detail Steigschacht mit den drei abzweigenden Unterkammern, rechts Bild: Steigschacht gesamt

5. Lufteintragstiefe in der Literatur

Der Begriff maximale Lufteintragstiefe wird definiert und zwei Berechnungsmöglichkeiten für die maximale Lufteintragstiefe aufgrund eines Fallstrahls werden erläutert.

5.1 Maximale Lufteindringtiefe

Liegt die Geschwindigkeit des Fallstrahls an der Auftreffstelle über der kritischen Geschwindigkeit, so ist das Ansaugen des Strahls im Bereich des Eindringpunkts stark genug, um die Kapillarkräfte zu übertreffen. Luft wird nun in die Auffangflüssigkeit (Wasser) eingetragen. Der eingetauchte Strahl bildet Wirbel und die miteingetauchten Luftblasen werden in axiale und radiale Richtung bewegt. Nach der Aufnahme der Bubbles durch die Strömung und dem Transport, werden die Blasen größer bis sich ein Gleichgewicht zwischen Aufteilen und Vereinigen der Lufteinschlüsse entsteht. Die Luftblasen sinken ab und erzeugen dadurch Reibungskräfte. Die größte Eindringtiefe wird an der Stelle erreicht, wo die Auftriebskraft den Jetimpuls aufhebt (Abbildung 23:). Die Blasen steigen anschließend wieder nach oben. Die maximale Eindringtiefe wird als die Tiefe definiert, wo diese Fließumkehr passiert (Clanet & Lasheras, 1997).

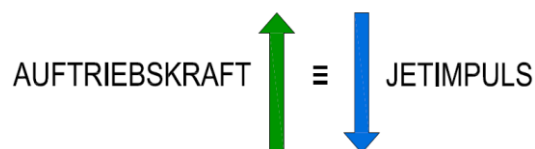


Abbildung 23: Gleichgewicht aus Jetimpuls und Auftriebskraft

Dieser Vorgang wird in Versuchen beobachtet. Ein großes Spektrum an eingebrachten Luftblasen steigt an dieser Stelle nach oben, kleinere Luftblasen werden in noch tiefere Lagen des Behälters transportiert. Die Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen hängt nur von der Dichte und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit ab und ist unabhängig von den Parametern des eindringenden Strahls. Ihr Minimum liegt bei 0,22 m/s (Clanet & Lasheras, 1997).

Die Aufstiegsgeschwindigkeit für Luftblasen ist nahezu konstant und pendelt sich zwischen 0,25 m/s und 0,3 m/s ein. Dieses Ergebnis basiert auf umfangrei-

chen Versuchsreihen in Süß- und Mehrwasser (Chanson et al., 2002). In Untersuchungen von (Arch, 2008) wurden durchschnittliche Aufstiegs- geschwindigkeiten von ca. 0,19 m/s ermittelt. Nach (Kobus, 1991) kann von einer Aufstiegs- geschwindigkeit von ca. 0,20 m/s ausgegangen werden.

5.2 Berechnungsmöglichkeiten für die maximale Lufteintragstiefe

Zwei Verfahren für die Berechnung der Luftblaseneindringtiefe werden näher betrachtet. Das Verfahren nach Clanet & Lasheras hat Versuche mit sehr klei- nen Durchmessern der Fallstrahlen als Grundlage. Ervine & Falvey hatten Ver- suche an Großmodellen als Basis für ihr Diagramm zur Bestimmung der Luft- blaseneindringtiefe.

5.2.1 Nach Clanet & Lasheras

Die Beziehung für die maximale Lufteindringtiefe durch einen Fallstrahl in ein Auffangbecken nach (Clanet & Lasheras, 1997) lautet:

$$\frac{H}{D} = \frac{1}{2 \tan \alpha} * \frac{V_0}{U_t} \quad (5.1)$$

$$\frac{H}{D} = \frac{1 + \tan \alpha}{2 \tan \alpha} * \frac{V_0}{U_t} \quad (5.2)$$

H Luftblaseneindringtiefe [m]

D Durchmesser des Fallstrahls beim Eintauchen [m]

α Öffnungswinkel des Strahls 12,5°

v_0 Geschwindigkeit des Jets beim Auftreffen [m/s]

u_t Aufstiegs- geschwindigkeit der Luftblasen [m/s]

Die Gleichung 5.1 gibt die mittlere Standartluftblaseneindringtiefe von Luftbla- sen an. Die Gleichung 5.2 berücksichtigt bei der Lufteindringtiefe zusätzlich noch die Fluktuation einzelner Luftblasen.

5.2.2 Diagramm nach Ervine & Falvey

(Ervine & Falvey, 1987) beschreiben die maximale Lufteindringtiefe durch einen Fallstrahl in ein Auffangbecken mittels eines Diagramms.

Dabei wird auf der Abszisse das Verhältnis aus Strahleindringgeschwindigkeit und Luftblasenaufstiegsgeschwindigkeit aufgetragen. Auf der Ordinate befindet sich das Verhältnis aus Luftblaseneindringtiefe und dem Durchmesser des eindringenden Fallstrahls. Weiters wird im Diagramm noch zwischen zwei verschiedenen großen seitlichen Ausbreitungen der Luftblasen im Pool unterschieden. Diese beiden Ausbreitungen resultieren aus Versuchsergebnissen.

Abbildung 24 zeigt das eben beschriebene Diagramm zur Ermittlung der Luftblaseneindringtiefe:

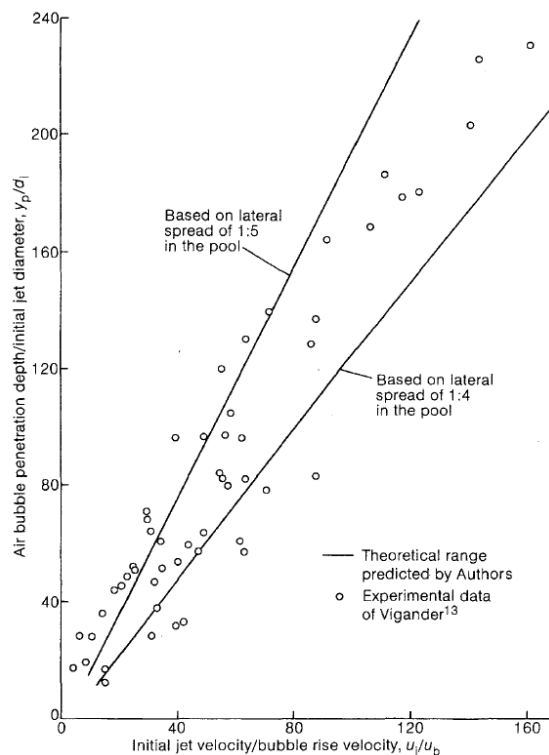


Abbildung 24: Lufteindringtiefe in einen Pool (Ervine & Falvey, 1987)

y_p Eindringtiefe der Luftblasen im Auffangbecken [m]

d_i Durchmesser des Fallstrahls an der Eintrittsstelle [m]

u_i Eindringgeschwindigkeit des Fallstrahls [m/s]

u_b Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen [0,25 m/s]

5.2.3 Vergleich der Methoden nach Ervine & Falvey und Clanet & Lasheras

Die Tabelle 2 zeigt den Vergleich der beiden Berechnungsmethoden. Für eine Fallhöhe von 4,10 m und einen Strahldurchmesser von 0,18 m wurde maximale Lufteindringtiefe mit beiden Verfahren bestimmt. Nach (Clanet & Lasheras, 1997) ergibt sich eine maximale Lufteindringtiefe von 22,30 m. Das Diagramm nach (Ervine & Falvey, 1987) liefert eine maximale Lufteindringtiefe von 17,60 m.

Tabelle 2: Vergleich der Berechnungsmethoden für die maximale Lufteindringtiefe

Eindringtiefe von Luftblasen im Steigschacht vom Wasserschloss Krespa (Clanet et al.)						
Öffnungswinkel des Strahls	α	12,5	°			
Öffnungswinkel des Strahls	α	0,218	rad			
Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen	u_t	0,2	m/s			
Durchmesser des Fallstrahls beim Eintauchen	D	0,18	m	$\frac{H}{D} = \frac{1}{2 \tan \alpha} * \frac{v_0}{u_t}$	$\frac{H}{D} = \frac{1 + \tan \alpha}{2 \tan \alpha} * \frac{v_0}{u_t}$	
Fallhöhe Wasserfall	h_f	4,1	m			
Geschwindigkeit des Jets beim Auftreffen	v_0	9,0	m/s	Eindringtiefe Blasen Standard	Eindringtiefe Blasen m. Fluktuation	
				m	m	
				18,27	22,32	
$v_0 = \sqrt{2gh_f} = \sqrt{2 * 9,81 * 2,1} = 6,42 \text{ m/s}$				H =		
Eindringtiefe von Luftblasen im Steigschacht vom Wasserschloss Krespa (Ervine et al.)						
v_0/u_t	45	-				
H/D	98	-				
H	17,64	m				
H... Eindringtiefe der Blasen						

5.2.4 *Diskussion*

Die Gleichungen von (Clanet & Lasheras, 1997) entstanden aus einer Versuchsreihe mit sehr kleinen Fallstrahldurchmessern im Labor. Es wurde bei mehreren Fallstrahlen mit Durchmessern von 0,2 mm bis 2,2 mm die Lufteindringtiefe in einen Pool gemessen. Das Verhältnis aus Fallhöhe und Strahldurchmesser wurde dabei stets konstant gehalten. Die Beziehung maximale Luftblaseneindringtiefe zu Tiefe des Pools wurde kleiner 0,35 [-] gehalten, um keine Einflüsse der Poolumrandung auf die Ergebnisse zu bekommen.

Das Diagramm von (Ervine & Falvey, 1987) hat als Grundlage ebenfalls Laborversuche mit Fallstrahlen. Jedoch sind die Strahldurchmesser (50 bzw. 100 mm) und die Jetgeschwindigkeiten größer als vorhin. Zusätzlich beinhaltet das Diagramm noch Versuchsergebnisse aus Naturmessungen von (Vigander, 1984) und ist daher besonders wertvoll und interessant.

Zusammenfassend gilt: Die größte Eindringtiefe der Luftblasen ist erreicht, wenn ein Gleichgewicht aus Absinkgeschwindigkeit und Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen herrscht. Die maximale Eindringtiefe lässt sich mit den Berechnungsformeln von (Clanet & Lasheras, 1997) oder dem Diagramm von (Ervine & Falvey, 1987) bestimmen.

6. Particle Image Velocimetry

Das folgende Kapitel gibt eine grundsätzliche Einführung in das Messverfahren Particle Image Velocimetry (PIV). Die theoretischen Grundlagen dieser Geschwindigkeitsmessung werden erläutert und die einzelnen Komponenten der PIV Messung werden erklärt. Die Sicherheitsvorkehrungen bezüglich der Verwendung eines gepulsten, hochenergetischen Laserstrahls werden ebenfalls thematisiert.

6.1 Allgemeines

Die Particle Image Velocimetry (PIV) ist ein optisches Verfahren, um unmittelbar ein Feld an Geschwindigkeitsvektoren einer 2D-Ebene in einer Flüssigkeitsströmung zu erhalten. Es kommen Tracer-Partikel in die Strömung um die Geschwindigkeit indirekt messen zu können. (Dobler, 2012)

Die Geschwindigkeitsfelder von strömenden Medien können mittels PIV-Verfahren vermessen werden. Es wird dabei eine zweidimensionale Ebene aufgenommen. Es besteht jedoch auch die Option mit zwei simultan arbeitenden PIV-Systemen ein dreidimensionales Geschwindigkeitsfeld zu untersuchen. Geschwindigkeiten von ein paar Zentimeter pro Sekunde bis zur Schallgeschwindigkeit können mit der PIV aufgezeichnet werden. Ausgedehnte Bereiche der zu untersuchenden Strömung können in nur einer Messung durch eine große räumliche Auflösung beobachtet werden. Die Geschwindigkeitsfelder stehen sofort nach der Messung zur Weiterverarbeitung zur Verfügung. Die PIV wird in sehr vielen Bereichen der Hydromechanik eingesetzt (Link, 2006).

Laut (Prasad, 2000) lassen sich die Bestandteile eines PIV-Messsystems auf vier Basiskomponenten zusammenfassen:

- transparenter Beobachtungsabschnitt der Strömung mit ihren Partikeln (Seeding)
- Beleuchtungseinheit: Aufhellung des Beobachtungsabschnitts mit einer Lichtquelle (meist Laser)
- Aufnahmeausrüstung (CCD-Kamera)

- Computer mit geeigneter Software zur Verarbeitung der aufgenommenen Daten und zur Generierung der Geschwindigkeitsfelder

Die folgende Abbildung zeigt den typischen Aufbau der Basiskomponenten einer PIV-Anlage und deren Funktionsweise:

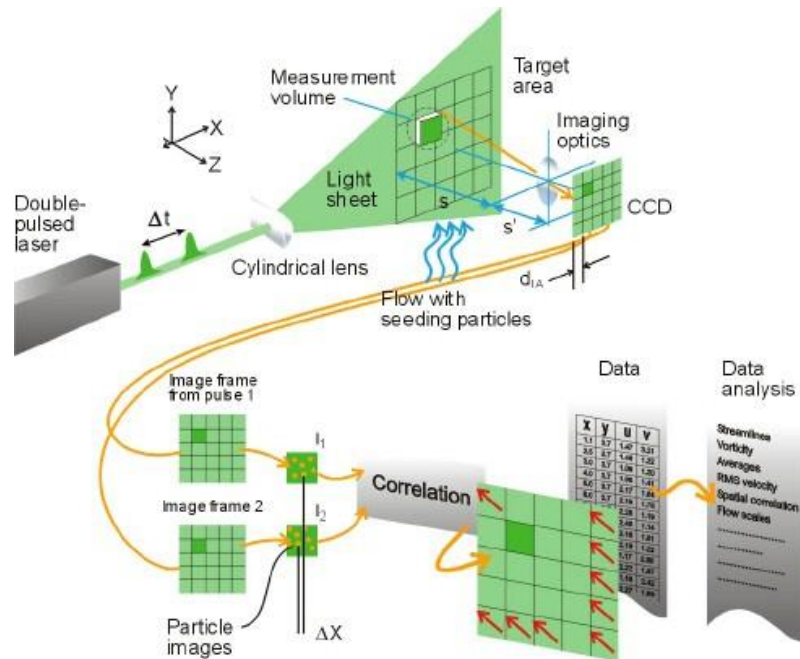


Abbildung 25: schematische Darstellung einer PIV-Anlage (Dantec Dynamics, 2014)

6.2 Messprinzip

Um das Geschwindigkeitsfeld in der 2-D Fläche, aufgespannt vom PIV Laser, ermitteln zu können, sind kleine Partikel (Seeding) notwendig. Entscheidend ist das Verhalten des Seedings, weil die PIV nicht die Geschwindigkeit der Strömung, welche die Partikel trägt, misst. Es wird die Geschwindigkeit der Partikel selbst bestimmt. Die Geschwindigkeitsverzögerung (Schlupf) ist abhängig von der Größe und Dichte der Partikel. (Dobler, 2012)

Die Tracer Partikel müssen der Strömung ideal ohne Schlupf folgen. Ist dies der Fall, so entspricht die Geschwindigkeit des Seedings der Geschwindigkeit der Flüssigkeit. Der Versatz Δx der Partikel während einer bestimmten Zeit Δt ist die Grundlage für die Ermittlung des Geschwindigkeitsfeldes der Strömung. Die Momentangeschwindigkeit des strömenden Mediums lässt sich berechnen (Link, 2006):

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (6.1)$$

u Momentangeschwindigkeit des Mediums [m/s]

Δx Versatz der Partikel [m]

Δt Zeitdistanz [s]

Die Tracer Partikel müssen sichtbar gemacht werden. Dafür werden gepulste Laser eingesetzt. Der Laserstrahl wird aufgeweitet und so entsteht die Laserlichtschnittebene bzw. Lichtschnittebene. Durch die Aufweitung ist es möglich einen Ausschnitt einer scharf begrenzten Fläche zu beleuchten.

Um die Geschwindigkeit einer Strömung bestimmen zu können, muss der Versatz der Tracer Partikel gemessen werden. Zwei belichtete Bilder der zu untersuchenden Strömungsebene werden aufgenommen. Eine digitale CCD-Kamera nimmt die beiden Bilder im zeitlichen Abstand Δt auf. Auf den Bildern lassen sich Muster erkennen, das belichtete Seeding ist sichtbar. Beide Bilder werden in Interrogation-Areas unterteilt. Das sind kleine quadratische Bildausschnitte, die für die Ermittlung der quantitativen Bewegung der Partikel notwendig sind. Ein Algorithmus vergleicht nun zusammengehörige Interrogation-Areas. Diese sind auf beiden Bildern auf denselben Positionen. Die Güte der Übereinstimmung beider Muster für verschiedene Verschiebungen wird gespeichert. Wo die Übereinstimmung der beiden Muster am besten ist, wird die Verschiebung Δx als richtige erkannt (Link, 2006).

Eine Highspeed Kamera nimmt von der Partikelströmung zwei Bilder auf. Die Strömung ist durch die Laserlichtebene aufgehellt, dadurch ist das Seeding sichtbar. Die Fotos werden an zwei verschiedenen, sehr kurzaufeinander folgenden Zeitpunkten t_i und t_{i+1} aufgenommen. Mit den zwei Fotos wird eine Kreuzkorrelation für jede Interrogation-Area (I_1 und I_2) durchgeführt. Ein Geschwindigkeitsvektor wird für jede Interrogation-Area berechnet und mit den Vektoren aller Interrogation-Areas entsteht das Geschwindigkeitsvektorenfeld (Dobler, 2012).

6.3 Korrelation

Bei der auf Korrelation basierenden Particle Image Velocimetry wird die durchschnittliche Bewegung von kleinen Gruppen aus Partikeln bestimmt. (Prasad, 2000)

Die Korrelation ist die Beziehung zwischen zwei Zufallsgrößen (\underline{x} , \underline{y}). Der Korrelationskoeffizient $\rho(\underline{x}, \underline{y})$ gibt an, wie stark dieser Zusammenhang zwischen den beiden Zufallsgrößen ist (Helmberg & Wagner, 2005).

$$\rho(x, y) = \frac{cov(x, y)}{\sigma(x) * \sigma(y)} \quad (6.2)$$

$\rho(\underline{x}, \underline{y})$ Korrelationskoeffizient [-]

$cov(x, y)$ Kovarianz

$\sigma(x)$ bzw. $\sigma(y)$ Standardabweichung

Einzelne Partikel zu verfolgen (tracken) ist kaum möglich, da die zu untersuchende Strömung zu voll mit Partikeln ist. Daher werden Interrogation-Areas eingeführt. Auf dem ersten Foto wird ein größeres Sortiment an Teilchen betrachtet. Am zweiten Foto wird versucht diese Formation an Teilchen wieder zu entdecken. Dies kann mittels des diskreten Kreuzkorrelationsverfahrens durchgeführt werden. *Die Kreuzkorrelation gibt ein Maß für die Übereinstimmung zweier Muster bei einer gegebenen Verschiebung an.* Die Anwendung auf ein Doppelbild ergibt, mit Hilfe der Informationen aus dem Foto und dem Zeitraum zwischen den Aufnahmen, das gemittelte Geschwindigkeitsfeld für die betrachtete Strömungsebene (Schaudel, 2001).

Die Kreuzkorrelation wird für zwei Interrogation-Areas durchgeführt, um den Verschiebungsvektor zwischen der ersten und zweiten Interrogation-Area zu erhalten. Die Korrelation zwischen den zwei Funktionen x und h ist wie folgt definiert:

$$z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\zeta) * h(t + \zeta) * d\zeta \quad (6.3)$$

t Zeit [s]

ζ Ortsveränderung [m]

Die numerische Lösung der Gleichung ist wegen des Multiplikations- und Integrationsvorgangs zeitaufwendig. Als Alternative dazu kommt das Faltungstheorem zur Anwendung: Eine Multiplikation im Frequenzbereich entspricht einer Faltung im Zeitbereich. Die Faltung und die Kreuzkorrelation sind fast identisch. Der einzige Unterschied liegt in der Spiegelung der Funktion. Als nächster Schritt folgt eine zweidimensionale diskrete Fourier-Transformation in den Frequenzbereich für die zwei Interrogation-Areas. Im Frequenzbereich folgen die Multiplikation und dann die inverse, zweidimensionale, diskrete Fourier-Transformation, um das Ergebnis im Zeitbereich zu generieren. Der Verschiebungsvektor zwischen dem Zentrum des Fotos und dem Peak kann mittels Peak-Erkennungs-Algorithmus berechnet werden (Dobler, 2012).

Die Lösung der Kreuzkorrelation ist meist im Softwarepaket einer PIV-Anwendung inbegriffen.

6.4 Tracer-Partikel (Seeding)

Die grundsätzlichen Größen (Weg und Zeit) der Geschwindigkeit werden bestimmt. Es erfolgt nicht die Messung der Geschwindigkeit der Strömung, sondern die der mitbewegten Tracer-Partikel. Es soll kein Unterschied zwischen der Geschwindigkeit der Strömung und der der Tracer-Partikel herrschen. Deswegen müssen die Partikel gewisse Eigenschaften erfüllen. Grob lassen sich diese in strömungsmechanische Eigenschaften und Lichtstreuverhalten einteilen (Schaudel, 2001):

- Das Kriterium für die strömungsmechanischen Eigenschaften ist das Folgevermögen des Seedings, d.h. die Dichte der Partikel muss mit der Dichte der Strömungsflüssigkeit übereinstimmen.
- Für das Lichtbrechverhalten ist ein möglichst kleiner Durchmesser des Seedings erstrebenswert. Ein zu kleiner Durchmesser ist allerdings auch nicht zielführend, da sonst die Lichtstreuereigenschaften zu schwach sind. Generell wird ein Kompromiss aus Folgeverhalten und Lichtstreuverhalten angestrebt (Schaudel, 2001).

Bei den Partikeln für die PIV-Messungen wird zwischen natürlichen und zugegebenen Teilchen unterschieden. Entweder man reichert die Flüssigkeit mit

Partikeln an oder man führt die Geschwindigkeitsmessung mittels der Beleuchtung von bereits natürlich in der Strömung vorhandenem Seeding durch. Künstliches Seeding hat die besseren strömungsmechanischen Eigenschaften (Folgevermögen, Schlupf, wichtig bei Verwindungen), jedoch ist die Zugabe dessen oft aus baulichen Gründen des Modellversuchs nicht möglich.

6.4.1 *Zugegebenes Seeding*

Das Seeding zum Anreichern der zur untersuchenden Strömung muss chemisch inert sein. Das bedeutet, es reagiert nicht mit potentiellen Reaktionspartnern. Es werden zum Beispiel Polyamid-Partikel verwendet. Deren Durchmesser beträgt $50\ \mu\text{m}$ (Zörweg, 2012).

6.4.2 *Natürliches Seeding*

Die Geschwindigkeit wird mittels der natürlichen Partikel des Abflusses ermittelt. Die Dichte und der Durchmesser des natürlichen Seedings sind schwer zu bestimmen. Diese Parameter werden benötigt um die Geschwindigkeitsverzögerung der Partikel zu berechnen. Von (Dobler, 2012) wurde der Durchmesser der natürlichen Partikel im Wasserkreislauf des Labors der TU Graz unter dem Mikroskop bestimmt. Der Durchmesser der meisten Partikel liegt zwischen $20\ \mu\text{m}$ und $50\ \mu\text{m}$. Für die Berechnungen verwendet Dobler, 2012 den Durchmesser $50\ \mu\text{m}$. Für die PIV Messungen am Modellversuch Wasserschloss Krespa wird ebenfalls auf die natürlich vorkommenden Partikel im Wasserkreislauf zurückgegriffen und der Partikeldurchmesser $50\ \mu\text{m}$ wird übernommen.

6.4.3 *Seeding im Rohrsystem des Wasserbaulabors der TU Graz:*

Der Durchmesser beträgt $50\ \mu\text{m}$. Die Dichte beträgt der Partikel ist gleich der von Wasser ($1000\ \text{kg/m}^3$). Nur die Partikel, die die gleiche Dichte wie Wasser haben, kommen mit der Pumpe aus dem Hochbehälter. Die schwereren sinken zu Boden und die leichteren Partikel steigen zur Wasseroberfläche auf (Dobler, 2012).

Es gibt Untersuchungen von Dobler, 2012 bezüglich der Endgeschwindigkeit des Seedings. Für die natürlichen Tracerpartikel des Wasserkreislaufes des TU Graz-Wasserbaulabors kommt er auf folgendes Ergebnis: Hat die Strömung eine Geschwindigkeit von 1 m/s und wirft man nun einen Partikel dort hinein, so braucht dieser ungefähr $7 * 10^{-4}$ Sekunden um die Endgeschwindigkeit zu erreichen. Die Geschwindigkeitsverzögerung der Partikel ist also sehr gering.

6.5 PIV System des Wasserbaulabors der TU Graz

Es kommt eine PIV-Anlage der Firma Dantec Dynamics A/S zum Einsatz. Die einzelnen Komponenten sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 3: PIV-Komponenten (Dobler, 2012)

Laser	Litron Laser - Modell: LDY303-PIV, Wiederholungsrate: 0.2 - 10 kHz mit 21.5 - 1.85 MJ, $\lambda=527\text{nm}$
Kamera	Photron FASTCAM SA-1 Kamera, 5.4 kHz, 1024 x 1024, 16 GB Speicher
Objektiv	AF Micro-Nikon, 60mm f/2.8 D
Software	Dynamic Studio 2.20.18

Die folgenden Abbildungen zeigen die PIV-Komponenten im Wasserbaulabor der TU Graz:

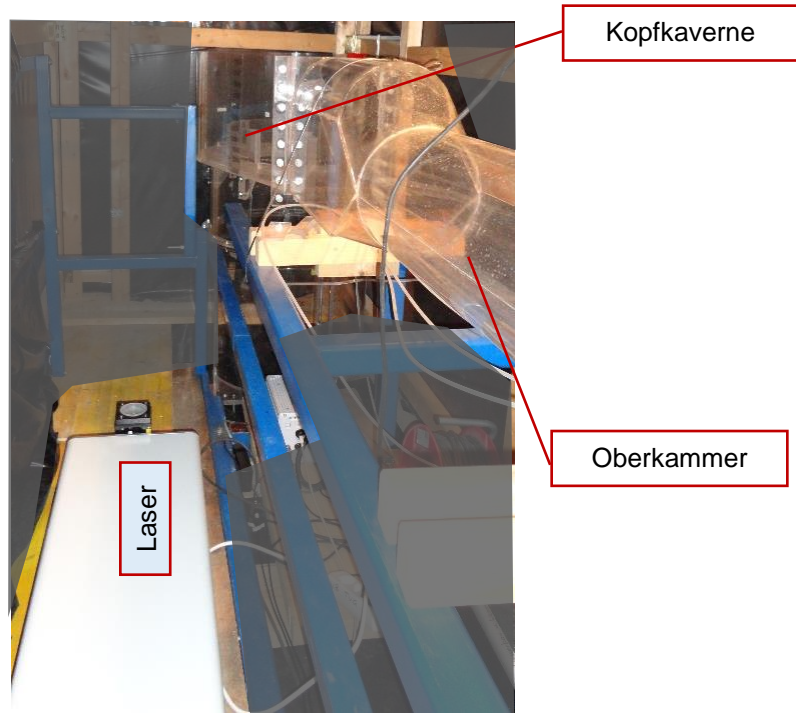


Abbildung 26: Laser, Laserarm noch nicht montiert

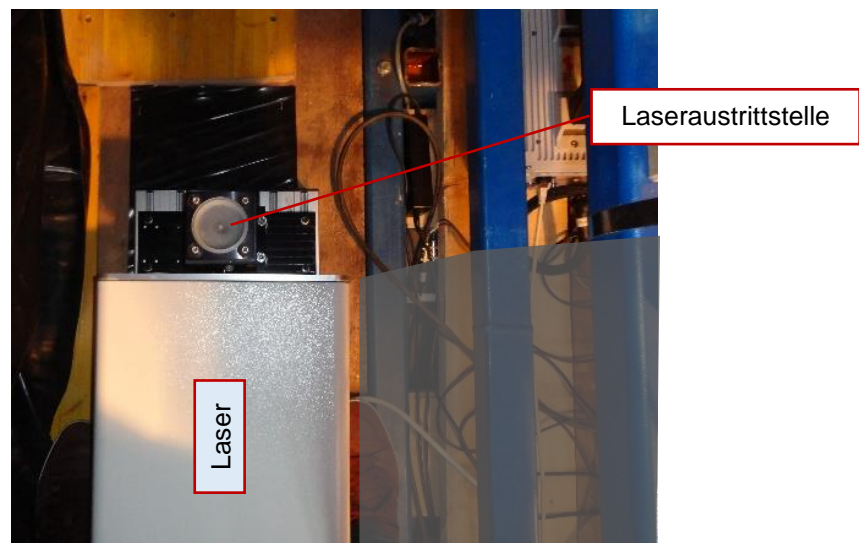


Abbildung 27: Austrittsstelle des Laserstrahls, Laserarm noch nicht montiert

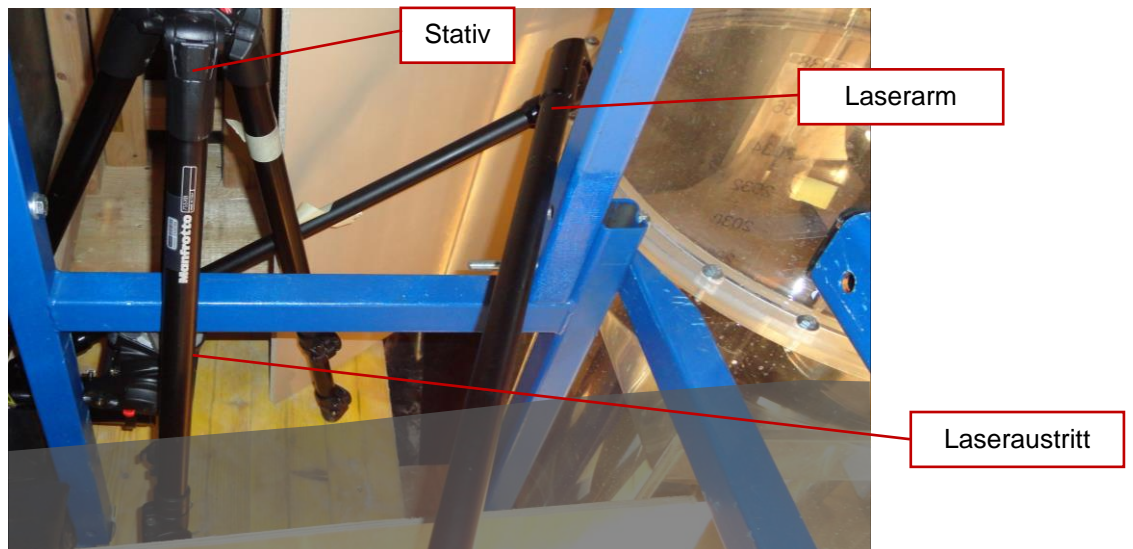


Abbildung 28: Laserarm

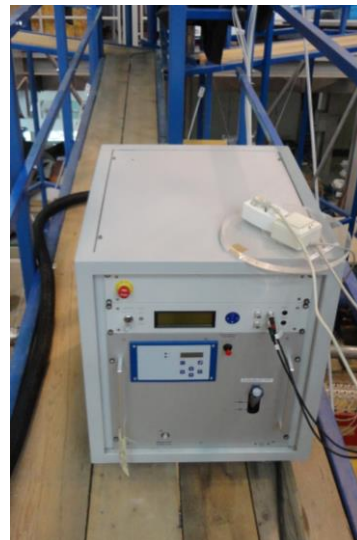


Abbildung 29: Kühlaggregat

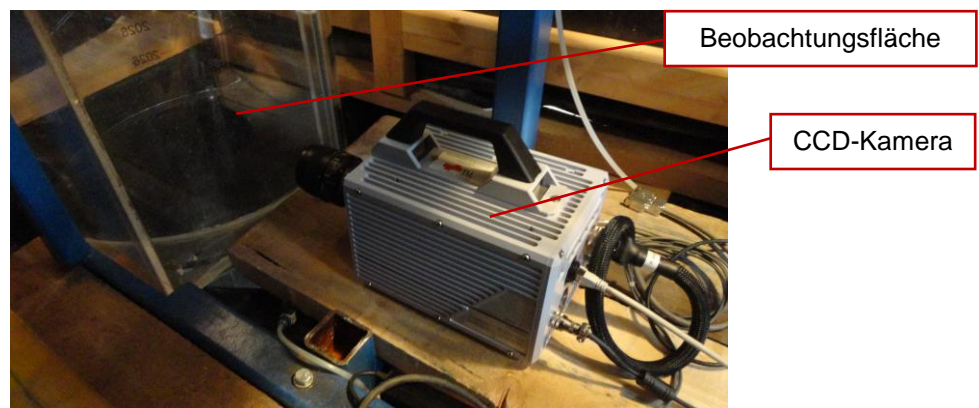


Abbildung 30: CCD-Kamera und die transparente Beobachtungsfläche (Plexiglas)



Abbildung 31: PIV-Rechner mit Auswertungssoftware

6.6 Lasersicherheit

Die Wellenlänge des doppelt gepulsten Nd:YAG-Lasers beträgt 527 Nanometer (grünes Licht). Das erzeugte Laserlicht wird aufgeweitet (optische Linsen), um eine Laserlichtebene in der Beobachtungstrecke zu erzeugen. Die abgegebene Leistung des Lasers beträgt 23 MJ bei einer Wiederholrate von 1 kHz. Das bedeutet, der Laser gehört zur Sicherheitsklasse 4 (Dobler, 2012).

Ein Laser der Klasse 4 ist ein Hochleistungslaser. *Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und gefährlich für die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein.* Die zugängliche Strahlung ist die Strahlung, mit der der Mensch in Berührung kommen kann, das heißt die Strahlung, die den Laser verlässt (Udovicic, 2010).

Laut (Udovicic, 2010) lassen sich die Schutzmaßnahmen bei der Verwendung von Lasern in drei Bereiche einteilen:

- technische Schutzmaßnahmen (z.B. Abschirmung des Messbereichs und eine Warnleuchte, dass Laser in Betrieb ist.)
- organisatorische Schutzmaßnahmen (z.B. Zugangsregelungen für den Laserarbeitsbereich)
- persönliche Schutzmaßnahmen (z.B. Laserschutzbrille)

Die folgenden Abbildungen zeigen Beispiele für Schutzmaßnahmen. Es wird der gesamte Kopfkavernenbereich eingehaust. Der Steigschacht, die Unterkammer sowie die Oberkammer werden mit ausreichend strahlungsdichten schwarzen Folien abgedeckt. Die Wirkungsweise wird mittels Infrarotmessung überprüft.



Abbildung 32: Warnschild - Vorsicht Laserklasse 4

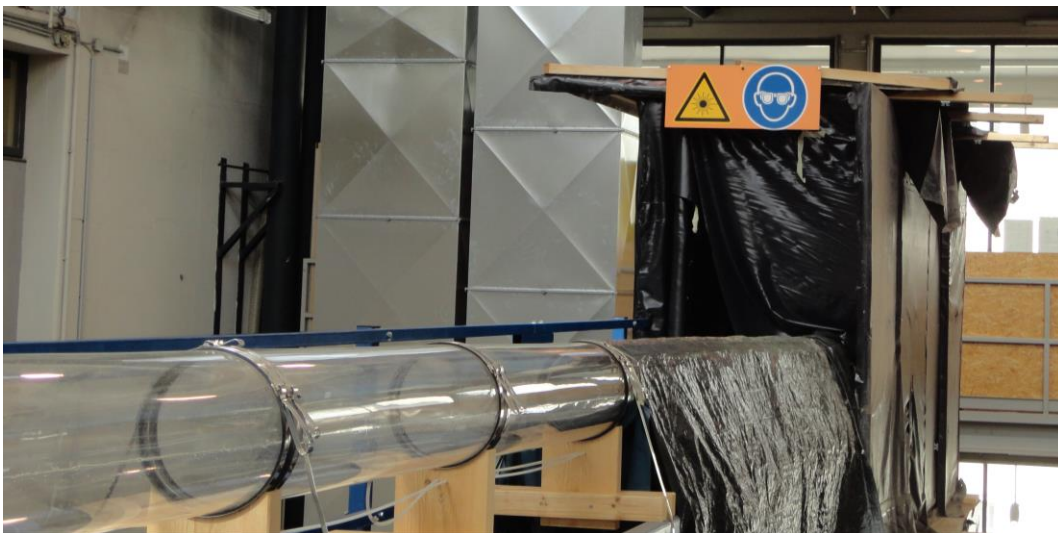


Abbildung 33: Abschirmung des Messbereichs und Hinweisschilder



Abbildung 34: Warnleuchte



Abbildung 35: Laserschutzbrille

7. PIV Messungen am Modellversuch Krespa

In diesem Kapitel werden die PIV Messungen am Modellversuch Krespa im Wasserbaulabor der TU Graz dargelegt. Die geringfügigen Umbauarbeiten am Modellversuch für die Abdeckungen und die Kalibrierung der Messeinrichtung werden erläutert. Außerdem werden die Messlastfälle definiert und die Auswertung der Messergebnisse beschrieben.

7.1 Allgemeines

Particle Image Velocimetry (PIV) Messung im Steigschacht des Modellversuchs Wasserschloss Krespa.

7.2 Ziel der PIV-Messungen

- Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung im Steigschacht für spezifische Lastfälle
- Evaluierung der max. Lufteintragstiefe im Modell
- Verhältnis der Lufteintragstiefe Modell zu Prototyp

7.3 Vorbereitungen und Versuchsumbau

Die Vorbereitungen für die Geschwindigkeitsmessungen mittels PIV beziehen sich auf den Umbau des Modellversuchs sowie auf die Einstellung der Messeinrichtung:

7.3.1 *Neue Zulaufleitung*

Eine neue Zulaufleitung aus Stahl wurde errichtet. Diese speist die Oberkammer mit Wasser. Mit der neuen Zulaufleitung wird der Versuch mit konstantem Durchfluss aus der Oberkammer gefahren, d. h. er läuft unter stationären Bedingungen ab (Abbildung 36).



Abbildung 36: Zulaufleitung und Oberkammer des Modellversuchs Krespa

7.3.2 Sicherheitsmaßnahmen

Die Strahlung (direkt und diffus) eines Klasse 4 Lasers ist sehr gefährlich für die Augen (Udovicic, 2010). Zum Schutz, für die sich im Labor aufhaltenden Personen, wird deshalb der Messbereich sicher umschlossen. Die sogenannte Messhütte (Abbildung 36, ganz rechts) aus Holzelementen und Teichfolie bietet Schutz vor direkter Laserstrahlung. Der Aufenthalt in der Hütte bei aktivem Laserstrahl ist nur mit entsprechenden Laserschutzbrillen gestattet. Des Weiteren wurden die restlichen Bereiche des Modellversuchs mit Teichfolie umwickelt, damit keine diffuse Strahlung in die Laborhalle reflektiert wird. Eine Warnleuchte signalisiert außerdem, dass der Laser gerade in Betrieb ist.

7.3.3 PIV-Box

Auf den zylindrischen Steigschacht des Modellversuchs wurde eine Plexiglas-scheibe (PIV-Box) montiert, um eine ebene Fläche für die Aufnahmen mit der Highspeed Kamera zu erreichen. Durch diese Maßnahme wird die sonst wirkende Brechung des Lichts an der zylindrischen Mantelfläche des Steigschachts ausgeglichen. Der Freiraum zwischen Steigschachtungsgrenzung und PIV-Box wird mit Wasser aufgefüllt (Abbildung 41).

Der Brechungsindex von Wasser (1,33) und Plexiglas-Röhm (1,49) ist sehr ähnlich, wodurch der Brechungseinfluss zwischen den beiden Medien vernachlässigbar klein ist (Dobler, 2012).

Auf Abbildung 37 sind die Highspeed Kamera und die PIV-Box (transparente, ebene Beobachtungsfläche) zu sehen:

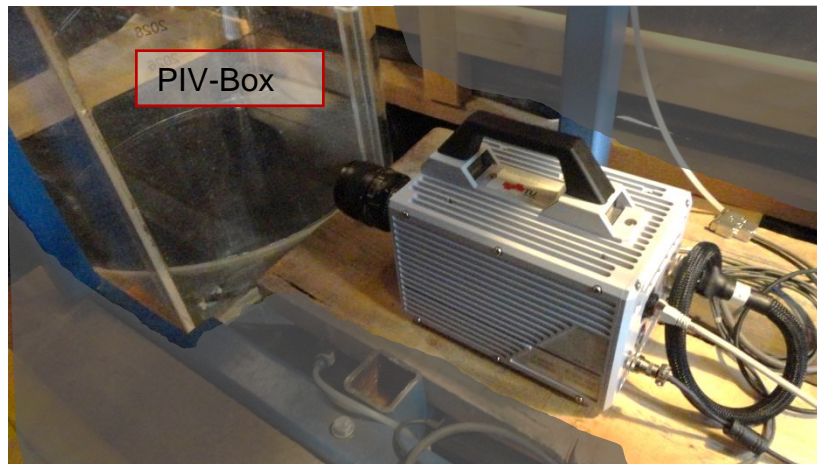


Abbildung 37: Highspeed Kamera und PIV-Box

7.4 Kalibrierung

Die Kalibrierung des Laserstrahls erfolgte mit Hilfe des im Messsystem enthaltenen Kalibrierrohrs. Durch die Justierschrauben im Bereich der Laseraustrittsstelle wurde der Laserstrahl innerhalb der Zentrumsmarken des Kalibrierrohrs positioniert (Abbildung 38).



Abbildung 38: Kalibrierrohr

Außerdem benötigt die Auswertungssoftware des Messsystems eine bekannte Längenabmessung um die Strömungsgeschwindigkeit errechnen zu können. Ein Meterstab wurde im Messbereich des Versuchs positioniert und durch die

PIV Optik der Highspeedkamera eine Aufnahme erstellt. Mit Hilfe dieser Aufnahme wird nun der Skalierungsfaktor für die Auswertungssoftware festgelegt.

7.4.1 Vorgangsweise bei der manuellen Einrichtung des Lasersheets

Der Laser wird mit der Zuhilfenahme einer Digitalen Videokamera eingestellt. Da die Schutzbrille die Laserstrahlen komplett abschirmt, kann über die Videokamera das Laserlicht in den sichtbaren Bereich transferiert werden. Für diesen Vorgang wird vorzugsweise eine nicht ganz neue Videokamera benützt. Das Laserlicht ist sowohl für die Augen als auch für CCD-Chips schädlich. Allerdings kann im Fall des Falles eine Videokamera ersetzt werden. Schäden am Auge sind irreparabel.

7.4.2 Kamera

Anhand des positionierten Meterstabes in der Lichtschnittebene wird auch die Kamera scharf gestellt. Die Abmessungen der aufgenommenen Bilder betragen 263 x 263 mm bei 1024 x 1024 Pixel.

7.5 PIV-Messungen

7.5.1 Generelle Angaben

Die Basisangaben hinsichtlich der Messung können der Tabelle 4 zu entnommen werden:

Tabelle 4: Basisangaben zur Messung

Anzahl Bilder	500
Zeit zwischen den Laserpulsen	8 ms
Dauer der Messung	4 s

Die Abbildung 39 zeigt den mit dem Laser beleuchteten Messbereich. Zu sehen ist der in Kapitel 7.5.2 beschriebene Lastfall 1.

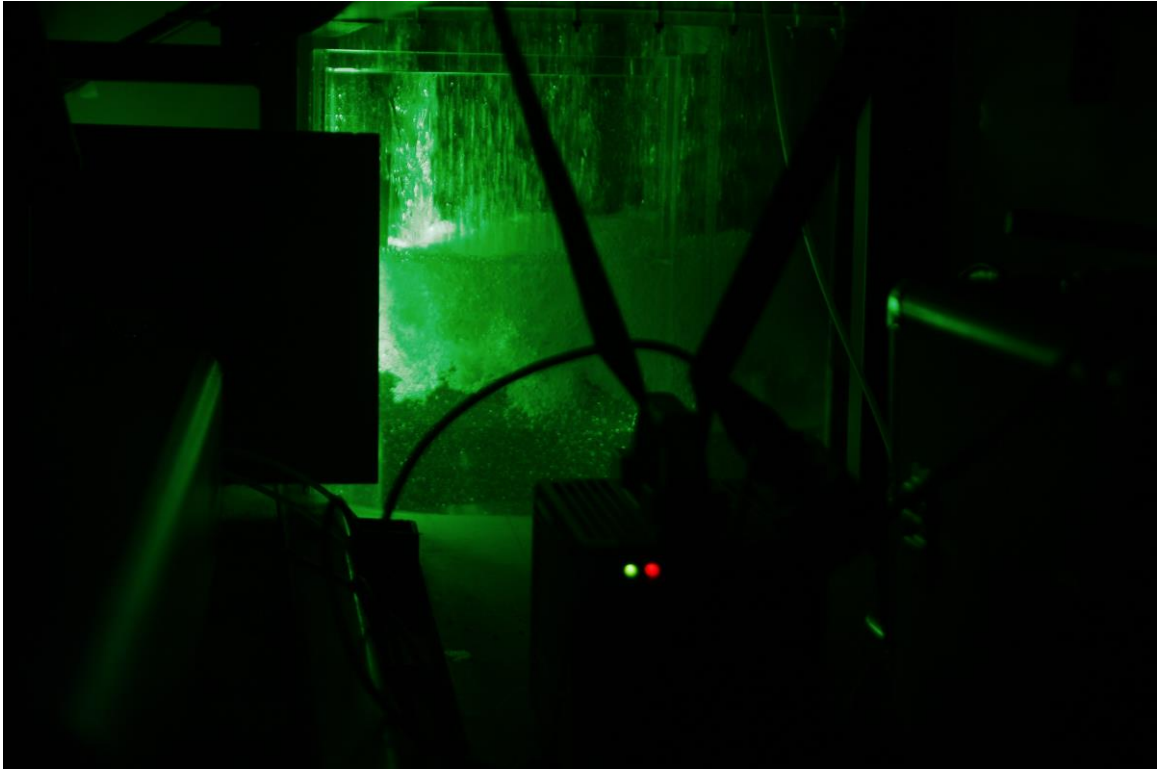


Abbildung 39: Beleuchtung des Messbereichs mittels Laserstrahl

7.5.2 Angaben zu den gemessenen Lastfällen

Zwei Messungen mit unterschiedlichen Wasserspiegeln im Steigschacht werden durchgeführt. Diese werden mit Lastfall 1 und Lastfall 2 bezeichnet:

Lastfall 1 – direkte Luftblasenaufnahme

Der Wasserspiegel im Steigschacht liegt auf der Höhenkote 2034,00 müA. Die Messung findet im Nahbereich zur Wasseroberfläche statt. Die eintreffenden Fallstrahlen des Wasserfalls und der daraus entstehende Luftblasenpolster befinden sich im Aufnahmebereich der Highspeed-Kamera. Die Ergebnisse des Lastfall 1 werden zur Ermittlung der Luft Eindringtiefe im Modell verwendet.

Lastfall 2 – unterhalb der Luftblasen

Die Messung erfolgt bei einem Wasserspiegel im Steigschacht auf der Höhenkote 2045,90 müA. Das bedeutet, dass die Geschwindigkeitsmessung tief unterhalb des Luftblasenpakets erfolgt, welches durch den herabstürzenden Wasserfall aus der Oberkammer entsteht. Der Lastfall 2 wird zur Übertragung der Luft Eindringtiefe für den Prototyp herangezogen.

Die Abbildung 40 stellt den Übergangsbereich Kopfkaverne und Steigschacht des Modellversuchs Krespa dar. Dabei sind der Wasserspiegel sowie alle sonstigen wichtigen Höhenkoten dargestellt. Zusätzlich sind auch die Lage der PIV-Box und die des Kameraaufnahmebereichs eingezeichnet. Der Aufnahmebereich der Kamera liegt zwischen den Koten 2024,30 und 2032,10 müA:

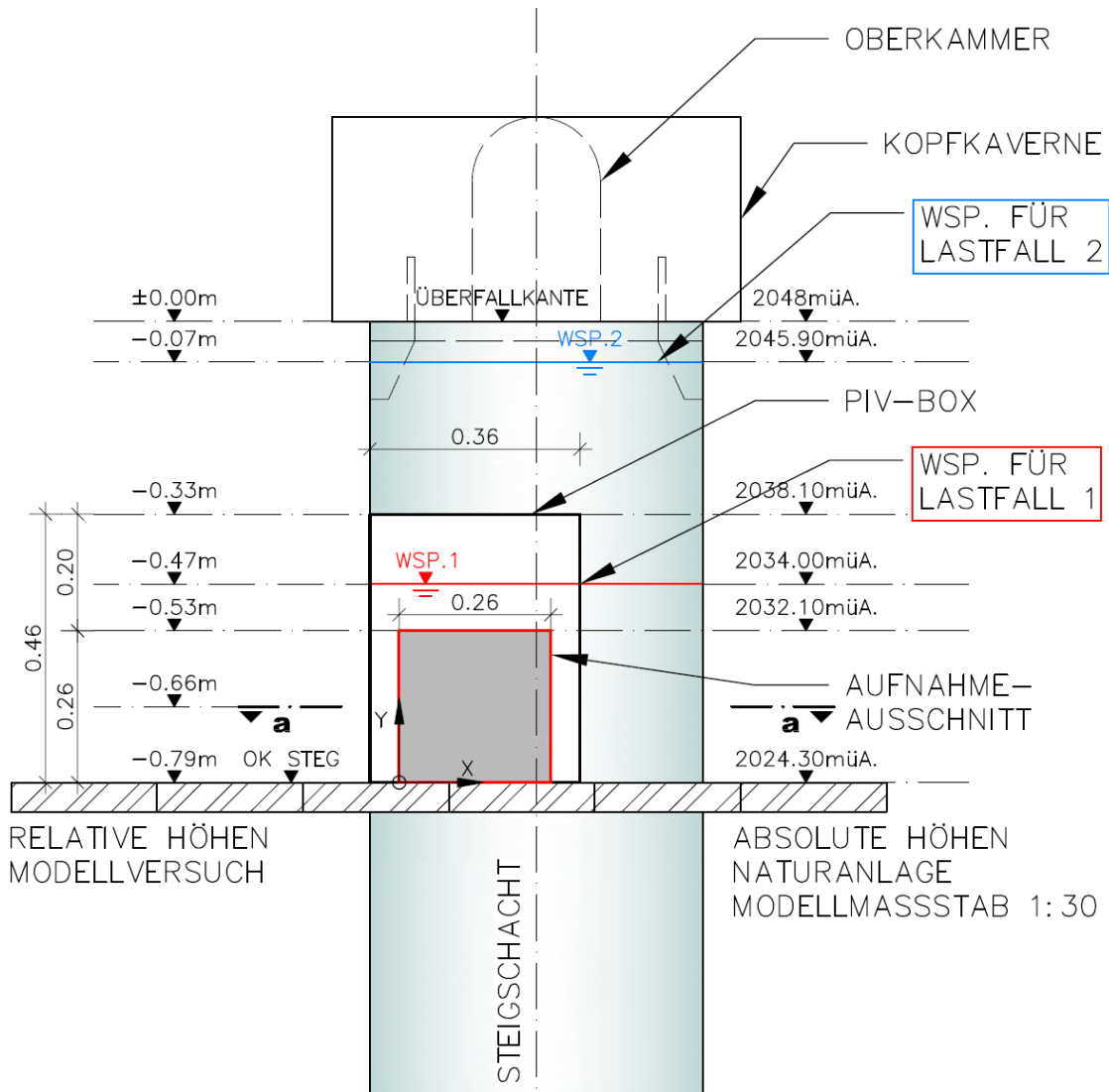


Abbildung 40: Skizze vom Messbereich

Die Abbildung 41 zeigt den Schnitt a-a. Hier ist der Messbereich im Grundriss dargestellt und die Anordnung von Laser und CCD-Kamera ist ersichtlich.

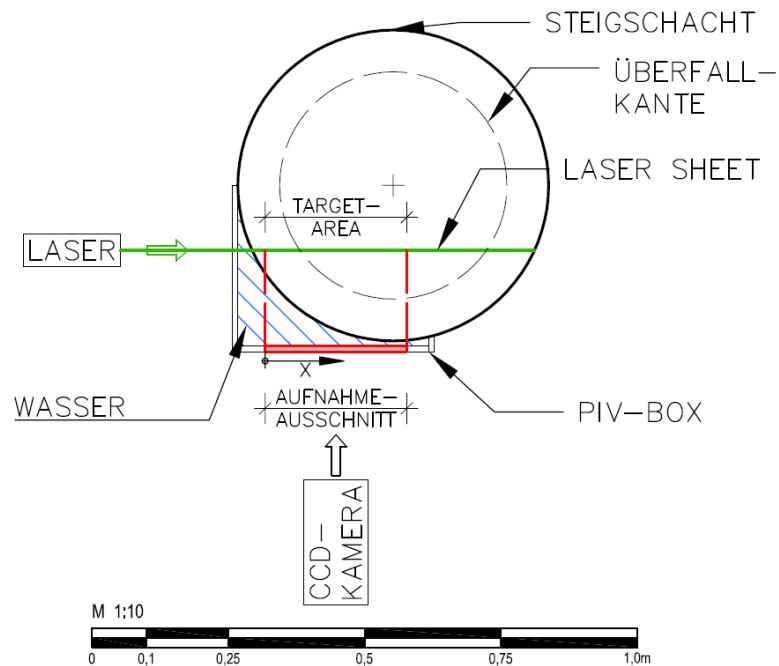


Abbildung 41: Schnitt a-a, Anordnung Laser und Kamera

Weitere Angaben zu den gemessenen Lastfällen können der Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5: Details zu den Lastfällen 1 und 2

Lastfall	Fallhöhe - Modell	Fallhöhe - Natur	Q – Modell [l/s]	Q – Natur [m³/s]
1	47 cm	14,00 m	12	59
2	7 cm	2,10 m	12	59

7.5.3 PIV-Bilder

Bei jedem Laserpuls (alle 8 ms) schießt die Highspeed Kamera ein Bild. Zwei dieser Fotos sind in Abbildung 42 beispielhaft dargestellt. Der Laserstrahl macht die Partikel in der Strömung sichtbar. Aus den Verschiebungen dieser Partikel lässt sich in weiterer Folge die Strömungsgeschwindigkeit berechnen.

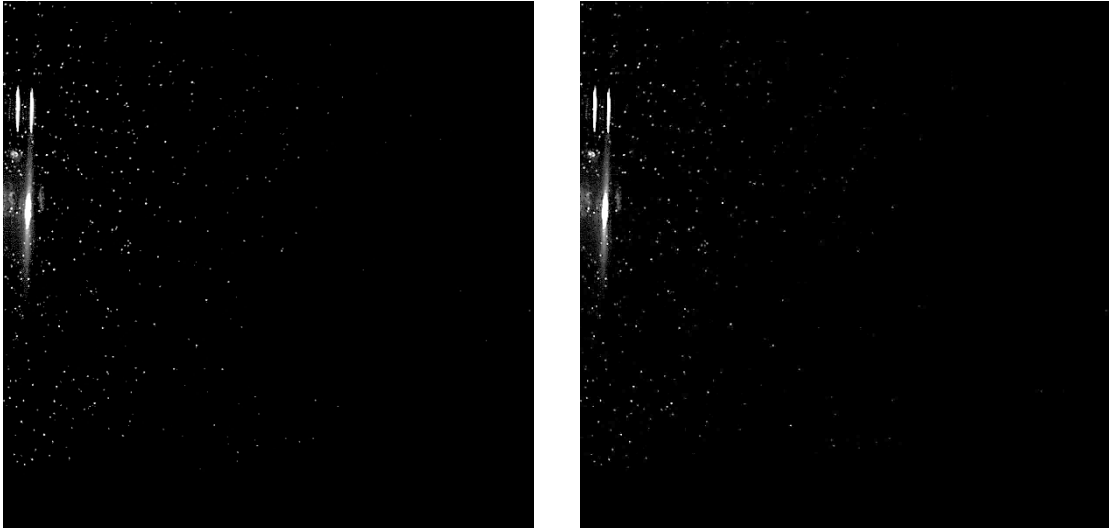


Abbildung 42: Kameraaufnahmen bei 40 und 48 ms

7.6 Auswertung

Im folgenden Absatz wird die Vorgehensweise für die Auswertungen der PIV-Messungen am Modellversuch beschrieben.

7.6.1 Software *Dynamic Studio*®

Diese Software ist im PIV-Messsystem der Firma Dantec Dynamics inkludiert. Mit dem Tool „Adaptive-Korrelation“ der Software *Dynamic Studio* (Version 2.3) wird eine Korrelation zwischen zwei aufeinanderfolgend geschossenen Kameraaufnahmen generiert. Das Ergebnis der „Adaptive-Korrelation“ ist ein Geschwindigkeitsvektorenfeld für zwei unmittelbar hintereinander aufgenommene Bilder. Die gewählte Größe der Interrogation Areas beträgt 32 x 32 Pixel.

Dynamic Studio® bietet die Möglichkeit die Geschwindigkeitsvektorenfelder aus der Korrelation mit dem Tool „Vector Statistics“ zu mitteln. Wendet man dies auf alle Vektorfelder an, kommt es zu einer erheblichen Verschmierung der instationären Geschwindigkeitsverteilung im Steigschacht. Durch die Verschmierung hat es den Anschein als würde die Strömung stationär sein. Das Verhalten der Strömung ist jedoch instationär, es gibt signifikante Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Vektorfeldern verschiedener Zeitschritte. Die Mittelwertbildung aus den Geschwindigkeitsvektorenfeldern wird daher nicht weiter verfolgt.

7.6.2 Datenplot im Programm Matlab®

Die numerischen Daten des Geschwindigkeitsfeldes werden aus der Software Dynamic Studio® exportiert, in die Software Matlab® eingelesen und anschließend geplottet.

7.7 Ergebnisse und Interpretation

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Darstellung und der Interpretation der Messergebnisse.

7.7.1 Lastfall 1

Der Lastfall 1 dient zur Ermittlung der Lufteintragstiefe im Modellversuch.

Die Abbildung 43 zeigt den Wasserfall aus der Oberkammer in den Steigschacht des Modellversuchs Wasserschloss Krespa in einer Bildfolge. Diese Bilder sind Aufnahmen aus einem Video, das während dem Bemessungslastfall für den Wasserfall aufgenommen wurde. Die Skala am Modell bezeichnet absolute Seehöhen in müA. Über den Bezug auf die Skala können Angaben über die realen Höhen und Lufteindringtiefen gemacht werden. Die Aufnahme ganz links zeigt die Situation unmittelbar vor dem Abreißen der Wassersäule im Steigschacht, es hat sich noch kein Wasserfall ausgebildet. Bei der Aufnahme in der Mitte ist der Wasserspiegel im Steigschacht bereits abgesunken und das Wasser in der Oberkammer wurde am Belüftungsbauwerk reflektiert und fließt in den Steigschacht. Der Wasserfall ist deutlich zu erkennen. Die Aufnahme rechts zeigt ebenfalls den Wasserfall in den Steigschacht. Der Wasserspiegel im Steigschacht liegt hier etwas tiefer. Außerdem ist in der Aufnahme ganz rechts der Luftblasenpolster gut zu erkennen. Dies ist der weiße Bereich unmittelbar unterhalb des Wasserspiegels. Durch die eintreffenden Fallstrahlen des Wasserfalls dringen Luftblasen in den Wasserkörper des Steigschachts ein und steigen anschließend wieder nach oben, daher die Weißfärbung.

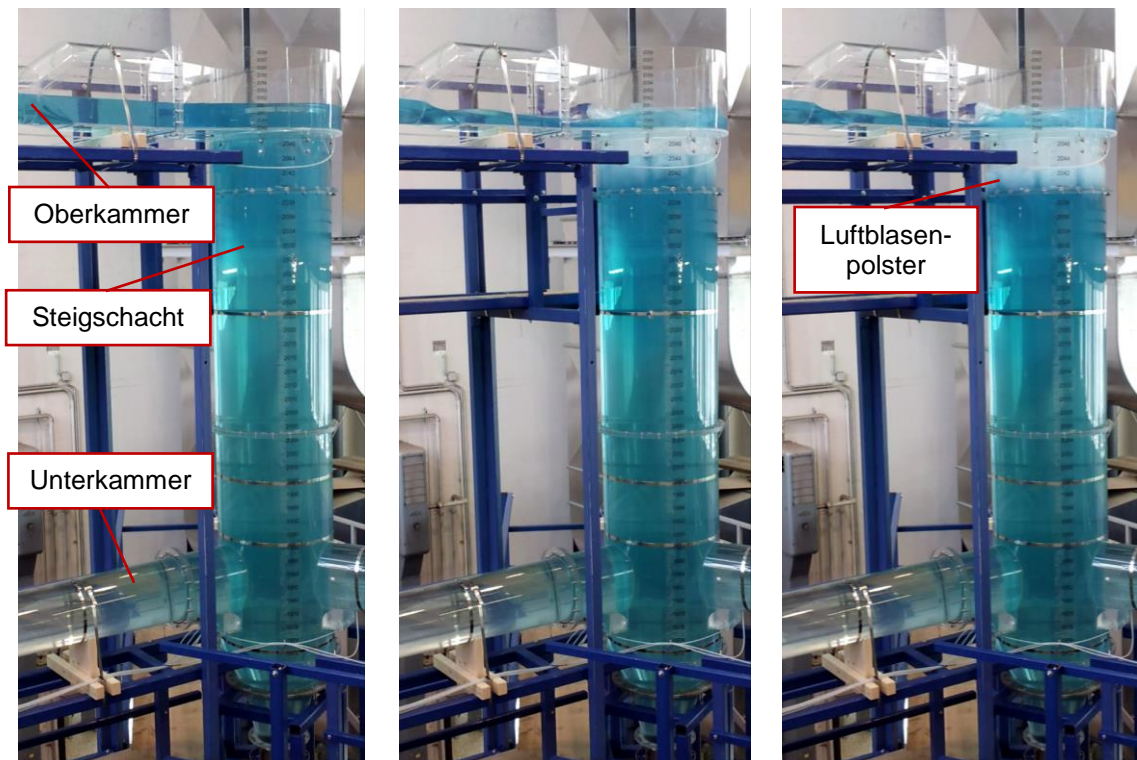


Abbildung 43: Bildfolge, Wasserfall Modellversuch Krespa

Der Auftreffbereich des Wasserfalls auf die Wasseroberfläche im Steigschacht wird in der Abbildung 44 vergrößert dargestellt. Der Wasserspiegel im Steigschacht liegt auf 2045,00 müA. Mit Hilfe der am Modellversuch angebrachten Höhenscala kann die Mächtigkeit des Luftblasenpolsters bestimmt werden und so direkt auf die Lufteindringtiefe im Modellversuch geschlossen werden. Die Unterkante des Luftblasenpolsters liegt auf der Höhenkote 2041,00. Daher ergibt sich im Modellversuch eine Lufteindringtiefe von ca. 4,0 m in den Wasserkörper im Steigschacht.

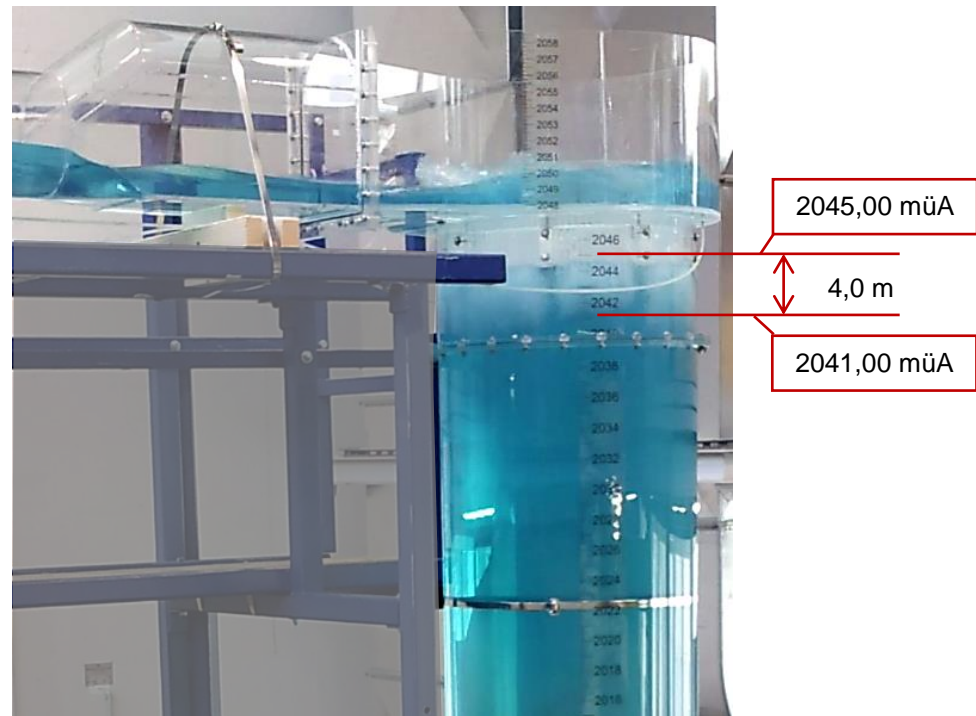


Abbildung 44: Luftblasenpolster im Steigschacht, ausgelöst durch den Wasserfall aus der Oberkammer

Die Beobachtungen mittels der Videoaufzeichnung der Wasserschlossschwingung werden nun mit den Ergebnissen aus der PIV-Messung für den Lastfall 1 verglichen.

Die Abbildung 45 zeigt ein Geschwindigkeitsvektorenfeld. Die Grundlage dafür sind zwei Highspeed-Kameraaufnahmen nach 96 ms und 104 ms Messdauer. Gut zu erkennen ist, dass sich im oberen Drittel des Vektorfeldes bereits ein Rückstrombereich bildet (blaue Bereiche in Abbildung 45). Der Wasserspiegel im Steigschacht lag auf der Höhe 2034,00 müA. In den Videoaufnahmen des Wasserfalls wird eine Eindringtiefe der Luftblasen von 4,0 m beobachtet. Legt man diese Erkenntnis aus der Videoanalyse des Wasserfalls nun auf die Gegebenheiten des Lastfalls 1 um, so müsste der Lufteintragshorizont im Steigschacht auf der Höhe 2030,00 müA liegen. Um dies überprüfen zu können werden die Schnitte A-A, B-B und C-C durch das Geschwindigkeitsvektorenfeld gelegt. Mit Hilfe dieser Schnitte wird die vertikale Komponente der Geschwindigkeitsvektoren dargestellt. Die maximale Eindringtiefe von Luftblasen ist erreicht, wenn ein Gleichgewicht aus der Geschwindigkeit der sich abwärts be-

wegenden Strömung und der Blasenauftiegs geschwindigkeit herrscht. Die Aufstiegsgeschwindigkeit von Luftblasen beträgt ca. 0,20 m/s. (Kobus, 1991)

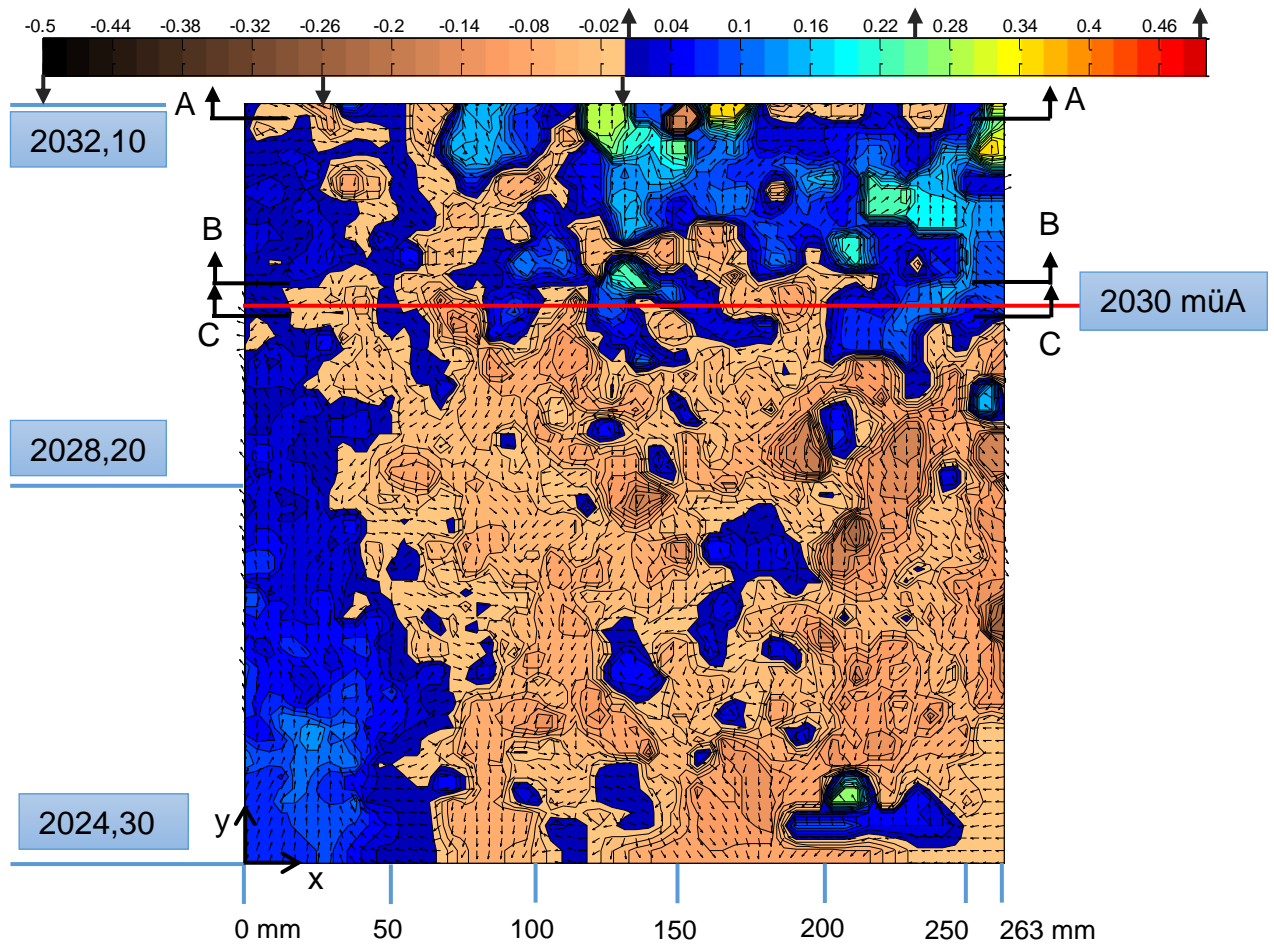


Abbildung 45: Geschwindigkeitsvektorenfeld Nr. 1 für Lastfall 1

Die Abbildung 46 zeigt den Schnitt A-A. Dessen Schnittlinie liegt auf einer Höhe von 2031,95 müA. Sehr deutlich sind die Bewegungen der Strömung nach unten (negatives Vorzeichen) und nach oben (positives Vorzeichen) zu erkennen. Dieses Auf und Ab der Geschwindigkeitsverteilung lässt sich durch die unmittelbare Nähe der Schnittebene zum Wasserspiegel (2034,00 müA.) erklären. Immer wieder dringen die Fallstrahlen des Wasserfalls in den Wasserkörper im Steigschacht ein und gleichzeitig steigen Luftblasen nach oben.

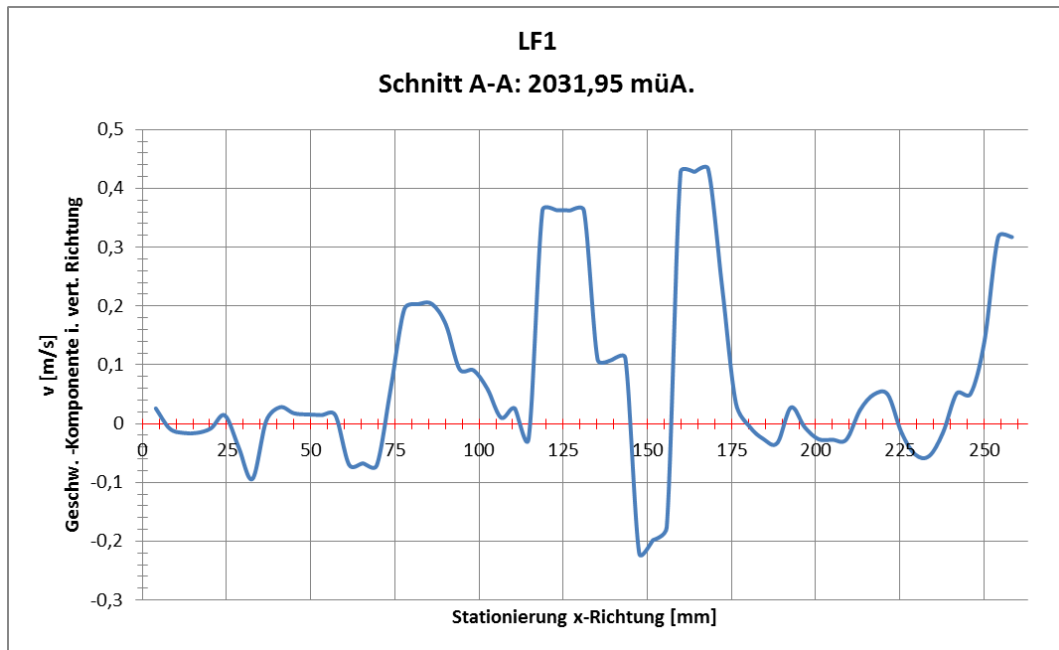


Abbildung 46: Schnitt A-A

Die Abbildung 47 zeigt den Schnitt B-B: Dessen Schnittlinie liegt auf einer Höhe von 2030,30 müA., also nur geringfügig höher als der zu erwartende Lufteintragshorizont (2030,00 müA.). Die maximale Geschwindigkeit nach unten beträgt 0,16 m/s. Außerdem ist der Bereich zwischen 130 mm und 140 mm horizontaler Stationierung interessant. Hier steigt eine Luftblase mit einer Geschwindigkeit von 0,28 m/s nach oben. Dies deckt sich mit Werten aus Literatur wie z. B. (Chanson et al., 2002).

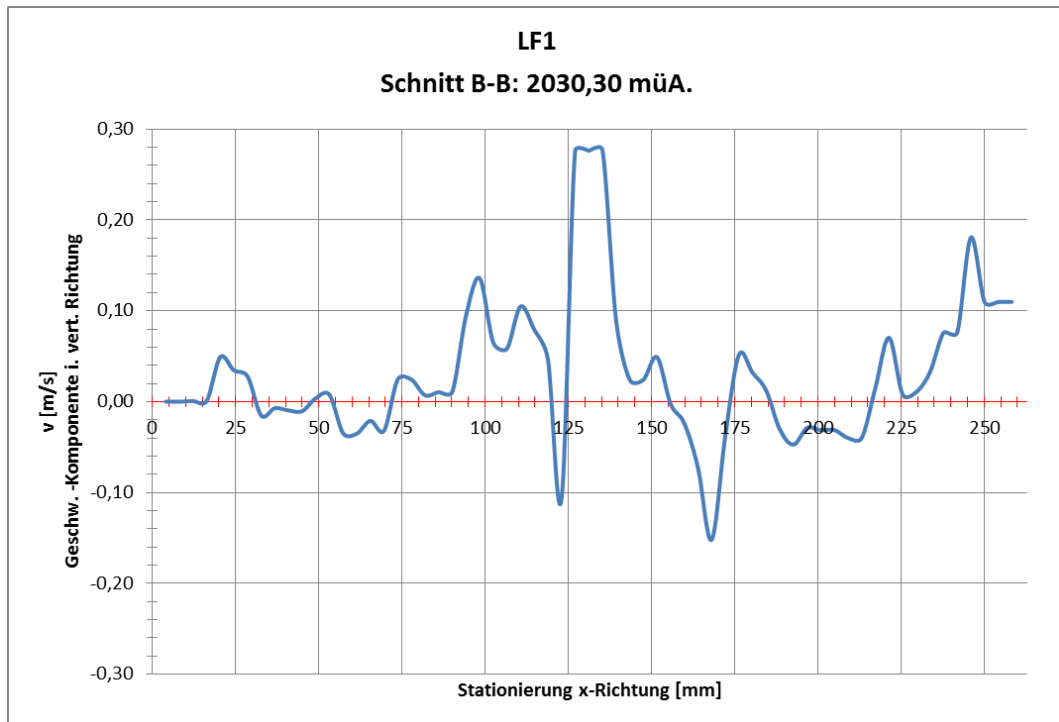


Abbildung 47: Schnitt B-B

Die Abbildung 48 zeigt den Schnitt C-C: Dessen Schnittlinie liegt auf einer Höhe von 2029,85 müA, also nur knapp tiefer als der zu erwartende Lufteintragshorizont (2030,00 müA.). Die maximale Geschwindigkeit nach unten beträgt 0,18 m/s. Diese liegt bereits unter der Grenzgeschwindigkeit von 0,20 m/s.

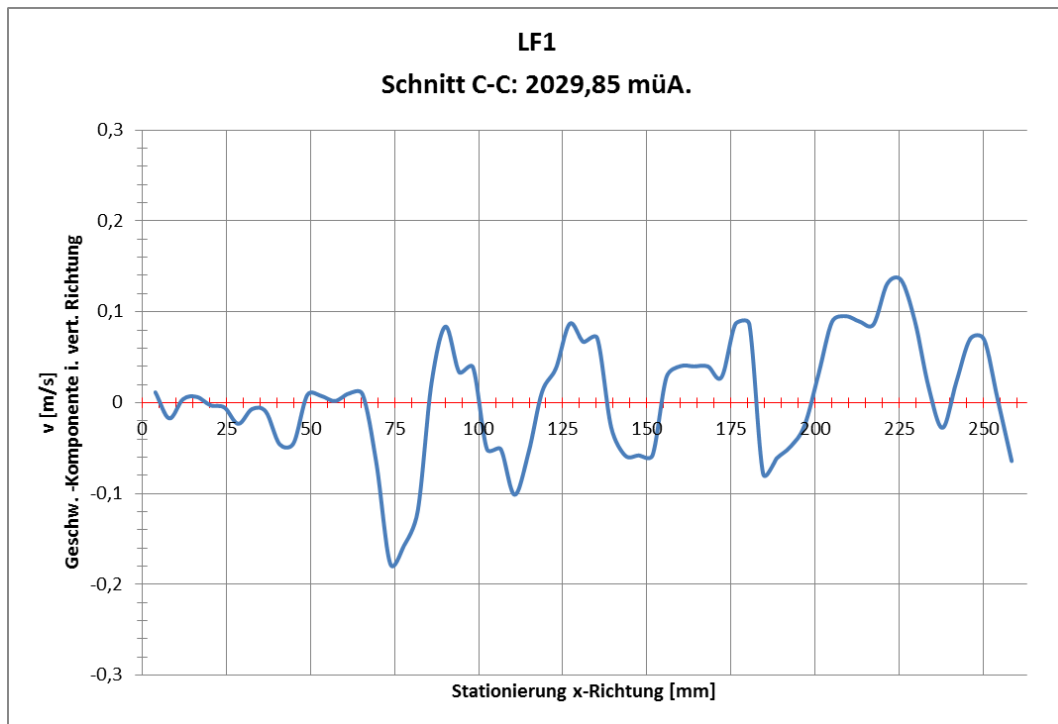


Abbildung 48: Schnitt C-C

Der Lufteintragshorizont von 2030,00 müA. kann somit bestätigt werden. Die Lufteindringtiefe im Modellversuch beträgt also 4 m. Zur Absicherung dieser Aussage wird ein weiteres Geschwindigkeitsvektorenfeld des Lastfall 1 mittels drei Schnittebenen untersucht:

Die Abbildung 49 zeigt das zweite untersuchte Geschwindigkeitsfeld des Lastfalls 1. Wie schon vorhin wurden wieder drei Schnittebenen (A-A, B-B und C-C) auf verschiedenen Höhenlagen definiert. Der Rückstrombereich (blaue Färbung) im oberen Drittel des Bildes ist gut zu erkennen.

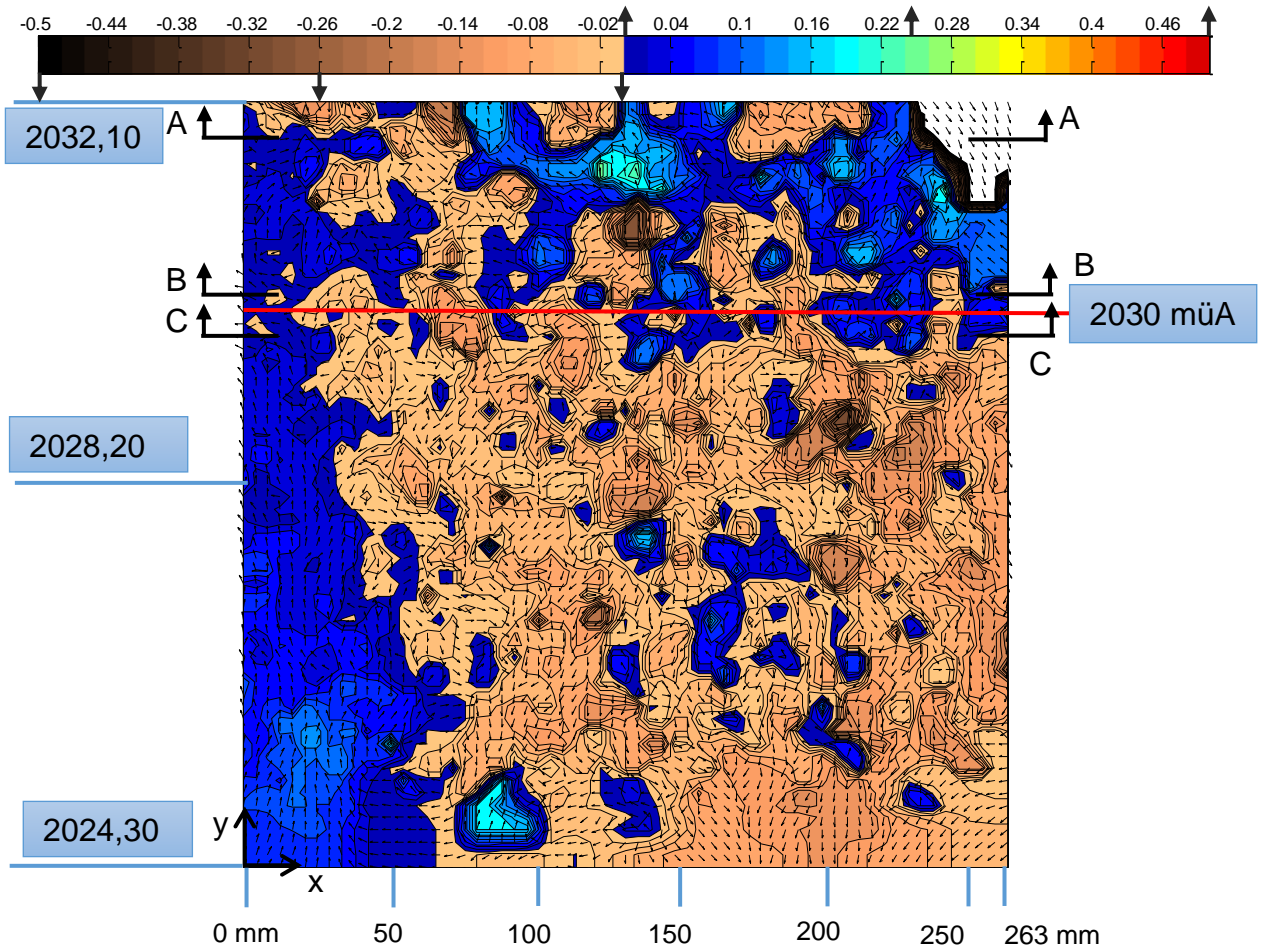


Abbildung 49: Geschwindigkeitsvektorenfeld Nr. 2 für Lastfall 1

Die Schnittebene von Schnitt A-A in Abbildung 50 liegt auf einer Höhe von 2031,80 müA. Die Schnittlinie liegt nahe unterhalb des Wasserspiegels (2034,00müA) im Steigschacht. Deswegen sind die in den Wasserkörper im Steigschacht eintauchenden Fallstrahlen (negatives Vorzeichen, Bewegung nach unten) sehr gut zu sehen. Die aufsteigenden Luftblasen (positives Vorzeichen, Bewegung nach oben) des Luftblasenpolsters unmittelbar unterhalb der Wasseroberfläche sind im Bereich der horizontalen Stationierung 80 mm bis 145 mm zu erkennen. Die Aufstiegs geschwindigkeit in diesem Bereich beträgt 0,20 m/s. Dies deckt sich sehr gut mit den Ergebnissen von (Clanet & Lasheras, 1997).

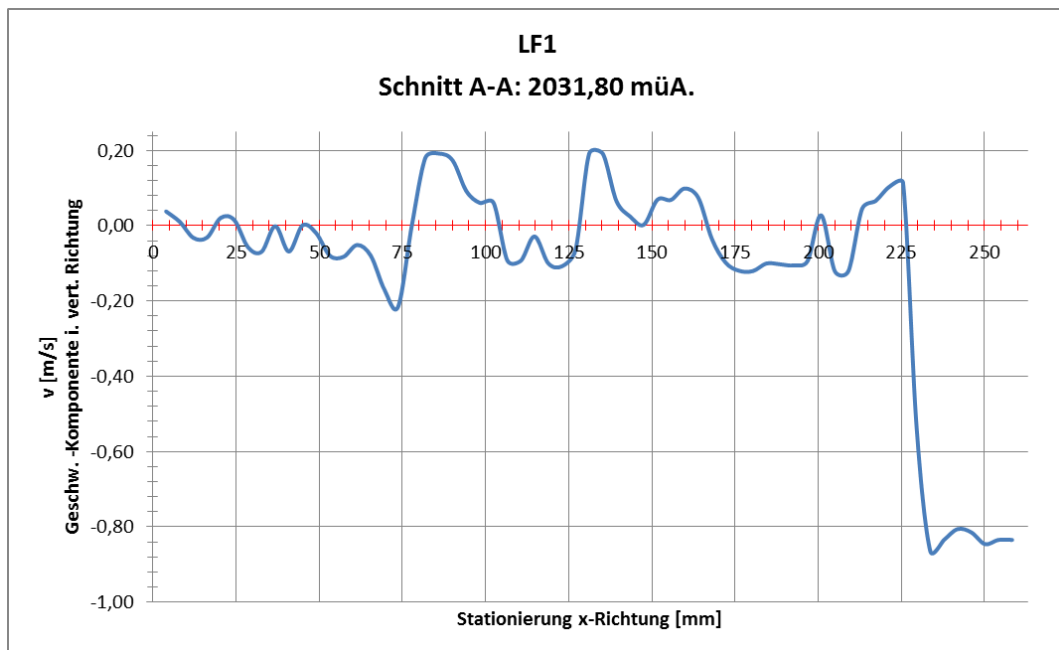


Abbildung 50: Schnitt A-A

Die Abbildung 51: Schnitt B-B und die Abbildung 52: Schnitt C-C zeigen den Bereich unmittelbar über bzw. unter der erwarteten Lufteintragstiefe (2030,00 müA). Die maximale Geschwindigkeit in Abwärtsrichtung beträgt 0,16 m/s.

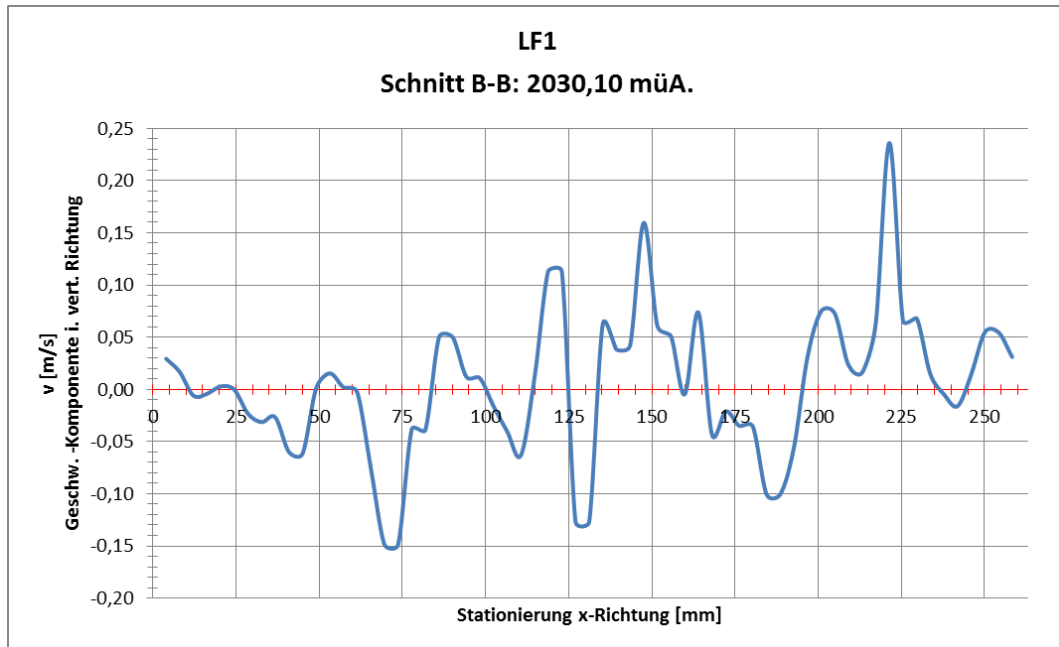


Abbildung 51: Schnitt B-B

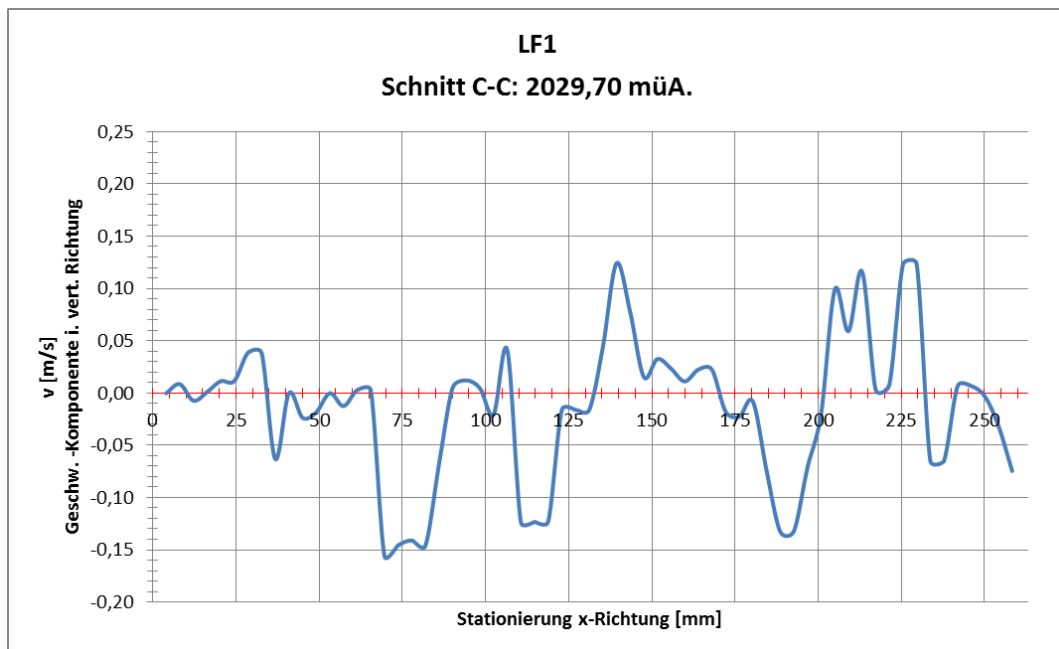


Abbildung 52: Schnitt C-C

Der Lufteintrag durch den Wasserfall findet für die Randbedingungen des Lastfalls 1 bis zu einem Horizont von 2030,00 müA statt, das bedeutet bis 4,0 m unterhalb des Wasserspiegels im Steigschacht. Die Schnitte B-B und C-C bestätigen dies, da die Grenzgeschwindigkeit von 0,20 m/s jeweils unterschritten wird. Auch die ausgeprägte Rückstrombereiche in den Geschwindigkeitsvektorenfeldern von Abbildung 45 und Abbildung 49 bezeugen die maximale Lufteintragstiefe von 4,0 m im Modellversuch - skaliert auf den Prototyp über den Modellmaßstabsfaktor von 30 [-]. Der tatsächlich gemessene Wert im Modellversuch beträgt natürlich $4,0 \text{ m} / 30 = 0,13 \text{ m}$.

7.7.2 Lastfall 2

Der Lastfall 2 dient zur Ermittlung der Lufteintragstiefe in der Naturanlage. Der Plot des Geschwindigkeitsfeldes ist in der Abbildung 53 dargestellt:

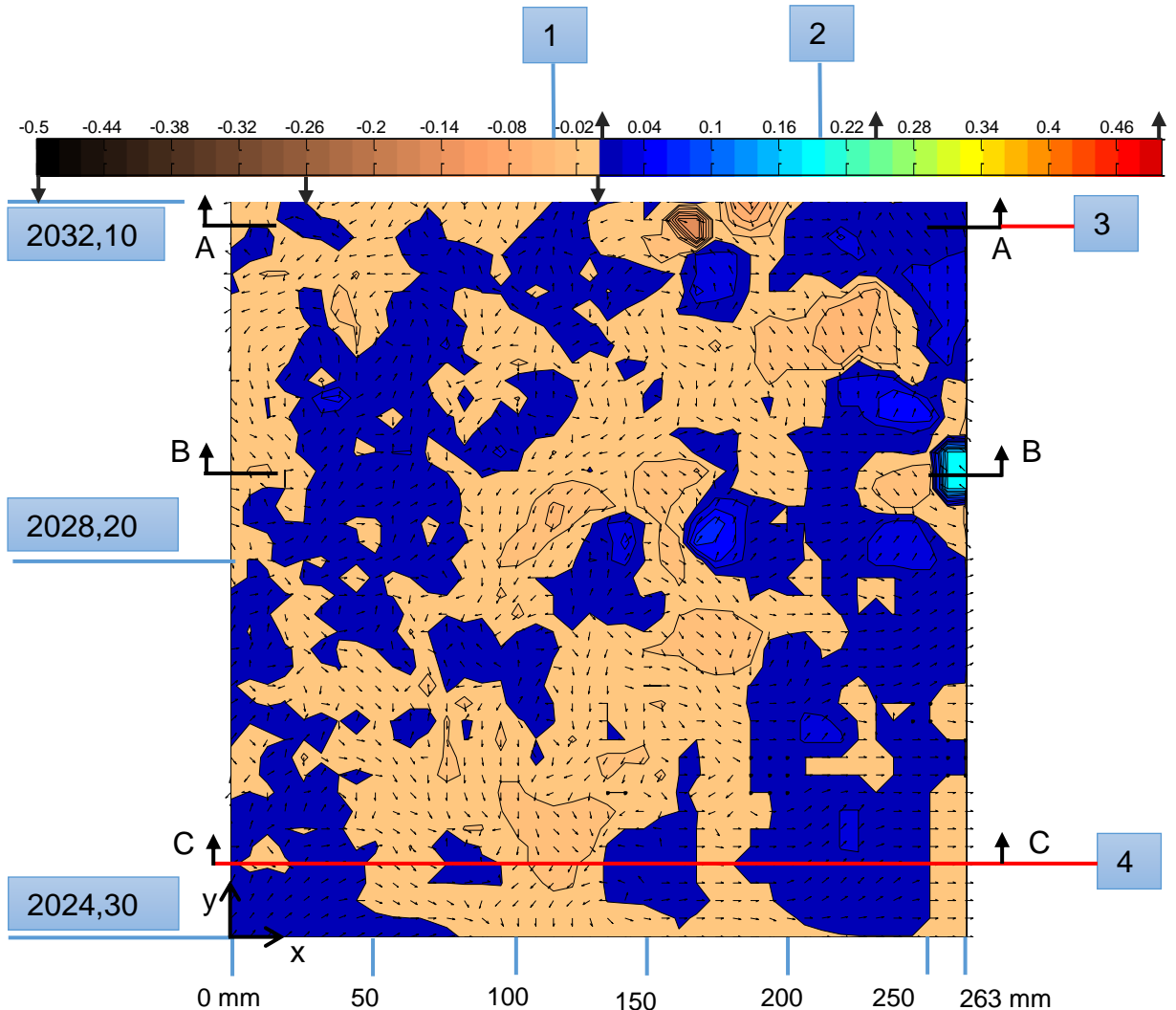


Abbildung 53: Geschwindigkeitsvektorenfeld für LF 2

Die Linien 1 bis 4 in der Abbildung 53 bedeuten folgendes:

- 1: Grenzgeschwindigkeit 0,0365 m/s, Aufstiegsgeschwindigkeit von Luftblasen auf den Modellversuch umgerechnet, Faktor $\sqrt{30} = 5,48 [-]$, Modellmaßstab 1:30.
- 2: Grenzgeschwindigkeit: 0,20 m/s, Aufstiegsgeschwindigkeit von Luftblasen.
- 3: Grenzlinie 0,20 m/s.

4: tatsächliche Lufteindringtiefe in der Naturanlage. Höhenkote: 2025,10 müA. Daraus folgt die zu erwartende Lufteindringtiefe der Blasen im Prototyp.

Der Modellversuch Krespa wird nach dem Ähnlichkeitsgesetz von Froude betrieben. Demnach ist die Froudezahl in der Natur und im Modell gleich groß. Der Modellmaßstab beträgt 1:30, wodurch die geometrischen Abmessungen des Modells 30-mal kleiner sind als die des Prototyps. In Abhängigkeit des Modellmaßstabs lassen sich die Größen Zeit, Geschwindigkeit und Durchfluss umrechnen.

Froude'sche Modellskalierung bedeutet, dass die Fließgeschwindigkeit des Wassers im hydraulischen Modell um den Faktor $\sqrt{\text{Modellmaßstab}}$ schneller gegenüber der Natur dargestellt wird. Die Luftblasen im Modellversuch haben allerdings einen vergleichbaren Durchmesser wie in der Natur. Die Blasen werden durch die eindringenden Fallstrahlen des Wasserfalls aus der Oberkammer in den Steigschacht gebildet. Betrachtet man die Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen, so ist diese in etwa gleich groß wie bei einer Naturanlage. Das heißt der Luftblasenaufstieg wird im Modellversuch zu schnell dargestellt. (Richter et al., Ermittlung der Lufteindringtiefe eines Wasserfalls in einem Wasserschloss, 2013)

Die Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen hängt nur von der Dichte und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit ab und ist unabhängig von den Parametern des eindringenden Strahls (Clanet & Lasheras, 1997). Sie liegt in etwa bei 0,20 m/s (Kobus, 1991).

Die maximale Lufteindringtiefe ist erreicht, wenn zwischen der Geschwindigkeit des eindringenden Strahls und der Blasenauftiegeschwindigkeit Gleichgewicht herrscht. In Froude'schen Modellversuchen wird daher die Lufteindringtiefe zu gering tief abgebildet. Die Grundregel Gleichgewicht der Geschwindigkeiten ist die Basis für die Umrechnung der Lufteindringtiefe auf die Größenordnung der Naturanlage (Clanet & Lasheras, 1997).

Wie aus Abbildung 53 ersichtlich wird die Aufstiegsgeschwindigkeit von Luftblasen bereits bei der Schnittlinie A-A (Abbildung 54) auf Höhe 2031,80 müA. er-

reicht. Wie aus den vorhin beschriebenen Umständen bekannt, ist dies jedoch nicht die Grenze für den Eintrag von Luftblasen zufolge des Wasserfalls. Luftblasen dringen noch tiefer in den Steigschacht ein. Rechnet man die Aufstiegs-
geschwindigkeit $v_{gr,N}$ von 0,20 m/s in der Natur auf die Modellverhältnisse um, so ergibt dies $v_{gr,M} = 0,0365$ m/s.

$$v_{gr,M} = \frac{v_{gr,N}}{\sqrt{M}} = \frac{0,20}{\sqrt{30}} = 0,0365 \text{ m/s} \quad (7.1)$$

$v_{gr,N}$Aufstiegsgeschwindigkeit in der Natur [m/s]

$v_{gr,M}$Aufstiegsgeschwindigkeit im Modellversuch [m/s]

MFroude'scher Modellmaßstab [-]

In der Naturanlage werden also Luftblasen bis zur Linie 4 auf eine Höhe von 2025,10 müA. eingetragen. Der Wasserspiegel im Steigschacht lag während der Messung von Lastfall 2 auf 2045,90 müA. Das bedeutet die Luftblasen dringen ca. **20,80 m** tief in den Steigschacht ein.

Die Schnitte A-A, B-B und C-C sind in der Abbildung 54, Abbildung 55, und in der Abbildung 56 dargestellt. Sie dienen zur Veranschaulichung der Strömungsverhältnisse des Lastfalls 2 in verschiedenen Höhenlagen. Der Schnitt C-C liegt genau auf der Höhenlage wo die Lufteintragstiefe in der Naturanlage (Prototyp) zu erwarten ist.

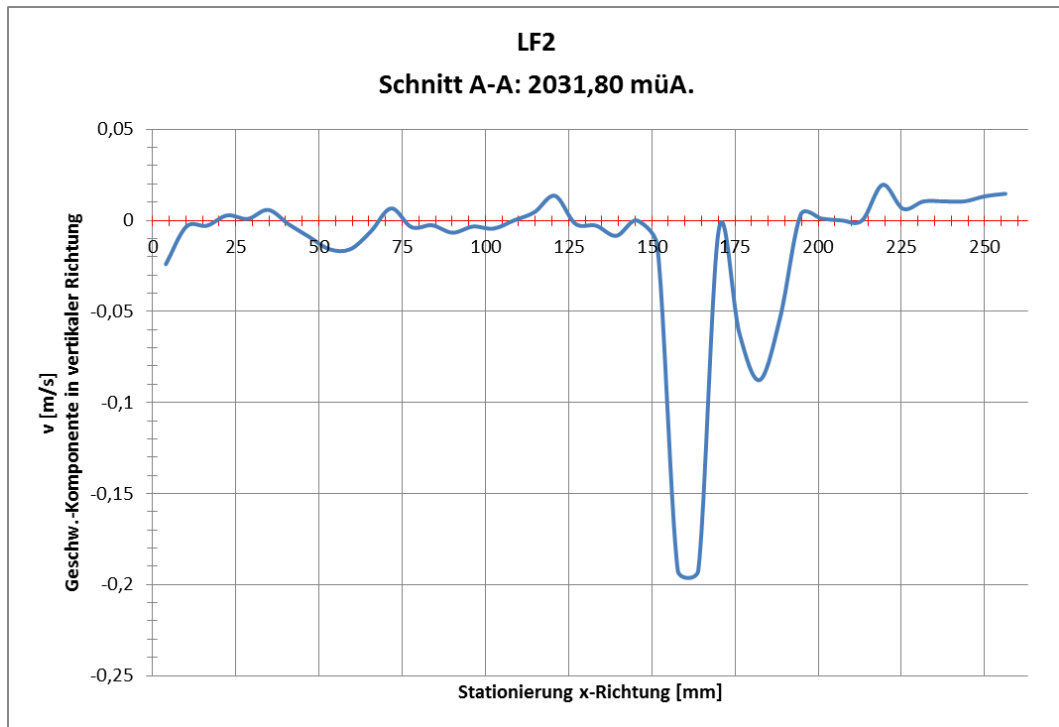


Abbildung 54: Schnitt A-A, LF 2

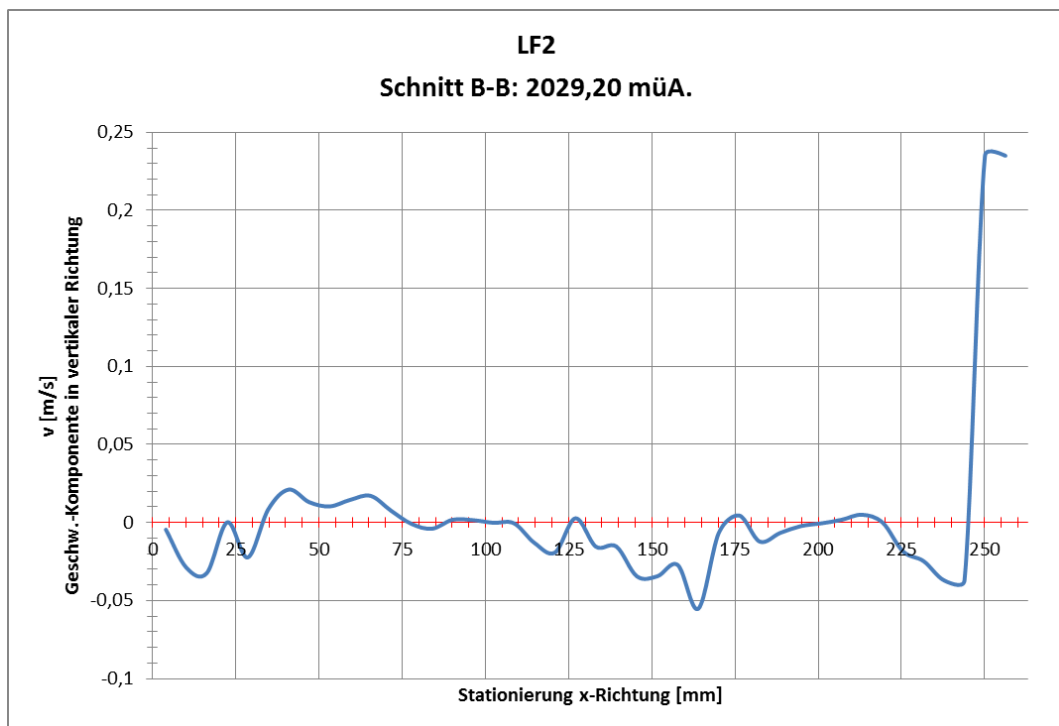


Abbildung 55: Schnitt B-B, LF 2

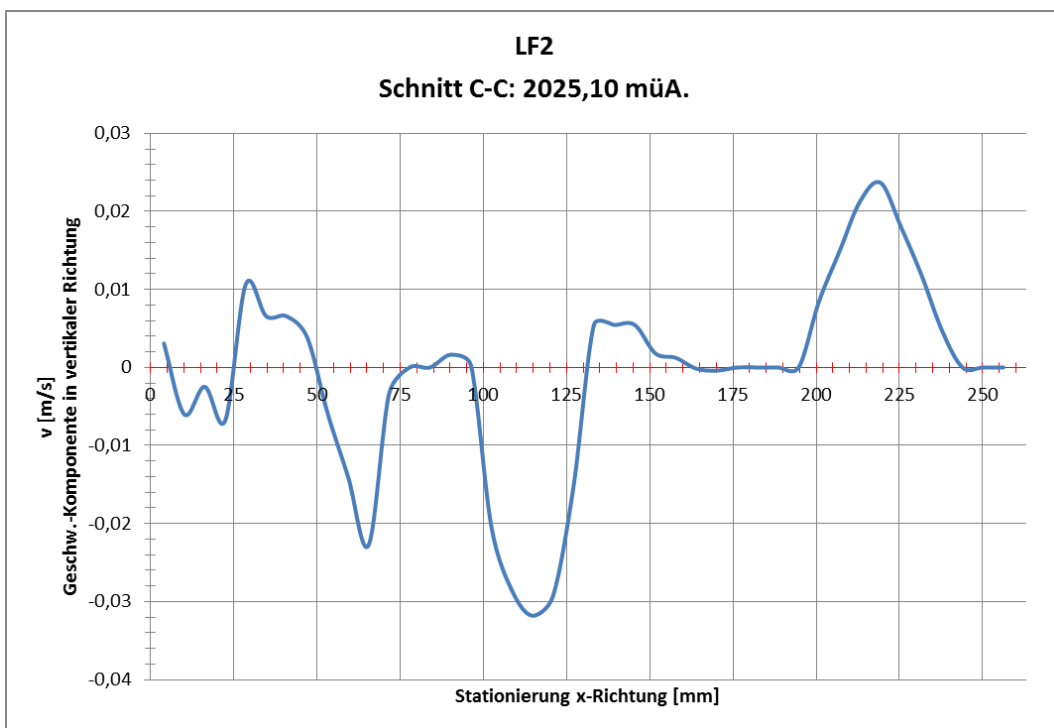


Abbildung 56: Schnitt C-C, LF 2

7.7.3 Verhältnis der Lufteintragstiefe Modell zu Prototyp

In Tabelle 6 sind die wesentlichen Aussagen der PIV Messungen angeführt:

Tabelle 6: Zusammenfassung der Messergebnisse

	Wasserspiegel	Lufteintragshorizont	Lufteintragstiefe t_L
Modellversuch (LF1)	2034,00 müA.	2030,00 müA	4,00 m
Prototyp (LF2)	2045,90 müA.	2025,10 müA.	20,80 m

Das Verhältnis der Lufteintragstiefe von Modellversuch zu Naturanlage (Prototyp) ergibt sich zu:

$$\frac{t_{L,N}}{t_{L,M}} = \frac{20,80}{4,00} = 5,20 \quad (7.2)$$

$t_{L,N}$ Lufteintragstiefe in der Naturanlage [m]

$t_{L,M}$ Lufteintragstiefe im Modellversuch [m]

Der Geschwindigkeitsmaßstab bei Froude'scher Ähnlichkeit beträgt: Maßstabszahl der Geschwindigkeit v_M ist gleich der Wurzel aus der Maßstabszahl der Längen. Dies resultiert daraus, dass die Gravitationskonstante g in Natur und Modell gleich groß ist. Aus der eben genannten Beziehung für den Geschwindigkeitsmaßstab lassen sich noch weitere Übertragungsregeln für Länge, Fläche, Zeit und Durchfluss ableiten (Martischinig, 1988). Die Übertragungsregeln sind in Tabelle 7 angeführt:

Tabelle 7: Übersicht über die Übertragungsregeln nach Froude (Kobus et al., 1984)

Längen	$M = \frac{L_N}{L_M}$
Flächen	$A_M = M^2$
Geschwindigkeiten	$v_M = M^{1/2}$
Zeiten	$t_M = \frac{M}{v_M} = M^{1/2}$
Durchflüsse	$Q_M = v_M \times A_M = M^{5/2}$

Berechnet man den Umrechnungsfaktor für die Geschwindigkeit zwischen Modellversuch und Prototyp für den konkreten Fall des Modellversuchs Krespa (Maßstab 1:30), so ergibt sich dieser zu:

$$v_M = M^{1/2} = 30^{1/2} = 5,48 [-] \quad (7.3)$$

Der Umrechnungsfaktor für die Geschwindigkeit bewegt sich in derselben Größenordnung wie das Verhältnis der Lufteindringtiefe im Prototyp zum Modellversuch. Dies bedeutet, dass das Verhältnis der Lufteindringtiefe Naturanlage zu Modellversuch in etwa der Wurzel aus dem Froude'schen Modellmaßstabsfaktor beträgt und bestätigt somit die zu untersuchende Forschungsfrage:

$$\frac{t_{L,N}}{t_{L,M}} \cong \sqrt{M} \quad (7.4)$$

Die in Abschnitt 7.7 gezeigten Darstellungen der Geschwindigkeitsvektorenfelder wurden mit den Matlab® Colormaps (Farbskalen) „copper“ für die Abwärtsströmung und „jet“ für die Aufwärtsströmung abgebildet. Durch beiden Colormaps kann sehr gut zwischen Aufwärts- und Abwärtsströmung unterschieden werden. Allerdings sind die verschiedenen Brauntöne der Colormap „copper“ in manchen Fällen schwer voneinander zu differenzieren. Deswegen befinden sich die selben Geschwindigkeitsvektorenfelder des Abschnitt 7.7 nochmals im Anhang. Dort sind diese mit anderen Matlab® Colormaps dargestellt. Eine Übersichtsgrafik über die verfügbaren Farbskalen im Programm Matlab ist ebenfalls im Anhang zu finden.

8. Resümee

„Wie tief dringen Luftblasen in den Steigschacht des Wasserschloss Krespa ein und in welchem Verhältnis steht die Luftblaseneindringtiefe im Modell zum Prototyp?“, so lautete die Forschungsfrage für die vorliegende Masterarbeit. Es wurden deswegen folgende Themengebiete beleuchtet:

- Projekt Obervermuntwerk II
- Wasserschlösser im Allgemeinen
- Lufteintragstiefe in der Literatur
- Particle Image Velocimetry
- PIV Messungen am Modellversuch Krespa

Es folgt nun die Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse:

8.1 Zusammenfassung

Die Ursache für den Lufteintrag ist ein Wasserfall, der sich bei bestimmten Schaltfällen ergibt. Es kommt zu einem Abreißen der Wassersäule in der Kopfkaverne und das aus der Oberkammer nachströmende Wasser ergießt sich als Wasserfall in den Steigschacht.

Der **Lufteintragshorizont im Steigschacht** des Wasserschloss Krespa wurde mit Hilfe der PIV Messungen definiert:

Im **Modellversuch** werden Luftblasen durch den einfallenden Wasserfall bis auf eine Tiefe von 4,00 m unterhalb des Wasserspiegels eingetragen. Die maximale Eintragstiefe von Luftblasen ist erreicht, wenn die Geschwindigkeit der Abwärtsströmung gleich der der Blasenauftiegeschwindigkeit (ca. 0,2 m/s) ist. Das Aufsteigen von Luftblasen wird in einem Modellversuch nach dem Ähnlichkeitsgesetz von Froude zu schnell dargestellt.

Die **Lufteindringtiefe im Prototyp** (Naturanlage) ist daher wesentlich größer als im Modellversuch. Dies kann durch den Froude'schen Umrechnungsfaktor

für die Geschwindigkeit zwischen Natur und Modell berücksichtigt werden. Es ergibt sich eine neue Grenzgeschwindigkeit und somit eine neue Grenztiefe bis zu der Luftblasen eindringen. Die zu erwartende Lufteintragstiefe im Prototyp liegt 20,80 m unterhalb des Wasserspiegels im Steigschacht.

Das **Verhältnis der Lufteintragstiefe** im Prototyp (20,80 m) und im Modellversuch (4,00 m) beträgt 5,20. Es liegt ca. in der Größenordnung von der Wurzel aus der Modellmaßstabszahl ($\sqrt{M} = \sqrt{30} = 5,47$) und bestätigt den Ansatz mittels der Froude'schen Geschwindigkeitsskalierung. Es kann daher aufgrund der durchgeführten PIV Messungen die Hypothese des Zusammenhangs der Froude'schen Geschwindigkeitsskalierung als Maßstabsfaktor für die maximale Lufteindringtiefe in einem Steigschacht bestätigt werden.

In den Darstellungen der Geschwindigkeitsvektorfelder kommen in den Bereichen mit aufsteigender Strömung lokal höhere Geschwindigkeiten vor als in unmittelbarer Umgebung. Hier steigen Luftblasen nach oben. Deren **Aufstiegsgeschwindigkeit** deckt sich mit Angaben aus der Literatur, wie z. B. (Arch, 2008), (Chanson et al., 2002), (Clanet & Lasheras, 1997), (Ervine & Falvey, 1987) und (Kobus, 1991).

8.2 Ausblick

- Zur Untermauerung der Aussage über das Verhältnis der Lufteindringtiefe Modellversuch zu Prototyp werden noch weitere Lastfälle mit unterschiedlichen Wasserspiegeln und Durchflüssen empfohlen.
- Die weiteren Lastfälle sollten vergleichend mit zusätzlichen Tracer-Partikeln (Seeding) durchgeführt werden. Neben dem natürlichen Seeding in der Strömung befindet sich dann auch von extern zugegebene Partikel im Wasser. Dies bedeutet eine höhere Dichte an Partikeln und bringt folgende Vorteile:
 - Es wird sichergestellt, dass genügend Partikel pro Interrogation-Area vorhanden sind, um ein lückenloses Geschwindigkeitsvektorenfeld zu erhalten. Außerdem kann die Größe der Interrogation-

- Areas verkleinert werden und somit können die Unterschiede in der Strömungsgeschwindigkeit noch genauer dargestellt werden.
- Während der PIV Messungen am Modellversuch Krespa konnten immer wieder zusätzliche sehr kleine Luftblasen im Steigschacht beobachtet werden. Diese entstehen vermutlich durch die hohe Fließgeschwindigkeit in der Oberkammer. Die eindeutige Unterscheidung zwischen Seeding und sehr kleinen Luftblasen ist kaum möglich. Die größere Dichte an Tracer-Partikeln durch das zugegebene Seeding schafft hier Abhilfe.
 - Durch das zugegebene Seeding muss der Laser auch nicht mit so hoher Intensität betrieben werden, um die Partikel sichtbar zu machen. Eine geringere Laserintensität bedeutet weniger Reflexion des Laserstrahls am Plexiglas.
 - Die Möglichkeit der Verwendung von Wachspartikeln (Pörschke & Hagedorn, 2014) als umweltfreundliche Alternative zu Kunststoffpartikeln (Polyamid) könnte näher untersucht werden.
- Die weiteren Messungen am Modellversuch Krespa erfordern eine Veränderung am Wasserzulauf in die Oberkammer. Wie aus Abbildung 36 ersichtlich ist die Zulaufleitung sehr steil, deswegen entsteht eine hohe Fließgeschwindigkeit in der Oberkammer.
 - Dadurch kommt es immer wieder zu einem Überschwappen des Wassers aus der Oberkammer an der Balkonbrüstung in der Kopfkaverne. Eine sehr geringe Wassermenge aus der Oberkammer umgeht so das Dämpfungselement für den Wasserfall und verändert so das Ergebnis der Geschwindigkeitsmessungen. Die Aufprallgeschwindigkeit der Jets, welche über die Balkonbrüstung abfließen, ist wesentlich höher als die der durch die Durchlässe strömenden Fallstrahlen (siehe dazu Abbildung 49 rechts oben, weißer Bereich).

- Es wird vermutet, dass die vorhandenen Zulaufverhältnisse wahrscheinlich auch der Grund für zusätzlich in den Steigschacht eingebrachte sehr kleine Luftblasen sind.

Literaturverzeichnis

- Adventures in Loom-Science*. (28. September 2014). Von <http://loomsci.wordpress.com/2013/06/19/matlabs-built-in-colormaps/> abgerufen
- Arch, A. (2008). *Luft- und Austragsprozesse bei Anlagen mit Pelton-turbinen im Gegendruckbetrieb*. Dissertation TU Graz.
- Bauer, M. (März 2014). Balanceakt in den Alpen. *flow 08/2014*, S. 10-14.
- Bergant et al. (2006). Water hammer with column separation: A historical review. *Journal of Fluids and Structures*, 22, S. 135-71.
- Blind et al. (1987). *Wasserbauten aus Beton*. Berlin: Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften.
- Bretschneider et al. (1993). *Taschenbuch der Wasserwirtschaft* (Bd. 7. Auflage). Hamburg u. Berlin: Verlag Paul Parey.
- Chanson et al. (2002). Similitude of Air Bubble Entrainment and Dispersion in Vertical Circular Plunging Jet Flows. An Experimental Study with Freshwater, Salty Freshwater and Seawater. *Coastal/Ocean Engineering Report No. COE02-1*. Japan: Toyohashi University of Technology.
- Clanet, C., & Lasheras, J. (1997). Depth of penetration of bubbles entrained by a plunging water jet. *Phys. Fluids* 9 (7), S. 1864-1866.
- Dantec Dynamics*. (14. März 2014). Von Measurement Principles of PIV: <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv> abgerufen
- Dobler, W. (2012). *Hydraulic Investigations of a Y-bifurcator*. Dissertation, TU Graz: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.
- Ervine, D., & Falvey, H. (1987). Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools. *Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2(83)*, (S. 295-314).
- Giesecke et al. (2009). *Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb*. Springer-Verlag.
- Helmbert, G., & Wagner, P. (2005). *Skriptum zur Vorlesung Wahrscheinlichkeitslehre und Statistik*. Bau fakultät, Universität

- Innsbruck: Institut für Technische Mathematik, Geometrie und Bauinformatik.
- Johnson, R. (1908). The Surge Tank in Water Power Plants. *Transactions - American Society of Mechanical Engineers*, 443-501.
- Kobus et al. (1984). *DVWK Schriften 39: Wasserbauliches Versuchswesen, 2. revidierte Auflage*. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey.
- Kobus, H. (1991). Introduction to air-water flows. (Wood, Hrsg.) *Air entrainment in free-surface flows*, S. 1-28.
- Kopswerk2*. (26. August 2014). Von Technische Besonderheiten: <http://www.kopswerk2.at/inhalt/at/84.htm> abgerufen
- Link, B. (2006). *Wirbelschall des Jets einer Querflöte und seine akustische Abstrahlungsleistung*. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Mathematik und Physik, Staatsexamensarbeit im Studiengang Physik.
- Martischnig, G. (1988). *Energieumwandlung im Auftreffbereich frei fallender Wasserstrahlen*. Dissertation TU Graz.
- Nd:YAG-Laser*. (22. April 2014). Von <http://de.wikipedia.org/wiki/Nd:YAG-Laser> abgerufen
- Pörschke, S., & Hagedorn, S. (25. September 2014). *Biowachspartikel als Alternative zu Mikroplastik*. Von Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT: <http://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/2014/140612-mikroplastik.html> abgerufen
- Prasad, A. (10. Juli 2000). Particle image velocimetry. *CURRENT SCIENCE*, VOL. 79, S. 51-60.
- Projekt Obervermuntwerk II*. (22. Juli 2014). Von <http://www.obervermuntwerk2.at/> abgerufen
- Rathe, L. (Juni/Juli 1975). An innovation in surgechamber design. *Water Power & Dam Construction*, S. 244-248.
- Richter et al. (2013). Ermittlung der Luft eindringtiefe eines Wasserfalls in einem Wasserschloss. *Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, 15. JUWI Treffen Fachbeiträge zur Tagung*. Graz: TU Graz.
- Richter et al. (2013). Hybrid modelling and development of a long upper chamber in a surge tank. *Promoting the versatile role of hydro* (S. 03.07.1 - 03.07.9). Innsbruck: Aqua-Media International.

- Schaudel, S. (2001). *Untersuchungen am Luftstrom einer Querflöte mittels Particle Image Velocimetry*. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Physik, Wissenschaftliche Arbeit für die Zulassung zur Prüfung für das Lehramt an Gymnasien.
- Seeber, G. (1. Jänner 1970). Das Wasserschloss des Kaunertalkraftwerkes der TIWAG - Ein neuer Typ eines rückstromgedrosselten Kammerwasserschlosses. *Schweizerische Bauzeitung*.
- Strobl, T., & Zunic, F. (2006). *Wasserbau: Aktuelle Grundlagen - Neue Entdeckungen*. Springer-Verlag.
- Thoma, D. (1910). *Theorie des Wasserschlosses bei selbsttätig geregelten Turbinenanlagen*. Dissertation, Kgl. Technische Hochschule zu München: R. Oldenbourg.
- Udovicic, L. (2010). *Damit nichts ins Auge geht... - Schutz vor Laserstrahlung*. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).
- Vigander, S. (1984). *Bubbles, Drops and Friction on the Judgment Scale: Case Histories from TVA Engineering Laboratory's Model Tests*. Norris, Tennessee, USA: Engineering Laboratory Tennessee Valley Authority.
- Wegeler, G., & Gerstner, R. (2008). Das hochdruckseitige Wasserschloss des Kopswerks II – bauliche Planung, Konzeption und technische Ausführung. *Geomechanik und Tunnelbau 1, Heft 5*, 407-416.
- Zenz et al. (2014). *Modellbericht Wasserschloss Krespa - PSKW Obervermuntwerk II*. TU Graz.
- Zörweg, K. (2012). *Optimierung der RDC-Geometrie*. Masterarbeit TU Graz: Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip eines Lasers (Udovicic, 2010)	4
Abbildung 2: Projektübersicht Obervermuntwerk II (Projekt Obervermuntwerk II, 2014).....	7
Abbildung 3: Längenschnitt Obervermuntwerk II, (Zenz et al., 2014).....	8
Abbildung 4: derzeitige Druckrohrleitung Obervermuntwerk I, links Blick in Fließrichtung, rechts Blick gegen die Fließrichtung: Druckrohrleitung und Staumauer Silvrettasee.....	9
Abbildung 5: Längsschnitt Wasserschloss Krespa, (Zenz et al., 2014).....	11
Abbildung 6: 3D-Darstellung Wasserschloss Krespa, (Zenz et al., 2014)	12
Abbildung 7: Kraftkaverne OWWII (Projekt Obervermuntwerk II, 2014).....	13
Abbildung 8: Unterwasserführung (Projekt Obervermuntwerk II, 2014)	13
Abbildung 9: hydraulische Trennung des Triebwassersystems.....	19
Abbildung 10:Wasserschlosstypen (Prinzipskizzen) (Blind et al., 1987)	23
Abbildung 11: Druckluftwasserschloss (Anlage in Driva, Norwegen), (Rathe, 1975).....	23
Abbildung 12: Differentialwasserschloss mit getrennter Anordnung von Steigschacht und gedrosselter Kammer (Giesecke et al., 2009)	24
Abbildung 13: Wasserfall - Überfallbereich in der Kopfkaverne im Modellversuch Krespa	29
Abbildung 14: Bildfolge Wasserfall Modellversuch Krespa	30
Abbildung 15: Dämpfungselement in der Draufsicht (Zenz et al., 2014)	33
Abbildung 16: Schnitt A-A: Kopfkaverne mit Balkon und Lochdurchbrüchen (Zenz et al., 2014).....	33
Abbildung 17: Übergang Oberkammer zur Kopfkaverne.....	34
Abbildung 18: Dämpfungselement am Übergang der Kopfkaverne in den Steigschacht	34
Abbildung 19: Modellversuch Krespa (Foto TU Graz, Richter W.)	35

Abbildung 20: Druckstollen mit Abzweigung ins Wasserschloss.....	35
Abbildung 21: Oberkammer	36
Abbildung 22: links Detail Steigschacht mit den drei abzweigenden Unterkammern, rechts Bild: Steigschacht gesamt	36
Abbildung 23: Gleichgewicht aus Jetimpuls und Auftriebskraft	37
Abbildung 24: Lufteindringtiefe in einen Pool (Ervine & Falvey, 1987).....	39
Abbildung 25: schematische Darstellung einer PIV-Anlage (Dantec Dynamics, 2014).....	43
Abbildung 26: Laser, Laserarm noch nicht montiert	49
Abbildung 27: Austrittsstelle des Laserstrahls, Laserarm noch nicht montiert ...	49
Abbildung 28: Laserarm	50
Abbildung 29: Kühlaggregat	50
Abbildung 30: CCD-Kamera und die transparente Beobachtungsfläche (Plexiglas)	50
Abbildung 31: PIV-Rechner mit Auswertungssoftware	51
Abbildung 32: Warnschild - Vorsicht Laserklasse 4	52
Abbildung 33: Abschirmung des Messbereichs und Hinweisschilder	52
Abbildung 34: Warnleuchte	53
Abbildung 35: Laserschutzbrille	53
Abbildung 36: Zulaufleitung und Oberkammer des Modellversuchs Krespa	55
Abbildung 37: Highspeed Kamera und PIV-Box.....	56
Abbildung 38: Kalibrierrohr.....	56
Abbildung 39: Beleuchtung des Messbereichs mittels Laserstrahl.....	58
Abbildung 40: Skizze vom Messbereich.....	59
Abbildung 41: Schnitt a-a, Anordnung Laser und Kamera	60
Abbildung 42: Kameraaufnahmen bei 40 und 48 ms	61
Abbildung 43: Bildfolge, Wasserfall Modellversuch Krespa	63

Abbildung 44: Luftblasenpolster im Steigschacht, ausgelöst durch den Wasserfall aus der Oberkammer	64
Abbildung 45: Geschwindigkeitsvektorenfeld Nr. 1 für Lastfall 1	65
Abbildung 46: Schnitt A-A	66
Abbildung 47: Schnitt B-B	67
Abbildung 48: Schnitt C-C	68
Abbildung 49: Geschwindigkeitsvektorenfeld Nr. 2 für Lastfall 1	69
Abbildung 50: Schnitt A-A	70
Abbildung 51: Schnitt B-B	71
Abbildung 52: Schnitt C-C	71
Abbildung 53: Geschwindigkeitsvektorenfeld für LF 2	73
Abbildung 54: Schnitt A-A, LF 2	76
Abbildung 55: Schnitt B-B, LF 2	76
Abbildung 56: Schnitt C-C, LF 2	77
Abbildung 57: Geschwindigkeitsvektorenfeld Nr. 1 für Lastfall 1 – alternative Farbdarstellung von Abbildung 45	95
Abbildung 58: Geschwindigkeitsvektorenfeld Nr. 2 für Lastfall 1 – alternative Farbdarstellung von Abbildung 49	96
Abbildung 59: Geschwindigkeitsvektorenfeld für Lastfall 2 – alternative Farbdarstellung von Abbildung 53	97
Abbildung 60: Übersicht der Farbskalen (Colormaps) in der Software Matlab (Adventures in Loom-Science, 2014)	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennzahlen OVWII (Projekt Obervermuntwerk II, 2014)	5
Tabelle 2: Vergleich der Berechnungsmethoden für die maximale Lufteindringtiefe	40
Tabelle 3: PIV-Komponenten (Dobler, 2012)	48
Tabelle 4: Basisangaben zur Messung	57
Tabelle 5: Details zu den Lastfällen 1 und 2	60
Tabelle 6: Zusammenfassung der Messergebnisse	78
Tabelle 7: Übersicht über die Übertragungsregeln nach Froude (Kobus et al., 1984).....	79

Anhang

Es wird im Anhang das Skript für die automatische Auswertung der PIV Ergebnisse in der Software Matlab® dargelegt.

Außerdem werden die Geschwindigkeitsvektorenfelder (analog zu Abschnitt 7.7) werden mit anderen Matlab® Colormaps zur besseren Unterscheidung der Geschwindigkeitsbereiche abgebildet.

MATLAB® – Programme

kill_lines.m

```
%Skript zum 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:\Users\Matthias\Dropbox\Diplomarbeit\MATLAB\01_Krespa_Auswertung
\516_32x32\single\data')
n=input('Bitte Anzahl der dat-Dateien eingeben:');
for k=1:n

fid=fopen(sprintf('D%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
fclose all ;

end
```

krespa_load.m

```
%Skript zum Darstellen der Vektorfelder
%n=Zahl der Datensätze, die dat-Dateien müssen DD1.dat...DDn.dat hei-
ßen
%Grunlage 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:\Users\Matthias\Dropbox\Diplomarbeit\MATLAB\01_Krespa_Auswertung
\516_32x32\single\data')
n=input('Bitte Anzahl der dat-Dateien eingeben:');

for k=1:n %Schleife zum Plotten und Speichern der Vektorfelder aus den
PIV Messungen
matti = load (sprintf('DD%d.dat',k)); %Laden der dat Files

matrix = matti;
MATRIX_UI(:,1)=matti(:,9).*0.8;
MATRIX_VI(:,1)=matti(:,10).*0.8;

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

```

        YI= matti(:,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); %#ok<GRIDD>
        V = griddata(XI,YI,VI,X,Y); %#ok<GRIDD>
        Vel = griddata(XI,YI,VELI,X,Y); %#ok<GRIDD>

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

            axis equal

            speichern=sprintf('Fuenfhundert16_32_%d',k); %Erstellt Bezeich-
nung 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

```

Alternative Farbdarstellung der Geschwindigkeitsvektorenfelder des Abschnitts 7.7:

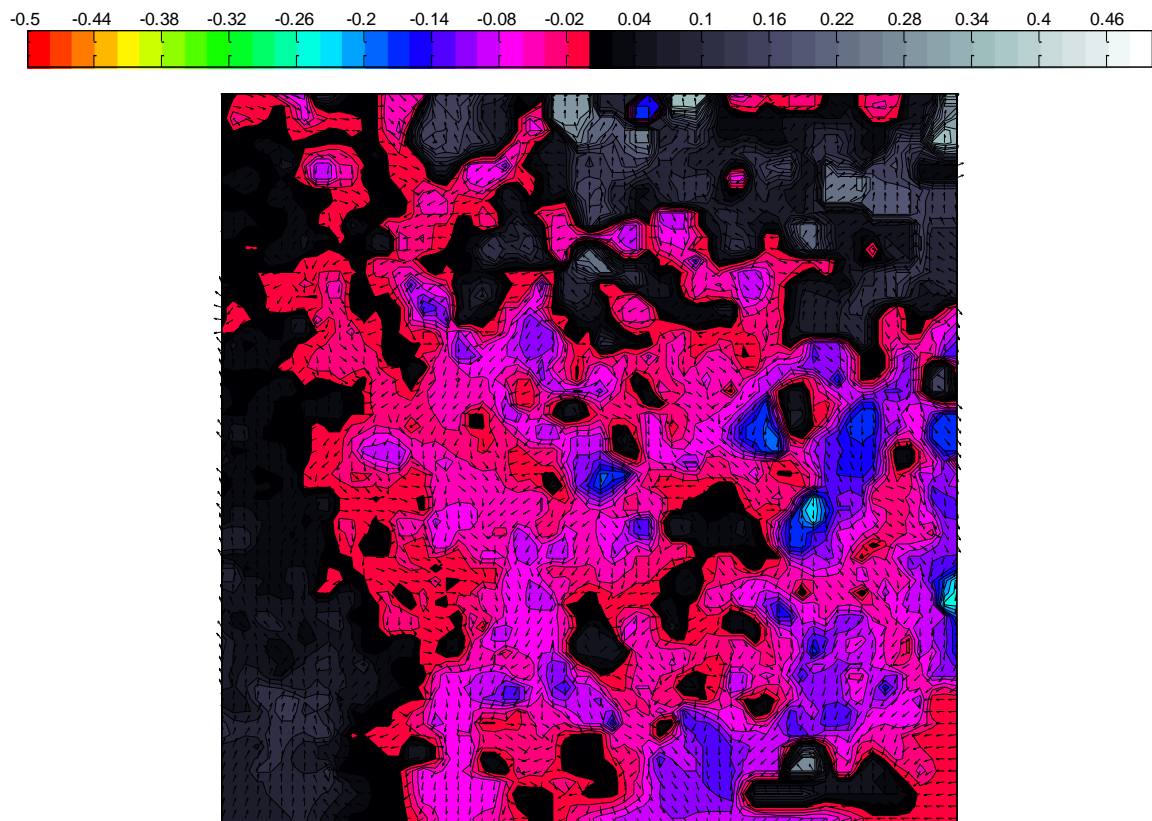


Abbildung 57: Geschwindigkeitsvektorenfeld Nr. 1 für Lastfall 1 – alternative Farbdarstellung von Abbildung 45

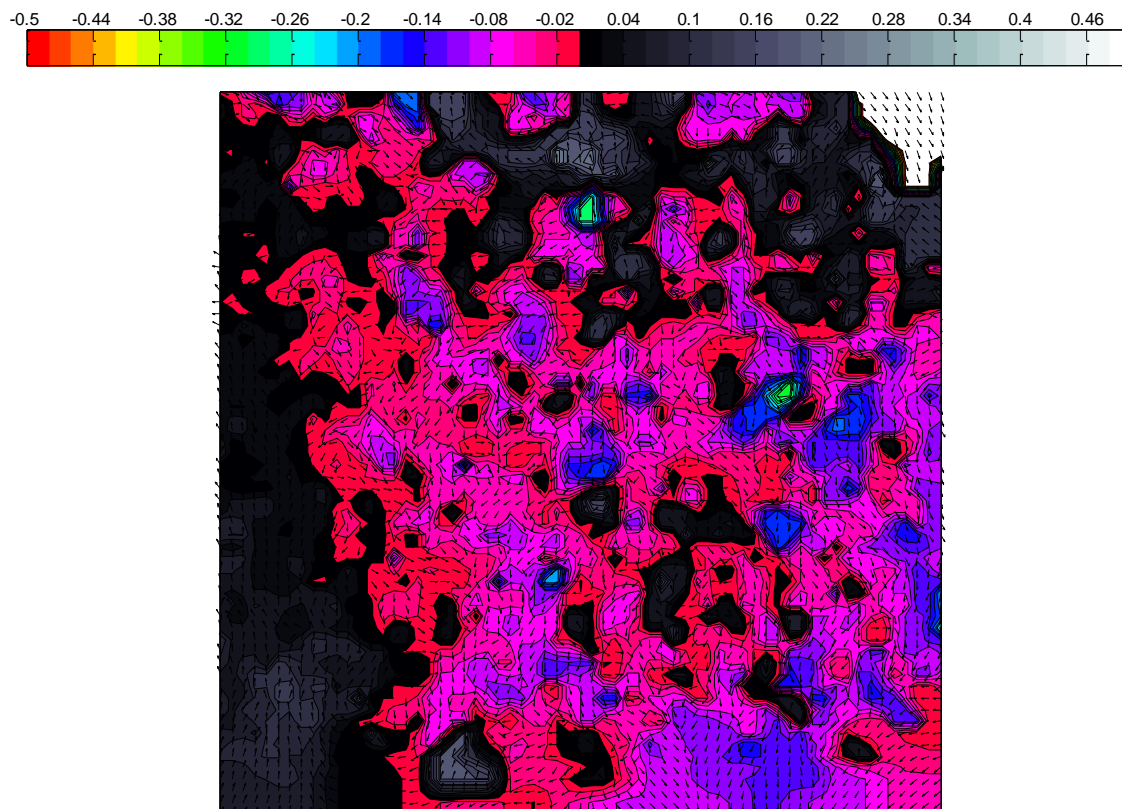


Abbildung 58: Geschwindigkeitsvektorenfeld Nr. 2 für Lastfall 1 – alternative Farbdarstellung von Abbildung 49

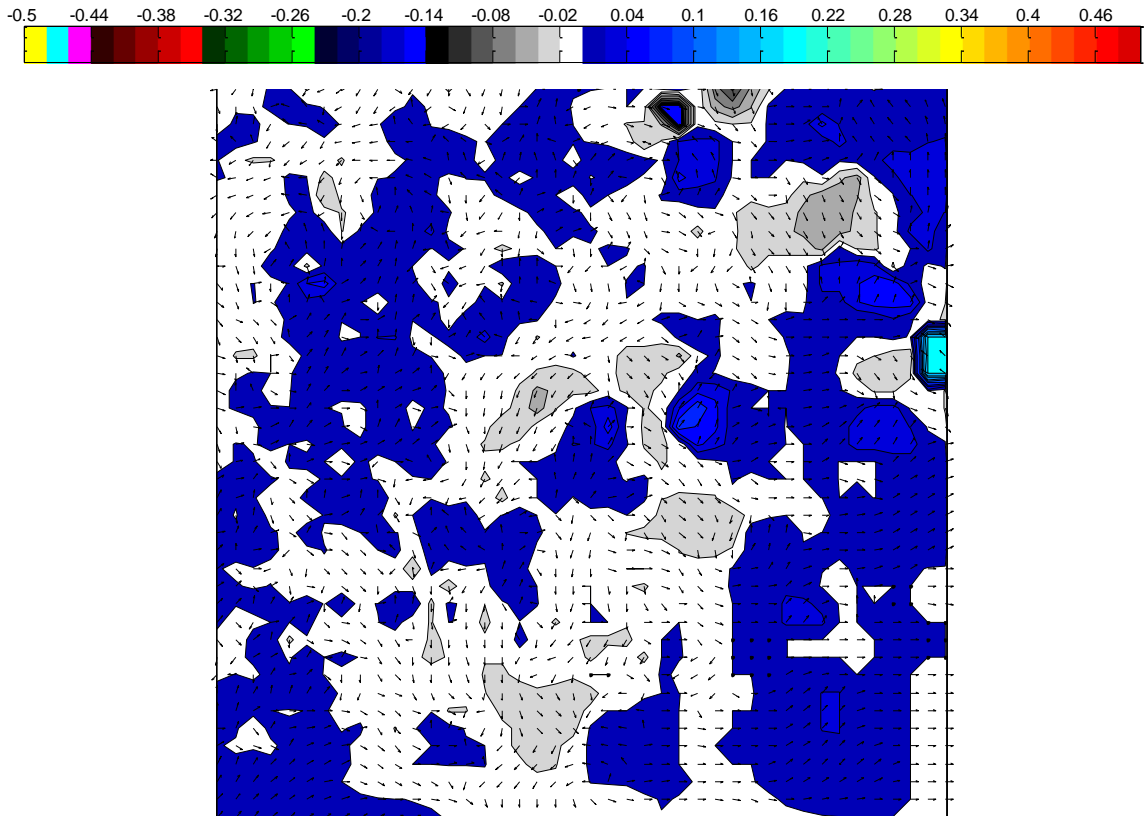


Abbildung 59: Geschwindigkeitsvektorenfeld für Lastfall 2 – alternative Farbdarstellung von Abbildung 53

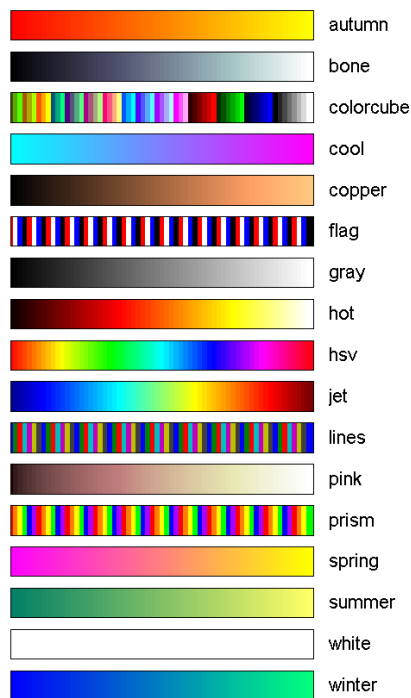


Abbildung 60: Übersicht der Farbskalen (Colormaps) in der Software Matlab (Adventures in Loom-Science, 2014)