

HOCHBELASTETE ABSPERRORGANE - HERAUSFORDERUNGEN BEI NEUANLAGEN & REHAB-PROJEKTEN



Graz, 13.September 2023

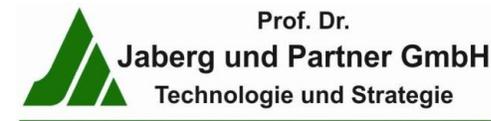
Pascal Dörig

Tel.: +41 79 422 22 74
p.doerig@adams-armaturen.ch



Stefan Höller

Tel.: +43 660 104 58 13
Stefan.Hoeller@JabergundPartner.com



ADAMS seit 1960 Experte für Armaturen und Kraftwerksausrüstung



ADAMS AG
SCHWEIZ



ADAMS AG
SCHWEIZ

Hochbelastete Absperrorgane – Herausforderungen bei Neuanlagen & Rehab-Projekten

23.9.2023

-2-



Agenda

- **Schliesssicherheit**

Viele Faktoren beeinflussen die Schliesssicherheit welche nicht alle im Detail erfasst werden können, RECHNE mit genügend RESERVE Schadenfall wartungsfreies Lager

- **Verschiedene Antriebslösungen**

Wasser, Öl, Gewicht, elektrisch, kombiniert
Druckspeicher bei Stromausfall / Schaltung

- **Verformungen**

Zu hohe Verformungen welche zu Leckagen und Antriebsblockierungen führen kann, Kompletter Ausfall der Sicherheitsfunktion



Schliesssicherheit bei neu und Rehabprojekten

Für einen sicheren Betrieb..... Aber wie viel.....

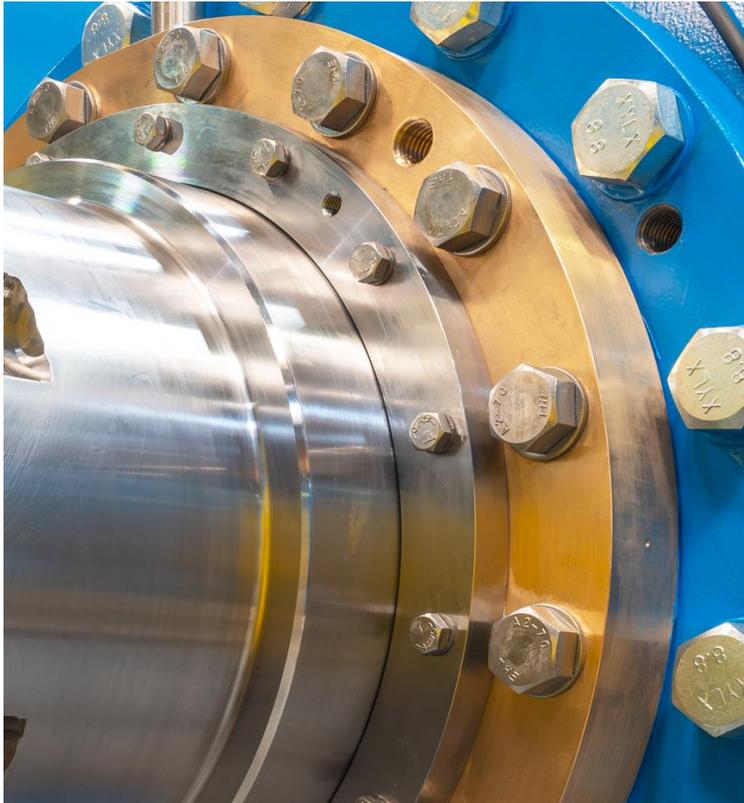
$$S_{\text{Spn}} := \frac{M_g + M_{\text{hyN}} + M_{\text{exN}} + M_{\text{gk}}}{M_{\text{Nlt}} + M_{\text{rg}} + M_{\text{L}} + M_{\text{RGS}} + M_{\text{Zr}} + M_{\text{rlN}} + M_{\text{rSB}}}$$

Die Schliesssicherheit sollte alle möglichen Lasten welche der Schliesssicherheit entgegenwirken abdecken.

Um jederzeit ein sicheres Schliessen gewährleisten zu können

Das Absperrorgan ist ein Sicherheitsorgan, welches in jedem Fall sicher schliessen muss!

Einflüsse Hauptlager, Lagerreibung - Momente



Eigenschaften:

- Selbstschmierend, gesintertes Lager, Graphit Noppen
- Massivbronze mit Fettschmierung
- Gegenwerkstoff
- Nur 90° Bewegung, Verteilung Schmierfilm und Verschleiss

Verformung der Lagerstelle:

- Zwangskräfte (Last, Toleranzen, Montage)
- Kantenpressung

Verschmutzung:

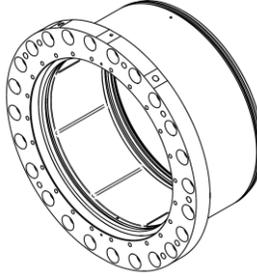
- Dichtungsleckage, Feststoffe
- Ansammlung von Abrieb durch unzureichende Reinigungsnuten

Dichtungen:

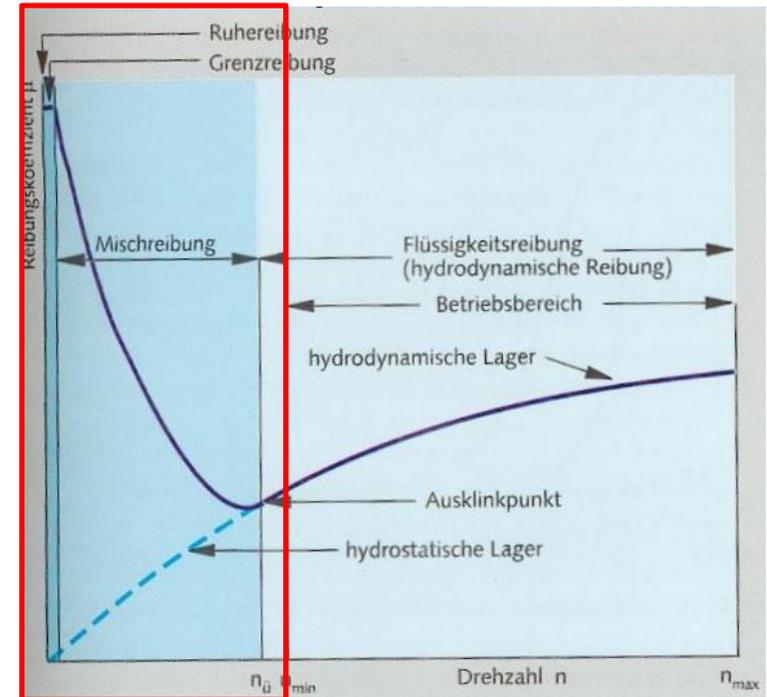
- Vorspannung, Material und Form der Dichtung

Typische Reibwerte:

- Selbstschmierend 0.12 – 0.25 (0.4)
- Festkörperreibung
- Bronze Fettgeschmiert 0.08 – 0.12
- Viskose Reibung



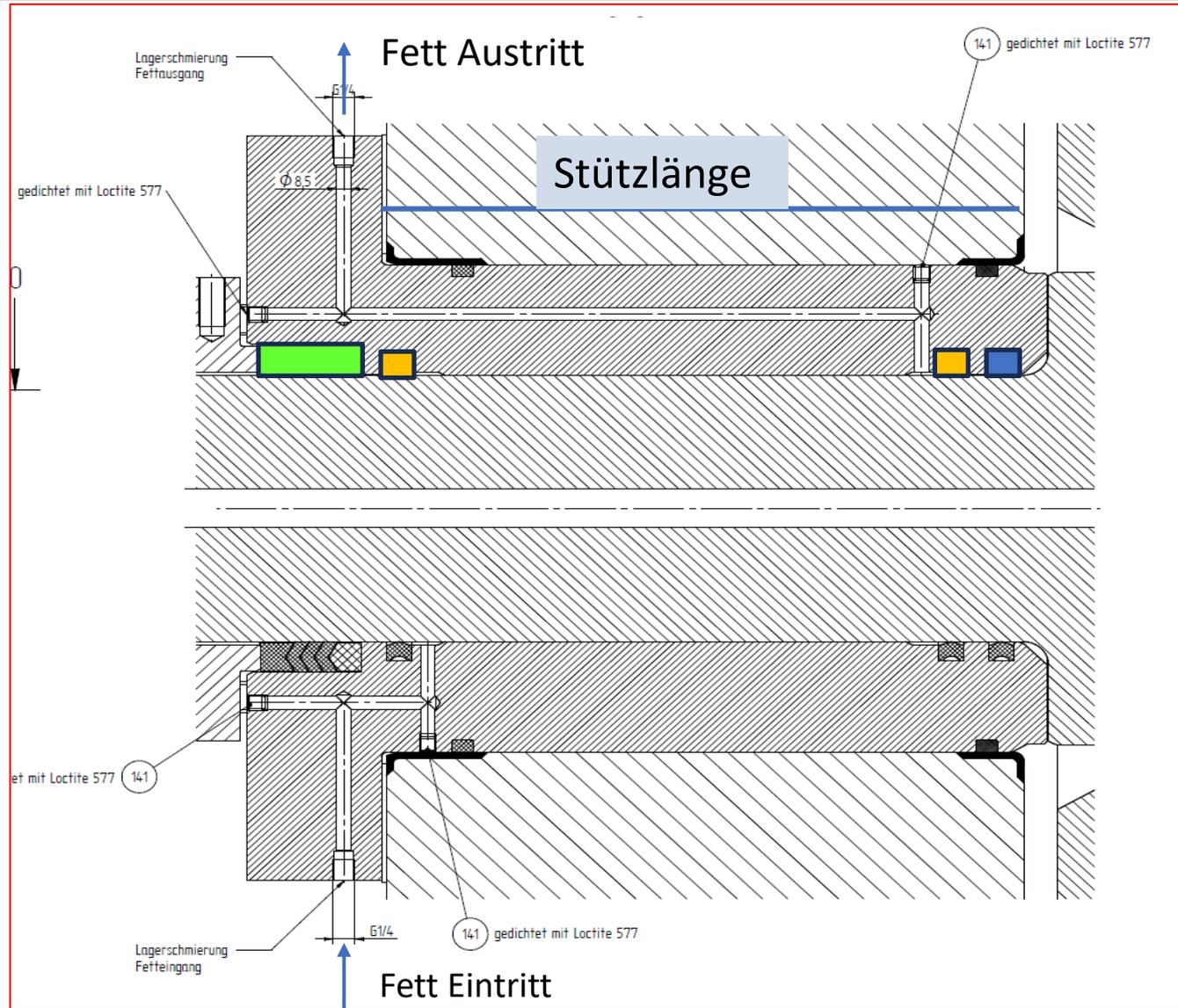
Stribeck Diagram



www.uebauer.de



Beispiel Lagerung mit Fettschmierung

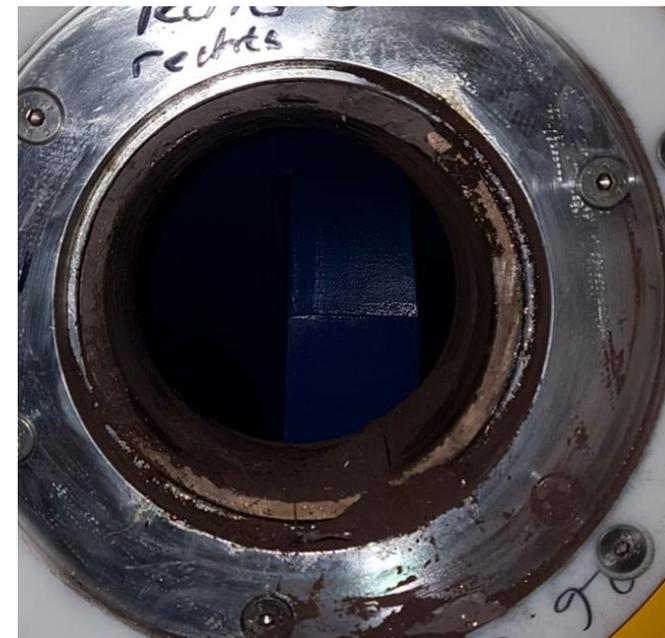


Empfohlene Lagermaterialien

- Rotguss
2.1090 RG7 / CuSn7Zn4Pb7
- Bleibronze
2.1176 / CuSn10Pb10
- Zinnbronze
CC484K / CuSn12Ni2-C
- Empfohlenes Wellenmaterial:
1.4313+QT900 geschliffen
im Lagerbereich

Schadenfall wartungsfreies Lager

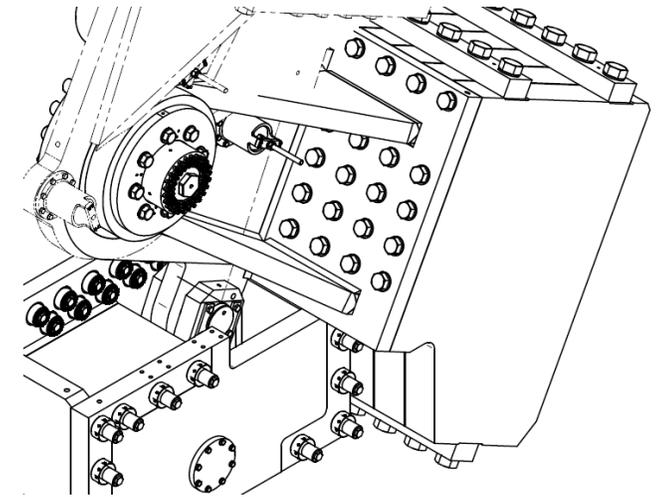
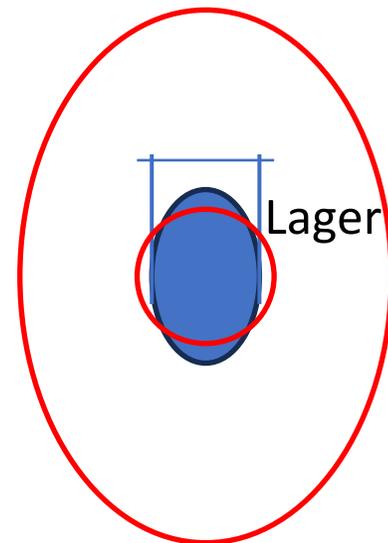
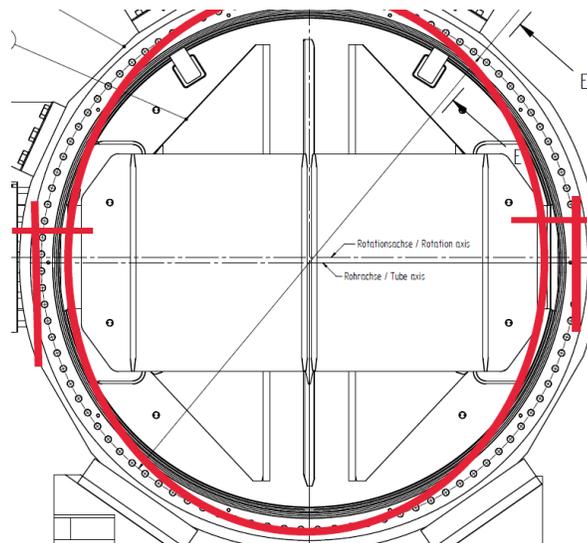
Gesinterter Lagerwerkstoff mit Graphite und PTFE



Der Lagerwerkstoff ist an den Kanten gebrochen, und hat sich im Bereich der Lauffläche komplett zerrieben.
Der Werkstoff wurde regelrecht pulverisiert

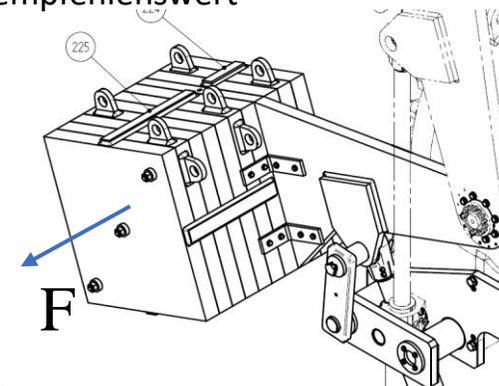
Verformungen

- Ovalisierung
- Zwängung Druck auf Lagerstelle
- Verformung beim Antrieb (Rüttelkräfte)



Mögliche seitliche
Anregung, nicht
empfehlenswert

Steife Konstruktion,
gutmütig bezüglich
Anregung



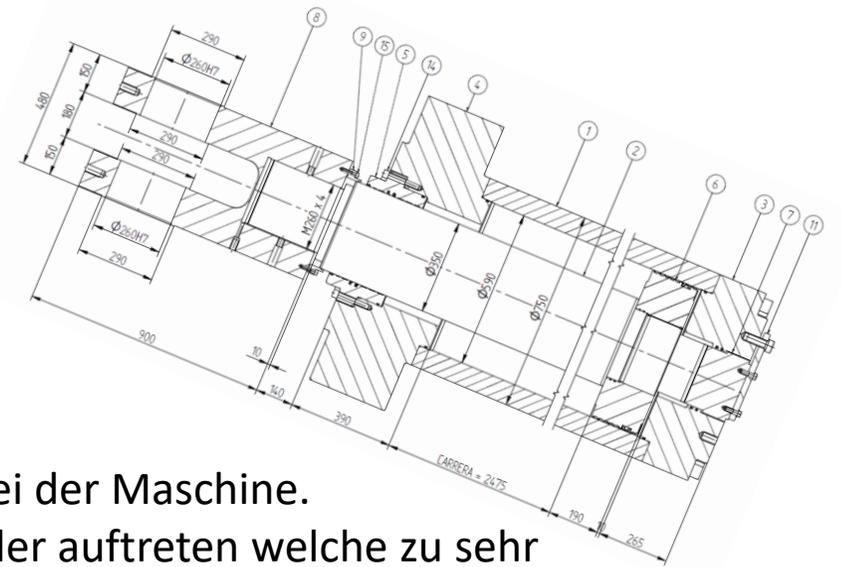
- Zylinderreibung

- Lagerwerkstoff für die Drehzapfen, Gelenklager, etc...
- Dichtungsreibung, Anzahl, Vorspannung, Material und Form
- Achtung Einbaulage

- Einflüsse aus der Strömung

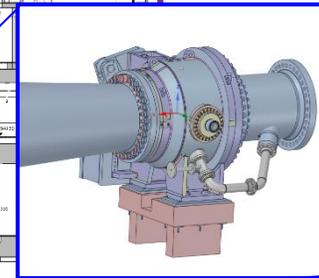
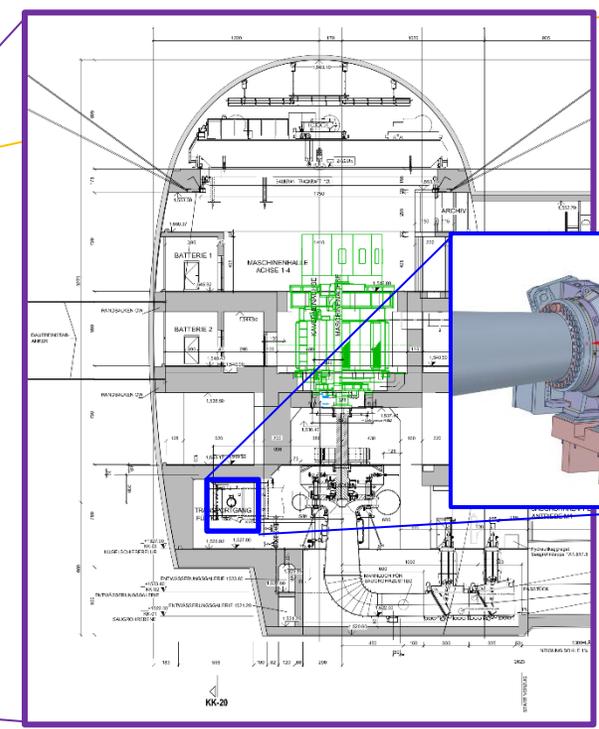
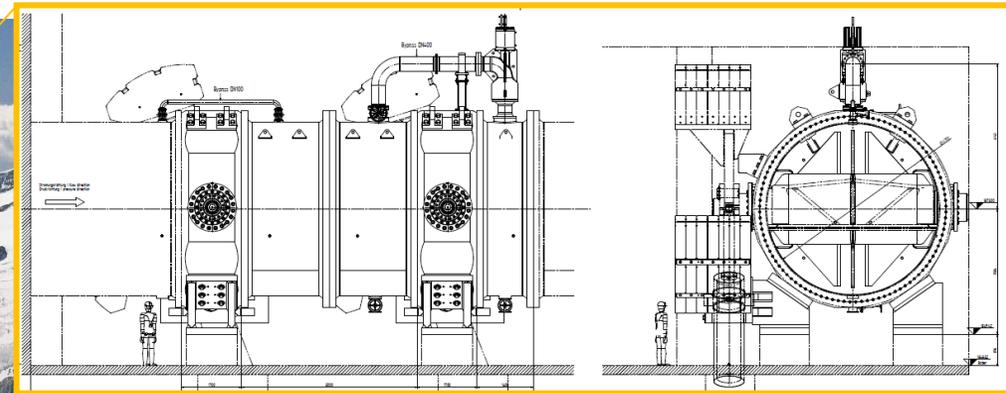
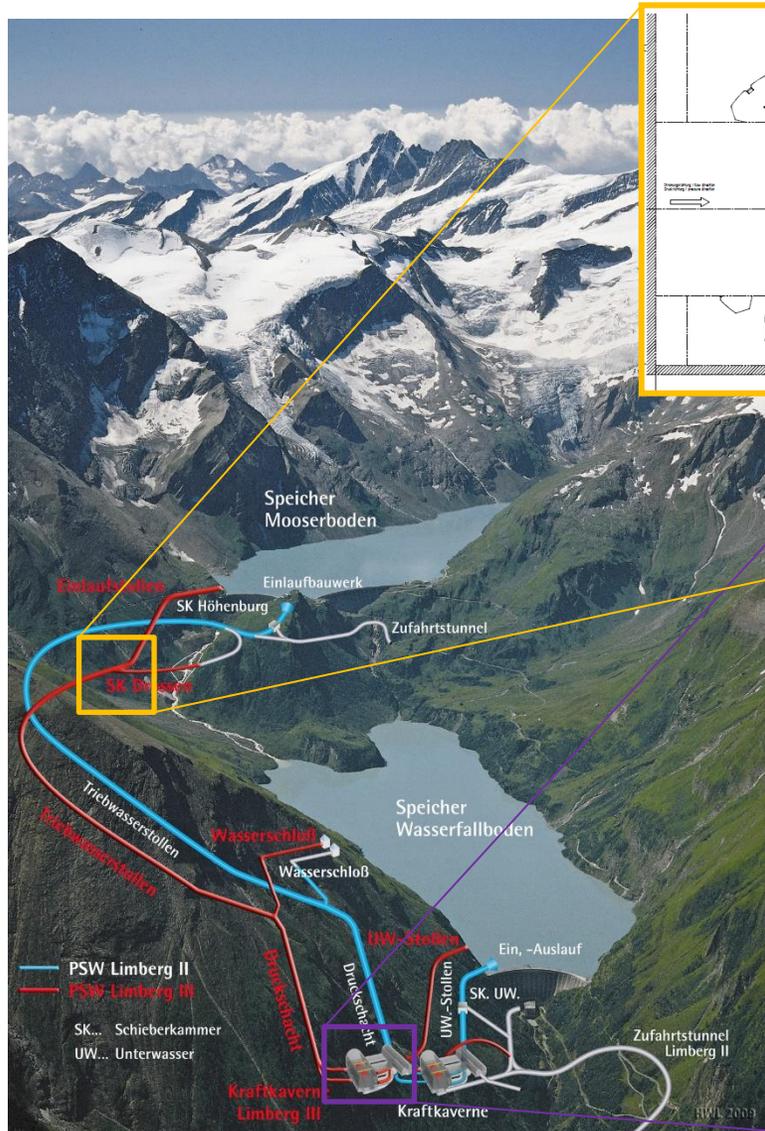
- Einleiten bei hoher Strömung, Eintauchen.
- Staudruck am Teller oder Kugel Rohrbruchfall oder hoher Wasser Verlust bei der Maschine.

Generell gilt dass bei dieser Art der Strömung hohe Wirbel und Kavitationsfelder auftreten welche zu sehr komplexen Lastzuständen führen, welche schwierig zu erfassen sind.

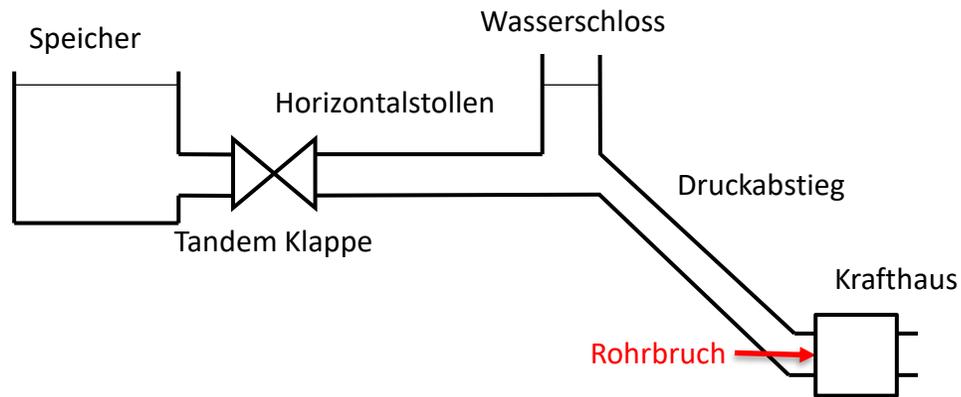


Hochbelastete Absperrorgane im Pumpspeicherkraftwerk Limberg III

- Neuer Triebwasserweg für Pumpspeicherkraftwerk Limberg III
- DN 4900 Tandem-Doppeldecker-Klappen in Schieberkammer Drossen; Notschlusstauglich im Rohrbruchfall bzw. bei Havarie im Kavernenkraftwerk
- Je ein ebenfalls notschlusstauglicher DN 2000 Kugelschieber vor den beiden Pumperturbinen
- Extreme Belastungen im Rohrbruchfall aufgrund immenser Durchflüsse
- Numerische Berechnung der hydraulischen Eigenschaften mittels CFD-Simulation (3D-CFD und 1D-transient / Druckstoß)



Rohrbruch: Höchste Belastungen! Wie groß ist der Durchfluss?



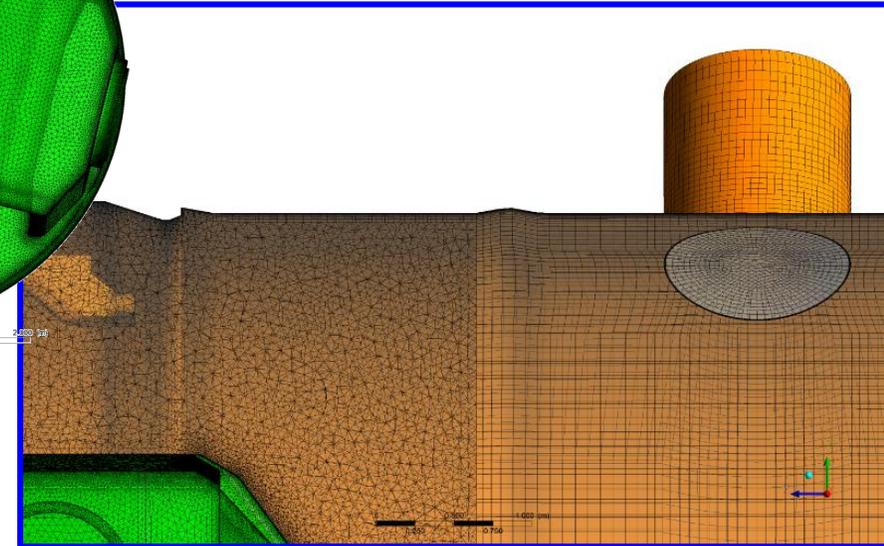
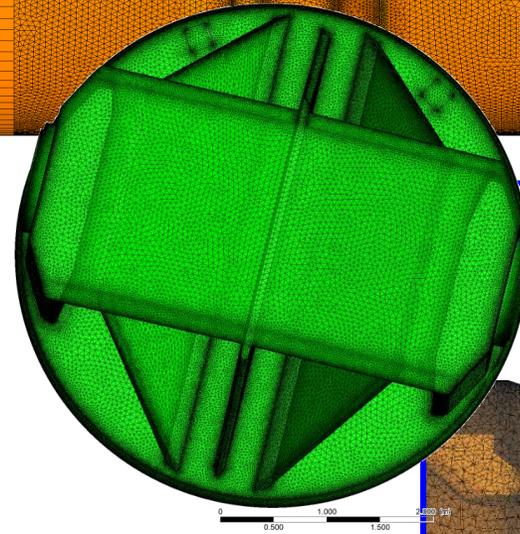
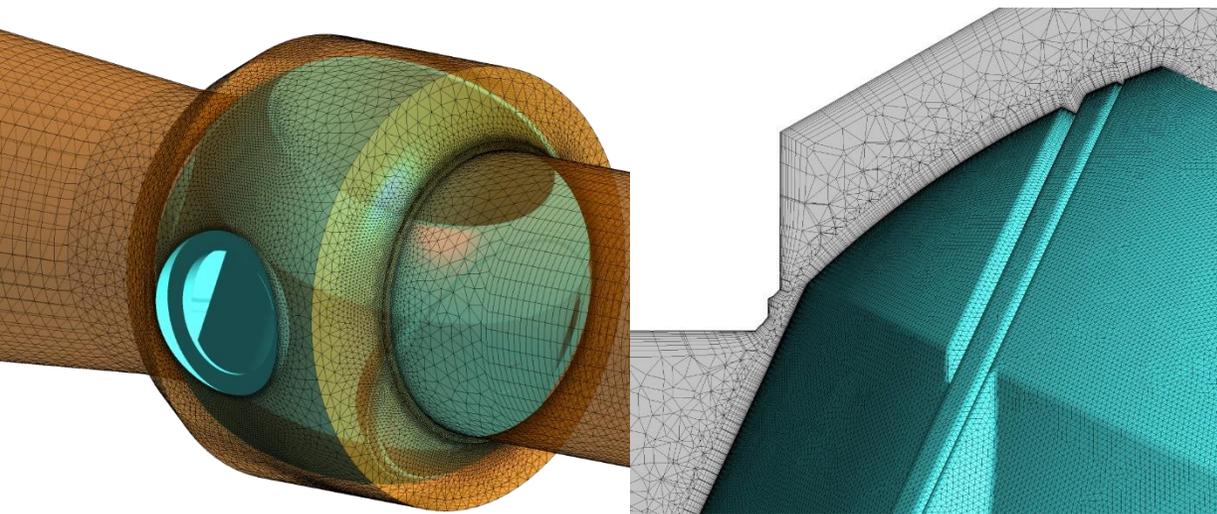
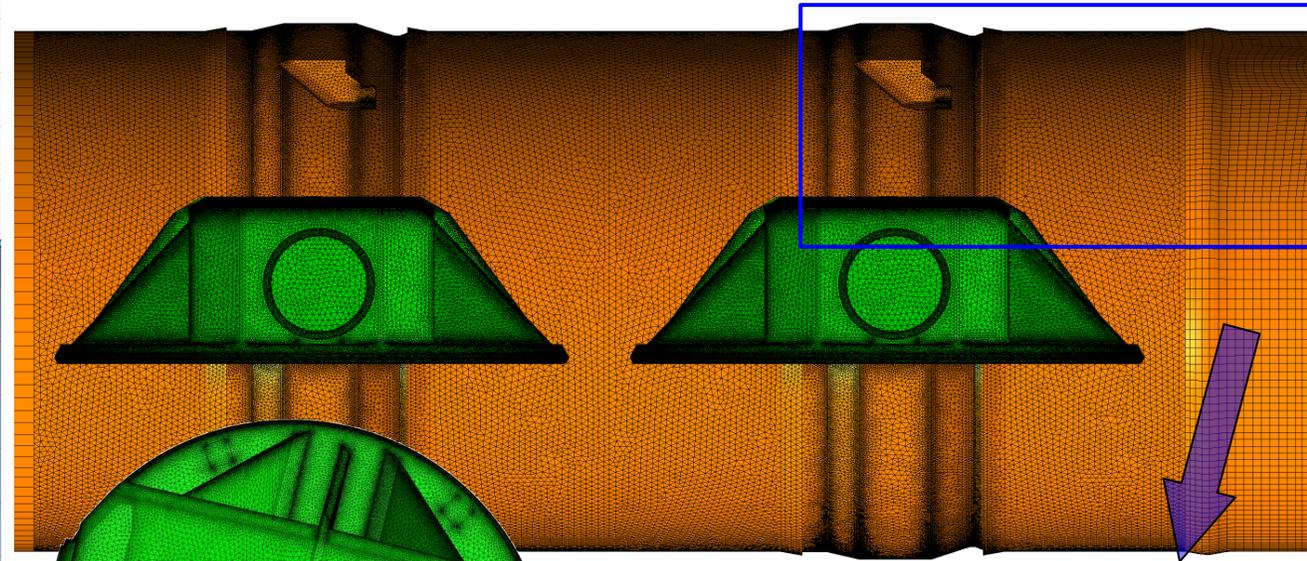
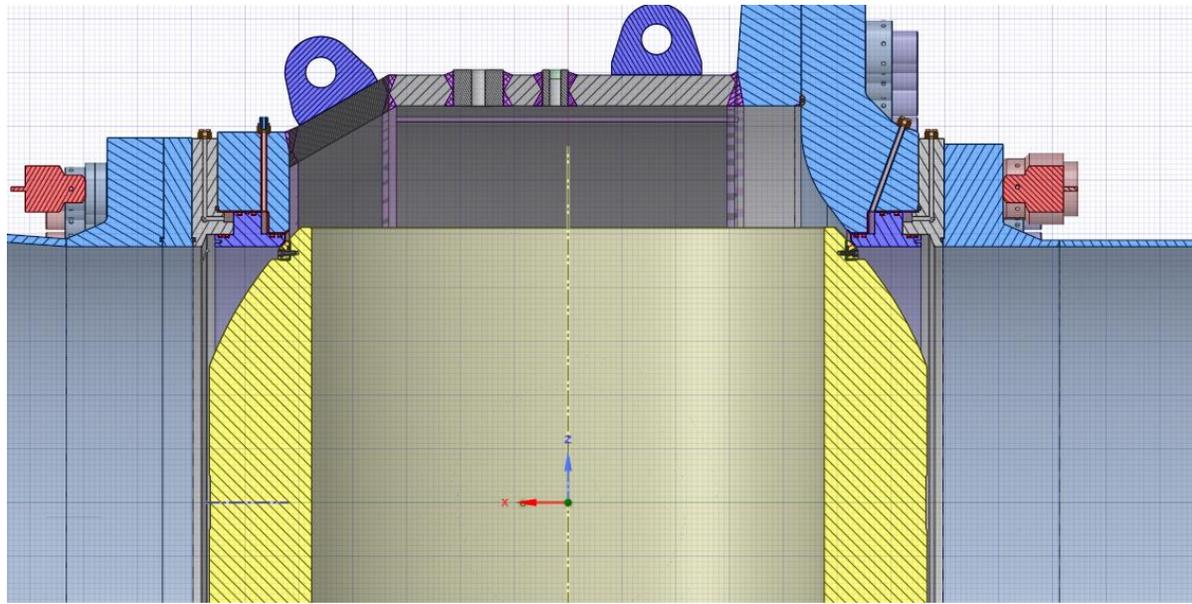
| | | |
|-------------------------------------|--------------|------|
| Stauziel Moserboden (Oberwasser) | 2036 | müNN |
| Höhenkote Tandem-Klappen | 1873 | müNN |
| Höhenkote Rohrbruch (Kugelschieber) | 1530 | müNN |
| Bruttofallhöhe im Rohrbruchfall | 506 | m |
| Vordruck Tandem-Klappe | 163 | m |
| $D_{N,Klappe}$ | 4.9 | m |
| $D_{N,Kugelschieber} = D_{out}$ | 2 | m |
| $\zeta_{valve,open}$ | 0.09 .. 0.15 | - |
| ζ_{out} | 1 | - |

$$H_V = \underbrace{\frac{1}{2g} \zeta_{valve} \frac{16 Q^2}{D_{valve}^4 \pi^2}}_{\text{Verlusthöhe Tandem-Klappe}} + \underbrace{\alpha \cdot Q^2}_{\text{Verlusthöhe Triebwasserstrecke}} + \underbrace{\frac{1}{2g} \zeta_{out} \frac{16 Q^2}{D_{out}^4 \pi^2}}_{\text{Druckhöhe Austrittsstrahl}} = H_{Brutto}$$

$Q_{Rohrbruch} = 288.7 \text{ m}^3/\text{s}$
 ($Q_{Nenn,TU} = 72 \text{ m}^3/\text{s}$)
 ($Q_{Nenn,Kraftwerk} = 144 \text{ m}^3/\text{s}$)

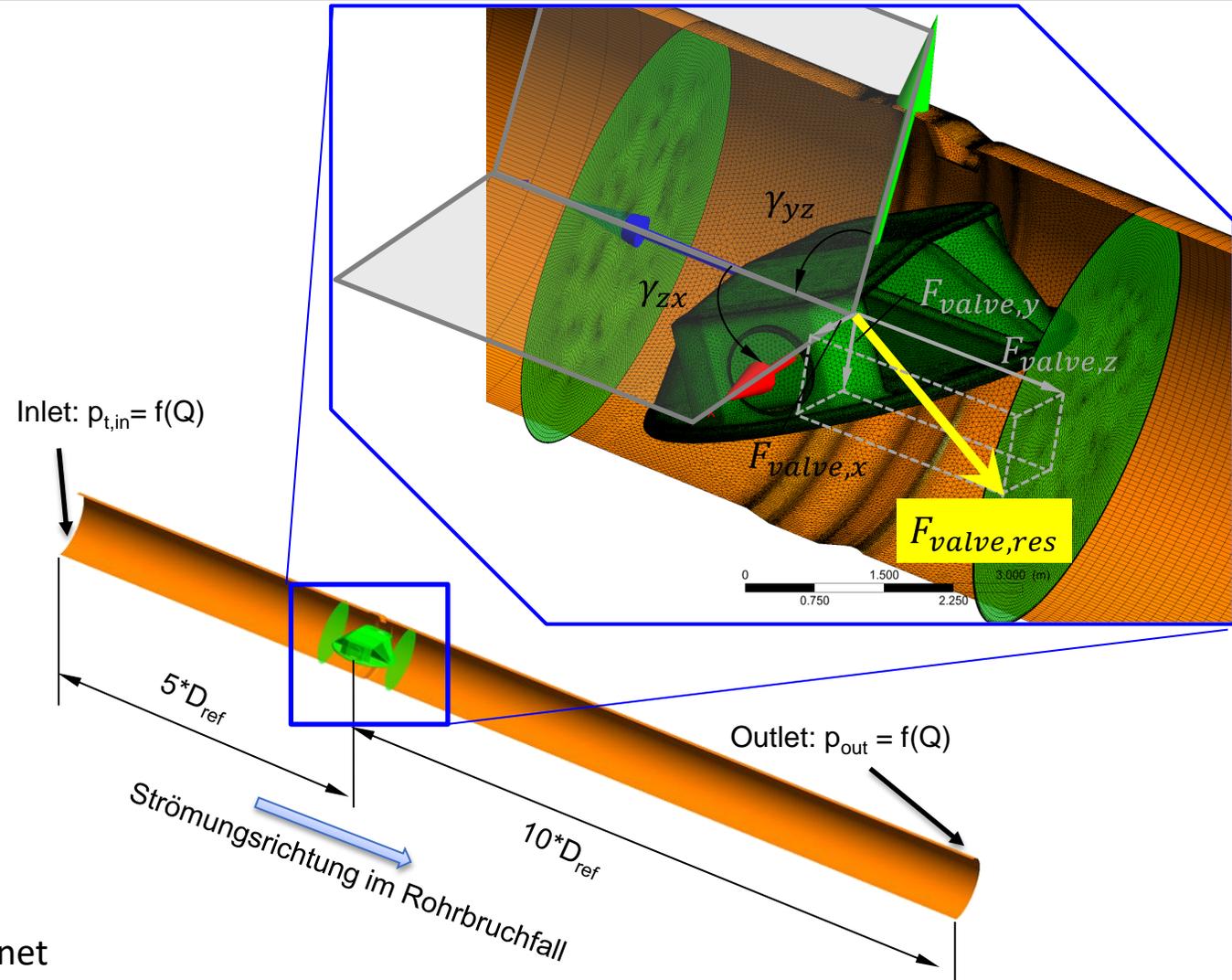
| | | | |
|--------------|-------|---|--------|
| H_{Valve} | 1.3 | m | 0.3% |
| H_{System} | 74.0 | m | 14.6% |
| H_{Out} | 430.7 | m | 85.1% |
| Summe | 506 | m | 100.0% |

Geometrieaufbereitung und Gittergenerierung



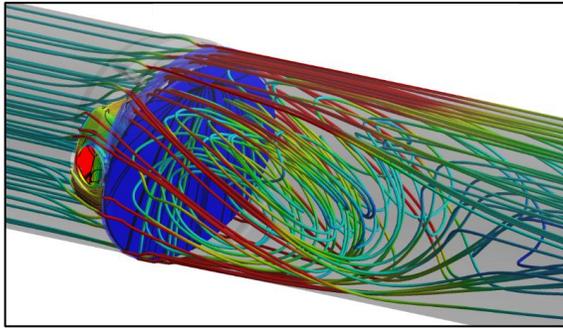
3D-CFD: Numerisches Modell - Einzelklappensimulation

- Einphasige 3D-CFD simulations mit ANSYS CFX
 - Kavitation oder Belüftung nicht modelliert
 - SST-Turbulenz-Modell
 - Alle geometrischen Details berücksichtigt
ca. 15 verschiedene Stellungen vergittert und berechnet
($\approx 7.5 \cdot 10^6$ Knoten, $16.5 \cdot 10^6$ Elemente)
 - Randbedingungen (RB):
 - Totaldruck am Eintritt / Inlet ($p_{t,in}$)
 - Statischer Druck am Austritt / Outlet (p_{out})
- CFD-Modell berücksichtigt die Einbausituation, den Druckverlust im Triebwasserweg und den Austrittsverlust
- RBs ($p_{t,in}$ und p_{out}) sind vom Durchfluss Q abhängig, welcher ein Berechnungsergebnis der CFD-Simulation darstellt \Rightarrow Implizite Randbedingung notwendig
 - $p_{t,in}$ und p_{out} werden im Simulationsverlauf iterativ berechnet

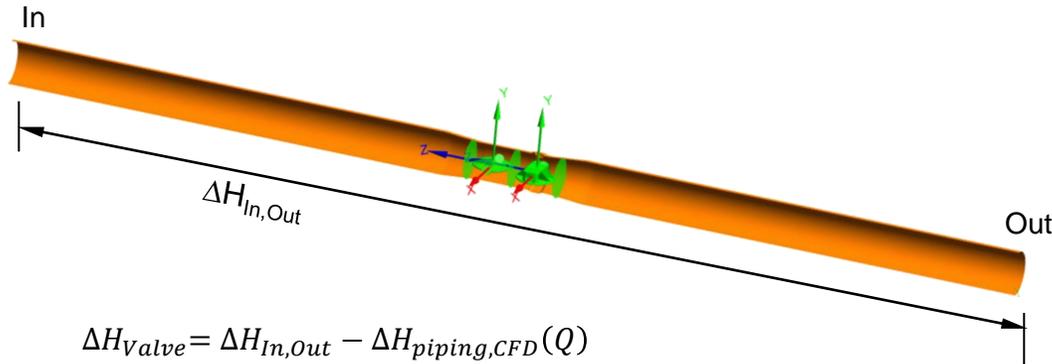
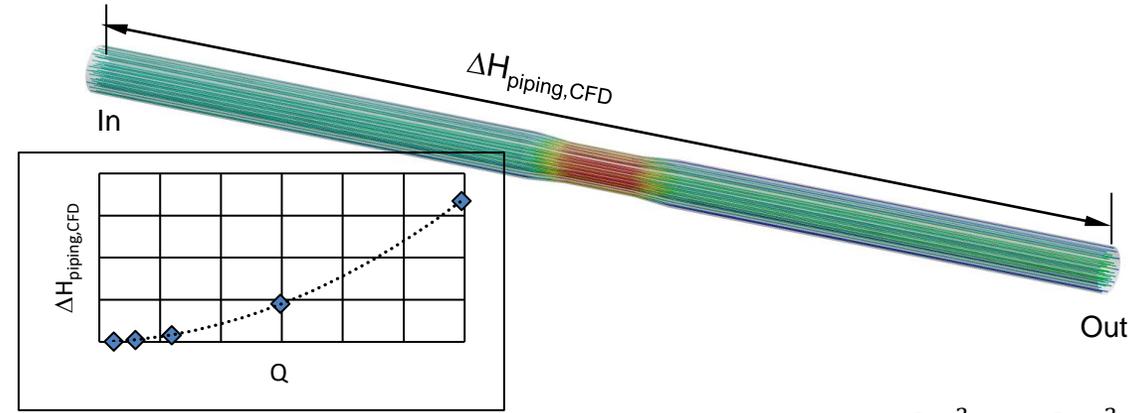


Schnelle Simulationsläufe (gute Konvergenz), rasche Reaktionen auf Geometrieadjustments möglich

Beispielhafte Auswertung der 3D-CFD Ergebnisse



- keine „saubere“ Messebene nach der Klappe
- Auswertung der Verlusthöhe nach IEC 60543-2-3 analog experimenteller Messung
- Ermittlung der Verlusthöhe ohne Klappe
- Auswertung der Verlusthöhe in Einbausituation als Differenz



$$\Delta H_{Valve} = \Delta H_{In,Out} - \Delta H_{piping,CFD}(Q)$$

$$H_{Valve} = \Delta H_{Valve} + \frac{\left(\frac{4 \cdot Q}{D_{ref}^2 \cdot \pi}\right)^2}{2 \cdot g}$$

$$\sigma = \frac{p_{Out,Valve} - p_{vap}}{\rho \cdot g \cdot H_{Valve}}$$

$$\Delta H_{piping,CFD} = \frac{1}{\rho g} \left[\frac{1}{A_{In}} \left(\int p \cdot dA \right) \Big|_{In} - \frac{1}{A_{Out}} \left(\int p \cdot dA \right) \Big|_{Out} \right] + \frac{\left(\frac{Q}{A_{In}}\right)^2 - \left(\frac{Q}{A_{Out}}\right)^2}{2g}$$

$$\vec{F}_{valve} = \int_A -p \cdot \vec{n} \cdot dA = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix}$$

$$T_{valve,x} = \int_A (y \cdot dF_z - z \cdot dF_y) dA$$

$$|\vec{F}_{valve}| = F_{valve,res} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

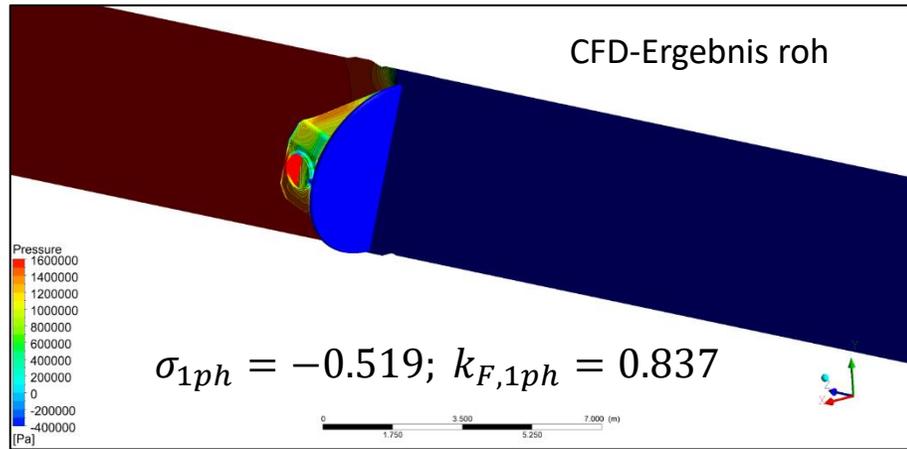
$$k_{Q,Grein} = \frac{4 \cdot Q}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_{valve}} \cdot D_{ref}^2 \cdot \pi}$$

$$k_{F,i,Grein} = \frac{F_{valve,i}}{\rho \cdot g \cdot H_{valve} \cdot D_{ref}^2}$$

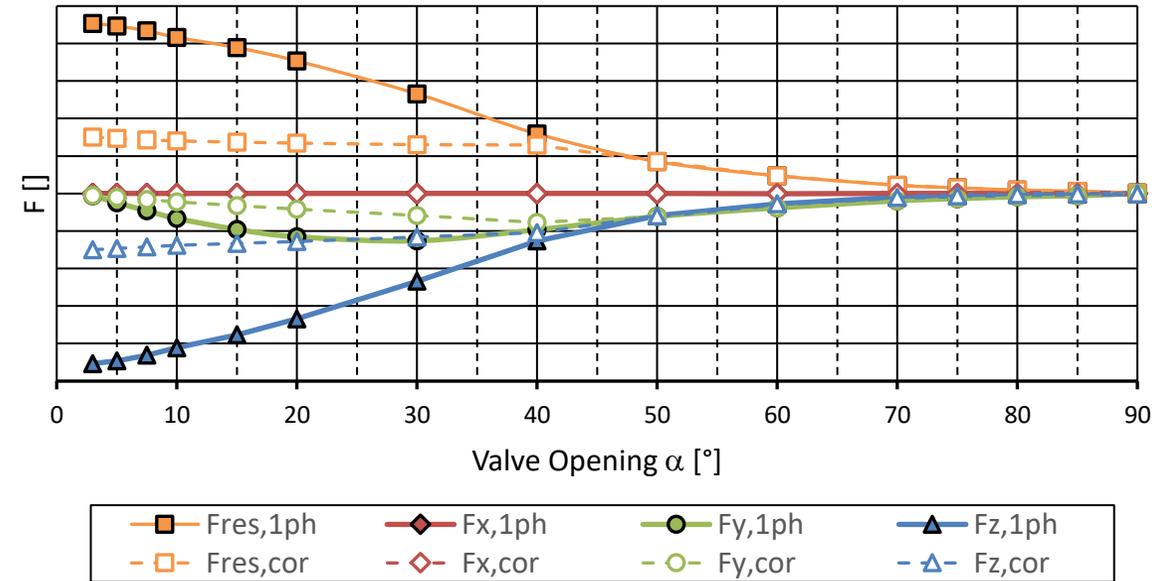
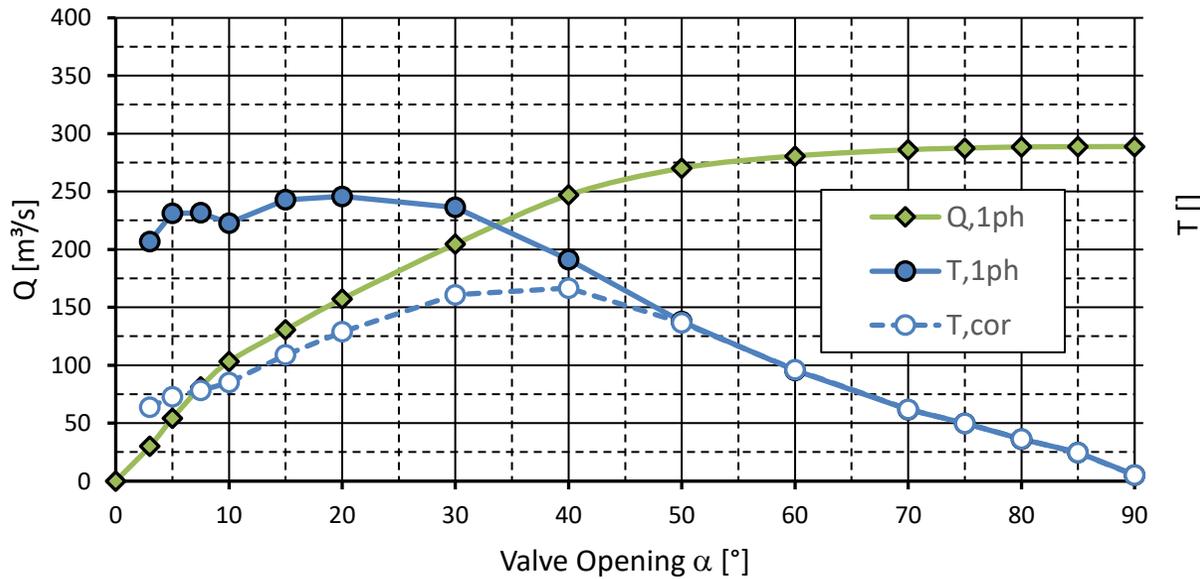
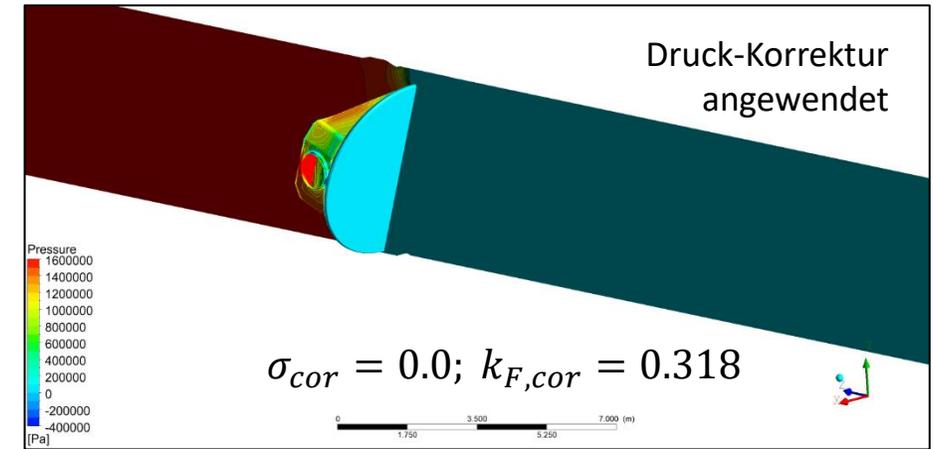
$$k_{T,Grein} = \frac{T_{valve,x}}{\rho \cdot g \cdot H_{valve} \cdot D_{ref}^3}$$



3D-CFD Auswertung / Berücksichtigung von Kavitation



wenn ($p < p_{vap}$)
 $p = p_{vap}$



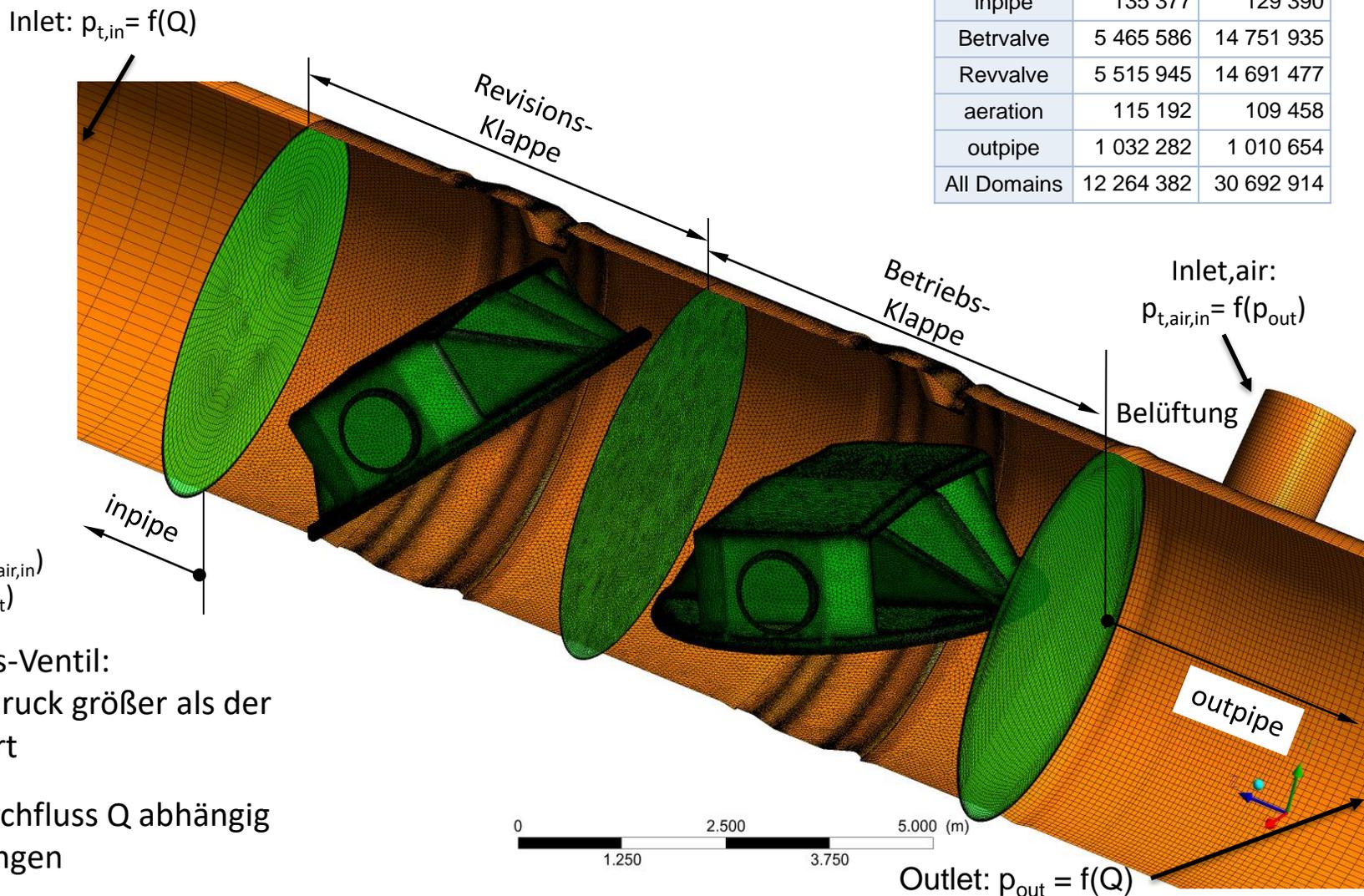
CFD-Modell Tandemanordnung

- Modellierung der Belüftung
- Mehrphasen 3D-CFD Simulation (VoF)
- Keine Kavitationsmodellierung
- 13 * 13 = 169 verschiedene Klappenstellungen untersucht
- Die Randbedingungen müssen der Drucksituation im Rohrbruchfall in der realen Anlage entsprechen, um die Belüftung korrekt zu modellieren

- Total-Druck am Eintritt / Inlet ($p_{t,in}$)
- Total-Druck am Luft-Eintritt / Inlet,air ($p_{t,air,in}$)
- Statischer Druck am Austritt / Outlet (p_{out})

„Inlet,air“ verhält sich wie ein reales Belüftungs-Ventil:
 Wenn der an der Randbedingung berechnete Druck größer als der Umgebungsdruck ist, wird eine Wand modelliert

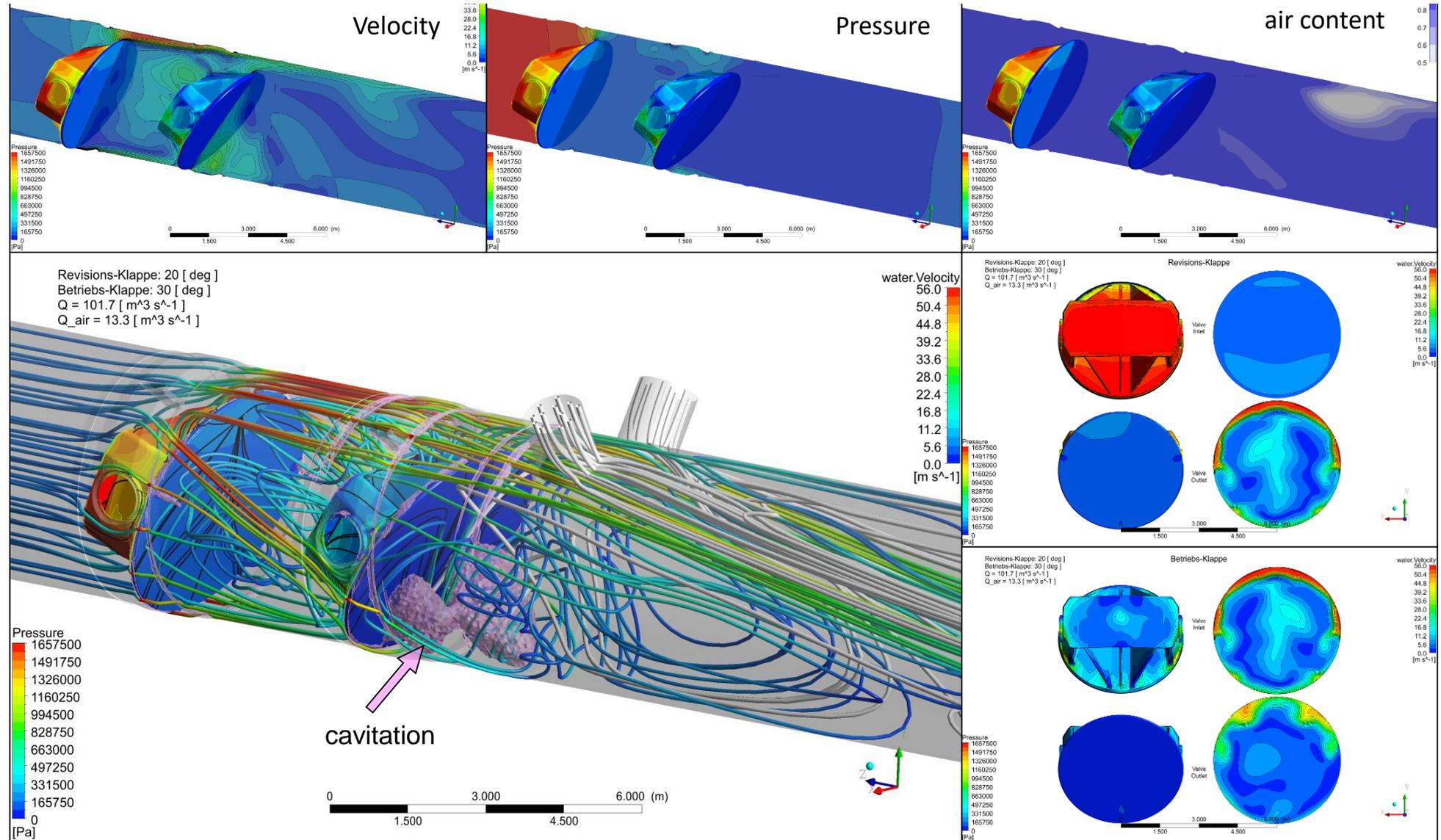
Alle Randbedingungen sind wiederum vom Durchfluss Q abhängig
 ⇒ implizite / iterativ berechnete Randbedingungen



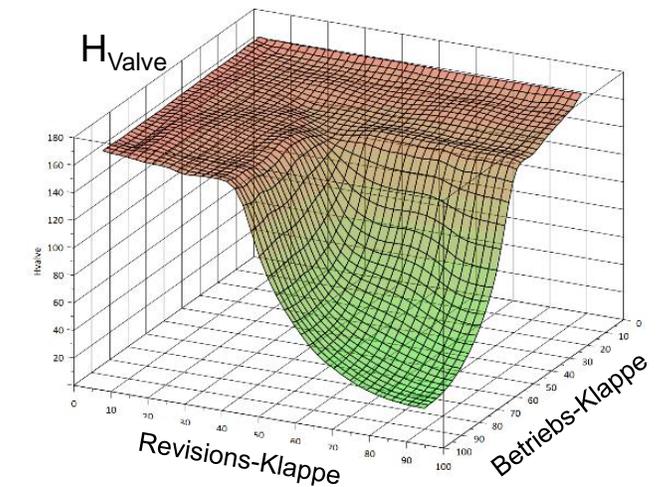
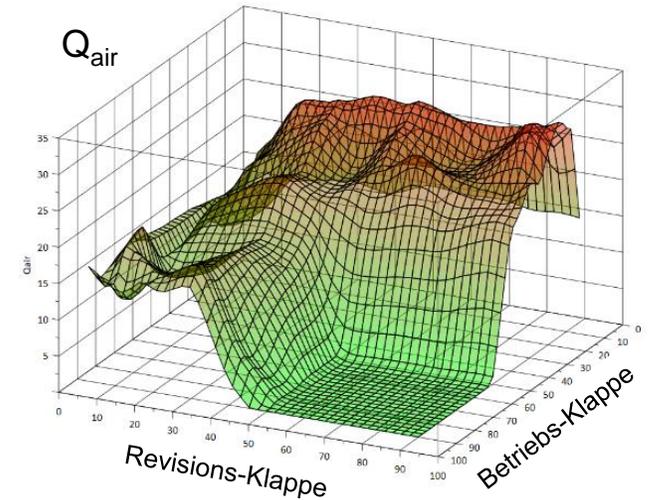
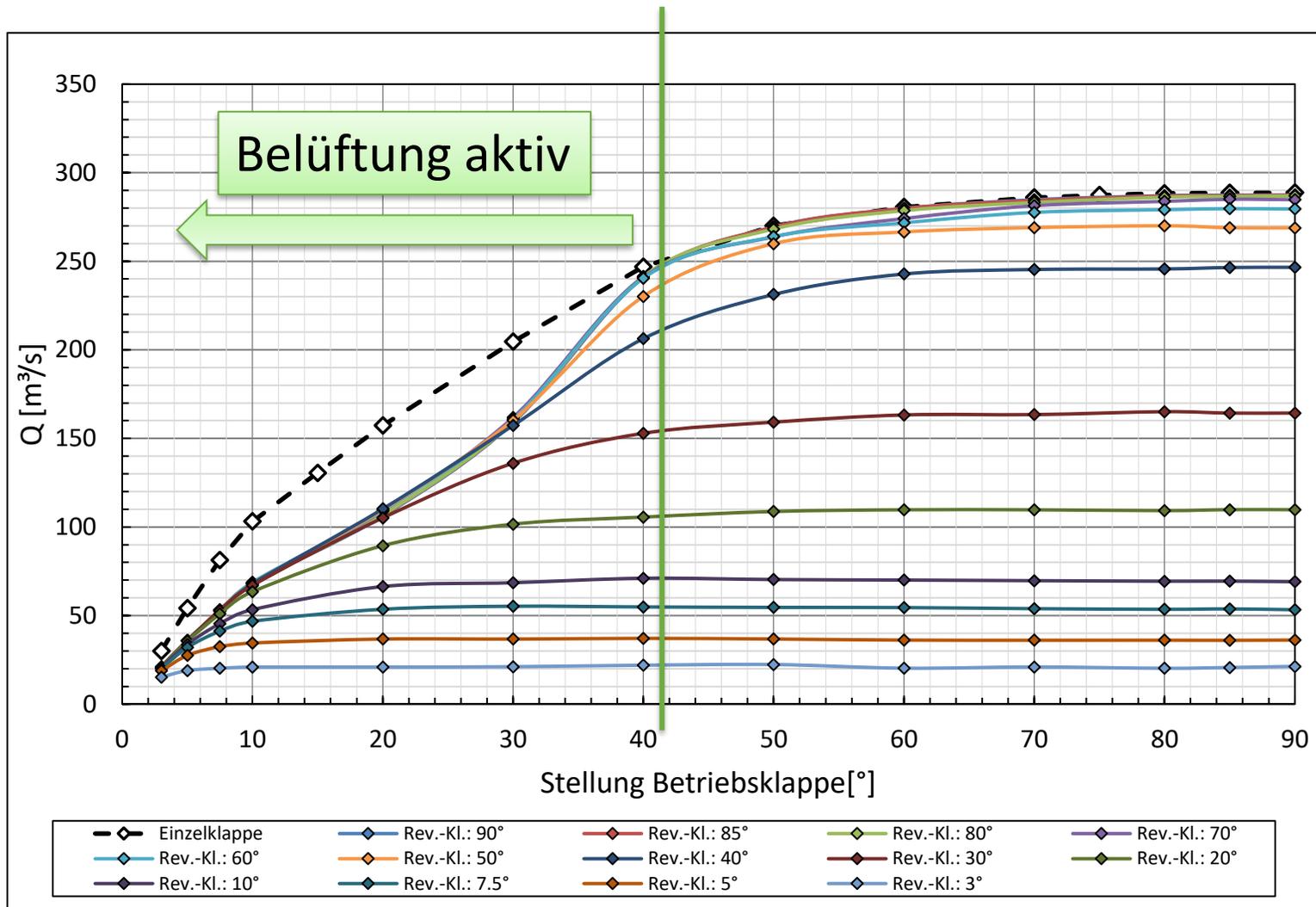
| Domain | Nodes | Elements |
|-------------|------------|------------|
| inpipe | 135 377 | 129 390 |
| Betrvalve | 5 465 586 | 14 751 935 |
| Revvalve | 5 515 945 | 14 691 477 |
| aeration | 115 192 | 109 458 |
| outpipe | 1 032 282 | 1 010 654 |
| All Domains | 12 264 382 | 30 692 914 |



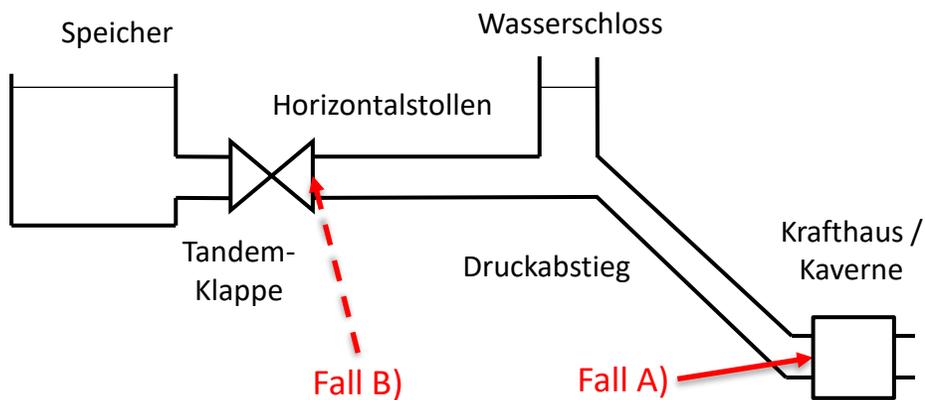
3D-CFD Tandem Strömungsvisualisierung: $O_{Rev} = 20^\circ$, $O_{Betr} = 30^\circ$



3D-CFD Tandem: Durchfluss, Belüftung, Klappen-Fallhöhe



Einfluss der Rohrbruch Lokalität bei identem Rohrbruch-Durchfluss



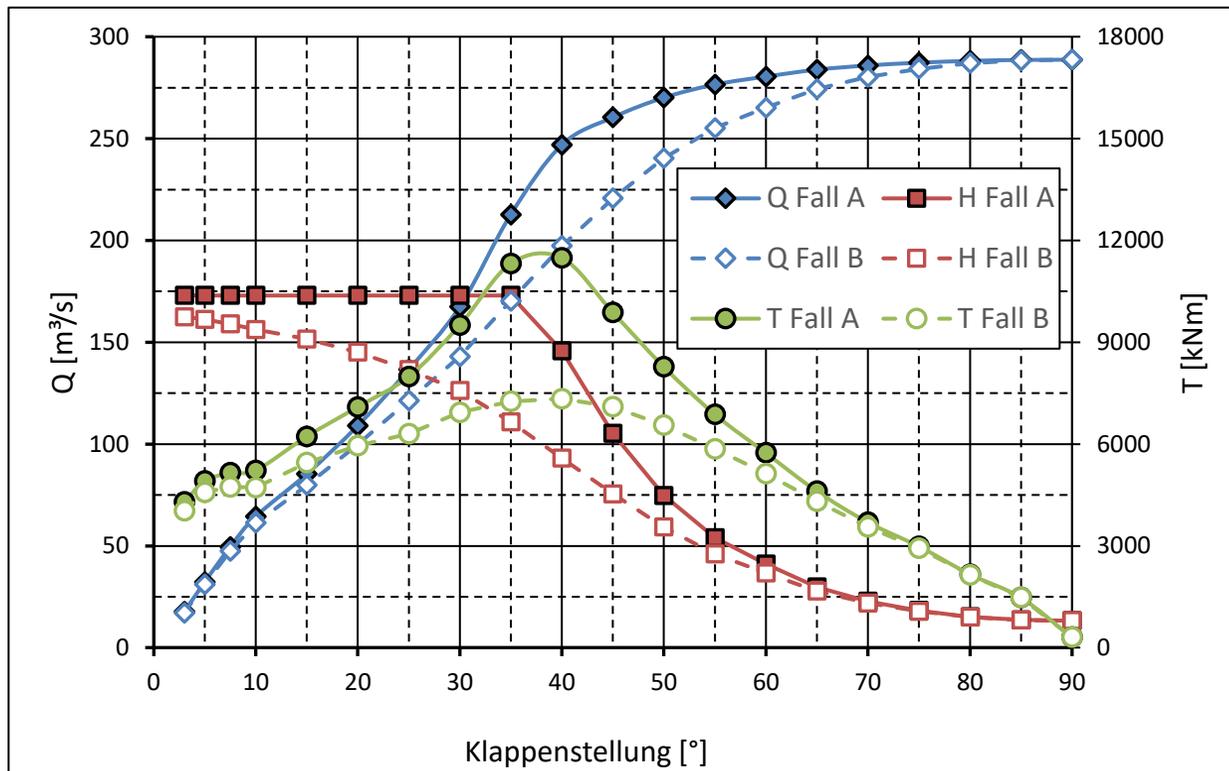
$$H_V = \frac{1}{2g} \zeta_{valve} \frac{16 Q^2}{D_{valve}^4 \pi^2} + \alpha \cdot Q^2 + \frac{1}{2g} \zeta_{out} \frac{16 Q^2}{D_{out}^4 \pi^2} = H_{Brutto}$$

Fall A)

| | | | |
|---------------------|-------|---|--------|
| OW-Pegel | 2036 | m | |
| Kote Rohrbruch | 1530 | m | |
| H _{Brutto} | 506 | m | |
| D _{out} | 2 | m | |
| | | | |
| H _{Valve} | 1.3 | m | 0.3% |
| H _{System} | 74.0 | m | 14.6% |
| H _{Out} | 430.7 | m | 85.1% |
| Summe | 506 | m | 100.0% |

Fall B)

| | | | |
|---------------------|-------|---|--------|
| OW-Pegel | 2036 | m | |
| Kote Rohrbruch | 1873 | m | |
| H _{Brutto} | 163 | m | |
| D _{out} | 2.588 | m | |
| | | | |
| H _{Valve} | 1.3 | m | 0.8% |
| H _{System} | 8 | m | 4.9% |
| H _{Out} | 153.7 | m | 94.3% |
| Summe | 163 | m | 100.0% |



Fall A) : Durch größeres H_{Brutto} und höherer Anlagenverluste verringerte Drosselwirkung beim Schließen im Vergleich zu B; Kavitation bzw. Aktive Belüftung bei Stellungen < 35°

Fall B) : Stärkere Drosselwirkung beim Schließen im Vergleich zu A); keine Belüftung

→ Bei gleicher Klappenstellung liegt bei A) eine Höhere Fallhöhe an der Klappe an; größerer Durchfluss und höhere Belastungen sind die Folge!

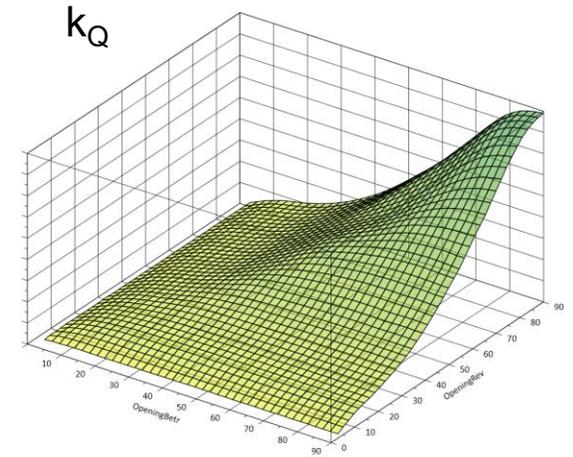
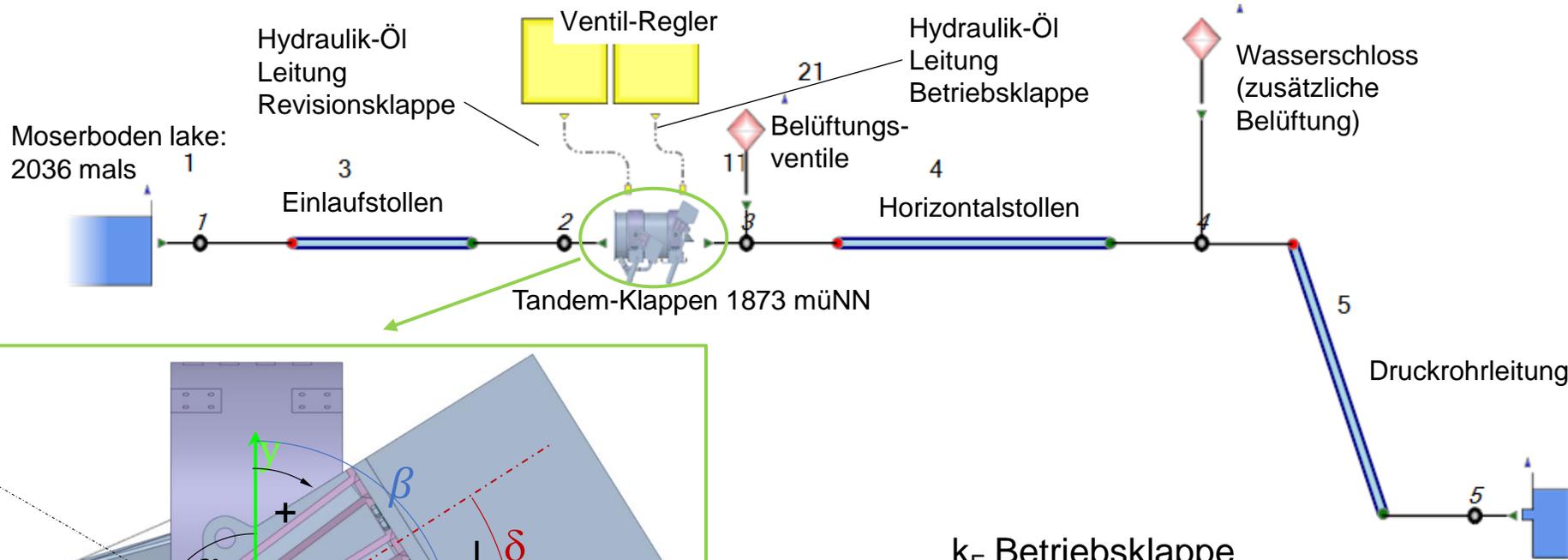
Anlagenverhalten ist wesentlicher Faktor für die Belastungen im Rohrbruchfall!

Q_{Rohrbruch} jeweils 288.7 m³/s

Anmerkung: Beispielhafte Ergebnisse aus stationärer Betrachtung / keine dynamischen Effekte berücksichtigt

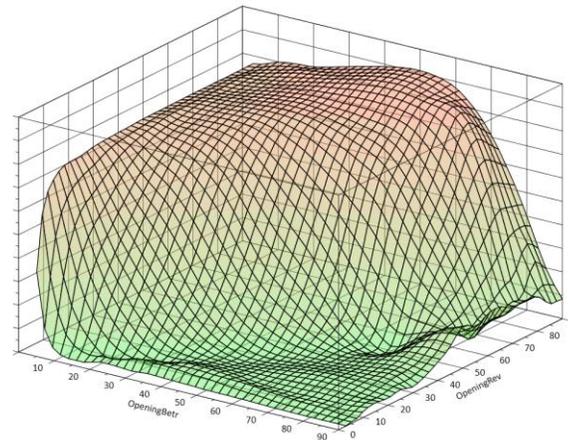


Transiente 1D-CFD-Simulation / Druckstoßberechnung

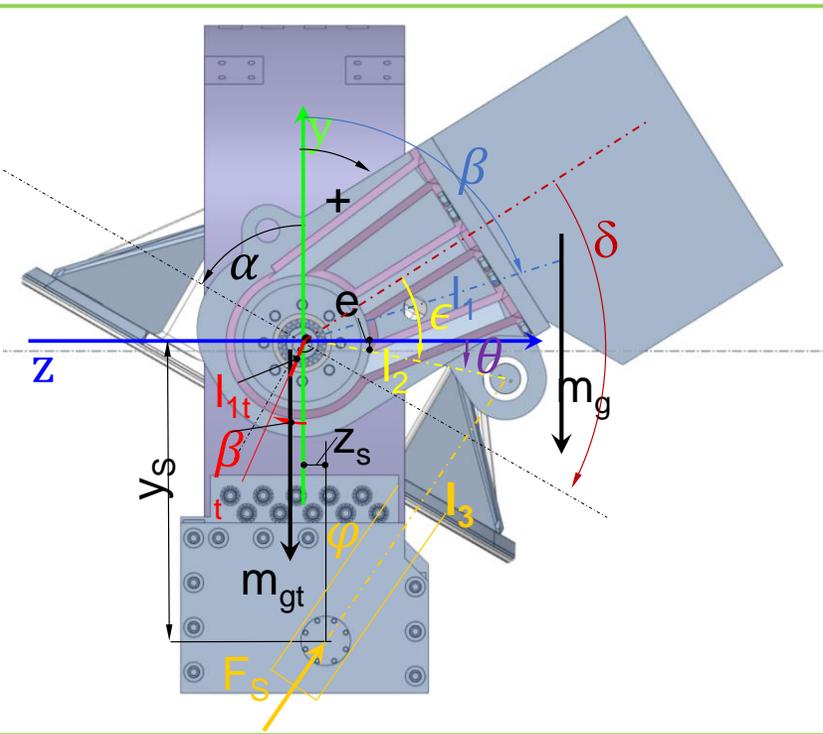
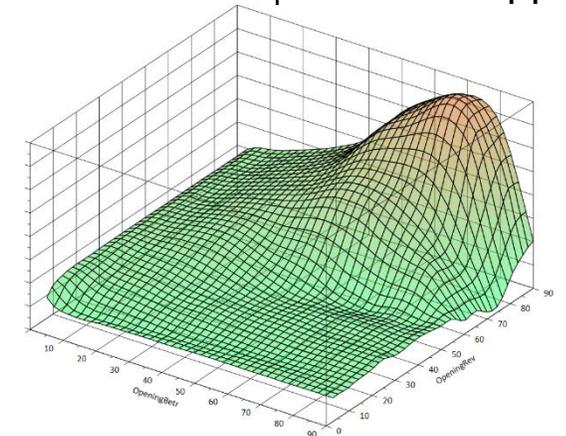


2 Kraftwerks-Kaverne 1530 müNN

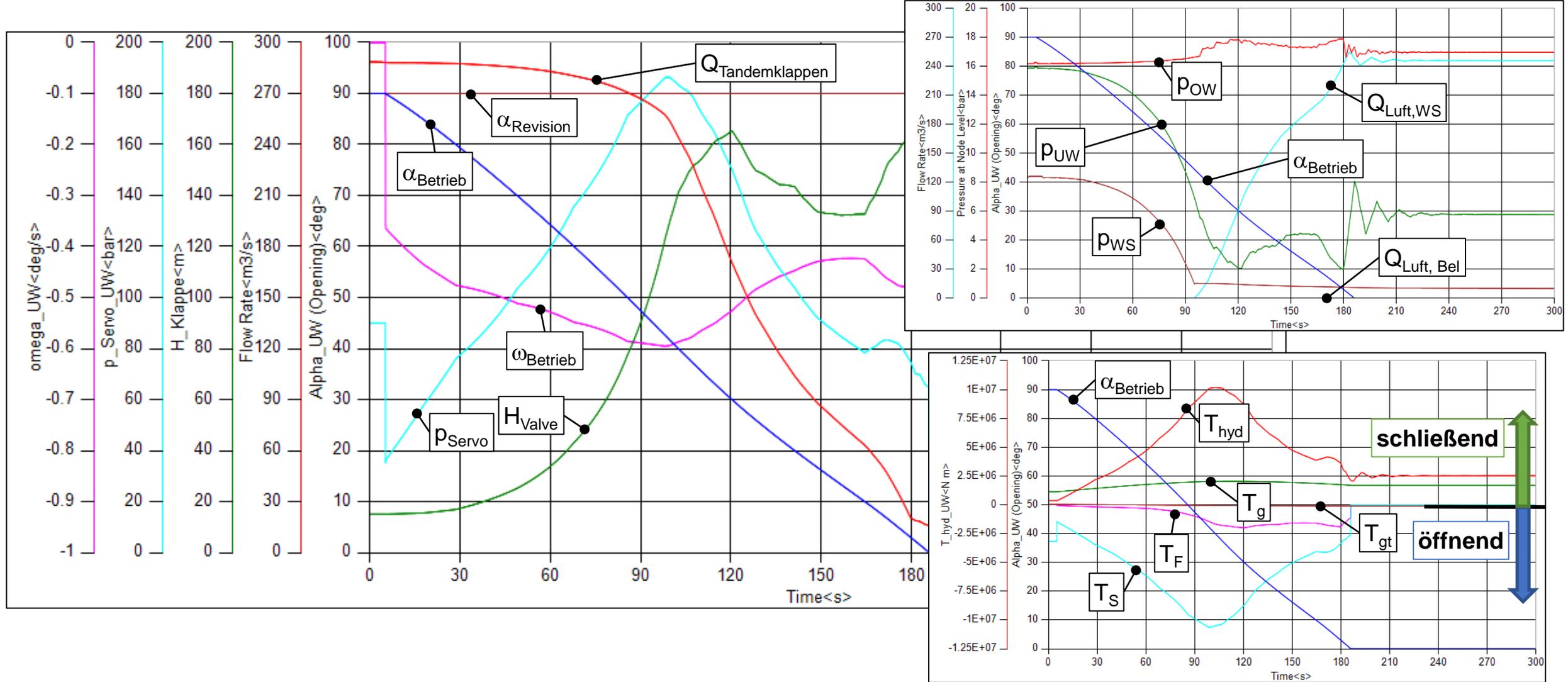
k_F Betriebsklappe



k_T Betriebsklappe



Notschluss im Rohrbruch-Lastfall: Transiente Belastungen

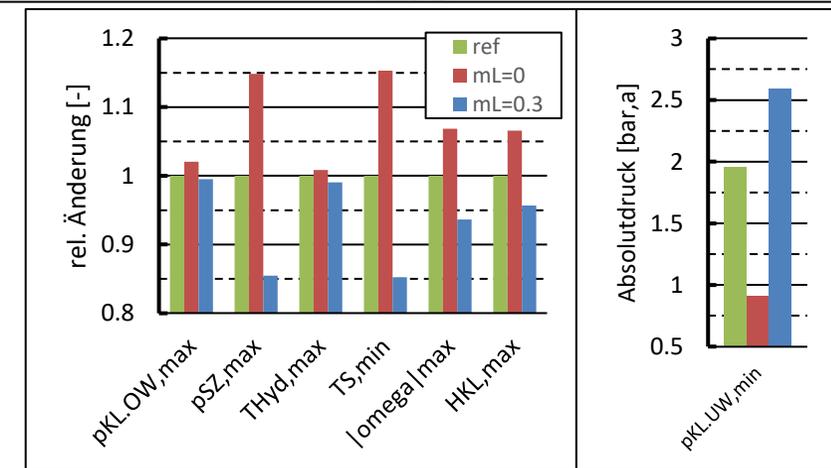
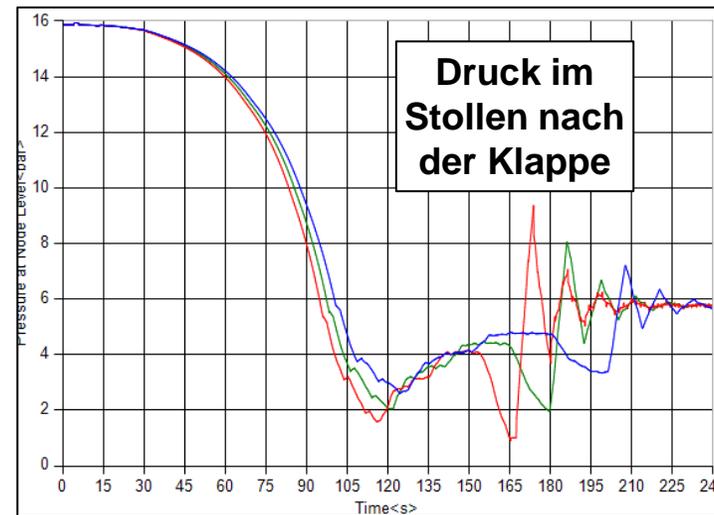
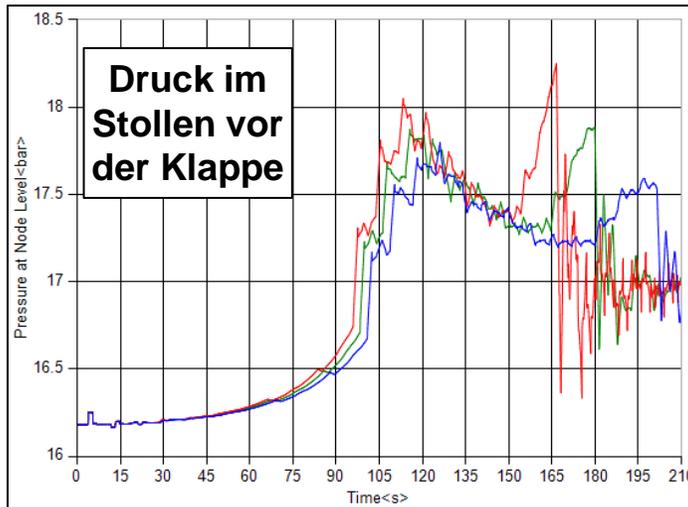
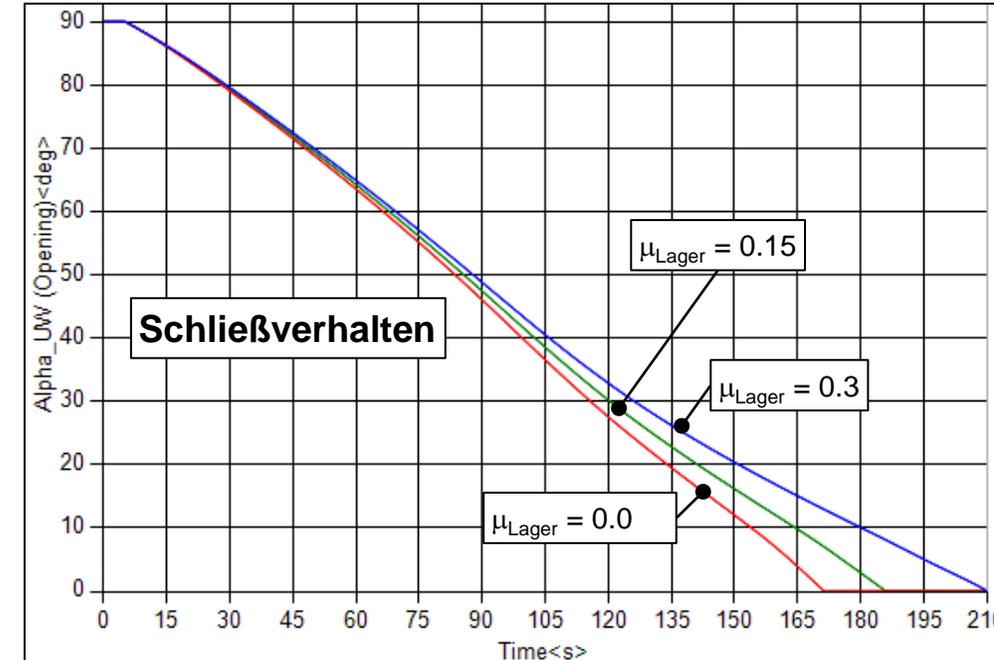
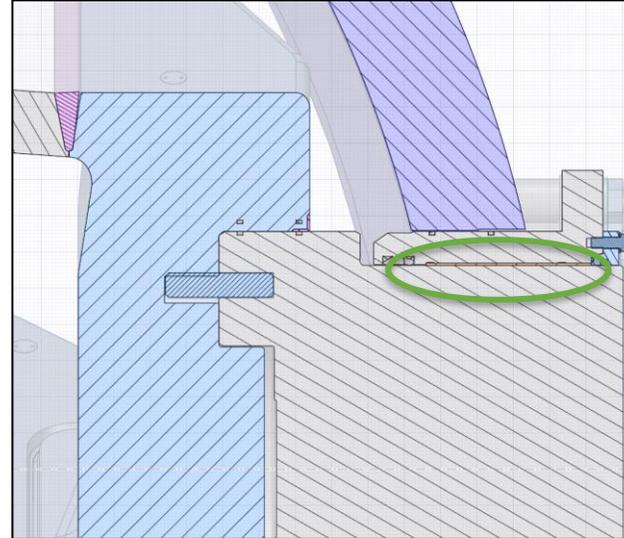


Auswirkung der Lagerreibung μ_{Lager} auf Schließzeit und Belastungen

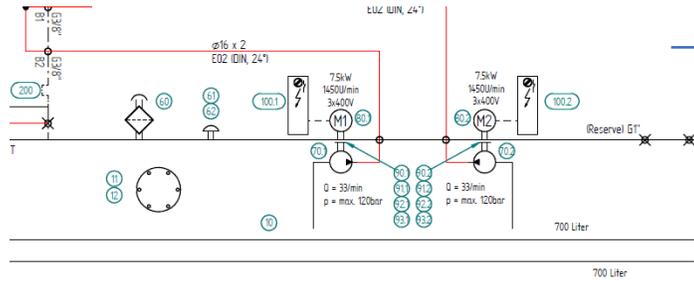
Variation des Reibungskoeffizienten in den Hauptlagern der Tandemklappen:

- $\mu_{\text{Bearing}} = 0$ (reibungsfrei)
- $\mu_{\text{Bearing}} = 0.15$ (Referenz)
- $\mu_{\text{Bearing}} = 0.3$

Wie groß ist die Reibung in den Hauptlagern unter der Belastung eines Notschlusses im Rohrbruchfall?
(Vibrationen, Kavitation, ...)

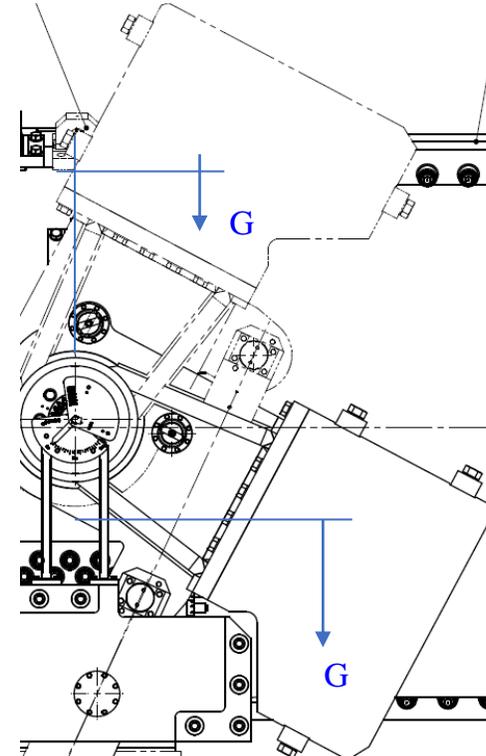


- Staudrücke im Hydrauliksystem
- Ventile / Schaltwiderstand – offenhalten
- Fliessgeschwindigkeit P-Leitung 2-(4)m/s max. Saugleitung 1-(2)m/s
- Leitungslänge / Geometrie / Höhenunterschiede
- Temperatur / Viskosität !



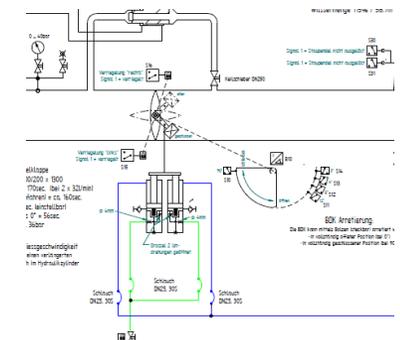
Aggregat 2-OG

Anfangsdruck!
Kurzer Hebel
Kein EX Moment

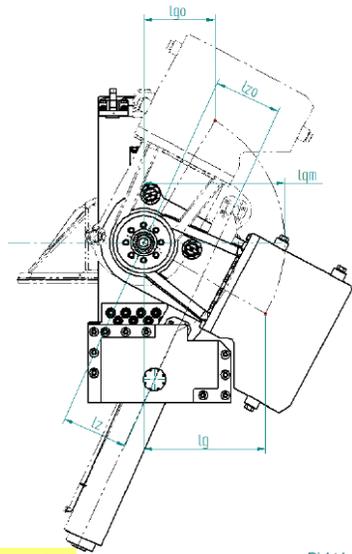


Beispiel
150 l/min
4m/s
40m
4.5bar
Verlust im Geraden
Rohrstück!

Absperrorgan UG



Beispiel Antrieb Limberg III DK DN4900 PN18



$$d_L := 900 \cdot \text{mm}$$

$$d_Z := 600 \cdot \text{mm}$$

$$n_Z := 1$$

$$\mu_{lt} := 0.26$$

Drehzapfen-Durchmessers im Lagerbereich

Zylinder Innendurchmesser

Anzahl Zylinder

Doppelter Reibungskoeffizient in den Lagern (DEVA
bm 362/9P)

Äquivalentes
Lastmoment ca.
13mio Nm



$$M_{QNtot} := 5.8 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$M_{RBtot} := 10.2 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

Totales Dynamisches Moment bei Abschaltmenge nach CFD
Analyse inkl. Moment durch Fallgewicht

Totales Dynamisches Moment bei Rohrbruch nach CFD
Analyse inkl. Moment durch Fallgewicht

$$M_{gm} := F_g \cdot l_{gm} = 2080.219 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Gewichtsmoment in bei maximalem Hebel

$$M_{RGS} := \mu_3 \cdot N_S \cdot d_{kt}^2 = 275.77 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Reibmoment der Gummi Dichtung (Tellerdichtung) Nenndruck

$$d_{kt} := 4818 \cdot \text{mm}$$

Dichtdurchmesser

$$A_{kt} := \frac{\pi}{4} \cdot d_{kt}^2 = 18.232 \text{ m}^2$$

Fläche des Rotors

$$h_1 := 163 \text{ m}$$

Wassersäule

$$P_N := 18 \text{ bar}$$

Nenndruck

$$P_D := 2 \text{ bar}$$

Druckdifferenz

$$m_g := 81180 \text{ kg}$$

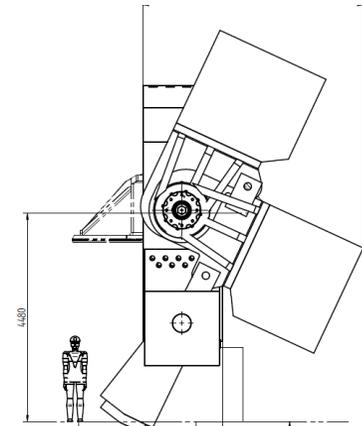
Gegenmasse am Anlenkhebel

Schliesssicherheit

$$S_{Spn} := \frac{M_g + M_{hyN} + M_{exN} + M_{gk}}{M_{Nlt} + M_{rg} + M_L + M_{RGS} + M_{zr} + M_{rlN} + M_{rSB}} = 1.05$$

$$P_{RB} := \frac{M_{totRB}}{l_{zmd} \cdot A_{kz}} = 213 \cdot \text{bar}$$

Maximaler Bremsdruck bei Rohrbruch



Zusammenfassung

Einige Einflüsse welche die Reibung beeinflussen, können nur bedingt genau ermittelt werden, dies aufgrund ihrer Komplexität

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen ist es wichtig mit genügend hohen Sicherheiten die Systeme auszulegen!

Empfehlung $\mu_{\min} = 0.25$
 $S = 1$

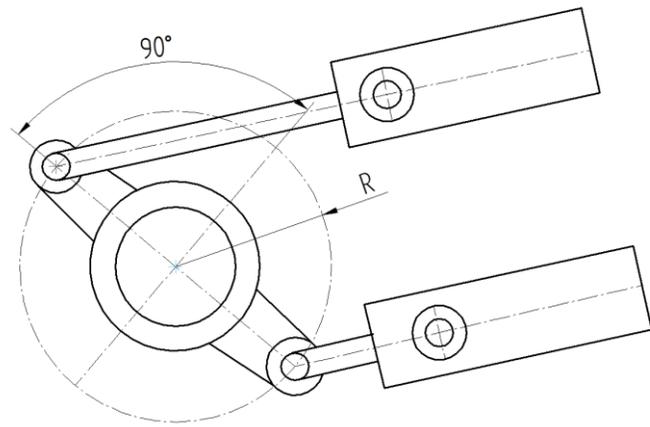
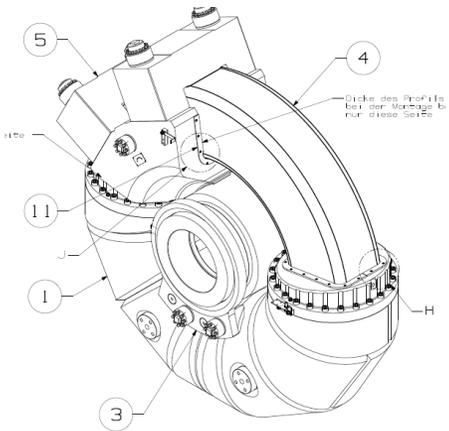
? Lagerüberwachung ?



- Welche Antriebe gibt es
 - Öffnen Öl - Schliessen mit Gewicht
 - Öffnen Öl - Schliessen mit Öl direkt aus dem Speicher
 - Öffnen Öl - Schliessen mit Öl über Umschaltventil
 - Öffnen Öl - Schliessen mit Wasser aus dem Triebwasser
 - Öffnen mit Wasser - Schliessen mit Wasser aus dem Triebwasser
 - Elektrischer Antrieb mit Getriebe für Öffnen und Schliessen
 - Anzahl Antriebe ein oder zwei ?

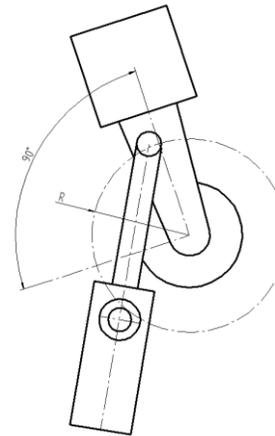
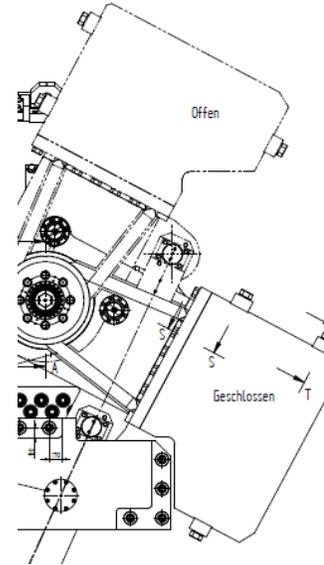
Ringkolben oder Doppelzylinder

- Wasser / Wasser
- Öl / Wasser
- Öl/Öl mit Speicher



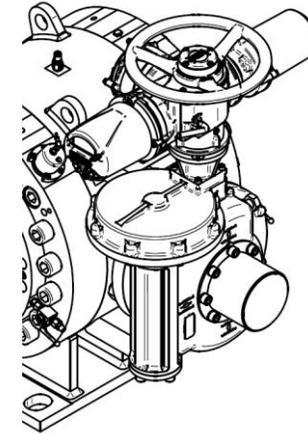
Schliessgewicht

- Öl / Schliessgewicht



Elektro – Getriebe

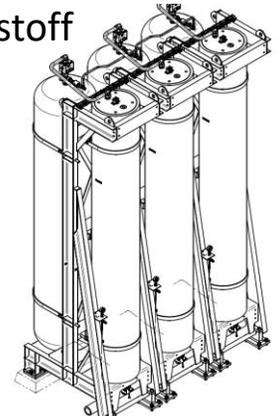
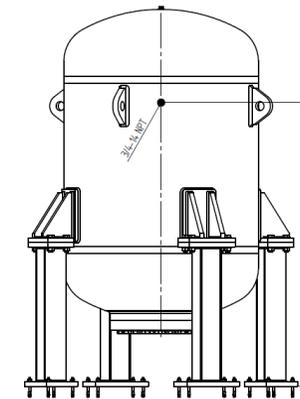
- Elektro / Batterie



Speicher Öl

60-70bar Windkessel

200-300bar Kolbenspeicher mit Stickstoff



Verformungen Beispiel REHAB Projekt Ersatz Rohrbruchsicherung

Austausch einer Bestandsklappe
Baujahr 1978 aufgrund zu hoher
Verformungen

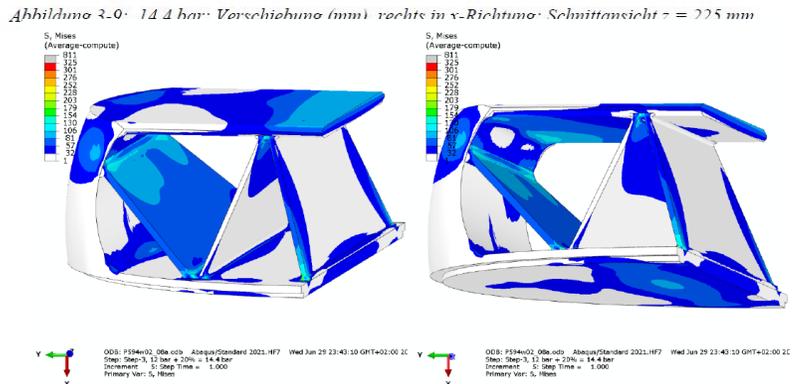
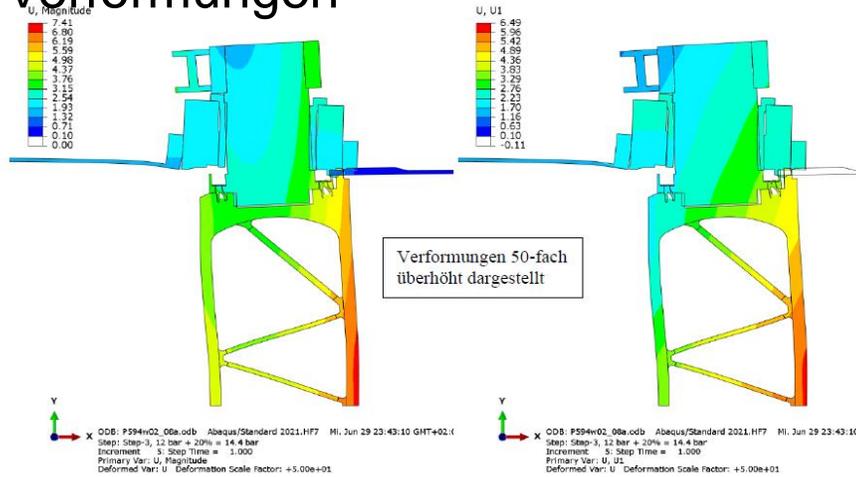


Abbildung 3-14: 14.4 bar; Vergleichsspannung (MPa)

Ungünstiges Tragbild bezüglich
Lagerpressung

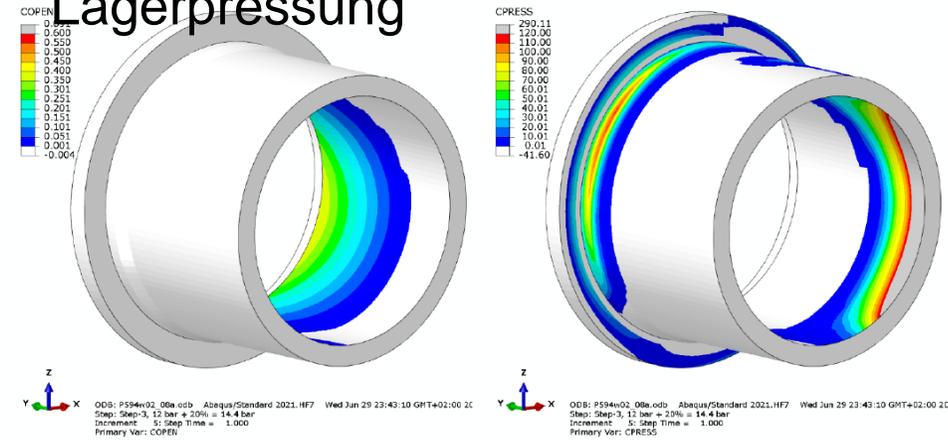


Abbildung 3-12: 14.4 bar; links: Kontaktöffnung (mm), rechts: Kontaktspannung (MPa)

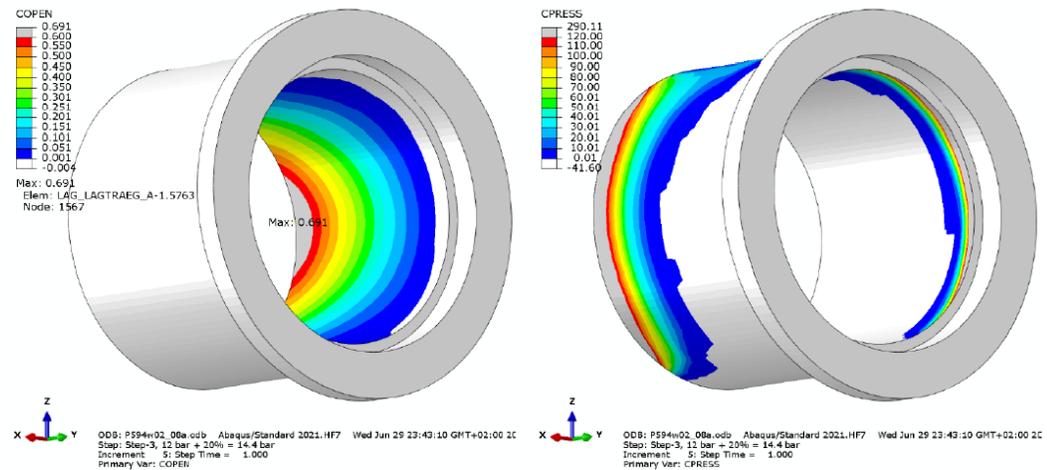


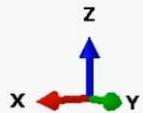
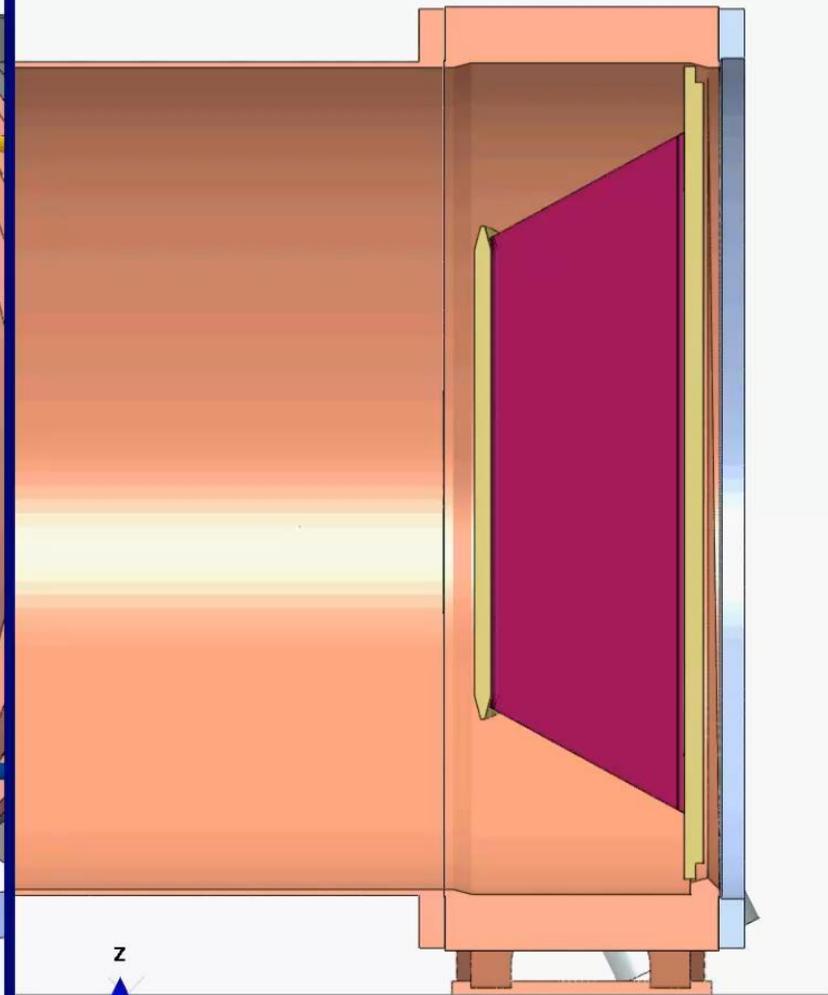
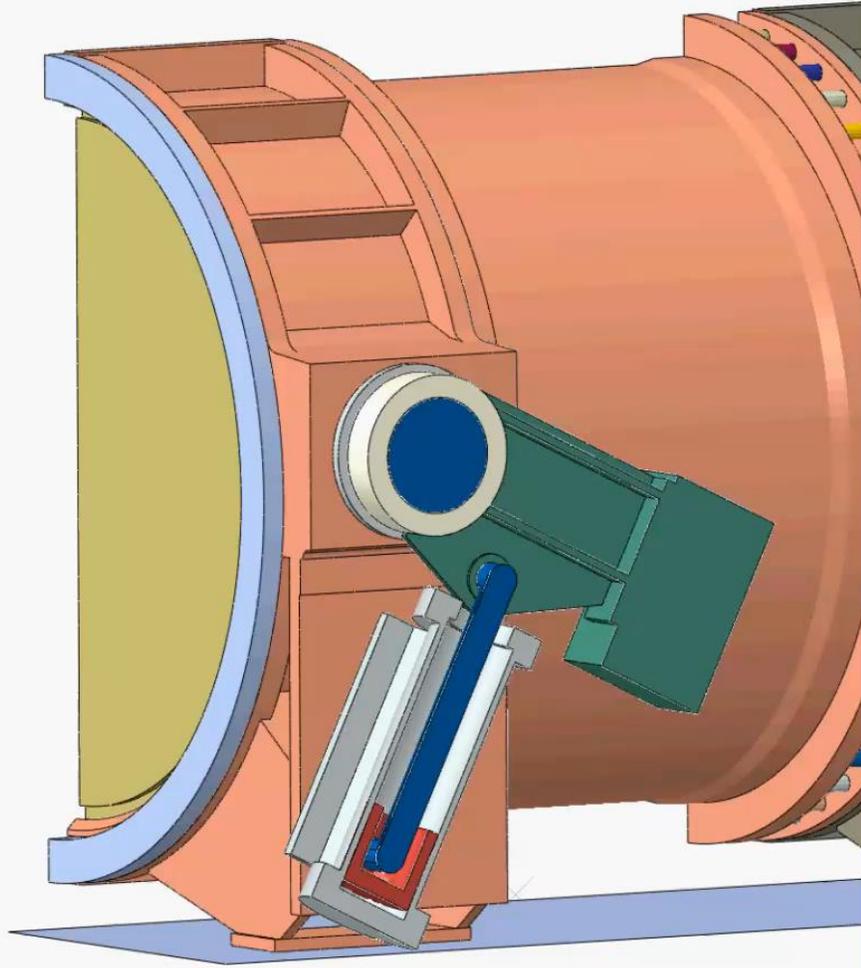
Abbildung 3-11: 14.4 bar; links: Kontaktöffnung (mm), rechts: Kontaktspannung (MPa)

Viewport 1 ODB: D:/data/as/P-22594_Adams_...N3500/w02/P594w02_08a.odb

Viewport 2 ODB: D:/data/as/P-22594_Adams_...N3600/w02/P594w02_08a.odb

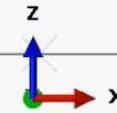
Scale Factor: +0.00

Scale Factor: +0.00



ODB: P594w02_08a.odb Abaqus/Standard 2021.HF7 Mi. Jun 29 23:43:10 GMT+02:00
 Step: Step-3, 12 bar + 20% = 14.4 bar
 Increment 5: Step Time = 1.000

Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +5.000e+01



ODB: P594w02_08a.odb Abaqus/Standard 2021.HF7 Mi. Jun 29 23:43:10 GMT+02:00
 Step: Step-3, 12 bar + 20% = 14.4 bar
 Increment 5: Step Time = 1.000

Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +5e+01



Neues Klappendesign

Vergleich IST - NEU

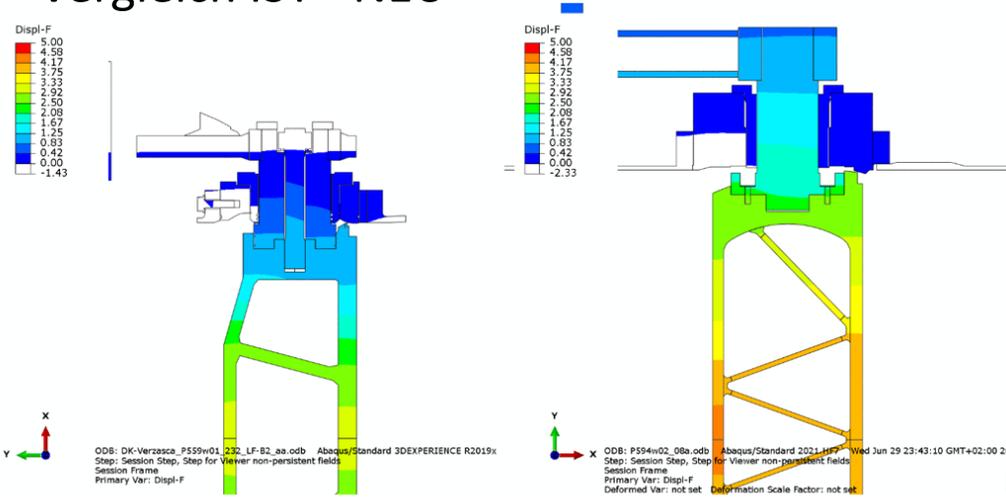


Abbildung 2-2: Verschiebungen in Strömungsrichtung auf Höhe der Rohrachsen (mm)

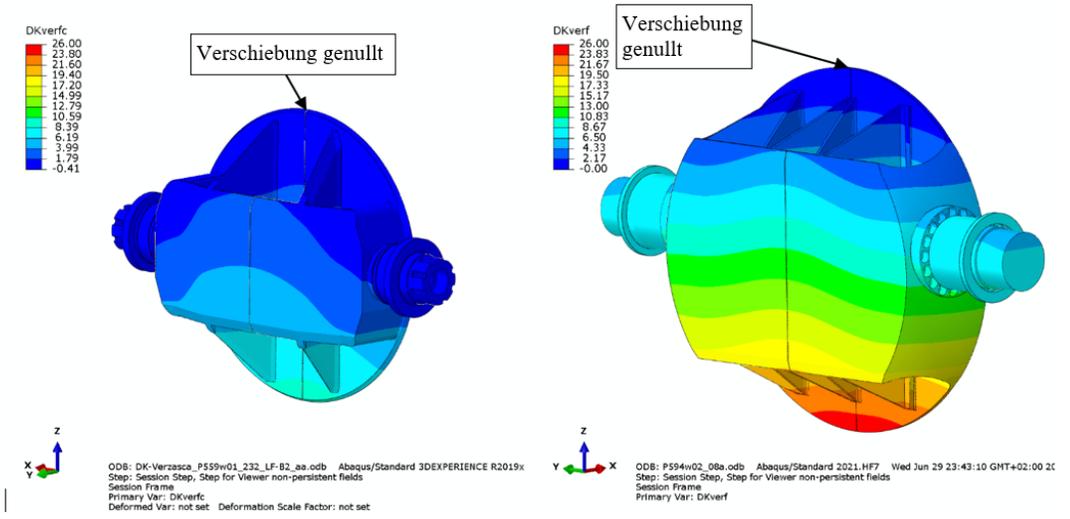
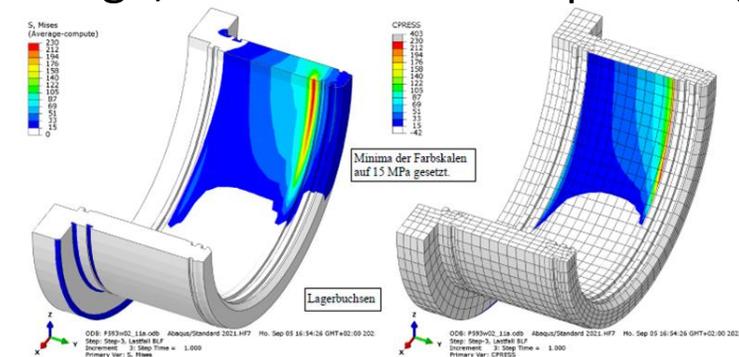
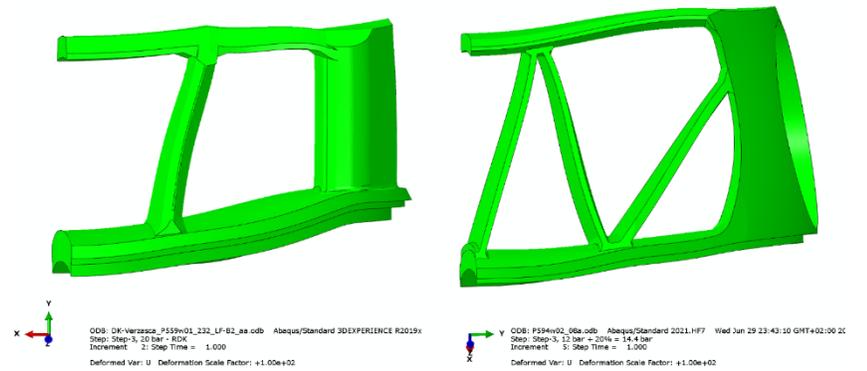


Abbildung 2-4: Verschiebungen in Strömungsrichtung (mm)

Verbessertes Tragbild mit neuem Design, reduzierte Kantenpressung



Empfehlung K-Faktoren

Für PM Primäre
Membranspannung

$$\sigma_{zuln} := \min\left(\frac{R_e}{3}, \frac{R_m}{5}\right)$$

| Material | Components | YS | UTS | fsn | | fst | | fn | | ft | |
|--------------|--|-------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
| | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [ksi] | [MPa] | [ksi] | [MPa] | [ksi] | [MPa] | [ksi] |
| 1.0570 | Body | 265 | 450 | 88 | 12.8 | 133 | 19.2 | 177 | 25.6 | 252 | 36.6 |
| 1.0577 | Disc (w/o hub) | 315 | 470 | 94 | 13.6 | 141 | 20.5 | 196 | 28.4 | 300 | 43.5 |
| | Body feet | 295 | 450 | 90 | 13.1 | 135 | 19.6 | 188 | 27.2 | 281 | 40.7 |
| 1.4313+QT780 | Bearing supports, plate of the disc stops | 520 | 700 | 140 | 20.3 | 210 | 30.5 | 292 | 42.3 | 495 | 71.8 |
| 1.4313+QT900 | Shafts | 800 | 900 | 180 | 26.1 | 270 | 39.2 | 375 | 54.4 | 762 | 110.5 |
| 1.6582+QT | Central bolts | 600 | 800 | 450 ^{a)} | 65.3 | 450 ^{a)} | 65.3 | 450 ^{a)} | 65.3 | 571 | 82.9 |
| | Shaft shear bolts | 800 | 1000 | 200 | 29.0 | 300 | 43.5 | 417 | 60.4 | 762 | 110.5 |
| 1.8903 | Disc hub | 360 | 530 | 106 | 15.4 | 159 | 23.1 | 221 | 32.0 | 343 | 49.7 |

YS, UTS Minimal values of yield strength and ultimate tensile strength
 fsn Nominal calculation stress for primary stresses and normal operating conditions based on the specification [SPE]
 fst Nominal calculation stress for primary stresses and test or extreme operating conditions
 fn Nominal calculation stress for secondary stresses and normal operating conditions
 ft Nominal calculation stress for secondary stresses and test or extreme operating conditions
 a) The allowable stress for this prestressed element is set to 0.75·YS.

Tiefe Grundspannung = Tiefe Verformungen jedoch sollte eine möglichst gleichmässig hohe Steifigkeit angestrebt werden, um nicht unnötig hohe lokale Spitzenspannungen zu generieren welche nachteilig bei Ermüdung sind

E-Modul ≈ 210 000N/mm²



Conclusio: Herausforderungen bei hochbelasteten Absperrorganen

- Ausgeklügelte Simulations-Modelle ermöglichen eine präzise und detaillierte Analyse der Belastungen bzw. des Verhaltens von notschlusstaughlichen Absperrorganen (inkl. Belüftungsbedarf, Optimierung Schließzeit, ...)
Voraussetzung: Anlagendaten hinreichend genau bekannt!
- Lokalität des Rohrbruchs bzw. das Anlagenverhalten hat große Auswirkung auf die Belastungen im Notschluss mit weitreichenden Folgen (Antrieb, Fundament, Statik, ...);
Genau Spezifikation / Definition des Rohrbruch-Szenarios inklusive notwendiger Informationen zum Triebwasserweg in der Ausschreibung oftmals nicht enthalten
Angabe des Rohrbruchdurchflusses ohne nähere Information ist nicht ausreichend!
- Instationäre Systemanalyse (Druckstoßrechnung) ist für einen sicheren Kraftwerksbetrieb unumgänglich

Eine Validierung der numerischen Modelle durch Messungen im Zuge der Inbetriebsetzung geben zusätzliche Sicherheit für einen sicheren Kraftwerksbetrieb.

