



Richard WECHTITSCH, BSc

Modellierung von Stollenspeicher

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

Dipl.-Ing. Wolfgang RICHTER

EIDESSTÄTTLICHE 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.

AFFIDAVIT

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Die vorliegende Masterarbeit ist all jenen Menschen gewidmet, die keinen Zugang zur elektrischen Energie haben, die nicht einmal über Trinkwasser verfügen und einen stundelangen Marsch zur nächstgelegenen Wasserstelle in Kauf nehmen müssen. Möge die Ingenieurskunst besonders diesen Menschen zu mehr Wohlstand verhelfen!

Danksagung

Die Basis für eine spannende Masterarbeit ist eine interessante und herausfordernde Fragestellung. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei INFRA Project Development GmbH und ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH bedanken, dass Sie mit einer solchen Fragestellung an das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz herangetreten sind und somit dieses Thema im Rahmen einer Masterarbeit untersucht werden konnte. Danke für die gute Zusammenarbeit, für das Bereitstellen von den notwendigen Projektunterlagen und für die konstruktiven Diskussionsrunden.

DI Wolfgang RICHTER betreute die vorliegende Masterarbeit und hat wesentlichen Anteil am Gelingen der Arbeit. Seine fachliche Kompetenz, sein Optimismus und seine Motivationskunst waren der Motor dieser Forschungsarbeit. Lieber Wolfgang, vielen Dank für die tolle Zusammenarbeit!

Bedanken möchte ich mich auch bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald ZENZ, der mit seinem Know-how entsprechende Impulse setzte.

Neben meiner Studienzeit wurde mir die Möglichkeit geboten Praxiserfahrung im Wasserbau zu sammeln, eine großartige Chance das theoretische Wissen aus dem Hörsaal der Universität zu ergänzen. An dieser Stelle möchte ich meinen Dank an DI Dr.techn. Hermann KRAUSS und seinem Team für das übermittelte Fachwissen und für die angenehme Büroatmosphäre aussprechen.

Mein Bauingenieurstudium beinhaltet einige Hoch und Tiefs. Wenn man einmal am Boden liegt und die Dinge nicht so laufen wie geplant, ist es gut zu wissen, dass jemand hinter mir steht und mich wieder auf die Beine hilft. Herzlichen Dank an meine Familie für die moralische und monetäre Unterstützung während meines Bildungswegs.

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit einer beispielhaften Hochdruckwasserkraftanlage, deren Druckstollen als Speicher verwendet werden soll. Charakteristisch für Stollenspeicher ist der vorgesehene Wechsel des Abflussverhaltens zwischen Druck- und Freispiegelabfluss während des Füll- oder Entleervorgangs. Die durchgeführten 1D- numerischen Berechnungen mit *WANDA* von *Deltares Systems* geben Aufschluss über die Fließvorgänge, die bei der Bewirtschaftung von Speicherstollen auftreten. Mögliche hydraulische Problemstellen werden dabei beleuchtet und erörtert.

Zu Beginn wird das Konzept einer Hochdruckwasserkraftanlage im Alpenraum beschrieben, jener Kraftwerkstyp, in dem der Speicherstollen eingegliedert wird. Die danach folgende Modellierung der Anlagenkomponenten einer untersuchten Wasserkraftanlage im alpinen Raum bildet die Basis für die 1D- numerischen Strömungsberechnungen. Das Resultat der Simulationen ist dabei eine Parameterstudie, um das hydraulische System zu untersuchen.

Den Abschluss bildet eine Empfehlung mit konstruktiven Optimierungen für zukünftige Wasserkraftanlagen mit Speicherstollen.

Abstract

This thesis deals with an example of a high-pressure hydro power plant whose headrace tunnel is to be used as a storage. The hydraulic behaviour of the system is investigated by 1D- numerical simulation using the software *WANDA 3.72*. Characteristic of tunnel storage is the provided change of the flow behaviour between pressurized and free surface flow during the filling or emptying. Possible hydraulic issues are examined and discussed.

Initially the concept of a high-pressure hydro power plant in the Alpine region is described. The storage tunnel is on approach of improving the range of operation. The following modelling of the system components of the investigated hydro power plant in the alpine area forms the basis for the 1-D numerical flow calculations. The core of the simulations is a parametric study to investigate the effects of single characteristic values on the hydraulic system. The conclusion is a recommendation with structural optimizations for future hydro power plants with storage tunnels.

Inhaltsverzeichnis

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG	ii
<i>AFFIDAVIT</i>	ii
Danksagung.....	iv
Kurzfassung	v
Abstract.....	vi
Inhaltsverzeichnis.....	vii
1. Abkürzungen und Begriffsbestimmungen	11
2. Einleitung	16
2.1 Einführung in Hochdruckwasserkraftwerke	17
2.2 Einführung in die Thematik der Stollenspeicherung.....	20
2.3 Ziel der vorliegenden Masterarbeit.....	21
3. Das Konzept eines Hochdruckwasserkraftwerks	22
3.1 Bauwerke und Anlagenkomponenten im Zulauf.....	22
3.1.1 Sperrenbauwerk	22
3.1.2 Anlagenkomponenten von Sperrenbauwerken	25
3.1.3 Speicher im Nebenschluss	30
3.1.4 Wasserfassung.....	32
3.1.5 Entsander	35
3.2 Triebwasserweg	37
3.2.1 Flachstrecke zwischen Einlaufbauwerk und Wasserschloss.....	38
3.2.2 Wasserschloss	40
3.2.3 Schnellschlussorgane.....	43
3.2.4 Kraftabstieg	44
3.2.5 Sohlstollen.....	45
3.3 Krafthaus und der Unterwasserbereich.....	46
3.3.1 Turbinenebene	48
3.3.2 Maschinenhalle.....	50
3.3.3 Elektrotechnische Ausrüstung	50

3.3.4	Betriebsräumlichkeiten	50
3.3.5	Unterwasserkanal und Schwallausgleichsbecken	51
3.3.6	Energieableitung.....	52
4.	Stollenspeicherung	53
4.1	Wirtschaftliche Aspekte	53
4.2	Hydraulische Aspekte.....	53
4.3	Speicherstollen des untersuchten Wasserkraftwerks.....	58
5.	1D- numerische Software für transiente Simulationen	61
5.1	Kriterien für die Wahl geeigneter Software.....	61
5.2	Analyse der Einsatztauglichkeit von <i>WANDA 4.2</i> für die 1D- numerischen Berechnungen	63
5.2.1	Massenerhaltung bei <i>WANDA 4.2</i> vorerst nicht gegeben	63
5.2.2	Massenschwingung des Free Surface Flow Pipe Elements von <i>WANDA 4.2</i>	69
5.3	Analyse der Einsatztauglichkeit von <i>ITM</i> für die 1D- numerischen Berechnungen.....	70
6.	Simulation der Fließvorgänge bei Stollenspeicher	73
6.1	Einführung in <i>WANDA 3.72</i> , eine Software für die 1D- numerische Berechnung von Pipeline- Systemen	73
6.1.1	Elemente für die hydraulische Modellierung von Rohrsystemen.....	74
6.2	Modellbildung	79
6.2.1	Modellabgrenzungen	81
6.2.2	Entsanderkammer	82
6.2.3	Endschwelle des Entsanders	83
6.2.4	Einlaufbecken	84
6.2.5	Einlaufverlust	85
6.2.6	Dükerleitung	85
6.2.7	Steigstollen	86
6.2.8	Speicherstollen	87
6.2.9	Schrägstollen.....	88
6.2.10	Schachtwasserschloss mit dazugehöriger Drossel	89
6.2.11	Lotschacht	90
6.2.12	Krümmen.....	90
6.2.13	Druckrohrleitung des Sohlstollens	90

6.2.14	Verluste im Bereich des Krafthauses	90
6.2.15	Turbine	90
7.	1D- numerische Berechnungen	92
7.1	Untersuchte Lastfälle.....	92
7.2	Parameterstudie	93
7.3	Ergebnisse der 1D- numerischen Berechnungen	94
7.3.1	LF Anfahren 180, System 80, Q= 12 m ³ /s	94
7.3.2	LF Anfahren 180, System 80, variabler Durchfluss	96
7.3.3	LF Anfahren 180, Q= 12 m ³ /s, System 80 mit variabler Wasserschlossquerschnittsfläche.....	99
7.3.4	LF Anfahren 180, Q= 11 m ³ /s, System 80 mit variabler Wandrauigkeit des Speicherstollens.....	100
7.3.5	LF Anfahren 180, System 80 mit variablem Durchmesser des Speicherstollens und maximalem Durchfluss	102
7.3.6	LF Anfahren mit variabler Anfahrzeit der Turbinen, System 80, Q= 11 m ³ /s.....	104
7.3.7	LF Anfahren 180, Q= 12 m ³ /s, System 80 mit variabler Neigung des Speicherstollens.....	106
7.3.8	LF Start Stopp, Q= 11 m ³ /s, System 80.....	107
7.3.9	LF Start Stopp, Q= 11 m ³ /s, System 80 mit einem Wasserschlossquerschnitt von 200 m ²	109
7.3.10	LF Start Stopp, Q= 11 m ³ /s, System 90.....	111
7.3.11	LF Start Stopp, Q= 11 m ³ /s, System 100.....	113
7.4	Konstruktive Optimierungsmöglichkeiten	114
7.4.1	Optimierungsmöglichkeiten für das untersuchte Wasserkraftwerk.....	115
7.4.2	Optimierungsmöglichkeiten für zukünftige WKW Projekte mit Speicherstollenbewirtschaftung	116

8. Ausblick	118
9. Zusammenfassung	120
Literaturverzeichnis	123
Abbildungsverzeichnis	126
Diagrammverzeichnis.....	130
Tabellenverzeichnis	132
Anhang.....	133
Modell System 80: Ausgangsmodell, A3 Format	133
Modell System 90: fiktiver Überfall im Hochpunkt 1, A3 Format	134
Modell System 100: Verschlussorgan im Einlaufbecken, A3 Format.....	135

1. Abkürzungen und Begriffsbestimmungen

BHQ	Bemessungshochwasser
BSP- WKW	Beispiel Wasserkraftwerk
D	Durchmesser
FSF	Free Surface Flow
GA	Grundablass
HDWKW	Hochdruckwasserkraftwerk
HP	Hochpunkt
KELAG	Kärntner Elektrizitäts-Aktiengesellschaft
KH	Krafthaus
LF	Lastfall
müA	Meter über Adria
OW	Oberwasser
PSKW	Pumpspeicherkraftwerk
Q _A	Ausbaudurchfluss
SHQ	Sicherheitshochwasser
STZ	Stauziel
TBM	Tunnelbohrmaschine
TWW	Triebwasserweg
UW	Unterwasser
VEÖ	Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs
WS	Wasserschloss
WF	Wasserfassung
WKW	Wasserkraftwerk
WSP	Wasserspiegel

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis

Folgend werden Fachausdrücke erläutert, die in den weiteren Zeilen der Masterarbeit Verwendung finden.

- **Pumpspeicherkraftwerk (PSKW):** Ein PSKW ist ein Speicherkraftwerk, das neben Turbinen im Krafthaus auch mit Pumpen ausgerüstet ist. Überschüssige Energie im Stromnetz kann durch Pumparbeit abgeführt werden. Durch das Fördern von Wasser in einen höher liegenden Speicher wird elektrische in potenzielle Energie umgewandelt und gespeichert. PSKW finden in erster Linie ihren Einsatz in der Spitzenlastabdeckung, wofür besonders kurze Anfahrts- bzw. Abschaltzeiten der Turbinen und Pumpen Voraussetzung sind. Im Unterwasser (UW) des Krafthauses wird ein Speicherbecken benötigt, welches Wasser für den Pumpbetrieb zur Verfügung stellt.
- **Regelkraftwerk:** Einem elektrischen Verteilernetz muss genau so viel elektrische Energie zugeführt werden, wie gerade von den Verbrauchern benötigt wird. Kleinere Differenzen führen zur Änderung der Netzfrequenz und der Netzspannung, größere hingegen können ausgedehnte Stromausfälle auslösen. Grundlast- und Mittellastkraftwerke, wie Kohle-, Kern- und Laufkraftwerke stellen die Basis der Leistungsbereitstellung im Stromnetz dar. Daneben müssen Spitzenlastkraftwerke der Leistungsänderung im Netz folgen und mit einer hohen Dynamik und Flexibilität für Ausgleich sorgen können. Zu solchen Regelkraftwerken zählen PSKW und Gasturbinenkraftwerke (Wikipedia 2013). Der zunehmende Ausbau von Solar-, Windenergie, die eine schwankende Leistungsbereitstellung mit sich bringen, unterstreichen zusätzlich die Notwendigkeit von Regelkraftwerken.
- **Jahres-, Monats-, Wochen-, Tagesspeicher:** Die unterschiedlichen Speicherbezeichnungen geben Auskunft über die jeweiligen Füll- und Entleerungszyklen von Speicheranlagen. Jahresspeicher sind typisch für Speicherkraftwerke im alpinen Raum. Der wasserreiche Zufluss aufgrund der Schneeschmelze über die Sommer- und Herbstmonate füllt den Speicherraum und somit steht in der wasserarmen Winter- und Frühjahrszeit elektrische Energie aus Wasserkraft zur Verfügung. Bei geringerem Zu-

fluss wird der Speicher für einen kürzeren Bewirtschaftungszyklus bemessen. Bei Tagesspeicher wird das über die Nachtstunden gesammelte Wasser zu den Spitzenlastzeiten, die am Morgen, zu Mittags und am Abend auftreten, turbinert und damit elektrische Energie erzeugt. Eine wesentliche Rolle für die Größe eines Speichers spielen auch die örtlichen Gegebenheiten, die aufgrund begrenzter Platzverhältnisse das Speichervolumen begrenzen.

- **Triebwasserweg (TWW):** Als TWW wird der Transportweg des Wassers zwischen Einlaufbauwerk und Krafthaus eines Hochdruckwasserkraftwerks (HDWKW) bezeichnet. Seine wesentlichen Elemente sind: ein meist langer und flacher Druckstollen, ein Wasserschloss am Ende des Druckstollens und ein Kraftabstieg zu den Turbinen. Der Kraftabstieg kann untertags als Schrägstollen oder als Lotschacht und Sohlstollen ausgeführt werden, oder über Tage als Druckrohrleitung. Charakteristisch für den Kraftabstieg sind die dort herrschenden hohen Wasserdrücke.
- **Stollenspeicher:** Der Druckstollen eines HDWKW stellt neben der Transportfunktion des Triebwassers auch eine Speichermöglichkeit des Wasserkraftwerks (WKW) dar. Der Inhalt des Stollens wird regelmäßig über die Turbinen abgearbeitet und dann über den Einlauf wieder aufgefüllt. Die Abflusssituation im Stollen wechselt dabei zwischen Druck- und Freispiegelabfluss.
- **Resonanzschaltfälle:** Die Wassermassen in langen Druckstollen einer Hochdruckwasserkraftanlage stellen mit dem Speicher im Oberwasser und dem Wasserschloss am Ende des Druckstollens ein schwingungsfähiges System dar. Liegt die periodische Schaltfrequenz der Turbinen im Bereich der Eigenfrequenz der Wassermassen im Druckstollen, so kommt es zur Anregung des Systems und die Amplituden der Schwingungen nehmen zu.
- **1D- numerische Modellierung:** Für die 1D- numerischen Berechnungen von Rohrleitungssystemen kommen meist 1D- numerische Modelle zur Anwendung. Dabei wird das Gerinne als Stromröhre aufgefasst, in der

sich die Geschwindigkeit konstant über den Querschnitt verteilt und des Weiteren wird eine hydrostatische Druckverteilung angenommen. Energiehöhenverluste aufgrund der Turbulenz werden in den Wandrauigkeitsbeiwerten und in den Beiwerten für lokale Verluste berücksichtigt.

- **3D- numerische Modellierung:** Bei 3D- numerischen Simulationen werden die *Navier- Stokes Gleichungen* (NSG) räumlich und zeitlich diskretisiert und numerisch berechnet. Eine analytische Lösung der NSG ist bislang nur für einfache Problemstellungen möglich und deshalb erfolgt ein numerischer Lösungsvorgang. Abhängig vom verwendeten Turbulenzmodell und der Modellierungsgenauigkeit können prinzipiell alle Fließvorgänge abgebildet werden. 3D- numerische Berechnungen sind mit höherem Bearbeitungs- und Rechenaufwand verbunden, als 1D- numerische Simulationen es sind, und werden für Detailuntersuchungen eingesetzt, wo die räumliche Strömungsbildung von Bedeutung ist.
- **Hybride Modellierung:** Die hybride Modellierung vereint die Stärken der physikalischen (Modellversuch) mit der numerischen Modellierung. Eine numerische Vorabberechnung bildet die Grundlage für eine bereits frühe optimierte Lösung des physikalischen Modells, z. B. bei der Dimensionierung eines Wasserschlosses. Die Messungen am Modellversuch dienen zur Verifizierung des numerischen Modells. Zeitintensive Änderungen am physikalischen Modell können mit Hilfe der numerischen Simulation schnell auf ihre Auswirkungen geprüft werden. Des Weiteren lassen sich Parameter- und Variantenstudien schnell und einfach am numerischen Modell umsetzen.
- **WANDA 4.2** ist ein Produkt von *Deltares System*. *Deltares* ist ein unabhängiges Institut und in den Bereichen Wasser (Flussbau, Grundwasser, Küste und Meer), Grundbau und Infrastruktur tätig. Das eingegliederte *Deltares Software Centre* entwickelte bereits eine Vielzahl an Softwarelösungen für die oben genannten Schwerpunkte, die in der eigenen Forschung und bei Kunden in aller Welt Anwendung finden (Deltares 2014).

- **ITM** (*Illinois Transient Model*) ist eine 1D- numerische Simulationssoftware und findet seine Anwendung in der Simulation von transientem Abfluss in geschlossenen Gerinnen, die vom Freispiegelabfluss, über gleichzeitigen Freispiegel- und Druckabfluss (engl. Mixed Flow) in Rohrleitungen, bis hin zu reinem Druckabfluss reicht (Leon, Oberg 2013, S. 3). Die aktuelle Version des *ITM*, beschreibt ein „Two Equation Modell“: Der Freispiegelabflussberechnung liegt die 1D- Saint-Venant Gleichung zugrunde und für die Druckabflussberechnung wird die Theorie der 1D- kompressiblen Druckstoß- Gleichung angewendet. Für den Übergangsbereich von Freispiegel- auf Druckabfluss gelten Masse-, Impuls- u. Energieerhaltung (Leon, Oberg 2013, S. 4).

2. Einleitung

1896 als Werner von Siemens den elektrodynamischen Generator erfand, war der Grundstein für die Gewinnung von elektrischem Strom aus Wasserkraft gelegt. In der Nachkriegszeit des zweiten Weltkrieges wurde der Ausbau der Wasserkraft in Österreich stark forciert. Heutzutage werden jährlich 37 TWh erneuerbare Energie aus Wasserkraft erzeugt, was etwa 55 % des Gesamtstrombedarfs Österreichs entspricht (E-Control 2014).

Im Mai 2008 veröffentlichte die VEÖ¹ eine von Pöyry Energy GmbH verfasste Studie mit folgenden Schwerpunkten (Pöyry Energy GmbH 2008):

- Aktualisierung des Abflusspotenzials nach Schiller durch aktuelle hydrologische Daten
- Erhebung des Kraftwerksbestandes mit einer Engpassleistung größer 10 MW
- Ermittlung des Technisch- Wirtschaftlichen Gesamt- und Restpotenzials der Wasserkraft unter Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen

Der Studie kann man ein errechnetes Technisch- Wirtschaftliches Gesamtpotenzial von 56- 58 TWh Energie aus Wasserkraft entnehmen, das bedeutet wiederum ein mögliches Technisch- Wirtschaftliches Restpotenzial von 18- 20 TWh. Das Restpotenzial setzt sich aus dem Optimierungspotenzial (~1,4 TWh) bestehender Anlagen und dem Neuerschließungspotenzial (16,5 TWh) zusammen (Pöyry Energy GmbH 2008).

¹ Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs

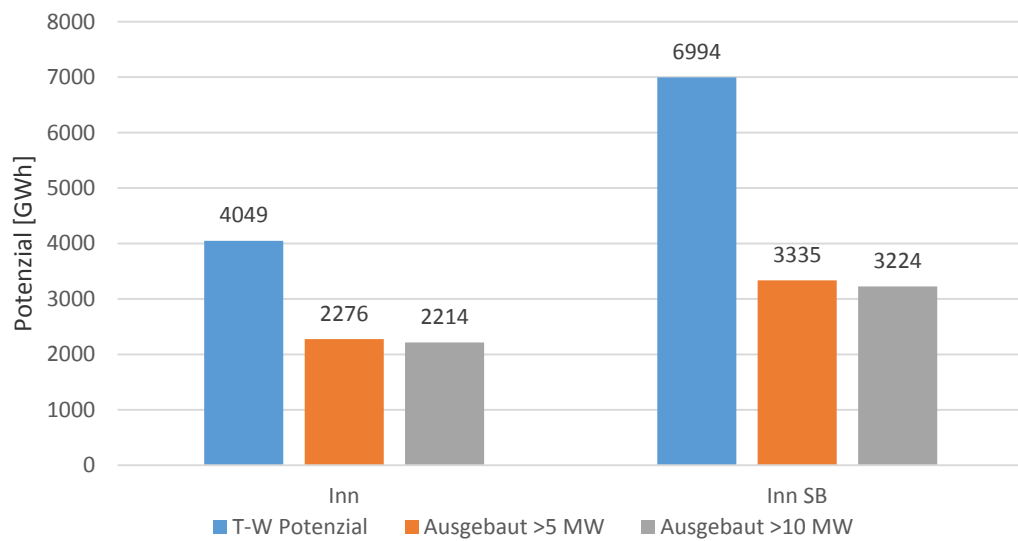


Diagramm 1: Gegenüberstellung des Technisch-Wirtschaftlichen Potenzials und des ausgebauten Potenzials am Inn und dessen Zubringern (Inn SB) (Pöyry Energy GmbH 2008)

Tirol verfügt laut Studie über ein Technisch- Wirtschaftliches Restpotenzial (siehe Diagramm 1) von etwa 1,77 TWh am Inn und 4,66 TWh an den Zubringern des Inns. Ein Großteil des Restpotenzials der Zubringer kann durch Hochdruckwasserkraftanlagen erschlossen werden- ein erprobter Kraftwerkstyp, der in den Alpen weit verbreitet ist.

2.1 Einführung in Hochdruckwasserkraftwerke

Unterteilt man WKW bezüglich ihrer Nutzfallhöhe, so sind HDWKW Anlagen mit einer Fallhöhe ≥ 50 m (siehe Abb. 1, S. 18). Meist sind sie als Speicherkraftwerke ausgeführt und sind daher besonders in der Spitzenlastabdeckung der täglichen Stromerzeugung gefragt (siehe Abb. 2, S. 18). Das Charakteristikum von Spitzenlastkraftwerken bildet eine hohe Engpassleistung und kurze Turbinenschaltzeiten.

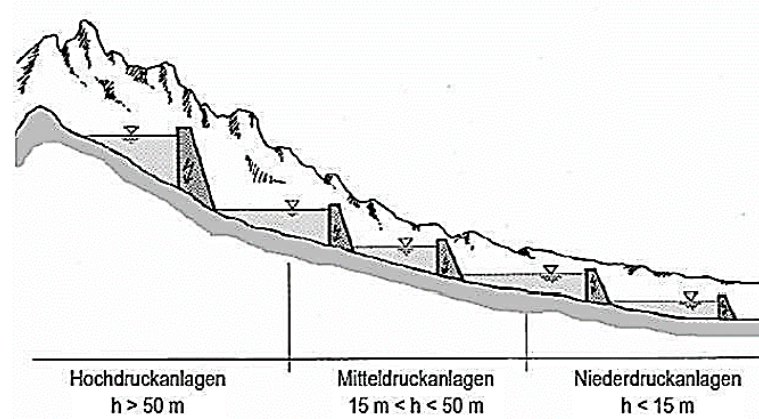


Abb. 1: Einteilung der Wasserkraftanlagen anhand der Nutzfalhhöhe (Strobl, Zunic 2006, S. 309)

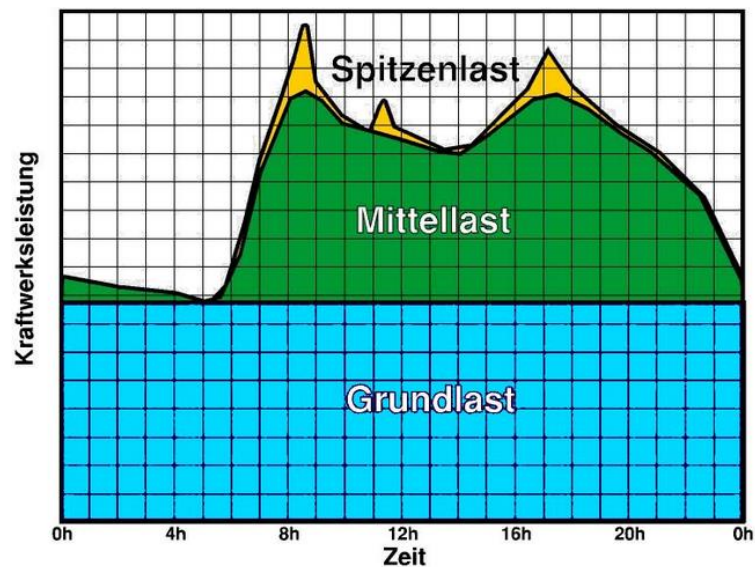


Abb. 2: Beispielhaftes Lastprofil der Stromerzeugung in Österreich (billig-strom.de 2014)

Die Topografie der Alpen, mit ihren ausgeprägten Trog- und V-Tälern, führt zu einem in der Vergangenheit alterprobten Design und Bauweise der WKW im alpinen Raum: Ein langer flachgeneigter TWW führt vom Speicher, entlang der Bergflanke, bis hin zum Talende. Das Wasserschloss bildet dann den Übergang zum Kraftabstieg oder Druckschacht. Über den Sohlstollen gelangt das Wasser

zu den Turbinen im Krafthaus oder in der Kaverne. Nach der Energieumwandlung wird das Wasser dem natürlichen Gewässer zurückgegeben. Oft geschieht die Rückgabe über ein Ausgleichsbecken, um die Schwall- und Sunkerscheinungen im natürlichen Gewässer zu minimieren. Zwischen Speicher und Rückgabebauwerk gibt es eine Vielzahl an Betriebseinrichtungen, die einen sicheren und langlebigen Betrieb der Anlage ermöglichen. Abb. 3 zeigt einen schematischen Längenschnitt durch ein typisches HDWKW.

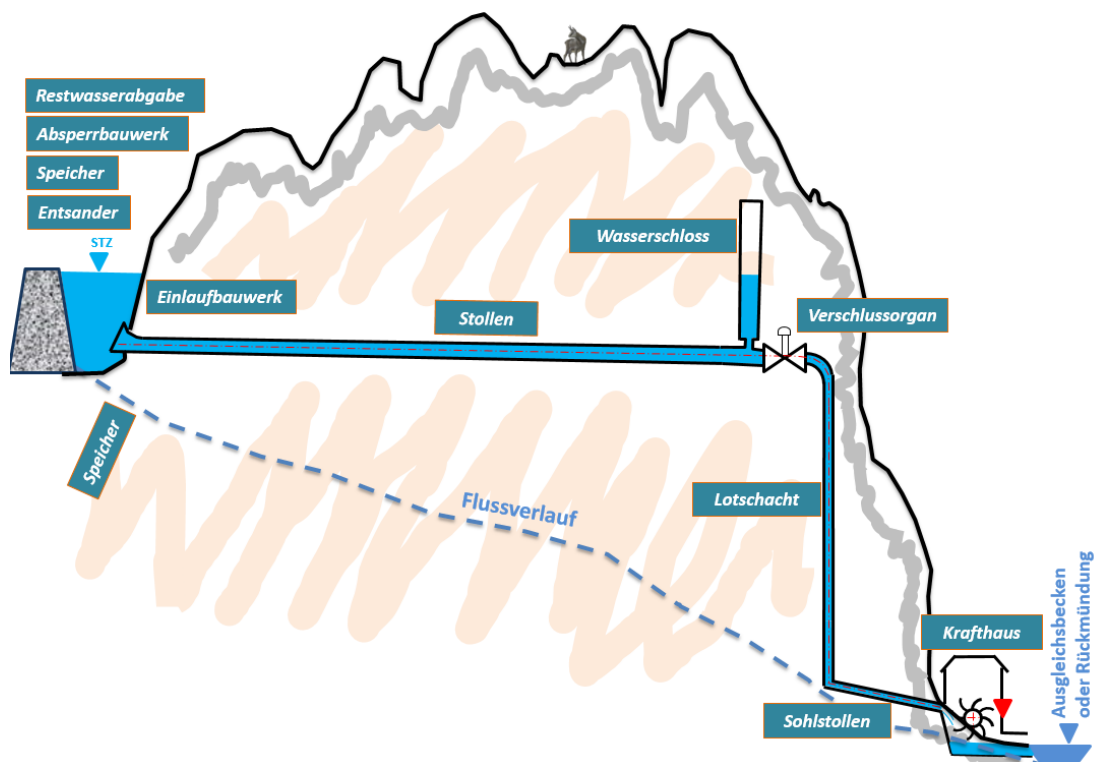


Abb. 3: Schemadarstellung einer Hochdruckwasserkraftanlage in den Alpen

Bei der Umsetzung einer Wasserkraftanlage kann aufgrund des mangelhaften Platzangebots oder einer ungünstigen Topografie im Gebiet der Wasserfassung (WF) die Anordnung eines Speicherbeckens entfallen. Um die ökonomischen Vorzüge einer Speichermöglichkeit trotzdem zu nützen, kann der Druckstollen des TWW eines HDWKW als Stollenspeicher genutzt werden.

2.2 Einführung in die Thematik der Stollenspeicherung

Neben seiner eigentlichen Aufgabe, dem Wassertransport, kann der Druckstollen eines HDWKW auch als Speicher Verwendung finden. Dadurch kann man dem Dargebot des Zuflusses und dem Energiebedarf der Verbraucher flexibler gegenüber treten. Den Vorteilen von zusätzlichem Speicherpotenzial stehen ungünstige hydraulische Abflussvorgänge gegenüber, welche bei der Bewirtschaftung von Stollenspeichern auftreten können.

Im Rahmen eines vorangegangenen Master- Projekts (Wechtitsch 2013) wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und eine Zusammenfassung möglicher hydraulischer Phänomene bei Fließvorgängen in Stollenspeichern aufgestellt. Die Schwerpunkte der Recherchearbeit liegen dabei auf:

- Strömungsmuster von Wasser- Luftgemisch
- Strömungsverhalten von Wasser- Luftgemisch in horizontalen und leicht geneigten Stollen
- Schwall als Übergangsbereich von Teil- auf Vollfüllung
- Lufteinschluss an Hochpunkten
- Lufteintrag im Einlaufbereich des Speicherstollens

Neben der hydraulischen Untersuchung ist auch eine energiewirtschaftliche Analyse von Stollenspeichern notwendig, um die tatsächlichen ökonomischen Vorteile abzuschätzen. Zusätzliche Speicherkapazitäten eines WKW ermöglichen die Umlagerung des Wasserdargebots in Zeiträume, z B. in die Mittagszeit, in denen der Energiebedarf größer ist im Vergleich zur restlichen Tageszeit. Somit kann die Anlage bei erhöhter Nachfrage und niedrigem Zufluss die Engpassleistung liefern.

2.3 Ziel der vorliegenden Masterarbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die Fließvorgänge des Stollenspeichers eines untersuchten Wasserkraftwerks 1D- numerisch zu simulieren, mögliche hydraulische Problemstellungen aufzuzeigen und gegebenenfalls Optimierungsvorschläge für einen sicheren Betrieb der Anlage zu erarbeiten. Dabei liegt der Schwerpunkt der Modellierung auf Anlagenkomponenten, in denen die Abflusssituation zwischen Druck- und Freispiegelabfluss wechselt. In der vorliegenden Arbeit werden Softwareprogramme (*WANDA 4.2*, *WANDA 3.72*, *ITM V 1.3.1.*) getestet und verglichen. Die numerische Untersuchung der Strömungsprozesse in einem Stollenspeicher geschieht anhand einer Wasserkraftanlage, die ein HDWKW im alpinen Raum repräsentiert.

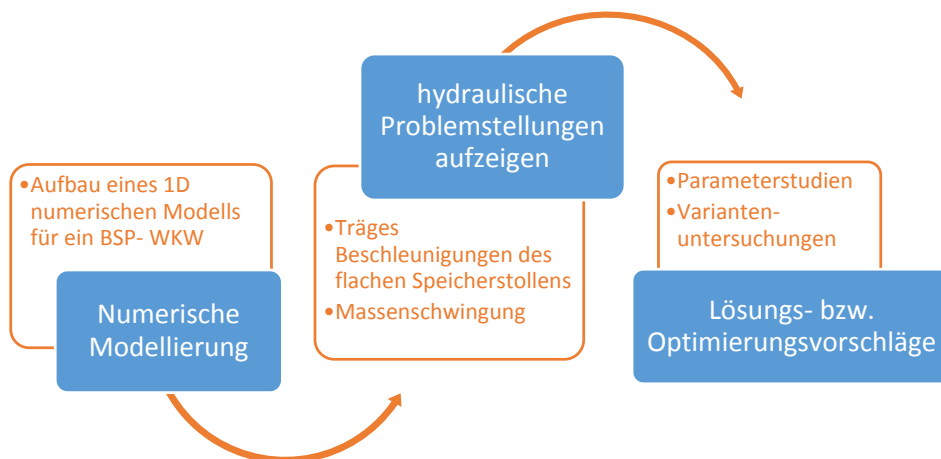


Abb. 4: Ziel der Masterarbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den hydraulischen Aspekten von Stollenspeicher und beinhaltet keine zentrale Wirtschaftlichkeitsanalyse, es sei jedoch erwähnt, dass sich die Thematiken der Hydraulik und der Wirtschaftlichkeit gegenseitig beeinflussen und nicht unabhängig voneinander bewertet werden können.

3. Das Konzept eines Hochdruckwasserkraftwerks

Der Druckstollen eines HDWKW kann als Speicherstollen Verwendung finden. Im folgenden Kapitel soll ein Überblick des Konzeptes eines HDWKW im Alpenraum gegeben werden, in welchem der Speicherstollen eingegliedert werden soll.

Das Design der installierten WKW im Alpenraum zeichnet sich durch die Langlebigkeit der Anlagenkomponenten aus. Die Dimensionierungen haben einen sicheren und störungsfreien Betrieb des WKW zum Ziel. Im Folgenden werden die wichtigsten Bauwerke und Anlagenkomponenten aufgezählt und erläutert. Die Aufzählung hat dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit und des Weiteren sei erwähnt, dass oft mehrere Wege und Möglichkeiten zum Ziel führen- das gilt auch für die Konzeptionierung eines HDWKW.

3.1 Bauwerke und Anlagenkomponenten im Zulauf

3.1.1 Sperrenbauwerk

Große Kraftwerksanlagen im alpinen Raum sind in erster Linie durch ihre Sperrenbauwerke bekannt geworden. Die Sperre ist letztlich das einzige nennenswerte Bauwerk, welches bei der Errichtung einer Anlage neu an der Oberfläche entsteht. Ihre Abmessungen nehmen zum Teil große Dimensionen an, sodass sie bedeutende Tourismusziele darstellen.

Talsperren sind Bauwerke, die quer zur Fließrichtung des Gewässers platziert sind und das Tal absperren. Ihre Konstruktion und Bauweise hängt primär mit der gewünschten Höhe des Aufstaus und der angrenzenden Geländeform zusammen. Sie werden meist aus Massenbeton oder in Schüttauweise errichtet (siehe Abb. 5, S.23). Die Bauwerke binden sowohl in die Talsohle als auch in die Bergflanken ein, um eine erosionsbehaftende Unterspülung zu verhindern.



Abb. 5: a) Bogenstaumauer des Speichers Kölnbrein (Verbund 2014), b) Schüttdamm des Wasserkraftwerks Glendoe, Schottland

Durch das Sperrenbauwerk wird ein Speicherraum geschaffen, welcher eine bedeutende Rolle in der Stromversorgung darstellt. Bäche, deren Quellen im Hochgebirge liegen, weisen eine besondere Abflusscharakteristik auf: Geringe Abflussmengen in den Winter- und Frühlingsmonaten und durch die Schneeschmelze bedingte umfangreiche Wasserfracht in der Sommer- und Herbstzeit (siehe Abb. 6, S. 24). Speicherbauwerke können diese erhöhten Abflussmengen im Sommer zurückhalten und in den wasserkargen Wintermonaten für die Stromproduktion bereitstellen - man spricht in solchen Bewirtschaftungsfällen von Jahresspeichern.

Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich der Hochdruckanlagen mit Speicherfunktion ist die Abdeckung der Spitzenlast der Stromerzeugung (siehe Abb. 2, S. 18). Reicht die Leistung von sogenannten Grundlastkraftwerken, wie z. B. Flusskraftwerken oder Kohlekraftwerken kurzfristig nicht aus, werden Anlagen mit schneller Reaktionszeit und entsprechender Engpassleistung hochgefahren. Dazu gehören unter anderem HDWKW oder Gaskraftwerke. Auch Flusskraftwerke mit Schwallbetrieb kommen für die Produktion von Spitzenstrom zum Einsatz.

Aufgrund der in den letzten 5 bis 10 Jahren zunehmenden Ausbreitung anderer erneuerbarer Energiequellen, wie Windkraft und Sonnenenergie, hat sich der Einsatzbereich von Speicherkraftwerken verändert. Besonders die stark wachsende Windkraft in Norddeutschland lässt die Wirtschaftlichkeit von Spitzenlastkraftwerken immer mehr schwinden (siehe Abb. 7, S. 24). Bei günstiger Wetterlage liegt ein Energieüberschuss am Strommarkt vor, welcher zum Einsatz von

PSKW als „Netzentlaster“ führt. Bei Schönwetter deckt der Solarstrom einen Großteil des Strombedarfs zu Mittag ab und drückt somit mit die Mittagsspitze - die schnelle Stromversorgung durch Spitzenlastkraftwerke wird nicht benötigt.

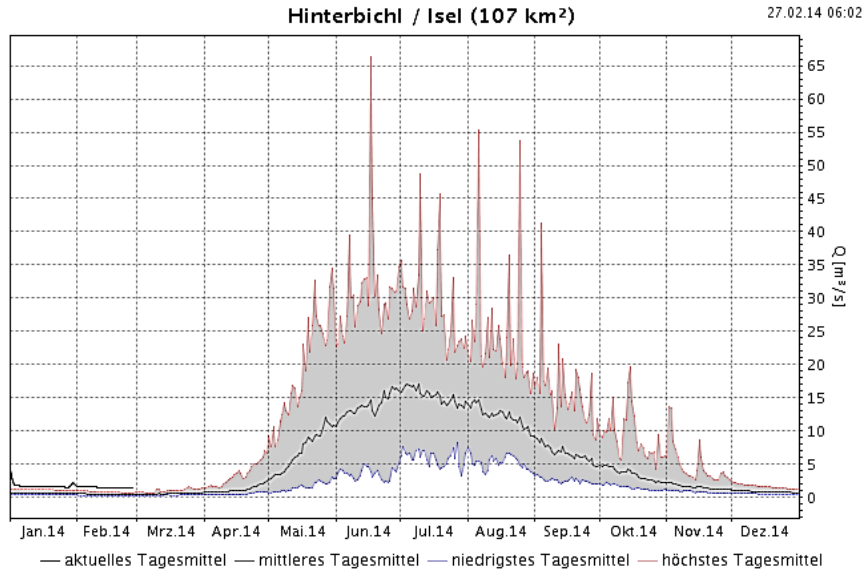


Abb. 6: Typische Abflusscharakteristik eines Gletscherflusses (Hydrographischer Dienst Tirol 2014)

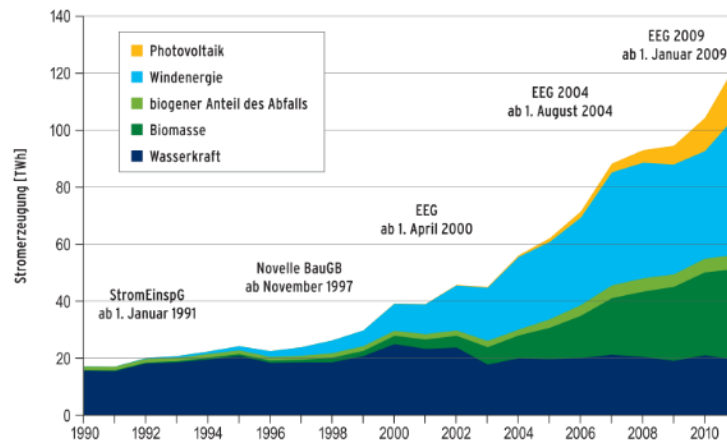


Abb. 7: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2011)

3.1.2 *Anlagenkomponenten von Sperrenbauwerken*

Für einen sicheren und reibungslosen Kraftwerksbetrieb sind zahllose Anlagenkomponenten und Betriebseinrichtungen im Sperrenbauwerk und im Bereich des Speichers installiert. Besonders hervorzuheben sind hierbei:

- die Überwachungseinrichtung einer Kraftwerkssperre
- die Hochwasserentlastung
- der Grundablass mit Revisionsverschluss
- das Einlaufbauwerk

Zur Beobachtung des Bewegungsverhaltens der Sperre und deren unmittelbaren Umgebung gibt es eine Vielzahl an Überwachungseinrichtungen. Neben der Bewegung des Bauwerkes sind auch das Sickerwasser, die Sohlwasserdrücke und Temperaturänderungen von großer Bedeutung. Für die Überwachung der Bewegungen der Sperrenkrone kommen häufig Hängelotanlagen (siehe Abb. 8a, S. 26) zum Einsatz und die Bewegungen zwischen Untergrund und Bauwerk werden mit einer Inversen-Lotanlage überwacht. Für die Messung des Sickerwassers kommt eine einfache und bewährte Methode zum Tragen: Dabei wird die Wasserspiegelhöhe des gesammelten Sickerwassers gemessen, welches über einen definierten Querschnitt (meist dreiecksförmig) abfließt. Die Durchflussmenge steht im direkten Zusammenhang mit der Wasserspiegelhöhe und dem Öffnungswinkel der Ausflussöffnung (siehe Abb. 8b, S. 26). Die Wasserdrücke an der Aufstandsfläche der Mauer werden mit sogenannten Piezometer gemessen. Die Ergebnisse geben Aufschluss über die wirkenden Auftriebskräfte. Die soeben beschriebenen Überwachungsmessungen erfolgen größtenteils automatisch und werden fernüberwacht. Regelmäßige manuelle Messungen oder redundante Messeinrichtungen stellen dabei eine Kontrollfunktion dar.

Mit Hilfe von Auswertesoftware wird auf Basis bekannter Parameter, wie Stauhöhe, Temperatur und vorhandene Setzungen, die Verformung und Verschiebung des Sperrenbauwerks errechnet und mit den tatsächlichen Ergebnissen

aus den Messungen verglichen. Somit können untypische Verformungen und Bewegungen rechtzeitig erkannt werden.



Abb. 8: a) Hängelot der Paalsperre des KW Bodendorf, b) automatische Sickerwassermessung

Hochwasserentlastungen sind Anlagen, die ein gesichertes Abführen von Hochwässern ermöglichen, ohne dass dabei Betriebseinrichtungen zu Schaden kommen. Sie werden für eine bestimmte Abflussmenge konzipiert.

Neue Wasserkraftanlagen sind so zu dimensionieren (siehe Abb. 9, S. 27), dass

- im Lastfall BHQ (Bemessungshochwasser) die Überstaukote (Überstaukote = Sperrenkrone minus Wellenfreibord minus Sicherheitsfreibordreserve) nicht überschritten wird.
- im Lastfall SHQ (Sicherheitshochwasser) bei Staumauern die Sperrenkrone und bei Staudämmen die Oberkante der Dammdichtung abzüglich des Wellenfreibords nicht überstaut werden (Gutknecht, Drobir 2009, S. II-10).

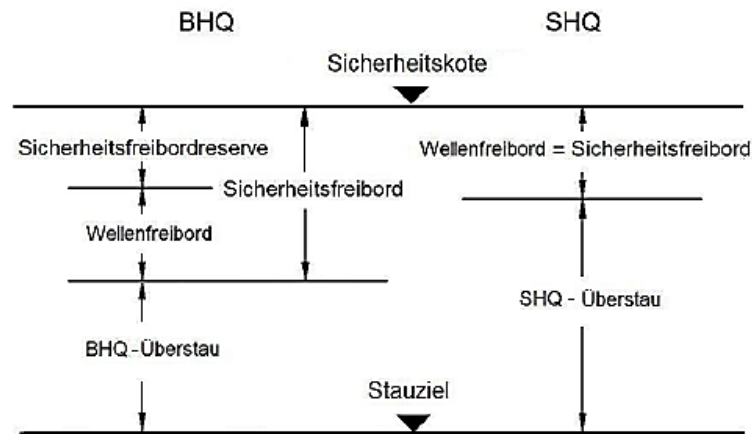


Abb. 9: Zuordnung der Nachweisgrößen zu den beiden hydrologischen Lastfällen BHQ und SHQ (Gutknecht, Drobir 2009, S. II-10)

Eine Entlastungsanlage kann wie folgt ausgeführt werden:

- Überfall ohne oder mit steuerbaren Verschlüssen (siehe Abb. 10)
- Verschießbare Öffnungen unterhalb des Stauziels
- Überströmbare Damm- oder Sperrenkronen



Abb. 10: a) Überfall mit steuerbaren Verschlüssen der Paalsperre, b) Überfall der Hochwasserentlastung des WKW Glendoe

Der Grundablass (GA) einer Sperre (siehe Abb. 11, S. 28) ist eine Betriebseinrichtung, der die vollständige Entleerung des Speicherraums ermöglicht. Gleich-

zeitig kann er als Spülmöglichkeit dienen, um den Betriebseinlauf von Verlandungen zu räumen. Bei extremen Hochwassersituationen findet der Grundablass auch als zusätzliche Abflusssentlastung Verwendung.

Aufgrund der genannten zentralen Funktionen des Grundablasses, ist es notwendig, dass eine ständige Betriebsbereitschaft vorliegen muss und daher der GA jährlich auf seine Funktionstauglichkeit geprüft wird. Um Reparaturarbeiten am Verschlussorgan des GA durchführen zu können, bedarf es eines Revisionsverschlusses, der wasserseitig vor dem Betriebsverschlussorgan angeordnet ist und bei Bedarf abgesenkt wird.



Abb. 11: Grundablass (luftseitig) des WKW Glendoe mit offenem Verschlussorgan

Durch das Einlaufbauwerk wird das energetisch genutzte Wasser vom Speicher in den TWW geleitet. Es ist mit einem Rechen versehen, um ungewünschtes Treibgut von den Turbinen fernzuhalten. Des Weiteren ist das Entnahmebauwerk mit einem Verschlussorgan ausgestattet. Von großer Bedeutung ist die Höhensituierung des Einlaufs: Bei zu tiefer Anordnung kommt es zur Verlandung des Einlaufbereiches und Sediment kann in den TWW mit eingezogen werden; bei zu hoher Anordnung der Entnahmeöffnung bleibt der darunterliegende Speicherinhalt ungenutzt. Von Bedeutung ist auch eine entsprechend hohe Überdeckung

zwischen dem Einlauf und dem Absenkziel vorzusehen, um Wirbelbildung an der Wasseroberfläche und somit Lufteintrag in den TWW zu unterbinden. In Abb. 12 ist diese Überdeckung nicht bedacht.

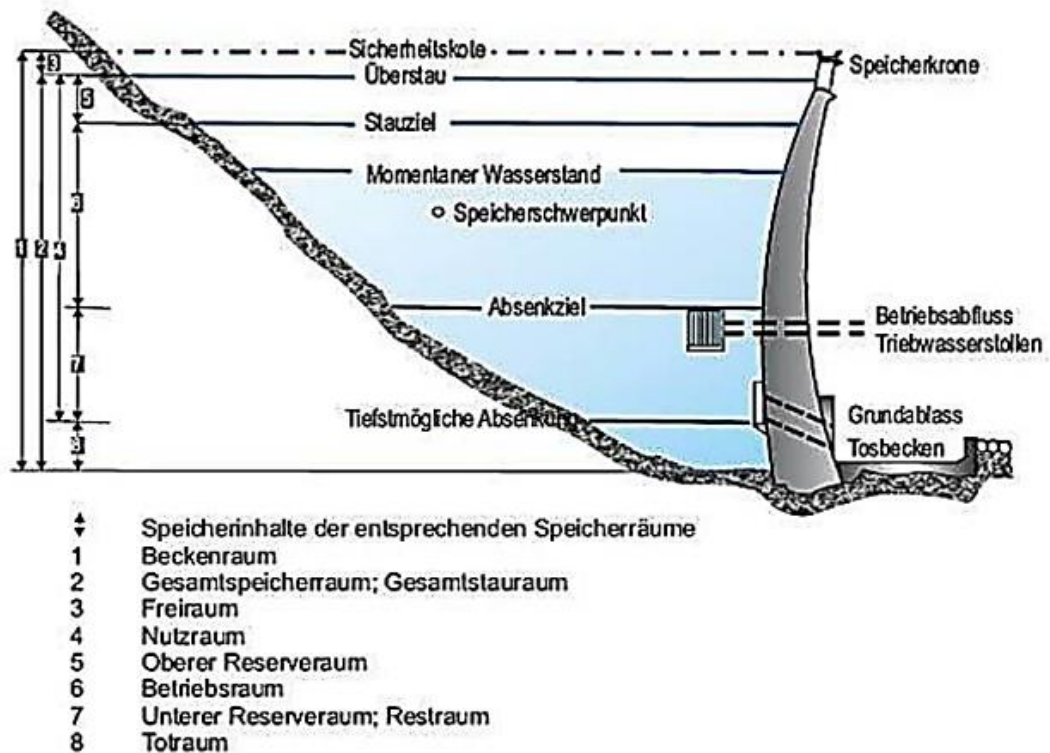


Abb. 12: Schematische Darstellung von Speicherräumen und -Inhalten (ÖNORM M 7103 2011)

Abb. 13 (S. 30) zeigt das Einlaufbauwerk des WKW Glendoe vor dem Einstau. Am Fuße des Turms ist ein Rechen vor der Einlauföffnung angebracht. Im oberen Teil sind Schützentafeln gelagert, die mit Hilfe eines Brückenkrans im Falle des Falles abgesenkt werden können. Somit kann man sich Zugang zum angrenzenden TWW verschaffen, ohne dabei das ganze Speicherreservoir zu entleeren.



Abb. 13: Entnahmebauwerk des WKW Glendoe

3.1.3 Speicher im Nebenschluss

Aufgrund der Tatsache, dass die Errichtung eines SBW einen großen Eingriff in die Umwelt darstellt, insbesondere die Durchgängigkeit des Fließgewässers behindert, ist in Österreich eine Realisierung solcher Bauwerke mit umfangreichen Auflagen verbunden.

Eine Alternative zur Talsperre bietet der Speicher im Nebenschluss: Wasser wird über eine entsprechende WF aus dem Fließgewässer entnommen und über eine Rohrleitung oder Kanal dem Speicher zugeführt. Solche Speicher werden hauptsächlich mit Schüttdämmen hergestellt.

Voraussetzung für die Errichtung eines Speichers im Nebenschluss ist ein ausreichendes Platzdargebot. Neben dem Bachbett und der bestehenden Infrastruktur muss noch genug Platz für die Schüttdämme vorhanden sein. Des Weiteren ist auch zu beachten, dass mit größerer Speichernutzhöhe die Dammaufstandsflächen zunehmen (siehe Abb. 14a).



Abb. 14: a) Schemadarstellung eines beengten Talquerschnitts, b) Animation Tagesspeicher Toinig WKW Obere Isel (Der Virgentaler Weg 2013)

Die Abb. 14b zeigt eine animierte Darstellung des Speichers Toinig im Virgental. Der Zufluss der Isel und die geplante Speichergröße würden eine Bewirtschaftung des Speichers als Tagesspeicher ermöglichen, d. h. Inhalt würde täglich gefüllt und über die Turbinen abgearbeitet werden. Das Projekt befindet sich derzeit in der Genehmigungsphase.

Im Gegensatz zu Talsperren besitzt ein Speicher im Nebenschluss keinen natürlichen Zufluss. Die über eine WF entnommene Wassermenge wird durch einen Entsander hindurch, über eine Rohrleitung an das Zulaufbauwerk des Speichers geleitet. Die Länge der Rohrleitung ist abhängig von der Topografie des Tals und der gewünschten Nutzhöhe des Speichers. Daher liegen WF und Speicher nicht unmittelbar nebeneinander.

Zu den Anlagenkomponenten der Speicher im Nebenschluss zählen neben den bereits unter Kapitel 3.1.2 erwähnten Einrichtungen, ein Zulaufbauwerk, ein unter der Speichersohle befindliches Drainagefeld und eine Rechenreinigungsmaschine. Das Drainagesystem hat die Funktion mögliche Wasserdrücke im anstehenden Untergrund abzubauen, welche besonders bei niedrigem Wasserstand im Speicher ungünstig wirken und somit die relativ leichte Abdichtungsebene aus Kunststoffbahnen heben können. Eine periodische Wartung durch Spülungen der Drainageleitungen ist daher wichtig, um die Funktionstauglichkeit über die Lebensdauer des Speichers sicherzustellen.

3.1.4 Wasserfassung

Wasserfassungen sind Bauwerke, durch die Wasser aus Fließgewässern entnommen wird, um es gewissen Nutzungen, wie der Bewässerung oder der Energiegewinnung, zuzuführen. Die hier angeführte Thematik von WF bezieht sich auf jene Anlagen, die ihre Anwendung in alpinen Gegenden, z. B. an Gebirgsbächen, finden. Grundsätzlich kann man WF bezüglich ihrer Entnahmerichtung einteilen:

- Seitenentnahme
- Stirnentnahme
- Sohlentnahme

Eine wichtige Rolle für die Wahl der Entnahmeart spielt der Geschiebetransport des Fließgewässers, welcher von der mittleren Neigung des Fließgewässers abhängt. Große Bedeutung hat auch die Entnahmemenge selbst, da gewissen Entnahmekonzepten Grenzen bzgl. ihrer Leistungsfähigkeit gesetzt sind. Eine gute Übersicht über die Einsatzgebiete der unterschiedlichen Entnahmearten zeigt die nachstehende Tabelle 2 (S. 33):

	Seitenentnahme		Stirnentnahme	Sohlenentnahme
	mit Geschiebeabweisung	mit Geschiebeabzug		
mögliche Zulauf-Entnahmeabfluss	bis zu 50 %	bis zu 70 %	bis zu 80 %	bis zu 100 % (bis Sohlenrechenleistungsgrenze)
sehr großes Gefälle (Wildbäche) $I > 10 \%$	günstig, wenn wartungsfreie Funktion gewährleistet	ungünstig, wenn unzugänglich, da permanente Bedienung erforderlich	ungünstig; hohe Turbulenz des Zuflusses; permanente Bedienung erforderlich	sehr günstig; klassischer Fall für Tiroler Wehr; wartungsfreier Betrieb
großes Gefälle (Gebirgsflüsse) $10 \% > I > 1 \%$	günstig für alle Entnahmekarten ohne besondere Einschränkungen mit oder ohne Aufstau			
mittleres Gefälle (Hügellandflüsse) $1 \% > I > 0,01 \%$	günstig für Seiten- und Stirnentnahme mit und ohne Aufstau			ungünstig; vorwiegend feines Geschiebe, welches zu nahezu 100 % in den Einlauf gerät

Tabelle 2: Möglicher Entnahmeabfluss und Vor- und Nachteile der Entnahmekarten in Abhängigkeit der Fließgewässerneigung (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 149)

Für die Seitenentnahme und der Stirnentnahme bedarf es eine gewisse Wassertiefe, die bei Gebirgsbächen meist nicht vorhanden ist. Künstliche Querbauwerke, meist Wehre, erzielen einen Rückstau und ermöglichen somit eine sichere Wasserentnahme. Dabei ist auf die Durchgängigkeit von Hochwasserwellen zu achten (siehe Kapitel 3.1.2, Hochwasserentlastung). Liegt im UW der Wehranlage strömender Abfluss vor, so folgt der Wehrschwelle ein Tosbecken, worin ein gesicherter Fließwechsel von schießendem auf strömenden Abfluss erfolgen kann.

Die Anordnung einer Seitenentnahme ist am Außenbogen des Fließgewässers zu empfehlen, da aufgrund der Spiralströmung eine natürliche Geschiebeabweisung erfolgt. Das Geschiebe bewegt sich dabei am Innenbogen vorbei an der Entnahmestelle. Liegt jedoch ein gerader Flussverlauf vor, muss man mit Hilfe von Buhnen, welche auf der gegenüberliegenden Seite der Entnahme situiert sind, eine Spiralströmung erzwingen. Des Weiteren sind Anordnungen von Grundswellen und Leitwänden für eine gut funktionierende Wasserentnahme erforderlich, wobei sich deren optimale Dimensionierung und Ausrichtung z. B. durch einen physikalischen Modellversuch bestimmen lassen.

Eine der vielen Ausführungsmöglichkeiten ist repräsentativ in Abb. 15 dargestellt:

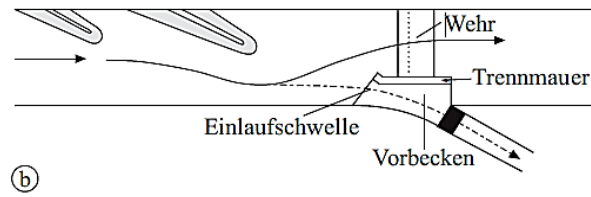


Abb. 15: künstliche Spiralströmung zur Geschiebeabweisung, (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 150)

Eine weitere Möglichkeit der Wasserentnahme aus Gebirgsbächen stellt die Sohlentnahme, auch bekannt als „Tiroler Wehr“, dar. Ihr Einsatzgebiet sind besonders steile und deshalb geschiebehaltige Bachstrecken. Der Kern der Konstruktion ist ein mit einem Grobrechen überdecktes Grundwehr (siehe Abb. 16, S. 35). Der Grobrechen ist in Fließrichtung orientiert und gibt Gestein und Treibgut, deren Dimensionen größer sind als die Stablichte, an das UW ab. Kornfraktionen mit geringem Durchmesser werden hingegen eingezogen. Größere Stababstände des Grobrechens führen zur Notwendigkeit den Entsander öfters zu spülen und somit Wasser energetisch ungenutzt abzugeben.

Wasserfassungen mit Tiroler Wehren gelten als wartungsarme Anlagen. Durch ihr robustes Design können sie auch in Muren- und Lawinengebieten eingesetzt werden - Argumente für den Einsatz im alpinen Raum.



Abb. 16: Sohlentnahme am Intake 1 des Wasserkraftwerks Glendoe

Das durch die Entnahme gewonnene Wasser wird dann weiter durch einen Entsander geleitet, bevor es in den Speicher bzw. direkt in den TWW gelangt.

3.1.5 Entsander

Im Entsander wird das Wasser von entsprechenden Feststoffen auf eine einfache Weise getrennt: Durch Reduktion der Fließgeschwindigkeit vermindert sich die Turbulenz der Strömung und Feststoffe, die zuvor in Schwebelage gehalten wurden, setzen sich ab. Bei Talsperren geschieht dieser Vorgang im Speicherraum von selbst.

Ein Feststoffeintrag in den TWW kann auf Dauer zu Verschleißerscheinungen an Anlagenkomponenten, wie z. B. an Schieber, Drosseln und Turbinen, führen. Bei Pelton-Turbinen kann es neben der Abnutzungserscheinung auch zum Verschluss von Turbinenteilen kommen, daher sind letztlich die Öffnungsweiten der Düsenadeln der Freistrahlturbine ein Maß für das zulässige Grenzkorn im Entsander. Ein über lange Zeit andauernder Feststoffeintrag kann auch zu Verlandungen im TWW führen, wodurch Fließverluste entstehen, die zu einer Reduktion der Nettofallhöhe des WKW führen.

Die Größe des Grenzkorns und die Ausbauwassermenge bilden die Eingangsgrößen für die Dimensionierung der Entsanderbecken, dabei können Bauwerke mit großen Abmessungen entstehen. Um diese bestmöglich in die Umgebung einzugliedern, wird die Beckenüberdeckung nach der Errichtung begrünt.

Das von der WF kommende Triebwasser wird über einen Zulaufkanal an die einzelnen Entsanderbecken weitergegeben. Hier gilt es eine gleichmäßige Beaufschlagung der Kammern zu erreichen und daher werden oft Beruhigungsstäbe im Zulauf installiert. Die Einhaltung geometrischer Randbedingungen, wie Längen- und Breitenverhältnisse, sorgen für eine gleichmäßige Strömung in den einzelnen Kammern.

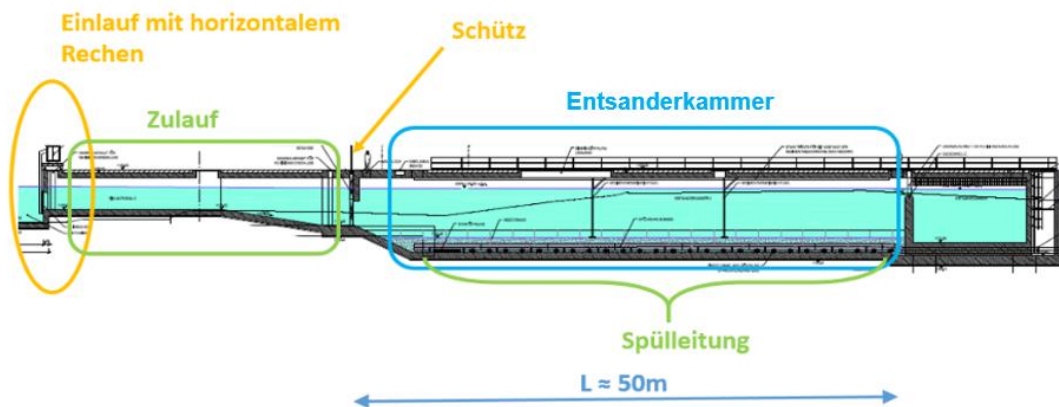


Abb. 17: Entsander- Längsschnitt der untersuchten Anlage (ILF Beratende Ingenieure 2012)

Abb. 17 zeigt die Wasserfassung und den Entsander der untersuchten Anlage. Das Wasser wird mittels Seitenentnahme aus dem Fluss ausgeleitet und über einen Linksbogen den Kammern zugeführt. Das Schütz unmittelbar nach dem Einlauf der untersuchten Anlage steuert die Entnahmemenge und die Verschlussorgane vor den einzelnen Entsanderbecken dienen zum Absperren der Kammern während notwendiger Wartungsarbeiten.

Bei entsprechender Ablagerungshöhe zeigen installierte Messeinrichtungen in den einzelnen Becken eine notwendige Spülung an, welche über das Öffnen von Spülsegmenten am Ende der Kammern ausgelöst wird. In der Regel werden die Kammern dabei vollständig geleert und das Sediment wird über eine Spüleleitung

in das natürliche Gewässer zurückgegeben. An dieser Stelle sei auf die Höhensituation der Spülung hingewiesen: Da die Spülung einige Meter unter dem Wasserspiegel des Entsanders liegt, braucht die Spülleitung, besonders bei flachem Flussgefälle, eine gewisse Strecke bis sie das Höhenniveau des Fließgewässers schneidet. Eine wassersparende Variante stellt der Rohrentsander dar (siehe Abb. 17, S. 36). Dabei wird über ein auf der Sohle der Entsanderkammer angebrachtes perforiertes Rohr gespült. Die entstehende Strömungssituation reißt die Ablagerungen mit, ohne dabei die gesamte Kammer zu leeren². Dieses wassersparende Spülverfahren ist ein patentiertes System der Hochschule Raberswil aus der Schweiz.

Nachdem die Wasserfracht den Entsander durchströmt und der Feststoffanteil sich abgesetzt hat, gelangt sie dann entweder in einen Kleinspeicher oder wenn keine Speichermöglichkeit gegeben ist, auf direktem Wege in den Triebwasserweg.

3.2 Triebwasserweg

Als Triebwasserweg wird jener Abschnitt einer Wasserkraftanlage bezeichnet, der sich zwischen dem Einlaufbauwerk und dem Krafthaus bzw. der Kaverne erstreckt. In den Alpen hat sich folgendes Design- Konzept etabliert (siehe Abb. 3, S. 19):

- Flachstecke zwischen Einlaufbauwerk und Wasserschloss
- Wasserschloss als Schacht oder Kammerwasserschloss
- Verschlussorgan nach dem Wasserschloss
- Kraftabstieg ausgeführt als ungepanzelter Lotschacht oder gepanzerter Schrägschacht
- Sohlstollen gepanzert
- Verteilrohr

² Patentiertes Entsandersystem der Hochschule Raberswil („HSR-System“)

Die soeben angeführte Gliederung des Triebwasserwegs variiert- abhängig von Geologie und Bauunternehmung. Andere Konzepte ergeben sich z. B. aufgrund von besonderen Gebirgseigenschaften, speziellen Topografieverhältnissen oder bestehenden Kraftwerksanlagen führen zu einer abgeänderten TWW- Anordnung.

3.2.1 Flachstrecke zwischen Einlaufbauwerk und Wasserschloss

Die Bezeichnung des ersten Abschnitts des TWW trägt unterschiedliche Benennungen: Druckstollen, Flachstrecke oder Oberwassertunnel; im Englischen spricht man vom *Head Race Tunnel*.

Die hydraulische Dimensionierung des oft kilometerlangen Druckstollens hat als Ziel, die Fließverluste im Stollen so gering wie möglich zu halten und somit die Fallhöhe der Anlage zu maximieren. Abflussgeschwindigkeiten von 3- 4 m/s werden als Entwurfskriterium angesehen, bei unausgekleideten Stollen soll die Fließgeschwindigkeit etwa 1 m/s betragen. Eine reduzierte Abflussgeschwindigkeit im Stollen, bei gleichbleibendem Ausbaudurchfluss, führt zu einem größeren Ausbruchquerschnitt, der mit steigenden Baukosten verbunden ist - es gilt eine wirtschaftlich vertretbare Lösung zu finden. Ein Mindestdurchmesser des Stollens von 3 m ist jedoch seitens der Herstellung erforderlich.

Weitaus aufwendiger als die hydraulische Auslegung ist die mechanische Dimensionierung des Stollens, die den Nachweis der Tragfähigkeit und die Wahl der Auskleidung beinhaltet. In die Dimensionierung fließen folgende Faktoren mit ein:

- maximaler Innendruck
- vorherrschende Gebirgsdruck
- Dichtheit des anstehenden Fels
- Bergwasserspiegel

Bei Hochdruckanlagen mit Tagesspeicher im Oberwasserbereich treten aufgrund des relativ niedrigen Stauziels nur geringe Wasserdrücke in der Flachstrecke des TWW auf. Besitzt der anstehende Fels eine ausreichende Standfestigkeit und

Dichtheit, kann der Stollen ohne zusätzliche Auskleidung ausgebildet werden. In Druckstollen hingegen, die von großen Talsperren wie etwa dem Zillergründl gespeist werden, steht eine 150- 200 m hohe Wassersäule an (15- 20 bar). In solchen Fällen ist eine geeignete Dimensionierung der Auskleidung aus Beton oder Stahl notwendig, abhängig von der Überdeckung und der Klüftung des anstehenden Gebirges.

Kilometerlange Druckstollen werden in der Regel mit Tunnelbohrmaschinen (TBM) aufgeföhren, wobei im Fels Gripper- Maschinen (siehe Abb. 18) zum Einsatz kommen. Oft gibt es aufgrund unterschiedlicher Gebirgszonen Zwischenanriffe und Abschnitte mit schlechten Gebirgseigenschaften, die konventionell ausgebrochen werden müssen. In der Regel wird der Ausbruch steigend vorangetrieben, um vor Überflutungen im Tunnel bei plötzlichem Wassereinbruch geschützt zu sein.



Abb. 18: a) Elisza Jane Gripper-TBM für den TWW des WKW Glendoe (Schadereit 2006),
b) Gripperplatte der TBM (Schadereit 2006)

Bei TWW mit kilometerlangen Druckstollen ist am Ende der Flachstrecke ein Wasserschloss notwendig.

3.2.2 Wasserschloss

Wasserkraftanlagen mit TWW- Längen von über 1 bis 1,5 km benötigen ein Wasserschloss, um die Turbinen überhaupt regelbar zu machen (Johnson 1908). Die wesentlichen Aufgaben eines Wasserschlosses können wie folgt zusammengefasst werden (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 336):

- *hydraulische Trennung von Niederdruck- und Hochdruckabschnitten des Triebwasserwegs (siehe Abb. 19)*
- *effektive Reflexion des Druckstoßes*
- *Stabilität im Regelungsbetrieb, d. h. eine rasche und wirkungsvolle Dämpfung der Massenschwingungen im Flachteil des TWW*
- *Bereitstellung und Aufnahme der beim Anfahren bzw. Abschalten der Turbine bewegten Wassermassen, bis diese im Druckstollen sich beschleunigen bzw. sich verzögern*
- *Minimierung des baulichen Aufwandes der Auskleidung im Druckstollen*

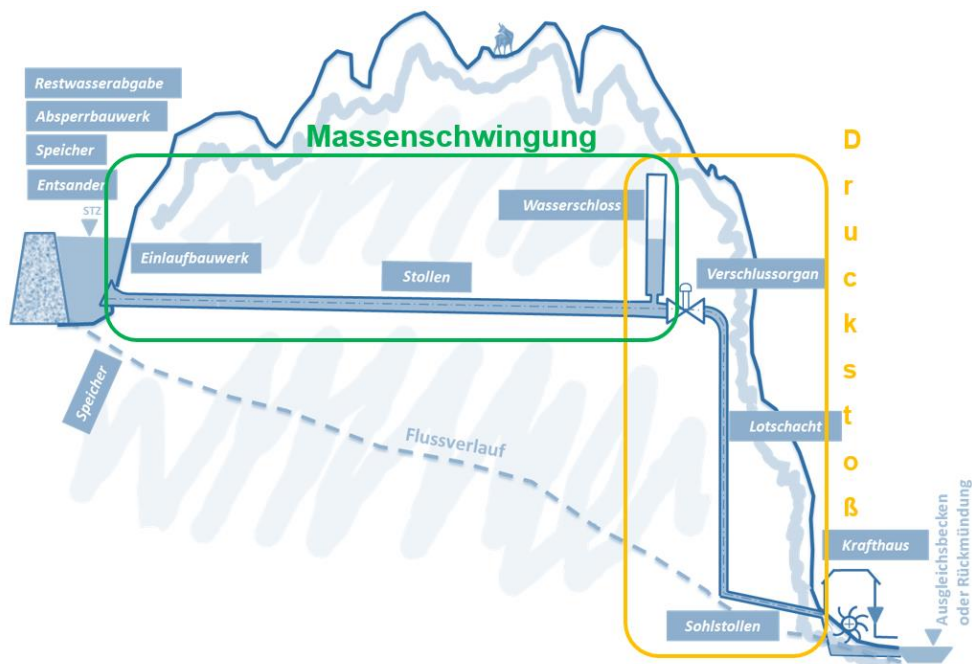


Abb. 19: Das Wasserschloss als Trennung der hydraulischen Systeme eines TWW

Es gibt eine Vielzahl an Ausführungsvarianten von Wasserschlossern, abgestimmt und optimiert auf den TWW und der Betriebsführung. Die einfachste Form ist das Schachtwasserschloss. Es findet seinen Einsatz bei HDWKW mit mittleren Druckstollenlängen und mäßigen Anfahr- und Abschaltzeiten der Turbinen. Der Schacht muss einen Minstdurchmesser aufweisen, um der Anlage eine Betriebsstabilität zu ermöglichen - dem *Thoma Kriterium*. Mit zunehmender Stollenlänge und steigender Flexibilität bzgl. der Schaltzeiten der Maschinensätze erhöhen sich auch die Anforderungen an das Wasserschloss, da mehr Masse in Bewegung ist und Resonanzschaltfälle auftreten.

Diesen Anforderungen soll das Kammerwasserschloss gerecht werden. Durch das Abschalten der Turbine breitet sich im TWW ein Druckanstieg vom Krafthaus beginnend in Richtung OW aus. An der freien Oberfläche des Wasserschlosses wird die Druckwelle größtenteils reflektiert und wandert als Entlastungswelle in den Kraftabstieg zurück. In der Flachstrecke des TWW pflanzt sich nur ein geringer Druckanstieg als Druckstoß fort. Die dynamische Belastung der Flachstrecke ergibt sich beim Füllen des Wasserschlosses aus der Zunahme der potenziellen Energie.

Das Abschalten der Turbine (siehe Abb. 20, S. 42) führt dazu, dass die strömende Wasserfracht des Druckstollens in das Wasserschloss ausweicht, den Schacht und die Oberkammer füllt. Der schnelle Anstieg des Wasserspiegels im engen Schacht führt zur schnellen Dämpfung der Massenoszillation. Beim Abschwingen beginnt die Oberkammer sich zu entleeren und das Wasser strömt Richtung Speicher bzw. Einlauf.

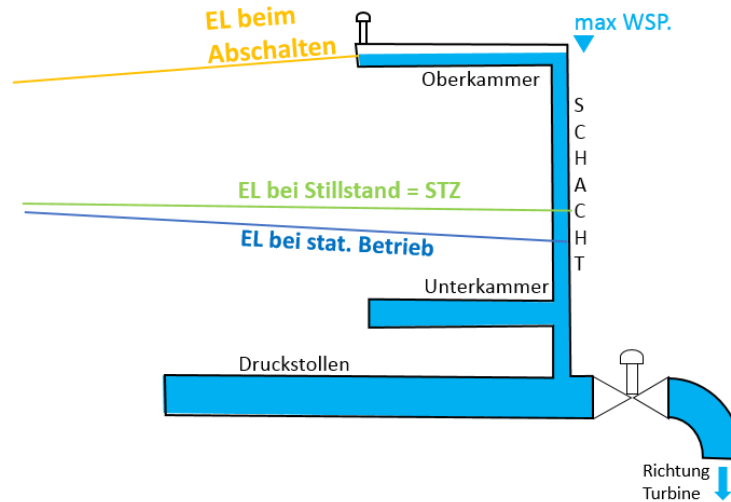


Abb. 20: Abschalten der Turbine führt zur Füllung des Wasserschlosses

Beim Anfahren der Turbine (siehe Abb. 21, S. 43) wird das Wasser im Druckstollen beschleunigt, dem sich die Trägheit der Wassermassen entgegensetzt. Um das Abreißen der Wassersäule zu verhindern, strömt Wasser aus der Unterammer in Richtung der Turbine. Wichtig dabei ist, dass die Unterammer nicht leer läuft und der Wasserspiegel im Wasserschloss nicht in den Bereich der Stollenfiste absinkt und somit Luft in den Kraftabstieg eintragen wird. (siehe Abb. 21, S. 43 rot). Zugleich darf die Druckhöhe nicht mehr als fünf Meter unter die Stollenfiste abfallen, um der Gefahr der Kavitation auszuweichen. Die Unterammer muss den Kraftabstieg solange mit Wasser speisen, bis sich der Zufluss vom Druckstollen ausreichend beschleunigt hat.

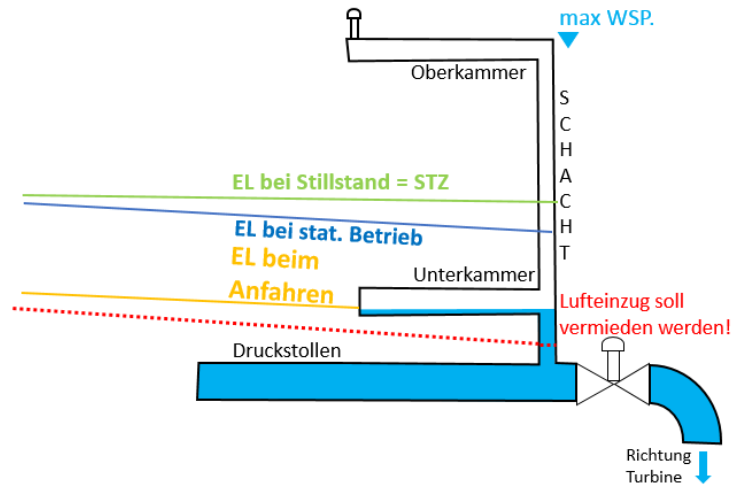


Abb. 21: Anfahren der Turbine führt zur Entleerung der Unterkammer des Wasserschlosses

Die Dimensionierung von Wasserschlossern erfolgt mit 1D- numerischer Computersimulation. Bei komplexen Wasserschloss- Geometrien ist zur Überprüfung der Dimensionierung des Wasserschlosses ein physikalischer Modelversuch notwendig.

3.2.3 Schnellschlussorgane

Nach dem Wasserschloss beginnt jener Abschnitt des TWW, welcher den hochfrequenten Druckstoßbelastungen ausgesetzt ist, welche durch Durchflussänderungen im System hervorgerufen werden. Die Auskleidung des Stollens, falls vorhanden, geht an dieser Stelle in eine gepanzerte Stahlauskleidung über, da im üblichen Kraftwerks- Konzept die dynamische Drucklinie über der Gebirgsüberdeckung liegt (Seeber 1999). Da eine Panzerung einen großen Kostenfaktor darstellt, wird der Durchmesser der Leitung reduziert. Ein Konfusor³ bildet den Übergang vom Druckstollen auf den gepanzerten Abschnitt des TWW.

Unmittelbar danach ist eine Schnellschlussklappe (siehe Abb. 22, S. 44) installiert, die in einer Apparatkammer untergebracht ist. Ihre Aufgabe besteht darin, bei einer Leckage im Kraftabstieg den TWW automatisch abzusperren und somit

³ Im Konfusor verjüngt sich der Querschnitt und die Fließgeschwindigkeit nimmt zu.

ein Auslaufen des Druckstollens zu verhindern. Der Schließvorgang wird mechanisch durch ein Fallgewicht vollzogen; der Auslöser kann geschwindigkeitsdruck- oder mengenabhängig gesteuert werden (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 426). Um Wartungsarbeiten am Schnellverschlussorgan zu ermöglichen, wird unmittelbar vor der Klappe ein Revisionsverschluss installiert.

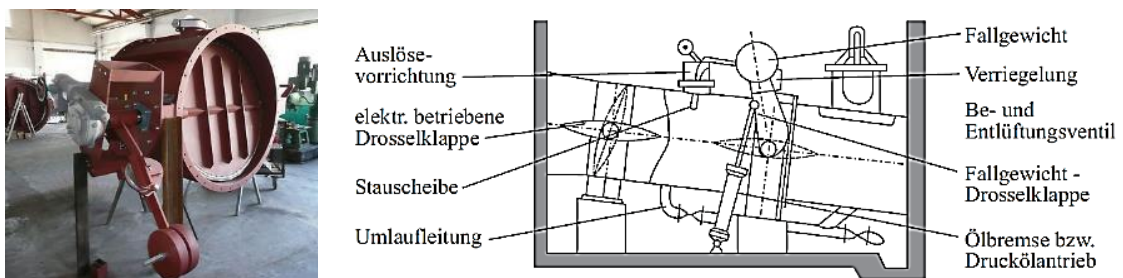


Abb. 22: a) Sicherheitsabsperrrinne vor der Montage (b-teck GmbH 2014), b) elektrisch angetriebene (links) und schnellschließende Fallgewichtsdrosselklappe (rechts) (Giesecke and Mosonyi 2005, S. 426)

Weitere Anlagenkomponenten in der Apparatekammer sind die Be- und Entlüftungsventile, welche beim Füllen und Entleeren des TWW zum Einsatz kommen. Bei Hochdruckanlagen mit einer oberflächennahen Druckrohrleitung als Kraftabstieg wird das Schnellschlussorgan als „Rohrbruchklappe“ bezeichnet.

3.2.4 Kraftabstieg

Der Kraftabstieg kann einerseits als Druckrohrleitung an der Geländeoberfläche oder unterirdisch als Lot- bzw. Schrägschacht konzipiert werden.

Aufgrund der hohen Innendrucke wird der unterirdische Kraftabstieg im Alpenraum meist mit Stahlpanzerung ausgekleidet. Bei vollständiger Entleerung des TWW besteht bei großen anstehenden Gebirgsdrücken Beulgefahr an der Stahlpanzerung. Die Dimensionierung der Auskleidung muss daher ein Nachweis gegen Ausbeulen beinhalten. Zur Abschätzung des kritischen Außendrucks kann z. B. die semi-empirische Formel von Amstutz herangezogen werden.

Bei ausgezeichneten Gebirgseigenschaften und ausreichender Überdeckung kann jedoch auf eine kostenintensive Panzerung verzichtet werden. Gerade im

norwegischen Raum findet man viele Kraftwerke mit unausgekleideten Kraftabstiegen. Sukzessiv gewonnene Kenntnisse über die Eigenschaften des anstehenden Baugrunds (Granit) lassen in Norwegen seit den 60iger des letzten Jahrhunderts eine Stahlpanzerung im TWW als unnötig erscheinen (Hveding 1992, S. 36).

Für die Herstellung des Lot- oder Schrägschachts wird das Raise-Boring- Verfahren oder der Alimak- Vortrieb eingesetzt (siehe Abb. 23). Die Anwendung des Raise-Boring sollte bei standfesten Gebirge erfolgen, da Stützmaßnahmen nicht unmittelbar nach dem Ausbruch eingebaut werden können.

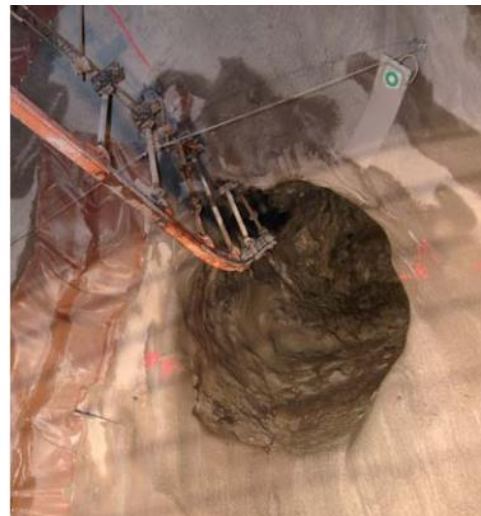


Abb. 23: Einsatz beider Ausbruchverfahren beim Bau des Kopswerks II, links Raise Boring, rechts Alimak- Vortrieb (Vorarlberger Illwerke AG 2006)

3.2.5 Sohlstollen

Der Sohlstollen verbindet den Kraftabstieg mit dem Krafthaus. Er wird steigend, mit konventionellem Vortrieb ausgebrochen. Für die Errichtung des Lotschachtes wird der Sohlstollen als Zugang zum Fuße des Schachtes benötigt, dabei wird der Querschnitt entsprechend groß ausgebrochen, um eine problemlose Schutterung des Schachtausbruchmaterials zu ermöglichen. Eine mögliche Ausführungsvariante des Triebwasserwegs stellt eine aufgeständerte Rohrleitung im Bereich des Sohlstollens dar (siehe Abb. 24, S. 46).

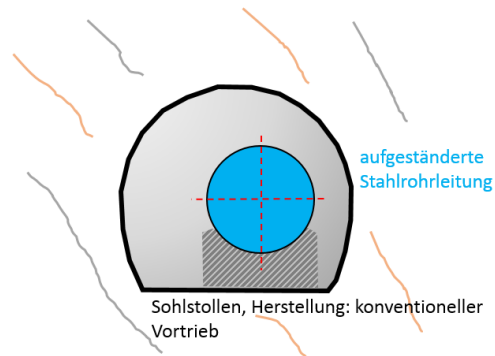


Abb. 24: Mögliche Ausführungsvariante: aufgeständerte Druckrohrleitung im Sohlstollen eines HDWKW

3.3 Krafthaus und der Unterwasserbereich

Die Baustelle des Krafthauses eines WKW ist ein interdisziplinäres Feld, wo Bauingenieure, Maschinenbauer und Elektrotechniker Seite an Seite arbeiten. Das Zentrum jedes Krafthauses bilden die Turbinen und die dazugehörigen Generatoren, welche die potenzielle Energie des Triebwassers in elektrische Energie umwandeln. Das Design des Krafthauses orientiert sich an der Bauart der Turbinen.

Das Krafthaus setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Bereichen zusammen:

- Turbinenebene
- Maschinenhalle
- Elektrotechnische Ausrüstung
- Betriebsräume

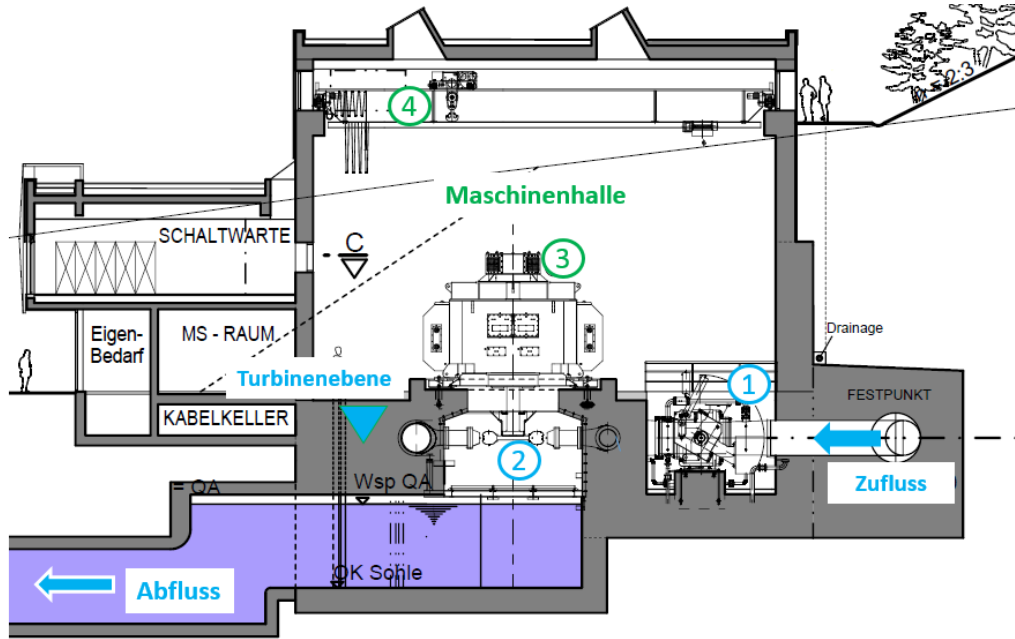


Abb. 25: Schnitt Krafthaus Mitteldorf, WKW Obere Isel (Dr. Krauss ZT GmbH 2012)

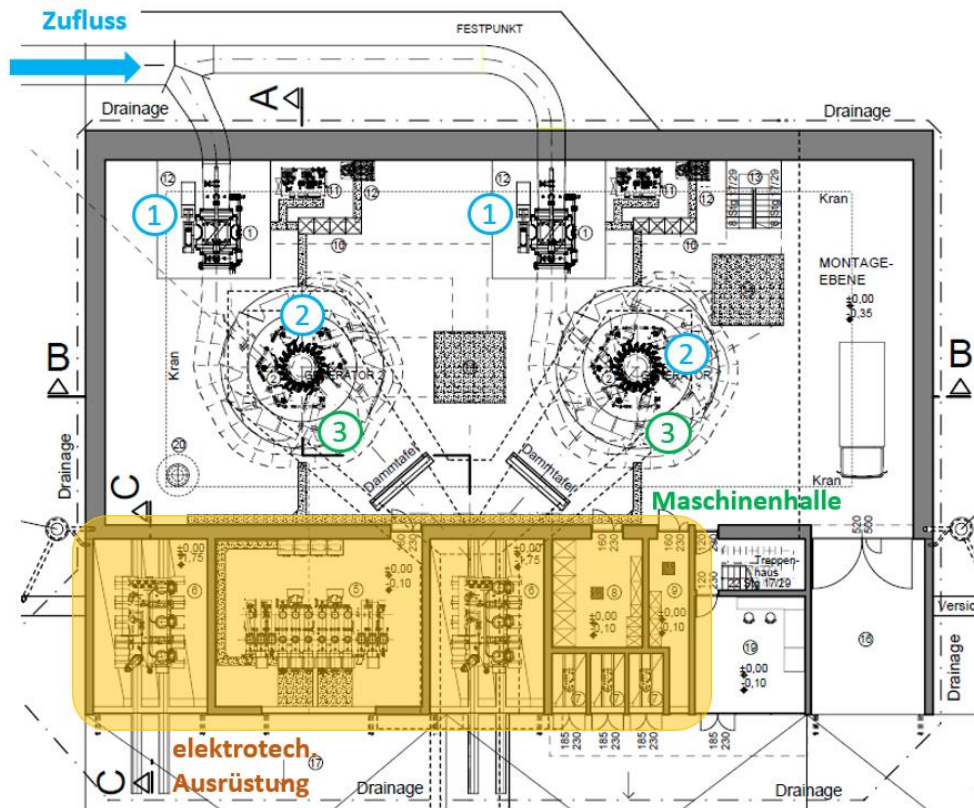


Abb. 26: Grundriss Krafthaus Mitteldorf, WKW Obere Isel (Dr. Krauss ZT GmbH 2012)

3.3.1 Turbinenebene

Das Triebwasser gelangt über eine Stahlleitung im Sohlstollen zum Krafthaus. Unmittelbar vor dem Krafthaus wird die Zuleitung, je nach Anzahl der installierten Turbinen (Abb. 25 und Abb. 26, S. 47), durch in Festpunkte gefasste Verteilerrohre aufgesplittet. In der Turbinenebene ist vor jedem Maschinensatz ein Absperrorgan (Abb. 25 und Abb. 26, 1, S. 47) installiert, welches vor dem Anfahren oder Abschalten der Turbine geöffnet bzw. geschlossen wird.

Bei Fallhöhen von über 100 m kommen hauptsächlich Pelton- und Francis- Turbinen zum Einsatz. Wie in Abb. 27 erkennbar, liegt der Anwendungsbereich der Pelton- Turbine bei Fallhöhen zwischen 100 und 1500 m, bei einem Durchfluss von 0,5 bis 70 m³/s; der Einsatzbereich einer Francis- Turbine reicht hingegen von Mitteldruckanlagen bis hin zu Hochdruckanlagen mit Fallhöhen bis zu 700 m. Das mit Francis- Turbinen ausgestattete PSKW Häusling im Zillertal besitzt eine Fallhöhe von 696 m.

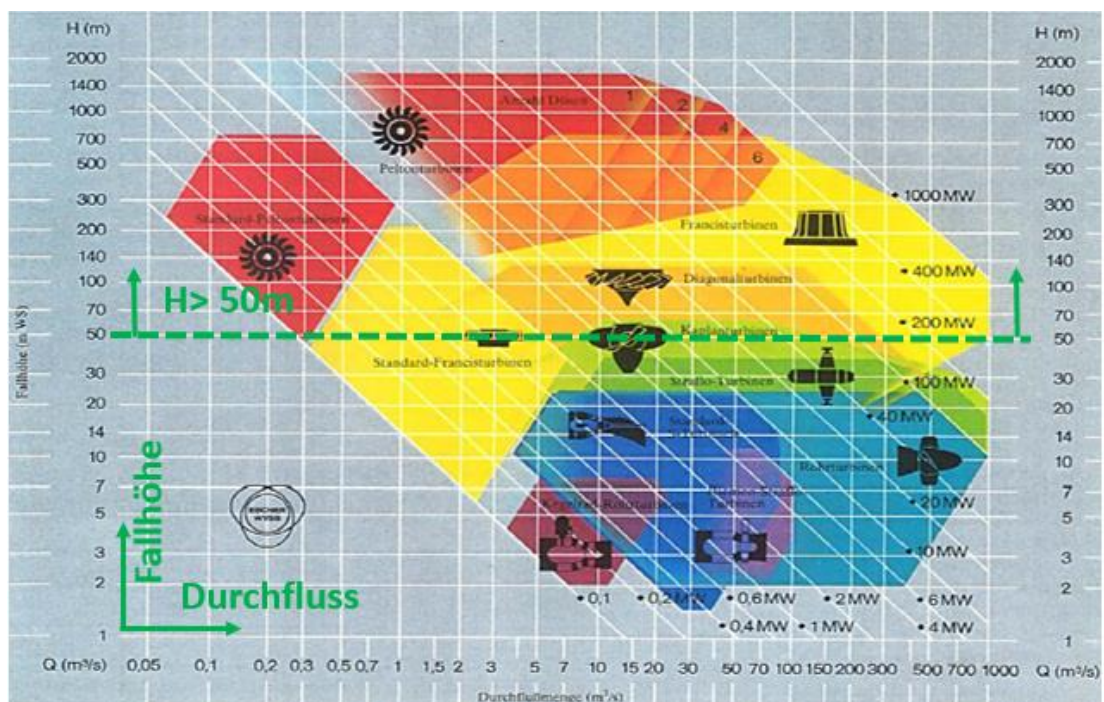


Abb. 27: Einsatzbereiche der unterschiedlichen hydraulischen Maschinen in Abhängigkeit der Fallhöhe und des Durchflusses (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 512)

Um eine gewisse Flexibilität bei der Stromerzeugung zu erreichen, werden mehr als eine Turbine im Krafthaus installiert. Das kann unterschiedliche Gründe haben:

- Je nach Schwankungscharakteristik des Wasserdargebots kann nicht immer die Ausbauwassermenge der Turbine zugeführt werden- besonders bei Francis- Turbinen fällt der Wirkungsgrad bei reduziertem Durchfluss schnell ab (siehe Abb. 28)
- Große Turbinen benötigen große Generatoren, welche ab bestimmten Abmessungen und Gewicht schwer zu händeln sind
- während der Revisionsarbeiten (etwa 2 Tage im Jahr je Turbine) an einer Turbine kann trotzdem mit den weiteren Turbinen Energie produziert werden.

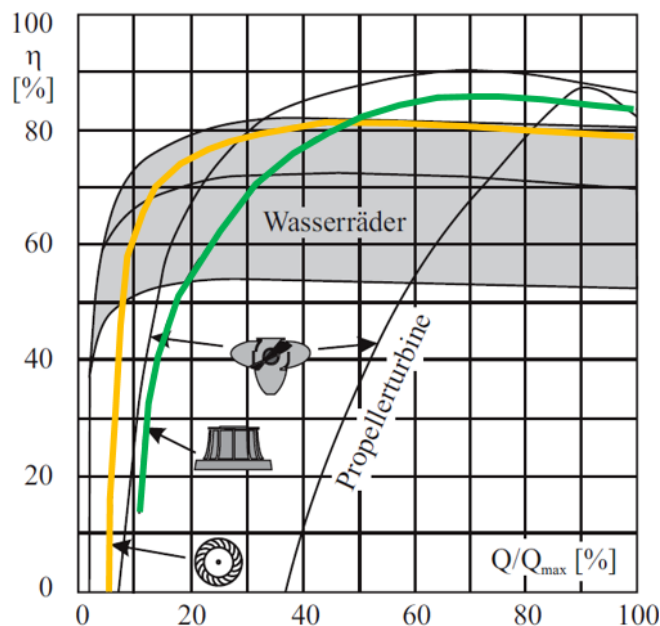


Abb. 28: Typische Wirkungsgradverläufe von ausgewählten Turbinentypen, Pelton orange und Francis- Turbinen grün dargestellt (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 611)

Die Bauart einer Turbine beeinflusst die Gestaltung des UW. Eine Pelton- Turbine ist eine Freistrahlturbine und benötigt genügend Abstand (Freihang) zum Unterwasserspiegel. Die Abflussverhältnisse im UW müssen so geregelt sein,

dass der maximal auftretende WSP den notwendigen Freihang zur Schaufelrad-ebene nicht unterschreitet. Der Francis- Turbine folgt das Saugrohr, indem Druckabfluss herrscht. Ein Anstieg des UW führt nur zur Reduktion der Fallhöhe.

3.3.2 *Maschinenhalle*

Die Maschinenhalle liegt meist im Erdgeschoß des Krafthauses und umfasst den Bereich der Generatoren. Sie bildet die Montage- und Ladezone des Krafthauses, daher ist bei der Planung auf genügend Arbeits- und Montageflächen zu achten. Die notwendigen Hebearbeiten in der Montagezone werden mittels eines Brückenkrans (Abb. 25, 4, S. 47) durchgeführt, der im Deckenbereich der Maschinenhalle installiert ist. Die maximale Traglast orientiert sich am Gewicht des Generators, der das schwerste Element im Krafthaus darstellt. Auch die Höhenausrichtung der Laufkatze des Brückenkrans orientiert sich am Größenverhältnis des Generators.

3.3.3 *Elektrotechnische Ausrüstung*

Neben den Generatoren sind viele weitere elektrotechnische Komponenten (Abb. 26, gelbe Markierung, S. 47) in einem Krafthaus installiert. Wichtige Anlagenteile sind unter anderem: Schaltanlagen, Blocktransformatoren, Eigenbedarfstransformatoren, Mittelspannungsanlagen und Steuerungsschränke für die Vorortbedienung. Die dafür notwendigen Räumlichkeiten sind mit Doppelböden ausgestattet, die eine problemlose Kabelführung ermöglichen.

Die Blocktransformatoren sind auf Schienen gelagert und können für umfangreichere Revisionsarbeiten ins Freie gezogen werden. Sie werden in getrennten Räumlichkeiten stationiert, dabei ist auf eine ausreichende Frischluftzufuhr für den Kühlungsprozess zu achten.

3.3.4 *Betriebsräumlichkeiten*

Bei Wartungsarbeiten ist das Personal über längere Zeit im Krafthaus tätig. Betriebsräumlichkeiten, wie etwa Aufenthaltsraum, Waschraum und Toiletten sind im Krafthaus notwendig.

3.3.5 *Unterwasserkanal und Schwallausgleichsbecken*

Die letzten Stationen des Triebwassers vor der Rückgabe ins natürliche Gewässer sind der Unterwasserkanal und falls notwendig ein Schwallausgleichsbecken. Wie bereits im Kapitel 3.3.1. erwähnt, hängt die Ausführung des UW von der Bauart der installierten Turbine ab. Bei Pelton- Turbinen liegt eine freie Wasseroberfläche vor. Um Lärmemissionen der Turbine gering zu halten, wird der Unterwasserkanal als Siphon ausgeführt, d. h. der tiefergeführte Abschnitt des Kanals ist ständig mit Wasser gefüllt und besitzt somit eine schalldämmende Wirkung.

Das Triebwasser wird über ein Rückgabebauwerk in das Fließgewässer zurückgeleitet. Je nach Abflussverhältnis Fließgewässer/ Turbine entsteht beim Anfahren der Maschinen eine Schwallwelle im natürlichen Gewässer, die sich negativ auf Flora und Fauna des Flusses auswirken kann. Durch die Anordnung eines Schwallausgleichbeckens kann dieser negative Effekt reduziert werden. Die Wasserrückgabe erfolgt über ein regelbares Abflussorgan; abhängig vom aktuellen Abfluss des Gewässers, wird eine vorgeschriebene Menge aus dem Ausgleichsbecken in den Vorfluter eingeleitet.

Das Design des Ausgleichbeckens gleicht jenem des Kleinspeichers: Ein von Schüttdämmen umschlossenes Becken mit einem Zu- und Abflussbauwerk. Meist liegen im Bereich des Krafthauses großzügigere Platzverhältnisse vor, verglichen mit jenen im oberwasserseitigen Entnahmebereich. Der Talboden ist breiter und somit ist es entsprechend einfacher ein Ausgleichsbecken zu platzieren und in die Landschaft einzugliedern. Abb. 29 (S. 52) zeigt eine Animation des geplanten Schwallausgleichbeckens am orographischen linken Ufer der Isel im Virgental.



Abb. 29: Animation des Ausgleichsbecken im Bereich des Krafthauses Mitteldorf, WKW Obere Isel, (Der Virgentaler Weg 2013)

3.3.6 Energieableitung

Die Energieableitung ist ein zentraler Punkt bei der Konzeptionierung eines Wasserkraftwerks. Anlagen mit hohen Engpassleitungen benötigen Hochspannungsnetze um ihre produzierte Energie abführen zu können. Strom aus Kraftwerken wird in der Regel auf einer Spannungsebene 3- 30 kV erzeugt und mittels Transformatoren oder Umspannwerken auf eine Spannung von bis zu 400 kV in Europa transformiert und über Hochspannungsnetze verteilt (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 667).

Die Energieableitung zwischen dem Krafthaus und der Einspeisestelle wird als Freileitung oder Erdkabel ausgeführt, wobei der unterirdische Transport in Österreich immer mehr zur Regel wird.

4. Stollenspeicherung

Das Kapitel 3 beinhaltet charakteristische Bauwerke und Komponenten einer klassischen Hochdruckanlage - ihre Ausführungen gelten als zuverlässig und erprobt. Außergewöhnliche Randbedingungen und spezielle Anforderungen führen jedoch oft zu Sonderlösungen und zur Abwandlung eines bewährten Konzepts, eröffnen aber auch neue Wege und Möglichkeiten.

Die Bewirtschaftung des kilometerlangen Druckstollens einer Hochdruckanlage als Stollenspeicher ist ein solcher neuer Weg. Als Folge von ungünstigen Platzverhältnissen im Entnahmebereich, wo die Möglichkeit einer Speichieranordnung nicht gegeben ist, versucht man die positiven Effekte eines Speichers in den Druckstollen zu transferieren. Die sichere und problemlose Bewirtschaftung eines kilometerlanger Speicherstollen stellt eine Herausforderung für die Planung und dem Betrieb der Anlage dar.

4.1 Wirtschaftliche Aspekte

Den Anfang eines technischen Projekts, wie z. B. den Bau einer Wasserkraftanlage, bildet die Machbarkeitsstudie (engl. Feasibility Study). Das zentrale Thema darin ist die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines Bauvorhabens, dabei stellen die aus Vorstudien gewonnene Informationen über Hydrologie, Topografie, Geologie, Baugrund, Baukonzept, Jahresarbeitsvermögen, Marktverhältnisse und die vorhandene Umweltsituation (Giesecke, Mosonyi 2005), die oft wackligen Säulen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dar. Die Anordnung eines Stollenspeichers hat positive Auswirkungen auf das Jahresarbeitsvermögen und auf die Flexibilität der Wasserkraftanlage.

4.2 Hydraulische Aspekte

Ein Kriterium für die hydraulische Bemessung von Leitungen, geschlossenen Kanälen oder Stollen ist, eindeutige Abflussverhältnisse entlang des Transportwegs sicherzustellen. Darunter versteht man entweder einen vollständigen Druckabfluss- oder eine gänzliche Freispiegelabflusssituation (siehe Abb. 30 und Abb.

31 auf S. 54), welche in geschlossenen Profilen einen genügend großen Luftquerschnitt über dem Wasserspiegel benötigt.

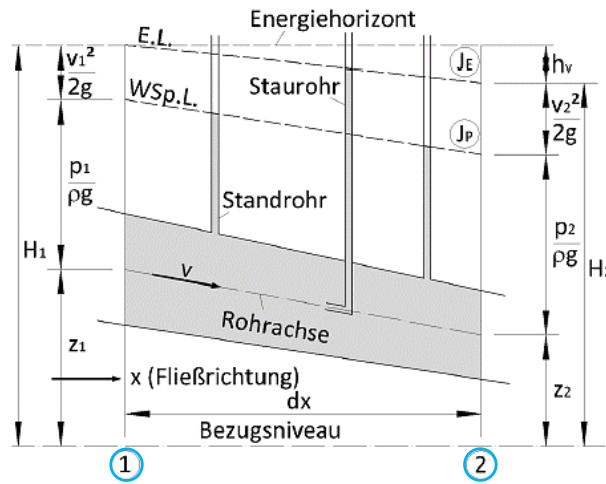


Abb. 30: Druck- und Energielinie bei Druckabfluss (Technische Universität Graz, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 2012, S. 1.4-1.5)

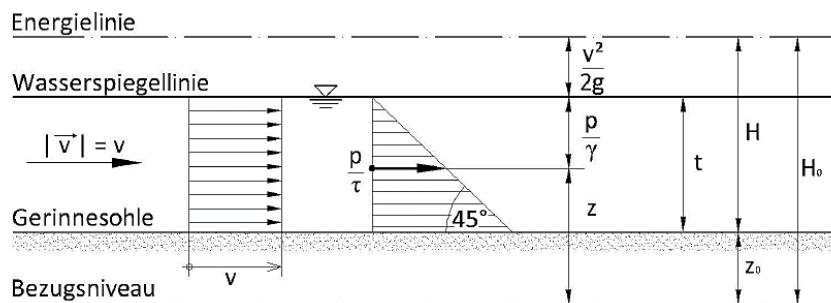


Abb. 31: Gleichförmiger Freispiegelabfluss (Technische Universität Graz, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 2012, S. 1.4-1.5)

Bei Ausleitungskraftwerken kann die Ausleitungsstrecke als Freispiegelgerinne, -stollen oder als Druckstollen, -leitung ausgeführt werden. Die Flachstrecke des TWW eines HDWKW wird in der Regel als Druckstollen konzipiert, wobei das oberwasserseitige Stauziel stets über der Tunnelfirste liegt.

Als Beispiel soll die Unterwasserstrecke vom KW Zirknitz bis zum Speicher Wurtenalm⁴ dienen, sie ist als Freispiegelstollen ausgeführt (siehe Abb. 32). Vom Unterwasser kommend wurde dieser mit einem Gefälle $I = 4 \text{ ‰}$ steigend vorgerieben, dabei erstreckt sich der Stollen über 7,5 km bis hin zum Krafthaus Zirknitz. Bemessen für einen Ausbaudurchfluss $Q = 7,65 \text{ m}^3/\text{s}$ mündet der Unterwasserstollen in den Speicher Wurtenalm. Der Auslauf ist etwa 3 m über dem Stauziel des Speichers angeordnet, somit ist ein unterwasserseitiger Rückstau unterbunden. Ein ausreichend großer Ausbruchquerschnitt verhindert das Zuschlagen des Stollens (Nackler 2014).

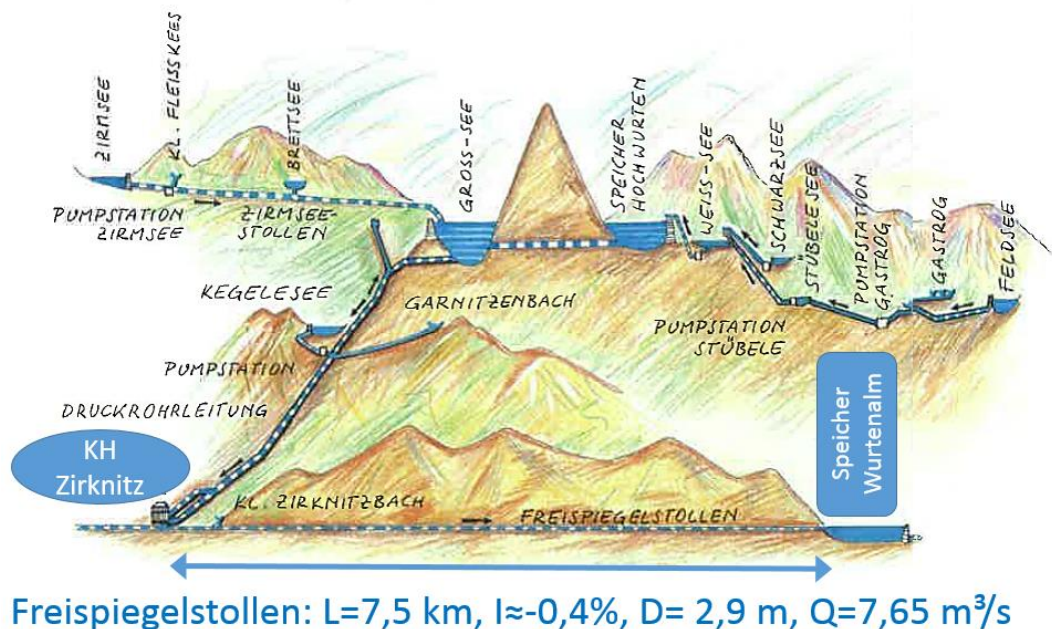


Abb. 32: Schematische Übersicht des KW Zirknitz (KELAG-Kärntner Elektrizitäts-Aktiengesellschaft 2000)

Bei der Bewirtschaftung von Flachstreckenstollen, bei welchen das Abflussverhalten zwischen Freispiegel- und Druckabfluss wechselt, können hydraulische Phänomene im Stollen auftreten, die sich negativ auf den Betrieb des Kraftwerks auswirken:

⁴Das KW Zirknitz und der Speicher Wurtenalm sind Bestandteile der Gruppe Fragant in Kärnten.

- Lufteintrag durch „Zuschlagen“ des Stollens: Bei sehr flacher Sohlneigung stellt sich kein eindeutiger Verschnitt zwischen dem WSP im Stollen und Tunnelfirste ein. Steigt der WSP bis an die Firste, beginnt aufgrund von Wellenbildung und Ausbruchsunregelmäßigkeiten der Stollenquerschnitt sich an vereinzelt Stellen gleichzeitig zu schließen und Luft wird in die Strömung eingeschlossen.
- Lufteintrag durch Füllschwall (siehe Abb. 33): Durch das Abschalten von Turbinen wird der Durchfluss im TWW reduziert. Im Freispiegelstollen breitet sich Richtung Oberwasser ein Schwall aus, der durch seine Deckwalze Luft in die Strömung induziert. Bei entsprechender Wassertiefe füllt der Schwall den Stollenquerschnitt und die eingetragene Luft kann nicht mehr entweichen.

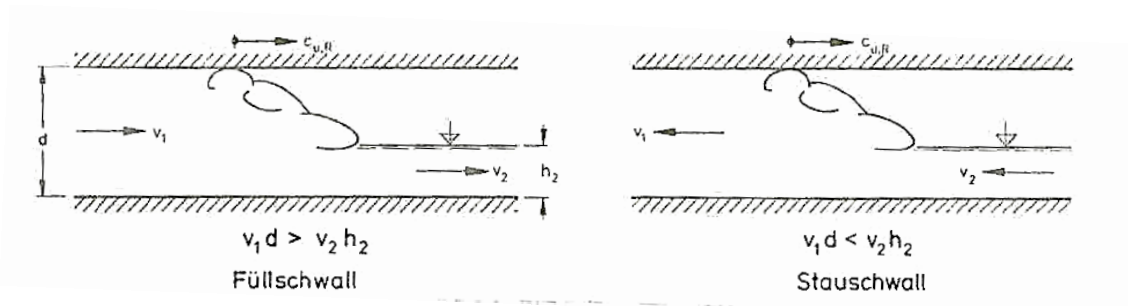


Abb. 33: Füll- und Stauschwall als Übergang zwischen Teil- und Vollfüllung (Geipert 1982, S. 42)

Die beschriebenen hydraulischen Besonderheiten bringen unter anderem folgende Auswirkungen mit sich:

- Strömungsverluste aufgrund von Lufteinschlüssen an der Firste oder an Hochpunkten: Angesammelte Luftmassen im Stollen verursachen lokale Strömungsverluste. Sie können als Querschnittsreduktionen verstanden werden und vermindern dadurch die Fallhöhe des WKW.
- Lufttransport ins UW aufgrund der Strömungskräfte: Von der Strömung des Druckabflusses wirken Kräfte auf die eingeschlossenen Luftblasen

und bei ausreichenden Strömungsgrößen beginnt sich die eingeschlossene Luft Richtung UW zu bewegen.

- Plötzliches und unkontrolliertes Austreten angesammelter Luft aus dem Stollen: Festsitzende Luftpolster können sich bei ausreichender Auftriebskraft lösen und sich Richtung OW bewegen. Entsprechend des vorliegenden Wasserdrucks tritt die Luftblase z. B. an der WF explosionsartig aus und kann sogar Schäden am Bauwerk verursachen (Abb. 34).



Abb. 34: "Blow Out" an der Wasserfassung des WKW Küblis/ Schweiz während des Testbetriebs (Arnason, Lardelli 2012)

Eine ausführlichere Auseinandersetzung mit der Thematik der möglichen hydraulischen Phänomene bei Stollenspeicherung ist im Masterprojekt *Wasser- Luftströmungen in Stollenspeicher* (Wechtitsch 2013) zu finden.

4.3 Speicherstollen des untersuchten Wasserkraftwerks

Das Projektgebiet der untersuchten Wasserkraftanlage befindet sich im alpinen Raum. Das Projekt beinhaltet die Errichtung eines Ausleitungskraftwerks. Das Stauziel liegt auf etwa 1107 müA und der Krafthausstandort befindet sich auf etwa 966 müA. Die Nettofallhöhe beträgt über 130 m und daher wird die Anlage aufgrund ihrer Nutzfallhöhe als Hochdruckwasserkraftwerk bezeichnet.

Die technischen Daten des betrachteten Kraftwerks sind folgend zusammengefasst angeführt:

Ausbauwassermenge Q_A	12 m ³ /s
Bruttofallhöhe	142,1 m
Nettofallhöhe	135 m
max Leistung	13,5 MW
Regelarbeitsvermögen (RAV) ohne Speicherbetrieb	52,2 GWh

Tabelle 3: Technische Daten der untersuchten Anlage

Im Bereich der Wasserfassung beträgt der mittlere Abfluss $MQ^5=8,4$ m³/s. Die Entnahme erfolgt an der orographischen rechten Uferseite über eine seitliche Entnahme. Das Wasser gelangt über den Einlauf in den mit drei Becken ausgestatteten Entsander, eine Überfallschwelle trennt das anschließende Einlaufbecken von den Entsanderkammern.

Der TWW setzt sich wie folgt zusammen:

- Dükerstrecke
- Flachstreckenstollen
- Wasserschloss
- Kraftabstieg
- Sohlstollen mit aufgeständerten Druckrohrleitung

⁵ errechnet aus Pegeldaten von 1968-2008 (Hydrographisches Jahrbuch 2008)

Die Dükerstrecke unterquert einen Straßentunnel. Am Ende des Dükers beginnt der etwa 4,5 km lange und als Speicher genützte Stollen. Der entstehende Hochpunkt (HP 1) am Beginn des Stollens beinhaltet eine Be- und Entlüftungsmöglichkeit. Das Gefälle des Stollenspeichers beträgt -1,5 ‰ und sein Durchmesser ist größer als 3,0 m. Der Ausbruch geschieht über einen Zwischenangriff in beide Richtungen. Über einen Fensterstollen im oberen Bereich des TWW wird das Teilstück Richtung OW konventionell vorgetrieben. Der Großteil des Ausbruchs erfolgt fallend mittels TBM Richtung UW.

Am Ende des Flachstollens ist eine Geschiebefalle angeordnet: In der Querschnittsaufweitung soll sich aufgrund der reduzierten Fließgeschwindigkeit mittransportiertes Geschiebe absetzen. Ein mit -15 ‰ geneigter und 31 m langer Schrägstollen führt zum Wasserschloss. Der am Beginn des Schrägstollens vorhandene Hochpunkt (HP 2) ist mit einer Be- und Entlüftungseinrichtung ausgestattet. Das Wasserschloss ist als Schachtwasserschloss konzipiert.

Der Kraftanstieg ist als gepanzerter Lotschacht geplant. Eine aufgeständerte Druckrohrleitung im Sohlstollen verläuft in Richtung Krafthaus. Der letzte Abschnitt der Stahlleitung erfolgt erdverlegt bevor sie das Krafthaus erreicht.

Abb. 35 (S. 60) zeigt einen schematischen TWW- Längsschnitt der untersuchten Anlage. Darauf sind die beiden Hochpunkte am Anfang und am Ende des teilgefüllten Speicherstollens erkennbar.

Im Krafthaus sind drei vertikalachsige Pelton- Turbinen installiert. Über einen Unterwasserkanal wird das turbinierte Wasser an das natürliche Gewässer zurückgegeben.

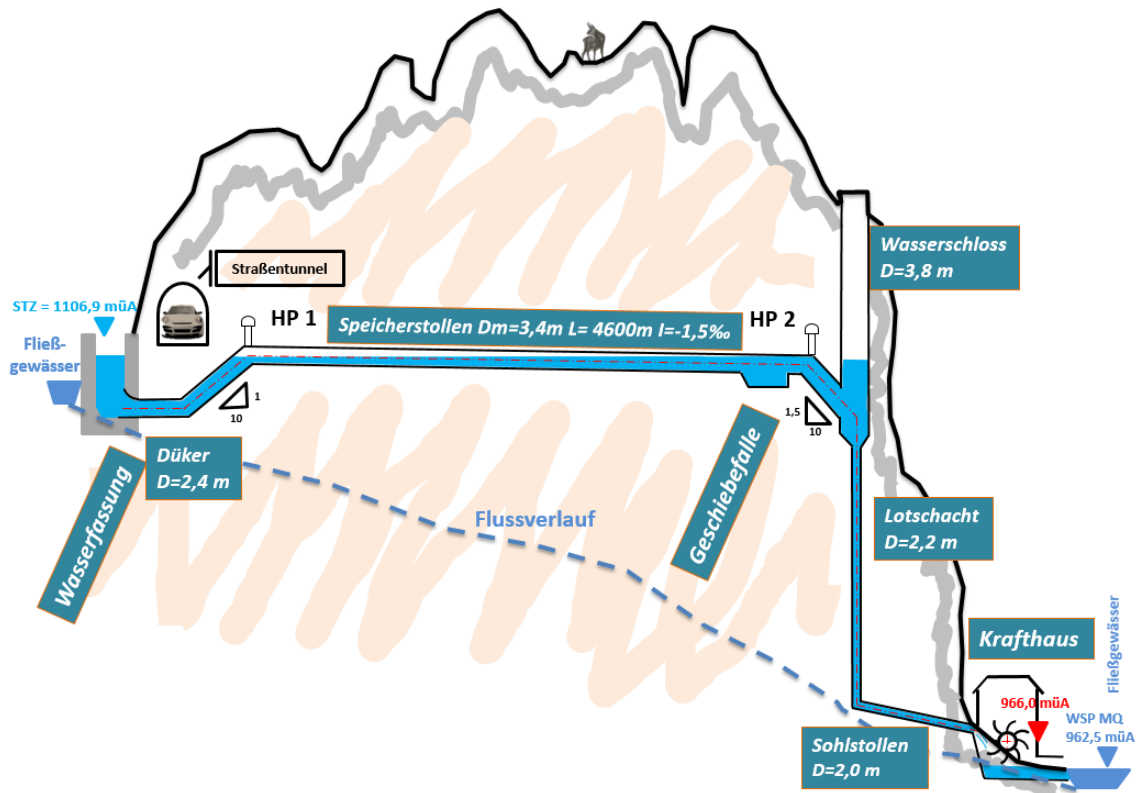


Abb. 35: Schematischer Längsschnitt des teilgefüllten TWW der untersuchten Anlage

Die in diesem Dokument angeführten Daten betreffend der untersuchten Wasserkraftanlage aus den Planungsunterlagen des technischen Projekts. Die von INFRA Project Development GmbH gefertigten und zur Verfügung gestellten Unterlagen setzen sich unter anderem aus dem Technischen Bericht, aus Übersichtsplänen und Bauwerksplänen zusammen. Die folgenden Berechnungen für die Bewertung der Fließvorgänge im Stollenspeicher beziehen sich auf die untersuchte Anlage.

Für die Simulation der Fließvorgänge im Speicherstollen sind vor allem die Entnahmemenge der WF, die Geometrie und Rauheitsbeiwerte des TWW bis zum Wasserschloss, das Wasserschloss selbst und die Schaltzeit der Turbinen von Bedeutung. Bis zum Schrägschacht vor dem Wasserschloss wechselt die Abflusssituation zwischen Druck- und Freispiegelabfluss, von dort an liegt in Richtung UW stets Druckabfluss vor.

5. 1D- numerische Software für transiente Simulationen

Das hydraulische System des Stollenspeichers des betrachteten Wasserkraftwerks wird im numerischen Modell mit 1D- Elemente aufgebaut. Die Hauptströmungen treten in Fließrichtung auf und Geschwindigkeiten quer zur Stollenachse sind vernachlässigbar klein. In der 1D- numerischen Strömungsberechnung kommt die Stromfadentheorie zur Anwendung. Die Strömungsgrößen verändern sich im betrachteten Querschnitt nicht - man spricht von einer mittleren Wassertiefe bzw. einer mittleren Geschwindigkeit.

Die untersuchte Sohlneigung liegt bei -1,5 ‰. Entlang des Speicherstollens liegen keine abrupten Neigungsänderungen oder Einbauten vor, welche das Wasser beschleunigen oder verzögern; die Stromlinienkrümmungen sind daher gering und es kann mit einer hydrostatischen Druckverteilung gerechnet werden.

Die dargelegten Feststellungen und Annahmen führen zur Anwendung der Stromfadentheorie für die Simulation der Fließvorgänge im Stollenspeicher. Sie findet ihre Anwendung bei Berechnungen von 1D- Strömungen in geschlossenen oder offenen Gerinnen.

Die Simulation der Fließvorgänge erfolgt mit Unterstützung einer 1D- numerischer Berechnungssoftware.

5.1 Kriterien für die Wahl geeigneter Software

Für die 1D- Modellierung von Rohrströmungen steht eine ganze Reihe von Berechnungssoftware zur Verfügung, kommerzielle und auch freie Programme. Doch nicht jede ist für die numerische Modellierung von Stollenspeicher geeignet.

Die Grundanforderung (Abb. 36, S. 62) an die verwendete Software ist die Richtigkeit der Berechnungsergebnisse. Viele Programme arbeiten nach dem „Black-box“-Prinzip: Der User ist nicht mit dem Code der Berechnung vertraut und muss den Ergebnissen der Simulation Vertrauen schenken; eine Plausibilitätskontrolle oder Vergleichsrechnungen mit anderen Softwares ist daher notwendig. Als Plausibilitätskontrolle wird folgendes durchgeführt:

- Überprüfung der Kontinuität
- Kontrolle der Massenschwingung und Eigenfrequenz
- Kontrolle der Ergebnisse der stationären Berechnung mit Handrechnung

Zu den spezifischen Anforderungen (Abb. 36) zählen die Simulation von Druck- und Freispiegelabfluss in geschlossenen Querschnitten und die Modellierungsmöglichkeit typischer Komponenten von Hochdruckwasserkraftanlagen, wie z. B. Wasserschläsler oder Lotschächte.

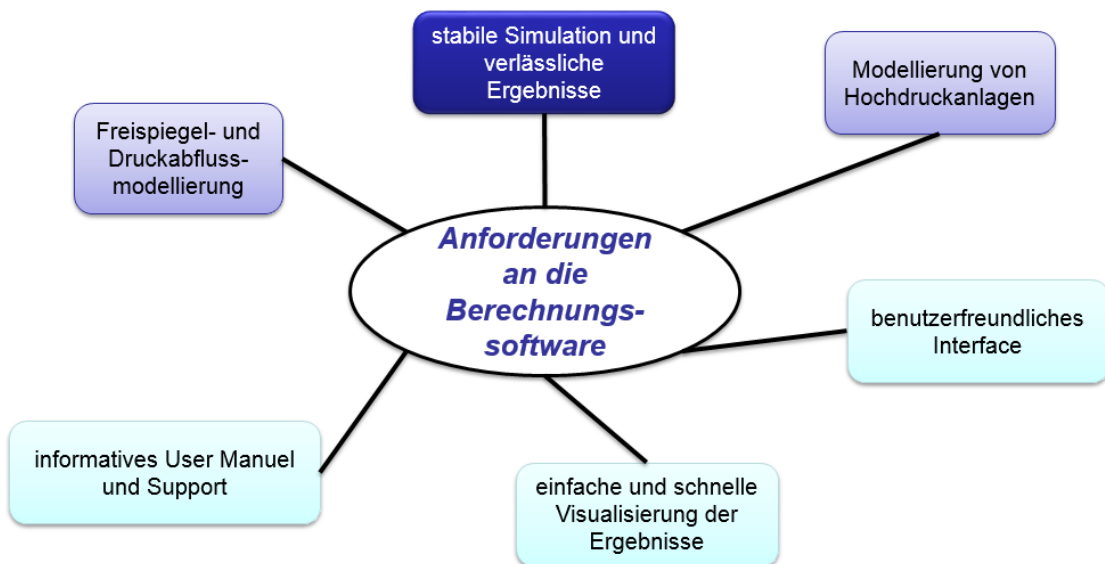


Abb. 36: Kriterien für die Wahl einer geeigneten Berechnungssoftware für die numerische Modellierung von Stollenspeicher

Zusätzliche Eigenschaften (Abb. 36), die den Umgang mit einer Berechnungssoftware erleichtern sind ein informatives Manual, leistungsstarkes Postprocessing und eine einfache Bedienbarkeit.

Für die 1D- numerischen Berechnungen wird die Software *WANDA 4.2* von *Deltares Systems* verwendet. Zum Vergleich wird die Open Source Software *ITM* der Origion State University in einigen Punkten untersucht.

5.2 Analyse der Einsatztauglichkeit von *WANDA 4.2* für die 1D- numerischen Berechnungen

Am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz wird *WANDA* für die numerische Berechnung von Druck- und Freispiegelströmungen verwendet. Die Validierung der numerischen Modelle geschieht an physikalischen Modellen im Wasserbaulabor (Richter, Schneider et al. 2013). Somit ist bekannt, dass die spezifischen Anforderungen (Druck- und Freispiegelabfluss, Modellierungsmöglichkeit einer HDWKW) seitens von *WANDA* erfüllt sind.

5.2.1 Massenerhaltung bei *WANDA 4.2* vorerst nicht gegeben

Nach der Einarbeitungsphase und der Modellierung der untersuchten Wasserkraftanlage werden die ersten Simulationen durchgeführt. Einfache Lastfälle wie der Füllvorgang des Stollens, lassen sofort erkennen, dass die ersten Berechnungen nicht massenkonservativ sind.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Berechnungsabweichungen nur bei der Verwendung des Modellierungselements *Free Surface Flow Pipe (FSF Pipe)* auftreten und nicht bei Elementen, die für reine Druckabflussmodellierung zur Verfügung stehen.

Um der Ursache des Fehlers schneller auf den Grund zu kommen, kommt die Fehleranalyse bei einem simplen Modell mit zwei Rohrabschnitten (siehe Abb. 37:, oben, S. 64), anstatt beim umfangreichen Modell der untersuchten Anlage zur Anwendung.

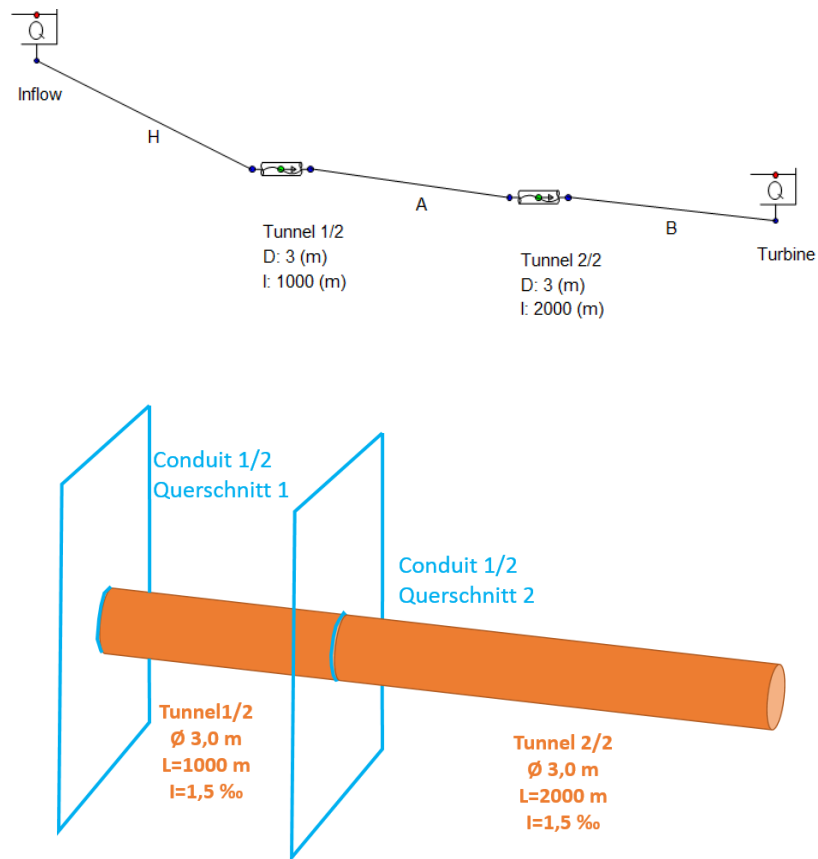


Abb. 37: oben: Das vereinfachte Modell für die Fehleranalyse, unten: Detailansicht des untersuchten Stollens

In Abb. 38 (S. 65) ist der Zufluss (rot) im Kontrollquerschnitt 1 und der Abfluss (grün) aus dem Kontrollquerschnitt 2 des Tunnels 1/2 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass ein maximaler Abfluss von nur $5,1 \text{ m}^3/\text{s}$ im Kontrollquerschnitt 2 vorliegt, bei einem Zufluss von $6,0 \text{ m}^3/\text{s}$ wird die Massenerhaltung nicht erreicht.

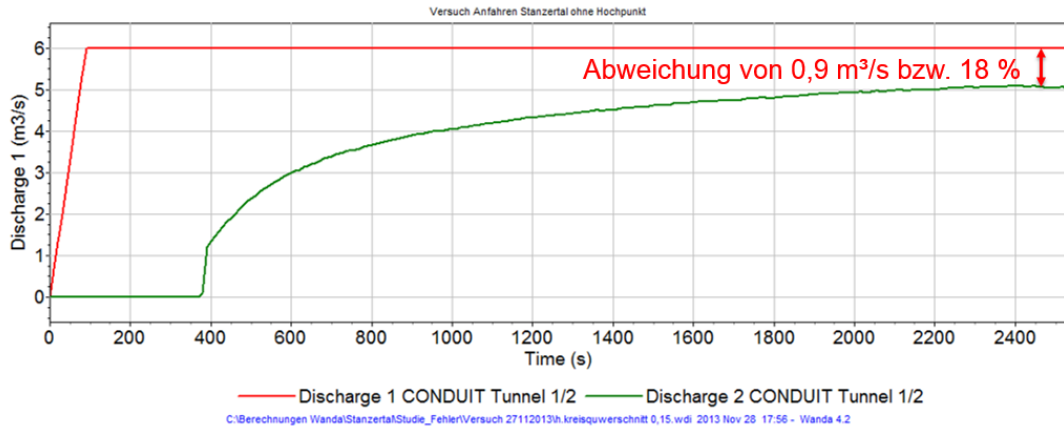


Abb. 38: Probleme mit der Massenkonservativität des FSF Elements

Die Konsequenz ist die Durchführung zahlloser Testläufe mit Parameterstudien um die Fehlerquelle einzugrenzen. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick von der Abfolge der Parameterstudie gegeben werden:

- Reduktion der Tunnelabschnittslängen: Da die modellierten Tunnelabschnitte der Untersuchungsanlage über große Längen verfügen, werden diese schrittweise reduziert und dabei die Durchflussabweichung beobachtet. Komponenten mit Längen um die 80 m weisen eine vernachlässigbare Durchflussabweichung auf. Durch die Aneinanderreihung mehrerer kurzer Abschnitte summiert sich jedoch der Fehler wieder auf.
- Variation des Zeitschrittes: Abhängig vom wählbaren Berechnungszeitschritt werden programmintern die Komponenten der Freispiegelleitungen in Elementen unterteilt - die Größenordnung der Elementlängen liegt bei einem Zeitschritt von 0,1 s bei etwa 1,5- 2,0 m. Größere Zeitschritte führen zu größeren Elementlängen und zu reduzierter Abweichung der Massenerhaltung. Der Zeitschritt ist jedoch für die Berechnungen nach oben hin begrenzt.
- Variation des Querschnitts: Neben Berechnungen mit Kreisprofilen werden auch Simulationen mit Rechteckquerschnitten unternommen - die Abweichungen blieben unverändert.

- *Drying and Wetting*- Problematik: Wird ein leerer Stollen mit Wasser gefüllt, so läuft die erste Wasserlamelle auf der Sohle entlang Richtung UW. Dieser Vorgang, *Wetting* genannt, kann bei gewissen numerischen Schemen zu Ungenauigkeiten im Ergebnis führen. Um diese Problematik als mögliche Fehlerquelle für die Abweichungen im Durchfluss ausschließen zu können, wird ein bereits teilgefüllter Stollen mit Wasser beaufschlagt. Dabei bewegt sich die Lamelle auf der Wasseroberfläche des teilgefüllten Gerinnes (siehe Abb. 39, oben). Das Ergebnis (siehe Abb. 39, unten) zeigt deutlich eine weiterhin bestehende Unstimmigkeit der Massenkonservativität. Somit kann *Drying and Wetting* als Ursache für den auftretenden Fehler ausgeschlossen werden.

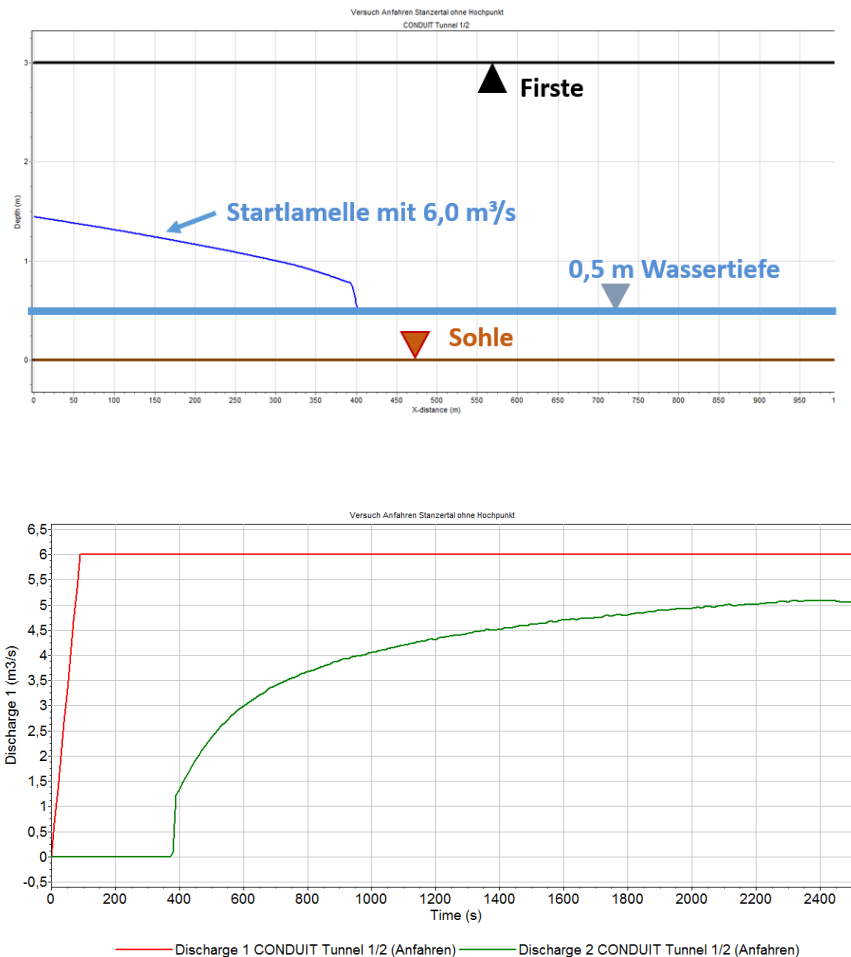


Abb. 39: oben: Ausgangssituation der Prüfsimulation für die „Wetting“-Problematik, unten: die unveränderte Abweichung des Durchflusses

- Variation der Sohlneigung: Da die Längsneigung der modellierten Stollen sehr gering ist, werden Berechnungen mit steilerem Gefälle angestellt. Eine Zunahme der Neigung führt gleichzeitig zur Erhöhung der Fließgeschwindigkeit und der Froude Zahl des Durchflusses. Die Berechnungsergebnisse zeigten, dass bei höheren Geschwindigkeiten die Abweichung des Durchflusses abnimmt. Abb. 40 zeigt den Durchfluss am Querschnitt 2 des Tunnels 1/2 (siehe Abb. 37:, unten, S. 64) abhängig vom Sohlgefälle und der daraus resultierenden Froude- Zahl. Bei Froude Zahlen größer 3,0 [-] liegt kein Fehler in der Massenerhaltung mehr vor.

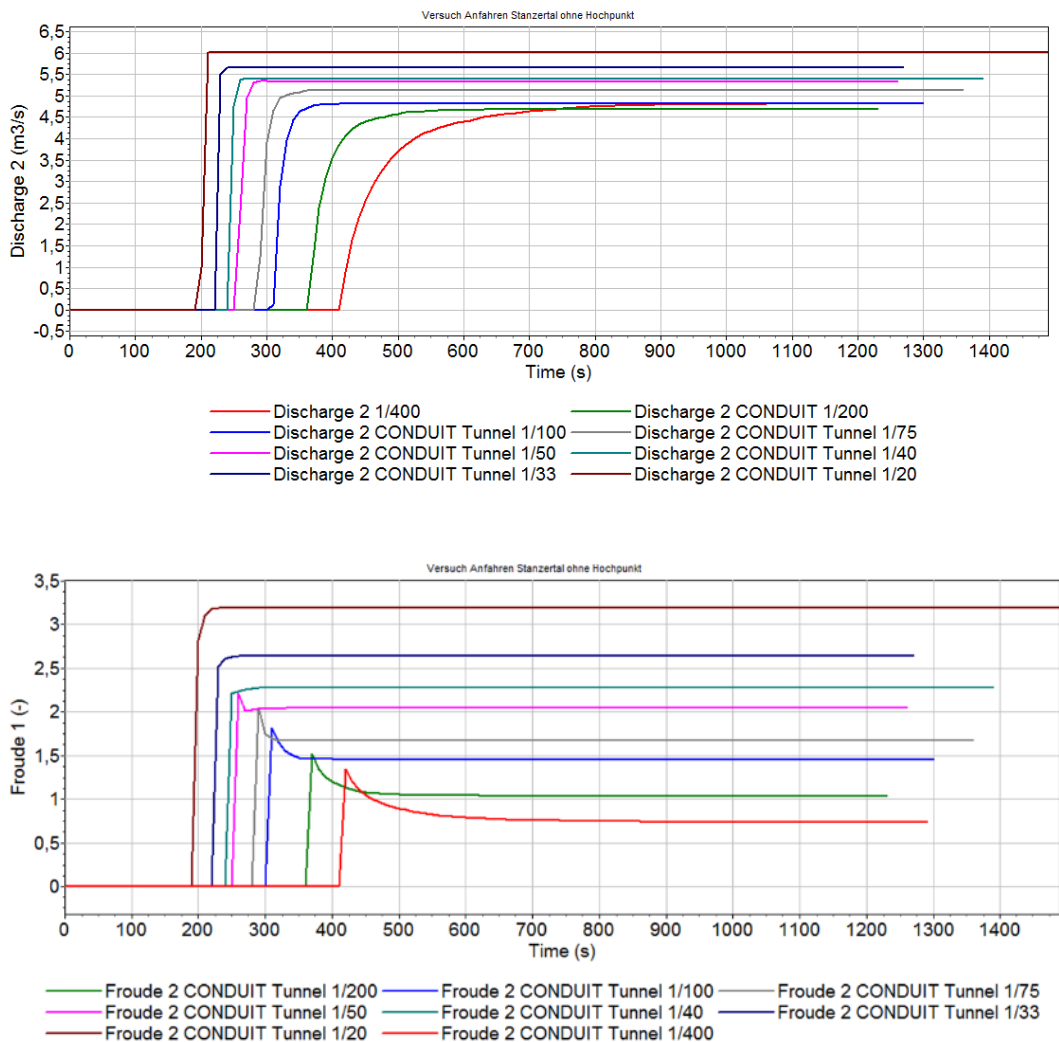


Abb. 40: Durchfluss im Querschnitt 2 bei unterschiedlicher Sohlneigung (oben) und der daraus resultierenden Froude Zahl (unten)

Die Abhängigkeit der Durchflussdifferenz von der Fließgeschwindigkeit ließ einen Fehler im numerischen Schema des Elements *FSF Pipe* vermuten. In weiterer Folge wird die Arbeit von Aldrighetti, Stelling untersucht, an die sich der numerische Code des *FSF Pipe* Elements von *WANDA* anlehnt. Aldrighetti und Stelling beschreiben ein sehr robustes und stabiles numerisches Schema für die Modellierung von Freispiegel- und Druckabfluss in beliebigen Querschnitten.

Die Ursache des Problems wurde schlussendlich vom Support Team von *Deltares* geklärt: Der Grund liegt in der Maschinengenauigkeit, sie ist mit einer einfachen Genauigkeit (simple precision) angegeben. Die Höhensituierung eines Berechnungsmodells sollte im Bereich des Null- Niveaus liegen, damit eine ausreichende Berechnungsgenauigkeit erreicht werden kann und somit auch geringe Wasserspiegeländerungen im System berücksichtigt werden. Abb. 41 zeigt den Vergleich des Durchflusses des Querschnitts 2 des Tunnels 1/2 in Abhängigkeit der Höhensituation des Modells.

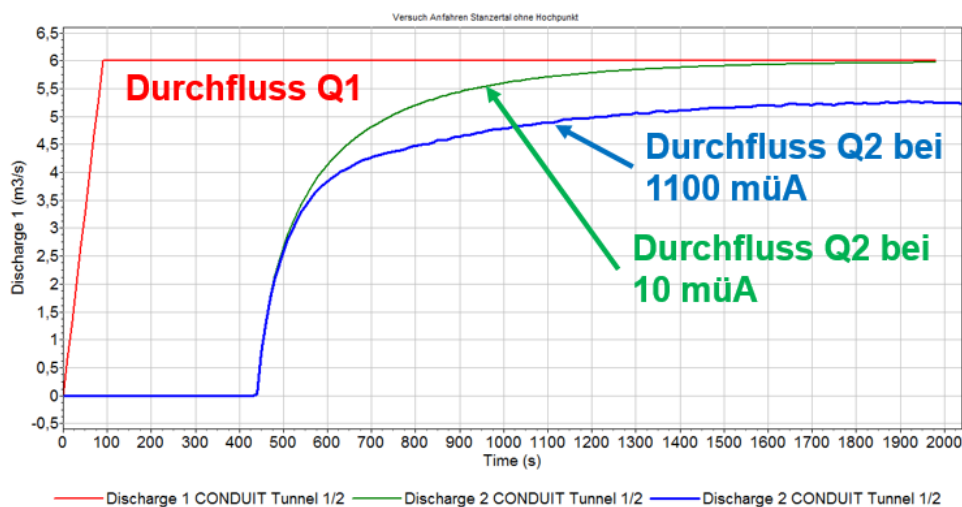


Abb. 41: Durchfluss im Querschnitt 2 des Tunnel 1/2 in Abhängigkeit der Höhenlage des Modells

Aufgrund der Lösung des Problems bzgl. Massenerhaltung in *FSF Pipe* Elementen kann *WANDA 4.2* als tauglich für die Simulationen von Freispiegelabfluss bewertet werden.

Für Freispiegelabflusssimulationen mit WANDA 4.2 sollten die für die Berechnungen notwendigen Höhenquoten des Modells im Bereich des Null- Niveaus liegen, um Abweichungen in den Ergebnissen zu verhindern. Der Grund dafür liegt an der niedrigen Maschinengenauigkeit.

5.2.2 Massenschwingung des Free Surface Flow Pipe Elements von WANDA 4.2

Beim Anfahren oder Abschalten der Turbine eines WKW beginnt die Wassermasse des Druckstollens periodisch zu schwingen. Dabei stellen die Fließverluste durch Reibung die Dämpfung der Schwingung dar und bringen diese allmählich zum Erliegen.

In der Literatur ist die Schwingungsdauer T der Masse im Druckstollen für plötzliches Öffnen oder Schließen der Turbine wie folgt angegeben:

$$T = 2 * \pi \sqrt{\frac{l_S * A_W}{g * A_S}} \quad (1)$$

l_S ...Länge des Stollens

A_W ...Querschnittsfläche des Wasserschlosses

A_S ...Querschnittsfläche des Stollens

Das *FSF Pipe* Element ist eine Modellkomponente des WANDA 4.2 und ermöglicht 1D- numerische Abflusssimulationen von Freispiegel- und Druckabflussgerinnen. Die Berechnungsergebnisse von Modellen, die das *FSF Pipe* Element beinhalten, zeigen nicht vernachlässigbare Abweichungen der Schwingungsdauer gegenüber der analytischen Kontrollrechnung. Im Manual wird darauf hingewiesen, dass bei Simulationen mit dem *FSF Pipe* Element kein Druckstoß berücksichtigt wird und daher bei Berechnungen mit vollgefülltem Querschnitt (Druckabfluss) es zu Abweichungen in den Ergebnissen im Vergleich zu Modellierungselementen, die Druckabfluss simulieren, kommen kann. Vergleichsrechnungen mit Druckabflusskomponenten bestätigten diesen Hinweis.

Die Vorläuferversion *WANDA 3.72* beinhaltet das Modellierungselement *FSF Pipe* mit Druckstoßmodellierung. Die Berechnungsergebnisse bei Vollfüllung zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Lösungen der analytischen Berechnungen und den Ergebnissen der Druckabflusskomponente. Die folgenden Simulationen der vorliegenden Arbeit werden mit *WANDA 3.72* durchgeführt.

Aufgrund der eingegrenzten Einsatzmöglichkeit des *FSF Pipe* Elements ist *WANDA 4.2* nur beschränkt für die Modellierung von Stollenspeichern tauglich. Die geringe Information im User Manual über das implementierte numerische Schema stellt ebenso einen negativen Kritikpunkt dar. Die einfache Maschinengenauigkeit von *WANDA 4.2* ermöglicht kürzere Simulationszeiten, bereitet jedoch Umstände im Bereich der Abbildung der Höhensituation eines HDWKW.

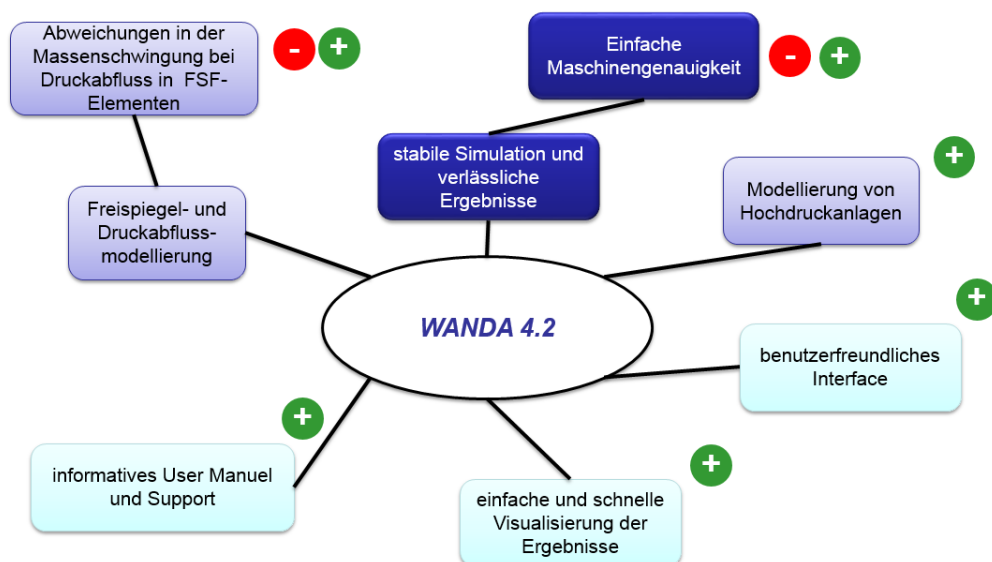


Abb. 42: Bewertung der Tauglichkeit von *WANDA 4.2* für die Berechnung von Fließvorgängen im Stollenspeicher

5.3 Analyse der Einsatztauglichkeit von *ITM* für die 1D- numerischen Berechnungen

Neben *WANDA 4.2* wird *ITM (Illinois Transient Model)* auf die Tauglichkeit für die Simulation von Fließvorgängen bei Stollenspeicher getestet. Die Software wird als Open Source Produkt angeboten und steht unter

<http://web.engr.oregonstate.edu/~leon/ITM.htm>⁶ zum Download bereit. Die Entwicklung und Betreuung von *ITM V. 1.3.1* (aktuelle Version) geschieht in der Forschungsgruppe von Dr. Arturo Leon, die ihre Schwerpunkte in die instationäre Hydraulik (Freispiegel- und Druckabfluss, Mixed- Flow, Two- Phase Flow), in das Stormwater Management, Stormwater Modeling und in die numerische und physikalische Modellierung von Wasserbauwerken gesetzt hat. Neben der Software *ITM* sind noch andere Programme, wie *Urban Flooding Model* und *OSU River*, in der Research Group von Dr. Leon entwickelt worden (Leon 2013).

ITM ist auf die Modellierung von Abflüssen im Regenkanalsystemen (engl. Stormwater Sewer) zugeschnitten. Plötzliche Niederschlagsereignisse, z. B. während eines Sommergewitters, führen zu raschem Ansteigen des Abflusses im lokalen Kanalnetz. Dabei kann die Abflusscharakteristik von Freispiegel- auf Druckabfluss übergehen - Parallelen zum Stollenspeicher. Jedoch tritt die durch Platzregen hervorgerufene transiente Strömung mit weitaus höheren Abflussgeschwindigkeiten auf. Die zentrale Anwendung von *ITM* in der Stormwater- Modellierung spiegelt sich auch in den Programmfunktionen wieder. Typische Modellierungselemente sind Schächte, Rohrleitungen, Schieber und Pumpen. Ein Merkmal von *ITM* ist die Charakteristik der Simulationszeit: Für Regenereignisse sind Berechnungszeiträume von mehreren Stunden oder Tagen notwendig. Entsprechend träge sind die Modifikationen im Zu- oder Abfluss, die sich nur jede volle Minute anpassen lassen - gerade bei Simulationen von Turbinen von HDWKW sind jedoch geringere Schaltzeiten zu modellieren.

Nach der Berechnung erster Testsimulationen konnte folgende Bewertung für die Tauglichkeit von *ITM V. 1.3.1* für die Simulation von Fließvorgängen in Speichertollen abgegeben werden:

⁶ Homepage der Oregon State University, zuletzt aufgerufen am 13.03.2013

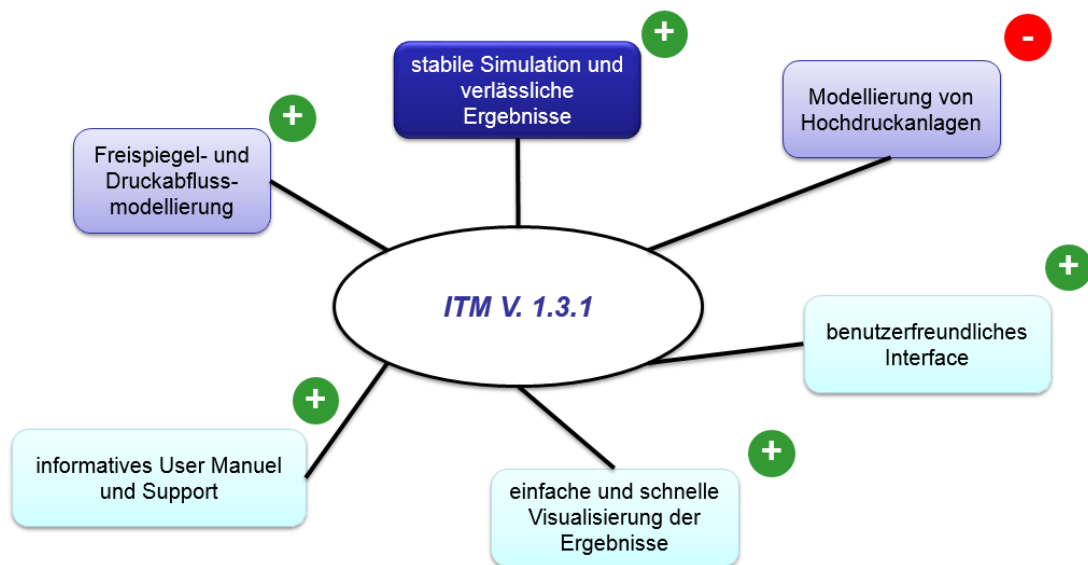


Abb. 43: Bewertung der Tauglichkeit von ITM für die hydraulische Berechnung von Fließvorgängen im Stollenspeicher

Die fehlenden Modellierungsmöglichkeiten eines Kammerwasserschlosses und kurzer Turbinenschaltzeiten sind notwendige Anforderungen für Simulationen von HDWKW. Zurzeit erscheint das Programm *ITM V. 1.3.1* für die Simulation von Stollenspeicher, aus Sicht des Autors, als ungeeignet. Da jedoch der numerische Code von *ITM* der Öffentlichkeit frei zur Verfügung steht, können die benötigten Funktionen adaptiert werden.

6. Simulation der Fließvorgänge bei Stollenspeicher

Für die Durchführung der transienten Abflussberechnungen kommt *WANDA 3.72* zum Einsatz. Die Modellierungspalette beinhaltet ein Element für die Simulation von Freispiegelabfluss, welches bei Vollenfüllung (Druckabfluss) die Druckstoßausbreitung berücksichtigt und somit die Massenschwingung im Speicherstollen korrekt darstellt.

6.1 Einführung in *WANDA 3.72*, eine Software für die 1D- numerische Berechnung von Pipeline- Systemen

WANDA 3.72 von *Deltares Systems* ist eine Software zur 1D- numerischen Simulation von Strömungen in Rohrleitungssystemen, dabei kann neben Druckabfluss auch Freispiegelabfluss simuliert werden. Mit Hilfe des Programms lassen sich stationäre und transiente Fließvorgänge in Pipeline- Systemen auf schnelle Art und Weise berechnen. Eine Visualisierung der Ergebnisse mittels Echtzeit- Simulation ermöglicht dem Benutzer das hydraulische Verhalten komplexer Anlagen leichter zu verstehen.

Dem User stehen zwei grundlegende Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung: Die Berechnung stationärer Strömungsvorgänge- im Programm als *Engineering Mode* bezeichnet und die numerische Berechnung von instationären Vorgängen als *Transient Mode* benannt. Je nach Wahl des Modus stehen entsprechende Input- und Output- Eigenschaften bereit.

WANDA 3.72 verwendet als graphische Benutzeroberfläche *iGrafX® FlowCharacter®*. Spezifische Elemente für die Systemmodellierung einer hydraulischen Anlage, wie Rohrleitungen, Pumpen, Zu- und Abfluss, sind aus sogenannten *Shape Palettes* (siehe Abb. 44 links, S. 74) des GUI (Graphical User Interface, dt. Graphische Benutzeroberfläche) zu entnehmen. Das primäre Tool der Benutzeroberfläche ist das *Property Window* (siehe Abb. 44 rechts, S. 74), in dem der Input und Output der einzelnen Modellelemente organisiert ist. Per *Drag and Drop* werden die benötigten Elemente, wie Rohre, Schieber und Zufluss- Rand-

bedingungen von der *Shape Palette* in die Zeichnungsfläche positioniert und Parameter wie Durchmesser, Länge, Öffnungsgeschwindigkeit und Zuflussmenge im jeweiligen *Property Window* definiert.

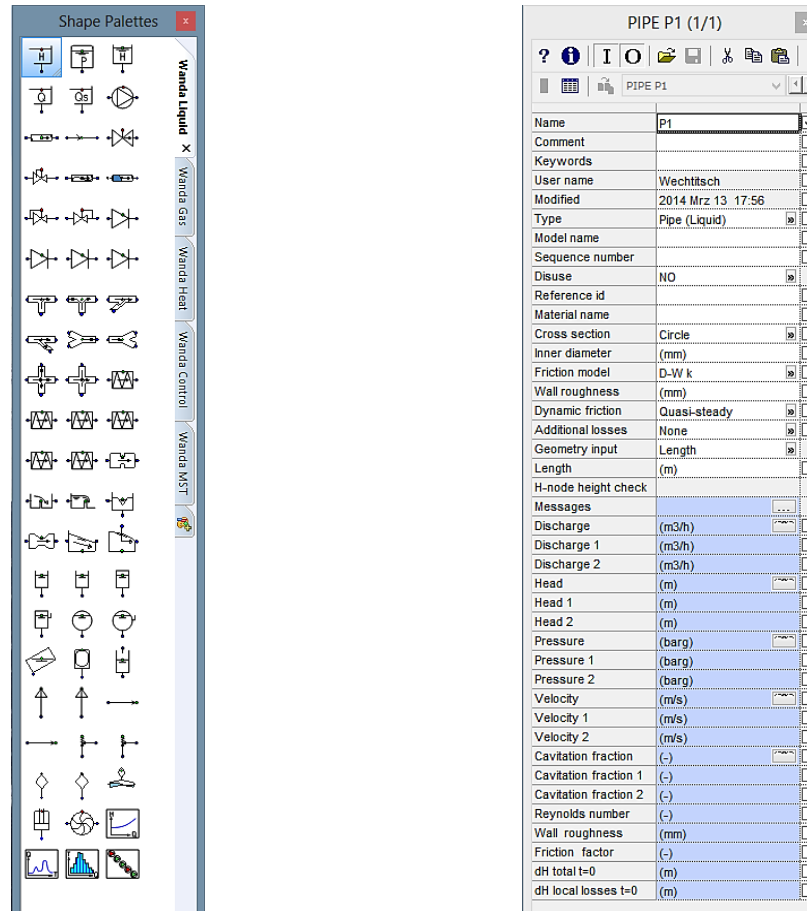


Abb. 44: Die Shape Palettes (links) und das Property Window eines Pipe- Elements (rechts)- zwei wesentliche Bestandteile des User Interface

6.1.1 Elemente für die hydraulische Modellierung von Rohrsystemen

Die angeführten Komponenten bilden die Gruppe der wesentlichen Bausteine für die numerische Modellierung eines HDWKW mit WANDA 3.72. Die für die hydraulische Modellierung notwendigen Komponenten (*H- Components*) sind in der *Shape Palette* unter der Rubrik *WANDA Hydraulic* zu finden.

H- Node ist die Bezeichnung für hydraulischer Knoten, welcher Modellbausteine wie z. B. Rohrleitungen untereinander verbindet. Als Input- Parameter ist die Höhenquote zu definieren, die meist aufgrund der Höhensituation der benachbarten

Komponenten automatisch vorgeschlagen wird. Die Höhenquote ist der Referenz- Level für die Druckhöhe.

Free Surface Flow Waterhammer Pipe (dt.: Freispiegelabfluss Rohrelement mit Druckstoßmodellierung): Beim Betreiben von Stollenspeicherung wechselt die Abflusssituation zwischen Druck- und Freispiegelabfluss. Ist die Ausleistungsmenge geringer als der Zufluss zur Turbine, beginnt der Stollen sich zu entleeren, der Wasserspiegel sinkt unter die Firste des Stollens ab. Ist der Zufluss jedoch höher als der Abfluss füllt sich der TWW kontinuierlich.

Die soeben beschriebenen Vorgänge können mit der hydraulischen Komponente *FSF Waterhammer Pipe* abgebildet werden. Damit lassen sich eindimensionale Strömungsvorgänge wie Schwall und Sunk berechnen.



Abb. 45: Symbol FSF Waterhammer Pipe

Bei der Verwendung der Freispiegelabfluss- Komponente sind laut Manual jedoch einige Punkte zu beachten:

- Lufttransport und Lufteinschlüsse werden in der Simulation nicht berücksichtigt, es wird eine Be- und Entlüftung vorgeschlagen
- Die Anwendung ist auf eine maximale Sohlneigung von 14 % begrenzt (Geltungsbereich der Stromfadentheorie)
- Auch der Neigungswechsel zwischen zwei Leitungsabschnitten ist mit 14 % begrenzt

(Deltares 2013, S. 241)

Des Weiteren ist auf die Höhensituation flacher Freispiegel- Elemente zu achten, sie sollten im Bereich des Null- Niveaus angesiedelt sein, damit Abweichungen in der Berechnung vermieden werden (siehe Kapitel 5.2).

Die Höhendefinition aller Rohrelemente bezieht sich bei *WANDA 3.72* auf den Rohrscheitel bzw. auf die Stollenfirste. FSF- Komponenten der aktuellen Version *WANDA 4.2* werden durch die Höhenquoten der Sohle modelliert, im Gegensatz zu ständig mit Druck beaufschlagten Rohrleitungen, deren Höhen sich auf die Rohrachse beziehen.

Das Element *FSF Pipe $Q < 0$* ermöglicht es, vor Beginn der Berechnung, die Definition der Wasserspiegellage im Gerinne durch sogenannte *Offtakes* (dt. Abzweiger) zu definieren. Damit lassen sich Lastfälle, wie z. B. das Anfahren oder das Abschalten von Turbinen bei unterschiedlichen Ausgangswasserspiegeln im Stollen, schnell vergleichen.

Die Komponente **Pipe rough** (dt. Druckrohrleitung für den hydraulischen rauen Bereich) ist ein klassisches Element für die Modellierung von Rohrleitungssystemen. In der vorliegenden Masterarbeit findet sie Einsatz in der Modellierung des Schrägstollens vor dem Wasserschloss und des Sohlstollens, wo ständiger Druckabfluss herrscht. *WANDA 4.2* bietet, im Gegensatz zu *WANDA 3.72*, die Möglichkeit Druckleitungen mit Kreis - oder Rechteckquerschnitt abzubilden.

Die Komponente **Reservoir** stellt eine mögliche Randbedingung (engl. Boundary Condition) des numerischen Modells dar. Sie beinhaltet die Vorgabe des Ausgangswasserspiegels im Ober- oder Unterwasser. Dabei bietet *WANDA 3.72* folgende Möglichkeiten:

- Reservoir mit konstantem Wasserspiegel, z.B. riesiger Speicher
- Reservoir mit zeitabhängigem Wasserspiegel, damit kann z. B. der Abfluss über ein angrenzendes Wehr gesteuert werden
- Reservoir mit variabler Querschnittsfläche, dabei ist die Querschnittsfläche eine Funktion der Höhe - geeignet für die Abbildung kleiner Speicher

Da die Komponente *Reservoir* eine Randbedingung des Modells ist, beinhaltet sie nur einen Zu- oder Abfluss.



Abb. 46: Symbol Reservoir

Eine weitere Randbedingung stellt die Komponente **BoundQ** dar. Sie ermöglicht es die Ab- und Zuflussmenge in Abhängigkeit der Zeit zu definieren. In dieser Arbeit werden mit der Komponente *BoundQ* die Turbinen modelliert, da Schaltfolgen rasch und einfach definiert werden können. Schließcharakteristiken können mittels *Copy/Paste* aus klassischen Tabellenkalkulationsprogrammen schnell eingefügt werden.

WANDA 3.72 bietet noch weitere Möglichkeiten für die Simulation von Turbinen und Verschlüssen, durch dafür vorgesehene Turbinen- und Verschluss-Komponenten. Für die folgenden Untersuchungen wurde jedoch die Turbine mit dem *BoundQ* Modul abgebildet.

Mit Hilfe des Bausteins **Resistance** (dt. Widerstand) kann man lokale Fließverluste am Einlauf oder Krümmer modellieren. Dabei besteht auch die Möglichkeit den Widerstand richtungsabhängig zu gestalten, wie es bei Drosseln im Wasserschloss notwendig ist.



Abb. 47: Symbol Resistance

Die Komponente **Shaft** (dt. Schacht) ist ein Speicherelement mit Zu- und Abfluss auf zwei unterschiedlichen Höheniveaus (Deltares 2013, S. 389). Bei Schächten kann die Querschnittsfläche als Funktion der Höhe definiert werden. Das *Shaft* Element ist jedoch nur in *WANDA 4.2* verfügbar. Mit *WANDA 3.72* muss der Lotschacht eines WKW mittels einer vertikal verlaufenden Druckrohrleitung modelliert werden.

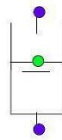


Abb. 48: Symbol Shaft (Deltares 2013, S. 389)

Im Gegensatz zum Schacht verfügt der Baustein **Surge Tower** (dt. Wasserschloss) über nur einen Zu- oder Abfluss. Auch seine Querschnittsfläche kann höhenabhängig definiert werden. Das Schachtwasserschloss ist eine klassische Anwendung dieser Komponente, sie wird aber auch für die Modellierung eines Wehrüberfalls benötigt.

Die Komponente **Weir 2 Way Flow** (dt. Wehr) ist ein Werkzeug für die Steuerung eines kontrollierten Abflusses aus einem angrenzenden Reservoir mittels einen Überfall. Dabei kann der Durchfluss in beide Richtungen erfolgen. Der Durchfluss ist wie folgt definiert:

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{1,5} * \sqrt{g} * B * C(H_1 - H_e)^{1,5} [m^3/s] \quad (2)$$

mit:

H_1 ...Höhe des Wasserspiegels im Oberwasser [m]

B ...Breite des Überfalls [m]

H_e ...Höhe der Überfallkante [m]

C ...Abflussbeiwert[-]

Vor dem Start der Berechnungen muss die zutreffende Abflusssituation über das Wehr ausgewählt werden. Folgende Möglichkeiten stehen zur Auswahl:

- vollkommener Überfall
- unvollkommener Überfall
- nicht überströmt
- vollkommener Überfall gegen die Abflussrichtung
- unvollkommener Überfall gegen die Abflussrichtung

Für die Simulation eines Wehrs empfiehlt es sich dem Überfall ein Speichervolumen vor- und nach zu schalten, da diese in der Komponente *Weir* nicht berücksichtigt ist (siehe Abb. 49). Dies kann am einfachsten mit der Komponente *Surge Tower* erfolgen.

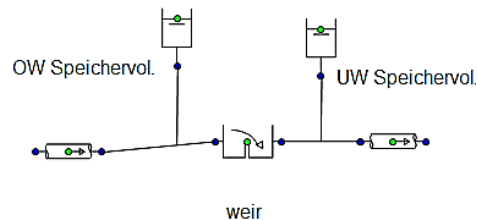


Abb. 49: Modellierung eines Wehrs mit vor- und nachgeschaltetem Surge Tower

6.2 Modellbildung

Unter Modellbildung versteht man generell die Abbildung der Wirklichkeit in ein Modell - eine Fertigkeit, der besonders im Ingenieurwesen hohe Bedeutung zukommt. Gleichzeitig geht mit der Modellierung neben einer Vereinfachung auch eine Abgrenzung des Originals einher (Stachowiak 1973, S 131-133). Die Kunst eines Ingenieurs liegt wohl darin, die Wirklichkeit auf ihr Wesentliches zu reduzieren und diese dann abzubilden. Bei komplexen Situationen und Vorgängen spielt besonders die Erfahrung des Modellbildners eine bedeutende Rolle.

Das Ziel dieser Arbeit ist die numerische Modellierung der transienten Strömungsvorgänge in einem Stollenspeicher. Die instationären Fließvorgänge bilden die Grundlage für die Abschätzung des Lufteintrags und des Lufttransports während der Bewirtschaftung des Stollenspeichers. Ein zentrales Thema der Modellierung ist daher die Flachstrecke des Triebwasserwegs. Das Anfahren und Abschalten der Maschinensätze führt zu Durchflussänderungen im System und somit zu transienten Strömungsvorgängen.

Im Folgenden ist die Modellierung der untersuchten Anlage dokumentiert. Die Wasserkraftanlage ist ein Ausleitungskraftwerk im alpinen Raum. Die Bauart ent-

spricht einer klassischen Hochdruckanlage in den Alpen, jedoch ohne oberirdischer Speichermöglichkeit. Als Speicher wird der Druckstollen genutzt. Die Anlagenteile, von Oberwasser nach Unterwasser geordnet, lassen sich wie folgt gliedern:

- Wehranlage
- seitliche Entnahme und Einlauf
- Entsanderkammern
- Einlaufbecken
- Dükerleitung
- Steigstollen
- Be- und Entlüftungsmöglichkeit im Hochpunkt 1
- Speicherstollen
- Geschiebefalle (engl. Rock Trap)
- Be- und Entlüftungsmöglichkeit im Hochpunkt 2
- Schrägstollen
- Schachtwasserschloss
- Lotschacht
- Sohlstollen und Druckleitung
- Krafthaus mit 3 Pelton- Turbinen
- Auslaufbauwerk

Folgend wird die Modellierung des WKW von den Entsanderkammern bis zu den Turbinen beschrieben. Für die Modellierung werden die Höhenknoten des Untersuchungskraftwerks um den Wert 1100 m reduziert, um somit mögliche Unstimmigkeiten in den Ergebnissen auszuweichen (siehe Kapitel 5.2.1.).

Gewisse Bezeichnungen der Anlagenteile werden in dieser Arbeit frei gewählt und decken sich nicht mit jenen Bezeichnungen der Projektunterlagen des BSP- WKW, im speziellen sind dies Begriffe der Stollenabschnittsbezeichnungen. Die folgende Modellierung beschreibt das Ausgangsmodell, bezeichnet als *System 80*. Das Ausgangsmodell wird dann für die Varianten- und Parameterstudie abgeändert.

6.2.1 Modellabgrenzungen

Oberwasserseitig bilden die drei Entsanderkammern die Modellgrenze. Sie sind als *Reservoir* abgebildet. In Abb. 50 ist der obere Abgrenzungsbereich dargestellt. Die Endschwelle des Entsanders garantiert die nötige Wassertiefe in den Kammern und ist durch die Komponente *Weir* modelliert.

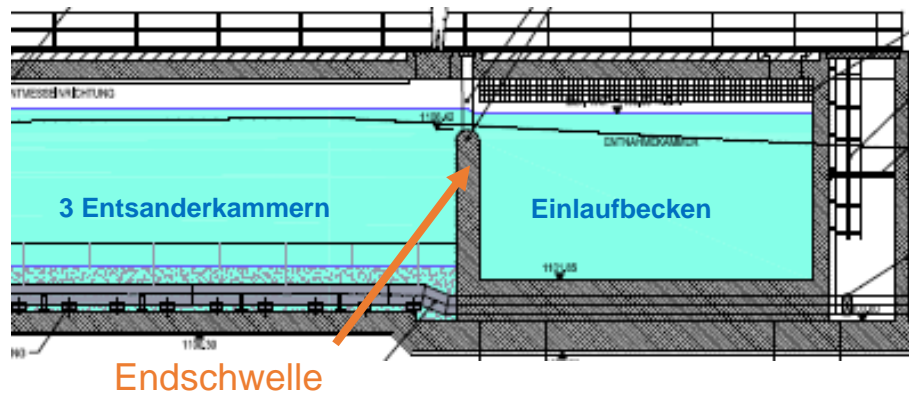


Abb. 50: Darstellung der Modellabgrenzung im OW (ILF Beratende Ingenieure 2012)

Im Unterwasser ist eine Modellabgrenzung durch die Turbinen gegeben. Diese sind über den Modellbaustein *BoundQ* abgebildet, welcher die zeitabhängige Zu- und Abflusssituation definiert. Abb. 51 zeigt das Anfahren der Turbinen etwa nach 750 s und das Abschalten nach 2100 s.

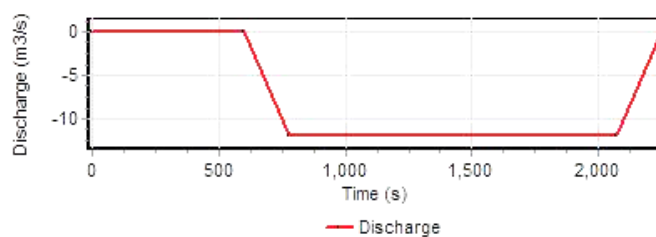


Abb. 51 Darstellung der Modellabgrenzung im Unterwasser

Der Ausbaudurchfluss Q_A der untersuchten Anlage beträgt $12 \text{ m}^3/\text{s}$, weitere Projektdaten sind im Kapitel 4.3 zu finden.

6.2.2 Entsanderkammer

Wie bereits erwähnt, bilden die drei Entsanderkammern die hydraulische Randbedingung im Oberwasserbereich für die Abflussberechnung. Modelliert sind die Kammern mit der Komponente *Reservoir*.

Bei stationärem Betrieb stellt sich eine WSP- Lage von 1107,05 müA im Entsander ein, dabei beträgt der Zufluss 12,0 m³/s. Der WSP des *Reservoirs* entspricht der Höhe des OW der angrenzenden Wehrschwelle.

Bei der Festlegung eines konstanten Wasserspiegels im *Reservoir* nimmt man beim Start der Berechnungen mit einem teilgefüllten Speicherstollen einen abrupten Zufluss in Kauf, d.h. zum Zeitpunkt $t=0$ wird der TWW mit vollem Zufluss plötzlich beaufschlagt- ein eher unrealistischer Vorgang. Um dies zu verhindern, gilt es den WSP im Entsander mäßig zu heben. Dafür bietet *WANDA 3.72* die Möglichkeit den WSP zeitabhängig zu steuern. So führt ein stetig steigender WSP in den Entsanderkammern zu einem stetig zunehmenden Zufluss im TWW. Bei Berechnungen mit einem vollgefüllten Speicherstollen bildet sich selbstständig ein kontinuierlicher Zufluss aus den Entsanderkammern aus, da zu Beginn dieselben Wasserspiegelniveaus vor und nach der Endschwelle vorliegen. Durch Absinken des WSP im Einlaufbecken springt die davorliegende Überlaufschwelle an und der Zufluss nimmt stetig zu.

Abb. 52 (S. 83) zeigt das Eingabefenster (*Action Table*) der Komponente *Reservoir*, bei der man einen definierten Anstieg des Wasserspiegels von 1106 auf 1107 müA in einem Zeitraum von 60 s erkennen kann. Somit steigt kontinuierlich der Oberwasserspiegel des Überfalls und bei Erreichen des Niveaus der Überfallkante springt das Wehr an.

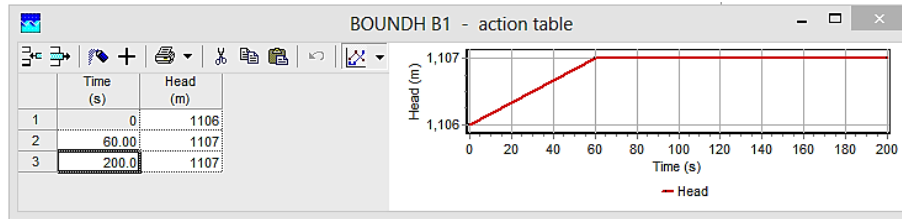


Abb. 52: Action Table der Komponente Reservoir

6.2.3 Endschwelle des Entsanders

Die Endschwelle trennt den Entsander vom TWW, der aufgrund der Speicherfunktion des Druckstollens Wasserspiegelschwankungen erfährt. Sinkt während des Betriebs der WSP im TWW, sinkt auch jener im Einlaufbecken ab. Die Endschwelle garantiert den Mindestwasserspiegel in den Becken des Entsanders und stellt somit den Absetzvorgang des Sediments sicher.

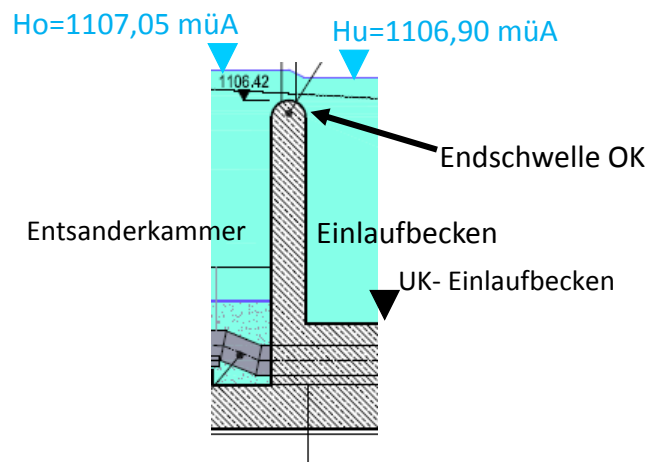


Abb. 53: Höhsituation der Endschwelle des Entsanders (ILF Beratende Ingenieure 2012)

Des Weiteren muss die Endschwelle in der Lage sein den Ausbaudurchfluss bei einem WSP im Einlaufbecken von 1106,90 müA zu fördern. Der Abfluss über das Wehr hängt von folgenden Kriterien ab:

- WSP- Höhe im OW
- WSP- Höhe im UW (bei unvollkommen Überfall)
- Breite Überfall
- Abflussbeiwert

Soll z. B. der TWW mit einem Zufluss $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$ gespeist werden, kann die Wehrförderfähigkeit durch die Anpassung des Abflussbeiwerts C erfolgen. *WANDA 3.72* ermittelt den Durchfluss nach Formel (2) (S. 78).

Wie in Kapitel 6.1.1 bereits erwähnt, soll dem Überfall ein Speichervolumen vor- und nachgeschaltet werden, welches mittels der Komponente *Surge Tower* abgebildet werden kann.

6.2.4 Einlaufbecken

Das Einlaufbecken ist durch die Komponente *FSF Pipe* mit rechteckigem Querschnitt abgebildet. Dabei ist die Höhe des Elements so gewählt, dass der WSP im Einlaufbecken das Niveau der Gerinnedecke nicht erreichen kann und somit ein Zuschlagen des Elements verhindert wird (siehe Abb. 54). Bei der Querschnittsmodellierung bietet *WANDA 3.72* die Möglichkeit, die Breite der Freispiegelleitung in Abhängigkeit der Höhe zu definieren, wodurch eine gewisse Flexibilität hinsichtlich der Querschnittsabbildung gegeben ist.

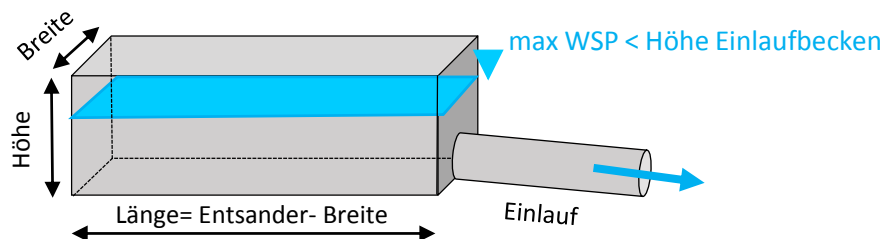


Abb. 54: Modellierung des Einlaufbeckens mittels der Komponente *FSF Pipe*

Der WSP des Einlaufbeckens bildet den Unterwasserspiegel der angrenzenden Endschwelle. Steigt das Wasser im Becken, so geht bei entsprechender Spiegelhöhe der vollkommene in einen unvollkommenen Überfall über.

Das Einlaufbecken ist als Betonbauwerk ausgeführt und somit ist die Wandrauigkeit mit $k= 1,0$ mm berücksichtigt, abgeleitet von folgender Quelle:

	nach Mannig- Strickler k_s [$m^{1/3}/s$]	Wandrauigkeitsmaß k [mm]
Beton, gut geschalt	85...90	0,8

Tabelle 4: Wandrauigkeit im Einlaufbecken (Bollrich, Martin 1992)

6.2.5 Einlaufverlust

Der Eintrittsverlust beim Einlauf wird mit $\zeta_e = 0,15$ [-] in Rechnung gestellt, dieser orientiert sich an der in Abb. 55 dargestellten Einlaufsituationen. Als Modellbaustein wird hierfür die Komponente *Resistance* verwendet, welche einen lokalen Verlust darstellt.

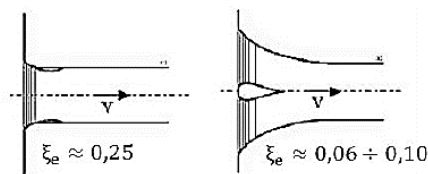


Abb. 55: Eintrittsverlust bei Stolleneinläufen (Bollrich, Martin 1992, S. 157)

6.2.6 Dükerleitung

Die Unterquerung eines vorhandenen Straßentunnels im Bereich der WF ist mit einem Stahlbeton- Düker ($D_i = 2,40$ m) geplant. Die Modellierung erfolgt mittels der klassischen Komponente *Pipe rough*, da der Düker tiefer als der angrenzende Speicherstollen liegt und somit ständig Druckabfluss herrscht. Die Wandrauigkeit ist mit $k= 1,0$ mm berücksichtigt (siehe Tabelle 4).

6.2.7 Steigstollen

Der Steigstollen ist Abschnitt des TWW, der die Verbindung des Dükers mit dem um etwa 3 m höherliegenden Speicherstollen darstellt. Das Gefälle beträgt +10 % und am Ende des Steigstollens bildet sich ein Hochpunkt (HP 1) aus, wo eine Be- und Entlüftungseinrichtung vorgesehen ist.

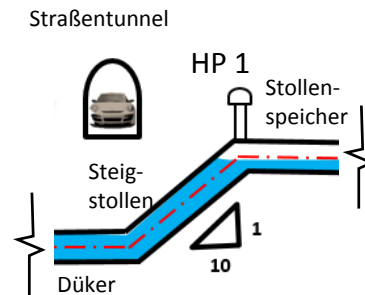


Abb. 56: Situation Steigstollen und benachbarter Hochpunkt 1 mit Be- und Entlüftungsmöglichkeit

Der Steigstollen ist durch die Komponente Freispiegelleitung mit kreisrundem Querschnitt modelliert. Als Auskleidung ist eine Spritzbetonschale berücksichtigt, die modellierte Wandrauigkeit $k=6$ mm ist in der nachstehenden Tabelle 5 angeführt. Nachfolgende Abschnitte des Triebwasserwegs, die eine Speicherfunktion besitzen, beinhalten dieselbe modellierte Wandrauigkeit.

	nach Mannig- Strickler k_s [$m^{1/3}/s$]	Wandrauigkeitsmaß k [mm]
Beton unverputzt	60	6

Tabelle 5: Wandrauigkeit des Triebwasserwegs mit Spritzbetonauskleidung (Bollrich, Martin 1992)

6.2.8 Speicherstollen

Der Speicherstollen schließt an den HP 1 nach dem Steigstollen des TWW an und ist etwa 4600 m lang. Der Stollen wird mit einem mittleren Gefälle von $-1,5\text{‰}$ geführt. Der Stollen besitzt aufgrund des Ausbruchsvorganges unterschiedliche Abschnitte mit variierenden Durchmessern (siehe Abb. 57).

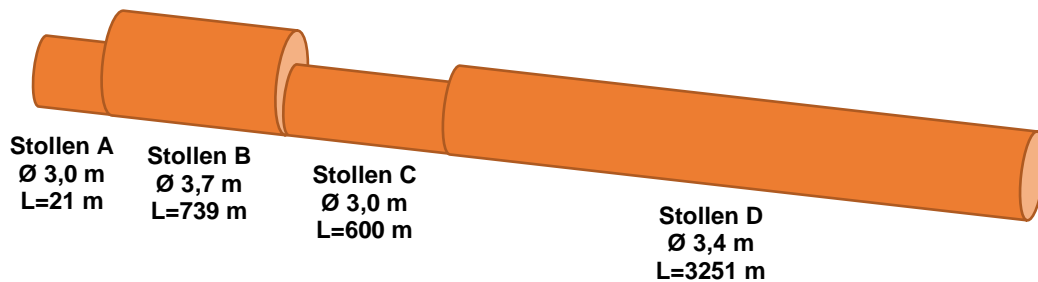


Abb. 57: Schemadarstellung des Speicherstollen der untersuchten Anlage

Bereiche mit Sprungstellen im Querschnitt sind typische Stellen für Luftansammlungen und sollten daher entsprechend berücksichtigt werden. Die Übergänge im Stollendurchmesser können wie folgt modelliert werden:

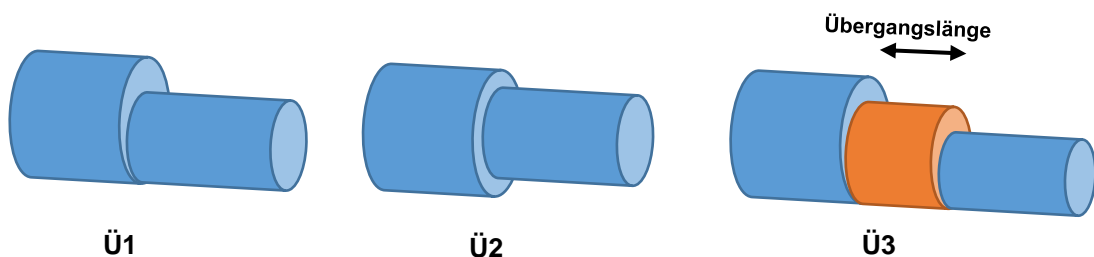


Abb. 58: Modellierungsmöglichkeiten der Stollenabschnitte mit unterschiedlichen Durchmessern

Dabei ist der Übergang 1 aus baupraktischer Sicht zu bevorzugen, da eine durchgehende Sohle eine einfache Wasserhaltung während des Vortriebs ermöglicht (Kluckner 2013).

Übergang 1 zeigt einen Durchmesserersatz an der Firste. Um den Sprung an der Firste realer zu gestalten, kann man einen abgestuften Verzug mittels eines Zwischenstücks modellieren (siehe Abb. 58, Ü 3, S. 87).

Für die folgenden Simulationen wird der Stollenspeicher mit einem mittleren Durchmesser abgebildet und beinhaltet keine Querschnittsprünge. Die Auskleidung mit Spritzbeton ist mit $k=6$ mm berücksichtigt (siehe Tabelle 5, S. 86).

6.2.9 Schrägstollen

Der Schrägstollen verbindet den Speicherstollen mit dem Wasserschloss. Seine Neigung beträgt -15 % und sein Durchmesser 3,0 m. Am Übergang (HP 2) zwischen dem Speicherstollen und dem Schrägstollen ist eine weitere Entlüftungsmöglichkeit vorgesehen. Am Fuße des Wasserschlosses befindet sich der Lotschacht (siehe Abb. 59).

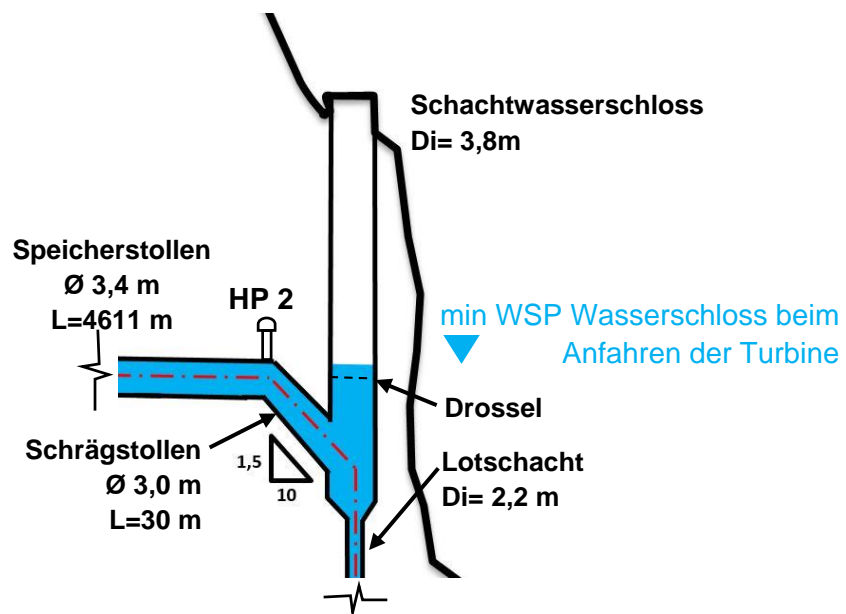


Abb. 59: Situation Schrägstollen und Wasserschloss

Der Schrägstollen ist mit Hilfe der Komponente *Pipe rough* modelliert. Die Betriebsführung des WKW ist so geplant, dass es im Schrägstollen zu keiner Entleerung kommen soll und somit ständig Druckabfluss herrscht. Die Wandrauigkeit ist mit $k=6$ mm berücksichtigt (siehe Tabelle 5, S. 86).

6.2.10 Schachtwasserschloss mit dazugehöriger Drossel

Das Wasserschloss ist als einfacher Schacht mit einer Drossel konzipiert, es verbindet den Schrägstollen mit dem Lotschacht und ist mit einem Innendurchmesser von 3,80 m geplant. Die Drossel ist eine einfache Stahlblende mit entsprechendem Innendurchmesser.

Das Schachtwasserschloss wird mit der Komponente *Surge Tower* abgebildet, dabei beträgt die Querschnittsfläche $A = 11,3 \text{ m}^2$. Die Drossel ist durch das Element *Resistance* modelliert. Der richtungsabhängige Verlustbeiwert ist mit $\zeta = 1,0$ [-] für Zu- und Abfluss in Rechnung gestellt. Abb. 60 zeigt dabei das grafische Modellbild des Wasserschlosses in *WANDA*. Dabei wird die Drossel und das Wasserschloss an den Knoten J, zwischen Schrägstollen und Lotschacht, angekoppelt. Die Komponente *Surge Tower* hat nur eine Zu- bzw. Abflussmöglichkeit und daher kann das Wasserschloss nicht, wie in Abb. 59 (S. 88) dargestellt, als teils- durchströmter Schacht modelliert werden.

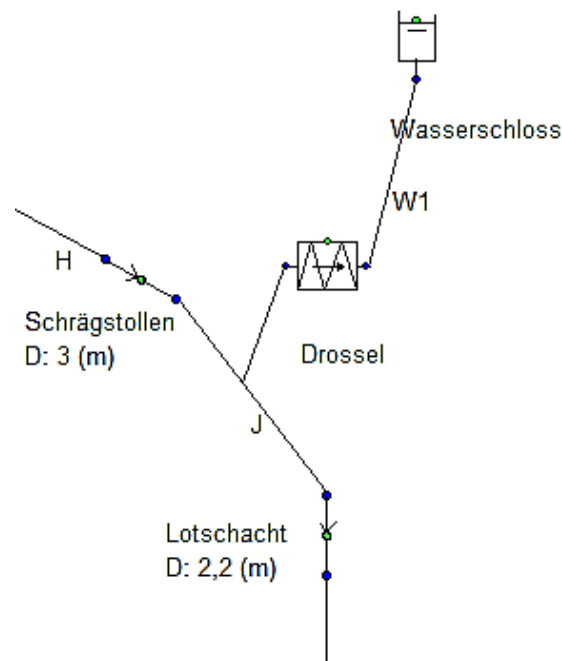


Abb. 60: Modellbildung des Bereichs rundum dem Wasserschlosses in *WANDA* 3.72

6.2.11 Lotschacht

Der Lotschacht ist 102 m tief und ist mit einer Stahlauskleidung versehen. Der Innendurchmesser beträgt $D_i = 2,2$ m. Die Modellierung erfolgt mit der Komponente *Pipe rough* und die Wandrauigkeit beträgt $k = 0,1$ mm.

6.2.12 Krümmer

Der Krümmer verbindet den Lotschacht und die Druckrohrleitung im Sohlstollen. Der Umlenkwinkel entspricht etwa 90° und das Verhältnis Krümmungsradius/Rohrdurchmesser beträgt ~ 2 [-]. Daraus ergibt sich ein Verlustbeiwert $\zeta = 0,14$ [-] (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 237). Auch der Krümmer ist mit der Komponente *Resistance* abgebildet.

6.2.13 Druckrohrleitung des Sohlstollens

Der Sohlstollen der untersuchten Wasserkraftanlage gliedert sich in zwei Abschnitte, die aufgeständerte Druckrohrleitung im Sohlstollen und die erdverlegte Druckrohrleitung. Der Innendurchmesser D_i beträgt bei beiden Leitungsabschnitten 2,0 m. Die Modellierung der Druckrohrleitung erfolgt mit dem Element *Pipe rough*; die angesetzte Wandrauigkeit k beträgt 0,1 mm.

6.2.14 Verluste im Bereich des Krafthauses

Lokale Verluste im Bereich Krafthaus, insbesondere die Energieverluste im Bereich der Rohrverteiler, sind durch das Element *Resistance* im numerischen Modell berücksichtigt.

6.2.15 Turbine

Die zweite Randbedingung des Modells der Untersuchungsanlage bilden, neben den Entsanderkammern im OW, die Turbinen im UW. Dabei werden drei Pelton-Turbinen zusammengefasst und mittels der Komponente *BoundQ* im System abgebildet. Der Durchfluss ist zeitabhängig vorgegeben.

Das Anfahren der Turbine mit einer Durchflusszunahme von 0- 12 m³/s in 180 s ist für die untersuchte Anlage vorgesehen, gleiches gilt für das Abschalten der Maschinensätze. Die Anfahrzeiten für geringe Durchflüsse stehen in linearem Zusammenhang(siehe Diagramm 2).

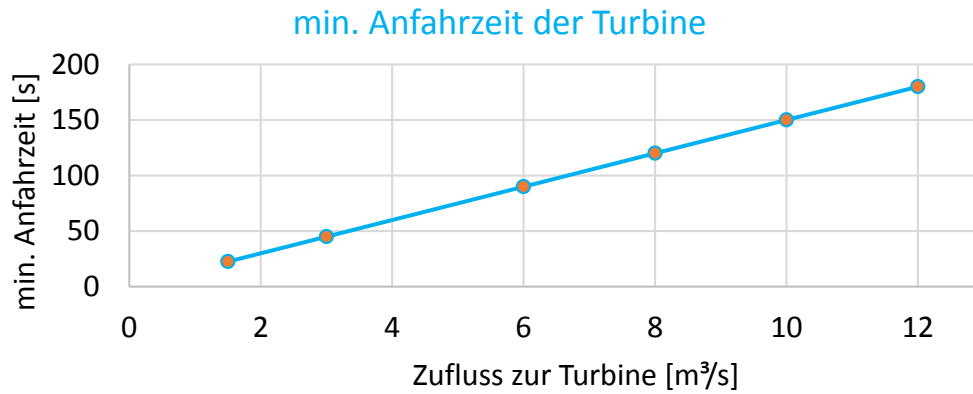


Diagramm 2: Linearer Zusammenhang zwischen max. Durchfluss und min. Anfahrzeit

7. 1D- numerische Berechnungen

Die Grundlage für die numerischen Untersuchungen bildet das Modell *System 80*, es ist eine Abbildung des BSP- WKW mit *WANDA 3.72*. Eine Modellskizze des *Systems 80* ist im Anhang zu finden. Die spezifischen Daten der einzelnen Bauwerke und Anlagenkomponenten sind wie folgt zusammengefasst:

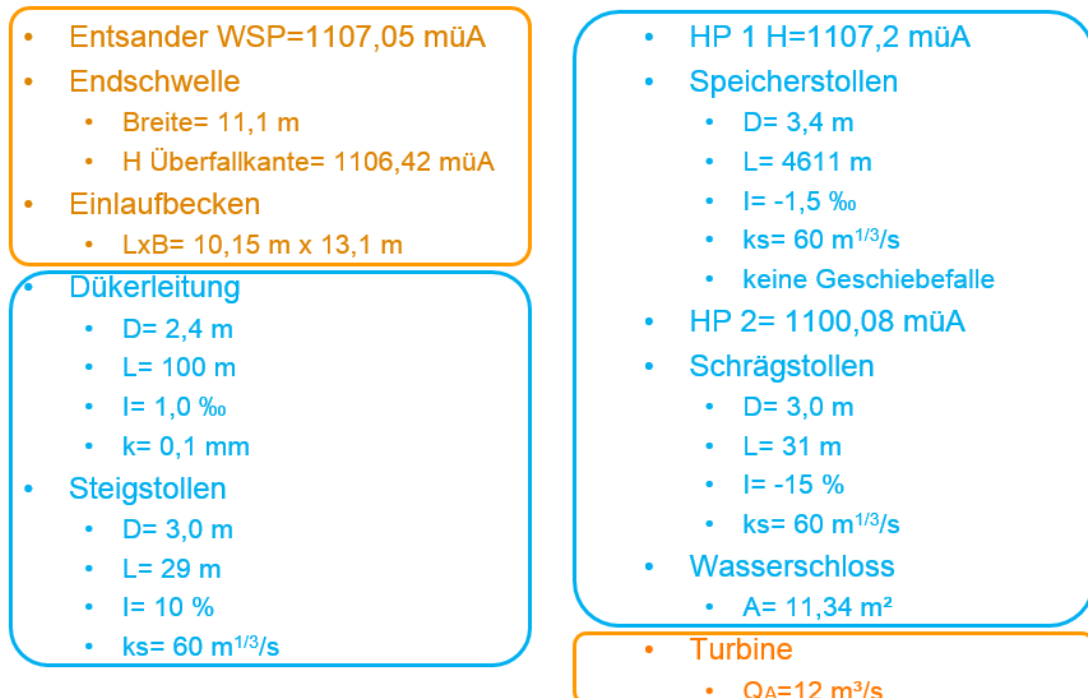


Abb. 61: Spezifische Daten des Systems 80

7.1 Untersuchte Lastfälle

Für die numerischen Berechnungen werden zwei einfache Lastfälle (LF) simuliert. Der LF *Anfahren 180* beinhaltet das Anfahren der Turbine in 180 s auf einen Durchfluss von 12 m³/s. Dieser LF zeigt das Starten der Turbine auf maximalen Durchfluss für die minimale Anfahrzeit. Dabei müssen die Wassermassen im Stollen auf die maximale Geschwindigkeit beschleunigt werden. Nach dem Startvorgang wird der Abfluss konstant gehalten.

Der zweite LF stellt das Anfahren und Stoppen (LF *Start Stopp*) der Turbine dar. Das Anhalten der Turbinen muss jederzeit möglich sein. Die beiden LF verdeutlichen die Herausforderungen bei der Bewirtschaftung von Speicherstollen. Das Diagramm 3 zeigt den Durchfluss der Turbinen für einen maximalen Durchfluss von $12 \text{ m}^3/\text{s}$:

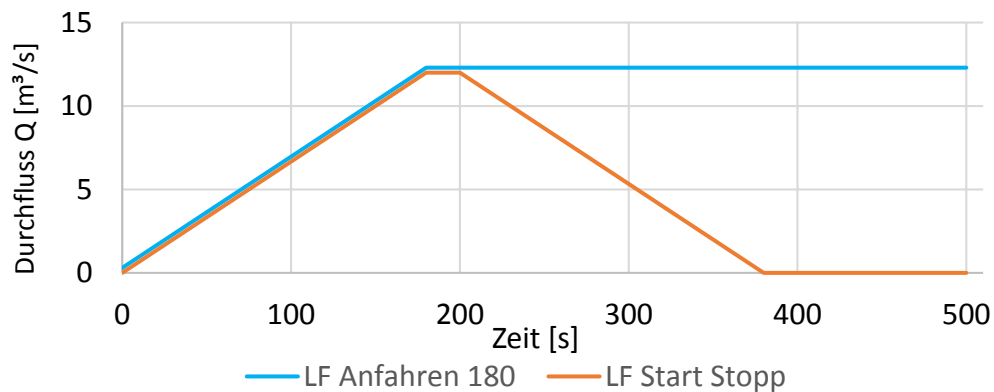


Diagramm 3: LF Anfahren 180 und LF Start Stopp für ein $Q_{\max} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$

7.2 Parameterstudie

Der Schwerpunkt der 1D- numerischen Berechnungen der Fließvorgänge im Speicherstollen bildet eine Parameterstudie. Die Studie soll Aufschluss über das Systemverhalten während der Variierung einzelner Kennwerte geben. Dabei werden folgende Parameter variiert:

- der Durchfluss
- die Querschnittsfläche des Schachtwasserschlosses
- die Wandrauigkeit des Speicherstollens
- der Durchmesser des Speicherstollens
- die Neigung des Speicherstollens
- die Anfahrzeiten der Turbine

7.3 Ergebnisse der 1D- numerischen Berechnungen

Der erste Teil der Berechnungen erfolgt mit dem LF *Anfahren 180* am *System 80*. Die Parameterstudie führt dann zu entsprechenden Änderungen des Modells. Den zweiten Teil der Simulationen bilden Berechnungen mit dem LF *Start Stopp*. Dabei werden die Modelle *System 90* (fiktiver Überfall im HP 1) und *System 100* (Verschlussorgan im Einlaufbecken) durchgeführt. Beide Modelle sind dem Anhang beigelegt.

7.3.1 LF *Anfahren 180*, *System 80*, $Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$

Die erste Untersuchung am *System 80* beinhaltet das Anfahren der Turbine bis zum Ausbaudurchfluss $Q_A = 12 \text{ m}^3/\text{s}$. Dabei muss die Trägheit der Wassermassen im Speicherstollen überwunden werden und auf eine bestimmte Abflusgeschwindigkeit beschleunigt werden. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass das Anfahren der Turbinen auf $12 \text{ m}^3/\text{s}$ mit dem *System 80* Schwierigkeiten mit sich bringt.

Aufgrund der geringen Stollenneigung und des niedrigen Stauziels im OW kann das Wasser im Speicherstollen nicht genügend schnell beschleunigt werden und im Bereich des HP 2 kommt es zum Abreißen der Wassersäule. Beim Starten der Turbine auf $12 \text{ m}^3/\text{s}$ in 180 s fällt die Energielinie (kurz EL) während des ersten Abschwingvorgangs unter die Stollenfirste (siehe Abb. 62 rechts, S. 95), dabei tritt ein Systemwechsel im Abflussregime auf: Der Druckabfluss wechselt im Bereich des HP 2 in Freispiegelabfluss und die Wassersäule reißt ab. Der Übergang von Druck- auf Freispiegelabfluss führt zur Änderung der Informationsaustauschgeschwindigkeit im Speicherstollen, die von der Druckwellenausbreitungsgeschwindigkeit a ($\sim 1000 \text{ m/s}$) auf die Schwallausbreitungsgeschwindigkeit c ($\sim 6 \text{ m/s}$) absinkt.

Die Förderfähigkeit des Stollenspeichers nimmt ab und der Wasserspiegel im Wasserschloss und Schrägschacht sinkt ab. Das Wasser aus dem Speicherstollen stürzt über einen Wasserfall in den Lotschacht und trägt dabei Luft in den Kraftabstieg ein (siehe Abb. 62 unten, S. 95).

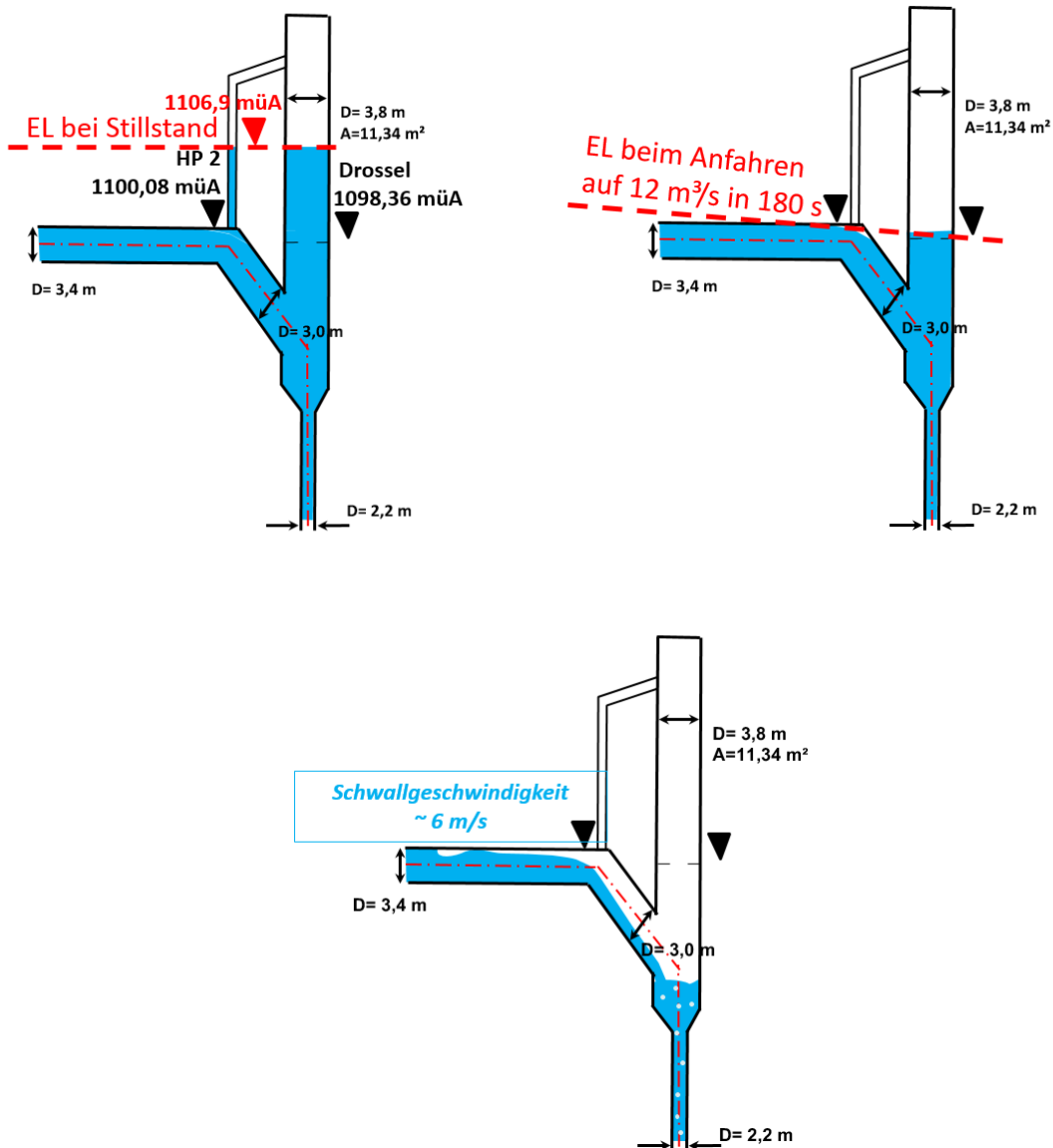


Abb. 62: Lage der EL im HP 2 bei LF Anfahren 180, System 80, $Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$

Das Abreißen einer Wassersäule ist ein hoch transienter hydraulischer Vorgang, der im TWW eines WKW nicht auftreten darf und vermieden werden muss. Ein sicheres Anfahren der Turbine auf $12 \text{ m}^3/\text{s}$ ist für das untersuchte System 80 nicht gegeben.

Das Abreißen der Wassersäule ist vergleichbar mit dem Differenzialeffekt der Oberkammer eines Kammerwasserschlosses, wo ein Wasserfall in den Schacht stürzt. Dabei kann üblicherweise die eingetragene Luft in die Unterkammer entweichen.

7.3.2 LF Anfahren 180, System 80, variabler Durchfluss

Das vorangegangene Kapitel 7.3.1 zeigt, dass die EL beim Anfahren der Turbine auf $12\text{m}^3/\text{s}$ in 180 s unter die Stollenfirse des HP 2 fällt. Die Reduktion des Durchflusses führt zu einem langsameren Absinken des WSP im Wasserschloss und die EL bleibt dabei über der Stollenfirse. Den Wassermassen im Stollenspeicher steht mehr Zeit für die Beschleunigungsphase zur Verfügung und ein Abreißen der Wassersäule kann dadurch verhindert werden. Die Reduktion des maximalen Durchflusses auf $11\text{ m}^3/\text{s}$ ermöglicht ein störungsfreies Anfahren der Turbine in 180 s. Im Diagramm 4 ist der zeitliche Verlauf der Wasserschlossschwingung für einen maximalen Durchfluss von $11\text{ m}^3/\text{s}$ dargestellt. Der minimale WSP wird nach 80 s. erreicht. Im Diagramm 5 (S. 97) ist die dazugehörige EL im Speichers-tollen abgebildet, die sehr nahe an die Tunnelfirse absinkt.

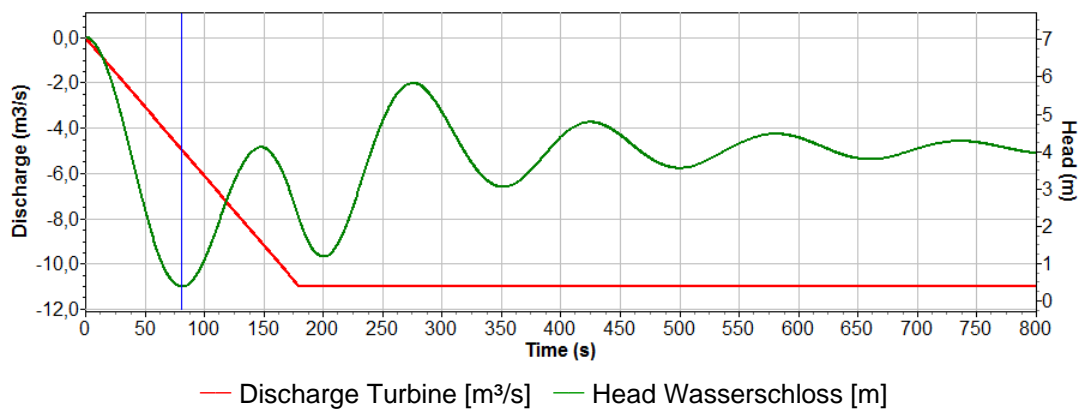


Diagramm 4: Zeitlicher Verlauf der Wasserschlossschwingung und des Turbinendurchflusses für LF Anfahren 180 und $Q=11\text{ m}^3/\text{s}$

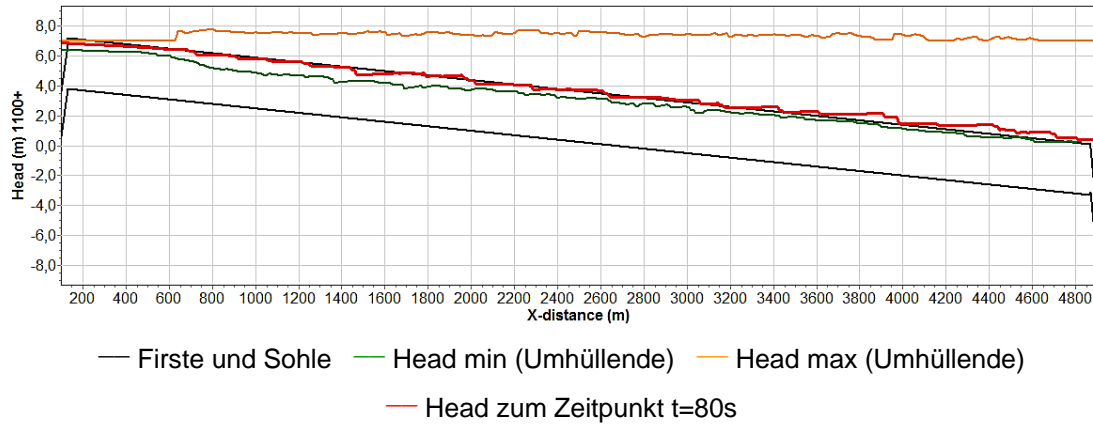


Diagramm 5: EL im Speicherstollen zum Zeitpunkt t=80 s

Das Diagramm 6 zeigt die Abnahme der Überdeckung der Firste im HP 2 mit zunehmendem Abfluss. Der maximal förderbare Abfluss des Systems 80 liegt bei 11 m³/s, dabei liegt die EL jedoch nur 32 cm über der Stollenfirste.

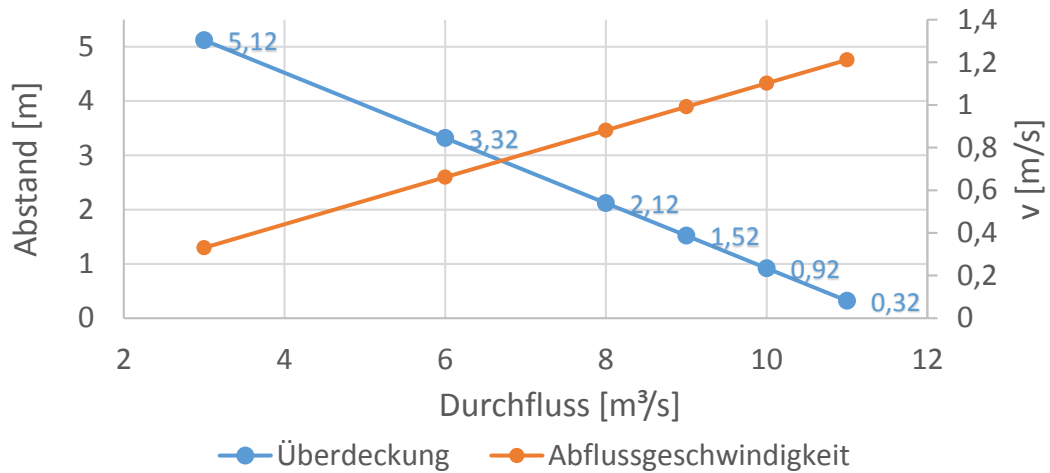


Diagramm 6: Abstand der EL zur Stollenfirste im HP 2, abhängig vom Durchfluss

Das Diagramm 7 (S. 98) zeigt den zeitlichen Verlauf der EL im HP 2 in Abhängigkeit des Durchflusses. Dabei erkennt man, dass die Lage der EL beim ersten Abschwingen am tiefsten ausfällt. Nach mehr als 1000 s stellt sich bei gleichem Ab- und Zufluss ein stationärer Zustand ein.

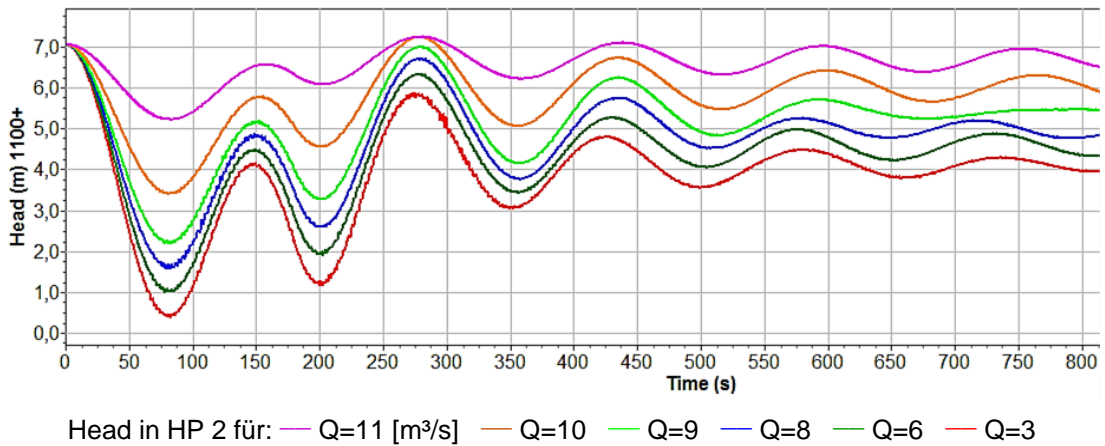


Diagramm 7: Zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im HP 2, abhängig vom Durchfluss

Das Diagramm 8 beinhaltet den zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit vom Durchfluss. Der Geschwindigkeitsgradient von $Q=11 \text{ m}^3/\text{s}$ (roter Verlauf) zwischen $t=50 \text{ s}$ und $t=100 \text{ s}$ kann als Grenzbeschleunigung gesehen werden, steilere Geschwindigkeitszunahmen, d. h. größere Durchflüsse, können beim LF *Anfahren 180* im System 80 nicht beschleunigt werden.

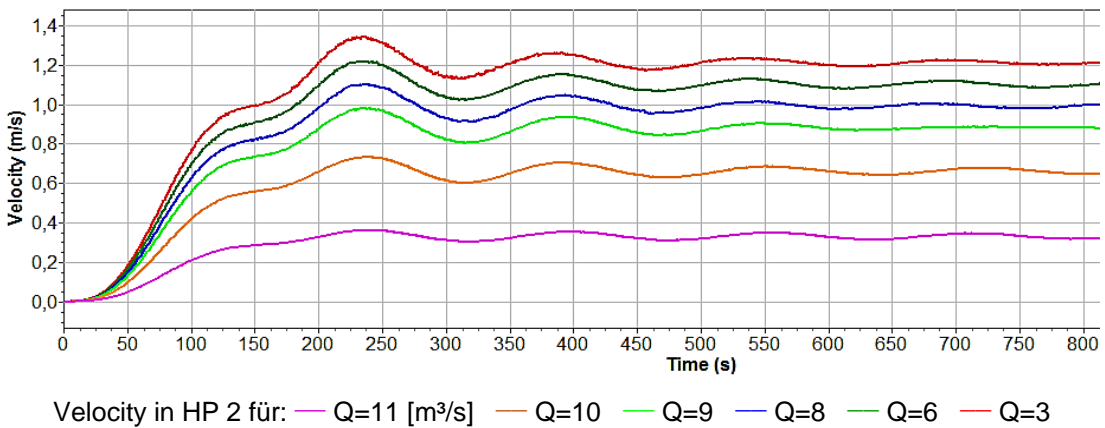


Diagramm 8: Zeitlicher Abflussgeschwindigkeitsverlauf im HP 2, abhängig vom Durchfluss

7.3.3 LF Anfahren 180, $Q= 12 \text{ m}^3/\text{s}$, System 80 mit variabler Wasserschlussschnittsfläche

Die Wasserschlussschnittsfläche des Systems 80 liegt bei etwa $11,3 \text{ m}^2$. Beim Anfahren der Turbine auf $12 \text{ m}^3/\text{s}$ sinkt der WSP im Wasserschlussschnit ab, das Wasser aus dem Speicherstollen kann nicht rechtzeitig beschleunigt werden und es kommt, wie bereits erwähnt, zum Abreißen der Wassersäule im HP 2. Durch die Vergrößerung der Querschnittsfläche des Wasserschlussschachtes kann die Turbine länger vom Wasserschlussschnit gespeist werden, der WSP sinkt langsamer ab und den Wassermassen im Speicherstollen bleiben ausreichend Zeit für die Beschleunigungsphase.

Im folgendem Diagramm 9 ist der minimale Abstand der EL beim LF *Anfahren 180* mit $12 \text{ m}^3/\text{s}$ in Abhängigkeit der Querschnittsfläche des Schachtwasserschlussschnit dargestellt. Für das untersuchte System 80 ist ab einer Wasserschlussschnittsfläche von 130 m^2 ein Anfahren der Turbinen in 180 s ohne Abreißen der Wassersäule im HP 2 möglich.

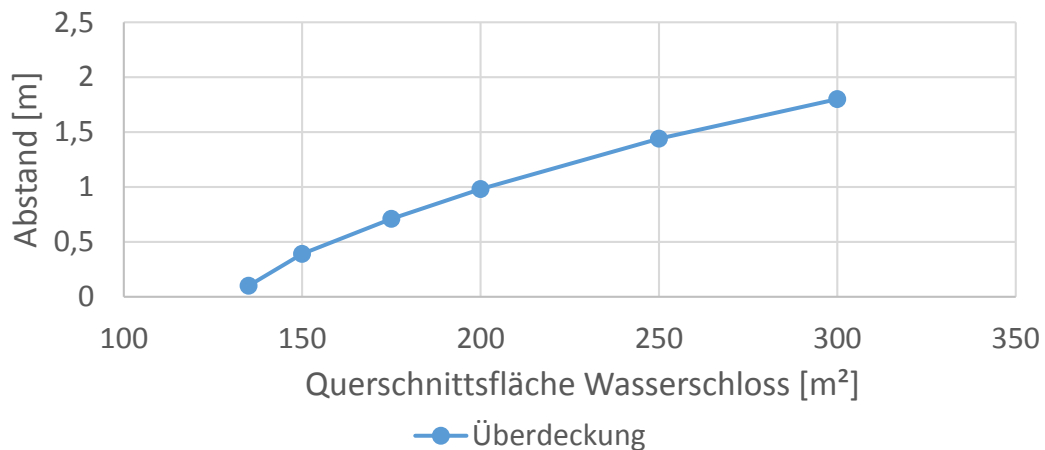


Diagramm 9: Abstand der EL zur Stollenfiste im HP 2, abhängig von der Querschnittsfläche im Wasserschlussschnit bei $Q= 12 \text{ m}^3/\text{s}$

Diagramm 10(S. 100) zeigt den zeitlichen Verlauf der Energiehöhe im Wasserschlussschnit in Abhängigkeit der Querschnittsfläche des Wasserschlussschnit. Mit zunehmendem Querschnitt nimmt die Amplitude der Wasserschlussschnit ab und der Abstand zwischen EL und Stollenfiste vergrößert sich. Des Weiteren ist im

folgendem Diagramm der Einfluss der Querschnittsfläche auf die Schwingungsdauer zu erkennen: eine Zunahme der Fläche führt zu einer Zunahme der Schwingungsdauer (siehe Formel (1), S. 69).

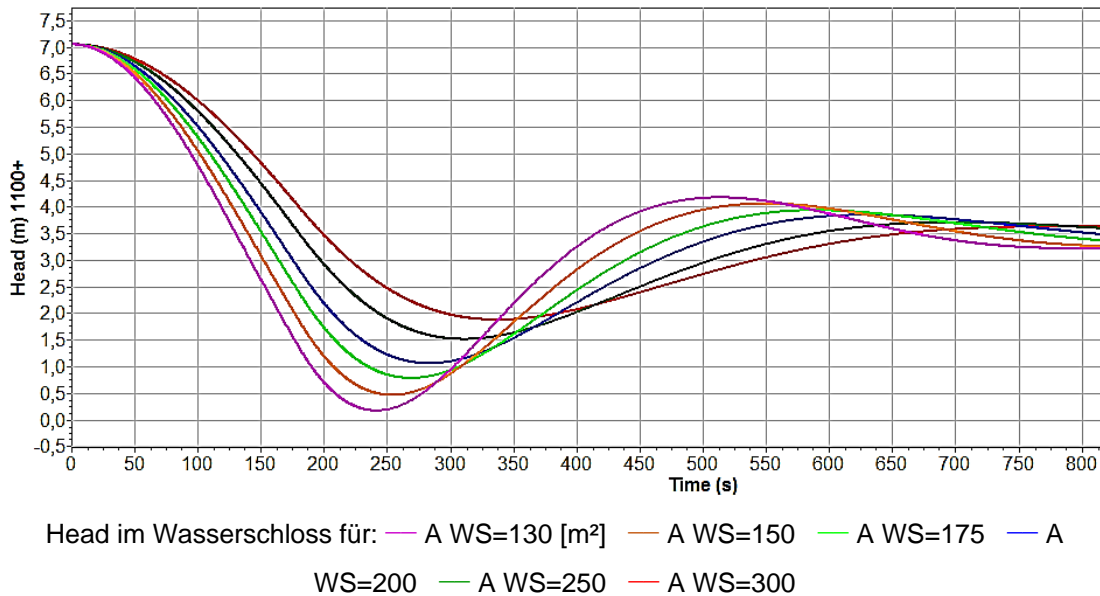


Diagramm 10: Zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im Wasserschloss, abhängig von der Querschnittsfläche des Wasserschlosses

7.3.4 LF Anfahren 180, $Q = 11 \text{ m}^3/\text{s}$, System 80 mit variabler Wandrauigkeit des Speicherstollens

Durch die Wandrauigkeit des Stollens stellt sich ein kontinuierlicher Fließverlust entlang des Stollens ein, welcher bei stationärem Betrieb der Neigung der EL entspricht. Ein zunehmender Durchfluss erhöht die Fließverluste im Stollen und das Gefälle der EL nimmt zu. Diagramm 11 (S. 101) zeigt die Verlusthöhe im 4611 m langen Speicherstollen bei stationärem Betrieb in Abhängigkeit des Durchflusses. Dabei beträgt der Durchmesser des Stollens 3,4 m. Das System 80 ist mit einer Wandrauigkeit $k_{st} = 60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ modelliert.

Diagramm 12 (S. 102) beinhaltet den zeitlichen Verlauf der Energiehöhe im HP 2 in Abhängigkeit der Wandrauigkeit und lässt erkennen, dass die Auskleidung des Stollens keinen Einfluss auf die erste Abschwingtiefe der Energiehöhe beim Anfahren der Turbine hat; die Geschwindigkeiten im Stollen sind noch sehr gering

und der Abfall der EL ergibt sich rein aus dem raschen Absinken des WSP im Wasserschloss. Erst nach mehr als 100 s beginnen sich die einzelnen Verläufe der Energiehöhen aufzufächern und die Fließverluste im Stollen nehmen aufgrund der steigenden Abflussgeschwindigkeit zu.

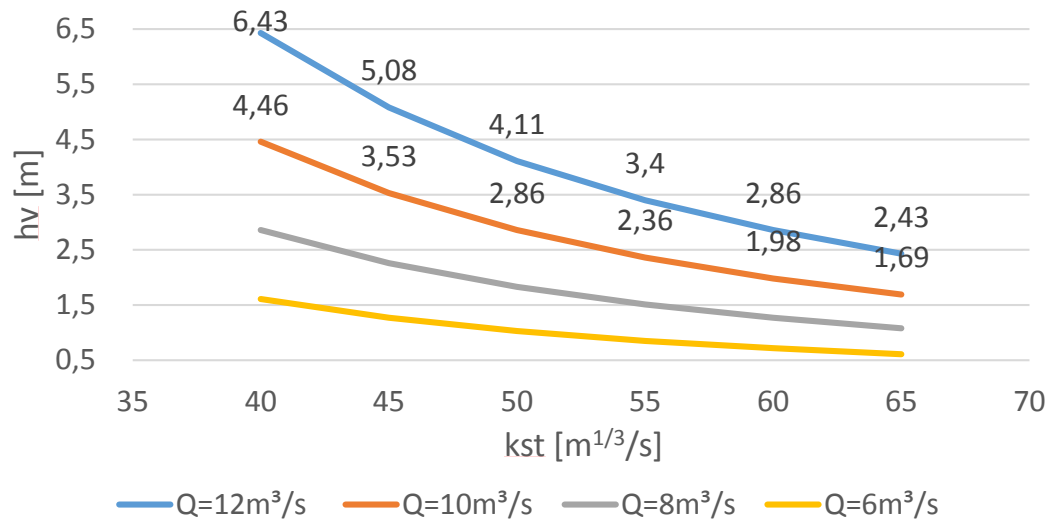


Diagramm 11: Fließverluste im Speicherstollen ($D=3,4$ m) bei stationärem Betrieb, abhängig von Durchfluss und der Rauigkeit

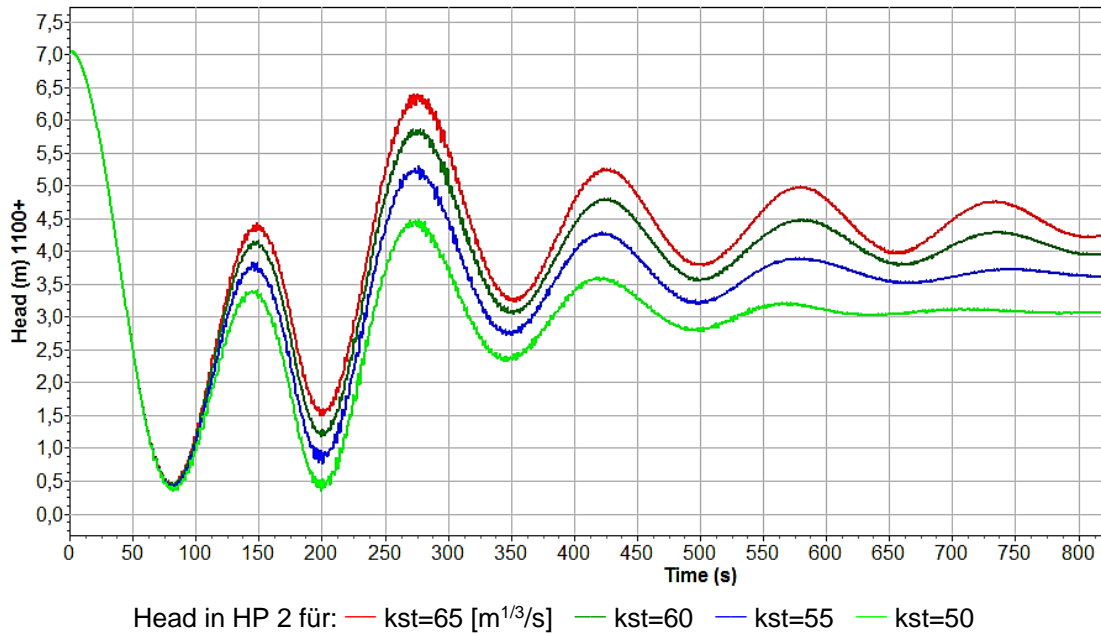


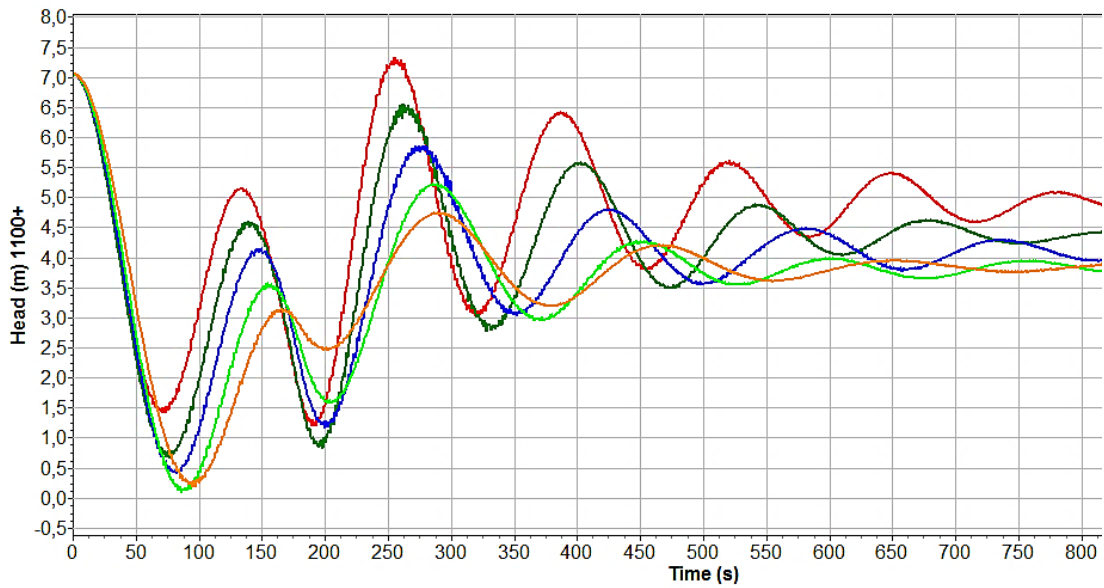
Diagramm 12: Zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im HP 2, abhängig von der Wandrauigkeit

7.3.5 LF Anfahren 180, System 80 mit variablem Durchmesser des Speicherstollens und maximalem Durchfluss

Neben seiner Neigung ist der Durchmesser des Speicherstollens der wichtigste Parameter. Der Stollen des *Systems 80* ist mit einem konstanten Durchmesser von 3,4 m abgebildet. Welche Auswirkungen eine Durchmesservariation mit sich bringt, sollen folgende Ergebnisse zeigen. Bei gleichbleibendem Durchfluss und zunehmender Stollenquerschnittsfläche müssen die Wassermassen im Speicherstollen auf eine geringere Fließgeschwindigkeit beschleunigt werden. Bei gleichbleibender Wasserschlossgröße und größerem Stollendurchmesser kann im LF *Anfahren 180* ein größerer Durchfluss in Bewegung gesetzt und transportiert werden, ohne dass es dabei zu einem Abreißen der Wassersäule im HP 2 kommt - dies zeigt das folgende Diagramm 13 (S. 103).

Der Speicherstollen des *Systems 80* mit einem Durchmesser größer 3,6 m ist in der Lage ein sicheres Anfahren der Turbine auf Ausbaudurchfluss in 180 s zu ermöglichen. Dabei ist zu beachten, dass eine Änderung des Stollendurchmessers eine Auswirkung auf die Schwingungsdauer des Systems mit sich bringt. In

Tabelle 6 ist die Schwingungsdauer in Abhängigkeit des Stollendurchmessers angegeben.



Head in HP 2 für: — D=3,8 [m] Qmax=12 [m³/s] — D=3,6 Qmax=12 — D=3,4 Qmax=11
 — D=3,2 Qmax=10 — D=3,0 Qmax=8,5

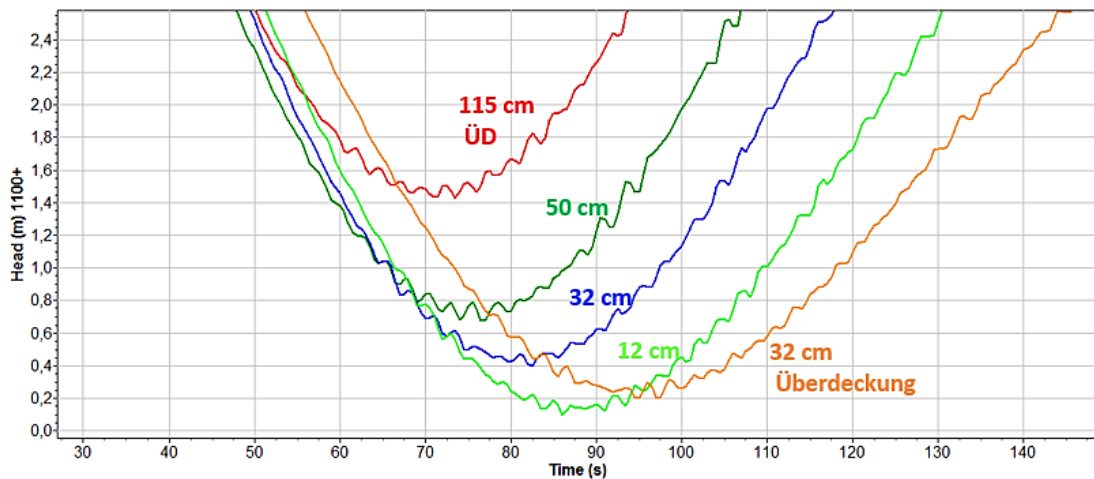
Diagramm 13: Zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im HP 2, abhängig vom Stollendurchmesser und dem dazugehörigen maximalen Durchfluss

D [m]	Schwingungsdauer T [s]
3,8	138
3,6	146
3,4	154
3,2	164
3,0	174

Tabelle 6: Schwingungsdauer, abhängig vom Stollendurchmesser

Die Variation des Stollendurchmessers bedeutet auch eine Verschiebung der Stollenfiste im Modell. In vorliegenden Berechnungen geht der Autor von einer

gleichbleibenden Stollenachse aus, d. h. eine Vergrößerung h des Durchmessers führt zu einer Verschiebung der Stollenfirse um $h/2$ nach oben. Diagramm 14 zeigt die einzelnen Energiehöhen im HP 2 während des ersten Abschwingvorgangs beim Anfahren der Turbinen in Abhängigkeit des Durchflusses und die dazugehörigen minimalen Abstände der EL von der jeweiligen Stollenfirse.



Head in HP 2 für: — $D=3,8$ [m] $Q_{\max}=12$ [m^3/s] — $D=3,6$ $Q_{\max}=12$ — $D=3,4$ $Q_{\max}=11$
 — $D=3,2$ $Q_{\max}=10$ — $D=3,0$ $Q_{\max}=8,5$

Diagramm 14: Energiehöhe und die jeweilige minimale Überdeckung der Stollenfirse im HP 2, abhängig vom Durchfluss

7.3.6 LF Anfahren mit variabler Anfahrzeit der Turbinen, System 80, $Q=11 \text{ m}^3/\text{s}$

Im folgenden Kapitel sind die Berechnungsergebnisse der Modellierungen mit variablen Anfahrzeiten der Turbine angeführt. Der LF *Anfahren 180* beinhaltet das Starten der Maschinen in 180 s. Dabei beträgt der maximal beschleunigbare Durchfluss $11 \text{ m}^3/\text{s}$ im Stollen. Folgend werden die Einflüsse einer zunehmenden Anfahrzeit der Turbinen auf das System bei einem Durchfluss von $11 \text{ m}^3/\text{s}$ dargestellt.

Diagramm 15 (S. 105) zeigt eine zunehmende Überdeckung der Stollenfirse im HP 2 während des ersten Abschwingvorgangs bei zunehmender Anfahrzeit der Turbinen. Eine Erhöhung der Startzeit der Maschinen auf 200 s bis 240 s führt

dazu, dass sich das zweite Abschwingen der EL mit der Eigenschwingung des Speicherstollens überdeckt und somit die EL tiefer absinkt als beim ersten Abschwingvorgang. Die Schwingungsdauer des Systems 80 liegt bei etwa 150 s.

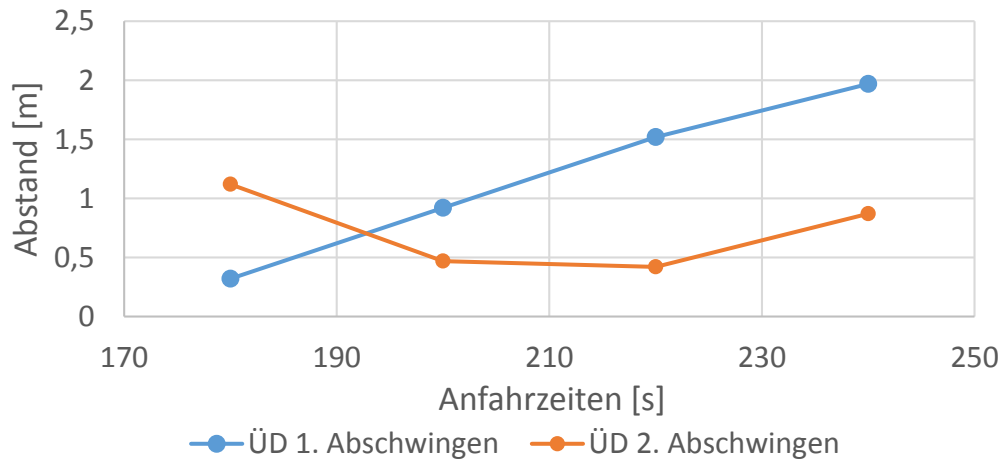


Diagramm 15: Abstand der EL von der Stollenfirse im HP 2 während des ersten und zweiten Abschwingvorgangs beim Anfahren der Turbine, abhängig von der Anfahrzeit

Diagramm 16 beinhaltet den zeitlichen Verlauf der Energiehöhe im Bereich des HP 2 in Abhängigkeit der Anfahrzeit. Darin ist auch das tiefere zweite Abschwingen der EL mit Startzeiten größer 200 s erkennbar.

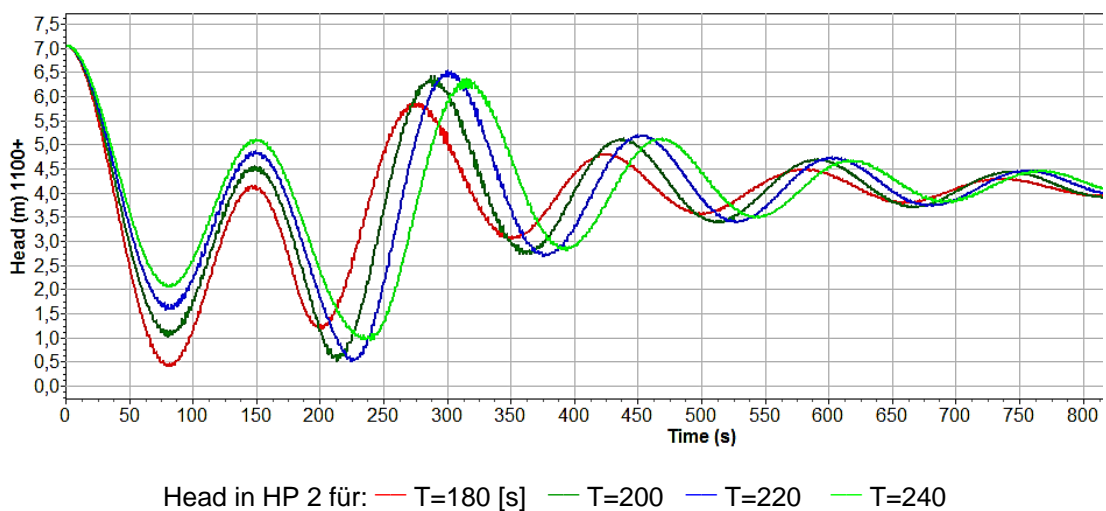


Diagramm 16: Zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im HP 2 beim LF Anfahren, abhängig von der Anfahrzeit

Des Weiteren zeigen die numerischen Simulationen, dass unter Verwendung des *Systems 80* ein Anfahren der Turbinen auf Ausbaudurchfluss von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ ab einer Anfahrzeit größer 240 s möglich ist. Dabei beträgt der minimale Abstand der EL zur Firste im HP 2 während des zweiten Abschwingvorgangs 30 cm.

7.3.7 LF Anfahren 180, $Q= 12 \text{ m}^3/\text{s}$, System 80 mit variabler Neigung des Speicherstollens

Das *System 80* beinhaltet eine Stollenneigung von $-1,5 \text{ ‰}$. Bei einer Stollenlänge von 4611 m beträgt der dabei überwundene Höhenunterschied etwa 7,1 m. Damit überhaupt Wasser in einem Freispiegelgerinne fließt, muss die Sohlneigung geringer sein als das Energieliniengefälle. Aus dem Diagramm 11(S. 101) kann man die Fließverlusthöhen im Speicherstollen aufgrund der Wandrauigkeit entnehmen. Die Neigung der EL bei stationärem Durchfluss von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ und einer Rauigkeit von $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ liegt bei $-0,60 \text{ ‰}$ und ist somit größer als die Stollenneigung.

Durch die Abnahme der Stollenneigung können beim Anfahren der Turbine die Wassermassen im Speicherstollen schneller beschleunigt werden, da das Wasserschloss tiefer absinken kann als davor. Dabei kommt es zu einem Anwachsen der Gewichtskomponente parallel zur Stollenachse, welche die Trägheit der Massen im Stollen schneller überwindet. Gleichzeitig führt eine Abnahme der Sohlneigung zu einer Zunahme der Überdeckung der Firste im HP 2.

Diagramm 17(S. 107) stellt den Zusammenhang zwischen der Stollenneigung und der minimalen Überdeckung der Stollenfirste im HP 2 während des Anfahrens der Turbine auf $12 \text{ m}^3/\text{s}$ dar. Eine Abnahme der Stollenneigung auf $-1,6 \text{ ‰}$ ermöglicht eine Simulation des LF *Anfahren 180* mit $12 \text{ m}^3/\text{s}$, ohne dass dabei ein Abreißen der Wassersäule im HP 2 auftritt.

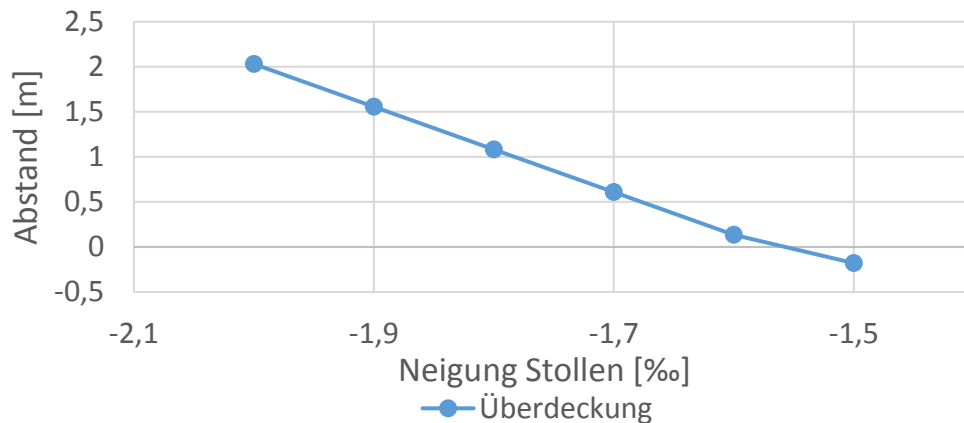


Diagramm 17: Zusammenhang zwischen dem Abstand der EL zur Stollenfirste im HP2 und der Sohlneigung des Speicherstollens, $Q= 12 \text{ m}^3/\text{s}$

7.3.8 LF Start Stopp, $Q= 11 \text{ m}^3/\text{s}$, System 80

Der zweite untersuchte LF beinhaltet das Anfahren und Stoppen der Turbine. Dabei gleicht die Schaltcharakteristik dieses LF bis zur 200sten Sekunde jener des LF *Anfahren 180* (Diagramm 3 S.93).

Die Maschinen werden in 180 s hochgefahren, laufen 20 s mit konstantem Durchfluss und werden dann in den weiteren 180 s gestoppt. Nach Beginn des Herunterfahrens der Anlage wird der Zufluss zur Turbine verringert, die Wassermassen im Speicherstollen bewegen sich jedoch ungebremst weiter und füllen das Wasserschloss. Die EL schwingt im Bereich des Wasserschlosses auf und erreicht einen maximalen Ausschlag, dabei werden die Massen im Speicherstollen abgebremst. Nach dem ersten Aufschwingen des Systems bewegt sich aufgrund der Energiehöhendifferenz im Speicherstollen, das Wasser Richtung OW und der WSP im Schachtwasserschloss sinkt ab. Die Fließverluste im Speicherstollen wirken dabei als Dämpfungselement und reduzieren die weiteren Amplituden der Massenschwingung.

Beim Anfahren der Turbinen deckt sich der Zufluss (Diagramm 18, grüner Verlauf, S. 108) aus dem Entsander über die Endschwelle nicht mit dem Turbinendurchfluss (Diagramm 19, grüner Verlauf, S. 108), da die Wassermassen im Speicherstollen erst beschleunigt werden müssen. Danach erst sinkt der WSP im Einlaufbecken ab (Diagramm 18, roter Verlauf, S. 108) und der Zufluss über die

Endschwelle steigt dann kontinuierlich an. Der maximale Durchfluss im Einlaufbecken wird nach etwa 250 s erreicht und dauert etwa 100 s an. Der Speichersollen wird solange mit dem Zufluss aus dem Einlaufbecken gespeist bis er schließlich vollständig gefüllt ist. Dabei wird der Zufluss von 11 m³/s innerhalb von 10 s auf 4 m³/s abgebremst.

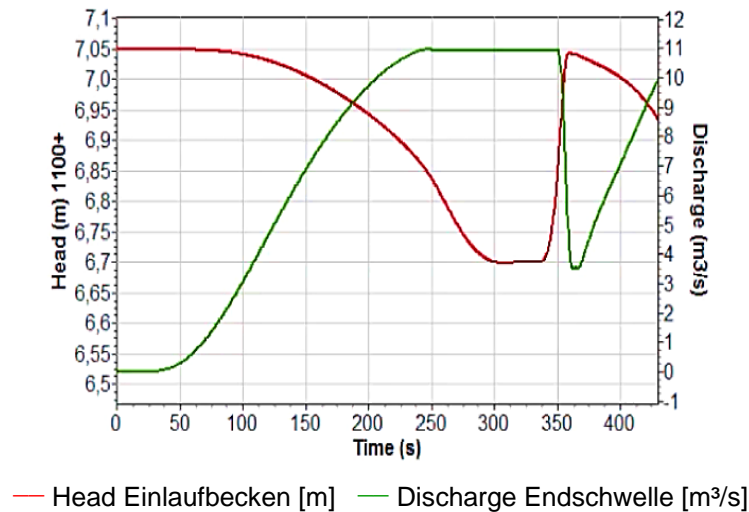


Diagramm 18: LF Start Stopp, zeitlicher Verlauf der Energiehöhe und Zufluss im OW

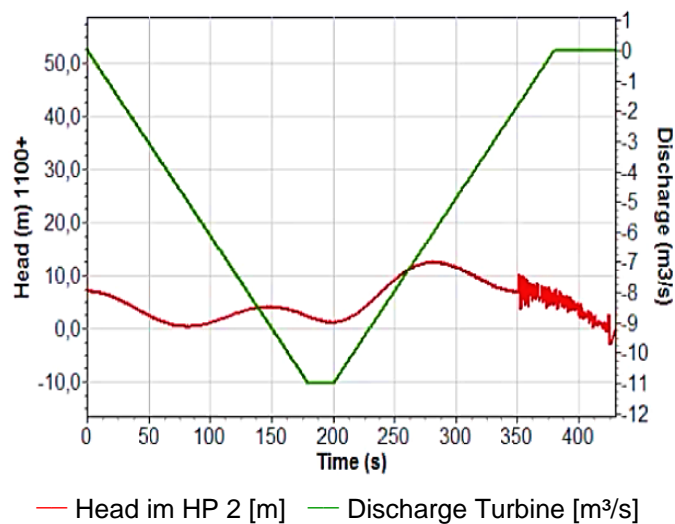


Diagramm 19: LF Start Stopp, Energiehöhe im HP 2 und Turbinendurchfluss

Unter Verwendung des *Systems 80* für die Simulationen wird durch die plötzliche Durchflussänderung ein Druckstoß ausgelöst (Diagramm 20). Das folgende Diagramm zeigt den Verlauf der EL zum Zeitpunkt 348 s. Im linken Bereich ist eine Druckwelle mit einer Höhe von etwa 40 m erkennbar, die sich mit ~ 1000 m/s in Richtung UW bewegt. Das *System 80* beinhaltet dabei eine Belüftung mit der Querschnittsfläche von 50 m^2 im Bereich des Hochpunkts 1. Die im Bereich des HP 1 während des Zuschlagens eingeschlossene Luft wirkt dabei dämpfend auf den Druckstoß. Dieser Effekt kann in der Simulation jedoch nicht berücksichtigt werden, ist somit nicht quantifizierbar.

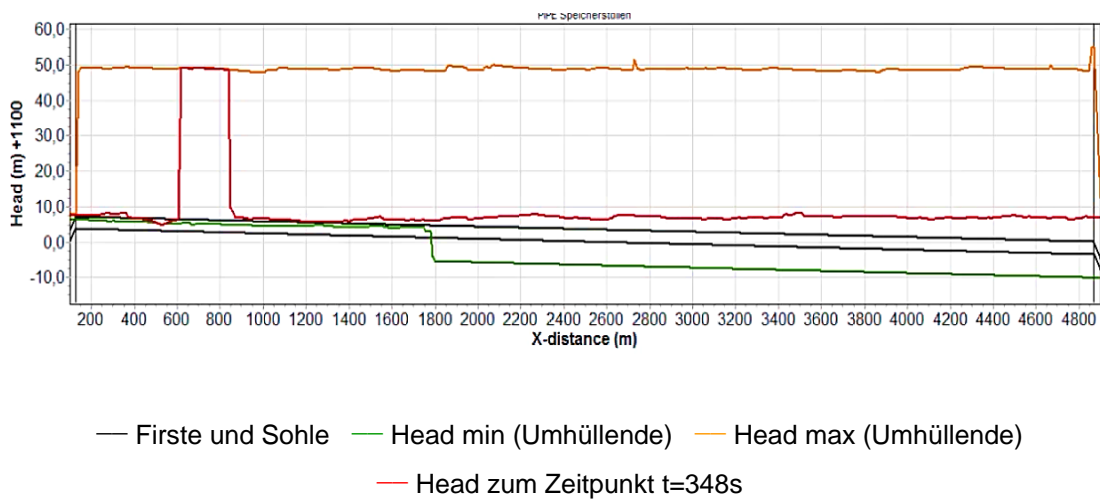
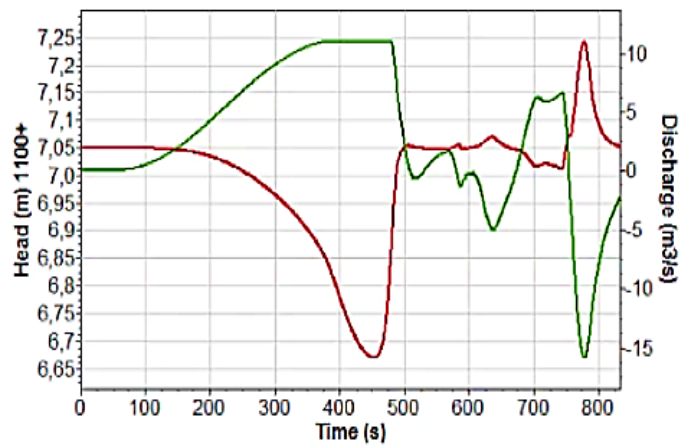


Diagramm 20: Druckstoßbelastung des Speicherstollens des Systems 80 bei LF Start Stopp

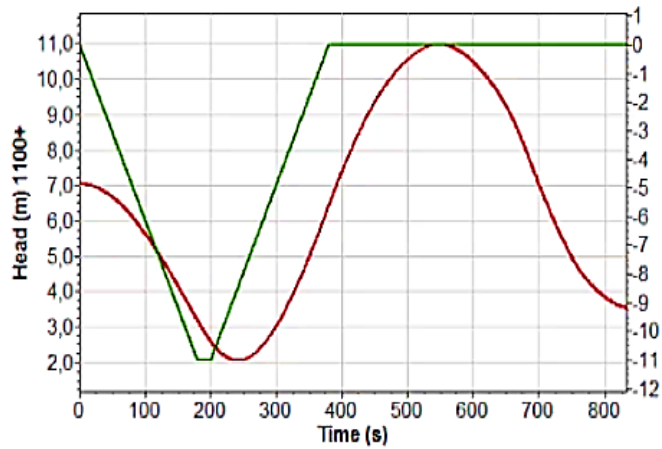
7.3.9 LF Start Stopp, $Q = 11 \text{ m}^3/\text{s}$, System 80 mit einem Wasserschlossquerschnitt von 200 m^2

Die folgenden Ergebnisse zeigen die Einflüsse eines vergrößerten Wasserschlossquerschnitts mit 200 m^2 . Eine Aufweitung des Querschnitts bewirkt ein langsames Beschleunigen der Massen im Speicherstollen und somit einen späteren Beginn des Zuflusses aus dem Entsander. Der volle Zufluss mit $11 \text{ m}^3/\text{s}$ wird erst nach etwa 350 s erreicht, wo bereits die Turbine zum Stillstand gekommen ist (siehe Diagramm 21, grüner Verlauf, S.110).



— Head Einlaufbecken [m] — Discharge Endschwelle [m³/s]

Diagramm 21: LF Start Stopp, System 80 mit Wasserschlossquerschnittsfläche $A=200 \text{ m}^2$, zeitlicher Verlauf der Energiehöhe und Zufluss im OW



— Head im Wasserschloss [m] — Discharge Turbine [m³/s]

Diagramm 22: LF Start Stopp, System 80 mit Wasserschlossquerschnittsfläche $A=200 \text{ m}^2$, zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im Wasserschloss und Turbinendurchfluss

Auf die Größe des Druckstoßes hat das vergrößerte Schachtwasserschloss keine positiven Auswirkungen, da es im HP 1 unabhängig von Wasserschlossgröße zum Zuschlagen kommt. Lediglich entstehen die Druckwellen zu einem späteren Zeitpunkt. Das folgende Diagramm 23 (S. 111) zeigt eine Druckstoßwelle im Speicherstollen um Zeitpunkt $t= 627 \text{ s}$.

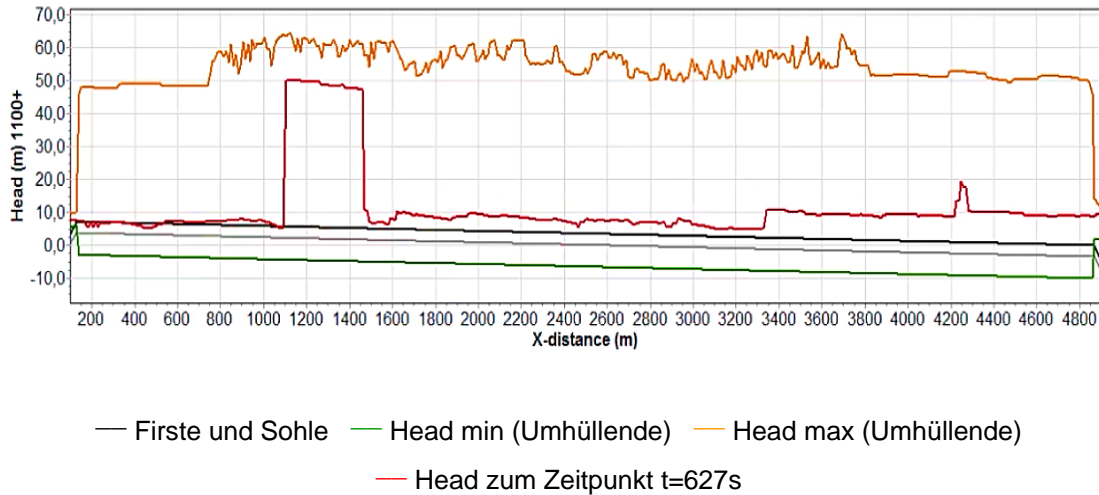


Diagramm 23: Druckstoßbelastung des Speicherstollens des Systems 80 mit Wasserschlossquerschnittsfläche von 200 m² bei LF Start Stopp

7.3.10 LF Start Stopp, $Q= 11 \text{ m}^3/\text{s}$, System 90

Wie bereits erwähnt wirkt die Luft im Bereich des HP 1 dämpfend auf das Zuschlagen des Stollens bzw. auf die Druckstoßausbreitung, jedoch kann die 1D- numerische Strömungssimulation diesen Effekt nicht abbilden. Mit Hilfe eines fiktiven Überfalls, wie er im System 90 angeordnet ist (siehe Anhang), kann eine Dämpfung des Druckstoßes, der beim Zuschlagen des Stollens entsteht, simuliert werden. Für eine detaillierte Modellierung und Kalibrierung des Dämpfungseffektes sind weitere Untersuchungen notwendig. (Diagramm 24, S. 112) zeigt unter anderem jene Wassermenge (roter Verlauf), die über den fiktiven Überlauf abgegeben wird und somit den Druckstoß im Stollenspeicher verringert. Die Überfallkante liegt in ihrer Höhenanordnung über der Quote des WSP im Entsan- der, deswegen springt der Überfall erst beim Zuschlagen des Stollens an.

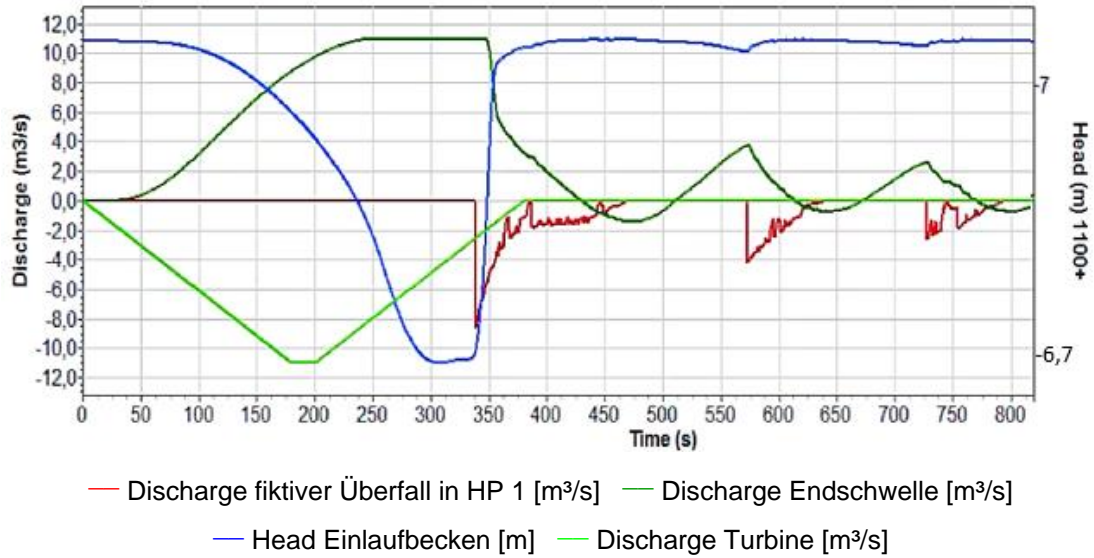


Diagramm 24: LF Start Stopp, System 90, Durchfluss des fiktiven Überfalls im HP1 und Energiehöhe und Zufluss im Einlaufbecken

Der fiktive Überfall zeigt auch die schwallartigen Rückflüsse in die Restwasserstrecke - dieses Thema ist gesondert zu behandeln. Der Druckstoß im Speicherstollen kann im Vergleich zum System 80 auf 8 m Wassersäule reduziert werden (Diagramm 25, orange Umhüllende).

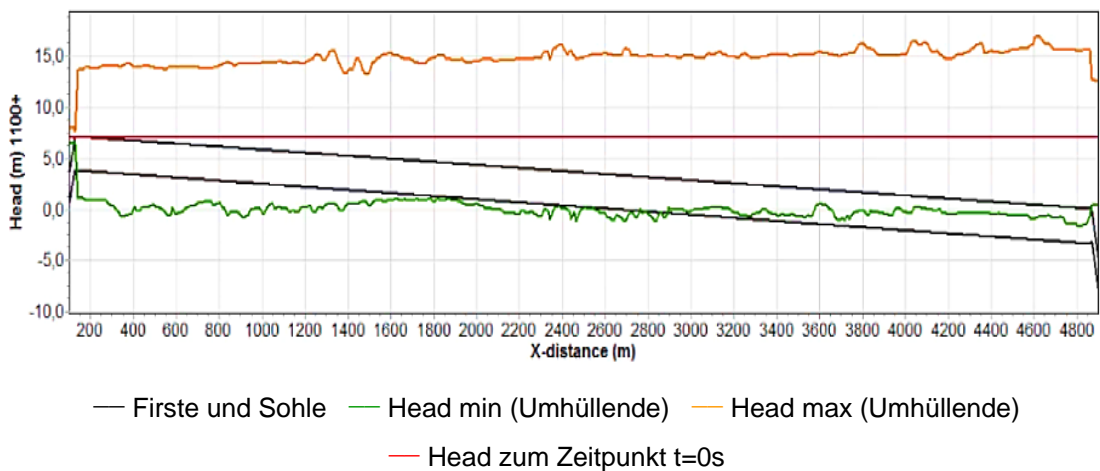


Diagramm 25: Druckstoßbelastung des Speicherstollens des Systems 90 bei LF Start Stopp

7.3.11 LF Start Stopp, $Q= 11 \text{ m}^3/\text{s}$, System 100

Das System 100 (siehe Anhang) beinhaltet im Einlaufbecken ein Verschlussorgan, womit der Zufluss gesteuert werden kann. Wird der Turbinendurchfluss reduziert, kann der Zufluss das Speicherstollens verringert werden und somit ein Zuschlagen des Stollens verhindert werden. Diagramm 26 zeigt die Schließcharakteristik (rot) des Einlaufschützes, welches in 100 s geschlossen werden kann.

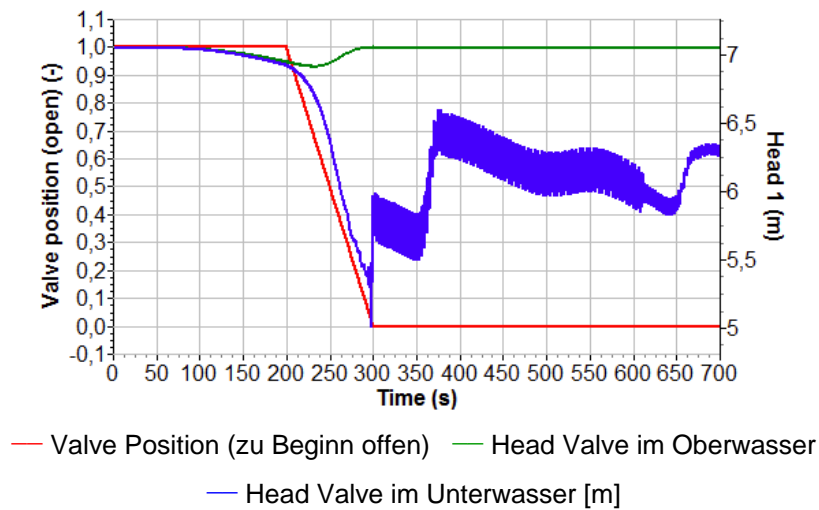


Diagramm 26: LF Start Stopp, System 100, Schließcharakteristik und Energiehöhen des Verschlussorgans im Einlaufbereich

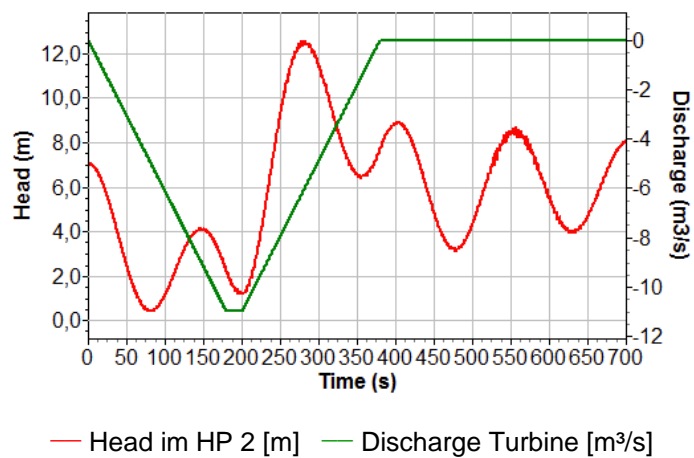


Diagramm 27: LF Start Stopp, System 100, Energiehöhe im HP 2 und Turbinendurchfluss

In Diagramm 28 ist erkennbar, dass sich aufgrund des rechtzeitigen Schließens des Einlaufschützes kein Zuschlagen des Stollens im Bereich des HP 1 auftritt. Durch die frühzeitige Reduktion des Zuflusses bleibt genügend Luftraum am Beginn des Speicherstollens, wo sich die Schwallwellen aus dem UW bewegen können, ohne dabei den Stollenquerschnitt zu verschließen. Bei Beginn des Abschaltvorgangs der Turbinen sollte das Einlaufschütz geschlossen und erst dann wieder geöffnet werden, wenn sich die Schwallwellen im Speicherstollen gelegt haben. Diese Maßnahme ist nur dann erforderlich wenn der WSP im Speicherstollen im Bereich des Stauziels liegt und den Schwallwellen kein Bewegungsraum zur Verfügung steht.

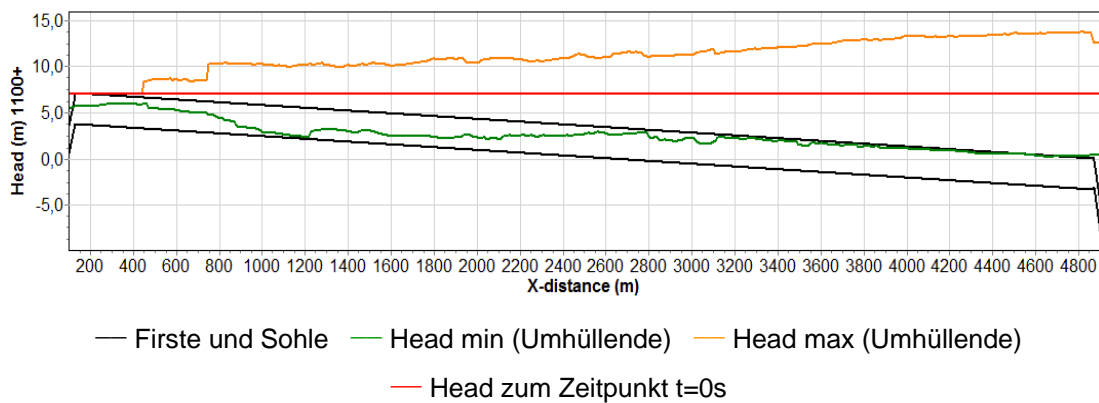


Diagramm 28: Keine Druckstoßbelastung des Speicherstollens des Systems 100 bei LF Start Stopp

7.4 Konstruktive Optimierungsmöglichkeiten

Der reibungslose Betrieb eines WKW zeichnet sich, neben der hohen Verfügbarkeit der Anlage, auch durch eine ständig existierende und ausreichende Sicherheit aus. Die Bewirtschaftung des Flachstollens eines HDWKW als Speicherstollen kann für eine zusätzliche Optimierung der Ausnutzung des Wasserdargebots sorgen. Der sichere Kraftwerksbetrieb muss für alle wahrscheinlichen Lastfälle jedoch Priorität haben.

Die Ergebnisse der durchgeführten 1D- numerischen Simulationen stellen einen reibungslosen Betrieb der untersuchten Anlage in Frage. Im Folgenden sind Optimierungsmöglichkeiten für die Untersuchungsanlage und für zukünftige WKW- Projekte mit Speicherstollen angeführt.

7.4.1 Optimierungsmöglichkeiten für das untersuchte Wasserkraftwerk

Die angestellten numerischen Untersuchungen an der Beispielanlage zeigen zwei konkrete Problemstellen auf:

- das Abreißen der Wassersäule im HP 2 bei Anfahren der Turbinen auf $12 \text{ m}^3/\text{s}$ in 180 s
- das Zuschlagen des Stollens im HP 1 beim Starten und Stoppen der Turbine, wobei der Ausgangswasserspiegel dem Stauziel entspricht

Die Beschleunigung der Wassermassen in einem Drucksystem ist unabhängig von der Neigung des Druckstollens. Sie hängt vom vorhandenen Druckgradienten zwischen Speicher und Wasserschloss ab. Auch der Speicherstollen stellt ein Drucksystem dar, jedoch ist der Druckgradient im Stollen sehr gering. Um beim Anfahren der Turbine die Wassermassen im Speicherstollen zu beschleunigen, ist ein ausreichender Abstand der Energielinie zur Stollenfirste im Bereich des Hochpunktes 2 notwendig. Diese Überdeckung kann mit einer genügend steilen Stollenneigung erreicht werden.

Während die Wassermassen mit rund 40 000 Tonnen im Speicherstollen ihre Trägheit überwinden und auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigen, wird in der Zwischenzeit die Turbine vom Wasserschloss gespeist. Ein ausreichend dimensioniertes Wasserschloss sorgt für ein langsames Absinken der EL beim Anfahren der Turbine und stellt einen genügend großen Abstand zwischen Stollenfirste und EL im HP 2 sicher. Dadurch kann ein Abreißen der Wassersäule im HP 2 verhindert werden. Kapitel 7.3.3 zeigt den Zusammenhang zwischen der Wasserschlossquerschnittsfläche und der minimalen Energiehöhe im HP 2. Eine Wasserschlossaufweitung kann z. B. durch die Anordnung einer Unterkammer

am Wasserschloss mit einer Grundfläche von 200 m² und einem Kammervolumen von 1200 m³ erfolgen.

Auch die Änderung der Schaltcharakteristik beim Anfahren der Turbine von 180 s auf mindestens 240 s ermöglicht die Förderung des Ausbaudurchflusses, ohne dass dabei die Wassersäule im HP 2 abreißt. Es soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass bei einer Anfahrzeit von 240 s der Turbine auf 12 m³/s der minimale Abstand der EL zur Stollenfirste im HP 2 nur 30 cm beträgt.

Die Simulationsergebnisse des LF *Start Stopp* zeigen ein plötzliches Zuschlagen des Stollens im HP 1, da ein vom UW kommender Schall auf den vollen Zufluss aus dem Einlaufbecken trifft und den Stollenquerschnitt blitzartig füllt. Diese Problematik wird durch eine genügend große Aufweitung des Stollens im HP 1 beherrschbar. Damit steht den Schwallwellen genügend Luftraum zur Verfügung, ohne dabei den Stollenquerschnitt zu verschließen.

Durch die Anordnung eines Verschlussorgans im Einlaufbecken kann der Zufluss in den TWW kontrolliert werden. Sobald die Turbine abgeschaltet wird, kann das Schütz im OW geschlossen werden. Der dadurch ausbleibende Zufluss schafft zusätzlichen Freiraum für kontrollierte Schwallbewegungen im Bereich des HP 1 und ermöglicht eine verbesserte Dämpfung der Massenschwingung. Der Abschaltvorgang der Turbine und der Füllvorgang des Speicherstollens sollten bei hoher Wasserspiegellage im Speicherstollen getrennt voneinander erfolgen. Bei höherem Entleerungsgrad kann das Einlaufschütz beim Abschalten der Maschinen auch offen bleiben, da den Schwallwellen genügend Bewegungsraum im Speicherstollen zur Verfügung steht.

7.4.2 Optimierungsmöglichkeiten für zukünftige WKW Projekte mit Speicherstollenbewirtschaftung

Grundsätzlich sollte die Konzeptionierung komplexer WKW von 1D- numerischen Untersuchungen begleitet werden. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass bei der Simulation von Speicherstollen auf die Auswahl der Berechnungssoftware zu achten ist. Besonders ein erprobtes und validiertes Freispiegelabflussmodul, welches bei Druckabfluss den Druckstoß berechnen kann, sollte gewählt werden.

Die vorangegangenen Simulationsergebnisse zeigen eine zentrale Herausforderung auf: Ein sehr träges Beschleunigen der Wassermassen im Speicherstollen, das in Verbindung mit einem zu kleinem Wasserschloss zu Problemen im Betrieb eines WKW führen kann. Das Kriterium dabei ist eine genügend große Überdeckung zwischen EL und Stollenfirste.

Ein ausreichend geneigter Speicherstollen sorgt neben einem raschen Beschleunigungsvorgang des Wassers auch für eine ausreichende Überdeckung der EL zur Stollenfirste. Stollen mit größeren Durchmessern benötigen eine geringere ausgeprägte Beschleunigungsphase, da die Abflussgeschwindigkeit aufgrund des größeren Fließquerschnitts abnimmt und somit die erforderliche kinetische Energie geringer ist. Ausgeprägte Wasserschlossquerschnittsflächen sorgen beim Anfahren der Turbine für einen genügend großen Abstand der EL zur Stollenfirste und stellen ein zusätzliches Speichervolumen dar. Gleichzeitig wird der ruhenden Wasserfracht im Speicherstollen genügend Zeit für den Beschleunigungsvorgang beim Anfahren der Maschinen eingeräumt.

Als ein Auslegungskriterium für die Trassierung des Speicherstollens kann der minimale Abstand zwischen EL und Stollenfirste beim Anfahren der Turbine berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass jeder weitere lokale Verlust im Stollen, durch z. B. Querschnittssprünge oder Lufteinschlüsse, die EL zusätzlich nach unten verschiebt. Diese zusätzlichen Verluste der EL sind bei der Festlegung des Mindestabstands der EL zur Stollenfirste zu berücksichtigen, um eine ausreichende Betriebssicherheit der Anlage zu gewährleisten.

8. Ausblick

Die vorliegenden 1D- numerischen Berechnungen beinhalten das Systemverhalten der untersuchten Anlage für zwei einfache Lastfälle. Die beiden Lastfälle beschreiben das Anfahren der Turbine in 180 s und das Anfahren und Stoppen der Maschinen in jeweils 180 s. Dabei entspricht der Ausgangswasserspiegel dem Stauziel der Anlage. Zusätzliche numerische Untersuchungen für unterschiedliche WSP- Lagen im Speicherstollen sind empfehlenswert. Es scheint zielführend, für den Bereich HP 2 Untersuchungen bezüglich der Förderfähigkeit anzustellen, um bei abgesenktem Wasserspiegel im Speicherstollen ein Abreißen der Wassersäule zu verhindern.

Im Kapitel 7.4.1 wird als Maßnahme gegen das Zuschlagen des Stollens im Bereich des HP 1 eine Stollenaufweitung vorgeschlagen. Mit Hilfe weiterer Untersuchungen der Schwallvorgänge im Stollenspeicher kann eine sinnvolle Dimensionierung des Ausbruchvolumens im Bereich des Hochpunktes 1 erfolgen. Da sich insbesondere ein Verschlussorgan im Einlaufbereich gegen das Zuschlagen positiv auswirkt, erscheinen weiterführende Parameterstudien diesbezüglich zweckmäßig.

Des Weiteren können 3D- numerische Strömungssimulationen weiterer Detailbereiche, wie etwa den Übergang des Stollens auf das Wasserschloss oder Querschnittssprünge im Stollen, Aufschluss über das tatsächliche Strömungsbild geben.

Eine Herausforderung ist die Auswirkung möglicher Lufteinschlüsse auf das Systemverhalten eines WKW mit Stollenspeicherbetrieb vorherzusagen. Es genügen oft kleine Querschnittsübergänge oder Mehrausbruchstellen an der Firste im Speicherstollen, wo sich Luftblasen festsetzen und zu Luftpolster oder Lufttaschen anwachsen können. Durch die Reduktion des Durchflusses nehmen die auf den Lufteinschluss wirkenden Strömungskräfte ab und bei entsprechend großen Auftriebskräften, resultierend aus der Stollenneigung, beginnt sich die eingeschlossene Luft in Richtung OW zu bewegen. Um ein besseres Verständnis

für die Luftproblematik in Speicherstollen zu gewinnen, können diesbezüglich Untersuchungen und Messungen am Prototyp und an Großmodellen im Wasserbaulabor stattfinden.

Die Verwendung des Flachstollens eines HDWKW als Speicherstollen ist ein sehr junges Kapitel des konstruktiven Wasserbaus und kann daher mit weiterer Forschungsarbeit in der Konstruktion und im Betrieb optimiert werden. Dabei stellen besonders die optimale Anordnung der Anlagenkomponenten zwischen Einlaufbecken und Wasserschloss, die ideale Neigung des Speicherstollens und der optimale Wasserschlossquerschnitt die Herausforderungen in der Dimensionierung dar.

9. Zusammenfassung

Im Alpenraum hat sich in der Vergangenheit eine bewährte Bauweise von Hochdruckanlagen etabliert, die einen sicheren und störungsfreien Betrieb der Anlagen ermöglicht. Außergewöhnliche Randbedingungen und die ständig wachsenden Anforderungen verlangen eine laufende Weiterentwicklung des bewährten Konzepts. Die Nutzung des kilometerlangen Druckstollens einer Hochdruckanlage als Speicherstollen, der regelmäßig gefüllt und entleert wird, ist keine Standardausführung im Konstruktiven Wasserbau. Charakteristisch dabei ist der Wechsel des Abflussregimes zwischen Druck- und Freispiegelabfluss.

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit den Strömungsvorgängen, die bei der Bewirtschaftung von Speicherstollen auftreten. Ziel dieser Arbeit ist es die Fließvorgänge im Speicherstollen eines beispielhaften Wasserkraftwerks (siehe Abb. 63, S.121) 1D- numerisch zu modellieren, auf mögliche hydraulische Problemstellen hinzuweisen und gegebenenfalls Optimierungsmöglichkeiten auszuarbeiten. Die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen beinhalten charakteristische Kennwerte, die keine zusätzliche Sicherheit enthalten.

Die dafür notwendige Berechnungssoftware muss in der Lage sein, die Komponenten einer Hochdruckanlage abbilden zu können. Darüber hinaus muss es über ein Modellierungselement verfügen, welches Freispiegel- und Druckabflussströmungen simulieren kann. Für die vorliegenden 1D- numerischen Berechnungen kommt *WANDA 3.72* von *Deltares System* zum Einsatz. Am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Graz wird *WANDA* für die numerische Berechnung von Druck- und Freispiegelabfluss verwendet. Dabei wird das numerische Modell an Modellversuchen validiert.

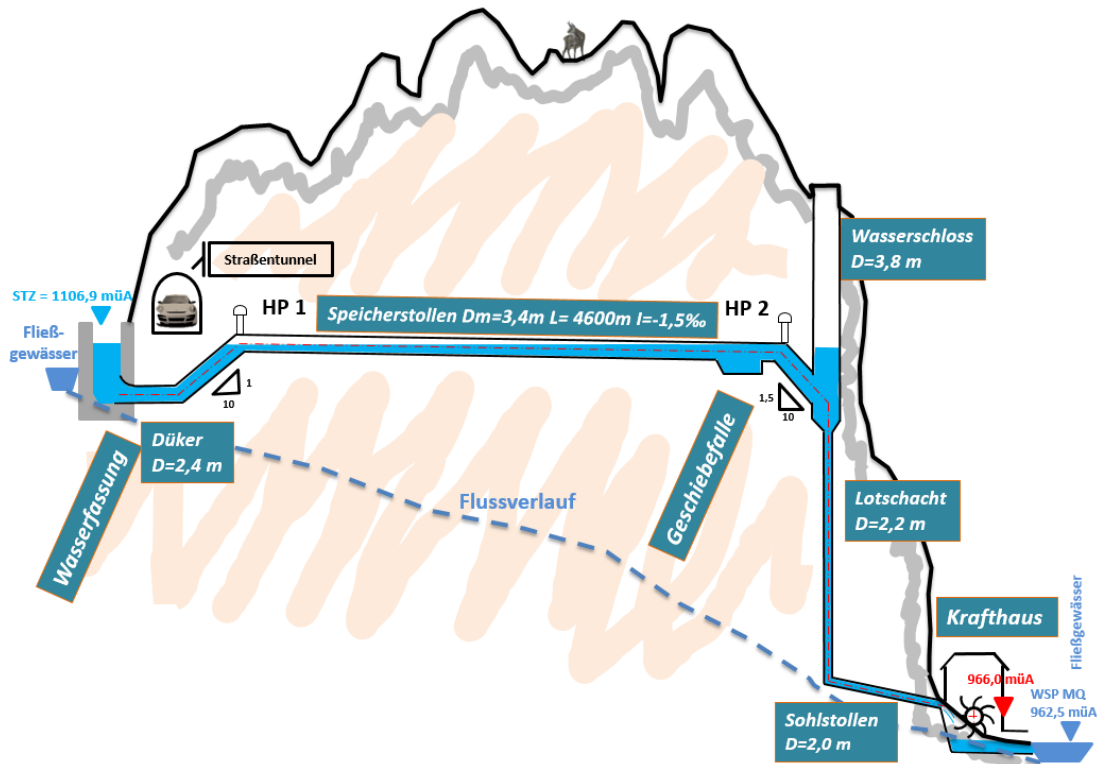


Abb. 63: Schematischer Längsschnitt des teilgefüllten Triebwasserwegs der untersuchten Anlage

Im Zuge der numerischen Strömungsberechnung werden zwei einfache Lastfälle untersucht: Das Anfahren der Turbine in 180 s, sowie das Anfahren und Stoppen der Turbine in jeweils 180 s. Der Ausgangswasserspiegel entspricht dabei dem Stauziel des Wasserkraftwerks. Den Schwerpunkt der Berechnungen bildet eine Parameterstudie, um die Einflüsse unterschiedlicher Kennwerte, wie Stollenneigung, Ausbruchquerschnitt oder Rauigkeit, auf das Systemverhalten zu untersuchen.

Das Anfahren der Turbine auf $12 \text{ m}^3/\text{s}$ (Ausbauwassermenge) in 180 s zeigt ein Abreißen der Wassersäule am Hochpunkt 2, dem Übergang vom flachen Speicherstollen auf den mit -15% geneigtem Schrägstollen. Beim Starten der Maschinen sinkt der Wasserspiegel im Wasserschloss rasch ab, da die Wassermassen im Speicherstollen nicht ausreichend schnell beschleunigt werden können. Die Energielinie taucht dabei im Bereich des Hochpunktes 2 unter die Stollenfirste und es kommt zum Abreißen der Wassersäule. Die Anordnung einer Unterkammer mit etwa 200 m^2 (Volumen $\sim 1200 \text{ m}^3$) verhindert die Separation der

Wassersäule. Die Änderung der Anfahrzeit der Turbinen auf über 240 s stellt ebenso eine Lösung des Problems dar.

Der Lastfall Anfahren und Stoppen der Turbine zeigt ein Zuschlagen des Speicherstollens im Bereich des Hochpunktes 1, dem Übergang der Siphonstrecke zum Speicherstollen. Die aufgrund des Abschaltens der Maschine entstehenden Schwallwellen treffen auf den vollen oberwasserseitigen Zufluss. Dabei kommt es zum Zuschlagen des Stollens im Bereich des Hochpunktes 1 und folglich breiten sich Druckstoßwellen im Speicherstollen aus. Eine Aufweitung des Stollens im Hochpunkt 1 verschafft den Schwallwellen mehr Bewegungsraum ohne dabei den Tunnelquerschnitt zu verschließen. Durch die Anordnung eines Verschlussorgans im Einlaufbereich wird das Nachströmen des Zuflusses verhindert und der Bewegungsraum für die Schwallwellen wird vergrößert. Wichtig ist dabei eine ausreichende Dämpfung der Wasserschlossschwingung zu ermöglichen.

Die angestellten 1D- numerischen Strömungssimulationen zeigen beim Anfahren der Turbine ein sehr träges Beschleunigen der Wassermassen im Speicherstollen der Beispielanlage. Das Auslegungskriterium für die Stollentrassierung sollte eine genügend große Überdeckung der Energielinie zur Stollenfirste sein. Mit einer angemessenen Stollenneigung allein kann dies erreicht werden. Auch ein möglichst großer Wasserschlossquerschnitt verringert die Amplitude und erhöht somit die minimale Lage der Energielinie.

Es zeigt sich, dass Stollenspeicher das Einsatzgebiet und die Flexibilität von Hochdruckwasserkraftwerken ausbauen könnten. Die mit der Speicherbewirtschaftung des Druckstollens einhergehenden hydraulischen Randbedingungen führen zu Herausforderungen, welche für den sicheren Betrieb der Anlage zu bewältigen sind. Die vorliegende Masterarbeit zeigt einen zielführenden Weg, mittels 1D- numerischen Strömungssimulationen die wichtigsten hydraulischen Vorgänge in einer Kraftwerksanlage mit Speicherstollen zu berechnen.

Literaturverzeichnis

ALDRIGHETTI, E. and STELLING, G., *A robust scheme for free surface and pressurized flows in channels with arbitrary cross- sections*.

ARNASON, A. and LARDELLI, M., 2012. Air entrainment challenges at the 45 MW Küblis scheme, Switzerland. *Hydropower and Dams*, (5), pp. 92-96.

BILLIG-STROM.DE, 2014-last update. Available: <http://www.billig-strom.de/leistungsoptimierung-strom-gewerbe.html> [02/2014, 2014].

BOLLRICH, G. and MARTIN, H.1., 1992. *Grundlagen; Technische Hydromechanik*. Berlin ; Wien [u.a.]: Beuth.

B-TECK GMBH, 2014-last update. Available: <http://www.b-teck.de/armaturen/sicherheitsklappen.html> [03/2014, 2014].

BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, 2011. *Erneuerbare Energien 2010*.

DELTARES, 2014-last update, About Deltares. Available: <http://www.deltares.nl/en/> [03/2014, 2014].

DELTARES, 2013. *WANDA 3.72*. Delft, The Netherlands.

DELTARES, 2013. *WANDA 4.2*. Delft, The Netherlands.

DELTARES, 2013. *Wanda 4.2 User Manual*. Delft, The Netherlands.

DER VIRGENTALER WEG, 2013-last update. Available: <http://www.virgentaler-weg.at/technische-details/> [02/2014, 2014].

DR. KRAUSS ZT GMBH, 2012. *Krafthaus Mitteldorf, Grundriß und Schnitte D303-TP-0132*. Graz.

E-CONTROL, 2014-last update. Available: <http://www.e-control.at/de/konsumenten/oeko-energie/basiswissen/oekostrom-arten/wasserkraft> [02/2014, 2014].

GEIPERT, H., 1982. *Schwall und Sunk als Übergangsbereich zwischen Teil- und Vollfüllung in Rohrleitungen mit rechteckigem Querschnitt*. Berlin.

GIESECKE, J. and MOSONYI, E., 2005. *Wasserkraftanlagen; Planung, Bau und Betrieb*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

GUTKNECHT, D. and DROBIR, H., 2009. Leitfaden zum Nachweis der Hochwassersicherheit von Talsperren.

HVEDING, V., 1992. HYDROPOWER DEVELOPMENT IN NORWAY. *Hydropower Development*.

HYDROGRAPHISCHE DIENST TIROL, 2014-last update. Available: <https://www.tirol.gv.at/umwelt/wasser/wasserkreislauf/wasserstand/> [02/2014, 2014].

ILF BERATENDE INGENIEURE, 2012. *Wasserfassung GR u. LS, D304 WF_20_02_105_01*. Innsbruck: .

JOHNSON, R., 1908. The Surge Tank in Water Power Plants. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS TRANSACTIONS, ed, *Trans. ASME*. pp. 443-501.

KELAG-KÄRNTNER ELEKTRIZITÄTS-AKTIENGESELLSCHAFT, ed, 2000. *Kraftwerk: Gruppe Fragant*. Klagenfurt.

KLUCKNER, A., 2013. *Anfrage per E-Mail bzgl. Übergangsgestaltung bei Stollen unterschiedlicher Durchmesser*. Graz.

LEON, A., 2013-last update, Illinois Transient Modell Description. Available: <http://web.engr.oregonstate.edu/~leon/ITM.htm> [03/2014, 22014].

LEON, A. and OBERG, N., 2013. *Illinois Transient Model, Two-Equation Model V. 1.3.1, User's Manual*. Oregon State University, Corvallis.

NACKLER, K., 2014. *Telefongespräch am 10.02.2014, Freispiegelstollen KH-Zirknitz - Speicher Wurtenalm*.

ÖNORM M 7103, 2011. *Begriffe der Energiewirtschaft- Wasserkraftwirtschaft*.

PÖYRY ENERGY GMBH, 2008. *VEÖ Wasserkraftpotenzialstudie Österreich, Endbericht*.

RICHTER, W., SCHNEIDER, J., ZENZ, G. and INNERHOFER, G., 2013. Hybrid Modelling and Developing of a long Upper Chamber in a Surge Tank. In: THE INTERNATIONAL JOURNAL ON HYDROPOWER AND DAMS, ed, *Hydro 2013: Promoting the Versatile Role of Hydro*. 1 edn. PO Box 285 Wallington, Surrey SM6 6AN, UK: Aqua-Media International.

SEEBER, G., 1999. *Druckstollen und Druckschächte; Bemessung - Konstruktion - Ausführung*. Stuttgart [u.a.]: Enke im Georg Thieme Verl.

STROBL, T. and ZUNIC, F., 2006. *Wasserbau; Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ, INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT, ed, 2012. *Konstruktiver Wasserbau Grundlagen, Lernbehelf*. Stremayrgasse 10 / II, 8010Graz.

VORARLBERGER ILLWERKE AG, 2006. Mit allen Mitteln durchs Gebirge.
Kopswerk II.

WECHTITSCH, R., 2013. *Wasser-Luft Strömungen in Stollenspeicher, Master Projekt.* Graz: Technische Universität Graz, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.

WIKIPEDIA, 2013-last update, Kraftwerksmanagement. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerksmanagement> [04/2014, 2014].

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einteilung der Wasserkraftanlagen anhand der Nutzfallhöhe (Strobl, Zunic 2006, S. 309)	18
Abb. 2: Beispielhaftes Lastprofil der Stromerzeugung in Österreich (billig-strom.de 2014)	18
Abb. 3: Schemadarstellung einer Hochdruckwasserkraftanlage in den Alpen .	19
Abb. 4: Ziel der Masterarbeit	21
Abb. 5: a) Bogenstaumauer des Speichers Kölnbrein (Verbund 2014), b) Schüttdamm des Wasserkraftwerks Glendoe, Schottland	23
Abb. 6: Typische Abflusscharakteristik eines Gletscherflusses (Hydrographischer Dienst Tirol 2014)	24
Abb. 7: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2011)	24
Abb. 8: a) Hängelot der Paalsperre des KW Bodendorf, b) automatische Sickerwassermessung	26
Abb. 9: Zuordnung der Nachweisgrößen zu den beiden hydrologischen Lastfällen BHQ und SHQ (Gutknecht, Drobir 2009, S. II-10)	27
Abb. 10: a) Überfall mit steuerbaren Verschlüssen der Paalsperre, b) Überfall der Hochwasserentlastung des WKW Glendoe	27
Abb. 11: Grundablass (luftseitig) des WKW Glendoe mit offenem Verschlussorgan	28
Abb. 12: Schematische Darstellung von Speicherräumen und –Inhalten (ÖNORM M 7103 2011)	29
Abb. 13: Entnahmebauwerk des WKW Glendoe	30
Abb. 14: a) Schemadarstellung eines beengten Talquerschnitts, b) Animation Tagesspeicher Toinig WKW Obere Isel (Der Virgentaler Weg 2013)	31
Abb. 15: künstliche Spiralströmung zur Geschiebeabweisung, (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 150)	34
Abb. 16: Sohlentnahme am Intake 1 des Wasserkraftwerks Glendoe	35

Abb. 17: Entsander- Längsschnitt der untersuchten Anlage (ILF Beratende Ingenieure 2012).....	36
Abb. 18: a) Elisza Jane Gripper-TBM für den TWW des WKW Glendoe (Schadereit 2006), b) Gripperplatte der TBM (Schadereit 2006)	39
Abb. 19: Das Wasserschloss als Trennung der hydraulischen Systeme eines TWW	40
Abb. 20: Abschalten der Turbine führt zur Füllung des Wasserschlosses	42
Abb. 21: Anfahren der Turbine führt zur Entleerung der Unterkammer des Wasserschlosses	43
Abb. 22: a) Sicherheitsabsperriklappe vor der Montage (b-teck GmbH 2014), b) elektrisch angetriebene (links) und schnellschließende Fallgewichtsdrosselklappe (rechts) (Giesecke and Mosonyi 2005, S. 426)	44
Abb. 23: Einsatz beider Ausbruchverfahren beim Bau des Kopswerks II, links Raise Boring, rechts Alimak- Vortrieb (Vorarlberger Illwerke AG 2006).....	45
Abb. 24: Mögliche Ausführungsvariante: aufgeständerte Druckrohrleitung im Sohlstollen eines HDWKW	46
Abb. 25: Schnitt Krafthaus Mitteldorf, WKW Obere Isel (Dr. Krauss ZT GmbH 2012).....	47
Abb. 26: Grundriss Krafthaus Mitteldorf, WKW Obere Isel (Dr. Krauss ZT GmbH 2012).....	47
Abb. 27: Einsatzbereiche der unterschiedlichen hydraulischen Maschinen in Abhängigkeit der Fallhöhe und des Durchflusses (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 512).....	48
Abb. 28: Typische Wirkungsgradverläufe von ausgewählten Turbinentypen, Pelton orange und Francis- Turbinen grün dargestellt (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 611).....	49
Abb. 29: Animation des Ausgleichsbecken im Bereich des Krafthauses Mitteldorf, WKW Obere Isel, (Der Virgentaler Weg 2013).....	52
Abb. 30: Druck- und Energielinie bei Druckabfluss (Technische Universität Graz, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 2012, S. 1.4-1.5)	54

Abb. 31: Gleichförmiger Freispiegelabfluss (Technische Universität Graz, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft 2012, S. 1.4-1.5)	54
Abb. 32: Schematische Übersicht des KW Zirknitz (KELAG-Kärntner Elektrizitäts-Aktiengesellschaft 2000)	55
Abb. 33: Füll- und Stauschwall als Übergang zwischen Teil- und Vollfüllung (Geipert 1982, S. 42)	56
Abb. 34: "Blow Out" an der Wasserfassung des WKW Küblis/ Schweiz während des Testbetriebs (Arnason, Lardelli 2012)	57
Abb. 35: Schematischer Längsschnitt des teilgefüllten TWW der untersuchten Anlage	60
Abb. 36: Kriterien für die Wahl einer geeigneten Berechnungssoftware für die numerische Modellierung von Stollenspeicher	62
Abb. 37: oben: Das vereinfachte Modell für die Fehleranalyse, unten: Detailansicht des untersuchten Stollens	64
Abb. 38: Probleme mit der Massenkonservativität des FSF Elements	65
Abb. 39: oben: Ausgangssituation der Prüfsimulation für die „Wetting“-Problematik, unten: die unveränderte Abweichung des Durchflusses	66
Abb. 40: Durchfluss im Querschnitt 2 bei unterschiedlicher Sohlneigung (oben) und der daraus resultierenden Froude Zahl (unten)	67
Abb. 41: Durchfluss im Querschnitt 2 des Tunnel 1/2 in Abhängigkeit der Höhenlage des Modells	68
Abb. 42: Bewertung der Tauglichkeit von WANDA 4.2 für die Berechnung von Fließvorgängen im Stollenspeicher	70
Abb. 43: Bewertung der Tauglichkeit von ITM für die hydraulische Berechnung von Fließvorgängen im Stollenspeicher	72
Abb. 44: Die Shape Pallets (links) und das Property Window eines Pipe-Elements (rechts)- zwei wesentliche Bestandteile des User Interface	74
Abb. 45: Symbol FSF Waterhammer Pipe	75
Abb. 46: Symbol Reservoir	77

Abb. 47: Symbol Resistance	77
Abb. 48: Symbol Shaft (Deltares 2013, S. 389).....	78
Abb. 49: Modellierung eines Wehrs mit vor- und nachgeschaltetem Surge Tower	79
Abb. 50: Darstellung der Modellabgrenzung im OW (ILF Beratende Ingenieure 2012).....	81
Abb. 51 Darstellung der Modellabgrenzung im Unterwasser	81
Abb. 52: Action Table der Komponente Reservoir	83
Abb. 53: Höhengsituation der Endschwelle des Entsanders (ILF Beratende Ingenieure 2012).....	83
Abb. 54: Modellierung des Einlaufbeckens mittels der Komponente FSF Pipe	84
Abb. 55: Eintrittsverlust bei Stolleneinläufen (Bollrich, Martin 1992, S. 157)....	85
Abb. 56: Situation Steigstollen und benachbarter Hochpunkt 1 mit Be- und Entlüftungsmöglichkeit	86
Abb. 57: Schemadarstellung des Speicherstollen der untersuchten Anlage	87
Abb. 58: Modellierungsmöglichkeiten der Stollenabschnitte mit unterschiedlichen Durchmessern.....	87
Abb. 59: Situation Schrägstollen und Wasserschloss	88
Abb. 60: Modellbildung des Bereichs rundum des Wasserschlosses in WANDA 3.72	89
Abb. 61: Spezifische Daten des Systems 80	92
Abb. 62: Lage der EL im HP 2 bei LF Anfahren 180, System 80, $Q= 12 \text{ m}^3/\text{s}$..	95
Abb. 63: Schematischer Längsschnitt des teilgefüllten Triebwasserwegs der untersuchten Anlage	121

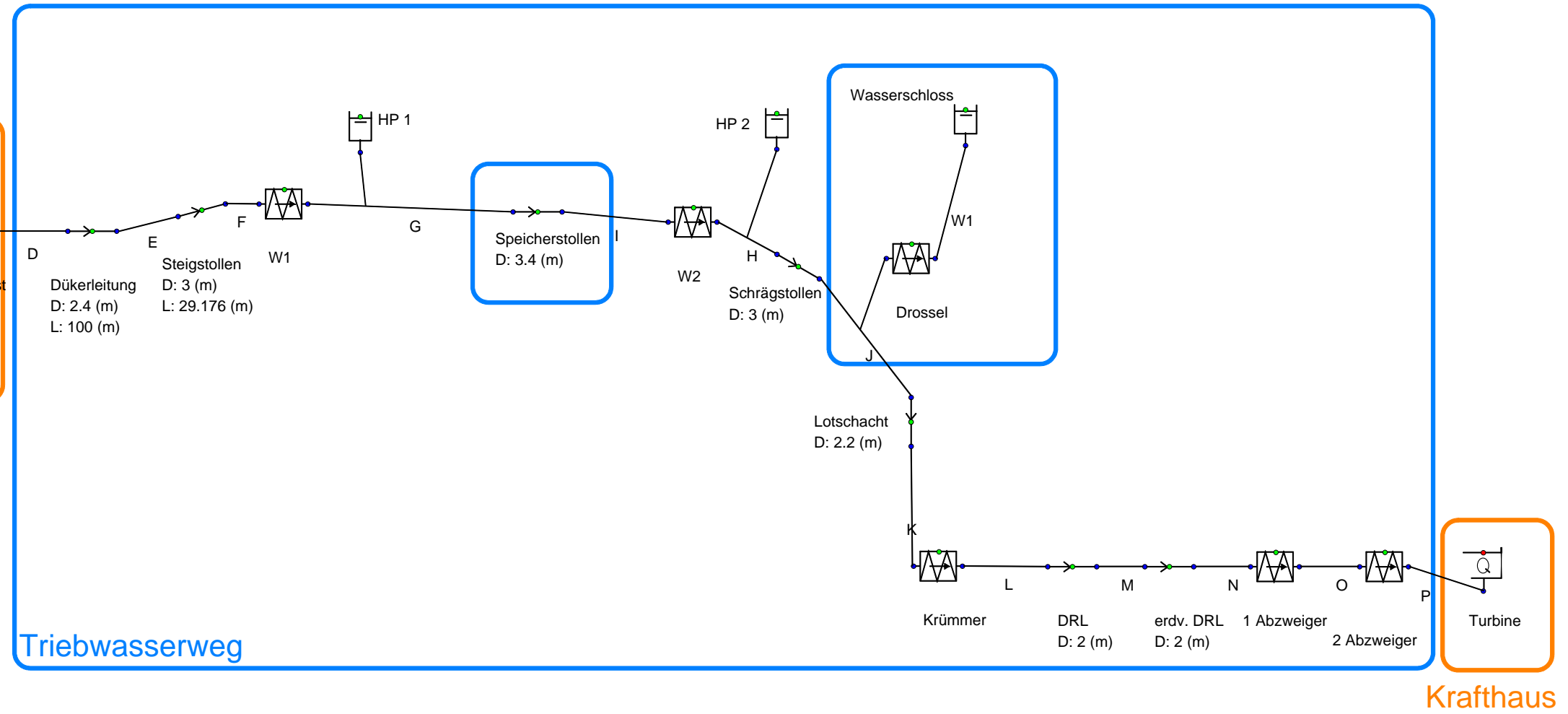
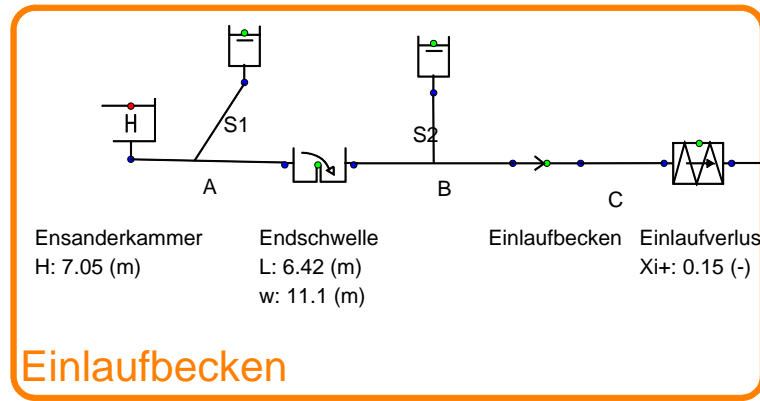
Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Gegenüberstellung des Technisch-Wirtschaftlichen Potenzials und des ausgebauten Potenzials am Inn und dessen Zubringern (Inn SB) (Pöyry Energy GmbH 2008).....	17
Diagramm 2: Linearer Zusammenhang zwischen max. Durchfluss und min. Anfahrzeit.....	91
Diagramm 3: LF Anfahren 180 und LF Start Stopp für ein $Q_{max} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$	93
Diagramm 4: Zeitlicher Verlauf der Wasserschlossschwingung und des Turbinendurchflusses für LF Anfahren 180 und $Q = 11 \text{ m}^3/\text{s}$	96
Diagramm 5: EL im Speicherstollen zum Zeitpunkt $t = 80 \text{ s}$	97
Diagramm 6: Abstand der EL zur Stollenfirste im HP 2, abhängig vom Durchfluss	97
Diagramm 7: Zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im HP 2, abhängig vom Durchfluss	98
Diagramm 8: Zeitlicher Abflussgeschwindigkeitsverlauf im HP 2, abhängig vom Durchfluss	98
Diagramm 9: Abstand der EL zur Stollenfirste im HP 2, abhängig von der Querschnittsfläche im Wasserschloss bei $Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$	99
Diagramm 10: Zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im Wasserschloss, abhängig von der Querschnittsfläche des Wasserschlosses	100
Diagramm 11: Fließverluste im Speicherstollen ($D = 3,4 \text{ m}$) bei stationärem Betrieb, abhängig von Durchfluss und der Rauigkeit	101
Diagramm 12: Zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im HP 2, abhängig von der Wandrauigkeit	102
Diagramm 13: Zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im HP 2, abhängig vom Stollendurchmesser und dem dazugehörigen maximalen Durchfluss	103
Diagramm 14: Energiehöhe und die jeweilige minimale Überdeckung der Stollenfirste im HP 2, abhängig vom Durchfluss	104

Diagramm 15: Abstand der EL von der Stollenfirste im HP 2 während des ersten und zweiten Abschwingvorgangs beim Anfahren der Turbine, abhängig von der Anfahrzeit	105
Diagramm 16: Zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im HP 2 beim LF Anfahren, abhängig von der Anfahrzeit	105
Diagramm 17: Zusammenhang zwischen dem Abstand der EL zur Stollenfirste im HP2 und der Sohlneigung des Speicherstollens, $Q= 12 \text{ m}^3/\text{s}$	107
Diagramm 18: LF Start Stopp, zeitlicher Verlauf der Energiehöhe und Zufluss im OW	108
Diagramm 19: LF Start Stopp, Energiehöhe im HP 2 und Turbinendurchfluss	108
Diagramm 20: Druckstoßbelastung des Speicherstollens des Systems 80 bei LF Start Stopp	109
Diagramm 21: LF Start Stopp, System 80 mit Wasserschlossquerschnittsfläche $A=200 \text{ m}^2$, zeitlicher Verlauf der Energiehöhe und Zufluss im OW	110
Diagramm 22: LF Start Stopp, System 80 mit Wasserschlossquerschnittsfläche $A=200 \text{ m}^2$, zeitlicher Verlauf der Energiehöhe im Wasserschloss und Turbinendurchfluss	110
Diagramm 23: Druckstoßbelastung des Speicherstollens des Systems 80 mit Wasserschlossquerschnittsfläche von 200 m^2 bei LF Start Stopp	111
Diagramm 24: LF Start Stopp, System 90, Durchfluss des fiktiven Überfalls im HP1 und Energiehöhe und Zufluss im Einlaufbecken	112
Diagramm 25: Druckstoßbelastung des Speicherstollens des Systems 90 bei LF Start Stopp.....	112
Diagramm 26: LF Start Stopp, System 100, Schließcharakteristik und Energiehöhen des Verschlussorgans im Einlaufbereich	113
Diagramm 27: LF Start Stopp, System 100, Energiehöhe im HP 2 und Turbinendurchfluss	113
Diagramm 28: Keine Druckstoßbelastung des Speicherstollens des Systems 100 bei LF Start Stopp.....	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis.....	11
Tabelle 2: Möglicher Entnahmeabfluss und Vor- und Nachteile der Entnahmekategorien in Abhängigkeit der Fließgewässerneigung (Giesecke, Mosonyi 2005, S. 149).....	33
Tabelle 3: Technische Daten der untersuchten Anlage.....	58
Tabelle 4: Wandrauigkeit im Einlaufbecken (Bollrich, Martin 1992)	85
Tabelle 5: Wandrauigkeit des Triebwasserwegs mit Spritzbetonauskleidung (Bollrich, Martin 1992).....	86
Tabelle 6: Schwingungsdauer, abhängig vom Stollendurchmesser	103



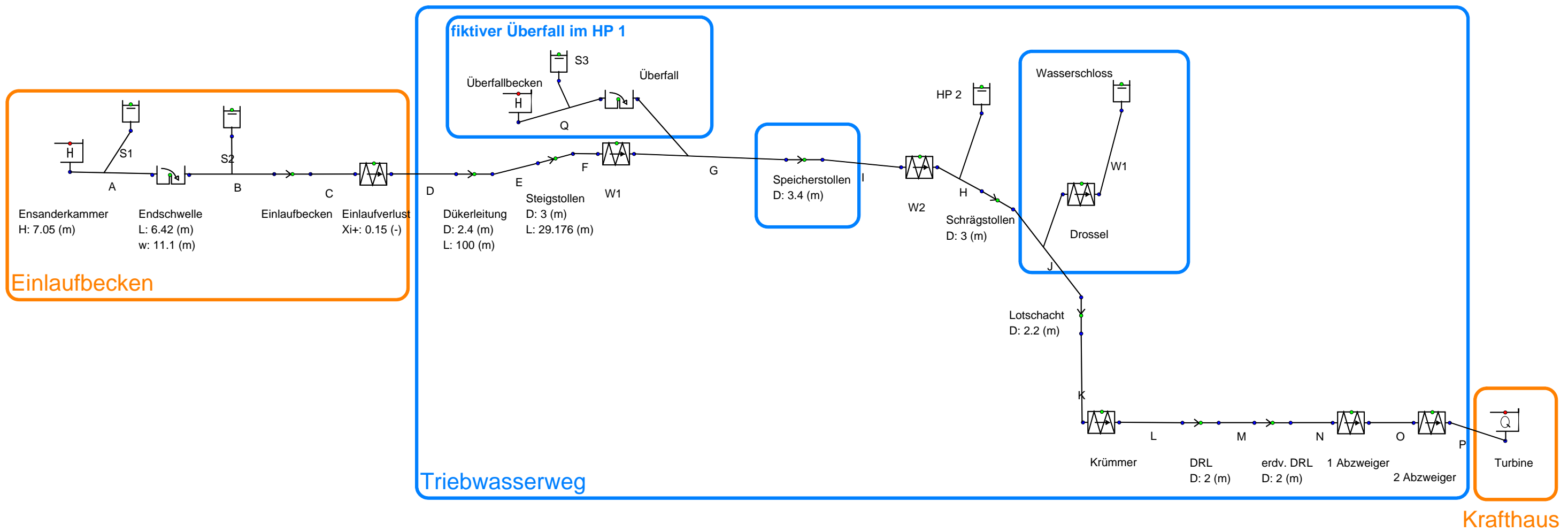
Anhang 1: Modellierung der untersuchten Wasserkraftanlage

System 80- Standard Modell

Wechtitsch Richard

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz

Mai 2014



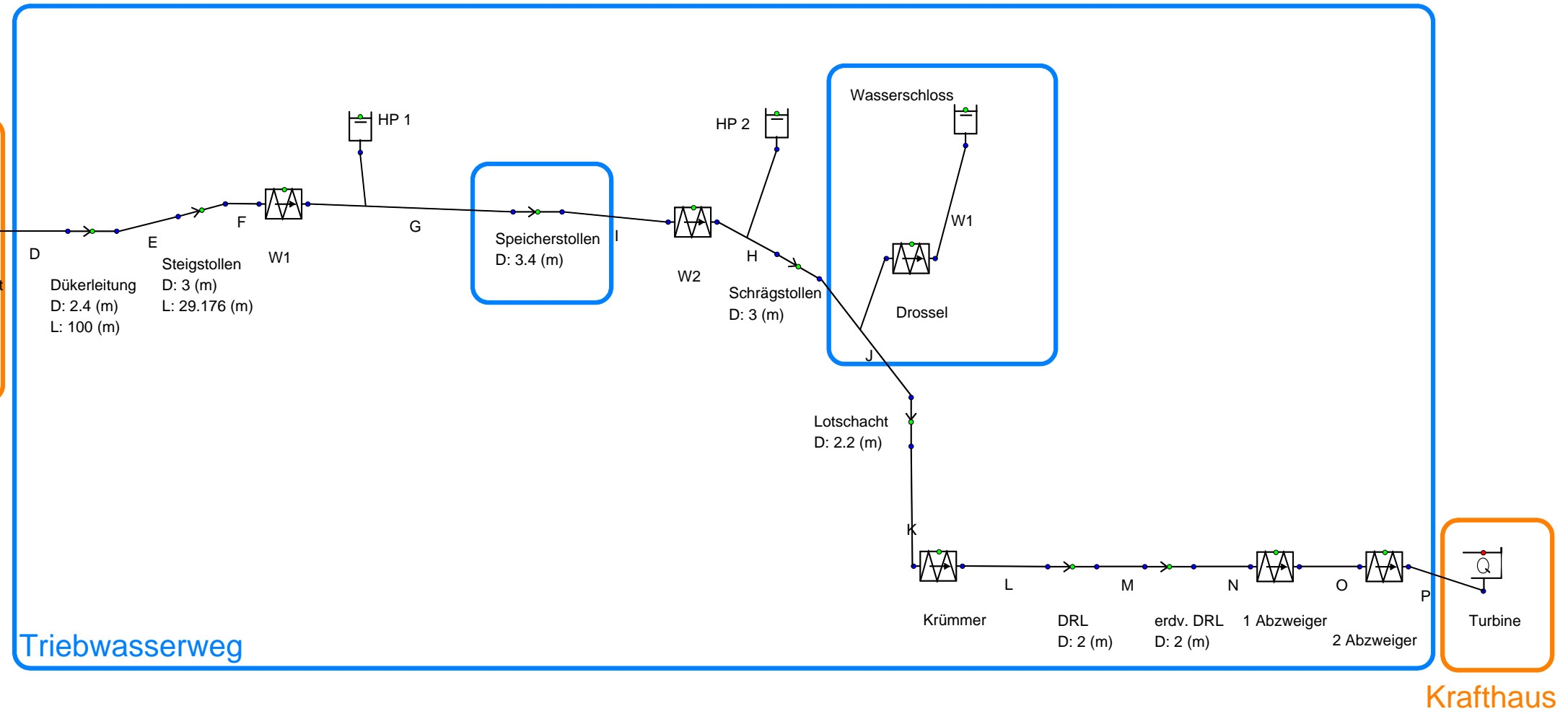
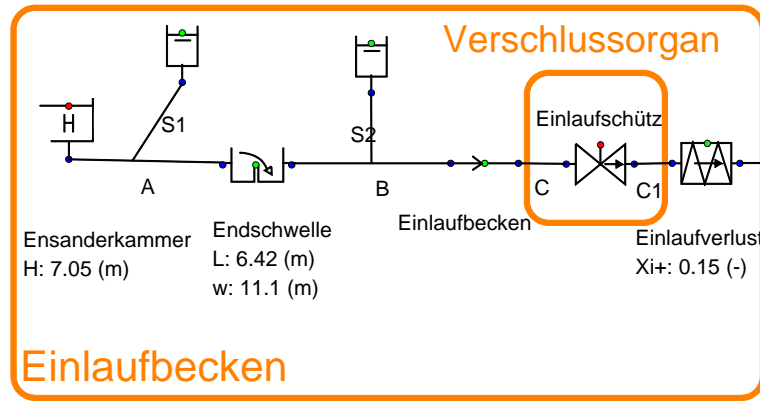
Anhang 2: Modellierung der untersuchten Wasserkraftanlage

System 90- Modell mit fiktivem Überfall im Bereich des HP 1

Wechtitsch Richard

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz

Mai 2014



Anhang 3: Modellierung der untersuchten Wasserkraftanlage

System 100- Modell mit Verschlussorgan im Einlaufbecken

Wechtitsch Richard

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz

Mai 2014