

# **Pumpspeicherwerk Forbach – Neue Unterstufe**

**Antragsunterlagen zum  
Planfeststellungsverfahren**

**Antragsteil B.VIII.1  
Hydraulische Nachweise**

**Stand: 30.11.2018**



# Pumpspeicherwerk Forbach – Neue Unterstufe

Antragsunterlagen zum Planfeststellungsverfahren

## Antragsteil B.VIII.1 Hydraulische Nachweise

Unterschriftenblatt:

Antragstellerin:

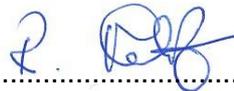
EnBW AG  
Schelmenwasenstraße 15  
70567 Stuttgart



.....  
(i. A. U. Gommel)

Stuttgart, den 30.11.2018

Bearbeiter/Verfasser:



.....  
(R. Achatz)

München, den 30.11.2018

# Pumpspeicherwerk Forbach – Neue Unterstufe

Antragsunterlagen zum Planfeststellungsverfahren

## Antragsteil B.VIII.1 Hydraulische Nachweise

Dokumentenprüfblatt:

Rev.	Art der Änderung	erstellt (Datum)	Autor	geprüft, freig., Name
0	Ersterstellung	25.01.2018	IAF	geprüft: Achatz
1	Überarbeitung zur Vollständigkeitsprüfung	30.11.2018	IAF	geprüft: Achatz freig.: Gommel
2				

---

**Projekt:** Pumpspeicherwerk Forbach

**Genehmigungsplanung Neue Unterstufe  
B.VIII.1  
Hydraulische Nachweise  
Kavernenwasserspeicher, Wasserweg  
Schwarzenbach- und Murgwerk**

**Auftraggeber:** EnBW Energie Baden-Württemberg AG  
Schelmenwasenstraße 15  
70567 Stuttgart

**Auftragnehmer:** Ingenieurarbeitsgemeinschaft PSW Forbach  
bestehend aus:  
*Lahmeyer Hydroprojekt GmbH  
Geoconsult ZT GmbH  
Lahmeyer International GmbH*

c/o Lahmeyer Hydroprojekt GmbH  
Elsenheimerstraße 11  
80687 München

**Projektleitung:** Dipl.-Ing. Robert Achatz

**Bearbeitung:** Dipl.-Ing. Christoph Grass

München, den 16.11.2017

Ing.-ARGE PSW Forbach



Robert Achatz  
Projektleiter



Christoph Grass  
Projektbearbeiter

## Inhaltsverzeichnis

1. Hydraulik des Kavernenwasserspeichers.....	6
1.1 Bemessung der Sohlagen und Querschnittsdimensionen des Kavernenwasserspeichers.....	7
1.2 Geometrie der Ein-/Auslaufdiffusoren Schwarzenbach- und Murgwerk.....	9
1.3 Einlaufüberdeckungshöhe Pumpeneinlauf.....	10
1.4 Geschiebefallen im Kavernenwasserspeicher.....	11
1.5 Wellenbildung im Kavernenwasserspeicher.....	12
1.6 Aus- bzw. Einlaufbauwerk in den Kavernenwasserspeicher.....	12
1.7 Mehrdimensionale Modellierung des Kavernenwasserspeichers.....	14
2. Hydraulik des Wasserwegs Schwarzenbachwerk.....	15
2.1 Ermittlung der Leitungsdurchmesser der Druckrohrleitung und des Unterwasserstollens Schwarzenbachwerk.....	15
2.2 Hydraulische Verlustberechnung.....	17
2.3 Anlaufzeit.....	22
2.4 Hydraulische Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Wasserschlosses.....	23
2.4.1 Lastfälle.....	25
2.4.1.1 Lastfälle A: Lastannahme Turbine.....	25
2.4.1.2 Lastfälle B: Lastabwurf Turbine.....	25
2.4.1.3 Lastfälle C: Lastannahme und Lastabwurf Pumpe.....	26
2.4.1.4 Lastfälle D: Umschalten von Turbinenbetrieb auf Pumpenbetrieb.....	26
2.4.1.5 Lastfälle E: Umschalten von Pumpbetrieb auf Turbinenbetrieb.....	27
2.4.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Lastfalluntersuchung und Betriebseinschränkungen.....	28
2.5 Druckstoßuntersuchung.....	28
3. HYDRAULIK DES WASSERWEGS MURGWERK.....	30
3.1 Ermittlung der Leitungsdurchmesser der Druckrohrleitung und des Unterwasserstollens Murgwerk.....	30
3.2 Hydraulische Verlustberechnung.....	31
3.3 Anlaufzeit.....	36
3.4 Hydraulische Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Wasserschlosses.....	37
3.4.1 Lastfälle.....	38
3.4.1.1 Lastfälle A: Lastannahme Turbine (Abbildung 14).....	38
3.4.1.2 Lastfälle B: Lastabwurf Turbine (Abbildung 15).....	41
3.4.1.3 Weitergehende Untersuchungen.....	41
3.5 Druckstoßuntersuchung.....	43

4. ANHANG .....	44
4.1 A1 WASSERWEG SCHWARZBACHWERK, LASTFÄLLE.....	44
4.1.1 Lastfälle A: Lastannahme Turbine .....	44
4.1.2 Lastfälle B: Lastannahme und Lastabwurf Turbine .....	46
4.1.3 Lastfälle C: Lastannahme und Lastabwurf Pumpe .....	48
4.1.4 Lastfälle D: Umschalten von Turbinenbetrieb auf Pumpenbetrieb.....	50
4.1.5 Lastfälle E: Umschalten von Pumpbetrieb auf Turbinenbetrieb .....	52

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausgleichsbecken Forbach, Kavernenwasserspeicher und Kraftwerkskaverne	6
Abbildung 2: Regelquerschnitt durch den Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers (Höhe Variabel)	8
Abbildung 3: Längsschnitt im Bemessungsfall durch den Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers vom Einlauf am Ausgleichsbecken (rechts) bis zum Zulaufbauwerk (links)	8
Abbildung 4: Regelquerschnitt durch den Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers mit Quergefälle und Totraumgräben	9
Abbildung 5: Zulaufbauwerk und Unterwasserstollen Murg- und Schwarzenbachwerk	10
Abbildung 6: Geschiebefallen im Zulaufbauwerk mit Bohlenabdeckungen	12
Abbildung 7: Abhängigkeit von Wasserspiegel und Durchfluss über die Zeit	13
Abbildung 8: Übergang des Einlaufsturms an der Schwarzenbachtalsperre in den Entnahmestollen mit Rechen, angeordnet in einem Trog	18
Abbildung 9: Wasserweg des Schwarzenbachwerk wie in Hammer modelliert	23
Abbildung 10: Wasserschloss Schwarzenbachwerk, Kopf (links) und Fuß (rechts), mit den Höhenangaben	24
Abbildung 11: Verlauf des Drucks und des Durchflusses für die beiden untersuchten Lastfälle	29
Abbildung 12: Schematischer Wasserweg des Murgwerk wie in HAMMER modelliert	37
Abbildung 13: Wasserschloss MURGWERK, Kopf (links) und Fuß (rechts), mit den Höhenangaben	38
Abbildung 14: Wasserspiegelschwankungen im Wasserschloss Murgwerk während der Anfahrlastfälle	40
Abbildung 15: Wasserspiegelschwankungen im Wasserschloss Murgwerk während der Anfahrlastfälle	42
Abbildung 16: Verlauf des Drucks und des Durchflusses für die beiden untersuchten Lastfälle	43
Abbildung 17: Lastfälle A: Lastabwurf Turbine	45
Abbildung 18: Lastfälle B: Lastabwurf Turbine	47
Abbildung 19: Lastfälle C: Lastabwurf Pumpe	49
Abbildung 20: Lastfälle D: Umschalten von Turbinenbetrieb auf Pumpbetrieb	51
Abbildung 21: Lastfälle E: Umschalten von Pumpbetrieb auf Turbinenbetrieb	53

## Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Einlaufüberdeckungshöhe Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk	11
Tabelle 2: Mindestbreite des Rechens	13
Tabelle 3: Bestimmung der Durchmesser des Druckschachts und -stollens	16
Tabelle 4: Äquivalente Rauigkeit für Stahl- und Betonauskleidung	19
Tabelle 5: Hydraulische Energiehöhenverluste für Turbinenbetrieb	19
Tabelle 6: Hydraulische Verluste für den Turbinenbetrieb	20
Tabelle 7: Hydraulische Verluste für den Pumpbetrieb	21
Tabelle 8: Anlaufzeit des Wasserwegs	23
Tabelle 9: minimale Wasserspiegel bei Lastannahmen	25
Tabelle 10: Maximale Wasserspiegel nach Lastabwürfen	26
Tabelle 11: Minimale und Maximale Wasserspiegel nach Lastannahmen und Lastabwürfen	26
Tabelle 12: Minimale und Maximale Wasserspiegel nach Umschalten von Turbinenbetrieb auf Pumpbetrieb	27
Tabelle 13: Minimale und Maximale Wasserspiegel nach Umschalten von Pumpbetrieb auf Turbinenbetrieb	27
Tabelle 14: Bestimmung der Durchmesser des Druckschachts und -stollens	31
Tabelle 15: Äquivalente Rauigkeit für Stahl- und Betonauskleidung	33
Tabelle 16: Hydraulische Energiehöhenverluste für Turbinenbetrieb	33
Tabelle 17: Hydraulische Verluste für den Betrieb der großen Maschine	34
Tabelle 18: Hydraulische Verluste für den Betrieb der kleinen Maschine	35
Tabelle 19: Anlaufzeit des Wasserwegs	36

**Anlagenverzeichnis:**

Anlage A1 Wasserweg Schwarzenbachwerk, Lastfälle

**ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN**

m ü. NN	Meter über Normalnull
NPSH	Net Positive Suction Head
PSW	Pumpspeicherwerk
MW	Murgwerk
SW	Schwarzenbachwerk
WS	Wasserschloss

**Quellenverzeichnis:**

- [Q1] Huval, 1959: American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division: Hydraulic Design of Unlined Rock Tunnels
- [Q2] Bollrich, 2006: Technische Hydromechanik 1
- [Q3] Mattimoe, 1964: American Society of Civil Engineers, Journal of the Power Division: Rock Trap Experience in Unlined Tunnels
- [Q4] Gordon, 1970: Vortices at Intakes
- [Q5] Fahlbusch, 1987: Determining Diameters of Power Tunnels and Pressure Shafts [Q6] Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN), 2009: TransmissionCode 2007
- [Q7] Zeichnung b08\_004
- [Q8] Heinemann, 2003: Hydraulik für Bauingenieure
- [Q9] Zeichnung b04\_001

### 1. Hydraulik des Kavernenwasserspeichers

Das Unterbecken der Unterstufe umfasst das bestehende Ausgleichsbecken Forbach, und den untertägigen Kavernenwasserspeicher, dessen Neuplanung Teil der vorliegenden Planung ist.

Der Kavernenwasserspeicher umfasst den Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers des Kavernenwasserspeichers und sechs Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers (Abbildung 1). Die Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers haben einen gedrungenen Querschnitt und stellen den größten Teil des Speichervolumens bereit, wohingegen der Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers mit seinem eher schlanken Querschnitt das bestehende Ausgleichsbecken und die Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers mit den Einläufen der Kraftwerkskaverne verbindet. Aus hydraulischer Sicht besonders hervorzuheben ist noch das „Zulaufbauwerk“, gemeint damit sind die ca. letzten 30 m des Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers, in welche die Unterwasserstollen von Murg- und Schwarzenbachwerk einmünden. Befüllung und Entleerung des Unterbeckens geschieht über die Unterwasserstollen des Murg- und Schwarzenbachwerk, welche die Maschinen mit dem Zulaufbauwerk verbinden.

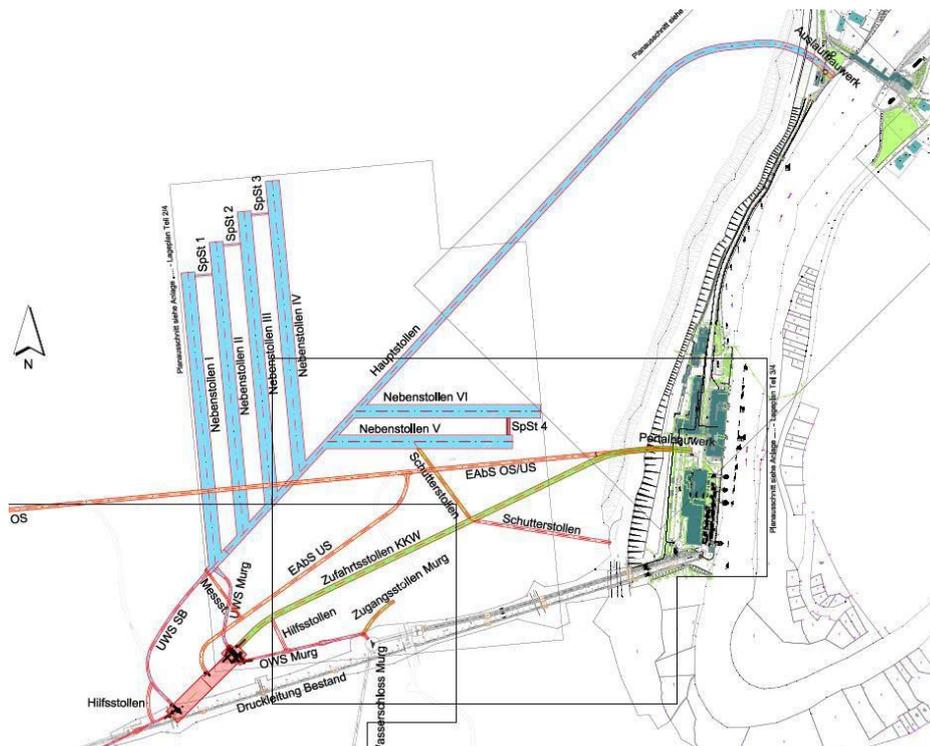


Abbildung 1: Ausgleichsbecken Forbach, Kavernenwasserspeicher und Kraftwerkskaverne

Die beiden Becken sollen im Regelbetrieb in Parallelschaltung nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren betrieben werden. Durch den Fluss zwischen den beiden Komponenten Kavernenwasserspeicher und Ausgleichsbecken beim Befüllen und Entleeren ergibt sich eine Schiefstellung des Wasserspiegels, welcher im Pumpbetrieb ein Gefälle zur Pumpe aufweist und im Turbinenbetrieb fällt der Wasserspiegel zum Ausgleichsbecken hin.

## 1.1 Bemessung der Sohlagen und Querschnittsdimensionen des Kavernenwasserspeichers

Eine genauere Betrachtung der Wasserspiegelschiefstellung wird hauptsächlich beim Entleeren wichtig, wenn sich das Speichervolumen dem Leerstand annähert. Da durch den tiefen Wasserstand im kombinierten Speicher der hydraulische Radius im Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers am ungünstigsten ist, kommt es in dieser Betriebsweise zum größten Wasserspiegelgefälle und damit zur größten Absenkung des Wasserspiegels im Zulaufbauwerk. Zusammen mit dem einzuhaltenen NPSH im Pumpbetrieb, bestimmt diese Betriebsweise die erforderlichen Sohlbreiten und die Sohlage des Stollensystems.

Die Ermittlung der Sohlagen im Kavernenwasserspeicher erfolgte zunächst in Form einer Näherung mit der Manning Gleichung (die aufgrund des Rückstaueffektes innerhalb des Speicherbauwerks nur beschränkt anwendbar ist) und wurden dann mit dem 1D Modell MIKE 11<sup>1</sup> (M11) bestätigt. Es sei angemerkt, dass das komplexe 2D/3D Fließverhalten des Prototyps durch eine 1D Berechnung mit M11 nur angenähert werden kann. Ziel der durchgeführten Bemessung ist es, eine möglichst gute Näherung zu erlangen, die dann in weiteren Versuchen in einem höherdimensionalen mathematischen, kalibrierten oder physikalischen Modell zu überprüfen und zu bestätigen ist. Gegebenenfalls sind Anpassungen vorzuschlagen (siehe separaten Abschnitt zu den erforderliche Untersuchungen, unten). Diese Untersuchungen werden von der TU Graz gegenwärtig ausgeführt. Erste Zwischenergebnisse wurden vorgelegt und bestätigen den Entwurf. Mit den endgültigen Ergebnissen ist zum Ende des Jahres 2017/Anfang 2018 zu rechnen.

Die hydraulische Bemessung der Querschnittsprofile (i.e. Gefälle und Sohlbreite) mit M11 erfolgte in den folgenden Schritten:

- I. Bestimmung des Gefälles im Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers: Das Gefälle wurde so bemessen, dass der Pumpenzufluss von  $Q = 17 \text{ m}^3/\text{s}$  (inklusive Sicherheitszuschlag) während des gesamten Absenkens des Wasserspiegels auf 295,5 m ü. NN der Pumpe zugeführt werden kann, ohne dass der Zufluss abreißt wenn der Wasserspiegel sich dem Absenkziel nähert und der hydraulische Radius in der Folge schlechter wird. Risse der Zufluss ab diesem Lastfall ab, so würde die Pumpe nicht mit voller Leistung bis zum Absenkziel gefahren werden können und der Betrieb müsste durch eine Betriebseinschränkung limitiert werden.

Neben den geometrischen Größen wie in Abbildung 2 für den Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers exemplarisch dargestellt, wurde die Rauigkeit des Ausbruchs mit  $M = 29 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  abgeschätzt, dies ist am raueren Ende des realistischen Spektrums und durch Publikationen [Q1] für das vorliegende Gestein gut belegt. Dieser Wert ist ähnlich der zu erwartenden Rauigkeit der Felsoberfläche von ca. 400 mm. Bei Erreichen des Absenkziels im Speicher (295,5 m ü. NN) ergibt sich aus der vorliegenden Bemessung unter den angeführten Randbedingungen eine Wasserspiegelhöhe im Zulaufbauwerk von 294,45 m ü. NN, wie in Abbildung 3 gezeigt. Der Längsschnitt durch den Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers vom Einlauf am Ausgleichsbecken (rechts) bis zum Zulaufbauwerk (links) zeigt den Bemessungsfall, wobei die vertikalen Striche die Lage der Nebenstollen des Kavernenwasserspei-

---

<sup>1</sup> M11 ist ein kommerzielles numerisches, hydrodynamisches eindimensionales Modell, was von „Danish Hydraulik Institute“ entwickelt wurde und vertrieben wird.

chers repräsentieren und die roten Linien repräsentieren  $Q$  im Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers (rechte vertikale Achse). Der Wasserstand im Ausgleichsbecken ist 295,5 m ü. NN und im Zulaufbauwerk ca. 294,45 m ü. NN (linke vertikale Achse).

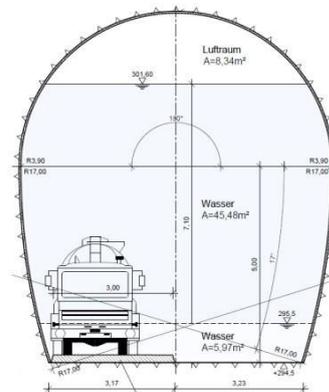


Abbildung 2: Regelquerschnitt durch den Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers (Höhe Variabel)

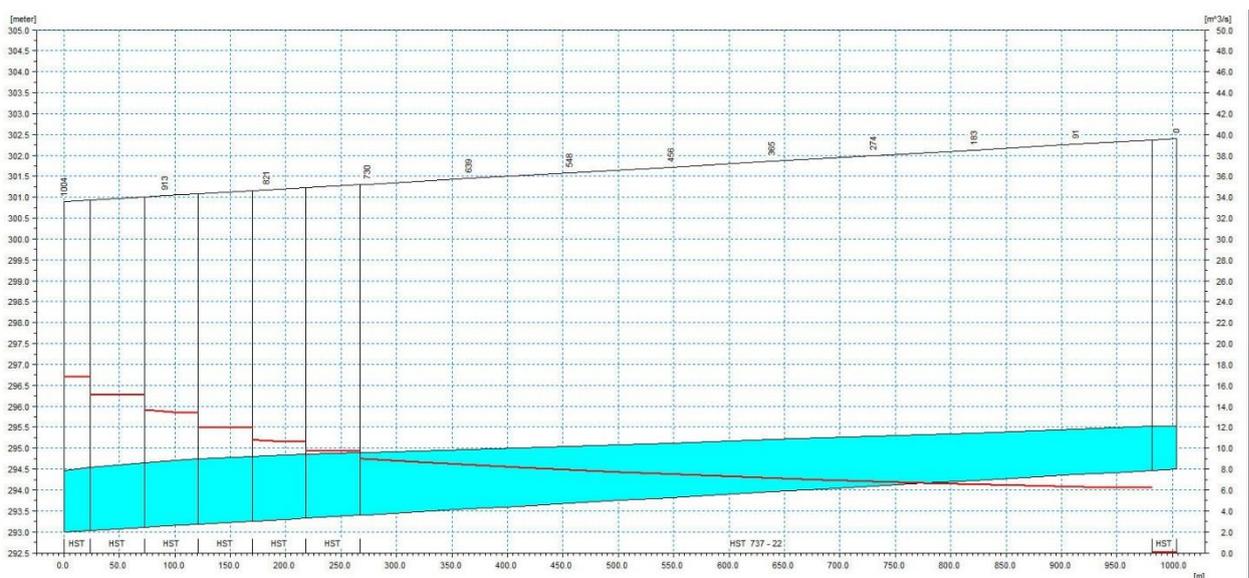
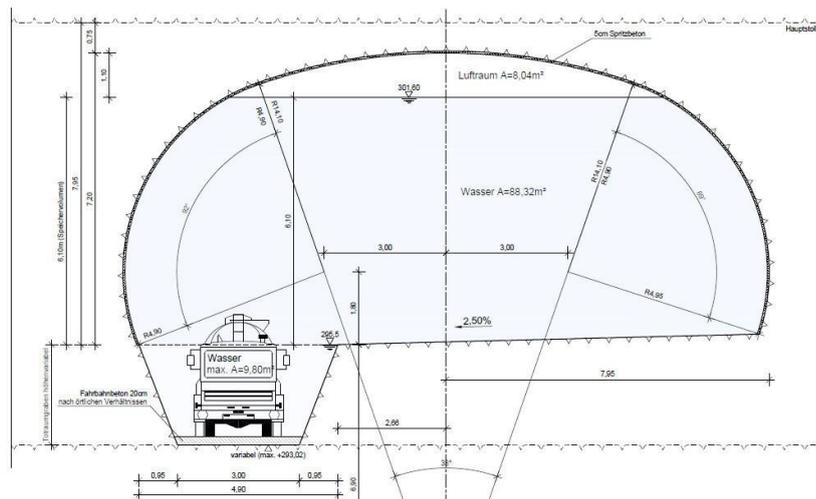


Abbildung 3: Längsschnitt im Bemessungsfall durch den Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers vom Einlauf am Ausgleichsbecken (rechts) bis zum Zulaufbauwerk (links)

- II. Festlegung der Laufradhöhe: die Höhe des Laufrads bestimmt sich durch Subtraktion des NPSH ca. 34 m vom tiefsten erreichbaren Wasserspiegel im Zulaufbauwerk, der wie erwähnt bei 294,45 m ü. NN liegt. Details zur Ermittlung des NPSH im Maschinenbauteil des Hauptberichtes. Die während des Auffahrens des Speichers angetroffenen geologischen Gegebenheiten können eine Verschiebung oder eine Anpassung der Geometrie in Länge oder Querschnitt einzelner Speicherkavernen oder des Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers erfordern. Dies mag den Zulauf zur Pumpe erschweren oder verlängern, daher wurde die Laufradhöhe auf der sicheren Seite mit 260,00 m ü. NN festgesetzt.
- III. Bemessung der Totraumgräben in den Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers: Das numerische M11 Modell wurde auch dazu verwendet, die Totraumgräben innerhalb der Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers abzuschätzen. Während die Nebenstollen des Ka-

vernenwasserspeichers kein Längsgefälle haben, so haben sie ein Quergefälle von 2,5% und jeweils einen Totraumgraben (Abbildung 4), dessen Ziel es ist, den hydraulischen Radius während des Absenkens zum Absenkziel hin, hoch zu halten. Der Totraumgraben ist mit einem Längsgefälle zum Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers hin ausgebildet; am toten Ende ist die Sohle des Totraumgrabens eben mit der Sohle des Hauptstollens des Kavernenwasserspeichers und fällt zum Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers auf einen festen Wert ab, der für jeden Stollen individuell bestimmt wurde.



**Abbildung 4: Regelquerschnitt durch den Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers mit Quergefälle und Totraumgräben**

## 1.2 Geometrie der Ein-/Auslaufdiffusoren Schwarzenbach- und Murgwerk

Die Diffusoren am Übergang von den Stollen zum Zulaufbauwerk des Stollens wurden strömungsmechanisch auf Reduktion der hydraulischen Verluste optimiert. Dazu wurde ein möglichst geringer Öffnungswinkel im Bereich von  $8^\circ$  angestrebt, da für Öffnungswinkel  $< 8^\circ$  die Strömung an der Wand haften bleibt [Q2]. Damit entstehen entlang der Wände weniger Ablösewirbel, die ein gewisses Maß an Energie dissipieren, was der Stromproduktion verloren geht.

Der Endquerschnitt des Unterwasserstollens Murgwerk wurde groß ( $A = 26,5 \text{ m}^2$ ) gewählt um die Fließgeschwindigkeiten an der Schnittstelle von Kavernenwasserspeicher, Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk und Unterwasserstollen Murgwerk (Abbildung 5) gering zu halten. Bei einem Durchfluss im Turbinenbetrieb im Murgwerk von ca.  $Q = 10,5 \text{ m}^3/\text{s}$  ergibt sich eine Ausflussgeschwindigkeit von  $0,39 \text{ m/s}$ , was niedrig ist für Ausläufe. Dem Vorteil geringer Fließgeschwindigkeiten kommt speziell dann eine Bedeutung zu, wenn das Murgwerk im Turbinenbetrieb arbeitet und das Schwarzenbachwerk im Pumpbetrieb. In diesem Fall entsteht ein komplexes, hoch dreidimensionales, wirbelbehaftetes Fließbild im Zulaufbauwerk. Durch die Wahl großzügiger Abmessungen in diesem Bereich, kann das Potential für hohe hydraulische Verluste reduziert werden, da die Fließgeschwindigkeit quadratisch in die Berechnung der Verluste eingeht.

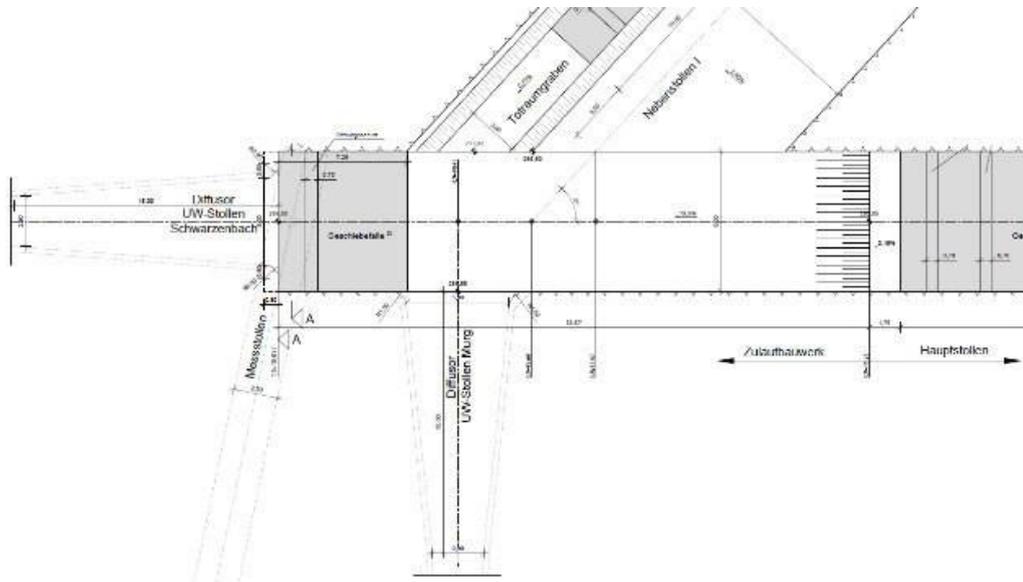


Abbildung 5: Zulaufbauwerk und Unterwasserstollen Murg- und Schwarzenbachwerk

### 1.3 Einlaufüberdeckungshöhe Pumpeneinlauf

Um den Eintrag von Luft in den Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk zu vermeiden, muss der Einlauf tief genug unter der Wasseroberfläche am Absenkziel sitzen. Erschwerend kommt hinzu, dass der Turbinenbetrieb des Murgwerks möglicherweise einen gewissen Drall in den Pool im Zulaufbauwerk eintragen könnte, der zu einer gewissen Asymmetrie in der Anströmung des Pumpeneinlaufs führen könnte, was die Wirbelbildungs- beziehungsweise die Lufteintragsgefahr erhöhen könnte. Die Sicherstellung eines luftfreien Zulaufs zur Pumpe ist für den Betrieb von größter Wichtigkeit, da, wenn Luft eingesogen würde, die Leistung der Pumpe während des Absenkens reduziert werden müsste und dies ist zu vermeiden.

Zur Berechnung der Einlaufüberdeckungshöhe wurde der bewährte empirische Ansatz von Gordon [Q4] herangezogen wie in Tabelle 1gezeigt. Damit errechnet sich die minimal erforderliche Überdeckungshöhe zu 2,11 m. Die Erfahrung zeigt allgemein eine gute Übereinstimmung der Lufteintragsgefahr in Prototypen mit dem verwendeten Berechnungsansatz, jedoch ist der vorliegende Fall mit der schiefen Ebene im Zulaufbauwerk und dem seitlichen Zulauf aus dem Murgwerk durch den empirischen Ansatz nicht abgedeckt. Da die Konsequenzen für den Betrieb durch eine Betriebseinschränkung der Anlage massiv wären, wurde ein hoher Sicherheitszuschlag von ca. 240% gewählt, was eine erforderliche Gesamtüberdeckung von mindestens 5,08 m ergibt. Die tatsächliche Überdeckung beim tiefsten erreichbaren Wasserstand im Zulaufbauwerk von 294,45 m liegt bei 5,05 m. Empfehlenswert wäre an dieser Stelle ein physikalischer Modellversuch in einem großmaßstäblichen Modell, was die Viskosität von Luft und Wasser gut abbildet.

Tabelle 1: Einlaufüberdeckungshöhe Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk

Pumpendurchfluss	$Q =$	11.2	m <sup>3</sup> /s	
Durchmesser UW-Stollen	$d =$	2.90	m	
Höhe Diffusor	$h =$	2.90	m	
Fließgeschwindigkeit	$v =$	1.69	m/s	
Froude	$F =$	0.32	-	
Empfohlene Einlauf- überdeckungshöhe	$S =$	2.11	m	$S = C \cdot d \cdot F$
Gordon Faktor Asymmetrie	$C =$	2.30		
Sicherheitszuschlag		240	%	
Gesamtüberdeckung		5.08	m	
Minimaler Unterwasserspiegel	$H_{min} =$	294.45	m ü. NN	
Höhenkote Firste Diffusor	$H_{Einlauf} =$	289.40	m ü. NN	

#### 1.4 Geschiebefallen im Kavernenwasserspeicher

Am Ende eines jeden Nebenstollen des Kavernenwasserspeichers und deren Totraumgräben, am Ende des Hauptstollen des Kavernenwasserspeichers und abermals direkt am Einlauf zum Schwarzenbachwerk sieht der Bauwerksentwurf Geschiebefallen vor. Dies soll sicherstellen, dass kein Geschiebe in die Pumpturbine gelangt. Geschiebe wird durch den Betrieb des Kavernenwasserspeichers erwartet, da davon auszugehen ist, dass durch die häufigen Wasserspiegelschwankungen Spritzbeton- und Gesteinsbrocken aus der Oberfläche herausgelöst werden könnten, speziell in Bereichen von geologischen Störungen.

Die Bauform der Fallen entspricht der der „Celsep Rocktrap“, die sich in unausgekleideten Bauwerken international als bewährt und effizient erwiesen hat [Q3]: eine Vertiefung im Boden wird mit Bohlen abgedeckt, die einen oder mehrere Schlitze quer zur Fließrichtung aufweisen. Das Geschiebe gleitet über die Bohlen und fällt durch die Schlitze. Füllt sich die Falle unter dem oberstromigsten Schlitz bis zum Rand, gleitet das Geschiebe weiter und fällt durch den nächsten Schlitz. Ist die Falle auch unter diesem bis oben gefüllt, muss die Falle geleert werden. Durch die Bohlenabdeckung wird sichergestellt, dass auch kleinere Partikel durch Turbulenz nicht wieder in Schwebe gehoben werden können und weiter gleiten. Die Abstände der Schlitze ergeben sich aus dem Reibungswinkel des zu erwartenden Materials (ca. 30°- 35°), so dass sich ein Schüttkegel neben den anderen reihen kann (in Fließrichtung) und deren Spitze bei Vollenfüllung der Falle ungefähr den jeweiligen Schlitz erreicht.

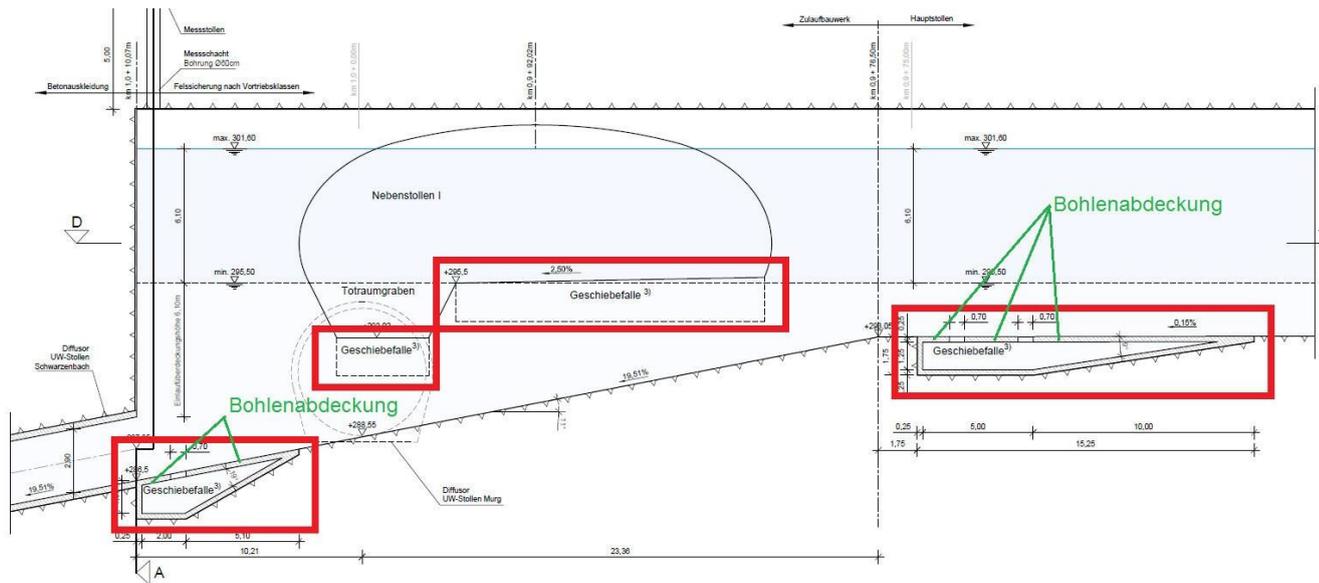


Abbildung 6: Geschiefefallen im Zulaufbauwerk mit Bohlenabdeckungen

### 1.5 Wellenbildung im Kavernenwasserspeicher

Wechsel der Betriebsweisen und Wechsel im Durchfluss können die Wellenbildung im Speicher erzeugen und anregen. Dies kann kritisch sein für Betriebsweisen nahe dem Speicherziel, wenn Wellen die Decke des Speichers erreichen und dort Unterdrücke bilden, die dann wiederum auf Dauer die Gefahr von Verbrüchen erhöhen könnte. Grundsätzlich ist diese Gefahr des sogenannten Zuschlagens gegeben, die eindimensionale Modellierung konnte jedoch die Existenz von ausgeprägten Schwall- und Sunkwellen bei schnellen Schaltvorgängen vom Pump- in den Turbinenbetrieb und umgekehrt nicht nachweisen. Es sei auf die mehrdimensionalen hydraulischen Zusatzuntersuchungen (unten beschrieben) verwiesen um die Gefahr einschätzen und beurteilen zu können.

### 1.6 Aus- bzw. Einlaufbauwerk in den Kavernenwasserspeicher

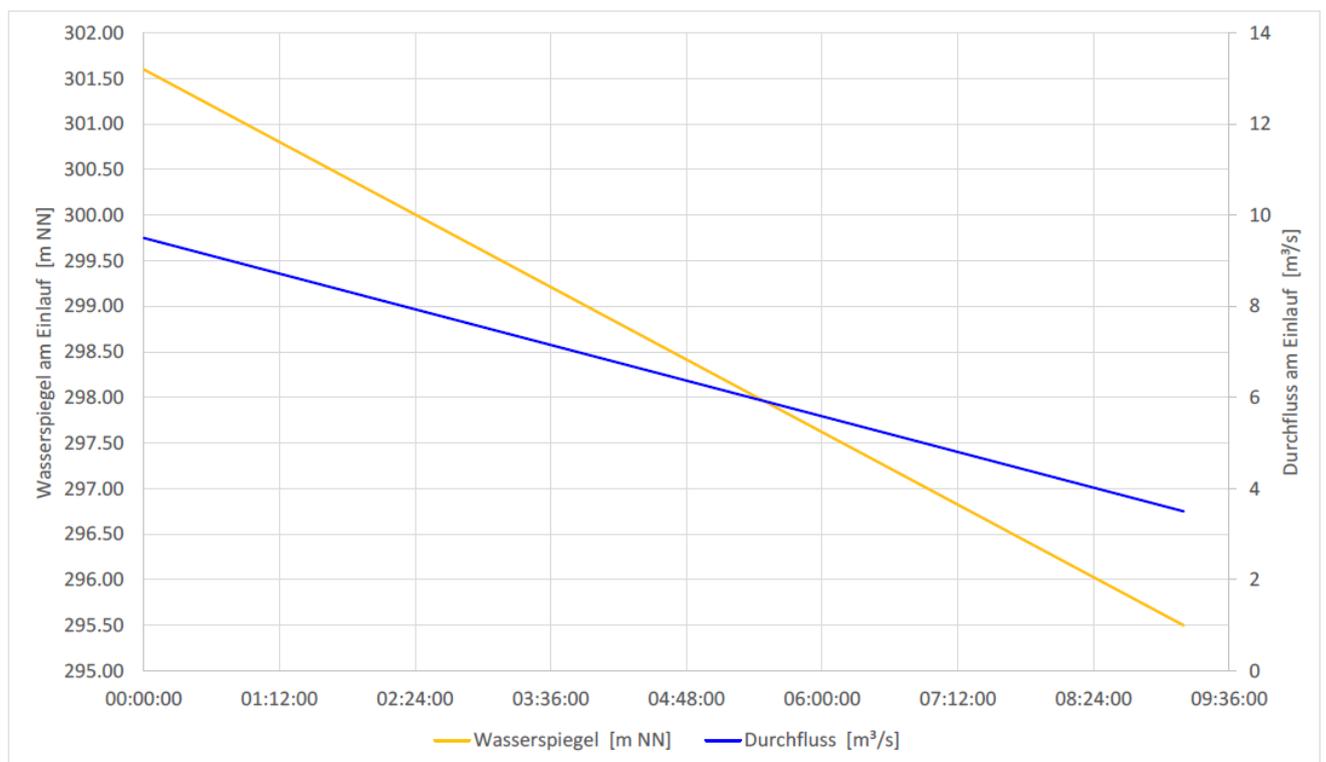
Es ist vorgesehen das Auslaufbauwerk bzw. im Pumpbetrieb das Einlaufbauwerk in den Kavernenwasserspeicher mit einem Rechen auszurüsten um das Eindringen von Schmutzstoffen zu verhindern. Entwurfsfließgeschwindigkeit für diesen Rechen ist 0,5 m/s, um Fischen das Wegschwimmen vom Rechen zu ermöglichen. Da sich der Durchfluss an dieser Stelle während der Absenkung des Wasserspiegels verändert, wurde das eindimensionale numerische Modell zur Bestimmung des Durchflusses herangezogen, mit welchem die hydraulische Vorbemessung des Kavernenwasserspeichers durchgeführt wurde. In dem Modell sind die Oberflächen-, Querschnitts- und Voluminaproportionen der beiden Teilspeicher implementiert.

Der Durchfluss, der sich am Einlauf einstellt, ist primär eine Funktion der Oberflächenproportion zwischen dem Ausgleichsbecken und dem untertägigen Speicher. In dem untenstehenden Diagramm ist die Veränderung des Wasserspiegels über eine Pumpdauer von ca. 9,25 h gezeigt (ca. 400'000 m<sup>3</sup>; Pumpe Q = 12 m<sup>3</sup>/s). Dabei senkt sich der Wasserspiegel von 301,6 m ü. NN auf 295,5 m ü. NN ab. Gleichzeitig geht der Durchfluss am Einlauf von 9,5 m<sup>3</sup>/s auf 3,5 m<sup>3</sup>/s beim Absenkziel zurück.

Mit der Kenntnis der Durchflüsse an dieser Stelle kann die Mindestquerschnittsfläche des Rechens bemessen werden (Tabelle 2). Die Mindestquerschnittsfläche ergibt sich in der Nähe des Absenkziels. Mit der bekannten Wassertiefe von 1 m am Absenkziel ergibt sich eine Mindestbreite von 7 m um die Forderung von einer Fließgeschwindigkeit < 0,5 m/s einzuhalten. Abbildung 7 zeigt die Abhängigkeit von Wasserspiegel und Durchfluss über die Zeit.

**Tabelle 2: Mindestbreite des Rechens**

Sohle Rechen:	294,5 m ü. NN				
hh:mm:ss	Q [m³/s]	H [m ü. NN]	A [m²]	Tiefe [m]	erf. Breite
00:00:00	9,5	301,60	19,00	7,10	2,68
09:12:00	3,5	295,50	7,00	1,00	7,00



**Abbildung 7: Abhängigkeit von Wasserspiegel und Durchfluss über die Zeit**

Neben dem Rechen ist am Einlauf auch eine Geschiebeleitwand vorgesehen um Geschiebe, welches sich im Hochwasserfall durch das Ausgleichsbecken bewegt, vom Einlauf in den Kavernenwasserspeicher fern zu halten.

## 1.7 Mehrdimensionale Modellierung des Kavernenwasserspeichers

---

Die vorliegende hydraulische Bemessung des Kavernenwasserspeichers wird gegenwärtig an der Technischen Universität Graz, Österreich, in detaillierten hydraulischen Berechnungen überprüft. Erste Zwischenergebnisse liegen bereits vor, mit den endgültigen Ergebnissen ist zum Ende des Jahres 2017/Anfang 2018 zu rechnen. Die Ergebnisse werden in einem separaten Bericht dokumentiert.

Gegenstand der Untersuchungen sind:

- Untersuchung der **Befüll- und Entleerungsvorgänge** des Kavernenwasserspeichers. Schwerpunkt dieser Untersuchung ist der Nachweis, dass im Pumpbetrieb die volle Leistung bis zum Absenkziel gefahren werden kann, ohne, dass der Zufluss abreißt. Dies geschieht durch eine hydrodynamische, numerische 3D Modellierung.
- Geometrische **Optimierung der Diffusoren der Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk und Unterwasserstollen Murgwerk und der Zulaufkaverne**. Die Zulaufkaverne ist das Bauwerk, was den Übergang zwischen dem Speicherteil und den Zuläufen aus Schwarzenbachwerk und Murgwerk bildet. Ziel ist es, die lokalen Verluste zu minimieren und gleichzeitig ein hohes Sicherheitsniveau gegenüber Wirbelbildung im Pumpbetrieb sicher zu stellen. Dies geschieht durch eine hydrodynamische, numerische 3D Modellierung.
- Transiente Untersuchung der **Befüll- und Entleerungsvorgänge** mittels 1D Numerik mit dem Ziel die Wellenbildung infolge von Ein- und Mehrfachschaltfällen anzuregen. Kritische Lastfälle, die das Aufschwingen der Oberfläche und das Zuschlagen des Kavernenwasserspeichers nach sich ziehen, sollen hierbei identifiziert werden. Ähnliches wird am Absenkziel durchgeführt.

Die bisher vorgelegten Zwischenergebnisse der Untersuchungen bestätigen den der Untersuchungen zugrundeliegenden Entwurf.

## 2. Hydraulik des Wasserwegs Schwarzenbachwerk

---

Der Triebwasserweg des Schwarzenbachwerk umfasst zukünftig die folgenden Bestandteile in Fließrichtung des Turbinenbetriebs: Entnahmeturm Schwarzenbachtalsperre – Entnahmestollen – Drosselklappen – Schwarzenbachstollen – Wasserschloss – Druckrohrleitung – Kraftwerkskaverne – Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk zum Kavernenwasserspeicher. Das System zwischen dem Entnahmeturm in der Schwarzenbachtalsperre und dem Wasserschloss wird in der vorliegenden Planung der Unterstufe weiter genutzt und wird rehabilitiert, wohingegen der Abschnitt zwischen dem Wasserschloss und dem Kavernenwasserspeicher vollends neu gebaut wird. Als Rehabilitierungsmaßnahmen ist besonders nennenswert der Austausch der beiden Kugelschieber in der Schieberkammer durch zwei Drosselklappen, so wie die vorgesehene Betonsanierung, die voraussichtlich partiell zu einer Glättung der Innenoberfläche der wasserführenden Bauwerke beiträgt. Der vorliegende Berichtsteil beschreibt die hydraulische Bemessung der einzelnen Bestandteile.

### 2.1 Ermittlung der Leitungsdurchmesser der Druckrohrleitung und des Unterwasserstollens Schwarzenbachwerk

---

Die neugeplante Druckrohrleitung (zwischen Wasserschloss und Kraftwerkskaverne) umfasst den horizontalen Stollen in Beton mit einer Länge von ca. 93 m, den Druckschacht mit einer Länge von ca. 366 m in Stahl und einem weiteren stahlgepanzerten horizontalen Abschnitt von ca. 42 m. Der Durchmesser eines Wasserwegs wird als Kompromiss zwischen den hydraulischen Verlusten während des Betriebs, der Anlaufzeit und den Baukosten ermittelt.

Die Ermittlung des Durchmessers der beiden Abschnitte in Beton und Stahl wurde zunächst unter Zuhilfenahme von verschiedenen, bewährten empirischen Formeln [Q5] durchgeführt und anschließend wurden die bestimmten Durchmesser auf Einfachheit bei der Bauausführung überprüft.

Die empirische Bemessung ist in Tabelle 3 gezeigt: unter Eingabe der bekannten Daten errechnet sich ein Innendurchmesser für den Betonstollen von 2.41 m, der aus Gründen der Baubarkeit<sup>2</sup> auf 2.9 m aufgeweitet wurde; derselbe Durchmesser wurde aus denselben Gründen auch für den Unterwasserstollen Schwarzenbachwerk angewandt. Für den Abschnitt aus Stahl wurde der berechnete Querschnitt aus denselben Gründen von 1.8 m auf 1.9 m aufgeweitet.

---

<sup>2</sup> Damit ergibt sich ein Außendurchmesser, der mit dem üblichen Baugerät ohne Sondergröße auffahrbar ist. Herbeischaffung von Baumaschinen mit kleinen Durchmessern wäre über die beiden kurzen Strecken (OW und UW) nicht kostengünstiger.

**Tabelle 3: Bestimmung der Durchmesser des Druckschachts und -stollens**

Unterstufe Schwarzenbachwerk		Turbinenbetrieb	Pumpbetrieb	
Durchfluss	$Q =$	16.34	11.17	m <sup>3</sup> /s
Entwurfs-Durchfluss	$Q_A =$	14.00	$Q_A = \sqrt{\frac{Q_I^2 + Q_P^2}{2}}$	m <sup>3</sup>
Turbinenleistung	$P =$	51.10	43.40	MW
Nennfallhöhe	$H =$	350.10	364.80	m
Länge vom Druckschacht	$L =$	366.00	366.00	m
Gemittelter Stollendurchmesser Beton	$d =$	2.41	m	
Gemittelter Stollendurchmesser Stahl	$d =$	1.82	m	

Druckschacht mit Stahlauskleidung im Entwurfs-Durchfluss

Formel		$D_{opt}$	A	v
		m	m <sup>2</sup>	m/s
ARGE-Intern	$0,85 \cdot Q^{0,43} \cdot I^{0,14} / H^{0,2}$	1.87	2.75	5.94
Fahlbusch	$1,12 \cdot Q^{0,45} / H^{0,12}$	1.82	2.60	5.39
Mittelwert		1.84	2.67	5.24

Druckstollen mit Betonauskleidung im Entwurfs-Durchfluss

Formel		$D_{opt}$	A	v
		m	m <sup>2</sup>	m/s
ARGE-Intern	$0,72 \cdot Q^{0,43}$	2.24	3.94	3.55
ARGE-Intern für PSW	$0,85 \cdot Q^{0,43}$	2.64	5.49	2.55
Fahlbusch	$0,62 \cdot Q^{0,48}$	2.20	3.80	3.68
Gordon	$0,72 \cdot Q^{0,5}$	2.69	5.70	2.46
Mittelwert		2.44	4.69	2.98

Druckschacht mit Stahlauskleidung im Turbinenbetrieb

Formel		$D_{opt}$	A	v
		m	m <sup>2</sup>	m/s
ARGE-Intern	$0,85 \cdot Q^{0,43} \cdot I^{0,14} / H^{0,2}$	2.00	3.14	5.20
Fahlbusch	$1,12 \cdot Q^{0,45} / H^{0,12}$	1.95	2.98	5.48

Druckstollen mit Betonauskleidung im Turbinenbetrieb

Formel		$D_{opt}$	A	v
		m	m <sup>2</sup>	m/s
ARGE-Intern	$0,72 \cdot Q^{0,43}$	2.39	4.50	3.63
ARGE-Intern für PSW	$0,85 \cdot Q^{0,43}$	2.83	6.27	2.61
Fahlbusch	$0,62 \cdot Q^{0,48}$	2.37	4.41	3.70
Gordon	$0,72 \cdot Q^{0,5}$	2.91	6.65	2.46

Druckschacht mit Stahlauskleidung im Pumpbetrieb

Formel		$D_{opt}$	A	v
		m	m <sup>2</sup>	m/s
ARGE-Intern	$0,85 \cdot Q^{0,43} \cdot I^{0,14} / H^{0,2}$	1.68	2.23	5.01
Fahlbusch	$1,12 \cdot Q^{0,45} / H^{0,12}$	1.63	2.10	5.32

Druckstollen mit Betonauskleidung im Pumpbetrieb

Formel		$D_{opt}$	A	v
		m	m <sup>2</sup>	m/s
ARGE-Intern	$0,72 \cdot Q^{0,43}$	2.03	3.24	3.44
ARGE-Intern für PSW	$0,85 \cdot Q^{0,43}$	2.40	4.52	2.47
Fahlbusch	$0,62 \cdot Q^{0,48}$	1.97	3.06	3.65
Gordon	$0,72 \cdot Q^{0,5}$	2.41	4.55	2.46

## 2.2 Hydraulische Verlustberechnung

Die Ermittlung der hydraulischen Verluste entlang der Wasserwege für den Turbinen,- als auch den Pumpenbetrieb erfolgte entsprechend den Grundregeln der Rohrhydraulik. Die Berechnung beinhaltet die Strecken vom Ein-/ Auslauf Oberbecken bis Austritt in den Kavernenwasserspeicher. Die Reibungsverluste wurden mit Hilfe des Widerstandsbeiwerts nach COLEBROOK-WHITE berechnet:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \lg \left( \frac{2,51}{R \cdot \sqrt{f}} + \frac{k/D_s}{3,71} \right)$$

- mit:
- $f$  = Darcy Widerstandsfaktor, [-]
  - $R$  = Reynoldszahl,  $R = v \cdot D_s / \nu$  [-]
  - $v$  = Fließgeschwindigkeit, [m/s]
  - $D_s$  = Durchmesser des Wasserwegs, [m]
  - $\nu$  = kinematische Viskosität, [m<sup>2</sup>/s]
  - $k$  = Äquivalente Sandrauigkeit [m] (siehe auch Tabelle 4)

Die daraus resultierende hydraulische Verlusthöhe wurde mit der universellen Fließformel nach DARCY-WEISBACH ermittelt:

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D_s \cdot 2g}$$

- mit:
- $h_f$  = hydraulische Verlusthöhe für Reibungsverluste [m]
  - $L$  = Länge des Wasserwegs [m]
  - $g$  = Erdbeschleunigung,  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>

Lokale Verluste wurden berücksichtigt mit:

$$h_l = \xi \cdot \frac{v^2}{2g}$$

- mit:
- $h_l$  = hydraulische Verlusthöhe für lokale Verluste, [m]
  - $\xi$  = Lokaler Verlustkoeffizient [-] (siehe auch Tabelle 6)

Die hydraulischen Gesamtverluste ergeben sich aus:

$$h_v = h_f + h_l$$

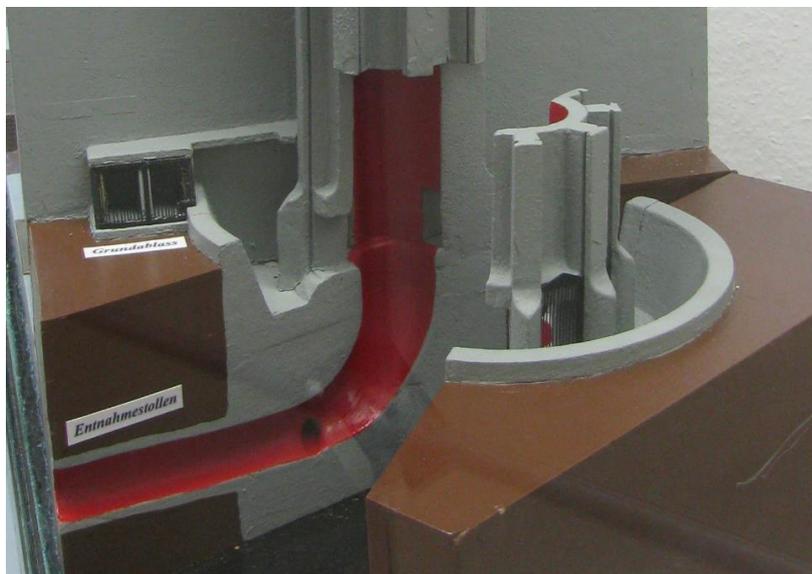
- mit:
- $h_v$  = hydraulische Gesamtverlusthöhe [m]

In Tabelle 6 sind die Berechnungen für die jeweiligen Einzelverluste für jeden Verlustverursachenden Querschnitt gezeigt. In der Tabelle wird zwischen Reibungsverlusten und lokalen Verlusten unter-

schieden. Für die Reibungsverluste ergibt sich aus dem Durchfluss  $Q$  und dem Durchmesser  $D_s$  eine Fließgeschwindigkeit  $v$ . Die Fließgeschwindigkeit ist Grundlage für die Reynoldszahl die mit Hilfe der Gleichung nach COLEBROOK-WHITE den Widerstandsbeiwert  $f$  ergibt. Die Gleichung wurde iterativ gelöst, und ist Grundlage für die Berechnung der hydraulischen Reibungsverlusthöhe, die mit Hilfe der universellen Fließformel nach DARCY- WEISBACH ermittelt wird. Für die universelle Fließformel werden ebenfalls die Angaben zur Fließgeschwindigkeit  $v$ , der Länge des Wasserwegs  $L$  und des Durchmessers  $D_s$  benötigt. Dieses Vorgehen muss für jeden verlustverursachenden Querschnitt vorgenommen werden und ist in Tabelle 6 dargestellt.

Für die lokalen Verluste wird ebenfalls die Fließgeschwindigkeit  $v$  benötigt und eine Abschätzung des lokalen Verlustkoeffizienten  $\zeta$ , der sich aus der Geometrie ergibt. Die jeweiligen Verlustkoeffizienten für lokale Verluste sind in Tabelle 6 gezeigt; sie wurden internationaler Fachliteratur entnommen und beruhen auf Annahmen für vergleichbare Pumpspeicherwerke. Berechnet werden die hydraulischen Verluste normalerweise für den Auslegungsdurchfluss. Es ist allerdings ebenfalls möglich, dass der Durchfluss je nach Betriebsweise und Fallhöhe variiert. Im Folgenden soll auf einige wichtige Verlustkoeffizienten eingegangen werden:

- Einlaufurm Schwarzenbachtalsperre: Abbildung 8 zeigt den Einlauf in den Triebwasserweg des Schwarzenbachwerk in einem maßstäblichen Modell. Der Einlauf ist in einem Trog angeordnet, der eine rechtwinklige Umlenkung der Strömung erzwingt bevor der Rechen durchströmt wird. Die Zuströmung in den Stollen (rot) erfolgt nicht radialsymmetrisch, der hintere Teil ist durch die Talsperre eingeeengt. Da die tatsächlichen Strömungsverhältnisse schwer abzuschätzen sind, wurde der lokale Verlustbeiwert  $\zeta$  mit 0,5 im Turbinenbetrieb und als Ausflusskoeffizient von 1.0 abgeschätzt.



**Abbildung 8: Übergang des Einlaufturms an der Schwarzenbachtalsperre in den Entnahmestollen mit Rechen, angeordnet in einem Trog**

- Ein- und Auslaufverluste Wasserschloss: Das Wasserschloss ist ungedrosselt, die ober- und unterwasserseitigen Stollen münden direkt in den Schacht. Es ist davon auszugehen, dass die Geschwindigkeitshöhen auf der in das Wasserschloss einlaufenden Seite jeweils verloren sind. Aus diesem Grund wurde auch kein Umlenkverlust durch die Umlenkung in der Ebenen

zwischen den beiden Stollen angenommen. Eine Option für die Reduktion der Verluste wäre, den Ein- und Auslauf des Wasserschlosses mit einem Rohr innerhalb des Wasserschlosses zu verbinden. Das Rohr würde mit einer Öffnung in der Firste versehen, die in Form einer Drossel als hydraulische Verbindung mit dem Wasserschloss fungieren würde und könnte dann interessant werden, wenn die abschließende transiente Untersuchung zu dem Ergebnis kommt, dass das Wasserschloss nicht mehr den Anforderungen entspricht. Die Ersparnis bei der Verlusthöhe könnte im Bereich von 0,1 bis 0,2 m liegen, je nach Ausführung.

Für die mittlere Rauigkeit ergibt sich ein Verlust im **Turbinenbetrieb von 9,87 m** (Tabelle 6) und im **Pumpbetrieb von 4.76 m** (Tabelle 7).

Die größte Unsicherheit bei der Berechnung von Verlusten resultiert aus den kontinuierlichen Verlusten, da diese für den Bestand nur geschätzt werden können (Im Gegensatz zu den lokalen, die recht genau über die bekannte Geometrie aus Bestandszeichnungen und spezialisierten Tabellenbüchern geschätzt werden können). Deshalb wurden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die Verluste mit niedrigen, mittleren und hohen Rauigkeitsbeiwerten (jeweils getrennt für Bestand und Neuplanung) berechnet. Die Rauigkeiten  $k$  wurden mit dem 0,7-fachen und dem 1,3-fachen getestet (Tabelle 4). Die Berechnung mit den nach oben und unten variierten Rauigkeiten wurde für den Turbinenbetrieb durchgeführt und das Ergebnis ist in Tabelle 5 zu sehen. Die Reduktion des  $k$ -Werts ergibt eine Abminderung der Verluste um ca. 27%, wohingegen die Erhöhung von  $k$  die Verluste um ca. 49% erhöht. Dies ist ein sehr typisches Verhalten, was durch die Nichtlinearität zu erklären ist.

**Tabelle 4: Äquivalente Rauigkeit für Stahl- und Betonauskleidung**

		Stahlauskleidung	Betonauskleidung
Normale äquivalente Rauigkeit Neubau	$k$	0,04 mm	0,3 mm
Normale äquivalente Rauigkeit Bestand	$k$	0,1 mm	0,5 mm

**Tabelle 5: Hydraulische Energiehöhenverluste für Turbinenbetrieb**

		Turbinenbetrieb
Normale äquivalente Rauigkeit	$h_v$	9,87 m
Minimale äquivalente Rauigkeit	$h_{v,min}$	6,87 m
Maximale äquivalente Rauigkeit	$h_{v,max}$	10,2 m

Tabelle 6: Hydraulische Verluste für den Turbinenbetrieb

Schwarzenbachwerk	Turbinenbetrieb												Summe	
			Entnahme- bauwerk I	Betonrohr II	Eisenrohre IIIa	Eisenrohre IIIb	Stollen IV	Stollen	Druckschacht	Turbinenzulauf	Turbinenzulauf	Saugseite		Saugseite
<b>Abfluss</b>	Q	m³/s	16.34	16.34	8.17	8.17	16.34	16.34	16.34	16.34	16.34	16.34	16.34	
<b>Durchmesser</b>	D	m	3.00	3.00	1.90	1.90	3.05	2.90	1.90	1.11	1.11	2.70	2.70	
<b>Rauigkeit</b>	k	mm	0.50	0.10	0.10	0.10	0.50	0.30	0.04	0.04	0.04	0.30	0.30	
Rauigkeit	k	m	0.0005	0.0001	0.0001	0.0001	0.0005	0.0003	0.00004	0.00004	0.00004	0.0003	0.0003	
<b>Länge</b>	L	m	55.50	86.20	19.40	19.40	1700.00	87.30	407.60	10.00	5.00	95.64	95.64	
Kin Viskosität	v	m²/s	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	
Fläche A = π*(D/4)²	A	m²	7.07	7.07	2.84	2.84	7.31	6.61	2.84	0.97	0.97	5.73	5.73	
Geschwindigkeit Q/A	v	m/s	2.31	2.31	2.88	2.88	2.24	2.47	5.76	16.89	16.89	2.85	2.85	
Reynoldszahl v*d/v	Re	-	6.93E+06	6.93E+06	5.47E+06	5.47E+06	6.82E+06	7.17E+06	1.09E+07	1.87E+07	1.87E+07	7.71E+06	7.71E+06	
Reibungsfaktor	λ	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Laufender Druckverlust pro Meter	hv(lauf.)	m	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.009	0.134	0.134	0.002	0.002	
<b>Laufender Druckverlust (gesamt)</b> I*(L/D)*(v²/2g)	hv(ges)	m	0.07	0.08	0.05	0.05	1.91	0.12	3.51	1.34	0.67	0.18	0.18	8.15
Lokaler Verlustbeiwert Einlauf/Rechen etc	ζ	-	0.50											
		m	0.14											0.14
Krümmen	β	°	90	10	55				76			12	75	
Krümmerradius	r	m	6.2	40	16				5.7			5.8	45	
	ζ	-	0.14	0.02	0.06				0.11			0.03	0.07	
Anzahl	#	-	1	2	1				2			1	1	
		m	0.04	0.01	0.03				0.36			0.01	0.03	0.48
Stromtrennung	ζ	-			0.25									
		m			0.11									0.11
Stromvereinigung	ζ	-				0.10								
		m				0.04								0.04
Drosselklappe	ζ	-				0.50								
		m				0.21								0.21
Auslaufverlust ins Wasserschloss	ζ	-					1.00							
		m					0.25							0.25
Einlaufverlust vom Wasserschloss	ζ	-						0.10						
		m						0.03						0.03
Konus	ζ	-						0.02		0.24				0.38
Anzahl	#	-						2		1				1
		m						0.06		0.10				0.16
Kugelschieber	ζ	-									0.01			
		m									0.07			0.07
Diffusor + Auslauf	ζ	-											1.00	
		m											0.06	0.06
<b>Summe</b>		m												<b>9.87</b>

Wasserschloss

**Tabelle 7: Hydraulische Verluste für den Pumpbetrieb**

Schwarzenbachwerk	Pumpbetrieb		Entnahme- bauwerk I	Betonrohr II	Eisenrohre IIIa	Eisenrohre IIIb	Stollen IV	Stollen	Druckschacht	Turbinenzulauf	Turbinenzulauf	Saugseite	Saugseite	Summe
	Q	m³/s												
Abfluss	Q	m³/s	11.17	11.17	5.59	5.59	11.17	11.17	11.17	11.17	11.17	11.17	11.17	
Durchmesser	D	m	3.00	3.00	1.90	1.90	3.05	2.90	1.90	1.11	1.11	2.70	2.70	
Rauigkeit	k	mm	0.50	0.10	0.10	0.10	0.50	0.30	0.04	0.04	0.04	0.30	0.30	
Rauigkeit	k	m	0.0005	0.0001	0.0001	0.0001	0.0005	0.0003	0.00004	0.00004	0.00004	0.0003	0.0003	
Länge	L	m	55.50	86.20	19.40	19.40	1700.00	87.30	407.60	10.00	5.00	95.64	95.64	
Kin Viskosität	$\nu$	m²/s	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	
Fläche $A = \pi \cdot (D/4)^2$	A	m²	7.07	7.07	2.84	2.84	7.31	6.61	2.84	0.97	0.97	5.73	5.73	
Geschwindigkeit Q/A	v	m/s	1.58	1.58	1.97	1.97	1.53	1.69	3.94	11.54	11.54	1.95	1.95	
Reynoldszahl $v \cdot d/\nu$	Re	-	4.74E+06	4.74E+06	3.74E+06	3.74E+06	4.66E+06	4.90E+06	7.49E+06	1.28E+07	1.28E+07	5.27E+06	5.27E+06	
Reibungsfaktor	$\lambda$	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Laufender Druckverlust pro Meter	hv(lauf.)	m	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.063	0.063	0.001	0.001	
Laufender Druckverlust (gesamt) $I \cdot (L/D) \cdot (v^2/2g)$	hv(ges)	m	0.03	0.04	0.02	0.02	0.90	0.05	1.68	0.63	0.32	0.09	0.09	3.86
Lokaler Verlustbeiwert Einlauf/Rechen etc	$\zeta$	-	1.00											
		m	0.13											0.13
Krümmerradius	$\beta$	°	90	10	55				76			12	75	
	r	m	6.2	40	16				5.7			5.8	45	
	$\zeta$	-	0.14	0.02	0.06				0.11			0.03	0.07	
Anzahl	#	-	1	2	1				2			1	1	
		m	0.02	0.00	0.01				0.17			0.01	0.01	0.22
Stromtrennung	$\zeta$	-			0.25									
		m			0.05									0.05
Stromvereinigung	$\zeta$	-				0.10								
		m				0.02								0.02
Drosselklappe	$\zeta$	-				0.50								
		m				0.10								0.10
Auslaufverlust ins Wasserschloss	$\zeta$	-					0.10							
		m					0.01							0.01
Einlaufverlust vom Wasserschloss	$\zeta$	-						1.00						
		m						0.15						0.15
Konus	$\zeta$	-						0.09		0.07				0.15
Anzahl	#	-						2		1				1
		m						0.14		0.01				0.03
Kugelschieber	$\zeta$	-									0.01			
		m									0.03			0.03
Diffusor + Auslauf	$\zeta$	-											0.10	
		m											0.00	0.00
<b>Summe</b>		m												4.76

Wasserschloss

### 2.3 Anlaufzeit

Im Nachfolgenden soll überprüft werden, ob die Anlaufzeit  $T_a$  für den gekoppelten Wasserweg zwischen den beiden freien Oberflächen des Wasserschlosses und des Kavernenwasserspeichers ausreichend klein ist. Übersteigt die Anlaufzeit einen Grenzwert von 2,5 bis 3 Sekunden, so soll ein Triebwasserweg durch ein Wasserschloss abgekoppelt werden [Q8], was in dem vorliegenden Fall bedeuten würde, dass ein zweites Wasserschloss im Unterwasser oder die Erhöhung der Fließquerschnitte erforderlich wäre. Bei der Berechnung der Anlaufzeit werden alle direkt gekoppelten Leitungsabschnitte zwischen den nächsten beiden freien Wasseroberflächen liegen, die ober- und unterstrom der Turbine liegen, berücksichtigt.

Die Berechnung der Anlaufzeit  $T_a$  geschieht mit folgender Formel [Q8]:

$$T_a = \frac{Q_T}{g \cdot h_f} \cdot \sum_1^n \frac{l_{F,i}}{A_{F,i}}$$

mit:	$T_a$	Anlaufzeit, [s]
	$Q_T$	stationärer, maximaler Turbinendurchfluss, [m <sup>3</sup> /s]
	$g$	Erdbeschleunigung, [m/s <sup>2</sup> ]
	$h_f$	minimale Bruttofallhöhe, [m]
	$l_{F,i}$	Teillänge des Abschnitts i, [m]
	$A_{F,i}$	Rohrquerschnitt des Abschnitts i, [m <sup>2</sup> /s]

Die Anlaufzeit für den Wasserweg beträgt 0,95 Sekunden, erfahrungsgemäß kann dann beim vorliegenden Entwurf mit den gegebenen Längen und Durchmessern noch einmal 5-7% für Spirale und Saugrohr hinzukommen, so dass von einer Anlaufzeit von ca. knapp über 1 Sekunde auszugehen ist. Dieser Wert ist für die Frequenzregulierung sehr gut geeignet und es sind keine weiteren Maßnahmen mehr nötig.

Tabelle 8: Anlaufzeit des Wasserwegs

Anlaufzeit						
Oberwasser Absenkziel		m ü. NN	628.00			
Unterwasser Stauziel		m ü. NN	301.60			
Bruttofallhöhe		m	326.40			
Stollen			OW	UW	UW	Zeit
Turbinen Q	Q	m <sup>3</sup> /s	16.40	16.40	16.40	
Durchmesser	Ø	m	2.90	1.90	2.90	
Leitungslänge	L	m	93	404	191	
Querschnittsfläche	A	m <sup>2</sup>	6.61	2.84	6.61	
Fließgeschwindigkeit	v	m/s	2.48	5.78	2.48	
Länge/Fläche	L <sub>i</sub> /A <sub>i</sub>	m <sup>3</sup> /s	14.08	142.3	28.96	
Anlaufzeit	t	s				0.95

### 2.4 Hydraulische Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Wasserschlosses

Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Wasserwegs kann das bestehende Wasserschloss das entscheidende Bauteil sein, das ggf. den Betrieb bei Anfahr- und Abschaltvorgängen und bei der Frequenzregulierung einschränkt. Im Nachfolgenden wurde auf Basis einer Vorabschätzung geprüft, ob die Abfolge gewisser Betriebsweisen (i) zu einem Überlaufen des Wasserschlosses führen, oder (ii) einen Lufteintrag (je nach Fließrichtung in den ober- oder unterwasserseitigen Stollen) verursachen kann, da der Wasserstand zu tief abfällt. Dabei ist auch zu klären, ob dies in allen Bereichen des zulässigen maximalen und minimalen Wasserstands an der Schwarzenbachtalsperre geschehen kann, oder nur in Bereichen.

Die Leistungsfähigkeit des Wasserschlosses wurde in einer vorläufigen transienten Abschätzung überprüft. Dazu wurde die kommerzielle Software „Hammer“ von „Bentley Systems“ genutzt. Das Programm simuliert die transienten Vorgänge in einem Leitungssystem (Drucksystem). Es basiert auf der Charakteristiken-Methode und wird in zahlreichen internationalen Großprojekten erfolgreich eingesetzt. Das hydraulische System des Wasserwegs wurde wie in Abbildung 9 umgesetzt.

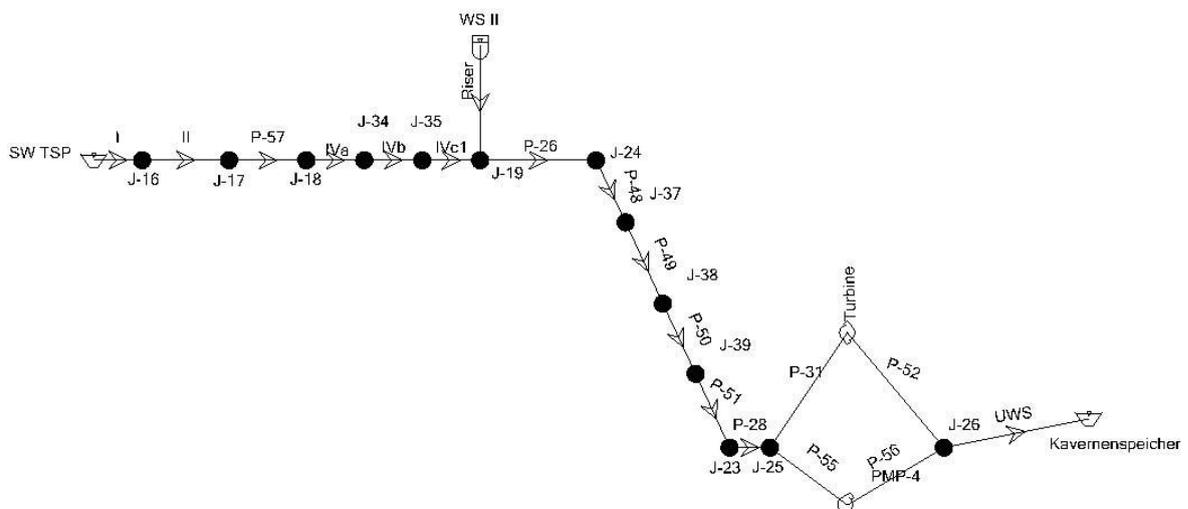
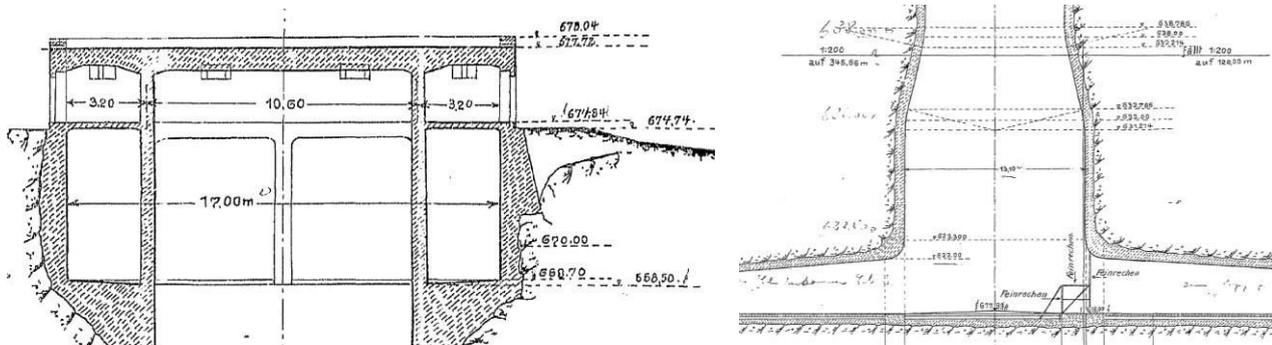


Abbildung 9: Wasserweg des Schwarzenbachwerk wie in Hammer modelliert

Um verschiedene Lastfälle untersuchen zu können, wurde die Pumpturbine als Ersatzsystem bestehend aus Pumpe und Turbine simuliert, die über verschiedene Start- und Stopzeiten nacheinander eingesetzt werden können, wobei das jeweiligen An- und Abfahren den Vorgaben aus dem maschinenbaulichen Entwurf genügt. Das Wasserschloss wurde gemäß der Bestandszeichnungen über seine Höhen – Volumenbeziehung in Hammer abgebildet. Abbildung 10 zeigt den Kopf (links) und Fuß (rechts) des Wasserschlosses, mit den Höhenangaben, beide sind über den Schacht mit dem Durchmesser von 10,1 m verbunden [Q7]. Für den maximal zulässigen Aufschwinger und den minimalen Abschwinger gelten folgende Grenzwerte:

- Aufschwinger: Mit einem gewählten Freibord von 3 m und einer Höhenkote der Eingangstür des Wasserschlosses von **674,84 m ü. NN** ergibt sich ein maximal zulässiger Wasserstand von 671,84 m ü. NN
- Abschwinger: Der Scheitel des Schwarzenbachstollens liegt bei 622,00 m ü. NN. Die Überdeckung sollte mindestens 5 m betragen, so dass sich ein minimaler Wasserstand von **627,00 m ü. NN** ergibt



**Abbildung 10: Wasserschloss Schwarzenbachwerk, Kopf (links) und Fuß (rechts), mit den Höhenangaben**

Anmerkung zu den Betriebswasserspiegeln an der Schwarzenbachtalsperre: es wurde von einem maximalen Stauspiegel von 668,5 m ü. NN und einem Absenkziel von 628 m ü. NN ausgegangen. Dies entspricht den derzeit vorgesehenen Betriebswasserspiegeln; tatsächlich soll das Reservoir jedoch nur in Ausnahmefällen unter 655 m ü. NN abgesenkt werden, da dies wiederum der minimale Unterwasserstand der Oberstufe ist und nur noch bei deren Außerbetriebsetzung (z.B. Revision) unterschritten werden kann.

### 2.4.1 Lastfälle

Zur Untersuchung der Wasserschlösser wurden die folgenden Standard Lastfälle untersucht, die Ergebnisse sind in der Anlage graphisch veranschaulicht.

#### 2.4.1.1 Lastfälle A: Lastannahme Turbine

LFA1: Lastannahme 100% in 15 Sekunden vom einem Wasserstand nahe dem Absenkziel von 628,0 m ü. NN. Gewählt wird Wasserschloss stationär ruhend bei 628,5 m ü. NN.

LFA2: Lastannahme 50% in 7,5 Sekunden und von 50% auf 100% in dem Moment, wenn im Wasserschloss der minimale Wasserstand herrscht.

LFA3: Lastabwurf von 100% gefolgt von einer Lastannahme von 100% in dem Moment, in dem im Schwarzenbachstollen die maximale negative Geschwindigkeit herrscht bei einem OW- Stand nahe dem Absenkziel. Wasserstand im Reservoir: gewählt 628,5 m ü. NN.

Ergebnis A Fälle: Keiner der Lastfälle

Tabelle 9 lässt genügend Überdeckungshöhe über dem Scheitel des Stollens, jedoch, wie bereits erwähnt ist ein Anfahren der Anlage bei einem Wasserstand direkt über dem Absenkziel unwahrscheinlich. Anheben des minimalen Absenkziels um ca. 5 m auf ca. 633,00 m ü. NN genügt, um ausreichend Überdeckung sicherzustellen.

**Tabelle 9: minimale Wasserspiegel bei Lastannahmen**

Lastfall	Minimalem Wasserspiegel
	m ü. NN
LFA 1	624.5
LFA 2	625.0
LFA 3	623.1

#### 2.4.1.2 Lastfälle B: Lastabwurf Turbine

LFB1: Lastabwurf 100% vom maximalem Stauziel 668,5 m ü. NN. Die ersten 40 Sekunden sind stationärer Betrieb mit stationärem Wasserspiegel im Wasserschloss bei einem Nenndurchfluss 16,4 m<sup>3</sup>/s, danach Schließen mit gebrochenem Schließgesetz in 15 Sekunden, wobei die letzten 10% über 5 Sekunden schließen.

LFB2: Lastannahme 100% gefolgt von einem Lastabwurf in dem Moment, in dem die Geschwindigkeit im Schwarzenbachstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) am höchsten ist, also während der Phase, in der das Wasserschloss aufschwingt. Dies ist nach ca. 300 Sekunden der Fall.

Ergebnis B Fälle: Keiner der Fälle führt zu einem Überschreiten des gewählten maximalen Wasserspiegels von 674,84 m ü. NN.

**Tabelle 10: Maximale Wasserspiegel nach Lastabwürfen**

Lastfall	Maximaler Wasserspiegel
	m ü. NN
LFB 1	670.1
LFB 2	670.2

#### 2.4.1.3 Lastfälle C: Lastannahme und Lastabwurf Pumpe

**LFC 1:** Pumpen-Lastabwurf 100% von einem Wasserstand nahe dem Stauziel 668,5 m ü. NN gefolgt von Pumpen-Lastannahme 100%. Die ersten 40 Sekunden sind stationärer Betrieb mit stationärem Wasserspiegel im Wasserschloss bei einem Nenndurchfluss 11,2 m<sup>3</sup>/s, danach Schließen mit gebrochenem Schließgesetz in 15 Sekunden, wobei die letzten 10% über 5 Sekunden schließen. Im Moment der minimalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) beginnt die Lastannahme.

**LFC 2:** Pumpen-Lastannahme 100% bei dem Absenkziel von 628,00 m ü. NN gefolgt von Pumpen-Lastabwurf 100%. Nach 40 Sekunden lineares Öffnen in 10 Sekunden auf einen Nenndurchfluss 11,2 m<sup>3</sup>/s. Im Moment der maximalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerk-Stollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) kommt es zum Lastabwurf mit gebrochenem Schließgesetz innerhalb von 15 Sekunden.

**Ergebnis C Fälle:** Nur der Fall LFC 2 ist kritisch, da der erste Abschwinger auf 626,00 m ü. NN abfällt. Dies kann durch Anheben des Absenkziels vermieden werden. Dieser Fall kann nicht durch eine Betriebseinschränkung vermieden werden, da ein Lastabwurf jederzeit vorkommen kann.

**Tabelle 11: Minimale und Maximale Wasserspiegel nach Lastannahmen und Lastabwürfen**

Lastfall	Maximale Wasserspiegel	Minimale Wasserspiegel
	m ü. NN	m ü. NN
LFC 1	670.7	665.0
LFC 2	630.6	626.0

#### 2.4.1.4 Lastfälle D: Umschalten von Turbinenbetrieb auf Pumpenbetrieb

**LFD 1:** Stationärer Betrieb bei 668,5 m ü. NN an der Schwarzenbachtalsperre, gefolgt von Umschalten vom Turbinenbetrieb in den Pumpbetrieb innerhalb von den dafür vorgesehenen 500 Sekunden. Die Turbinenlast wird innerhalb von 15 s (gebrogene Schließcharakteristik) von 100% auf 0% abgeworfen. 490 s nach Beginn des Lastabwurfs beginnt die Pumpe mit der Lastannahme (innerhalb von 10 s) von 0% auf 100%.

**LFD 2:** Stationärer Betrieb bei 668,5 m ü. NN an der Schwarzenbachtalsperre, gefolgt von Umschalten vom Turbinenbetrieb in den Pumpbetrieb mit Verzögerung bis zur maximalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerkstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss). Die Turbinenlast wird innerhalb von 15 s (gebrogene Schließcharakteristik) von 100% auf 0% abgeworfen. Die Lastannahme der Pumpe beginnt zu dem Zeitpunkt der maximalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerkstollen und geschieht innerhalb von 10 Sekunden von 0% auf 100%. Der ungünstigste Zeitpunkt ist in diesem Fall nach 925 s.

Ergebnis D Fälle: Es sind keine kritischen Aufschwinger zu erwarten.

**Tabelle 12: Minimale und Maximale Wasserspiegel nach Umschalten von Turbinenbetrieb auf Pumpenbetrieb**

Lastfall	Maximale Wasserspiegel m ü. NN	Minimale Wasserspiegel m ü. NN
LFD 1	670.1	665.5
LFD 2	671.3	665.5

#### 2.4.1.5 Lastfälle E: Umschalten von Pumpbetrieb auf Turbinenbetrieb

LFE 1: Stationärer Betrieb bei 628,5 m ü. NN an der Schwarzenbachtalsperre, gefolgt von Umschalten vom Pumpbetrieb in den Turbinenbetrieb innerhalb von den dafür vorgesehenen 290 Sekunden. Die Pumplast wird innerhalb von 15 s (gebrochene Schließcharakteristik) von 100% auf 0% abgeworfen. 280 s nach Beginn des Lastabwurfs beginnt die Turbine mit der Lastannahme (innerhalb von 10 s) von 0% auf 100%.

LFE 2: Stationärer Betrieb bei 628,5 m ü. NN an der Schwarzenbachtalsperre, gefolgt von Umschalten vom Pumpbetrieb in den Turbinenbetrieb mit Verzögerung bis zur minimalen Geschwindigkeit in dem Schwarzenbachwerkstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss). Die Pumplast wird innerhalb von 15 s (gebrochene Schließcharakteristik) von 100% auf 0% abgeworfen. Die Lastannahme der Pumpe beginnt zu dem Zeitpunkt der minimalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerkstollen und geschieht innerhalb von 10 s von 0% auf 100%. Der ungünstigste Zeitpunkt ist in diesem Fall nach 795 Sekunden.

Ergebnis E Fälle: Beide Lastfälle fallen unter den gewählten Mindestwasserspiegel von 627 m ü. NN ab.

**Tabelle 13: Minimale und Maximale Wasserspiegel nach Umschalten von Pumpenbetrieb auf Turbinenbetrieb**

Lastfall	Maximale Wasserspiegel m ü. NN	Minimale Wasserspiegel m ü. NN
LFE 1	629.4	623.9
LFE 2	629.4	623.1

#### 2.4.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisse der Lastfalluntersuchung und Betriebseinschränkungen

---

Zusammenfassend hat die abschätzende Untersuchung der vereinfachten Lastfälle gezeigt, dass das Wasserschloss den Anforderungen voraussichtlich gerecht werden kann, wenn man von einem Absenkziel an der Schwarzenbachtalsperre von 655,00 m ü. NN ausgeht. Kein Fall wurde identifiziert, bei dem das Wasserschloss unter den gegebenen Annahmen überlaufen könnte. Ob der Wasserweg den Anforderungen gerecht werden kann, erfordert eine detaillierte Transientenanalyse, die nicht im Leistungsumfang der Arbeitsgemeinschaft enthalten ist. Voraussetzungen und Bestandteil dieser Transientenanalyse sind:

- a) Gemessene Eingangsdaten aus dem Betrieb der Anlage, um das hydraulische Modell zu kalibrieren. Dazu zählen Durchfluss, Leistung, Wasserstände an der Schwarzenbachtalsperre und im Wasserschloss. Aus diesen Daten können die tatsächlichen lokalen und kontinuierlichen Verlustbeiwerte der Bauteile ermittelt werden, die weiterhin genutzt werden sollen, als da wären: das Einlaufbauwerk, der Schwarzenbachstollen und das Wasserschloss selbst.
- b) die Spezifikation der Anforderungen, die EnBW plant, mit der Anlage zu erfüllen sind. Für den Frequenzregelungsbetrieb als Pumpspeicherwerk, speziell in der sogenannte Primär- und Sekundärregelleistung, sind die Umschaltzeiten von Pump- in Turbinen- oder Phasenschieberbetrieb (oder umgekehrt) von entscheidender Bedeutung. Dies kann auch erfordern, dem ersten Umschaltvorgang innerhalb einer definierten Zeit einen zweiten Umschaltvorgang folgen zu lassen. Vorgaben bezüglich der Abfolge der Schaltvorgänge sind zum Beispiel eine Doppelhöckerkurve oder ähnliche Vorgaben zu den Last- und Betriebsweisenwechsel [Q6].

## 2.5 Druckstoßuntersuchung

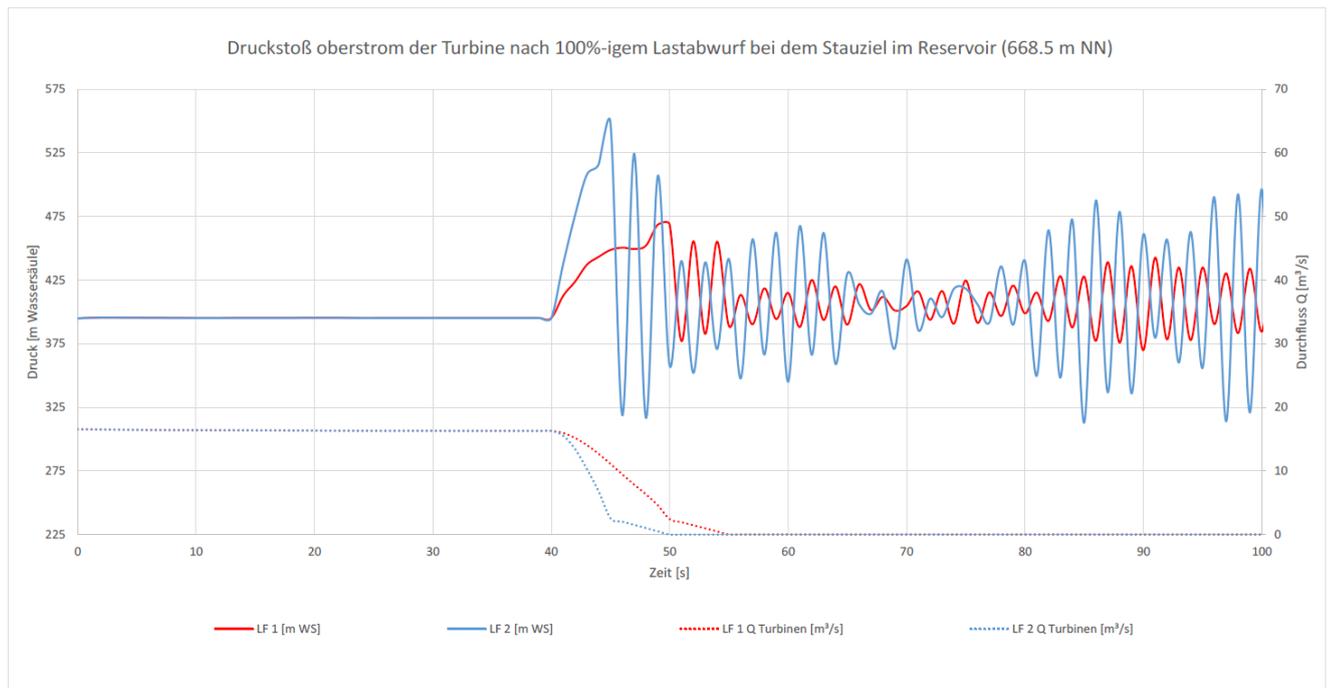
---

Im Rahmen der vorläufigen Transientenuntersuchungen wurde auch der maximale Druckstoß im Oberwasser abgeschätzt. Dieser ergibt sich bei einem Schnellschluss bei vollem Durchfluss und dem höchsten Wasserstand an der Schwarzenbachtalsperre.

LF 1: Lastabwurf 100% und Turbinen schließen in 15 Sekunden bei maximalem Stauziel von 668,5 m ü. NN im Reservoir. Die Turbinen schließen in den ersten zehn Sekunden zu 90% und in den letzten fünf Sekunden die restlichen 10%

LF 2: Lastabwurf 100% und Turbinen schließen in 10 Sekunden bei maximalem Stauziel von 668,5 m ü. NN im Reservoir. Die Turbinen schließen in den ersten fünf Sekunden zu 90% und in den letzten fünf Sekunden die restlichen 10%.

Für die beiden Lastfälle ergeben sich die folgenden maximalen Drücke direkt oberstromig der Turbine (Abbildung 11):



**Abbildung 11: Verlauf des Drucks und des Durchflusses für die beiden untersuchten Lastfälle**

- **LF 1:** 468,5 m WS (maximaler Aufschwinger im WS ist noch hinzuzurechnen; ca. 5 m)
- **LF 2:** 548,2 m WS (Aufschwinger im WS ist noch hinzuzurechnen; ca. 5 m).

Diese Werte sind niedrig im Vergleich mit anderen Anlagen, resultieren jedoch aus der ungedrosselten Bauform des Wasserschlosses.

Ebenso wurde in der vorliegenden Abschätzung die Gefahr von Makrokavitation untersucht, das heißt das Risiko, dass die Wassersäule innerhalb des Rohrs bei Schaltvorgängen abreißt. Exponiert ist besonders der obere Krümmer des Druckstollens beim Anfahren im Turbinenbetrieb und beim Abschalten im Pumpbetrieb. Bei einem Reservoirspegel von 628,5 m ü. NN wurde an dieser Stelle in mehreren Fällen kritische Unterdrücke beobachtet, wenn die Pumpe zum Stillstand kommt. Dies sollte jedoch auch noch einmal in der ausführlichen Transientenanalyse geprüft werden.

### 3. HYDRAULIK DES WASSERWEGS MURGWERK

---

Der Triebwasserweg des Murgwerk umfasst zukünftig die folgenden Bestandteile in Fließrichtung: Entnahmebauwerk des Sammelbeckens Kirschbaumwasen – Rechen – Sandfang – Murgstollen – Wasserschloss – Druckrohrleitung – Kraftwerkskaverne – Unterwasserstollen Murgwerk zum Kavernenwasserspeicher. Das System zwischen dem Entnahmebauwerk des Sammelbeckens Kirschbaumwasen und dem Wasserschloss wird in der vorliegenden Planung der Unterstufe weiter genutzt und wird rehabilitiert, wohingegen der Abschnitt zwischen dem Wasserschloss und dem Kavernenwasserspeicher vollends neu gebaut wird. Als Rehabilitierungsmaßnahmen ist besonders nennenswert die vorgesehene Betonsanierung, die voraussichtlich partiell zu einer Glättung der Innenoberfläche der wasserführenden Bauwerke beiträgt. Der vorliegende Berichtsteil beschreibt die hydraulische Bemessung der einzelnen Bestandteile.

#### 3.1 Ermittlung der Leitungsdurchmesser der Druckrohrleitung und des Unterwasserstollens Murgwerk

---

Die neugeplante Druckrohrleitung (zw. Wasserschloss und Kraftwerkskaverne) umfasst den horizontalen Stollen in Beton mit einer Länge von ca. 49,7 m, den Druckschacht mit einer Länge von ca. 160,1 m in Beton und einem weiteren stahlgepanzerten horizontalen Abschnitt von ca. 51,8 m. Der Durchmesser eines Wasserwegs wird als Kompromiss zwischen den hydraulischen Verlusten während des Betriebs, der Anlaufzeit und den Baukosten ermittelt.

Die Ermittlung des Durchmessers der beiden Abschnitte in Beton und Stahl wurde zunächst unter Zuhilfenahme von verschiedenen, bewährten empirischen Formeln [Q5] durchgeführt und anschließend wurden die bestimmten Durchmesser auf Einfachheit bei der Bauausführung überprüft. Die empirische Bemessung ist in Tabelle 14 gezeigt: unter Eingabe der bekannten Daten errechnet sich ein Innendurchmesser für den Betonstollen von 2,41 m, der aus Gründen der Baubarkeit<sup>3</sup> in dem horizontalen Bereich zwischen dem Wasserschloss und dem oberen Krümmer auf 2,9 m aufgeweitet wurde. Für den vertikalen Schacht wurde ein Durchmesser von 2,4 m gewählt. Der untere horizontale Abschnitt der Druckrohrleitung einschließlich des unteren Krümmers ist stahlgepanzert. Durch die Panzerung soll verhindert werden, dass der Beton reißt und Wasser an die Kraftwerkskaverne herantreten kann.

Wie bereits im horizontalen Bereich des Oberwasserstollens zwischen dem Wasserschloss und dem oberen Krümmer wurde der Durchmesser aus denselben Gründen auch für den Unterwasserstollen Murgwerk angewandt.

---

<sup>3</sup> Damit ergibt sich ein Außendurchmesser, der mit dem üblichen Baugerät ohne Sondergröße auffahrbar ist. Herbeischaffung von Baumaschinen mit kleinen Durchmessern wäre über die beiden kurzen Strecken (OW und UW) nicht kostengünstiger.

Tabelle 14: Bestimmung der Durchmesser des Druckschachts und -stollens

Murgwerk in Unterstufe	Murgwerk nur Turbinenbetrieb		
Entwurfs Durchfluss	$Q_A =$	14.34	m <sup>3</sup> /s
Gemittelter Stollendurchmesser Beton	$d =$	2.41	m
Druckstollen mit Betonauskleidung im Turbinenbetrieb			
Formel		$D_{opt}$	$v$
		m	m/s
ARGE-intern	$0.72 \cdot Q^{0.43}$	2.26	3.57
Fahlbusch	$0.62 \cdot Q^{0.48}$	2.23	3.68
Gordon	$0.72 \cdot Q^{0.5}$	2.73	2.46

### 3.2 Hydraulische Verlustberechnung

Die Ermittlung der hydraulischen Verluste entlang der Wasserwege für den Turbinenbetrieb erfolgte entsprechend den Grundregeln der Rohrhydraulik. Die Berechnung beinhaltet die Strecken vom Ein-/Auslauf Oberbecken bis Austritt in den Kavernenwasserspeicher. Die Reibungsverluste wurden mit Hilfe des Widerstandsbeiwerts nach COLEBROOK-WHITE berechnet:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \lg \left( \frac{2,51}{R \cdot \sqrt{f}} + \frac{k/D_s}{3,71} \right)$$

mit:  $f$  = Darcy Widerstandsfaktor, [-]

$R$  = Reynoldszahl,  $R = v \cdot D_s / \nu$  [-]

$v$  = Fließgeschwindigkeit, [m/s]

$D_s$  = Durchmesser des Wasserwegs, [m]

$\nu$  = kinematische Viskosität, [m<sup>2</sup>/s]

$k$  = Äquivalente Sandrauigkeit [m] (siehe auch Tabelle 15).

Die daraus resultierende hydraulische Verlusthöhe wurde mit der universellen Fließformel nach Darcy-Weisbach ermittelt:

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D_s \cdot 2g}$$

mit:  $h_f$  = hydraulische Verlusthöhe für Reibungsverluste [m]

$L$  = Länge des Wasserwegs [m]

$g$  = Erdbeschleunigung,  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>

Lokale Verluste wurden berücksichtigt mit:

$$h_l = \xi \cdot \frac{v^2}{2g}$$

mit:  $h_l$  = hydraulische Verlusthöhe für lokale Verluste, [m]

$\xi$  = Lokaler Verlustkoeffizient [-]

Die hydraulischen Gesamtverluste ergeben sich aus:

$$h_v = h_f + h_l$$

mit:  $h_v$  = hydraulische Gesamtverlusthöhe [m]

In Tabelle 17 (Betrieb große Maschine) und Tabelle 18 (Betrieb kleine Maschine) sind die Berechnungen für die jeweiligen Einzelverluste für jeden verlustverursachenden Querschnitt gezeigt. In der Tabelle wird zwischen Reibungsverlusten und lokalen Verlusten unterschieden. Für die Reibungsverluste ergibt sich aus dem Durchfluss  $Q$  und dem Durchmesser  $D_s$  eine Fließgeschwindigkeit  $v$ . Die Fließgeschwindigkeit ist Grundlage für die Reynoldszahl die mit Hilfe der Gleichung nach Colebrook-White den Widerstandsbeiwert  $f$  ergibt. Die Gleichung kann iterativ gelöst werden, und ist Grundlage für die Berechnung der hydraulischen Reibungsverlusthöhe, die mit Hilfe der universellen Fließformel nach Darcy-Weisbach ermittelt wird. Für die universelle Fließformel werden ebenfalls die Angaben zur Fließgeschwindigkeit  $v$ , der Länge des Wasserwegs  $L$  und des Durchmessers  $D_s$  benötigt. Dieses Vorgehen muss für jeden Verlustverursachenden Querschnitt vorgenommen werden.

Für die lokalen Verluste wird ebenfalls die Fließgeschwindigkeit  $v$  benötigt und eine Abschätzung des lokalen Verlustkoeffizienten  $\xi$ , der sich aus der Geometrie ergibt. Die jeweiligen Verlustkoeffizienten für lokale Verluste sind in Tabelle 17 und Tabelle 18 gezeigt; sie wurden internationaler Fachliteratur entnommen und beruhen auf Annahmen für vergleichbare Anlagen. Berechnet werden die hydraulischen Verluste normalerweise für den Auslegungsdurchfluss. Es ist allerdings ebenfalls möglich, dass der Durchfluss je nach Betriebsart und Fallhöhe variiert.

Im Folgenden soll auf die Berechnung und einige wichtige Verlustkoeffizienten eingegangen werden:

- Das Murgwerk verfügt über zwei Maschinen mit 5 MW ( $Q = 4,04 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und 15 MW ( $Q = 10,30 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Die hydraulische Aufteilung der Druckrohrleitung erfolgt im Hosenrohr, das kurz vor der Kraftwerkskaverne sitzt. Die Verlustberechnung erfolgt für beide Maschinen getrennt, wobei bis zum Hosenrohr der gesamte Durchfluss von ( $Q = 4,04 + 10,30 = 14,34 \text{ m}^3/\text{s}$ ) berücksichtigt wurde.
- Der Betrieb der Hausmaschine ist im normalen Betrieb der Anlage nicht vorgesehen, sondern nur während des Schwarzstarts. Daher wurde deren Durchfluss bei der Berechnung der Verluste die beim Betrieb des Murgwerk entstehen nicht berücksichtigt.
- Ein- und Auslaufverluste Wasserschloss: Das Wasserschloss ist ungedrosselt, die ober- und unterwasserseitigen Stollen münden direkt in den Schacht. Es ist davon auszugehen, dass

die Geschwindigkeitshöhen auf der in das Wasserschloss einlaufenden Seite jeweils verloren sind. Aus diesem Grund wurde auch kein Umlenkverlust durch die Umlenkung in der Ebenen zwischen den beiden Stollen angenommen. Eine Option für die Reduktion der Verluste wäre, den Ein- und Auslauf des Wasserschlosses mit einem Rohr innerhalb des Wasserschlosses zu verbinden. Das Rohr wurde mit einer Öffnung in der Firste versehen, die in Form einer Drossel als hydraulische Verbindung mit dem Wasserschloss fungieren würde und könnte dann interessant werden, wenn die abschließende transiente Untersuchung zu dem Ergebnis kommt, dass das Wasserschloss nicht mehr den Anforderungen entspricht. Die Ersparnis bei der Verlusthöhe könnte im Bereich von 0,1 bis 0,2 m liegen, je nach Ausführung.

Für die mittlere Rauigkeit ergibt sich ein Verlust von **5,89 m** für die große Maschine (Tabelle 17) und **6,67 m** für die kleine Maschine (Tabelle 18). Erwähnenswert sind die niedrigen Verluste im Murgstollen, die aus der geringen Fließgeschwindigkeit von 1,73 m/s resultieren.

Die größte Unsicherheit bei der Berechnung von Verlusten resultiert aus den kontinuierlichen Verlusten, da diese für den Bestand nur geschätzt werden können (Im Gegensatz zu den lokalen, die recht genau über die bekannte Geometrie aus Bestandszeichnungen und spezialisierten Tabellenbüchern geschätzt werden können). Deshalb wurden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die Verluste mit niedrigen, mittleren und hohen Rauigkeitsbeiwerten (jeweils getrennt für Bestand und Neuplanung) berechnet. Die Rauigkeiten  $k$  wurden mit dem 0,7-fachen und dem 1,3-fachen im Falle der großen Maschine getestet. Die Berechnung mit den nach oben und unten variierten Rauigkeiten wurde für den Turbinenbetrieb durchgeführt und das Ergebnis ist in Tabelle 16 zu sehen. Die Reduktion des  $k$ -Werts ergibt eine Abminderung der Verluste um ca. 5%, wohingegen die Erhöhung von  $k$  die Verluste um ca. 4% erhöht. Dies ist ein sehr typisches Verhalten, was durch die Nichtlinearität zu erklären ist. Die geringen Veränderungen liegen an der geringen Fließgeschwindigkeit im Murgstollen, der einen beträchtlichen Teil des Wasserweges ausmacht.

**Tabelle 15: Äquivalente Rauigkeit für Stahl- und Betonauskleidung**

		Stahlauskleidung	Betonauskleidung
Normale äquivalente Rauigkeit Neubau	$k$	0,04 mm	0,3 mm
Normale äquivalente Rauigkeit Bestand	$k$	0,1 mm	0,5 mm

**Tabelle 16: Hydraulische Energiehöhenverluste für Turbinenbetrieb**

		Turbinenbetrieb
Normale äquivalente Rauigkeit	$h_v$	5,89 m
Minimale äquivalente Rauigkeit	$h_{v,min}$	5,62 m
Maximale äquivalente Rauigkeit	$h_{v,max}$	6,11 m

Tabelle 17: Hydraulische Verluste für den Betrieb der großen Maschine

Murgwerk - Große Maschine			Entsander eine Kammer	Murgstollen I	Murgstollen II	Murgstollen III	Murgstollen IV	Murgstollen V	Druckstollen	Druckstollen	Druckstollen	Abzweig	Turbinenzulauf	Auslauf	Konus	Auslauf	Konus	Saugseite I	Saugseite II	Summe
Ablfluss	Q	m³/s	7.17	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	14.34	14.34	14.34	184
Durchmesser	D	m	6.30	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	2.90	2.40	1.90	1.90	1.40	1.25	1.90	1.90	2.90	2.90	2.90	2.90
Rauigkeit	k	mm	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.30	0.30	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.30	0.30	0.30
Rauigkeit	k	m	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0003	0.0003	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.0003	0.0003	0.0003
Länge	L	m	62.00	33.95	305.51	1697.27	1442.68	2121.59	49.96	160.14	51.82	0.90	0.90	3.00	5.50	13.50	4.25	51.37	51.37	51.37
kin Viskosität	v	m²/s	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06
Fläche A = π*(D/4)²	A	m²	31.20	8.30	8.30	8.30	8.30	8.30	6.61	4.52	2.84	2.84	1.54	1.23	2.84	2.84	6.61	6.61	6.61	6.61
Geschwindigkeit Q/A	v	m/s	0.46	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	2.17	3.17	5.06	3.63	6.69	8.39	3.63	3.63	2.17	2.17	2.17	2.17
Reynoldszahl v*d/v	Re	-	2.90E+06	5.62E+06	5.62E+06	5.62E+06	5.62E+06	5.62E+06	6.30E+06	7.61E+06	9.61E+06	6.90E+06	9.37E+06	1.05E+07	6.90E+06	6.90E+06	6.30E+06	6.30E+06	6.30E+06	6.30E+06
Reibungsfaktor	λ	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Laufender Druckverlust pro Meter	hw(lauf.)	m	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.007	0.004	0.016	0.029	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001
Laufender Druckverlust (gesamt) I*(L/D)*(v²/2g)	hv(ges)	m	0.00	0.02	0.19	1.06	0.90	1.32	0.05	0.44	0.35	0.00	0.15	0.09	0.02	0.05	0.00	0.05	0.05	4.74
Lokaler Verlustbeiwert Einlauf/Rechen etc	ζ	-	2.00																	0.02
Krümmen	β	°		145	120	120	148	167		75	75					45		55	58	
Krümmerradius	r	m		9.75	9.75	9.75	9.75	9.75		7.2	5.7					2		20	20	
	ζ	-		0.17	0.15	0.15	0.17	0.19		0.11	0.11					0.13		0.06	0.07	
Anzahl	#	-		1	1	1	1	1		1	1					1		1	1	
Stromtrennung	ζ	-		0.03	0.02	0.02	0.03	0.03		0.05	0.14					0.09		0.02	0.02	0.44
Stromvereinigung	ζ	-									0.40									0.05
Drosselklappe	ζ	-													0.10					0.10
Auslaufverlust ins Wasserschloss	ζ	-						1.00								0.17				0.17
Einlaufverlust vom Wasserschloss	ζ	-						0.15												0.15
Konus	ζ	-						0.02												0.02
Anzahl	#	-						1								0.09				2.25
Kugelschieber	ζ	-						0.00		0.01						0.06				0.03
	#	-						1		1						1				1
Diffusor + Auslauf	ζ	-											0.01			0.02				1.10
Summe	m	-																		0.02
	m	-																		5.89

Tabelle 18: Hydraulische Verluste für den Betrieb der kleinen Maschine

Murgwerk - Kleine Maschine			Entsander eine Kammer	Murgstollen I	Murgstollen II	Murgstollen III	Murgstollen IV	Murgstollen V	Druckstollen	Druckstollen	Druckstollen	Abzweig	Turbinenzulauf	Auslauf	Konus	Auslauf	Konus	Krümmen	Saugseite I	Saugseite II	Summe
Abfluss	Q	m³/s	7.17	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	14.34	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	14.34	14.34	
Durchmesser	D	m	6.30	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	2.90	2.40	1.90	0.80	0.80	0.75	1.30	1.30	1.65	1.65	2.90	2.90	
Rauigkeit	k	mm	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.30	0.30	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.30	0.30	
Rauigkeit	k	m	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0003	0.0003	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.00004	0.0003	0.0003	0.0003
Länge	L	m	62.00	33.95	305.51	1697.27	1442.68	2121.59	45.96	160.14	51.82	10.90	4.50	3.00	4.80	8.00	2.90	3.50	51.37	51.37	
kin Viskosität	v	m²/s	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06
Fläche A = π*(D/4)²	A	m²	31.20	8.30	8.30	8.30	8.30	8.30	6.61	4.52	2.84	0.50	0.50	0.44	1.33	1.33	2.14	2.14	6.61	6.61	
Geschwindigkeit Q/A	v	m/s	0.46	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	2.17	3.17	5.06	8.04	8.04	9.14	3.04	3.04	1.89	1.89	2.17	2.17	
Reynoldszahl v*d/v	Re	-	2.90E+06	5.62E+06	5.62E+06	5.62E+06	5.62E+06	5.62E+06	6.30E+06	7.61E+06	9.61E+06	6.43E+06	6.43E+06	6.86E+06	3.96E+06	3.96E+06	3.12E+06	3.12E+06	6.30E+06	6.30E+06	
Reibungsfaktor	λ	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Laufender Druckverlust pro Meter	hw(lauf.)	m	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.007	0.046	0.046	0.063	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	
Laufender Druckverlust (gesamt) I(L/D)*(v²/2g)	hw(ges)	m	0.00	0.02	0.19	1.06	0.90	1.32	0.05	0.44	0.35	0.46	0.20	0.19	0.02	0.03	0.00	0.01	0.05	0.05	5.34
Lokaler Verlustbeiwert Einlauf/Rechen etc	ζ	-	2.00																		0.02
Krümmen	β	°		145	120	120	148	167		75	75	45				45		45	55	58	
Krümmerradius	r	m		9.75	9.75	9.75	9.75	9.75		7.2	5.7	1.5				2		2.5	20	20	
Anzahl	#	-		0.17	0.15	0.15	0.17	0.19		0.11	0.11	0.09				0.11		0.11	0.06	0.07	
Stromtrennung	ζ	-		0.03	0.02	0.02	0.03	0.03		0.05	0.14	0.31				0.05		0.02	0.02	0.02	0.73
Stromvereinerung	ζ	-										0.00									0.00
Drosselklappe	ζ	-													0.07						0.07
Auslaufverlust ins Wasserschloss	ζ	-														0.25					0.12
Einlaufverlust vom Wasserschloss	ζ	-																			0.15
Konus	ζ	-	0.27						0.10												0.02
Anzahl	#	-	1.00						0.00	0.01					0.20						0.02
Kugelschieber	ζ	-	0.04						0.00	0.01					0.09						2.25
Diffusor + Auslauf	ζ	-							0.00	0.01			0.01		0.09						0.03
Summe	m	-							0.00	0.01			0.02		0.00						0.18
																					1.10
																					0.02
																					0.02
																					6.67

### 3.3 Anlaufzeit

Im Nachfolgenden soll überprüft werden, ob die Anlaufzeit  $T_a$  für den gekoppelten Wasserweg zwischen den beiden freien Oberflächen des Wasserschlosses und des Kavernenwasserspeichers ausreichend klein ist. Übersteigt die Anlaufzeit einen Grenzwert von 2,5 bis 3 Sekunden, so soll ein Triebwasserweg durch ein Wasserschloss abgekoppelt werden [Q8], was in dem vorliegenden Fall bedeuten würde, dass ein zweites Wasserschloss im Unterwasser oder eine Anpassung der Fließquerschnitte erforderlich wäre. Bei der Berechnung der Anlaufzeit werden alle direkt gekoppelten Leitungsabschnitte zwischen den nächsten beiden freien Wasseroberflächen liegen, die ober- und unterstrom der Turbine liegen, berücksichtigt.

Die Berechnung der Anlaufzeit  $T_a$  geschieht mit folgender Formel [Q8]:

$$T_a = \frac{Q_T}{g \cdot h_f} \cdot \sum_1^n \frac{l_{F,i}}{A_{F,i}}$$

- mit:  $T_a$  Anlaufzeit, [s]
- $Q_T$  stationärer, maximaler Turbinendurchfluss, [m<sup>3</sup>/s]
- $g$  Erdbeschleunigung, [m/s<sup>2</sup>]
- $h_f$  minimale Bruttofallhöhe, [m]
- $l_{F,i}$  Teillänge des Abschnitts i, [m]
- $A_{F,i}$  Rohrquerschnitt des Abschnitts i, [m<sup>2</sup>/s]

Die Anlaufzeit für den Wasserweg beträgt 0,81 Sekunden, erfahrungsgemäß kann dann beim vorliegenden Entwurf mit den gegebenen Längen und Durchmessern noch einmal 5-6% für Spirale und Saugrohr hinzukommen, so dass von einer Anlaufzeit von ca. 0,9 Sekunden auszugehen ist. Dieser Wert ist niedrig, es sind keine weitergehenden Maßnahmen wie zum Beispiel ein Unterwasserschloss nötig.

**Tabelle 19: Anlaufzeit des Wasserwegs**

Anlaufzeit						
Oberwasser Absenckziel	m asl		439.50			
Unterwasser Stauziel	m asl		301.60			
Bruttofallhöhe	m		137.90			
Stollen			UW	UW	UW	UW
Turbinen Q	Q	m <sup>3</sup> /s	14.34	14.34	14.34	14.34
Durchmesser	Ø	m	2.90	2.40	1.90	2.90
Leitungslänge	L	m	50	160	52	103
Querschnittsfläche	A	m <sup>2</sup>	6.61	4.52	2.84	6.61
Fließgeschwindigkeit	v	m/s	2.17	3.17	5.06	2.17
Länge/Fläche	$L_i/A_i$	m <sup>3</sup> /s	7.52	35.40	18.28	15.56
Anlaufzeit	t	s				0.81

### 3.4 Hydraulische Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Wasserschlosses

Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Wasserwegs kann das bestehende Wasserschloss das entscheidende Bauteil sein, das den evtl. Betrieb bei Anfahr- und Abschaltvorgängen einschränkt. Im Nachfolgenden wurde auf Basis einer Vorabschätzung geprüft, ob die Abfolge gewisser Betriebsweisen (i) zu einem Überlaufen des Wasserschlosses führen, oder (ii) einen Lufteintrag (je nach Fließrichtung in den ober- oder unterwasserseitigen Stollen) verursachen kann, da der Wasserstand zu tief abfällt. Dabei ist auch zu klären, ob dies in allen Bereichen des zulässigen maximalen und minimalen Wasserstands im Sammelbecken Kirschbaumwasen geschehen kann, oder nur in Bereichen.

Die Leistungsfähigkeit des Wasserschlosses wurde in einer vorläufigen transienten Abschätzung überprüft. Dazu wurde die kommerzielle Software „Hammer“ von „Bentley Systems“ genutzt. Das Programm simuliert die transienten Vorgänge in einem Leitungssystem (Drucksystem). Es basiert auf der Charakteristiken-Methode und wird in zahlreichen internationalen Großprojekten erfolgreich eingesetzt. Das hydraulische System des Wasserwegs wurde wie in Abbildung 12 schematisiert dargestellt, umgesetzt.

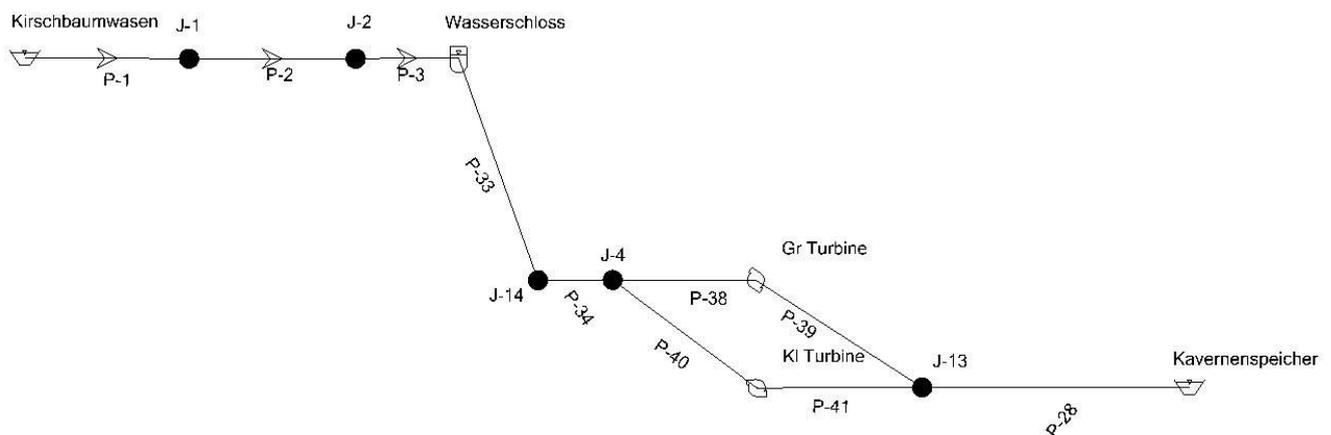


Abbildung 12: Schematischer Wasserweg des Murgwerk wie in HAMMER modelliert

Um verschiedene Lastfälle untersuchen zu können, wurden die beiden Turbinen simuliert, wobei das jeweilige An- und Abfahren den Vorgaben aus dem maschinenbaulichen Entwurf genügt. Das Wasserschloss wurde gemäß der Bestandszeichnungen über seine Höhen – Volumenbeziehung in Hammer abgebildet. Abbildung 13 zeigt den Kopf (links) und Fuß (rechts) des Wasserschlosses, mit den Höhenangaben, beide sind über den Schacht mit dem Durchmesser von 15,0 m und 12,0 m verbunden [Q9]. Für den maximal zulässigen Aufschwinger und den minimalen Abschwinger gelten folgende Grenzwerte:

- Aufschwinger: Mit einem gewählten Freibord von 3 m und einer Höhenkote der Eingangstür des Wasserschlosses von **454,6 m ü. NN** ergibt sich ein maximal zulässiger Wasserstand von 451,6 m ü. NN.
- Abschwinger: Der Scheitel des MURGWERK-Stollens liegt bei 430,50 m ü. NN. Die Überdeckung sollte mindestens 5 m betragen, so dass sich ein minimaler Wasserstand von **435,50 m ü. NN** ergibt.

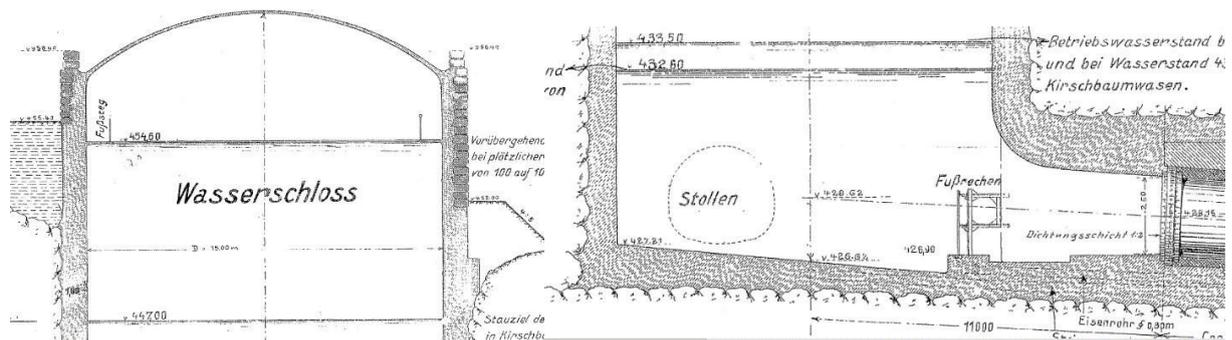


Abbildung 13: Wasserschloss MURGWERK, Kopf (links) und Fuß (rechts), mit den Höhenangaben

### 3.4.1 Lastfälle

Zur Untersuchung der Wasserschlösser wurden die folgenden Standard Lastfälle untersucht, die Ergebnisse sind auch graphisch veranschaulicht.

#### 3.4.1.1 Lastfälle A: Lastannahme Turbine (Abbildung 14)

**LFA 1:** Lastannahme 100% in 15 Sekunden vom einem Wasserstand nahe dem Absenkziel von 439,5 m ü. NN. Gewählt wird Wasserschloss stationär ruhend bei selbigem Wasserstand. Gewählt: 440,0 m ü. NN. Minimaler Wasserspiegel: 430,00 m ü. NN.

**LFA 2a:** Lastannahme 30% in 15 Sekunden und von 30% auf 100% (15 Sekunden) in dem Moment, wenn im Murgstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) die minimale Geschwindigkeit herrscht bei einem OW-Stand nahe dem Absenkziel (Gewählt: 440,0 m ü. NN). Dieser Lastfall repräsentiert das Anfahren der kleinen Turbine gefolgt von dem Anfahren der großen Turbine im ungünstigsten Zeitpunkt. Minimaler Wasserspiegel: 430,00 m ü. NN.

**LFA 2b:** Lastannahme 70% in 15 Sekunden und von 70% auf 100% (15 Sekunden) in dem Moment, wenn im Murgstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) die minimale Geschwindigkeit herrscht bei einem OW-Stand nahe dem Absenkziel. Gewählt: 440,0 m ü. NN. Dieser Lastfall repräsentiert das Anfahren der großen Turbine gefolgt von dem Anfahren der kleinen Turbine im ungünstigsten Zeitpunkt. Minimaler Wasserspiegel: 431,70 m ü. NN.

**LFA 3a:** Lastabwurf von 100% gefolgt von einer Lastannahme von 30% in 15 Sekunden in dem Moment, wenn im Murgstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) die maximale negative Geschwindigkeit herrscht bei einem OW-Stand nahe dem Absenkziel (Gewählt: 440,0 m ü. NN). Dieser Lastfall repräsentiert das Anfahren der kleinen Turbine im ungünstigsten Zeitpunkt nach einem Lastabwurf von 100%. Minimaler Wasserspiegel: 430,10 m ü. NN.

**LFA 3b:** Lastabwurf von 100% gefolgt von einer Lastannahme von 70% in 15 Sekunden in dem Moment, wenn im Murgstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) die maximale negative Geschwindigkeit herrscht bei einem OW-Stand nahe dem Absenkziel (Gewählt: 440,0 m ü. NN). Dieser Lastfall repräsentiert das Anfahren der großen Turbine im ungünstigsten Zeitpunkt nach einem Lastabwurf von 100%. Minimaler Wasserspiegel: 430,00 m ü. NN.

**Ergebnis A Fälle:** Keiner der untersuchten Anfahrlastfälle erfüllt die oben definierten Kriterien, ein Absinken des Wasserspiegels unter die Stollenfirse des Murgstollen im Wasserschloss ist wahr-

scheinlich. Daraus ergibt sich eine Betriebseinschränkung bei tiefen Wasserständen im Sammelbecken Kirschbaumwasen, die ein langsames und schrittweises Hochfahren der Maschinen mit einer Schrittweite von beispielsweise 20 – 30% des Durchflusses nach beinhaltet, oder ein Anheben des minimalen Absenkziels oder den bereits diskutierten Einbau einer Drossel im Wasser-schloss.

Die limitierte hydraulische Leistungsfähigkeit des Murgwasserweges bei niedrigen Wasserständen im Sammelbecken Kirschbaumwasen ist jedoch eine bekannte Limitierung, die auch im jetzigen Kraftwerksbetrieb durch Betriebseinschränkungen beherrscht wird. Aufgrund der verringerten Ausbaumassermenge des neuen Murgwerks ergibt sich zukünftig eine Verbesserung der hydraulischen Situation.

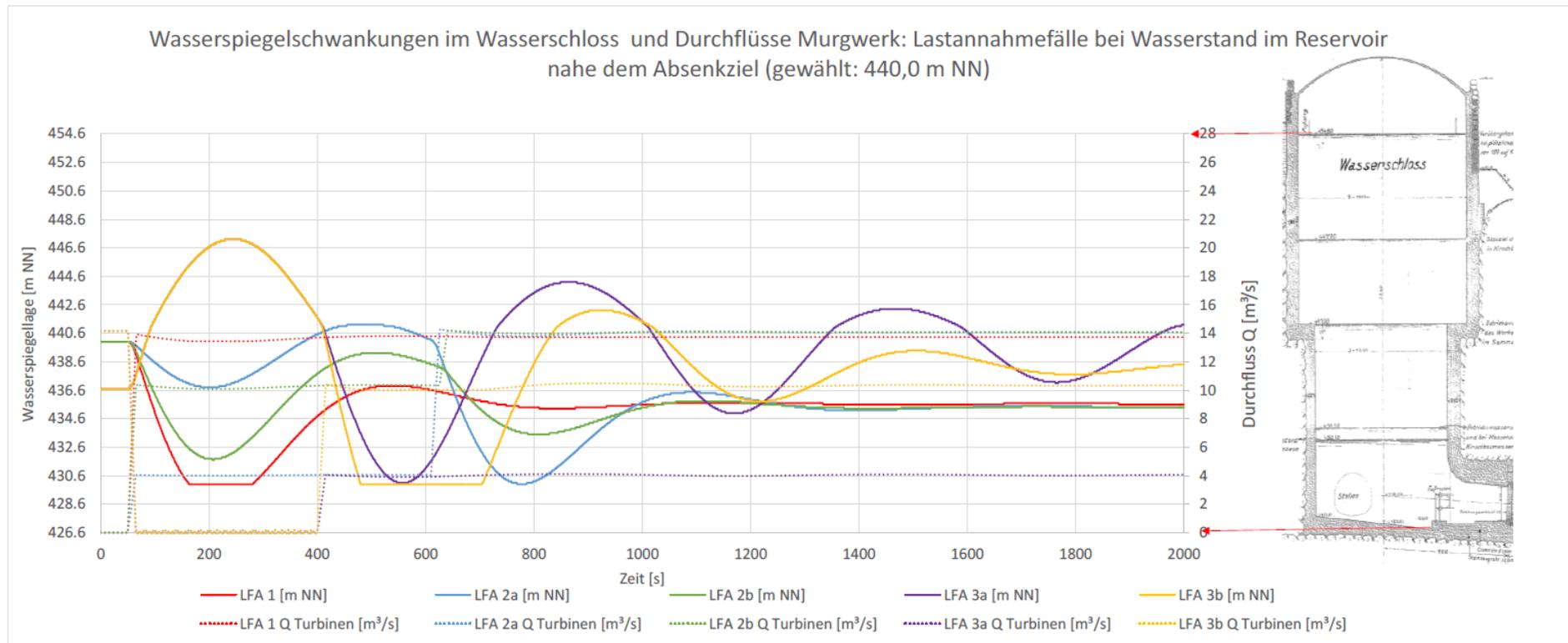


Abbildung 14: Wasserspiegelschwankungen im Wasserschloss Murgwerk während der Anfahrlastfälle

### 3.4.1.2 Lastfälle B: Lastabwurf Turbine (Abbildung 15)

---

LFB 1: Lastabwurf 100% bei maximalem Stauziel von 447,0 m ü. NN im Reservoir. Die ersten 50 Sekunden sind stationärer Betrieb mit stationärem Wasserspiegel im Wasserschloss bei einem Nenndurchfluss von 14,3 m<sup>3</sup>/s, danach Schließen mit gebrochenem Schließgesetz in 15 Sekunden, wobei die letzten 10% über 5 Sekunden schließen. Max WSP: 454,00 m ü. NN.

LFB 2a: Lastannahme 30% in 15 Sekunden und von 30% auf 100% (15 Sekunden) in dem Moment, wenn im Murgstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) die minimale Geschwindigkeit herrscht bei Stauziel im Reservoir, gefolgt von einem Lastabwurf 100% in dem Moment, in dem die Geschwindigkeit im Murgstollen am höchsten ist, also während der Phase, in der das Wasserschloss aufschwingt. Dieser Lastfall repräsentiert einen Lastabwurf im ungünstigsten Zeitpunkt nach einem bereits ungünstig gestaffelten Anfahren der Turbinen (erst die kleine dann die große). Max WSP: 453,90 m ü. NN.

LFB 2b: Lastannahme 70% in 15 Sekunden und von 70% auf 100% (15 Sekunden) in dem Moment, wenn im Murgstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) die minimale Geschwindigkeit herrscht bei Stauziel im Reservoir, gefolgt von einem Lastabwurf 100% in dem Moment, in dem die Geschwindigkeit im Murgstollen am höchsten ist, also während der Phase, wenn das Wasserschloss aufschwingt. Dieser Lastfall repräsentiert einen Lastabwurf im ungünstigsten Zeitpunkt nach einem bereits ungünstig gestaffelten Anfahren der Turbinen (erst die große dann die kleine). Max WSP: 453,40 m ü. NN.

Ergebnis B Fälle: Die Aufschwinger sämtlicher Lastfälle nähern sich dem oberen Rand des Schachtes an und unterschreiten den gewählten sicheren Freibord.

### 3.4.1.3 Weitergehende Untersuchungen

---

Ob der Wasserweg den Anforderungen gerecht werden kann, erfordert eine detaillierte Transientenanalyse, die nicht im Leistungsumfang der Arbeitsgemeinschaft enthalten ist. Voraussetzungen und Bestandteil dieser Transientenanalyse sind gemessene Eingangsdaten aus dem Betrieb der Anlage, um das hydraulische Modell zu kalibrieren. Dazu zählen Durchfluss, Leistung, Wasserstände im Sammelbecken Kirschbaumwasen und im Wasserschloss. Aus diesen Daten können die tatsächlichen lokalen und kontinuierlichen Verlustbeiwerte der Bauteile ermittelt werden, die weiterhin genutzt werden sollen, als da wären: das Einlaufbauwerk, der Murgstollen und das Wasserschloss selbst.

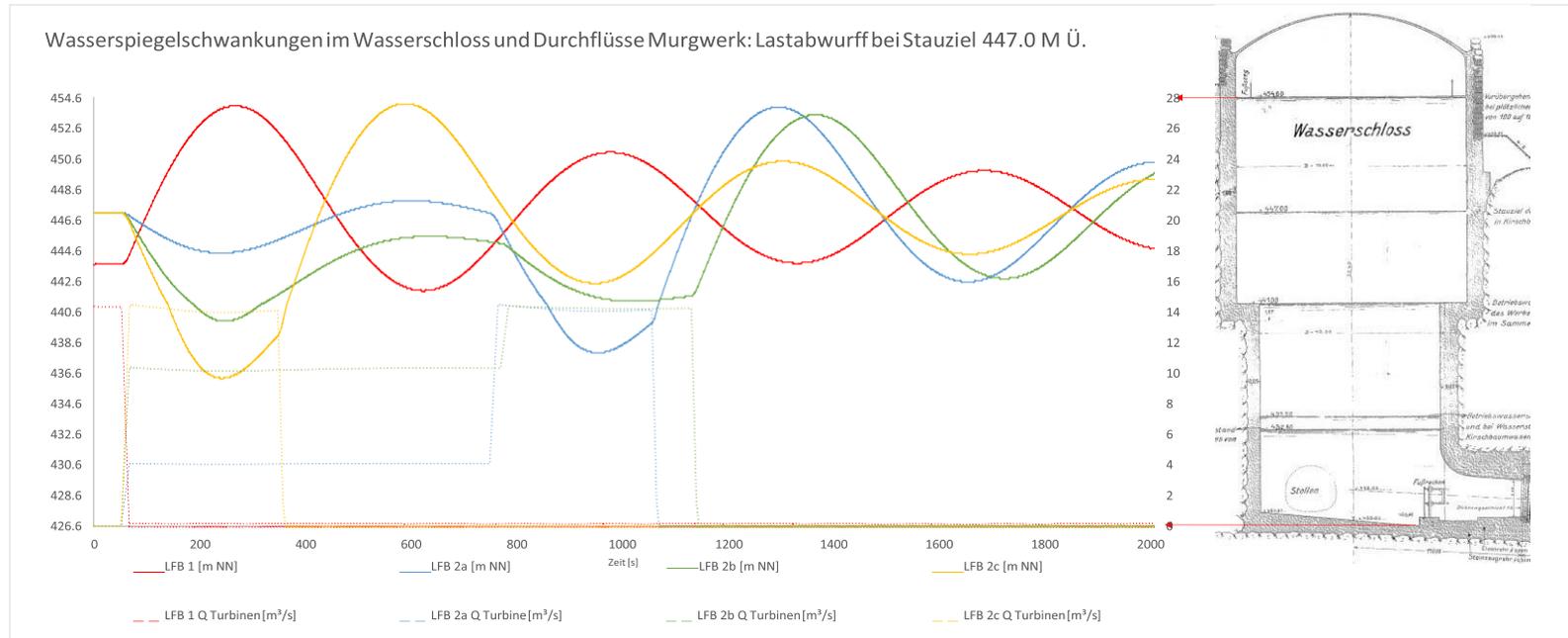


Abbildung 15: Wasserspiegelschwankungen im Wasserschloss Murgwerk während der Anfahrlastfälle

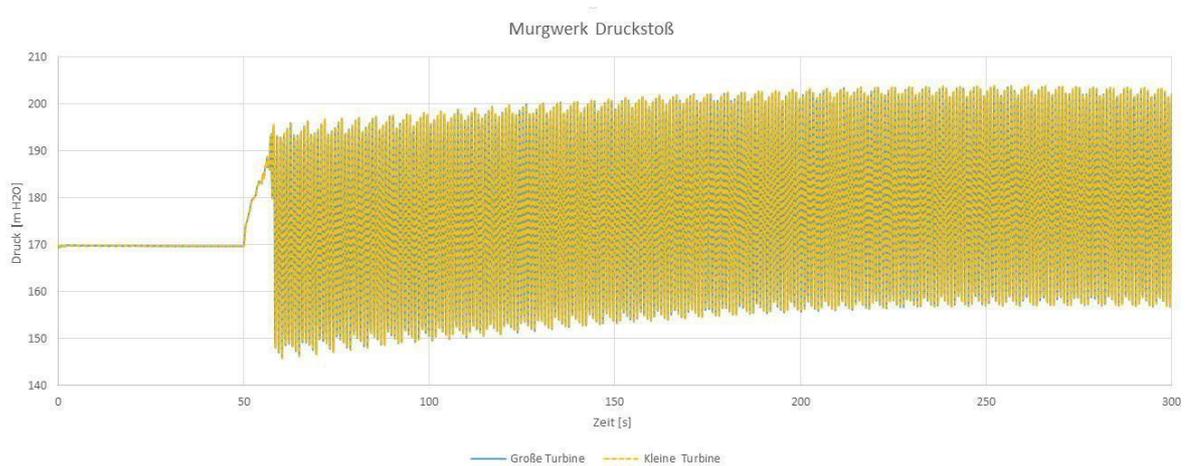
### 3.5 Druckstoßuntersuchung

Im Rahmen der vorläufigen Transientenuntersuchungen wurde auch der maximale Druckstoß im Oberwasser abgeschätzt. Dieser ergibt sich bei einem Schnellschluss (in 8 Sekunden) bei vollem Durchfluss beider Maschinen und dem höchsten Wasserstand im Sammelbecken Kirschbaumwasen (447,0 m ü. NN).

Bei einem statischen Druck von  $447,00 - 273,0 = 174,0$  m ergeben sich folgende Druckanstiege (Kote 273,0 bezieht sich auf Maschinenachse):

- Maximum zu Beginn des Druckstoßes 195,4 m ca. 15%
- Am Maximalwert des Aufschwingers 203,6 m ca. 17% Erhöhung

Diese Werte sind niedrig im Vergleich mit anderen Anlagen, resultieren jedoch aus der ungedrosselten Bauform des Wasserschlosses.



**Abbildung 16: Verlauf des Drucks und des Durchflusses für die beiden untersuchten Lastfälle**

## 4. ANHANG

---

### 4.1 A1 WASSERWEG SCHWARZBACHWERK, LASTFÄLLE

---

#### 4.1.1 Lastfälle A: Lastannahme Turbine

---

LFA1: Lastannahme 100% in 15 Sekunden vom einem Wasserstand nahe dem Absenkziel von 628,0 m ü. NN. Gewählt wird Wasserschloss stationär ruhend bei 628,5 m ü. NN.

LFA2: Lastannahme 50% in 7,5 Sekunden und von 50% auf 100% in dem Moment, wenn im Wasserschloss der minimale Wasserstand herrscht.

LFA3: Lastabwurf von 100% gefolgt von einer Lastannahme von 100% in dem Moment, in dem im Schwarzenbachstollen die maximale negative Geschwindigkeit herrscht bei einem OW- Stand nahe dem Absenkziel. Wasserstand im Reservoir: gewählt 628,5 m ü. NN.

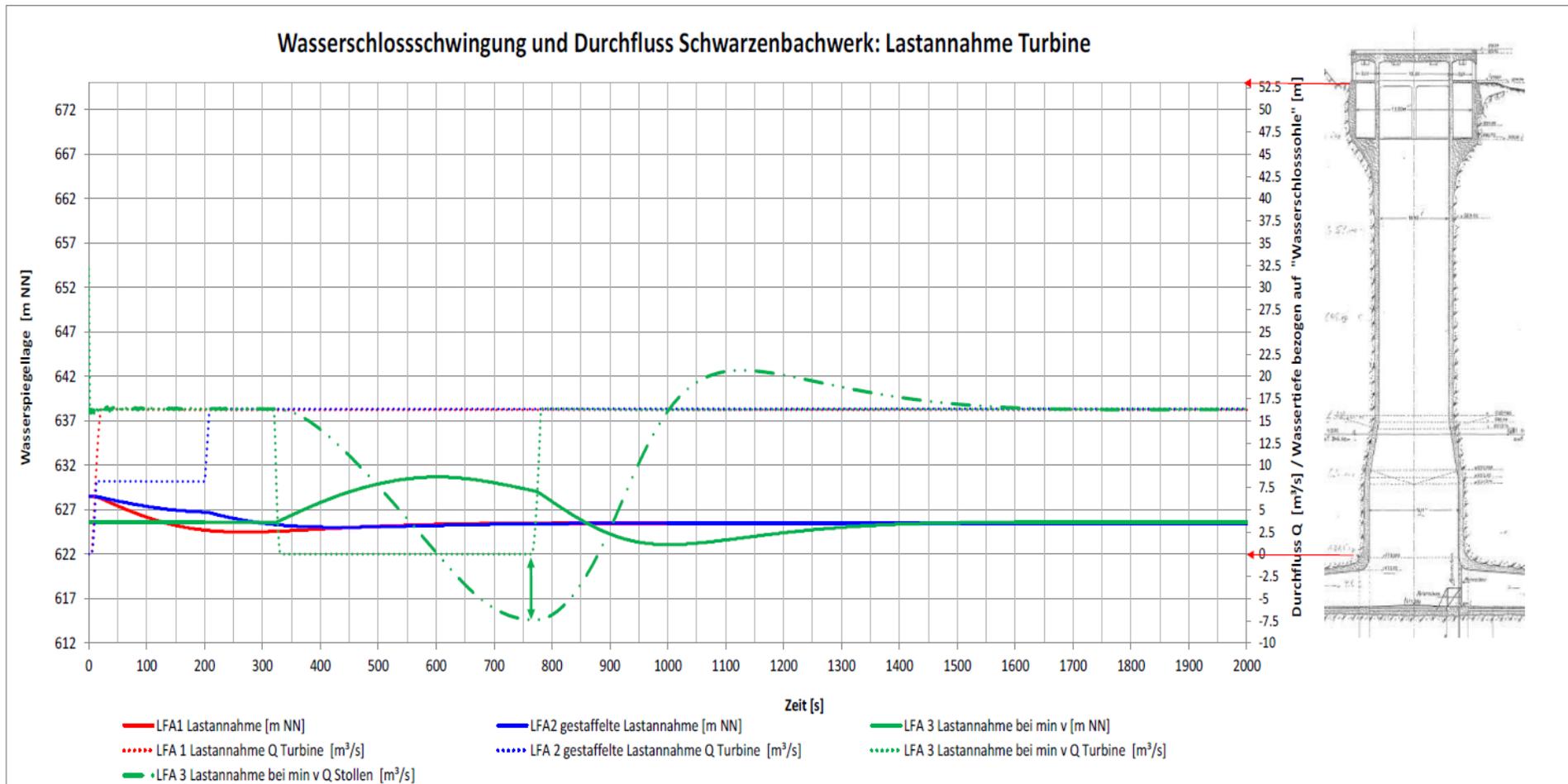


Abbildung 17: Lastfälle A: Lastabwurf Turbine

#### 4.1.2 Lastfälle B: Lastannahme und Lastabwurf Turbine

---

LFB1: Lastabwurf 100% vom maximalen Stauziel 668,5 m ü. NN. Die ersten 40 Sekunden sind stationärer Betrieb mit stationärem Wasserspiegel im Wasserschloss bei einem Nenndurchfluss 16,4 m<sup>3</sup>/s, danach Schließen mit gebrochenem Schließgesetz in 15 Sekunden, wobei die letzten 10% über 5 Sekunden schließen.

LFB2: Lastannahme 100% gefolgt von einem Lastabwurf in dem Moment, in dem die Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerkstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) am höchsten ist, also während der Phase, in der das Wasserschloss aufschwingt. Dies ist nach ca. 300 Sekunden der Fall.

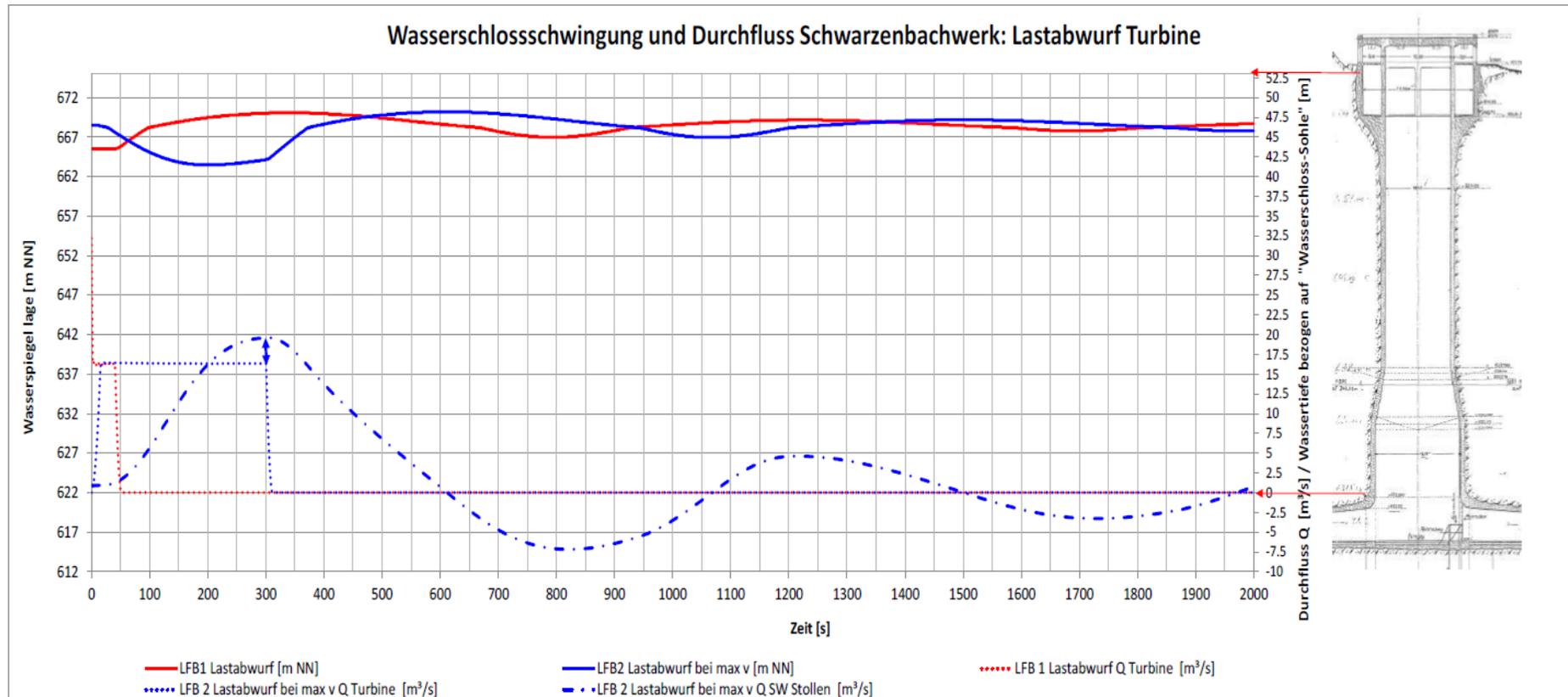


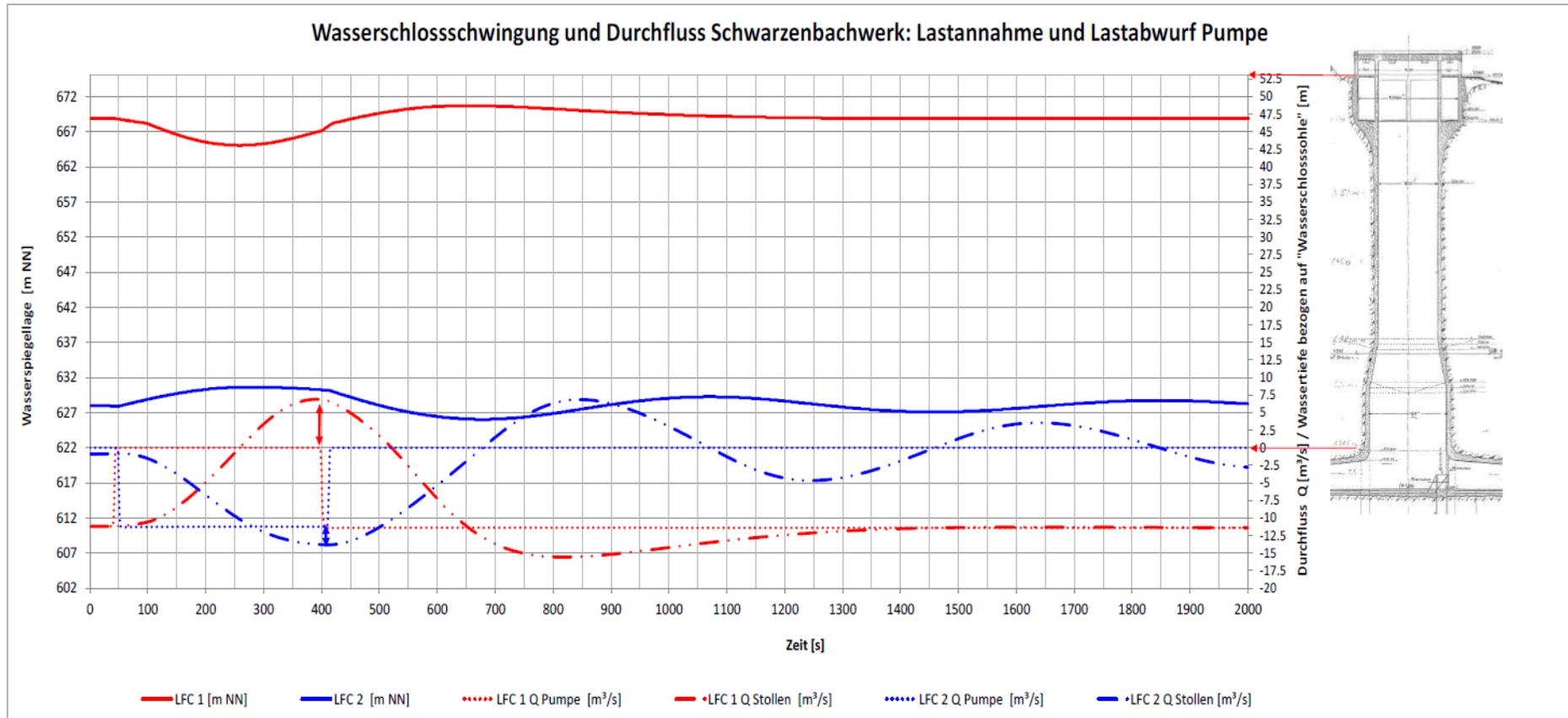
Abbildung 18: Lastfälle B: Lastabwurf Turbine

### 4.1.3 Lastfälle C: Lastannahme und Lastabwurf Pumpe

---

LFC 1: Pumpen-Lastabwurf 100% von einem Wasserstand nahe dem Stauziel 668,5 m ü. NN gefolgt von Pumpen-Lastannahme 100%. Die ersten 40 Sekunden sind stationärer Betrieb mit stationärem Wasserspiegel im Wasserschloss bei einem Nenndurchfluss 11,2 m<sup>3</sup>/s, danach Schließen mit gebrochenem Schließgesetz in 15 Sekunden, wobei die letzten 10% über 5 Sekunden schließen. Im Moment der minimalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerkstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) beginnt die Lastannahme.

LFC 2: Pumpen-Lastannahme 100% bei dem Absenkziel von 628,00 m ü. NN gefolgt von Pumpen-Lastabwurf 100%. Nach 40 Sekunden lineares Öffnen in 10 Sekunden auf einen Nenndurchfluss 11,2 m<sup>3</sup>/s. Im Moment der maximalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerkstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss) kommt es zum Lastabwurf mit gebrochenem Schließgesetz innerhalb von 15 Sekunden.



**Abbildung 19: Lastfälle C: Lastabwurf Pumpe**

#### 4.1.4 Lastfälle D: Umschalten von Turbinenbetrieb auf Pumpenbetrieb

---

LFD 1: Stationärer Betrieb bei 668,5 m ü. NN an der Schwarzenbachtalsperre, gefolgt von Umschalten vom Turbinenbetrieb in den Pumpbetrieb innerhalb von den dafür vorgesehenen 500 Sekunden. Die Turbinenlast wird innerhalb von 15 s (gebrochene Schließcharakteristik) von 100% auf 0% abgeworfen. 490 s nach Beginn des Lastabwurfs beginnt die Pumpe mit der Lastannahme (innerhalb von 10 s) von 0% auf 100%.

LFD 2: Stationärer Betrieb bei 668,5 m ü. NN an der Schwarzenbachtalsperre, gefolgt von Umschalten vom Turbinenbetrieb in den Pumpbetrieb mit Verzögerung bis zur maximalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerkstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss). Die Turbinenlast wird innerhalb von 15 s (gebrochene Schließcharakteristik) von 100% auf 0% abgeworfen. Die Lastannahme der Pumpe beginnt zu dem Zeitpunkt der maximalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerkstollen und geschieht innerhalb von 10 Sekunden von 0% auf 100%. Der ungünstigste Zeitpunkt ist in diesem Fall nach 925 s.

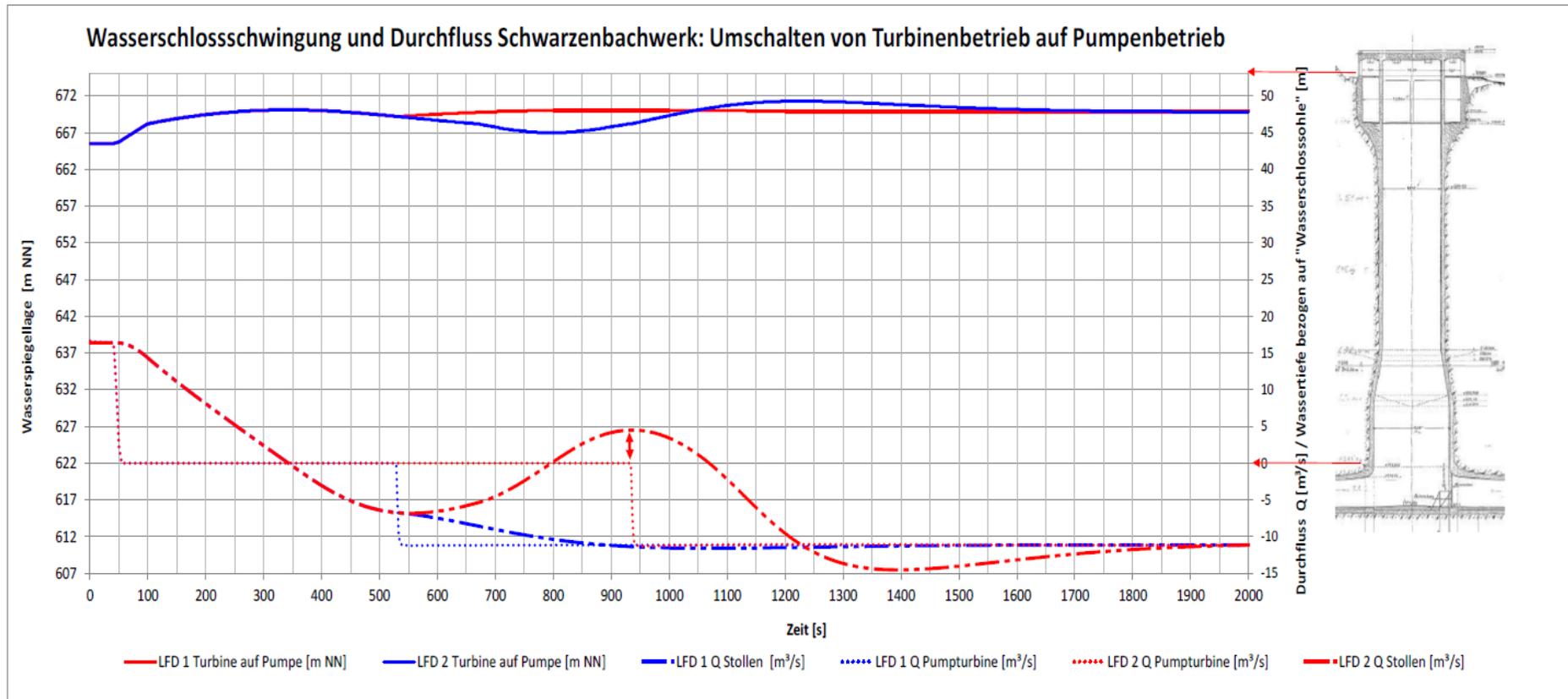


Abbildung 20: Lastfälle D: Umschalten von Turbinenbetrieb auf Pumpbetrieb

#### 4.1.5 Lastfälle E: Umschalten von Pumpbetrieb auf Turbinenbetrieb

---

LFE 1: Stationärer Betrieb bei 628,5 m ü. NN an der Schwarzenbachtalsperre, gefolgt von Umschalten vom Pumpbetrieb in den Turbinenbetrieb innerhalb von den dafür vorgesehenen 290 Sekunden. Die Pumplast wird innerhalb von 15 s (gebrochene Schließcharakteristik) von 100% auf 0% abgeworfen. 280 s nach Beginn des Lastabwurfs beginnt die Turbine mit der Lastannahme (innerhalb von 10 s) von 0% auf 100%.

LFE 2: Stationärer Betrieb bei 628,5 m ü. NN an der Schwarzenbachtalsperre, gefolgt von Umschalten vom Pumpbetrieb in den Turbinenbetrieb mit Verzögerung bis zur minimalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerkstollen (zwischen Reservoir und Wasserschloss). Die Pumplast wird innerhalb von 15 s (gebrochene Schließcharakteristik) von 100% auf 0% abgeworfen. Die Lastannahme der Pumpe beginnt zu dem Zeitpunkt der minimalen Geschwindigkeit im Schwarzenbachwerkstollen und geschieht innerhalb von 10 s von 0% auf 100%. Der ungünstigste Zeitpunkt ist in diesem Fall nach 795 Sekunden.

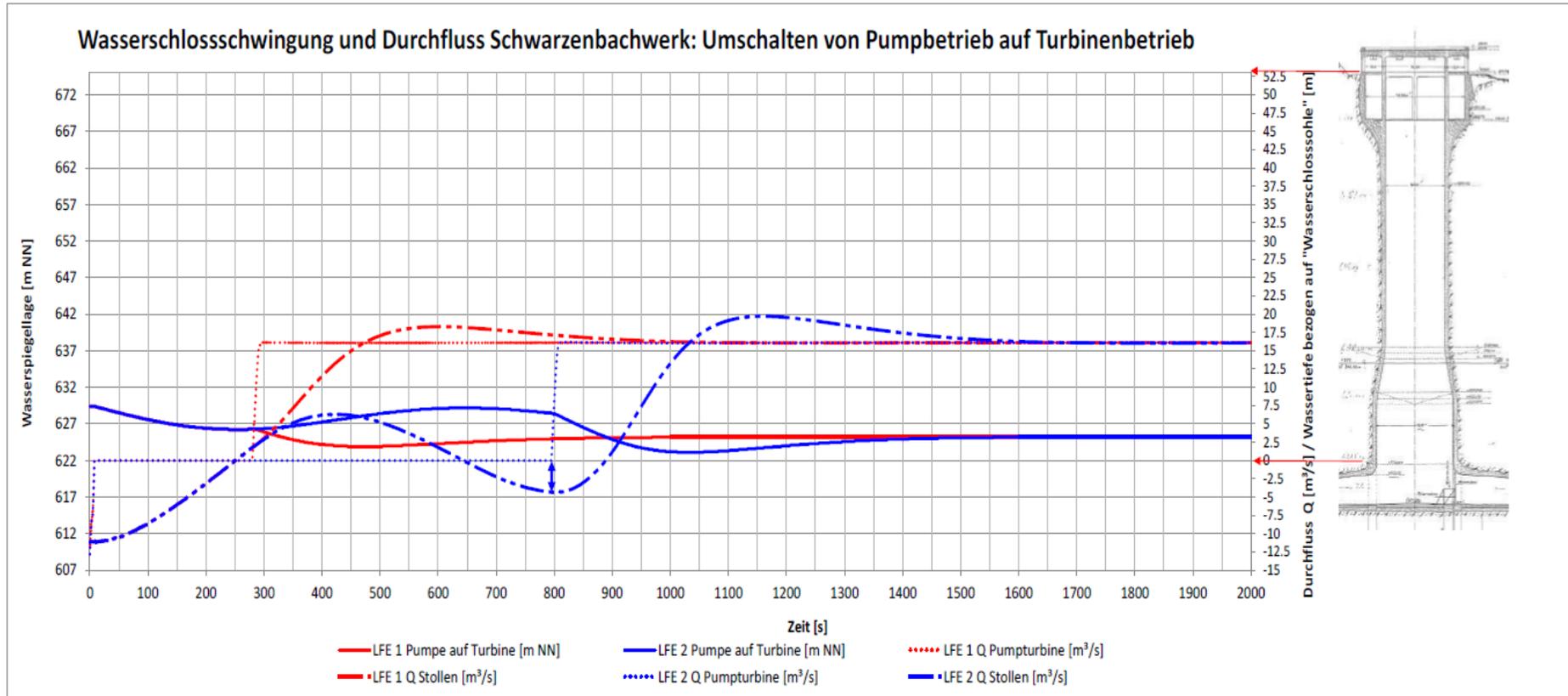


Abbildung 21: Lastfälle E: Umschalten von Pumpbetrieb auf Turbinenbetrieb