

9. PRAKTIKERKONFERENZ GRAZ

# OPTIMIERUNG DES WASSERSCHLOSSES UND DER WASSERWEGE FÜR EIN PUMPSPEICHERKRAFTWERK

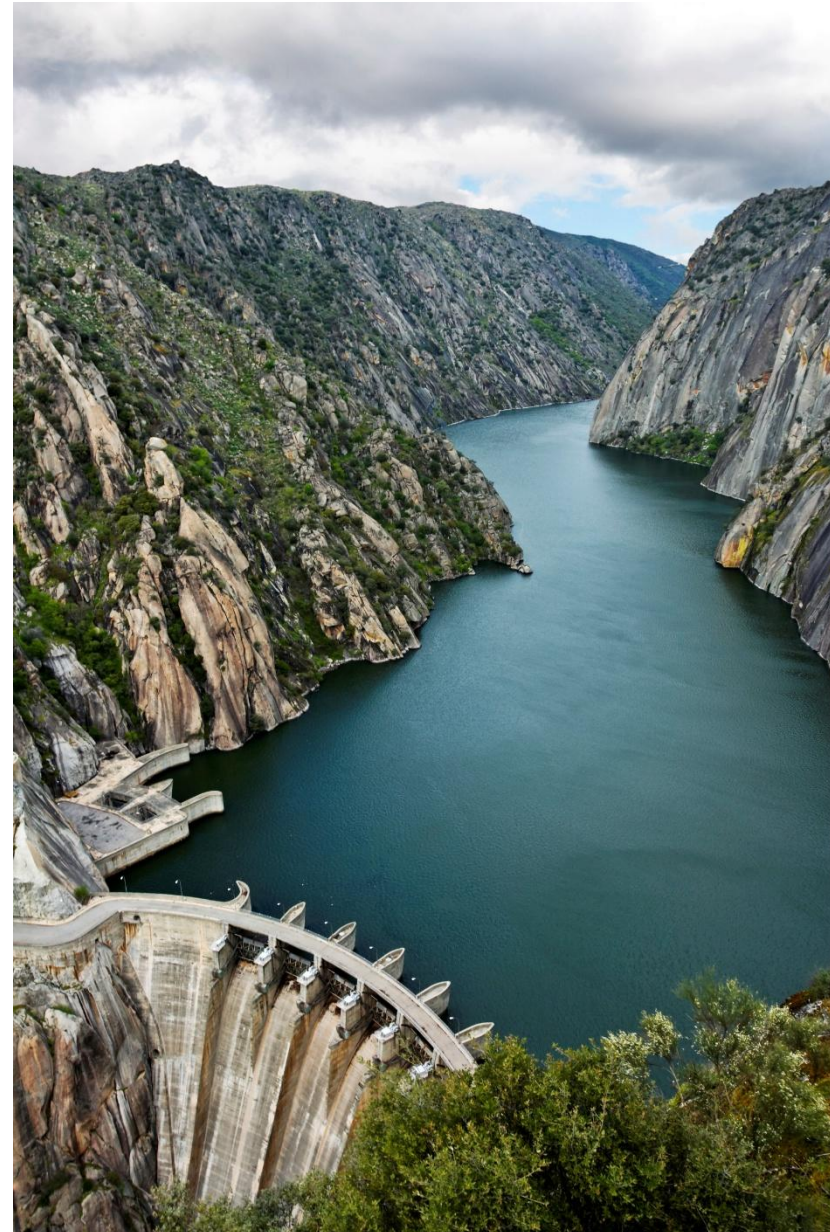
RICHTER / SAURWEIN

17.09.2025

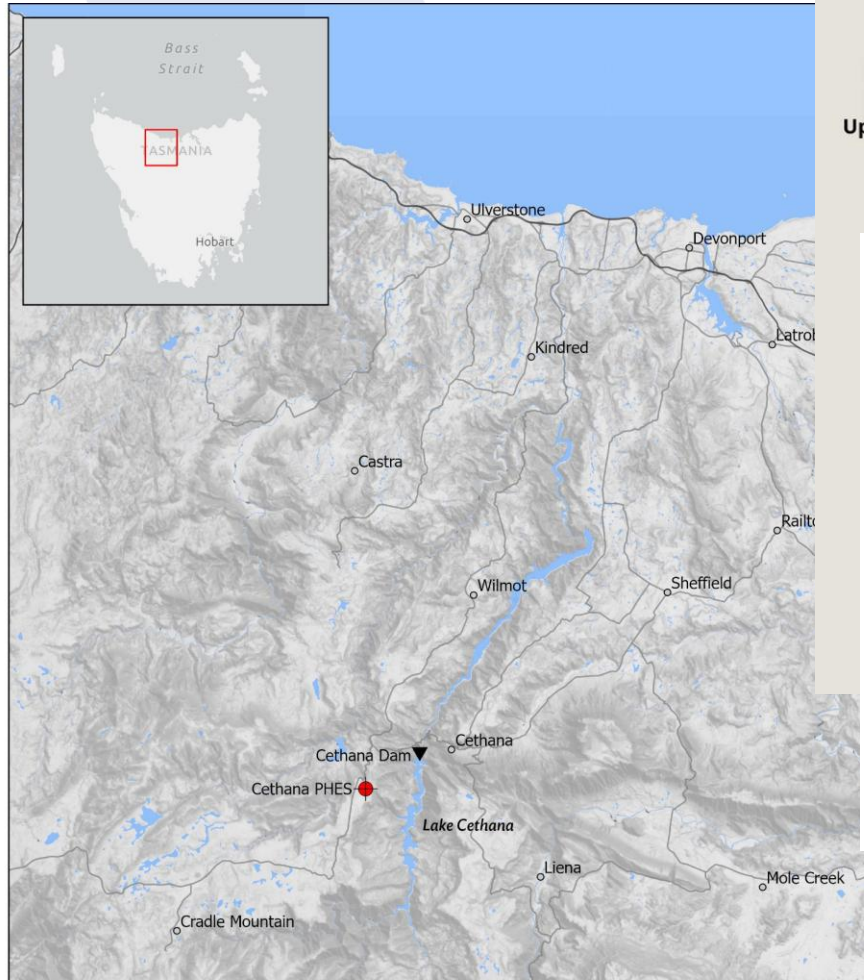


# INHALT

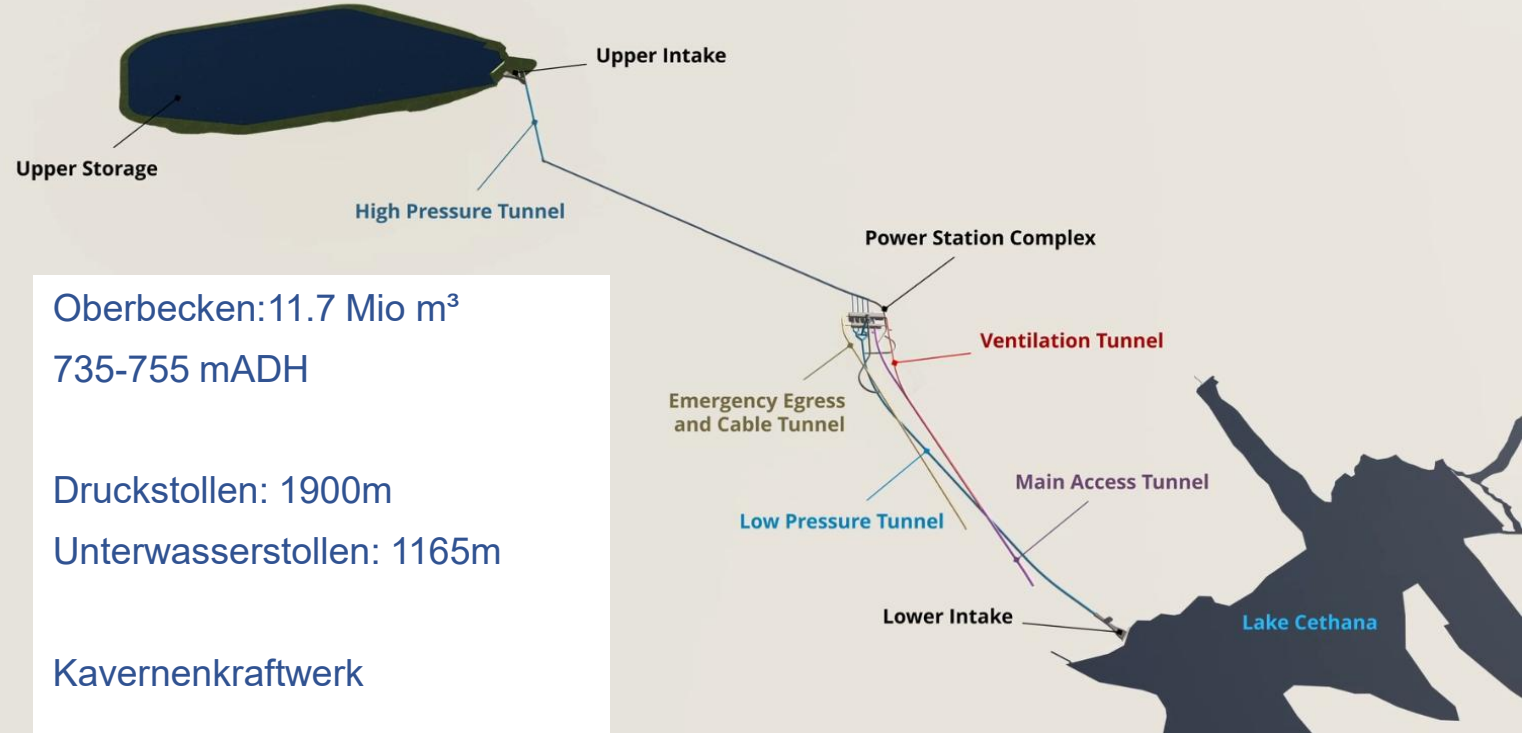
- PROJEKTVORSTELLUNG
- WORKFLOW
- RESULTATE & FINDINGS
- OPTIMIERUNG WASSERSCHLOSS
- CFD WASSERSCHLOSS



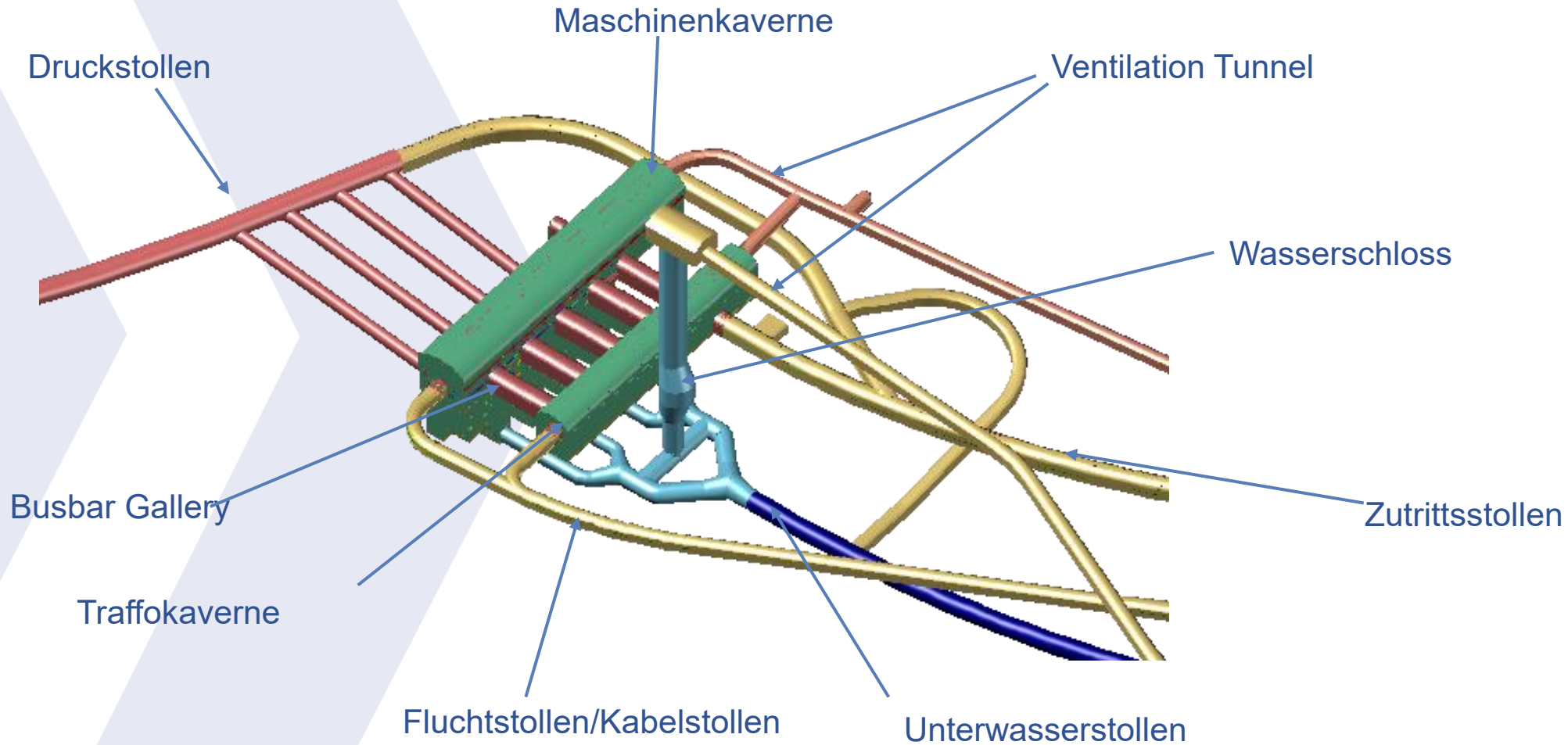
# PROJEKTGEBIET PHES CETHANA



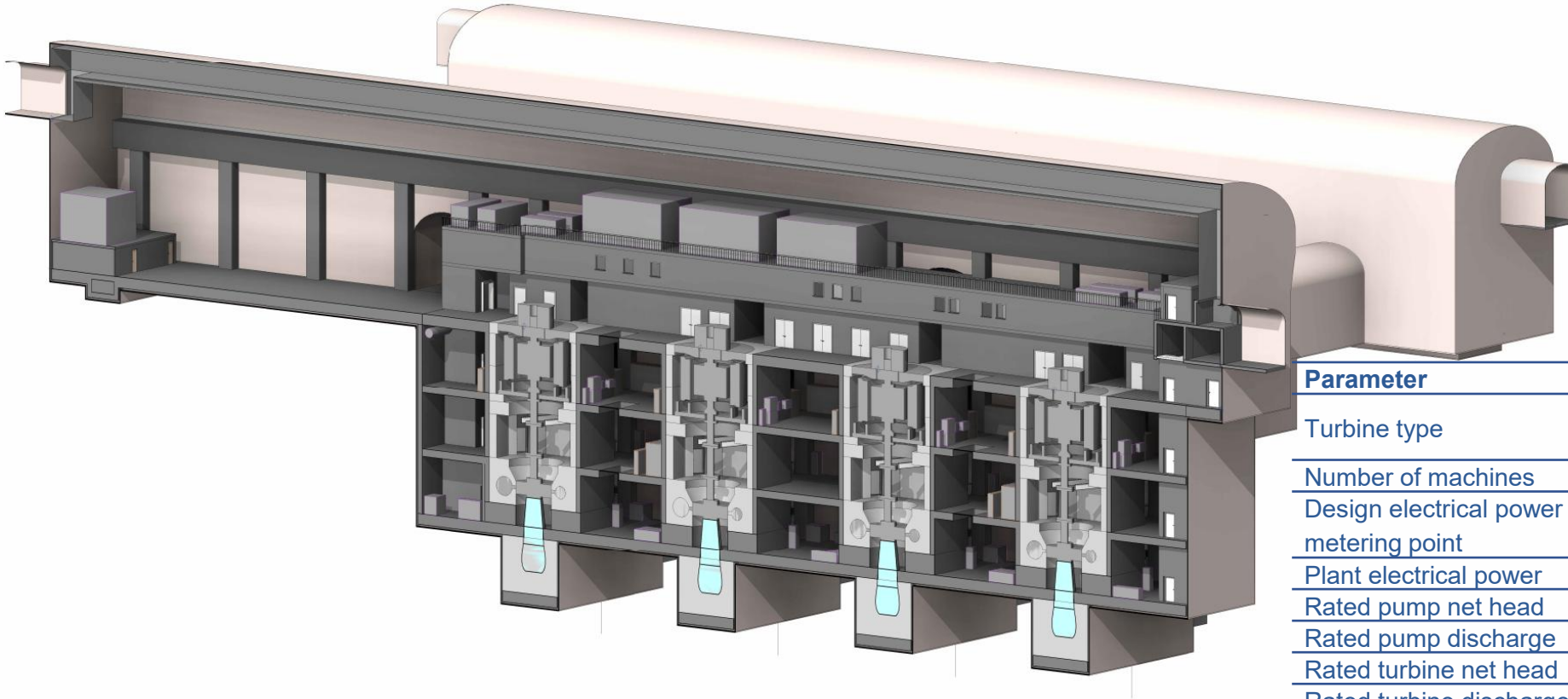
Creative Commons BY 3.0 AU © State of Tasmania, DPIPW, Esri, TomTom, Garmin, FAO, NOAA, USGS



# POWER STATION COMPLEX

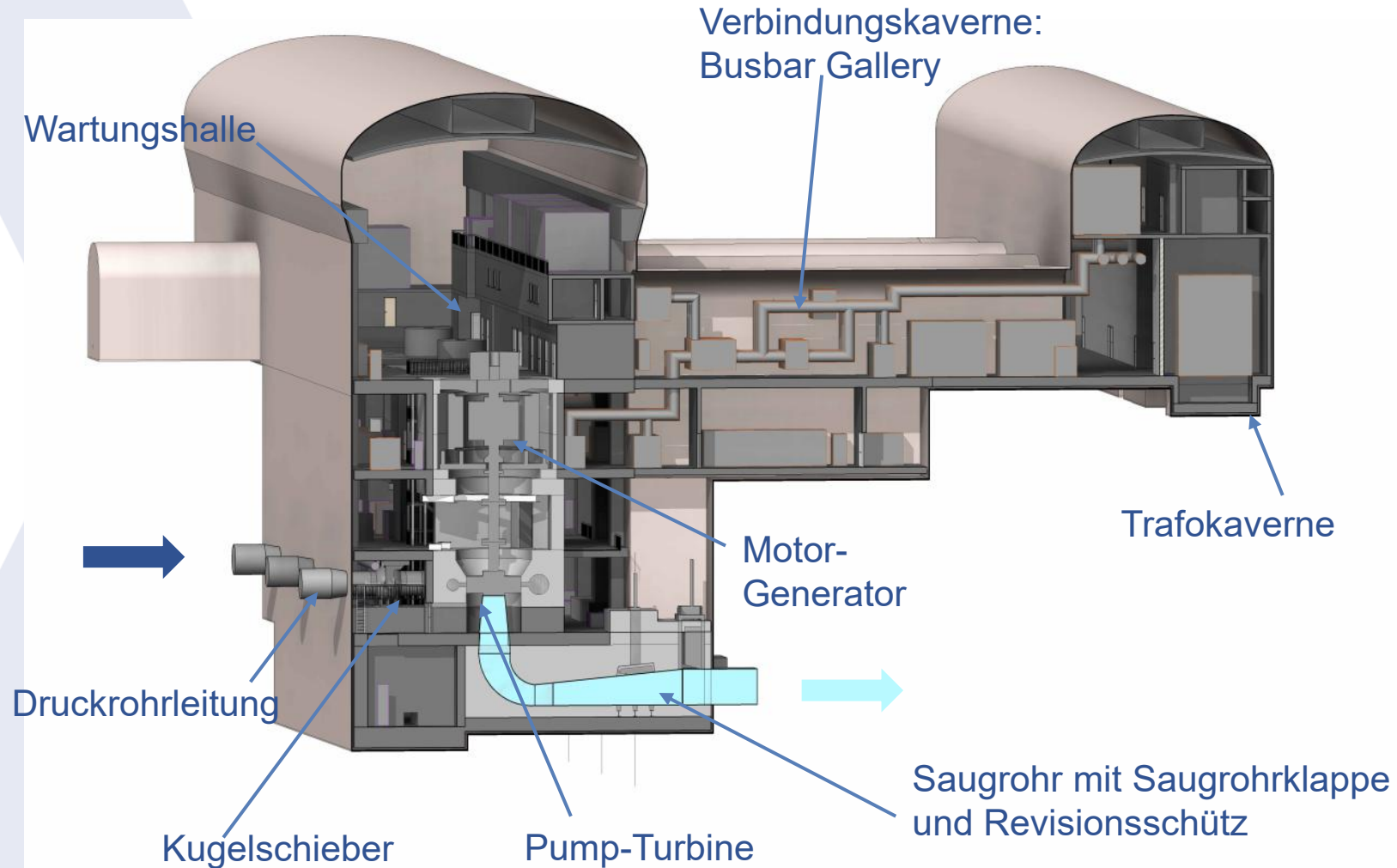


# POWER STATION COMPLEX



| Parameter                                  | Unit              | Value                                |
|--|-------------------|--------------------------------------|
| Turbine type                               | –                 | Reversible Pump-Turbine, fixed speed |
| Number of machines                         | –                 | 4                                    |
| Design electrical power at metering point  | MW                | 187.5                                |
| Plant electrical power                     | MW                | <b>750</b>                           |
| Rated pump net head                        | m                 | 518.97                               |
| Rated pump discharge                       | m <sup>3</sup> /s | 32.6                                 |
| Rated turbine net head                     | m                 | 503.45                               |
| Rated turbine discharge                    | m <sup>3</sup> /s | 43.12                                |
| Pump-Turbine reference diameter            | m                 | 1.9                                  |
| Rated speed                                | rpm               | 600                                  |
| Total moment of inertia (GD <sup>2</sup> ) | t·m <sup>2</sup>  | 1400                                 |
| Unit setting – turbine axis elevation      | m                 | -62                                  |
| Specific speed $nq$ (pump mode),           | –                 | 31.7                                 |

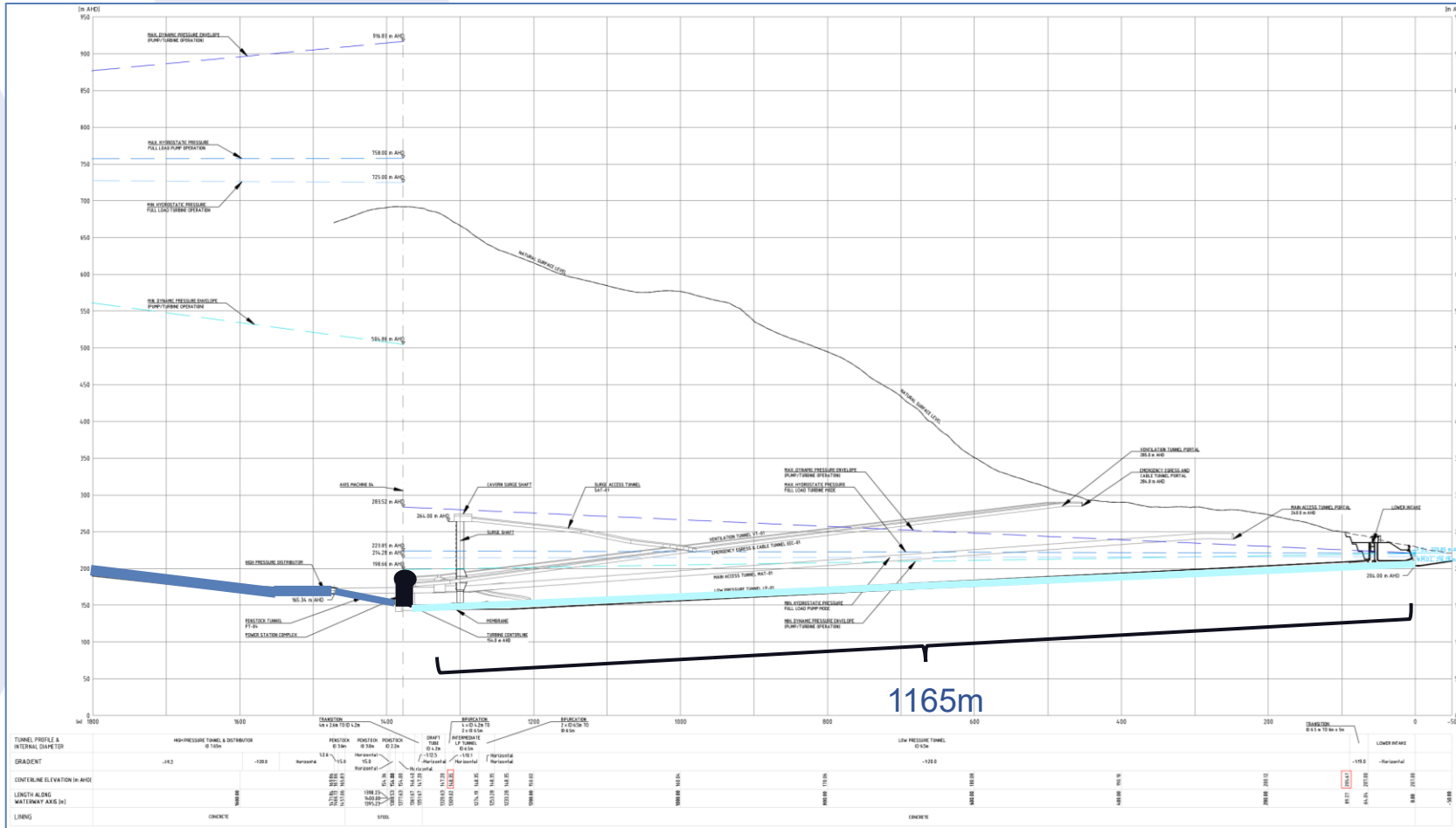
# POWER STATION COMPLEX





# PROJEKTVORSTELLUNG & HAUPTDATEN

# WASSERWEG



| Surge facility                           |  |
|--|--|
| ID [m]                                   | 6.50, widening into 12.36, then reducing to 8.74 |
| Throttle diameter [m]                    | 3.80   |
| Height [m]                               | 115.65   |
| Surge chamber dimensions (L x H X W) [m] | 24.00 x 10.00 x 14.00                            |
| Lining                                   | concrete, partly with membrane                   |
| Low pressure tunnel                      |  |
| ID [m]                                   | 6.50   |
| Length [m]                               | approx. 1,165                                    |
| Lining                                   | concrete   |

## Basic Data

- Waterway layout
- Unit setting (n, Q, H, GD<sup>2</sup>)
- Start up and closing Times

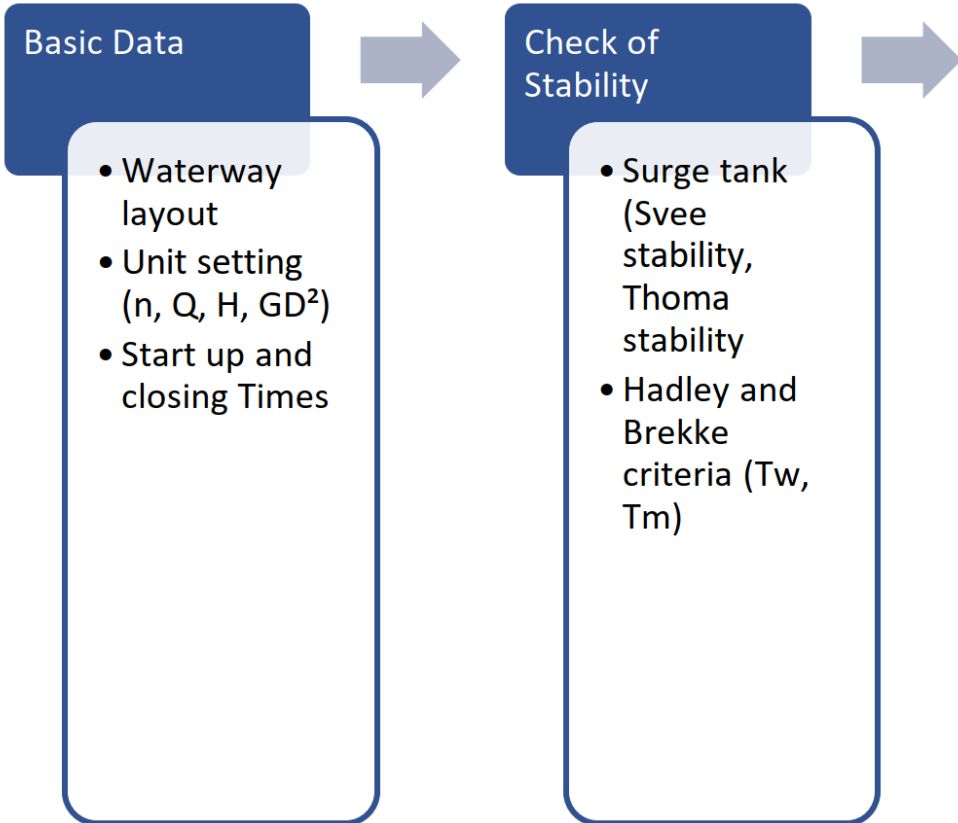
### ▪ Lage der Kaverne

- » Geologische Kriterien (Stabilität, Durchlässigkeit, Störungszonen)
- » Bau und sicherheitstechnische Kriterien (Zugänglichkeit, Baugrundrisiken,..)
- » Hydraulische Kriterien (kurze Stollen → Transienten)
- » Betriebswirtschaftliche Kriterien (Baukosten, Effizienz, Flexibilität)

### ▪ Auswahl Turbinenlayout

- » Anlagenleistung festlegen → Anzahl Maschinen
- » Anlagenperformance (Schnelle Umschaltzeiten oder als reiner Speicher, ...)
- » Flexibilität im Pumpbetrieb, minimale Teillast im Turbinenbetrieb
- » Transportbeschränkungen in Größe und Gewicht
- Optimum finden für Anlagen und Baukosten
- Spezifische Drehzahl (H, Q, n), Saughöhe

# STABILITÄTSKRITERIEN



▪ **Hadley and Brekke criteria [4,5]**

» Hydraulische Anlaufzeit (Tw) versus mechanische Anlaufzeit(Tm) (Rule of Thumb)

$$T_W = \frac{1}{gH_r} \sum L_i v_i$$

Where:¶  
 Hr: rated head (m)¶  
 Li: each waterway section length (m)¶  
 Vi: water velocity at each section (m/s)¶

$$T_M = \frac{(Wk^2) \times 4\pi^2 \times n_r^2}{3600 \times P_R}$$

Where:¶  
 Wk<sup>2</sup>: Total moment of inertia (kgm<sup>2</sup>)¶  
 nr: rated speed (rpm)¶  
 Pr: Rated electrical power output (W)¶

$$T_r = \sum \frac{2L_i}{a_i}$$

Where:¶  
 Li: each waterway section length (m)¶  
 ai: wave speed at each section (m/s)¶

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| According to Hadley and USBR            |   |           |
| Tm/Tw (criteria 1) >= 3                 | - | 4.33      |
| Tm/Tw <sup>2</sup> (criteria 2) >= 2    | - | 2.54      |
| According to Arne Kjolle Rules of thumb |   |           |
| hw (water hammer number)                | - | 0.50<br>4 |
| Tm/Tw (criteria 3) >= 4                 | - | 4.33      |

# STABILITÄTSKRITERIEN

## Basic Data

- Waterway layout
- Unit setting (n, Q, H, GD<sup>2</sup>)
- Start up and closing Times

## Check of Stability

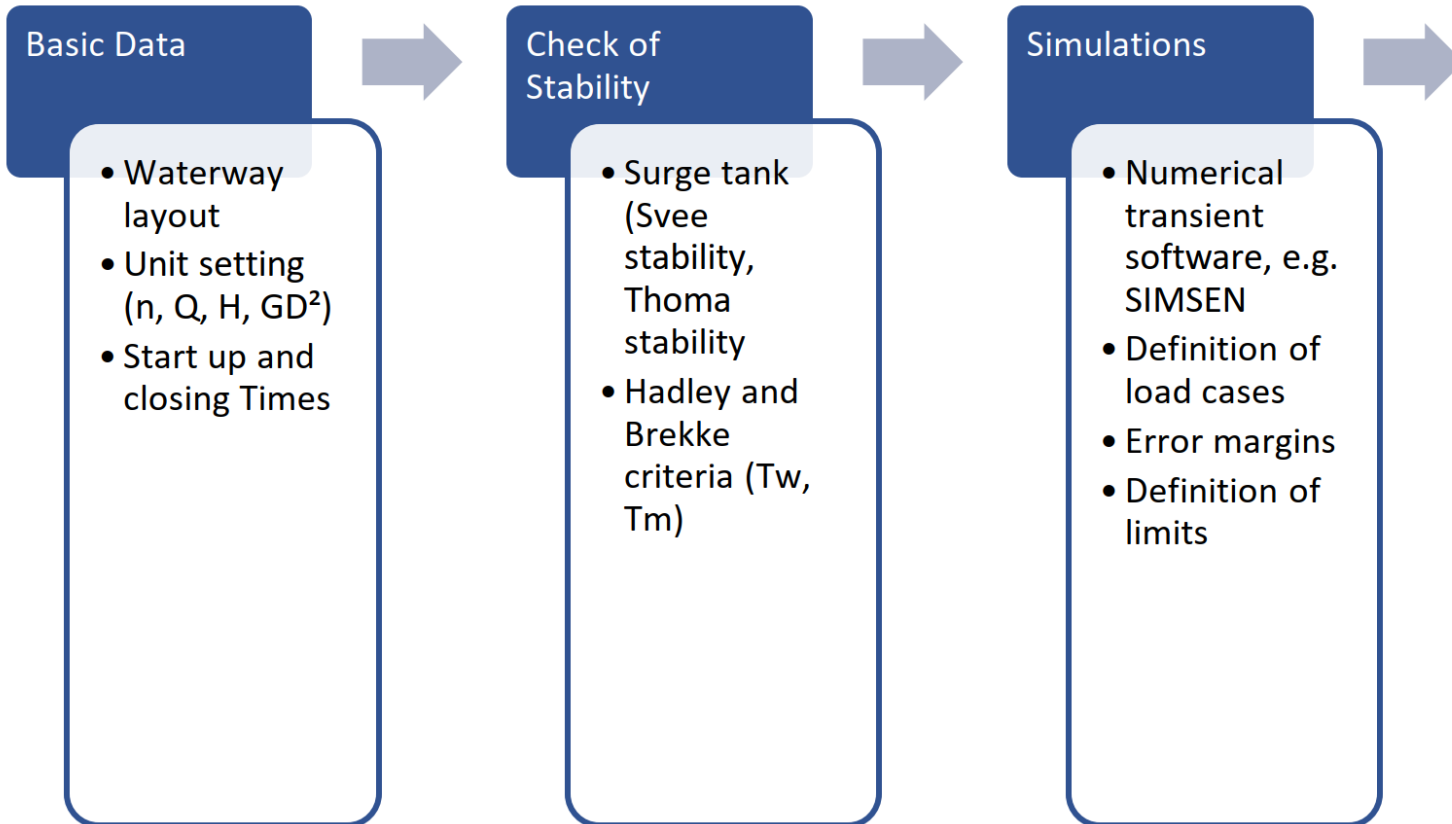
- Surge tank (Svee stability, Thoma stability)
- Hadley and Brekke criteria (Tw, Tm)

### ▪ Thoma Stability Kriterium (Wasserschloss) [3]

» Minimaler Durchmesser des Wasserschlosses

$$A_{ST} > 1.5 \times \frac{(A_G \times D_G)}{(H_{to} \times \lambda)}$$

- $A_{ST}$ : Thoma'sche Querschnittsfläche [m<sup>2</sup>]
- $A_G$ : Querschnittsfläche des Triebwasserstollens [m<sup>2</sup>]
- $D_G$ : Durchmesser des Triebwasserstollens [m]
- $H_{to}$ : Nettofallhöhe [mWC]
- $\lambda$ : Reibungsbeiwert des Triebwasserstollens [-]










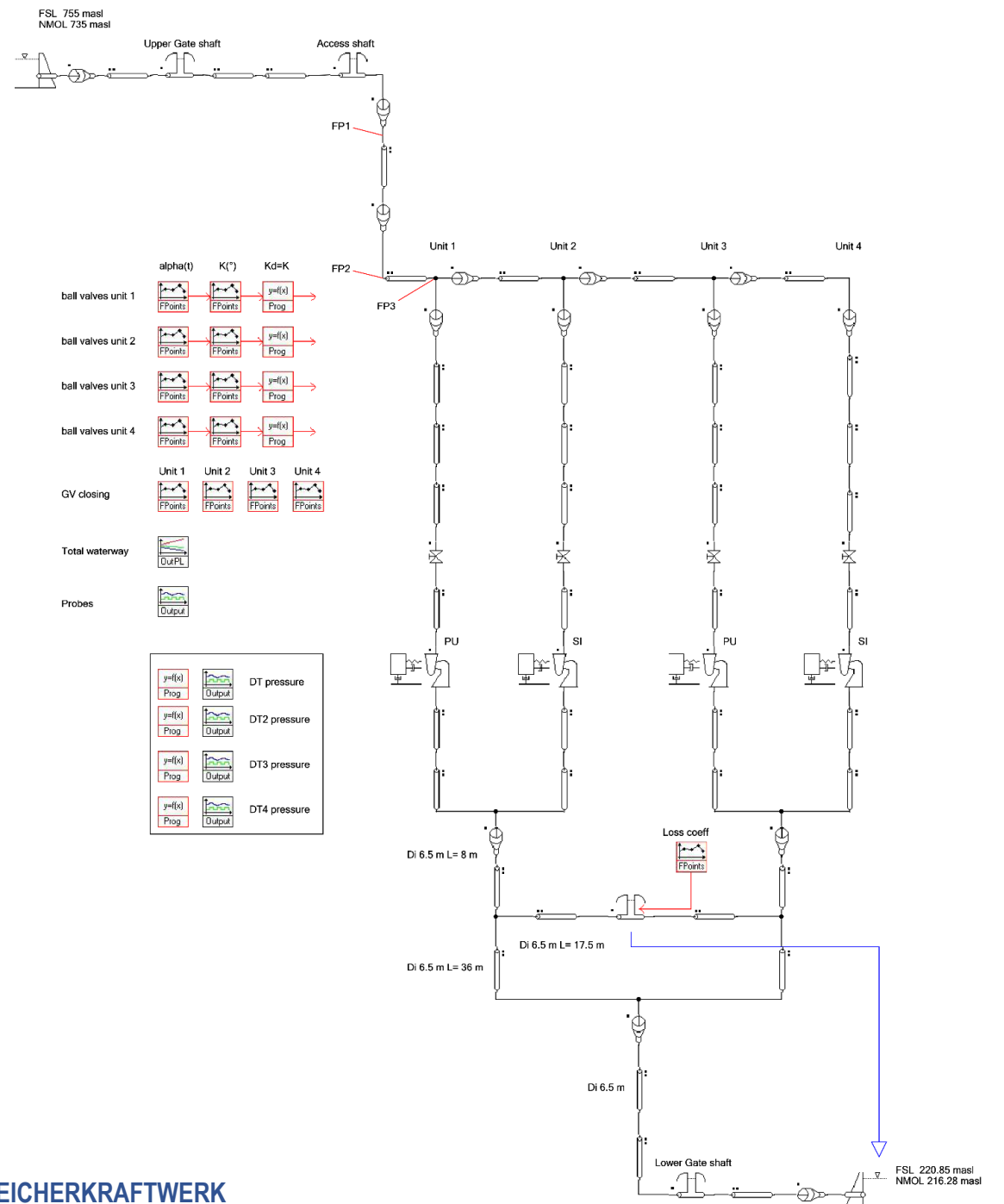
## Simulations

- Numerical transient software, e.g. SIMSEN
- Definition of load cases
- Error margins
- Definition of limits

- zum Beispiel mit: **SIMSEN Software**
- **Möglichst genaue Abbildung der Realität**
  - » Reibungsverluste
  - » Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
  - » Rohrelemente für mögliche Reflexionen
  - » Wasserschloss (D, Drosseln, Höhen, ...)
  - » Einlauf/Auslauf mit Schächten für Schützentafeln (Lufteinzug)

# SIMULATION

| Element   | Description                               |
|---|---|
|  | Upper and lower Reservoirs                |
|  | Pipe                                      |
|  | Surge Shaft considering the water inertia |
|  | Pump-Turbine                              |
|  | Moment of inertia of all rotating parts   |
|  | Local pressure loss                       |
|  | Valve                                     |



# DEFINITION OF LOAD CASES

## PUMP STORAGE PLANT

### ▪ NLC - Normal Load Case

- » Anfahren, Belasten, Entlasten und Normalabschaltung bei allen Pegelständen
- » Notabstellung (ESD) mit Lastabwurf
- » Schnellabstellung (QSD)
- » Verzögerte Lastabwurf
- » Beliebige Kombinationen von normalen Lastfällen
- » Betriebsartenwechsel zwischen Turbinen- und Pumpbetrieb
- » Lastanstieg mit anschließendem Lastabwurf sowohl im Turbinen- als auch im Pumpbetrieb unter ungünstigsten Pegelständen im Wasserschloss
- » Michaud-Berechnung: Anfahren und Schließen in charakteristischer Zeit von  $2L/a$
- » Lastfälle Hydraulische Kurzschlüsse
- » Mehrfaches Umschalten zwischen Pump- und Turbinenbetrieb

### ▪ ELC - Exceptional Load Case (Ausfall eines Sicherheits- oder Überwachungsgeräts)

- » Notabschaltung (ESD) mit einer Leitschaufel, die sich nicht schließt, MIV schließt vor Leitapparat  
→ maximale Überdrehzahl
- » Notabschaltung (ESD) mit einem Hauptabsperrventil (MIV), das sich nicht schließt
- » Anstieg der Drehzahl im Pumpbetrieb bis auf 55 Hz (momentane Netzanforderung Tasmanien)

→ ca. 40 Lastfälle

# DEFINITION FEHLERMARGE

Jede Simulation ist mit Fehler behaftet und beinhaltet Vereinfachung

- **Uncertainty margin ( $X_{UM}$ )**

- »  $X_{UM} = X_{Max} + 0.1 * (X_{Max} - X_{Steady})$  für Druckwerte
- » Für Überdrehzahl 0.05

- **High Frequency Pressure Pulsation (HFPP) [7]**

- » aus dem instationären Strömungsfeld innerhalb der Pumpturbine resultierend (Rotor-Stator-Interaktion → Bei IBS Messung festgestellt).
- » Wird angewendet für Spiralendruck, Druck im Saugrohr
- »  $10\% \text{ von } H_{dyn} = (\omega R)^2 / (2g)$        $R = \text{Laufreddurchmesser}$

- **Wasserlevel im Wasserschloss**

- » 10% Sicherheitszuschlag+ 5% Modelungenauigkeit = 15% effektiven Volumen

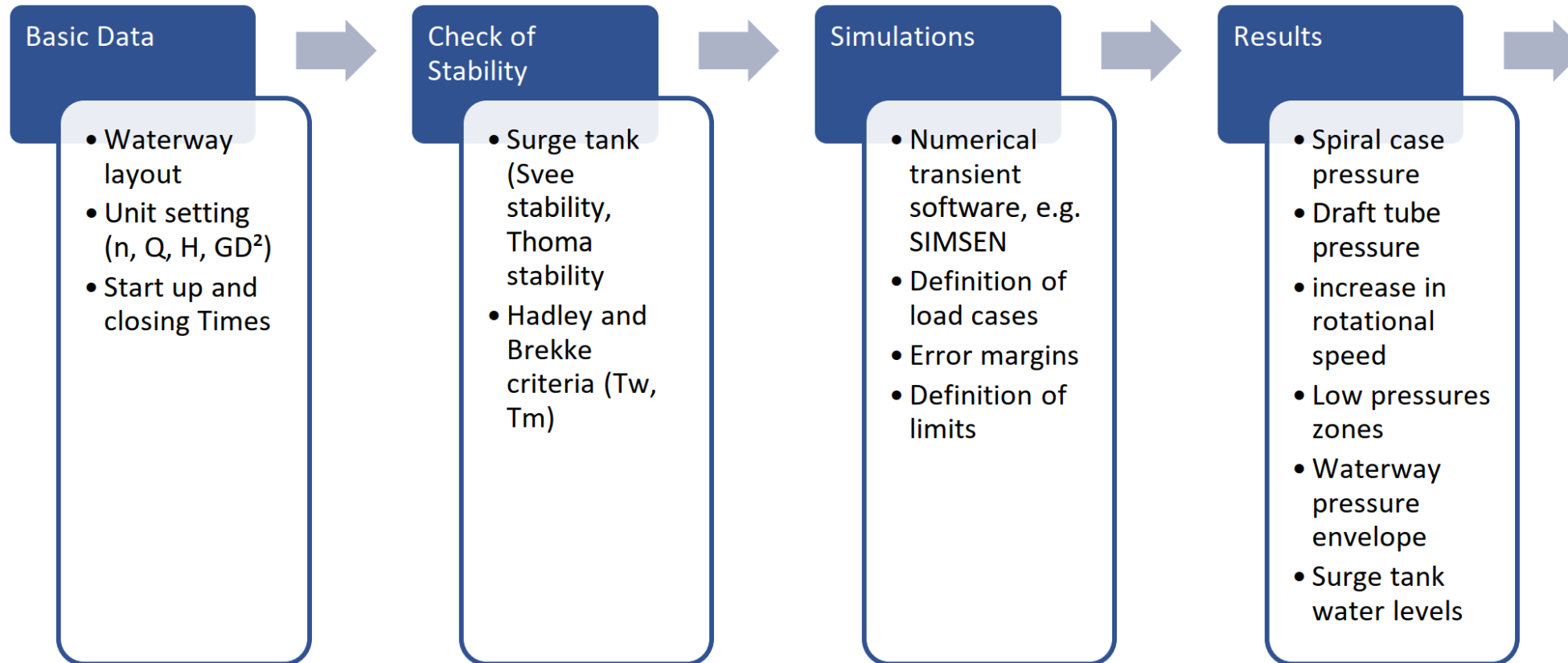
# DEFINITION GRENZWERTE

## MAXIMAL ERLAUBTE WERTE

- » **Projektspezifische Werte**
- » Spiraldruck  $< 1.4^*$  maximaler statischer druck (H Brutto)
- » Durchgangsdrehzahl  $< 150\%$  er Nenndrehzahl
- » Minimaler Druck im Wasserweg 5mWS
- » Wasserschlosspegel (Maximum lt. Geometrie), Minimum um Lufteinzug zu vermeiden
- » Minimaler Druck unter dem Laufrad nach Murai's equation [1]

$$\bullet \sigma_{min} = \frac{H_B + H_d - H_v}{H_e} = 0.042 \text{ [1]}$$

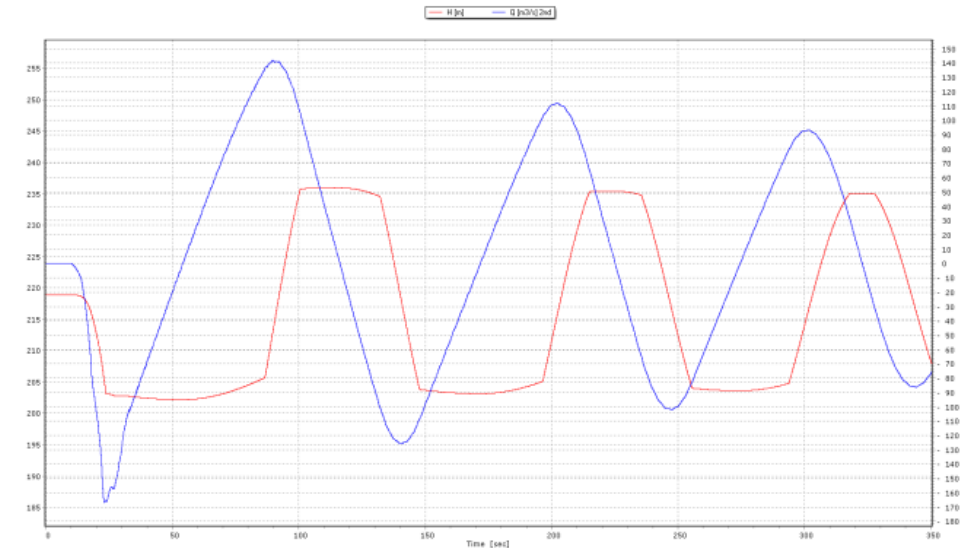
# METHODOLOGY



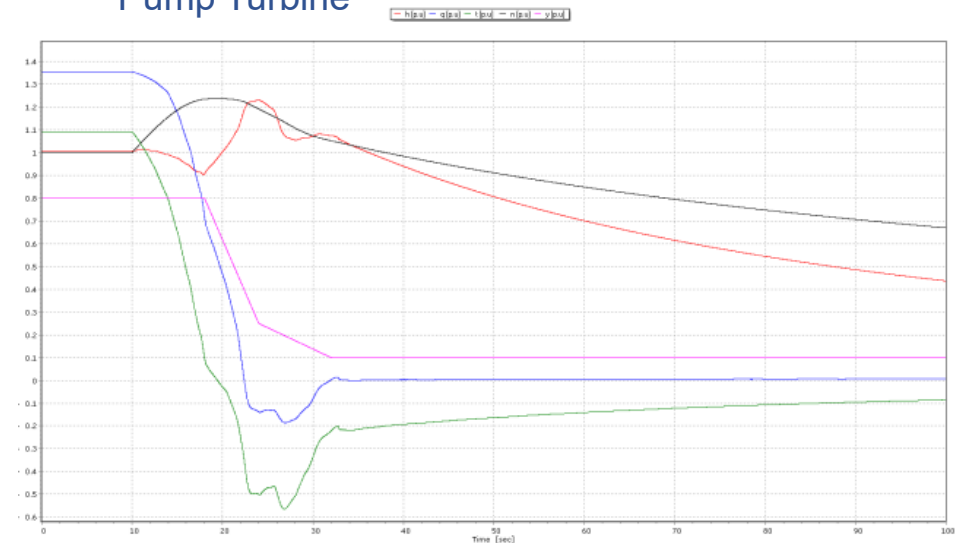
## VORGEHENSWEISE FÜR ALLE LASTFÄLLE

- **Wasserweg**
  - » Auswerten der Drucklinien entlang des Wasserweges
  - » kritischen Punkte Tabellarisch
- **Turbinentechnik**
  - » Auswerten Überdrehzahl
  - » Spiralendruck
  - » Maximaler und minimaler Druck unter Laufrad
- **Wasserschläsler**
  - » Auswerten der Pegel
  - » Druckspitzen

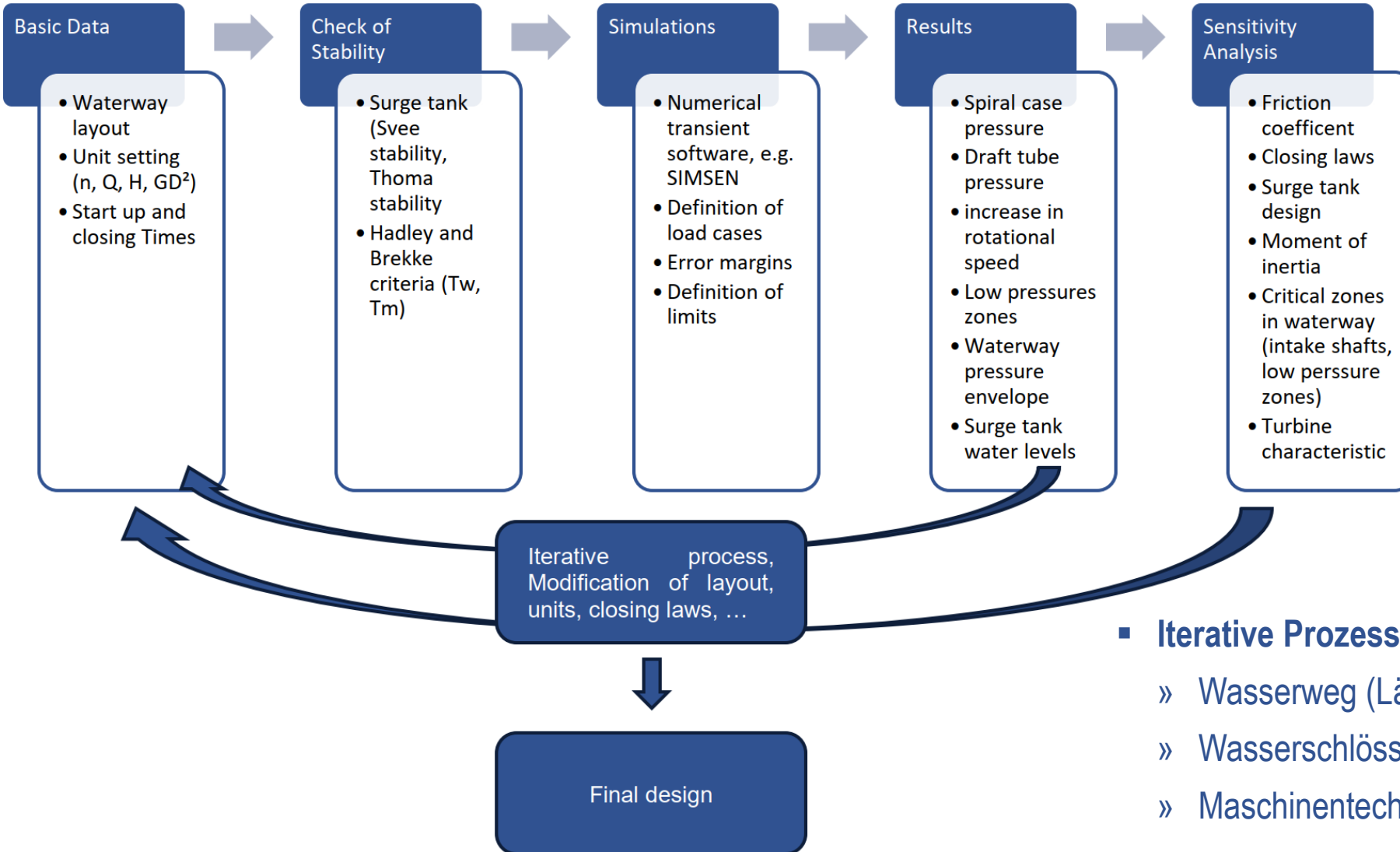
Wasserschloss



Pump Turbine



# METHODOLOGY



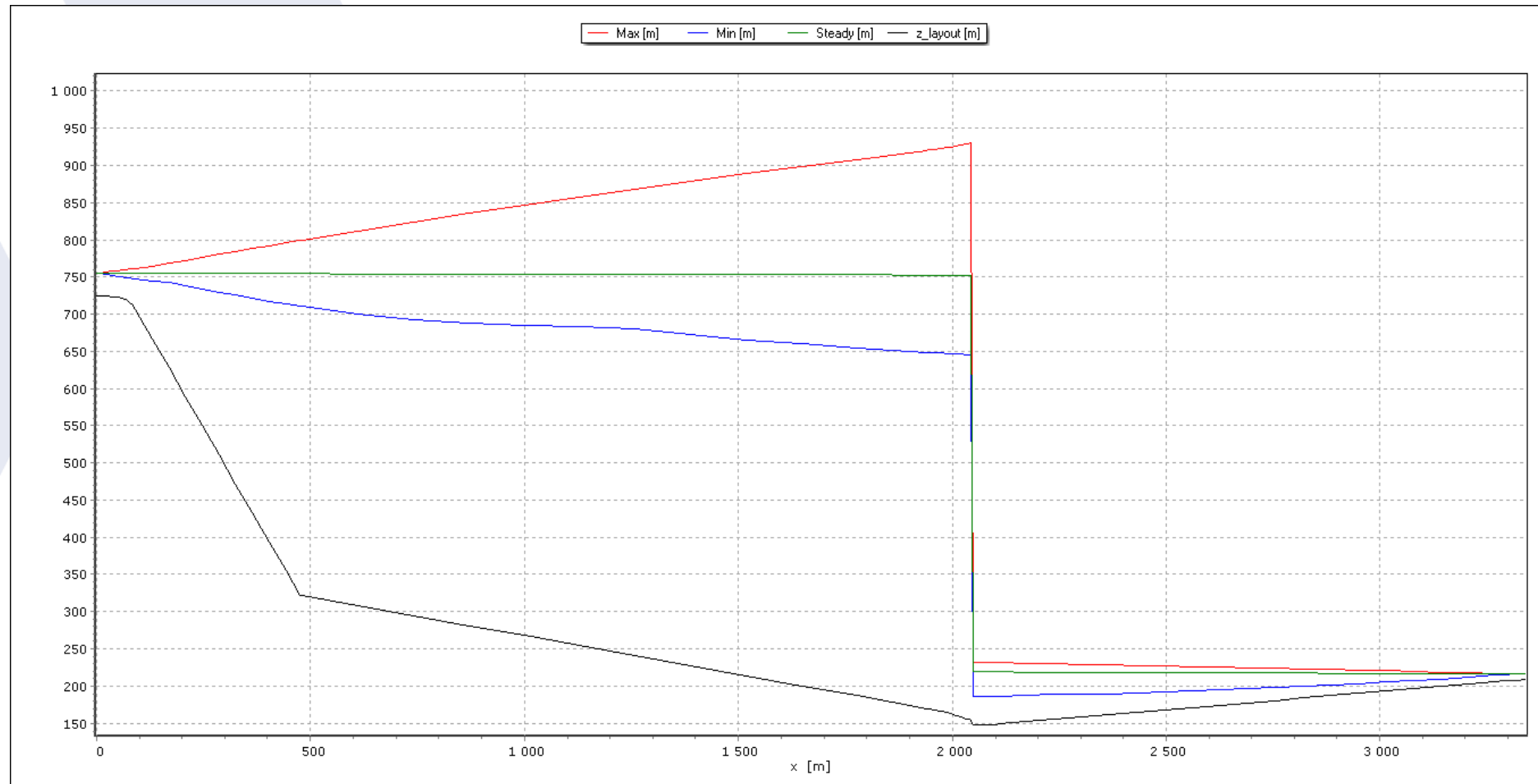
## Sensitivity Analysis

- » Grenzen erkennen
- » Robustheit des Designs
- » Problemzonen identifizieren

### ▪ Iterative Prozess mit vielen Stellgrößen

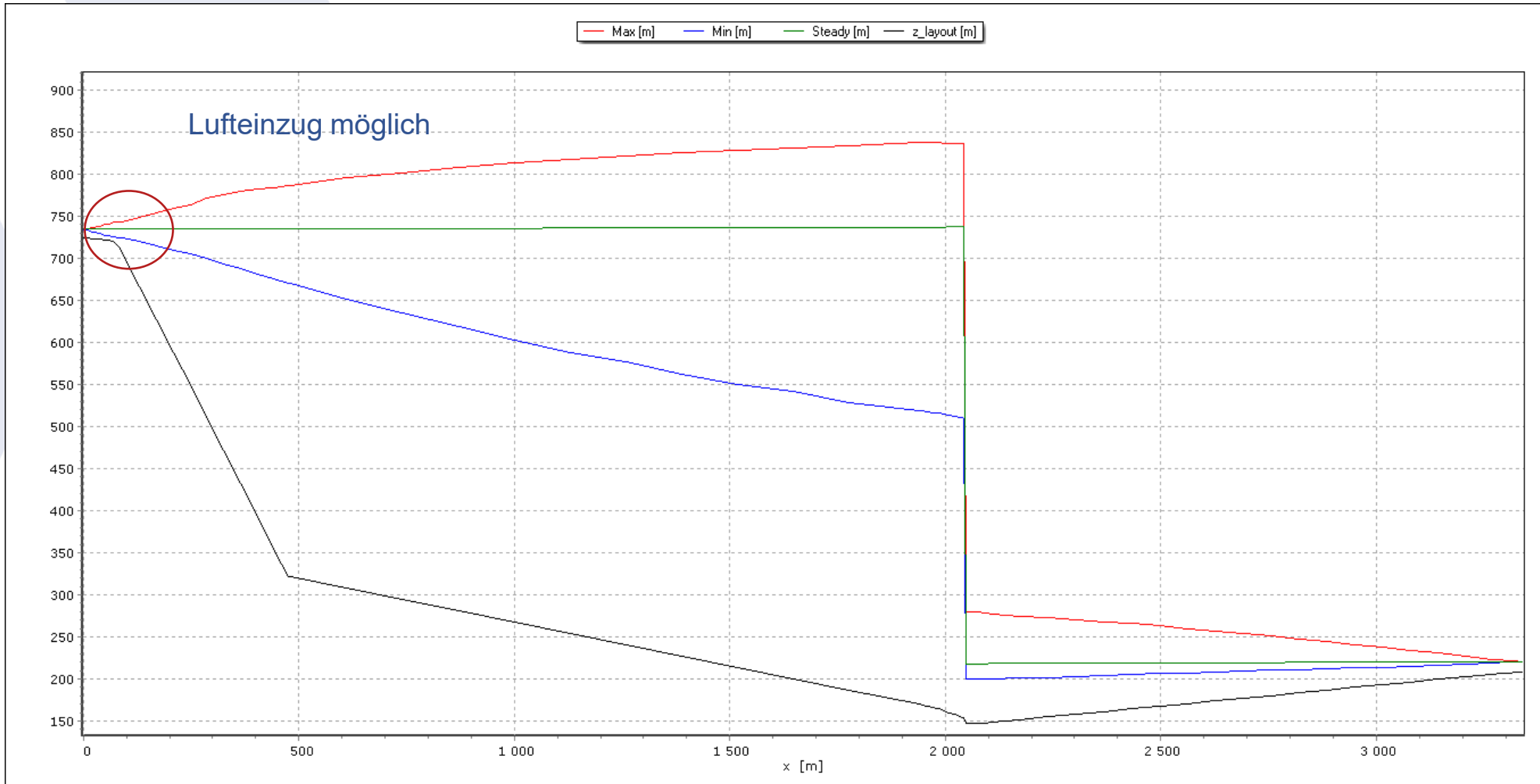
- » Wasserweg (Länge, Durchmesser)
- » Wasserschlosser (Höhen, Durchmesser, Drosselwerte)
- » Maschinentechnik (GD<sub>2</sub>, Schließzeiten)

# EINLAUFBEREICH



Maximaler  
Oberwasserpegel

# EINLAUFBEREICH



Minimaler  
Oberwasserpegel

# EINLAUFBEREICH

## MODELL

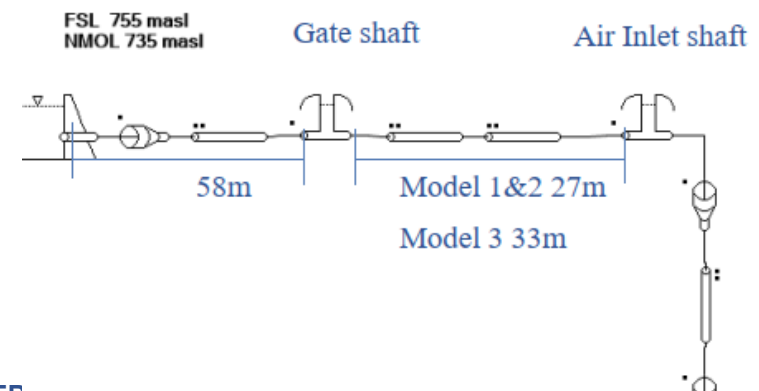
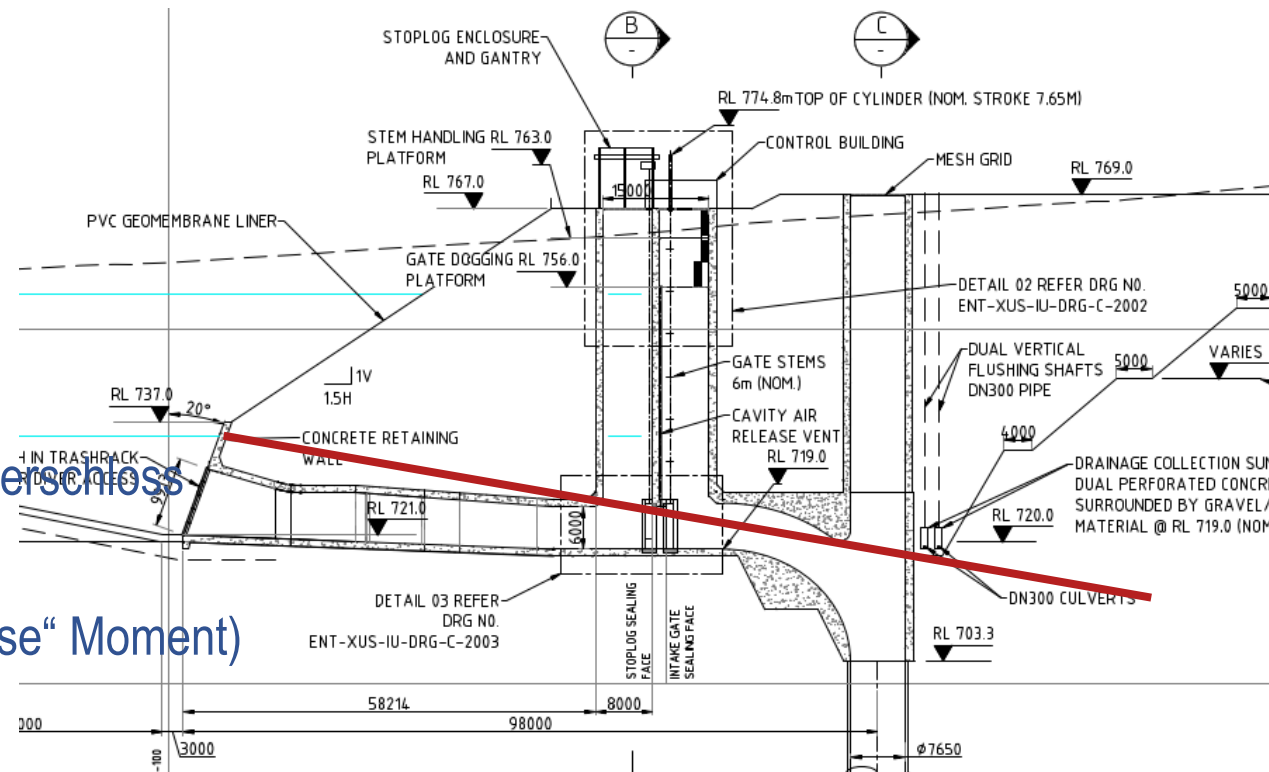
### ■ Möglichst genaue Nachbildung

- » Einhaltung Hydraulisches Moment (L/Ag)
- » Verluste des Einlaufrechens berücksichtigen (verlegt)
- » Lufterzug von Schützenschacht und Lufterlass als Wasserschloss modellieren

Lastfall (Anfahren aller 4 Pumpen und Lastabwurf in „wort case“ Moment)

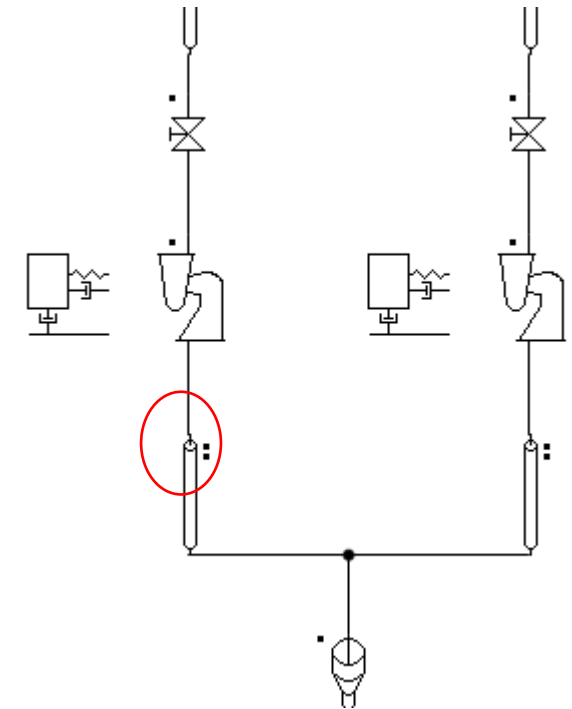
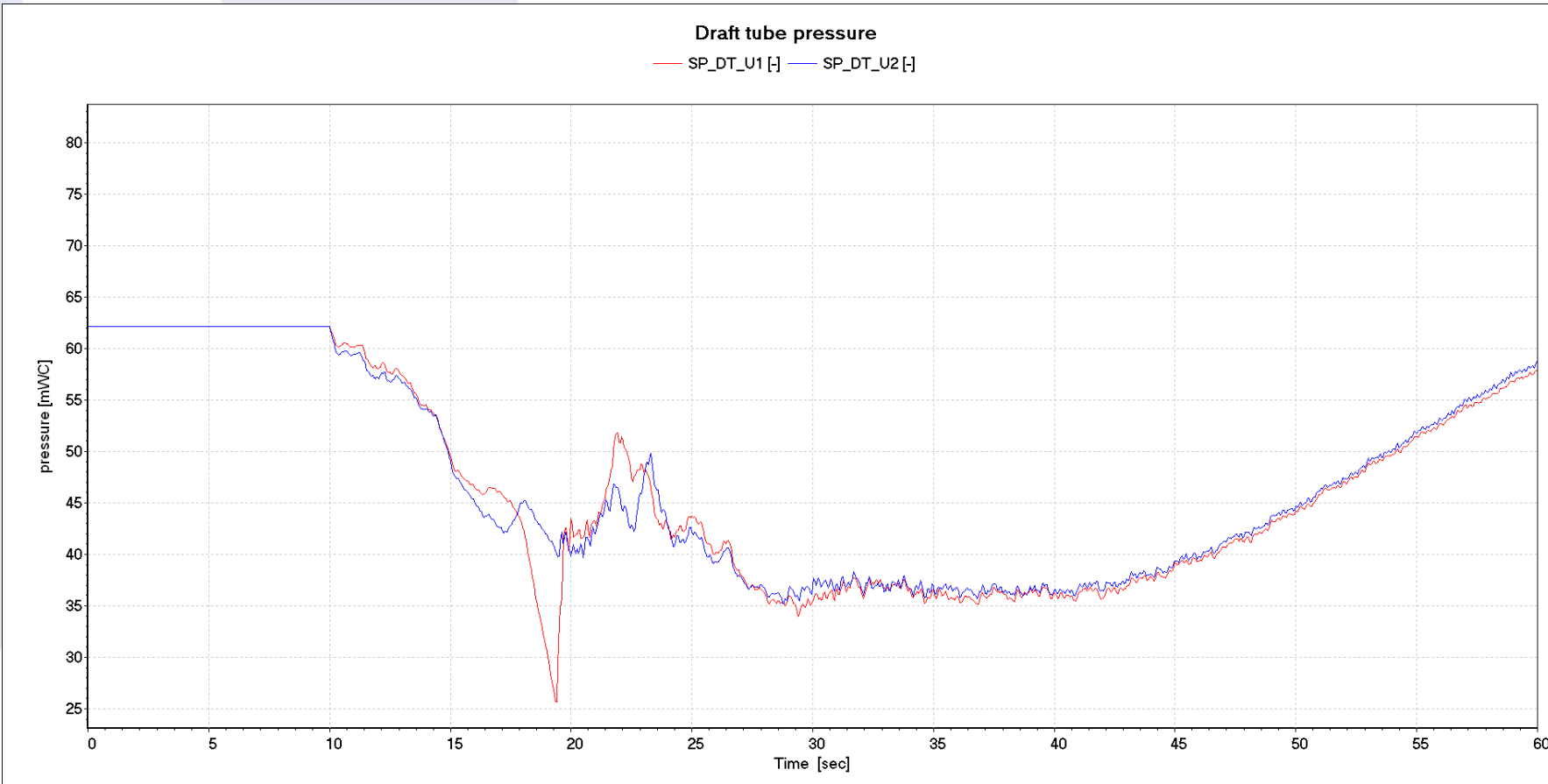
### Stellgrößen

- » Verhalten der Pumpen Turbinen (Schließzeit, Trägheit)
- » Lage vom Schützenschacht
- » Höhenverlauf vom Einlaufbereich (für mehr Drucküberdeckung)



# DRUCK UNTER LAUFRAD

Minimaler Druck: Worst Case bei Turbinenlastabwurf mit blockiertem Leitapparat → Abreißen der Saugsäule



Turbinencharakteristik

Schließzeiten restlicher Turbinen

Trägheitsmoment

Wasserschlossparameter (Lage, Drosselung)

Durchmesser des Unterwasserstollens

# DRUCK UNTER LAUFRAD

Maximaler Druck: Worst Case: Lastabwurf alle 4 Pumpen bei minimalem Oberwasserpegel und erhöhter Netzfrequenz 55 Hz → Anheben des Wellenstranges

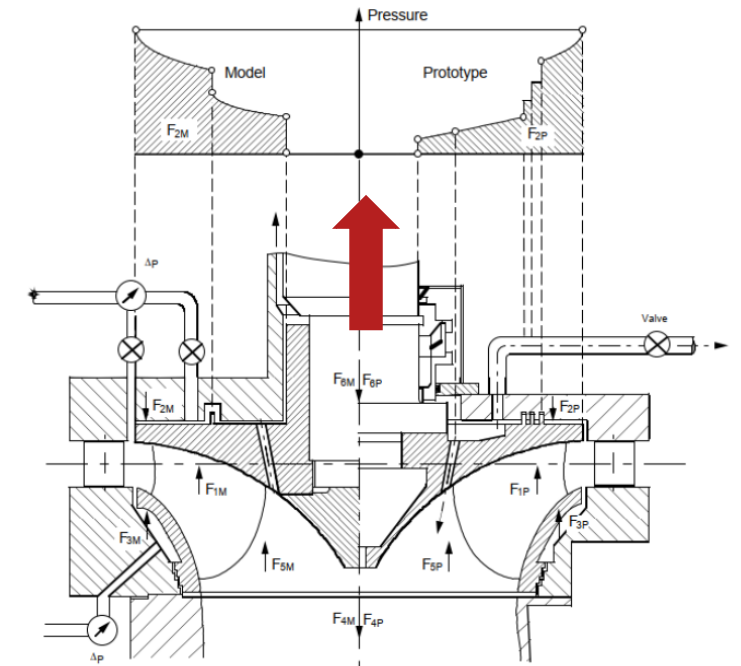
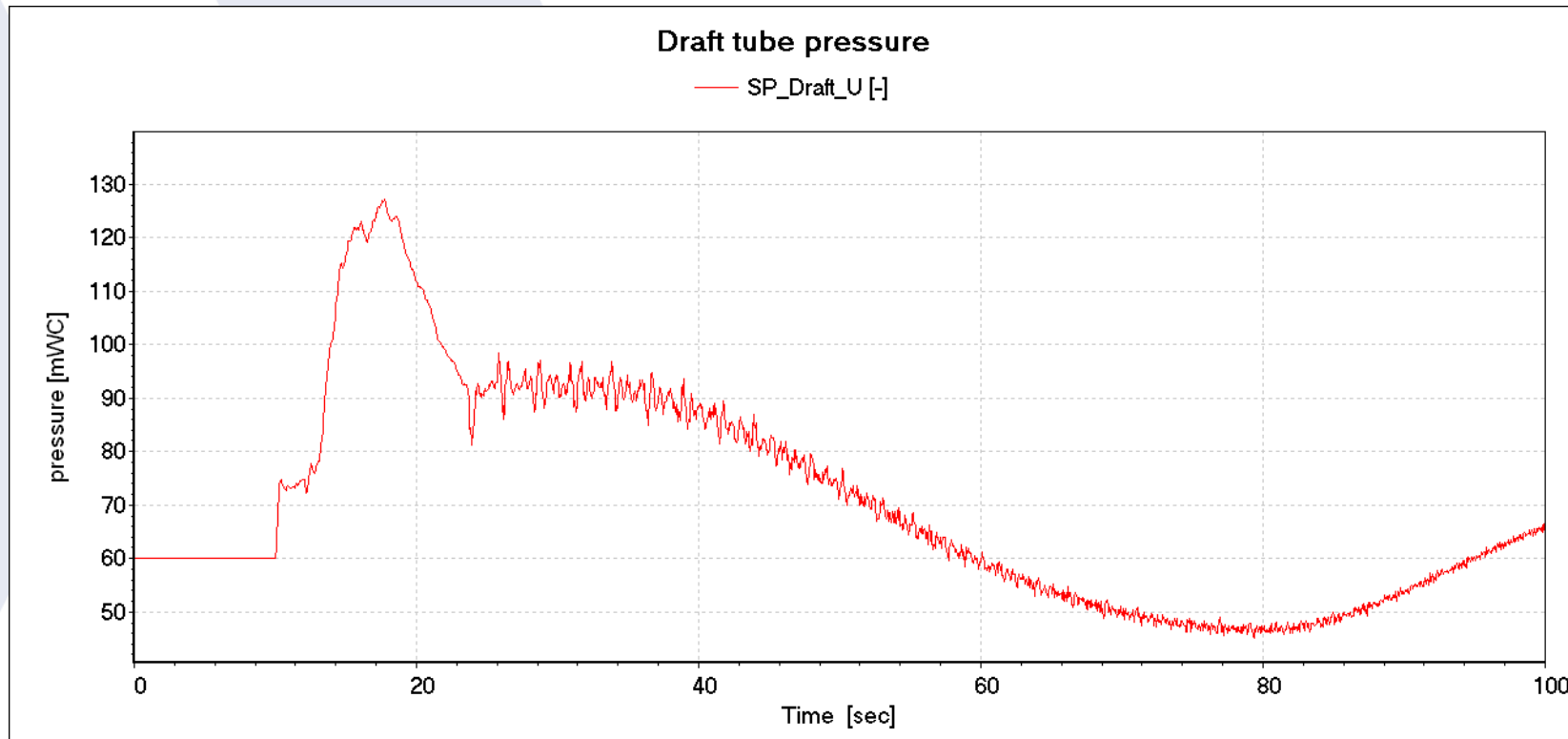


Figure 104 – Individual elements of axial force acting on a radial machine

## Einflussnahme

Turbinencharakteristik

Schließzeiten

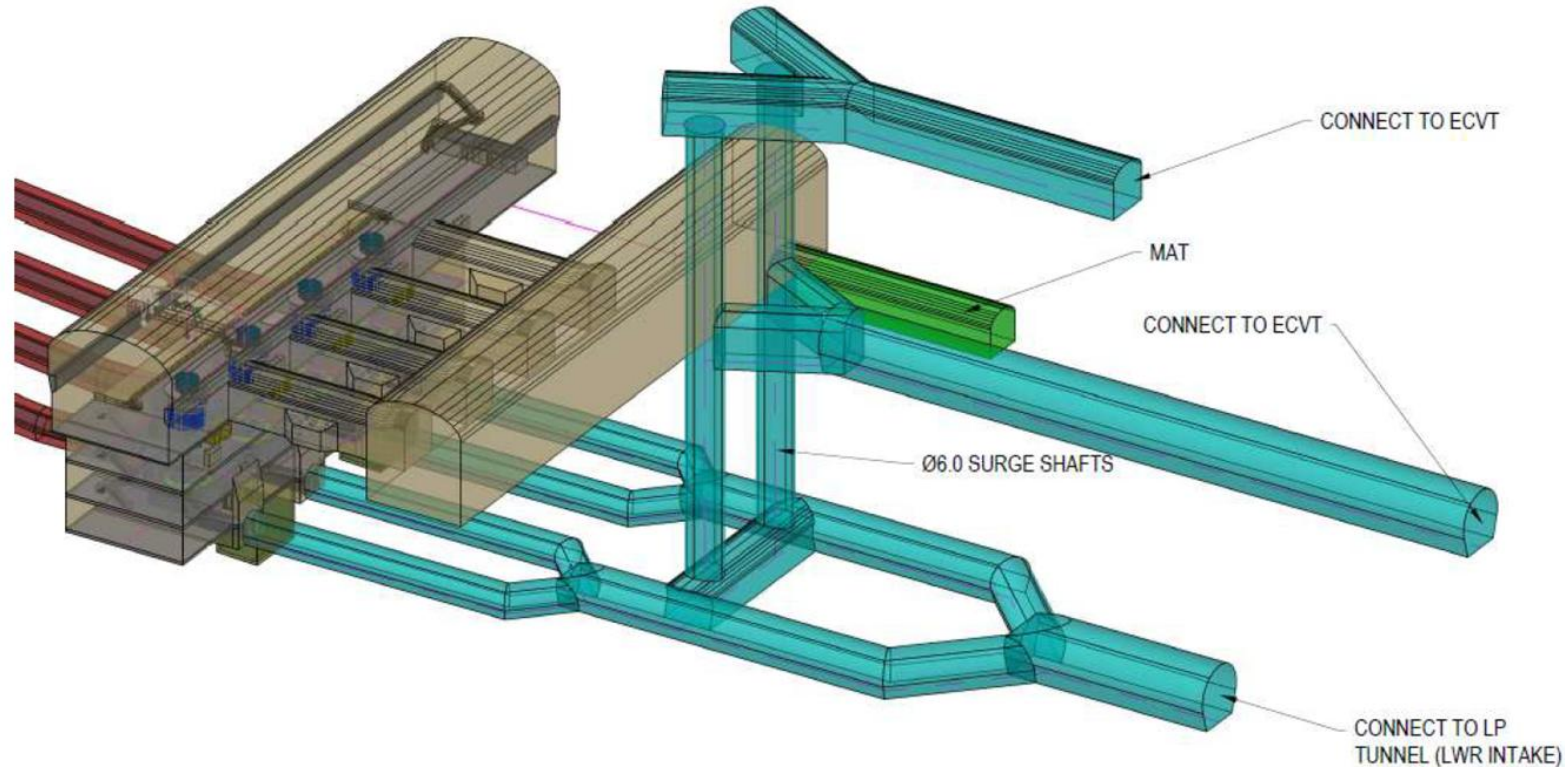
Trägheitsmoment

Wasserschlossparameter (Lage, Drosselung)

Lager Wasserschlosskammer

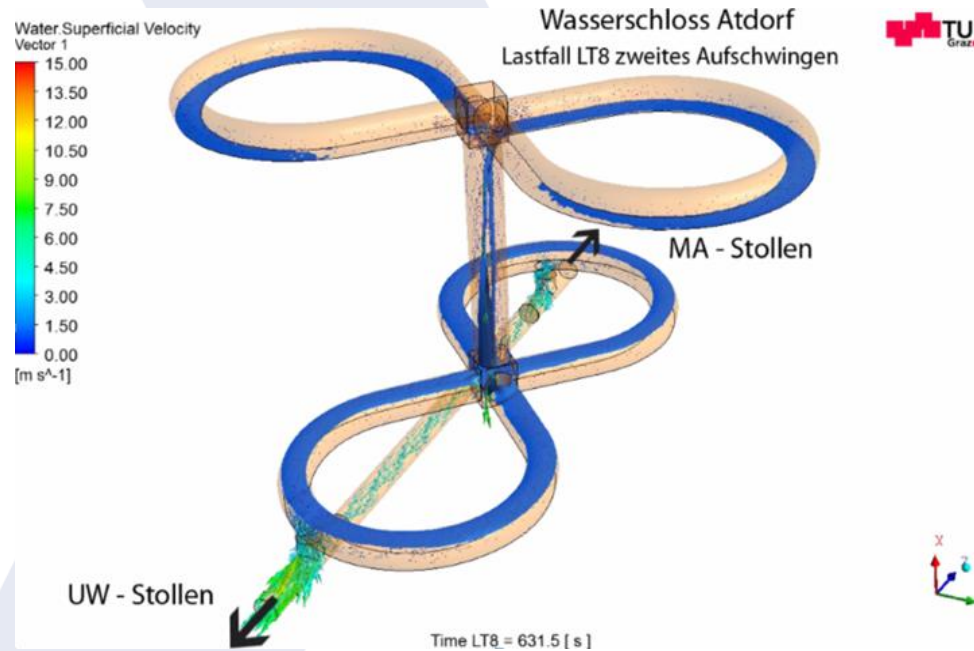
# WASSERSCHLOSS OPTIMIERUNG

## AUSGANGS DESIGN – KAMMER WASSERSCHLOSS - UNTERWASSER



# WASSERSCHLOSSVERGLEICH

Wasserschloss Atdorf 1400 MW, Q 230 m<sup>3</sup>/s



| Snowy 2.0 - 2000 MW |                  |                        |
|---------------------|------------------|------------------------|
| Di                  | 10               | m                      |
| L                   | 17.000           | m                      |
| Ai                  | 79               | m <sup>2</sup>         |
| V                   | <b>1.335.177</b> | m <sup>3</sup> resp. t |
| Öltanker            | 250.000          | t                      |
| Öltanker            | 5                | [-]                    |

| Cethana - 750 MW |               |                    |
|------------------|---------------|--------------------|
| Di               | 6             | m                  |
| L                | 1.100         | m                  |
| Ai               | 30            | m <sup>2</sup>     |
| V                | <b>33.210</b> | m <sup>3</sup> / t |
| Öltanker         | 250.000       | t                  |
| Öltanker         | 0,13          | [-]                |

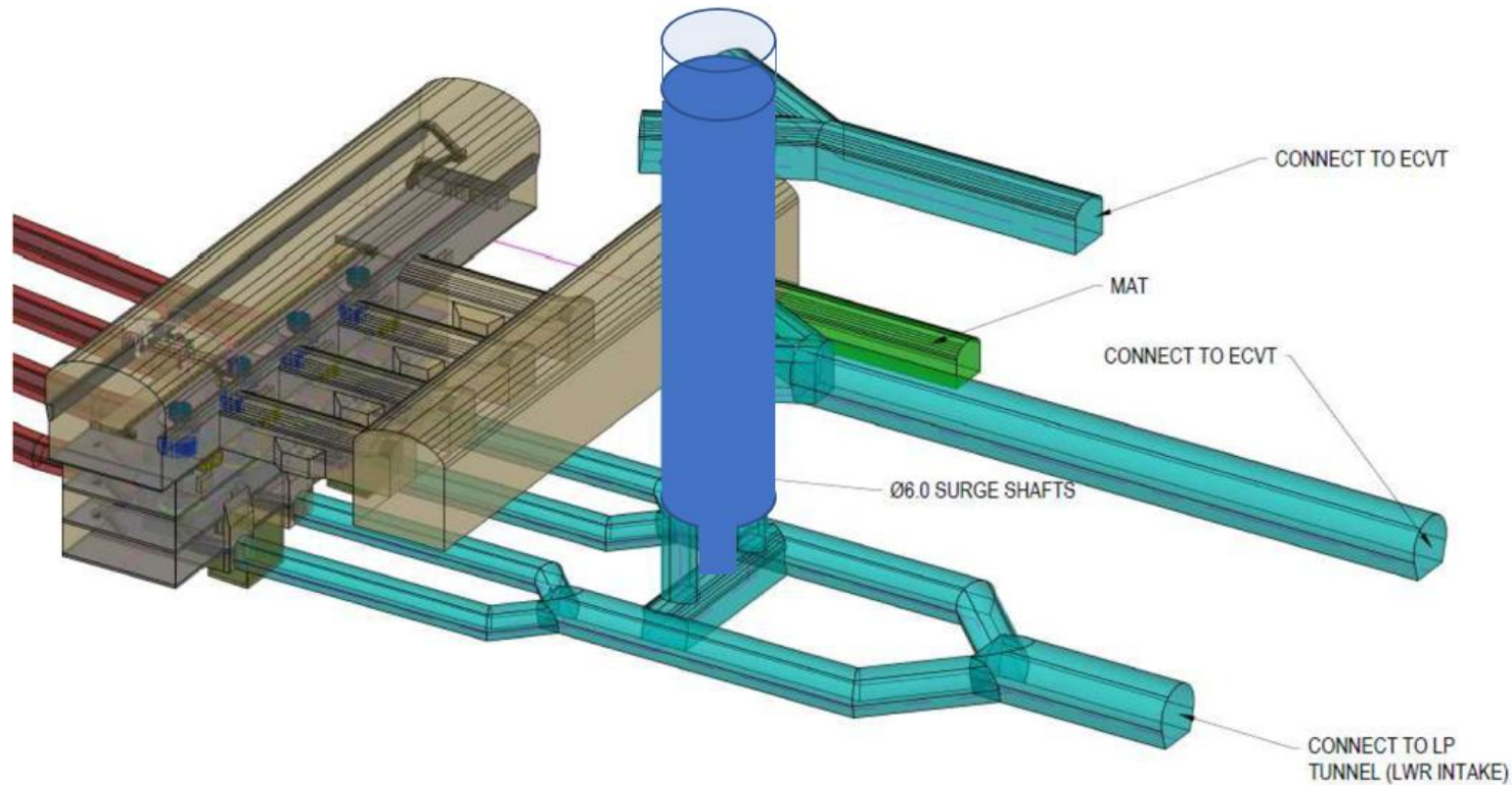
| Atdorf - 1400 MW |                |                    |
|------------------|----------------|--------------------|
| Di               | 10             | m                  |
| L                | 8.000          | m                  |
| Ai               | 79             | m <sup>2</sup>     |
| V                | <b>628.319</b> | m <sup>3</sup> / t |
| Öltanker         | 250.000        | t                  |
| Öltanker         | 3              | [-]                |



<https://finanzmarktwelt.de>

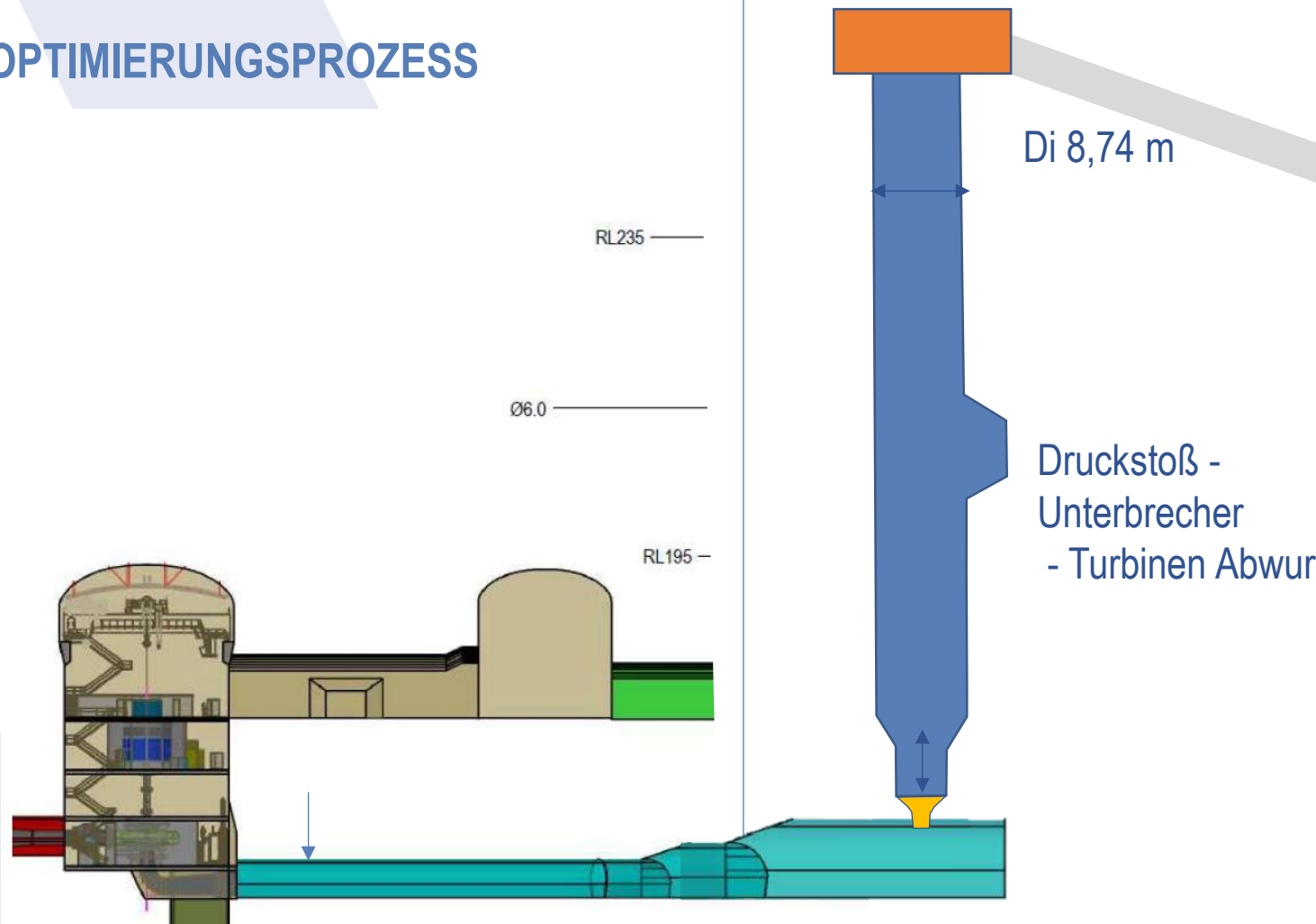
# WASSERSCHLOSS OPTIMIERUNG

ZIEL – OPTIMIERUNG BAU UND HYDRAULISCHE FUNKTION



# WASSERSCHLOSS OPTIMIERUNG

## OPTIMIERUNGSPROZESS



## Optimierungsparameter

Zugangskaverne - Baulogistik

Durchmesser – finale Anpassung möglich, um die Trägheit zu beeinflussen (Mindestdruck bei Turbinen-Notabschaltung)

Teilweise Erweiterung

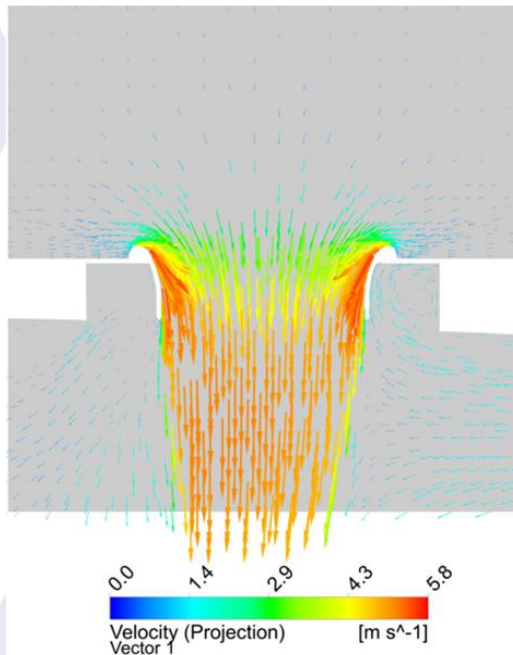
Durchmesser: 6 – 8 m  
Aspekt: Trägheit

Differential - Drossel als zentrales hydraulisches Element

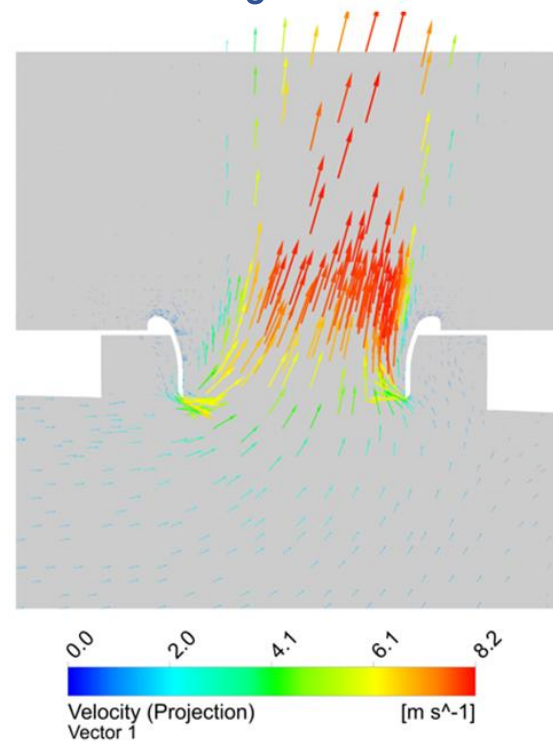
# WASSERSCHLOSS OPTIMIERUNG

## DIFFERENTIAL - DROSSEL OPTIMIERUNG

Geringer Verlustbeiwert  
Abschwingen



Hoher Verlustbeiwert  
Aufschwingen

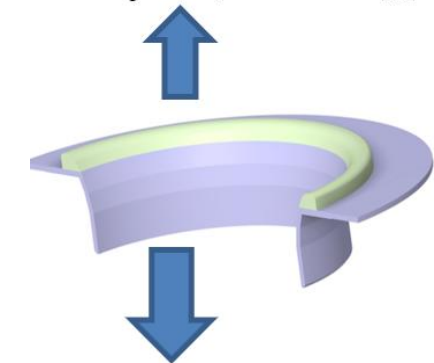


Verhältnis Geometrisch  
bedingt

Throttle TU Graz

Di 3.8 m

$\zeta_{\text{up}} = 3.88 [-]$

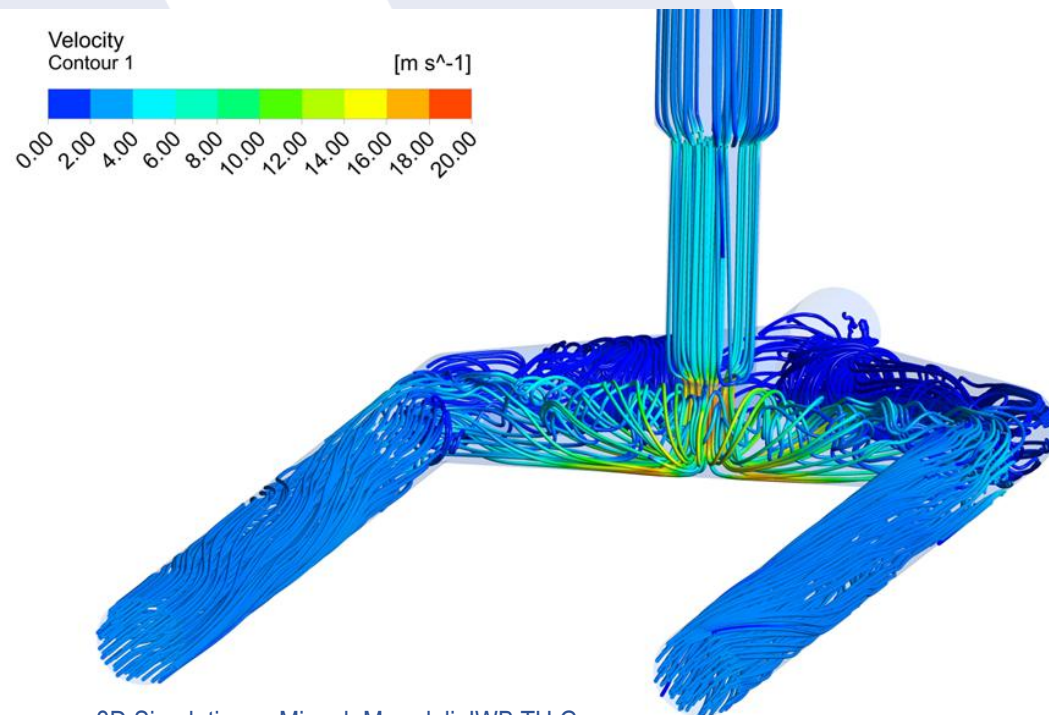


$\zeta_{\text{down}} = 1.46 [-]$

# WASSERSCHLOSS OPTIMIERUNG

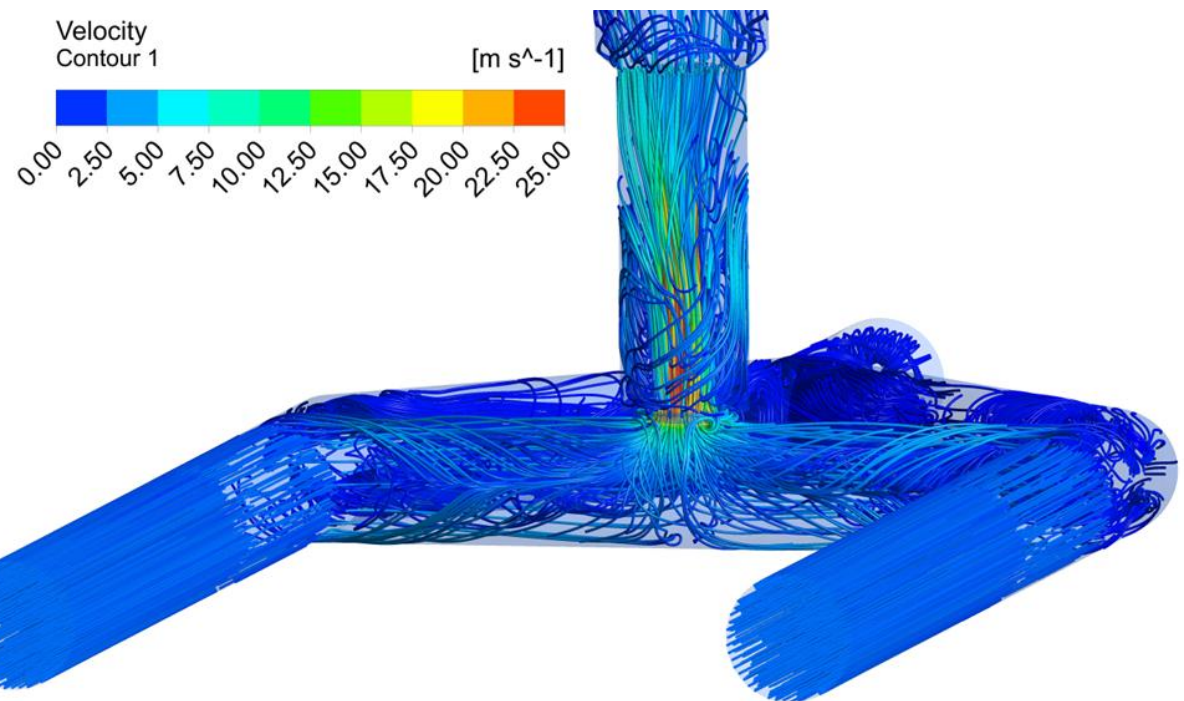
## DIFFERENTIAL DROSSEL - OPTIMIERUNG

3D CFD Abschwingen



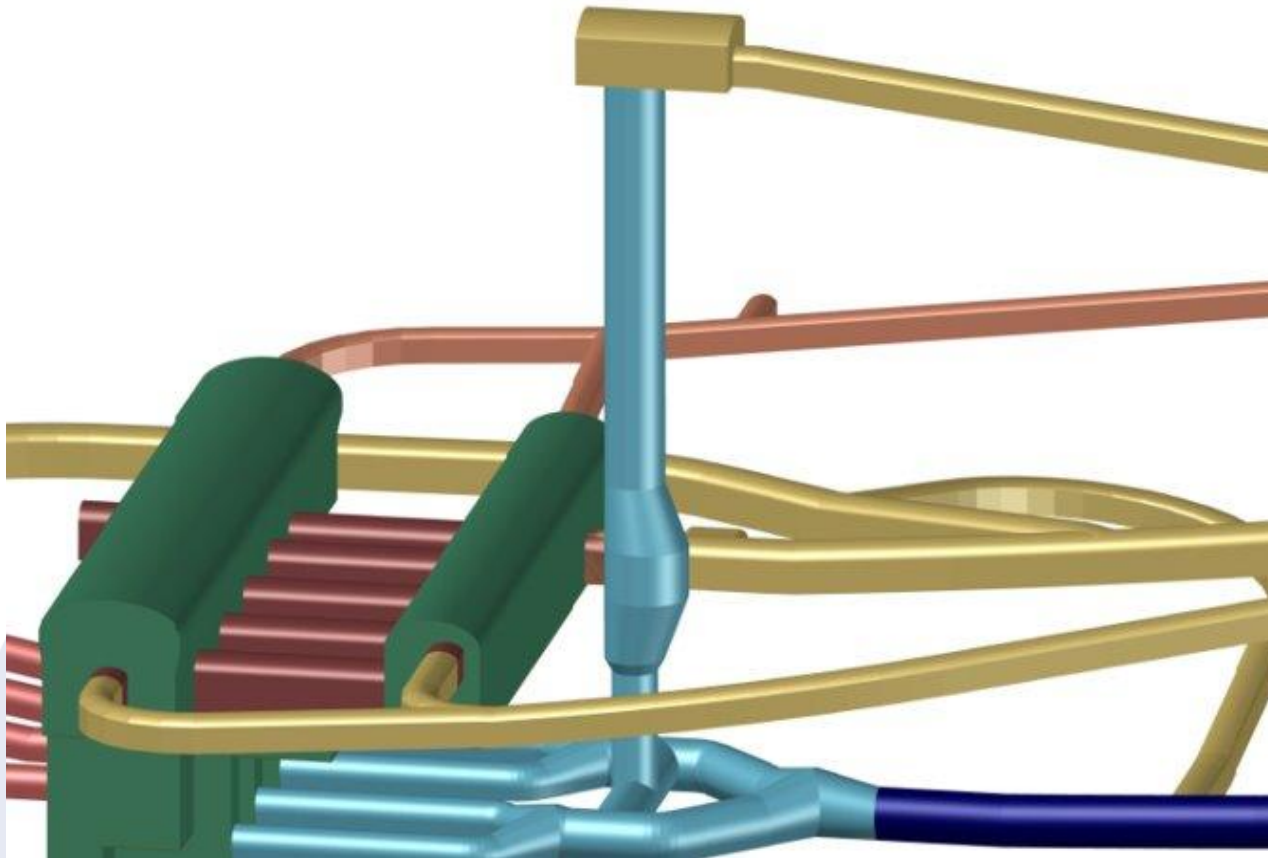
3D Simulationen Misagh Moradali, IWB TU Graz

3D CFD Aufschwingen



# WASSERSCHLOSS OPTIMIERUNG

## FINALE GEOMETRIE



Schachtwasserschloss mit  
Differential Drossel

Lokaler Aufweitung

Hydraulisch nahe an Saugrohr

Geotechnischer Abstand zu  
Trafokaverne

**Drosseloptimierung**

Hydraulische Optimierung der  
Bifurkatoren

# ZUSAMMENFASSUNG

## PUMPSPEICHERKRAFTWERK CETHANA

- PUMP UND TURBINENLEISTUNG: 750 MW
- FALLHÖHE (514,1-538,7M)
- DURCHFLUSS (TURBINENBETRIEB: 162M<sup>3</sup>/S, PUMPBETRIEB 130M<sup>3</sup>/S )
- ERZEUGUNG TURBINENBETRIEB 15GWH, BEZUG PUMPBETRIEB 18.9 GWH
- WÄLZWIRKUNGSGRAD 79.4%
- KAVERNENDIMENSION 133 / 42 / 45 METER
- WASSERSCHLOSSOPTIMIERUNG – DIFFERENTIALER DROSSEL

# THANK YOU FOR YOUR ATTENTION!



**Wolfgang Richter – TU Graz**  
**Wolfgang.richter@tugraz.at**  
**T +43 316 873 8352**



**Matthias Saurwein – ILF**  
**Matthias.saurwein@ilf.com**  
**T +43 676 884535097**



# QUELLVERZEICHNIS

1. Murai Hitoshi (1980), Hydrodynamic Topics in Developments of High Pump-Turbines and Investigations on related Problems in Japan, 10th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation, Tokyo
2. Svee (1970), Untersuchungen über die Stabilität bei Wasserkraftanlagen mit idealer Regelung, Dissertation, Technische Hochschule Graz,
3. Thoma (1910) Theorie des Wasserschlosses bei selbsttätig geregelten Turbinenanlagen, Dissertation, Kgl. Technische Hochschule zu München
4. Arne Kjolle (2001). Hydropower in Norway, Mechanical equipment, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim – Brekke?
5. Hadley B, G.H. Lundgreen, C.E. Stille, Governing of Water Turbines
6. Jaeger (1958) Contribution to the Stability Theory of Systems of Surge Tanks, Transactions of the ASME
7. PVE (2024), Christian Landy, Christophe Nicolet, Cethana Pumped Storage Power Plant Transient analysis, non-published internal project document