

Druckbeaufschlagte Toskammern – Übersicht, Dimensionierung und Forschungsfragen

Clemens Dorfmann und Dominik Mayr

Zusammenfassung

Druckbeaufschlagte Toskammern sind kompakte und daher wirtschaftlich interessante Energie-dissipationsbauwerke für die Transformation von mechanischer Energie in Wärme und Schall. Für diesen Typ Energieumwandlungsbauwerk und dessen Dimensionierung sind nur sehr wenige Literaturangaben zu finden. Schlüsselparameter für die bauliche Dimensionierung sind neben der zu dissipierenden Energie die Förderfähigkeit des Gesamtsystems sowie die resultierenden Wanddrücke, welche im Idealfall nur gering negative als auch nicht zu große Werte annehmen sollen. In einigen physikalischen Modellversuchen, durchgeführt an der Technischen Universität (TU) Wien in den 1960-iger Jahren, wurden druckbehaftete Toskammern für die Dissipation von großen Energiehöhen für die Anwendung bei Grundablässen von Talsperren untersucht. Aus Sicht der Autoren sind diese Ergebnisse wohl etwas in Vergessenheit geraten.

Für das im Jahr 2022 in Betrieb genommene Gemeinschaftskraftwerk Inn wurde mittels CFD-Modellierung eine druckbehaftete Toskammer für die Entleerung des Triebwasserstollens dimensioniert. Die physikalischen Modellversuchsergebnisse der TU Wien dienten dabei als Validierung für das numerische Modell und für die bauliche Vordimensionierung. Der Beitrag gibt eine Übersicht und zeigt die Effizienz von druckbehafteten Toskammern für die Energieumwandlung bei großen Fallhöhen. Des Weiteren werden neben Betriebserfahrungen relevante Forschungsfragen zu diesem interessanten Thema aufgezeigt.

1 Einleitung

Energieumwandlungsbauwerke am Auslass von Druckrohrleitungen wasserbaulicher Anlagen wie z.B. Grundablässen wandeln die Lage- und Geschwindigkeitsenergie in Wärme und Schall in einem Ausmaß um, so dass das in den Vorfluter eingeleitete Wasser schadlos abgeführt wird. Zur Energieumwandlung auf engem Raum wurden unterschiedliche Systeme entwickelt. Eine Übersicht ist in Vischer (1984) dargestellt. Druckbeaufschlagte Toskammern als eine technische Sonderform (Abb. 1) können technisch, wirtschaftlich und betrieblich sinnvoll sein, wenn

- die Energieumwandlung auf engstem Raum erfolgen soll.
- ein natürlicher Unterwassereinstau der Vertosungseinrichtung nicht realisierbar ist.
- eine Belüftung der Toskammer nicht möglich oder nicht gewünscht ist.
- die Verlegung des Steuer- und Verschlussorgans durch Fest- und Schwimmstoffe ausgeschlossen werden muss.
- die Druckhöhe am Zutritt zur Toskammer bis ca. 130 m beträgt und/oder der Durchfluss einen Wert bis 100 m³/s erreicht.

Druckbehaftete Toskammern können eine technisch sinnvolle Alternative zu belüfteten Energieumwandlungsbauwerken sein.

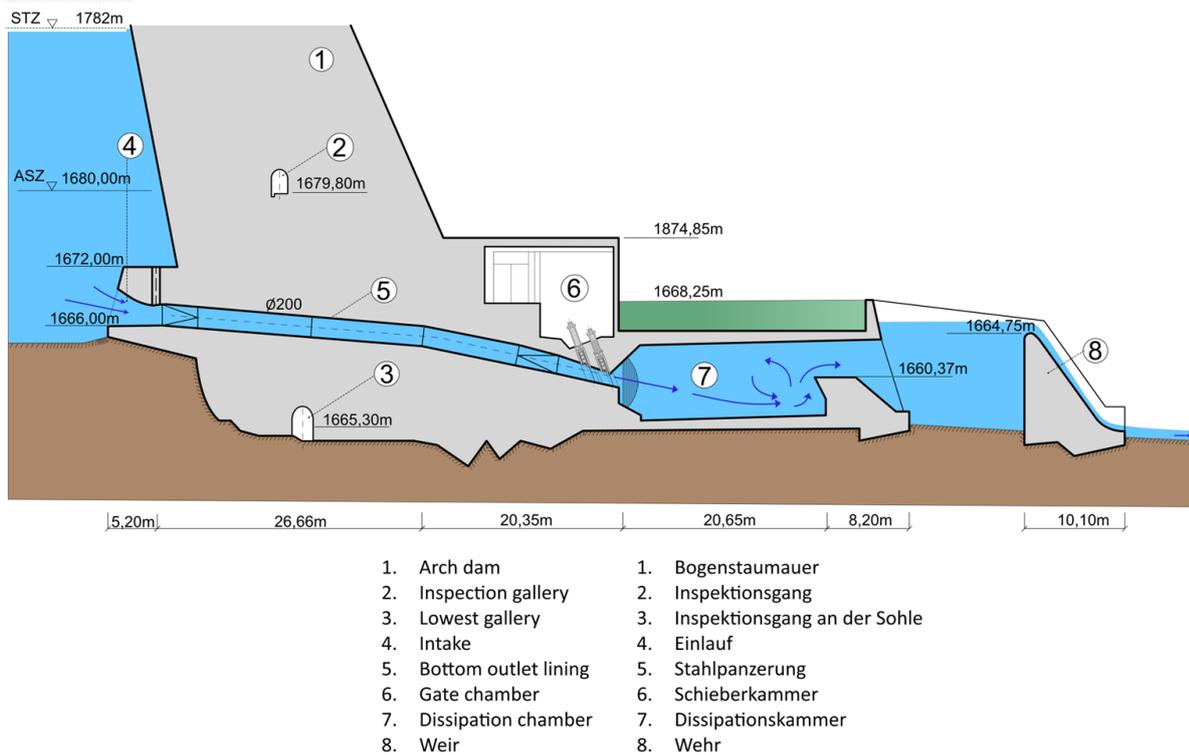


Abb. 1 Druckbeaufschlagte Toskammer (Nr. 7), Längsschnitt, entnommen aus Widmann (1973)

Die Entwicklung von druckbeaufschlagten Toskammern für einige Grundablässe österreichischer Talsperren erfolgte an hydraulischen Modellversuchen in den 1960-iger Jahren an der Technischen Universität Wien.

Die Zuführung des Wassers zur Toskammer wird mit zwei Flachschiebern gesteuert (Betriebs- und Revisionsschütz), die Einmündung in die eigentliche Kammer erfolgt zentrisch. Dies begünstigt die Energieumwandlung durch die Bildung von umlaufenden Randwirbeln. Eine Schwelle bzw. Prallwand mit aufgesetzter Nase bewirkt eine verbesserte Energiedissipation. Um eine durchgehende Druckbeaufschlagung sicher zu stellen, ist am Übergang zum Vorfluter ein den Abfluss rückstauendes Wehr angeordnet. In Abb. 2 sind die Angaben zu den ausgeführten Toskammern zusammengestellt.

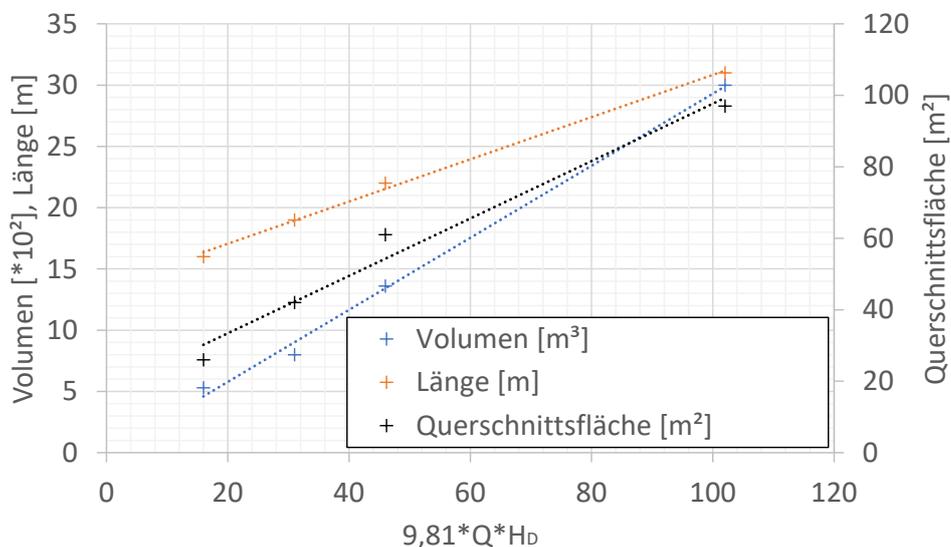


Abb. 2 Ausgeführte Toskammern - Hauptdaten

2 Gemeinschaftskraftwerk Inn - GKI

Das Gemeinschaftskraftwerk Inn (GKI) ist ein von der TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG und der Engadiner Kraftwerke AG im Jahr 2022 in Betrieb genommenes Laufkraftwerk am Oberen Inn im schweizerisch-österreichischen Grenzgebiet. Im Wesentlichen besteht das Gemeinschaftskraftwerk Inn aus drei Elementen: Stauraum und Wehranlage, Triebwasserstollen sowie Krafthaus. Vom gestauten Wasser wird die Ausbauwassermenge von $75 \text{ m}^3/\text{s}$ in den 23,2 km langen Triebwasserstollen geleitet. Dieser mündet in den Druckschacht, der zu den Turbinen im Krafthaus in Prutz/Ried führt. Das abgearbeitete Wasser fließt anschließend durch einen unterirdischen Kanal wieder zurück in den Inn. Die Fallhöhe beträgt 132,5 m, das Regelarbeitsvermögen 438,5 GWh.

Die Entleerung des Druckstollens erfolgt über den Fensterstollen in den Inn bei Maria Stein. Der Einlauf zur Entleerung befindet sich am Tiefpunkt in der Mitte des Druckstollens bei Station km 12,30, von wo das Wasser mit einer ca. 80 m langen Stahlrohrleitung zu der im Fensterstollen ($L = 600 \text{ m}$) befindlichen Toskammer in Stahlbetonbauweise zugeführt wird. Ein Revisions- und Betriebsverschluss sind oberwasserseitig der Toskammer angeordnet. Unterwasserseitig der Toskammer rinnt das Wasser als Freispiegelabfluss bis zu einem Portalbauwerk und weiter bis zum Auslaufbauwerk am Inn ab.

Die maximale Höhendifferenz zwischen Stauziel am Wehr und des Stollen - Tiefpunktes beträgt 85 m, die Auslegungwassermenge der Entleerung ist mit $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt. Im Zuge der hydraulischen Dimensionierung wurden höhere Abflüsse bis $7,7 \text{ m}^3/\text{s}$ untersucht.

3 3D CFD-Modellierung

Die 3D numerischen CFD-Berechnungen hatten zum Ziel, die Toskammer hinsichtlich der Geometrie zu dimensionieren, um eine sichere Abfuhr des Wassers aus dem Triebwasserstollen zu gewährleisten. Es sollte möglichst viel kinetische Energie dissipiert werden, um die Stabilität des weiterführenden Stollens, insbesondere der Auskleidung (Spritzbeton), zu gewährleisten. Gleichzeitig sollte eine bestimmte Förderfähigkeit für das Gesamtsystem (Zuleitung und Toskammer) sichergestellt sowie Unterdrücke in der Toskammer vermieden werden. Als Grundlage für die Dimensionierung dienten die Modellversuche der Toskammer Schlegeis der TU Wien. Zur Überprüfung der grundsätzlichen Eignungsfähigkeit des 3D numerischen Berechnungsmodells für die Dimensionierung der Toskammer wurde in einem ersten Validierungsschritt der Modellversuch zur Toskammer Schlegeis nachgerechnet.

3.1 3D RANS Gleichungslöser

Für die zu untersuchende Druckströmung mit freier Wasserspiegeloberfläche am Auslass der Toskammer wurde der Solver InterFoam (OpenFoam v1806, www.openfoam.com) verwendet. Dieser ermöglicht die Simulation von reibungsbehafteten Flüssigkeiten auf Basis der Reynolds-gemittelten-Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) für inkompressible, zweiphasige Strömungen. Sämtliche Berechnungen wurden aufgrund der sehr langen Rechenzeiten am High Performance Cluster (HPC) Cirrus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) durchgeführt.

Das Berechnungsnetz wurde mit der Software cfMesh (www.c-fields.com) erstellt. Die Software erlaubt die qualitativ hochwertige Generierung von Netzen bestehend vorwiegend aus Hexaeder-Zellen (hexa-dominant). In Bereichen mit starken Krümmungen werden vorwiegend Polyeder Zellen verwendet. Für die Netzauflösung nahe der Wand wird in der Software, neben anderen Algorithmen, das Kriterium des dimensionslosen Wandabstandes verwendet.

3.2 Validierungsrechnungen Modellversuch Schlegeis

Aus den Unterlagen der Modellversuche wurde die hydraulische Kontur der Toskammer digitalisiert. Die Toskammer Schlegeis hat eine Länge von 30 m bis zur Prallwand, eine Breite von 8,8 m und eine Höhe von 11,5 m. Die Schieberkammer ist 2 m breit und 1,7 m hoch. Die Querschnittsfläche der Toskammer beträgt somit rund 100 m², das Volumen ca. 3000 m³. Das Berechnungsnetz wurde unter Ausnützung der Symmetrie der Strömung als Halbmodell generiert. Das Netz, bestehend vorwiegend aus Hexaedern, hat rund 650.000 Zellen (Abb. 3).

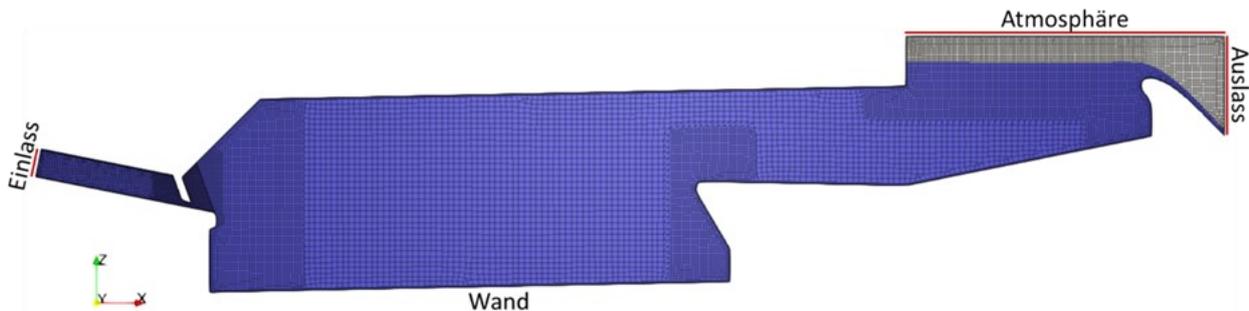


Abb. 3 Längsschnitt (Symmetrieebene) Berechnungsnetz Toskammer Schlegeis

Für die räumliche Diskretisierung aller Variablen wurde das begrenzte Upwind-Verfahren 2. Ordnung verwendet. Für die Zeitintegration wurde das implizite Euler Schema 1. Ordnung verwendet. Für die Turbulenzschließung wurden die zwei Turbulenzmodelle Standard k-epsilon Modell und SST (Shear Stress Transport) Modell getestet. Der Vergleich der beiden Turbulenzmodelle zeigte für die Berechnungen in der Toskammer, dass die Unterschiede in den berechneten Drücken gering sind. Tab. 1 listet die in den numerischen Simulationen verwendeten Randbedingungen auf.

Tab. 1 Verwendete Randbedingungen im numerischen Modell

Variable	Einlass	Wand	Auslass	Atmosphäre	Symmetrieebene
alpha (Indikator Wasser-Luft)	0-gradient	0-gradient	0-gradient	0-gradient	Symmetrie
U (Geschwindigkeit)	fixiert	noSlip, Log-Gesetz glatt	0-gradient	0-gradient	Symmetrie
P (Druck)	0-gradient	0-gradient	0-gradient	fixiert	Symmetrie
k (Turbulente kinetische Energie)	fixiert	Wandfunktion	0-gradient	0-gradient	Symmetrie
epsilon (Turbulente Dissipationsrate)	fixiert	Wandfunktion	0-gradient	0-gradient	Symmetrie

Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die Positionen der Druckmesspunkte im Modellversuch sowie den Vergleich der gemessenen mit den simulierten Drücken für die zwei betrachteten Validierungslastfälle $Q = 108 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$. Die mittlere Abweichung der simulierten zu den gemessenen Druckhöhen beträgt zwischen 1,5 und 2 m Wassersäule (WS). Die maximalen Differenzen mit Werten zwischen 4 und 5 m WS treten beim Lastfall $Q = 108 \text{ m}^3/\text{s}$ an der Sohle der Toskammer auf. Wahrscheinlich wird in der Numerik die Ausbreitung des einschließenden Strahls in Richtung Sohle überschätzt.

Mit Bedacht auf das komplexe Strömungsgeschehen in der Toskammer mit Fließgeschwindigkeiten bis zu 40 m/s kann festgehalten werden, dass in den 3D numerischen Berechnungen die gemessenen Druckverläufe sehr gut reproduziert werden können.

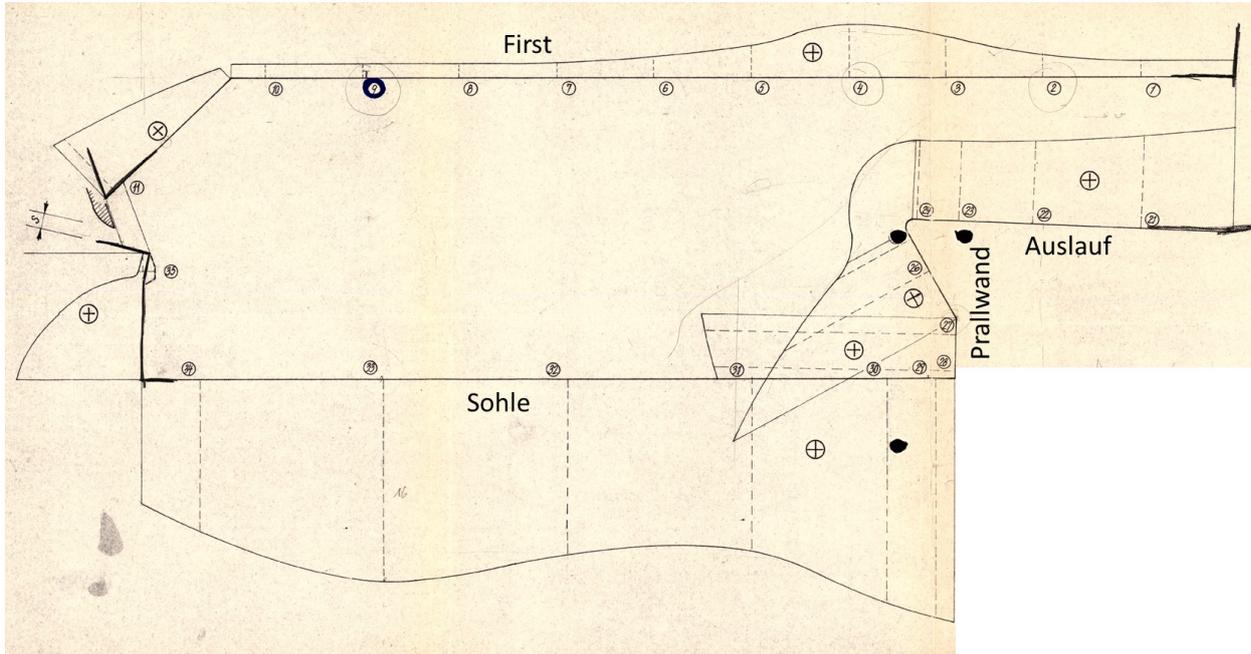


Abb. 4 Längsschnitt Toskammer Schlegeis mit Druckmesspunkten

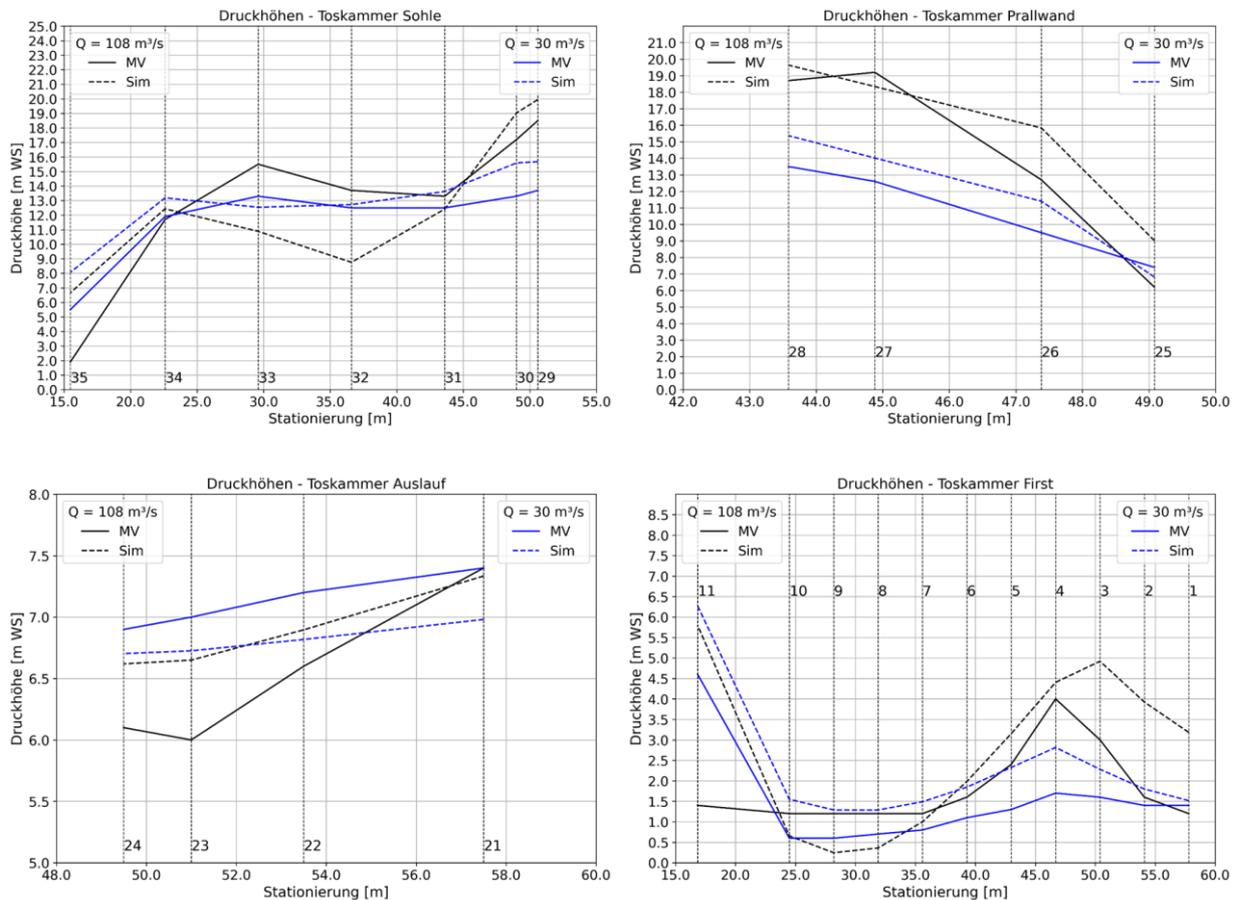


Abb. 5 Gemessene (MV) und simulierte (Sim) Druckhöhen für die zwei Validierungslastfälle

3.3 Dimensionierung der Toskammer Maria Stein

Als Grundlage für den ersten geometrischen Entwurf der Toskammer diente das aus den Modellversuchsergebnissen entwickelte Diagramm in Abb. 2. Dabei wurden eine Bruttofallhöhe von rund 82 m und eine Förderfähigkeit von $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ angesetzt. Das erforderliche Volumen wurde aus der gewählten Länge von 15,5 m (bis zur Prallwand), Breite von 3,5 m und Höhe von 5,5 m mit rund 300 m^3 bestimmt.

Für die Ermittlung der Förderfähigkeiten des gesamten hydraulischen Systems bis zum Freispiegelabfluss im Zugangsstollen bei verschiedenen Druckhöhen und Schieberstellungen des Betriebsschiebers musste, neben der detailgetreuen Modellierung der Schieberkammer, die ca. 80,5 m lange Entleerleitung vom Tiefpunkt des Triebwasserstollens bis zur Toskammer mitmodelliert werden. Das Schema des numerisch berechneten hydraulischen Systems ist in Abb. 6 dargestellt.

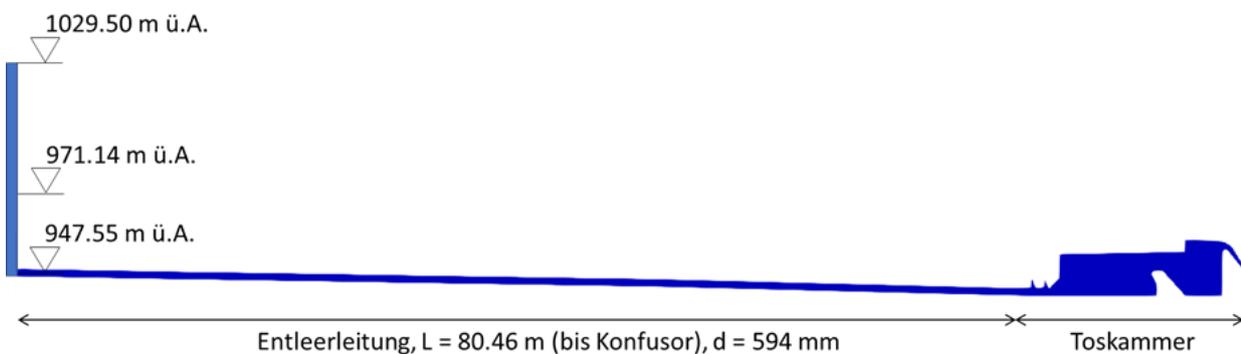


Abb. 6 Längsschnitt des numerisch berechneten hydraulischen Systems

Das numerische Setup wurde aus den validierten Schlegeis-Simulationen übernommen. Die numerischen Randbedingungen wurden, bis auf die Einlassrandbedingungen, ebenfalls aus den Schlegeis-Simulationen übernommen (Tab. 1). Der Geschwindigkeit am Einlass wurde eine Neumann-Randbedingung zugewiesen. Die Druckhöhe am Einlass wurde entsprechend den definierten Stauzielen vorgegeben. Das Berechnungsnetz wurde mit der vertikalen Symmetrieebene entlang der longitudinalen Mittelachse generiert. Das Netz, bestehend vorwiegend aus Hexaedern, hatte rund 1.030.000 Zellen. Der Zeitschritt wurde entsprechend einer maximal erlaubten Courant-Zahl von 1 variabel eingestellt und hatte die Größenordnung von $10\text{e-}4 \text{ s}$. Die durchschnittliche Rechenzeit für eine Simulationsdauer von 20 Sekunden bis zu einem stationären Ergebnis betrug ca. 25 Stunden, bei Verwendung von 32 Intel-Xeon Prozessoren am ZAMG Cluster.

Die 3D Simulationen der ersten Toskammerentwürfe zeigten, dass vor allem die auftretenden Drücke, im Vergleich zu den Modellversuchen Schlegeis, klein sind und damit Optimierungspotenzial hinsichtlich der Toskammerabmessungen gegeben war. In einem numerischen Variantenstudium wurde die Geometrie hinsichtlich der Abmessungen Toskammerlänge, Toskammerhöhe, Querschnittsfläche, Prallwandhöhe sowie Auslaufbereich mit Wehrhöcker optimiert.

Für den Ausführungsvorschlag konnten die Abmessungen der Toskammer im Variantenstudium maßgeblich reduziert werden. So hat der Ausführungsvorschlag ein deutlich reduziertes Volumen von rund 95 m^3 , eine Länge bis zur Prallwand von 8,5 m, eine Breite von 3,5 m und eine durchschnittliche Höhe von 3,4 m. Die durchschnittliche Querschnittsfläche in der Toskammer

beträgt $11,30 \text{ m}^2$. Der entwickelte Ausführungsvorschlag ist mit den maßgebenden Abmessungen in Abb. 7 dargestellt. Im Gegensatz zur Toskammer Schlegeis wurde aus baulichen Gründen die Schieberkammer mit anschließendem Einlaufbereich in die Toskammer nach unten gesetzt. Im $5,3 \text{ m}$ langen Auslaufbereich flussab der 2 m hohen Prallwand wurde die Sohle, im Vergleich zur Toskammer Schlegeis, abgesenkt. Einerseits kann zusätzliches Dissipationsvolumen bereitgestellt sowie mit Verringerung der Fließgeschwindigkeiten die Strömung am Übergang zum Freispiegelabfluss / Wehrüberfall beruhigt und andererseits Betonvolumen gespart werden.

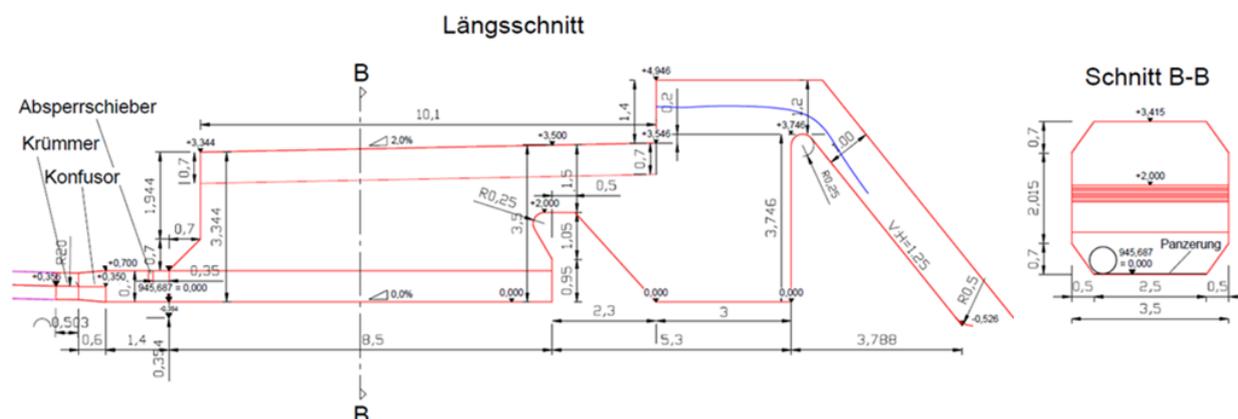


Abb. 7 Längsschnitt und Querschnitt des Ausführungsvorschlags der Toskammer Maria Stein

Die 3D numerisch untersuchten Lastfälle wurden in Betriebslastfälle und einer Sicherheitsbetrachtung mit höheren Durchflüssen unterschieden. Die Lastfälle variieren in der Druckhöhe (Wasserspiegel Druckstollen) und in der Schieberöffnung des Betriebschiebers.

Exemplarisch für einen maßgebenden Betriebslastfall ($Q = 2,53 \text{ m}^3/\text{s}$, Druckhöhe $H_D = 82,0 \text{ m}$) sind in Abb. 8 und Abb. 9 die berechneten Fließgeschwindigkeiten und Drücke dargestellt. Der Strahl wird aufgrund der Teilstellung des Schiebers konvektiv beschleunigt und schießt mit über 30 m/s in die Toskammer. An der Prallwand wird der höchste Druck mit ca. $1,2 \text{ bar}$ erreicht. Entlang der Prallwand ist ein hoher Druckgradient zu verzeichnen, wobei am Übergang zur Prallwandoberkante ein maximaler Unterdruck von $-0,07 \text{ bar}$ berechnet wird. Die Auswertungen der turbulenten kinetischen Energie (Abb. 10) und der Dissipationsrate (Abb. 11) belegen eine gute Energiedissipation in der Toskammer und demonstrieren die Wirkungsweise der Prallwand als Störkörper.

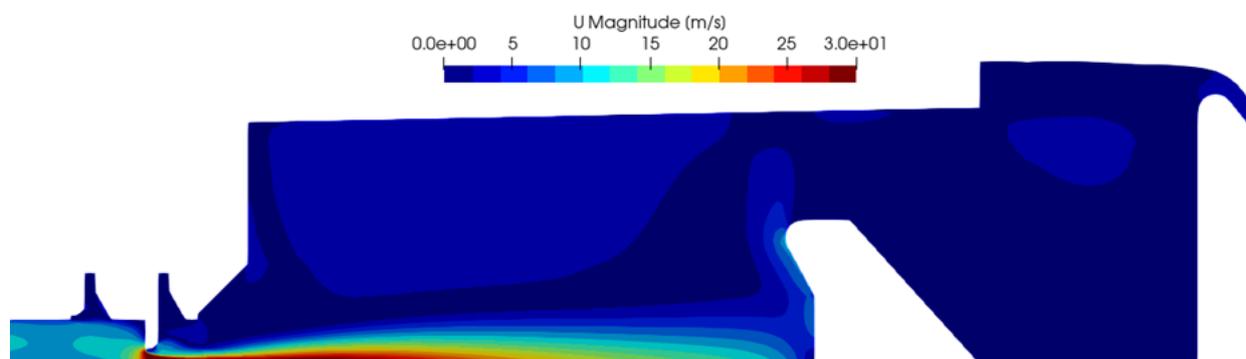


Abb. 8 Berechnete Fließgeschwindigkeiten, Symmetrieebene, Ausführungsvorschlag

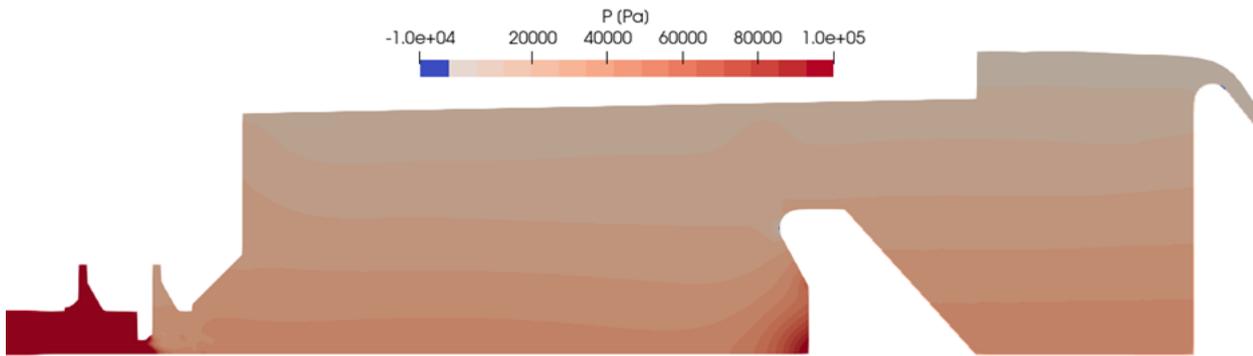


Abb. 9 Berechnete Drücke, Symmetrieebene, Ausführungsvorschlag

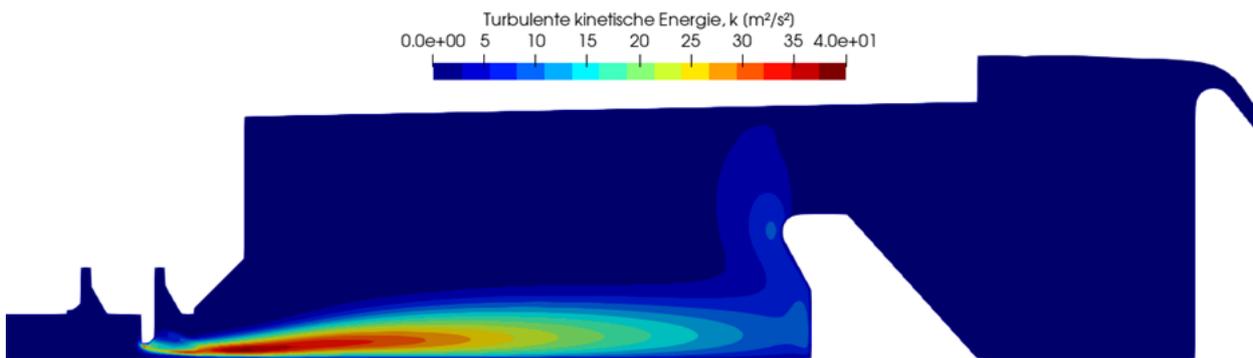


Abb. 10 Berechnete turbulente kinetische Energie, Symmetrieebene, Ausführungsvorschlag

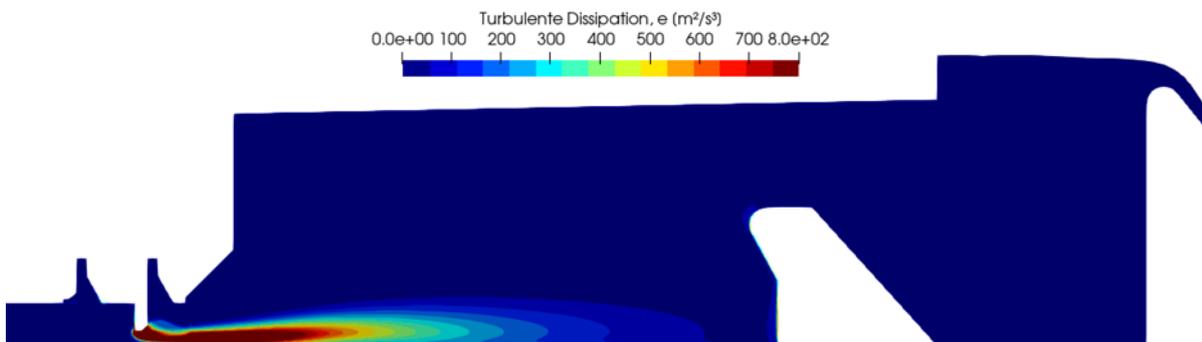


Abb. 11 Berechnete turbulente Dissipationsrate, Symmetrieebene, Ausführungsvorschlag

4 Diskussion

Umfangreiche Literaturrecherchen, durchgeführt von den Autoren, ergaben keine wesentlichen Hinweise zu Bemessungskriterien für die Dimensionierung von druckbeaufschlagten Toskammern. Das aus den Modellversuchen der TU Wien entwickelte Bemessungsdiagramm (Abb. 2) kann zur groben Vordimensionierung herangezogen werden, jedoch werden höchstwahrscheinlich in der Regel zu große Toskammerabmessungen daraus abgeleitet, wie auch die hier vorgestellte Studie zeigt. Die resultierenden Drücke im Ausführungsvorschlag sind vergleichsweise gering, was auf die Möglichkeit von noch kleineren Toskammerabmessungen hinweist. Anzumerken ist dabei, dass die Autoren aus Sicherheitsaspekten heraus den Ausführungsvorschlag nicht ausreichend optimiert haben.

Unter den Gesichtspunkten der zu dissipierenden Energie, der ausreichenden Förderfähigkeit des Gesamtsystems sowie der maximal und minimal zulässigen Drücke sehen die Autoren For-

schungsfragen hinsichtlich der Bemessungskriterien für die generellen Abmessungen der Toskammer (Länge, Querschnittsfläche, Volumen) aber auch hinsichtlich der maßgebenden Toskammerelemente: Einlaufbereich (Höhe über Boden, Zuströmwinkel), Prallwand (Position, Ausbildung, Höhe), Auslaufbereich (Gestaltung, Höhe), Wehrhöcker (Ausbildung, Höhe).

5 Zusammenfassung

Für das im Jahr 2022 in Betrieb genommene Gemeinschaftskraftwerk Inn wurde mittels CFD-Modellierung eine druckbehaftete Toskammer für die Entleerungseinrichtung des Triebwasserstollens dimensioniert. Die Ergebnisse von physikalischen Modellversuchen der TU Wien zu bereits ausgeführten Toskammern dienten dabei als Validierung für das numerische Modell. Die durchgeführte Validierung des 3D numerischen Programms zeigte eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse des Modellversuches und der CFD-Berechnung.

Als Grundlage für die ersten geometrischen Entwürfe der Toskammer diente ein aus den Modellversuchsergebnissen entwickelte Bemessungsdiagramm. In einem Variantenstudium für die Dimensionierung der Toskammer wurden die Hauptabmessungen sukzessive reduziert und zum Ausführungsvorschlag entwickelt. Anlagenversuche in der Inbetriebsetzungsphase der Anlage GKI zeigten, dass die Energieumwandlung in der Toskammer einwandfrei ist.

Das System der druckbeaufschlagten Toskammer kann bei Druckhöhen bis ca. 130 m und Durchflüssen bis 100 m³/s und darüber hinaus als das Mittel der Wahl zur Energieumwandlung bezeichnet werden, wenn die Energiedissipation auf engstem Raum erfolgen soll.

Die bisher ausgeführten druckbeaufschlagten Toskammern wurden auf Grundlage von aufwendigen Modellversuchen oder numerischen Berechnungen dimensioniert. Für eine allgemein gültige Anwendbarkeit des Systems wären Bemessungsangaben in Form eines Formelapparates bzw. Diagrammen wünschenswert, deren Ausarbeitung von den Autoren angeregt wird.

Literatur

Vischer, D. (1984). Energievernichter im Wasserbau, Schweizer Ingenieur und Architekt, 40/84, S. 769 - 776

Widmann, R. (1973). Bottom outlets with stilling caverns at high dams, Conference Proceedings, ICOLD Congress, Madrid

Anschrift der Verfasser

Dr. Clemens Dorfmann
flow engineering
Ingenieurbüro für Wasserbau
8010 Graz, Österreich
clemens.dorfmann@flowengineering.at

Dr. Dominik Mayr
3d-Hydro Engineering GmbH
Ingenieurbüro für konstruktiven Wasserbau und Hydraulik
8045 Graz, Österreich
dominik.mayr@3dHE.at

