

Numerische Berechnung von Hochdruckanlagen: Global betrachtet – lokal verbessert

Dipl.-Ing. Dr. Roman Gabl¹, Dipl.-Ing. Dr. Stefan Achleitner¹, Dipl.-Ing. Dr. Bernhard Gems¹, Dr.-Ing. Johann Neuner², Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Aufleger¹

¹Arbeitsbereich Wasserbau, Universität Innsbruck, Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck, Austria

²Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG), Division Engineering Services,
Eduard-Wallnöfer-Platz 2, 6020 Innsbruck, AUSTRIA

Veröffentlicht in der Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaft:

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00506-013-0104-4>

Zusammenfassung

Durch die Verwendung von zusätzlichen 3D-numerischen Untersuchungen können die hydraulischen Berechnungen des Triebwasserweges von Hochdruckwasserkraftanlagen verbessert werden. Anhand von drei Beispielen werden exemplarisch die Möglichkeiten aufgezeigt, welche sich durch eine solche vertiefte Betrachtung ergeben. Dabei handelt es sich um eine Oberkammer, eine asymmetrische Düse und eine Anbindung eines sich im Bau befindenden neuen Teils einer Wasserkraftanlage mit einem bestehenden Druckstollen. Für die Rohrströmungen wurde ANSYS-CFX verwendet und die Simulation des Füll- und Entleerungsprozesses erfolgte mit FLOW-3D.

Numerical simulation of high head power plants: globally considered and locally refined

Summary

Local 3D-numerical simulations are useful additions to a global calculation of hydropower plants. The paper presents an overview and three exemplary cases, which were conducted as part of an actual modernization project of an existing high-head power plant operated by the TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG. For the cases of the connection of the existing headrace power tunnel to the new surge tank including the penstock and the asymmetric orifice in the surge tank, the software ANSYS-CFX was used. For the third example, an upper chamber of the surge tank, the software FLOW-3D was chosen.

1. Einleitung

1.1. Anwendungsbereiche der 3D-Numerik

Die Verwendung von 1D-numerischen Softwarelösungen für die Berechnung von transienten Strömungszuständen in Rohrleitungen ist Stand der Technik. Sie werden bei Wasserkraftwerken zur Ermittlung von unterschiedlichsten Systemzuständen, maximalen Druckstößen, Wasserschlossschwingungen oder auch Sonderproblemen wie Rohrbrüchen eingesetzt. Dabei gibt es eine breite Palette an kommerziellen (z.B. WANDA der Firma Deltares) und akademischen (z.B. Hydraulic System der EPFL Lausanne [2]) Produkten [9]. Diese Vielfalt wird oft noch durch firmeninterne Programme der Betreiber und Planer erweitert. Die Stärke der vereinfachten eindimensionalen Betrachtung ist es, dass sehr schnell aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können. Meist wird dabei für die Lösung der grundlegenden Bewegungs- und Kontinuitätsgleichung die Methode der Charakteristiken herangezogen. Dieses Verfahren ermöglicht es, die partiellen Differentialgleichungen an den Stützstellen exakt zu lösen [9], [10]. Bedingt durch den vergleichsweise überschaubaren Berechnungsaufwand sind eine breite Variation der Geometrie und der Lastfälle sehr gut untersuchbar.

Bei der praktischen Anwendung der Software ergeben sich im Hinblick auf die Verluste im hydraulischen System gewisse Unsicherheiten. Diese sind zum einen die Wahl der Rauheit der Rohrleitung bzw. des Stollens und zum anderen die Größe der lokalen Verluste. Bei der Festlegung der Verlustgrößen können entsprechende Literatur- und Erfahrungswerte herangezogen werden. Ist die Anlage errichtet, kann basierend auf den Naturmessungen eine Kontrolle der Berechnungsannahmen vorgenommen werden.

Sowohl im Zuge der Planung aber auch bei der Kalibrierung an Naturmessungen kann die Verwendung von 3D-numerischen Simulationen deutliche Vorteile bringen. Durch die unterschiedlichsten Gegebenheiten (u.a. Geologie, Wasserdargebot, Speichervolumen, Höhenlagen) werden bei Wasserkraftwerken im Gegensatz zum Bau von Pipelines sehr häufig Sonderlösungen verwendet. Um die lokalen Verluste mit Hilfe von Literaturwerten zu bestimmen, müssen reale Geometrien meist vereinfacht und abstrahiert werden. Die damit verbundene Unsicherheit kann entweder durch skalierte physikalische Modellversuche im Labor oder durch lokale 3D-numerische Berechnungen deutlich verringert werden. Die 3D-Numerik bietet den zusätzlichen Vorteil einer hohen Ergebnisdichte (lokale Drücke und Geschwindigkeiten), was in Kombination mit der einfachen Möglichkeit der Anpassung der Geometrie ein optimales Werkzeug für Optimierungen ist. Die globale Betrachtung mit 1D-Werkzeugen kann mithilfe lokaler 3D-numerischer Simulationen, welche entsprechend

durch physikalische Versuche validiert wurden, verbessert werden. Somit können die Vorteile jedes Modellwerkzeuges optimal ausgenutzt und kombiniert werden.

In **Abbildung 1** ist eine Wasserkraftanlage schematisch dargestellt. Mögliche Einsatzbereiche für die 3D-Numerik erstrecken sich dabei über den gesamten Bereich, wobei eine mögliche Kategorisierung von Anwendungen in vier Gruppen erfolgen kann:

- Speicher
- Übergang in die Rohrleitungen / Stollen (Ein- bzw. Auslaufbauwerke)
- Lokale Verluste im hydraulischen System (u.a. Abzweigungen, Drosseln, Verteilrohrleitungen,...)
- Kammern im Wasserschlosssystem

Bei den Berechnungen im Umfeld des Speichers handelt es sich meist um zusätzliche Untersuchungen, die nicht direkt mit der hydraulischen Bemessung der Anlage zusammenhängen müssen. Mögliche Anwendungsbereiche reichen dabei von der Simulation von Impulswellen, die durch Lawinen erzeugt werden [8], über die Sedimentation im Stauraum [13] oder Sandfängen [1] bis hin zur Bemessung von Hochwasserentlastungsanlagen [4], [6]. Ein gewisses Optimierungspotential besteht auch bei der Auslegung von Ein- bzw. Auslaufbauwerken, die den Übergang zum Stollen- und Rohrleitungssystem darstellen. Obwohl bei diesen Bauwerken meist baubetriebliche Gesichtspunkte (kurze Bauzeit) im Vordergrund stehen, ist auch hier eine Verlustminimierung möglich.

Der Fokus in diesem Beitrag liegt auf den Anwendungsmöglichkeiten in der hydraulischen Anlage. Dazu gehören hauptsächlich lokale Verluste wie Verteilrohrleitungen [3], Abzweiger sowie Verbindungen und Drosseln, mit denen das Verhalten der Wasserschlossschwingung verbessert wird [5], [11]. Das Befüllen und Entleeren von komplexen Kammern kann ebenfalls mit Hilfe der 3D-Numerik untersucht werden und die Auslegung der Volumina inklusive Überfälle kontrolliert werden. Die hier genannten Untersuchungen decken bei weitem nicht die gesamte Breite der Einsatzmöglichkeiten der 3D-Numerik ab, sondern sollen exemplarisch Möglichkeiten und Betätigungsfelder aufzeigen.

1.2. Projekt KW Kaunertal

Im März 2012 wurde mit den Bauarbeiten am neuen Druckschacht für das Kraftwerk (KW) Kaunertal ([12], [14]) der Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG) begonnen. Der 1450 m lange und 60% geneigte Schacht ist für einen Ausbauabfluss von $122 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ dimensioniert. Neben dem Kraftabstieg wird auch das Wasserschloss erneuert. Die größeren Volumina in den beiden Kammern resultieren aus dem Wechsel von der bisher verwendeten Rückstromdrossel (Verhältnis des Verlustbeiwertes für Auf- und Abschwngen liegt bei 1:50, [15]) zu einer neuen asymmetrischen Düse mit einem Verhältnis 1:2,5. Weiterführende und aktuelle Informationen werden von der TIWAG auf der firmeneigenen Homepage [16] angeboten.

Im Zuge eines Forschungsprojektes der Universität Innsbruck mit der TIWAG wurden für dieses Projekt drei Erweiterungen der globalen 1D-Simulationen mit Hilfe von 3D-numerischen Methoden untersucht. Dies sind (a) die Anbindung der neuen Anlage an den bestehenden Triebwasserweg (Druckstollen), (b) der lokale Verlustbeiwert der asymmetrischen Düse und (c) das Sunk- und Schwallverhalten der komplexen Oberkammer des Wasserschlosses (Abb. 1). Als Software wurden für diese Simulationen FLOW-3D (Freispiegel) und ANSYS-CFX (Rohrströmungen) verwendet. Anhand dieser drei Beispiele wird aufgezeigt, welche Vorteile sich aus der lokalen 3D-Numerik für die Projektierung ergeben.

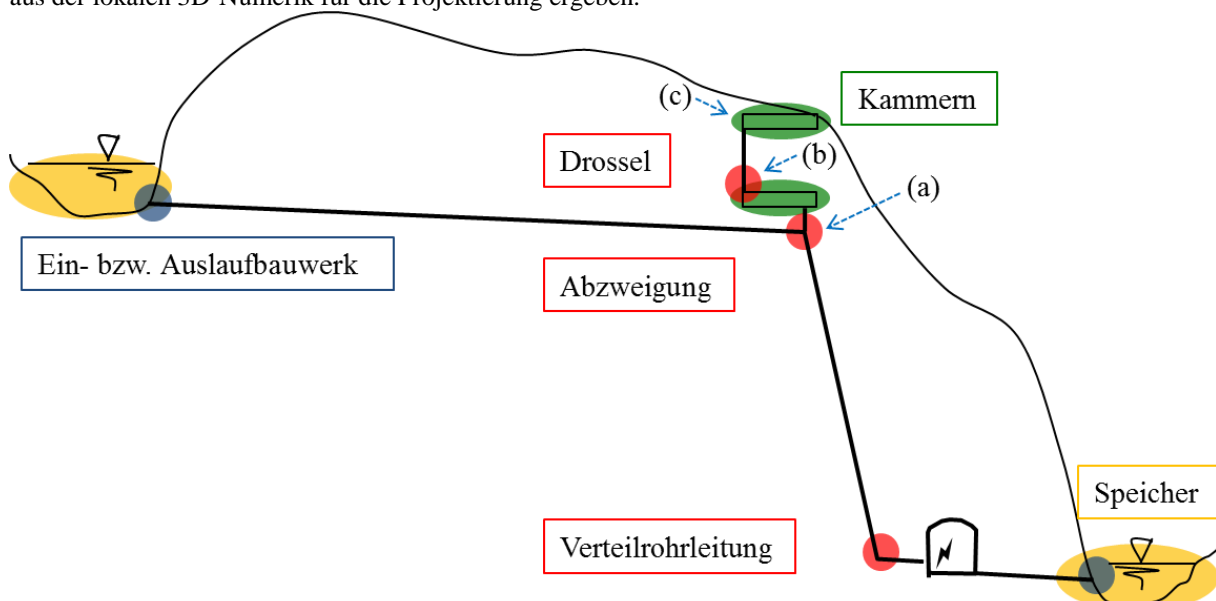


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Hochdruckwasserkraftanlage inklusive der Zuordnung der vorgestellten Beispiele

2. Verbindung Bestand und Neubau

2.1. Grundlagen

Aus wirtschaftlichen Gründen ist bei einer solchen Baumaßnahme an einer bestehenden Anlage die Minimierung der Außerbetriebnahme des Kraftwerks von großer Bedeutung. Der neue Druckschacht und das Wasserschloss des KW Kaunertal können weitestgehend ohne Betriebseinschränkungen errichtet werden. Anbindungen der neuen Anlage an den Bestand sind in der Wasserschloss Oberkammer, an der Verteilrohrleitung und dazwischen an der Verbindung an den bestehenden Druckstollen notwendig. Der letztgenannte Bereich ist in **Abbildung 2** dargestellt und wurde mit Hilfe der 3D-Numerik im Detail untersucht.

Die Untersuchung der relativ komplexen Geometrie der Anbindung der neuen Unterkammer bzw. des neuen Druckschachtes mit dem bestehenden Druckstollen befasst sich mit einer rein stationären Rohrströmung mit Reinwasser. Die bestehende und auch weiterhin vorhandene Drosselklappe am Ende des Druckstollens ist in der numerischen Berechnung zu berücksichtigen (Abb. 2). Somit wird eine hohe Flexibilität des Berechnungsnetzes (sehr feine Bereiche kombiniert mit längeren Rohrstücken) bei der Erstellung gefordert. Bedingt durch diese beiden Rahmenbedingungen – Rohrströmung und Flexibilität beim Netz – fällt die Wahl der numerischen Software eindeutig auf ANSYS-CFX. Das alternative Produkt FLOW-3D, auf das bei der Berechnung der Oberkammer nochmals eingegangen wird, hat Vorteile in der Simulation von Freispiegelabflüssen und ist auf rechteckige Netze beschränkt [5], [7].

2.2 Umsetzung

Bei der Simulation wurde die Vereinfachung angenommen, dass jeweils eine der drei möglichen Modellgrenzen als geschlossen betrachtet wird. Somit wurde zum Beispiel die Strömung von der Wasserschloss Unterkammer in den Druckstollen und in einer gesonderten Berechnung die Strömung in Richtung des neuen Druckschachtes berechnet (**Abb. 3**). Um eine Beeinflussung durch die Modellgrenzen zu minimieren, wurden die jeweiligen An- und Abströmungsrohrleitungen verlängert. Um den Einfluss der kontinuierlichen Verluste zu verringern, wurden die Auswerteebenen möglichst knapp vor und nach der Verbindung gelegt. Als Randbedingungen wurden ein stationärer Durchfluss beim Einlauf und ein fixierter Druck beim Auslauf angesetzt. Ziel der Berechnungen war neben der Kontrolle von lokalen Drücken und Geschwindigkeiten die Bestimmung der Verlustbeiwerte der sechs Hauptströmungsrichtungen. Diese Beiwerte dienen als Eingangswert für die 1D-Berechnung, bei der die Anbindung als lokaler Verlust berücksichtigt wird.

Bedingt durch baubetriebliche Einschränkungen waren die möglichen Ansatzpunkte für eine weiterführende Optimierung, wie zum Beispiel die Vergrößerung des Durchmessers der Verbindungsrohrleitung, limitiert. Von besonderem Interesse ist der Übergang vom bestehenden Druckstollen (nach der Drosselklappe) in die Verbindungsleitung (Abb. 2, linkes blau eingefärbtes Geometriestück) in Form eines Hosenrohres mit einem nach der Inbetriebnahme des neuen Druckschachts verschlossenen Anschluss an den alten Druckstollen. Würde dieser Bereich strömungstechnisch günstiger ausgeformt (Krümmer), könnte die Verlusthöhe um ca. 4 % in der Hauptströmungsrichtung verringert werden. Die Verringerung in die entgegengesetzte Strömungsrichtung (Fließrichtung Druckschacht zu Druckstollen) beträgt ca. 13 %. Dies würde aber nur im Fall des beim KW Kaunertal nicht möglichen Pumpbetriebes eine entscheidende Rolle spielen. Weitere Varianten wurden nicht untersucht, da das Hauptaugenmerk nur auf der Quantifizierung der Verlustbeiwerte lag.

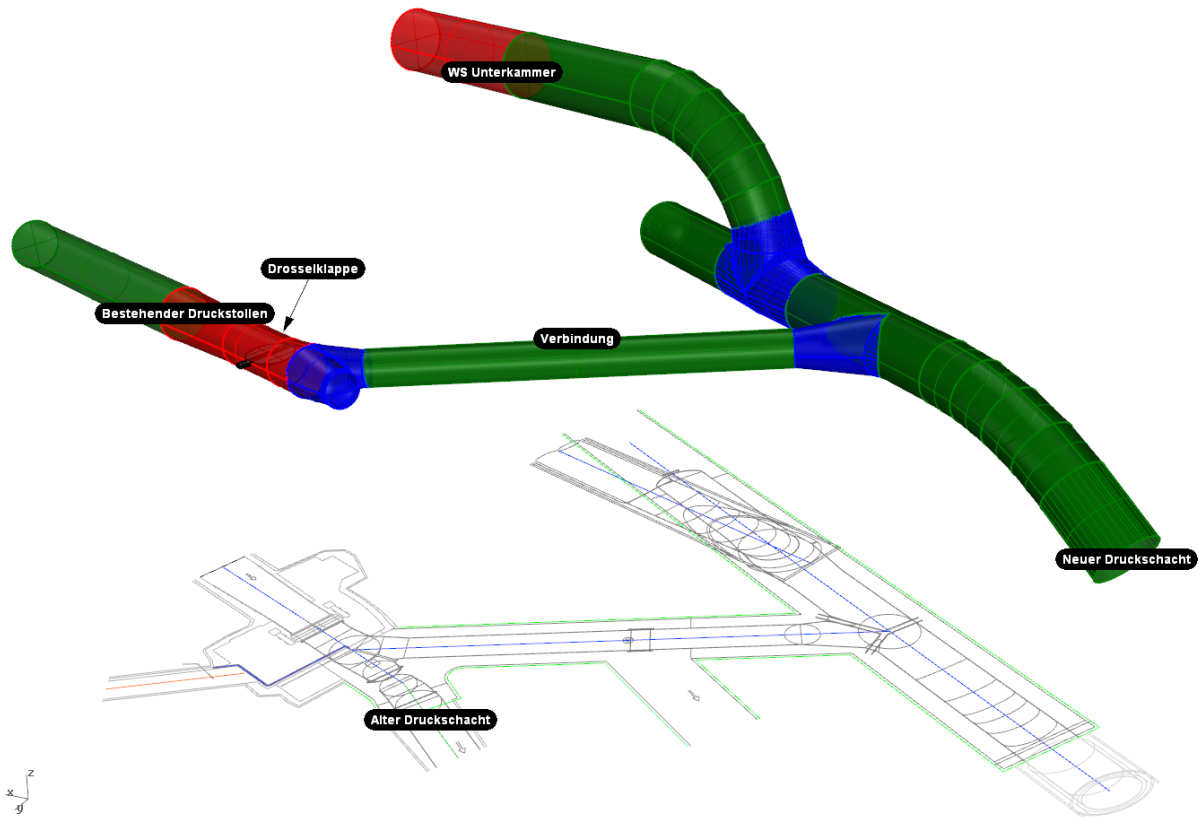


Abb. 2: Kombierter Grundriss und 3D-Modell – Verbindung Unterkammer, Druckschacht, Druckstollen

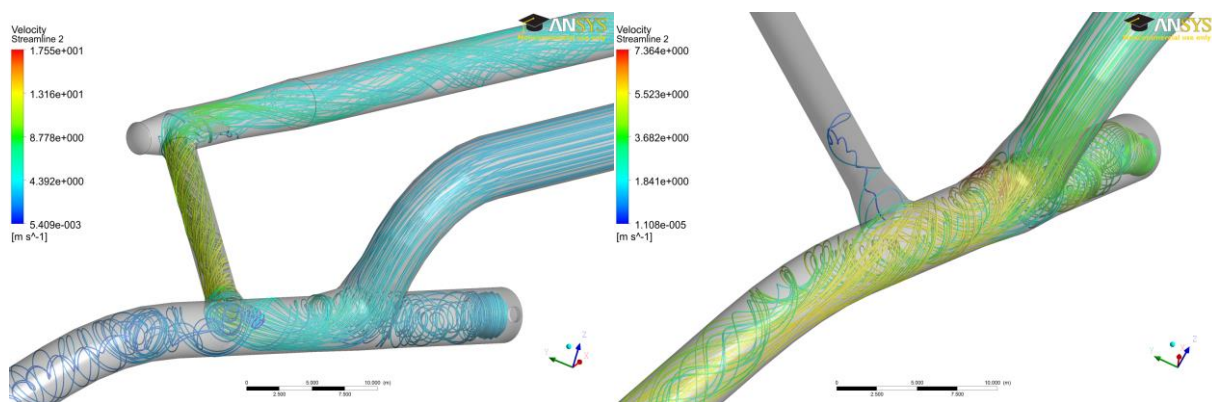


Abb. 3: Strömung Unterkammer in Richtung Druckstollen (links) und Druckschacht (rechts)

3. Asymmetrische Düse im Wasserschloss

3.1. Grundlagen

Für das neue Wasserschloss des KW Kaunertal ist eine asymmetrische Düse geplant (Abb. 4, rotes Bauteil). Diese ist am Übergang der Unterkammer (Innendurchmesser 5 m) zum Lotschacht (6,3 m) oberhalb des 90°-Krümmers (Abb. 4, grünes Bauteil) angeordnet. Die Drossel soll einen relativ geringen Widerstand beim Aufschwingen (Fließrichtung Unterkammer Richtung Oberkammer) und eine großen Verlust beim Abschwngen erzeugen. Dieser asymmetrische Effekt (im Gegensatz zu einer einfachen Blende) führt gezielt zu einer zusätzlichen Dämpfung der Wasserschlossschwingung im hydraulischen System. Als Zielwert für die Optimierung wurde das Verhältnis des Verlustbeiwertes Auf- zu Abschwngen eingeführt und mit 1:2,5 festgelegt.

3.2. Bemessungskonzept

Im Gegensatz zur schon erwähnten Anbindung des Bestandes an den Neubau sind die Variationsmöglichkeiten der Geometrie der Düse kaum beschränkt. Das verwendete Konzept für die hydraulische Dimensionierung der asymmetrischen Düse baut sich aus folgenden Punkten auf [5]:

- a) Vordimensionierung durch Literaturwerte
- b) Breite Variation der Geometrie mit einem vereinfachten numerischen Modell
- c) Numerisches Vollmodell inklusive Krümmer
- d) Validierungsexperiment
- e) Weiterführende Anpassungen (ausschließlich numerische Modellierung)

Ausgehend von den Literaturwerten wurden mit Hilfe eines vereinfachten numerischen Modells die prinzipiellen Zusammenhänge der Geometrieparameter und der fließrichtungsabhängigen Verlustbeiwerte untersucht. Dazu wurde die Düse als rotationssymmetrisch angenommen (der Krümmer wird auf eine reine Querschnittsveränderung reduziert) und nur ein Segment mit ANSYS-CFX modelliert. Basierend auf den Ergebnissen wurden allgemeine Bemessungshypothesen entwickelt. Der Nachweis basiert auf in Summe neun unterschiedlichen Düsen, die im Labor getestet (Maßstab 1:25) und im Modellmaßstab 3D-numerisch simuliert wurden. In **Abbildung 5** sind exemplarische Ergebnisse jeder der beiden Strömungsrichtungen ersichtlich.

Bestärkt durch die sehr gute Übereinstimmung der Numerik mit dem Validierungsexperiment konnten alle weiteren Anpassungen und die Skalierung in den Naturmaßstab rein numerisch durchgeführt werden. Der Vorteil dieser kombinierten Bemessung war es, dass die Flexibilität bei der Untersuchung der Geometrie und die hohe Ergebnisdichte der numerischen Berechnung mit der Absicherung durch den etablierten physikalischen Modellversuch erzielt werden konnten. Zusätzlich standen frühzeitig Ergebnisse aus der Numerik für die Vorbemessung zur Verfügung und Änderungen, welche sich aus der Detailplanung und dem Bauablauf ergaben, konnten auch nach dem Abbau des Labormodelles mit Hilfe der Numerik bewertet werden [5].

Zwei unterschiedliche Stadien dieses Prozesses sind in **Abbildung 4** dargestellt. Die jeweils rechte Variante entspricht dem Beginn des Optimierungsprozesses und die linke dem Abschluss. Der auskragende Anteil der Düse (**Abb.4**, rotes Bauteil) konnte deutlich verringert werden, ohne damit eine Reduktion der Abschwingverluste zu verursachen. Die letzten beiden Segmente wurden gleich ausgerichtet, um das Verhalten beim Aufschwingen zu verbessern (der rote Teil in **Abb. 4** wird zu einem Segment). Zusätzlich wurde der Krümmer in mehr Segmente unterteilt, um die Errichtung zu erleichtern. Damit konnte das Optimierungsziel erreicht und der bautechnische Aufwand verringert werden [5].

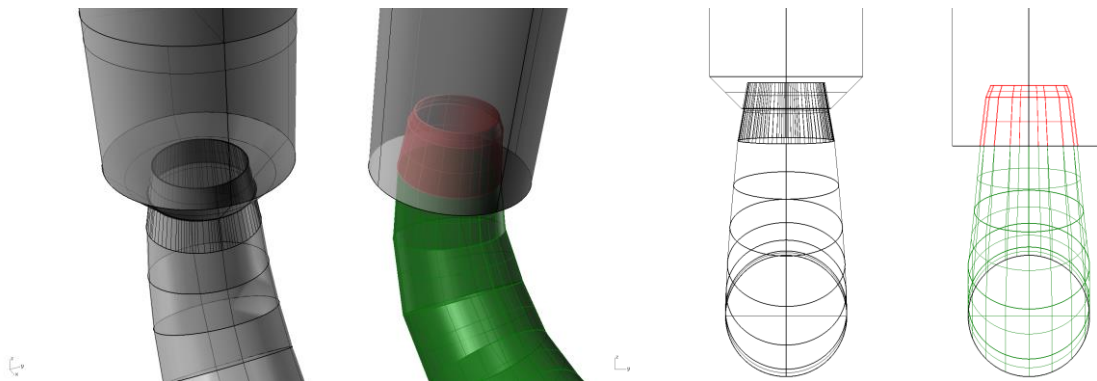


Abb. 4: Vergleich der optimierten Variante mit der ersten Annahme – Axonometrie (links), Ansicht (rechts)

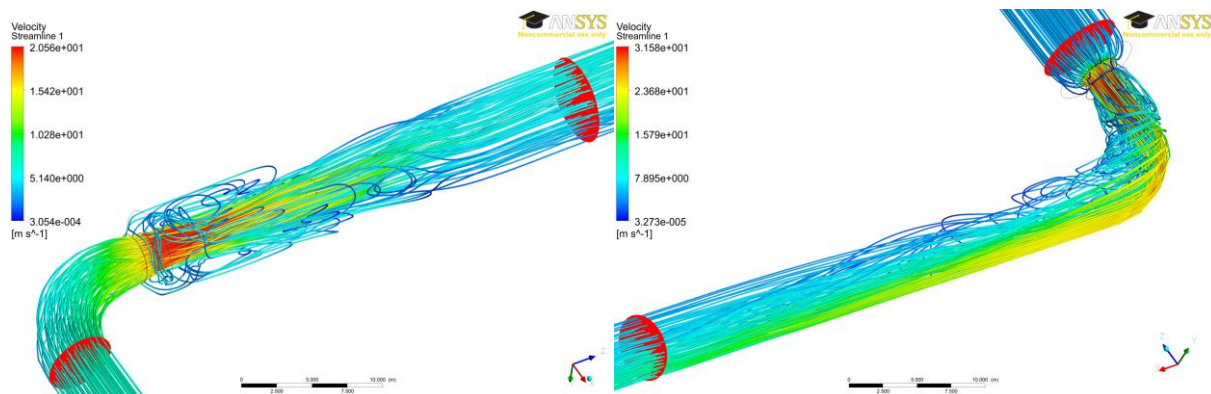


Abb. 5: Exemplarische Ergebnisse Aufschwingen (links) und Abschwngen (rechts)

4. Oberkammer des Wasserschlosses

4.1. Grundlagen

Bedingt durch die neuen Rahmenbedingungen für die Bemessung des Wasserschlosses muss die bestehende Oberkammer des Wasserschlosses (**Abb. 6**, rotes Bauteil) deutlich vergrößert werden. Der neue Lotschacht, welcher von der Düse zur Oberkammer führt, mündet in die neue Schachtkopfkaferne, an die ein zusätzlicher Stollen anschließt (Abb. 6, grün). Zwischen der bestehenden Oberkammer und dem Neubau sind zwei Verbindungen vorgesehen. Zum einen wird ein Durchschlag zur alten Schachtkopfkaferne vorgenommen und zum anderen werden im Bereich der Belüftung die beiden Stollen zusammengeführt. Dies ermöglicht einen Ringschluss mit beiden Kammern. Die Ermittlung der Ausbreitung von (reflektierten) Wellen in den Kammern gestaltet sich dadurch zwar komplexer, doch können die zur Verfügung stehenden Volumina besser ausgenutzt werden, als wenn die Kammern nur einfach verbunden wären. Das Füllen und Entleeren wurde mit Hilfe der Software FLOW-3D unter der Annahme von zwei unterschiedlichen Rauheiten, welche jeweils zu den geometrischen Unebenheiten durch die Diskretisierung der Stollenwand addiert werden, untersucht. Die Vorteile der Software im Bereich des instationären Freispiegelabflusses wiegen in diesem Fall die Einschränkungen in der Netzerstellung auf [7].

4.2. Numerik

Basierend auf den Netzuntersuchungen hat sich eine Kombination aus acht rechteckigen Netzblöcken bewährt. Bedingt durch die weitläufige Geometrie sind bei der Berechnung nur ca. 25 % der Gesamtzellenanzahl (1,3 Millionen Zellen) aktiv. Um eine Reduktion des Anteils der ausgeblendeten Zellen zu erreichen, müsste die Anzahl der Blöcke erhöht werden. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass dies die Berechnung nicht beschleunigt und ein Wasserverlust durch Rundungsfehler an den Blockgrenzen nicht ausgeschlossen werden kann.

Der Hauptbemessungsfall der Kammer stellt das maximale Aufschwingen und somit Füllen der Oberkammer dar. Dabei dient die mit Hilfe der 1D-Software berechnete Simulation eines Dreifachlastfalles (Änderung des Betriebszustandes der Turbine zum ungünstigsten Zeitpunkt als Nachweis für die freie Betriebsführung) als Grundlage. Die daraus resultierende Ganglinie des Zulaufs zur Oberkammer ist exemplarisch in **Abbildung 7** dargestellt. In dieser Abbildung ist die nachgebildete Randbedingung für die 3D-numerische Berechnung des Füllvorganges der Oberkammer grün hinterlegt. Dabei dienen die den maßgebenden Schaltzyklus umschließenden Nulldurchgänge (Wechsel der Fließrichtung) als Anfangs- und Endpunkt der Betrachtung. Beim Nulldurchgang vor der Spitze liegt der freie Wasserspiegel des Wasserschlosses deutlich im unteren Bereich des Lotschachtes und somit außerhalb des Modellbereiches. Durch das in das Wasserschloss einströmende Wasser hebt sich der Wasserspiegel, bis rechnerisch die untere Grenze des Modelles erreicht ist. Zu diesem Zeitpunkt beginnt die 3D-numerische Berechnung. Der ergänzende Teil des Lotschachtes stellt die Unabhängigkeit der Einströmung in die Schachtkopfkaferne von der Durchflussrandbedingung in FLOW-3D sicher. Das Einströmen des Wassers in das Modellgebiet erfolgt zu Beginn noch mit einem relativ starken Anstieg, der zu einem Zuschlagen der Schachtkopfkaferne führt. Nach der sehr klaren Spitze nimmt der Durchfluss wieder ab, bis der Nulldurchgang erreicht ist und wieder Wasser abfließt. Zu Zeitpunkt dieser Fließrichtungsänderung ist das maximale Volumen in der Kammer gespeichert. Ziel dieser Untersuchung ist es nachzuweisen, dass das 1D-berechnete Volumen – unter Berücksichtigung der zeitlichen Verteilung – in dem Oberkammersystem aufgenommen werden kann. Dabei sollte ein Zuschlagen der Stollenquerschnitte und ein Überströmen des nach der hinteren Zusammenführung angeordneten Wehrs möglichst verhindert werden.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die erste Welle relativ unproblematisch hauptsächlich in der neuen Kammer aufgenommen wird. Die Bestandskammer wird im Anschluss von beiden Seiten her gefüllt. In **Abbildung 8** ist ein exemplarischer Systemzustand nach 80 Sekunden Berechnungszeit dargestellt. Erst durch die Überlagerungen von reflektierten Wellen kommt es zum Zuschlagen in einzelnen Bereichen der Stollen. Die geplante Wehrhöhe (aus Ruhewasserspiegel inklusive angenommenem Wellenschlag) genügt nicht, um ein Überströmen zu verhindern.

Es wurde untersucht, ob durch zusätzliche Einbauten an der Sohle oder den seitlichen Wänden eine Verbesserung des Strömungsverhaltens erzielt werden kann. Für solche Variationsrechnungen musste das Berechnungsnetz in FLOW-3D nicht angepasst werden, sondern nur die Diskretisierung der Einbauten kontrolliert werden. Die gute Vergleichbarkeit solcher Geometrievariationen ist neben der Stärke bei Freispiegelberechnungen ein weiterer Vorteil der Software FLOW-3D. Durch zusätzliche Wände kann die erste Aufteilung des eintretenden Wassers in die bestehende und neu zu errichtende Kammer verbessert und der Ort des Zuschlagens kontrolliert werden. Die Problematik mit den überlagernden Wellen war aber nicht komplett zu lösen. Der zusätzliche bauliche Mehraufwand und die Verschlechterung in der Zugänglichkeit nach einem solchen Einbau haben dazu geführt, dass komplett auf die Einbauten verzichtet wurde. Stattdessen wird die Wehrkrone angehoben, womit der Nachweis der Leistungsfähigkeit beim Füllen erbracht werden konnte.

Für den nachfolgenden Entleerungsvorgang wurde die Einströmrandbedingung in einen Ausflussrand umgewandelt und vom Endzustand des Füllens aus als Restart weiter berechnet. Dabei wurde aber der maximal mögliche Ausfluss entsprechend der 1D-Berechnung limitiert. Aus dem Unterschied zwischen Ausfluss-Soll und dem tatsächlichen Abfluss konnte die Absenkung im Lotschacht ermittelt werden. Auch für diesen Lastfall konnte der Nachweis erbracht werden.

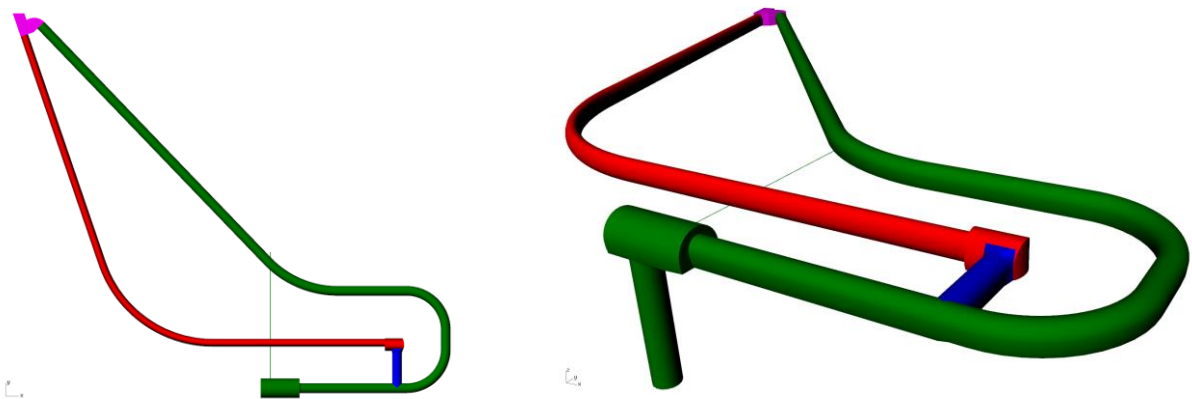


Abb. 6: Grundriss (links) und Ansicht (rechts) der Oberkammer des Wasserschlosses zu Beginn der Untersuchung

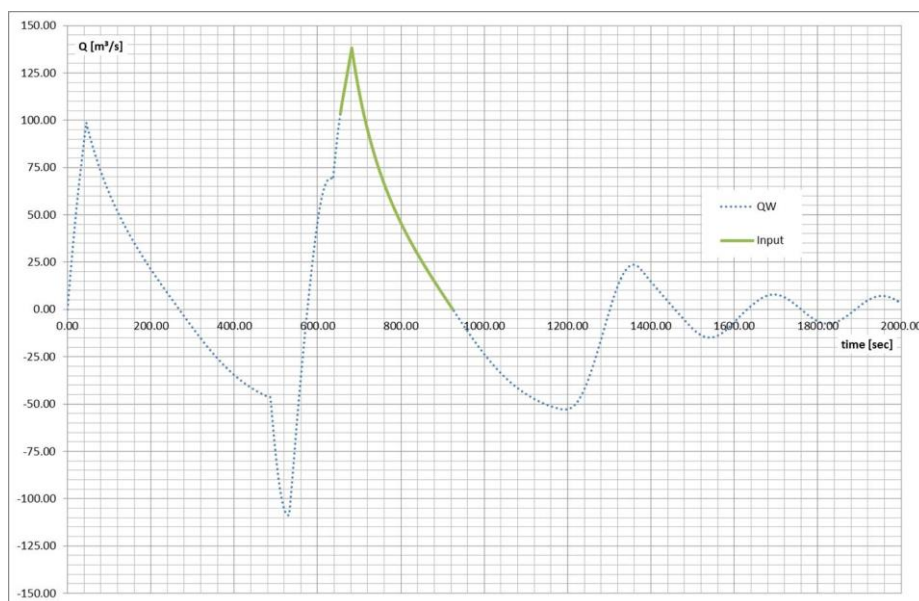


Abb. 7: Durchflussspitze aus der 1D-Numerik überlagert mit der Randbedingung für die 3D-Numerik

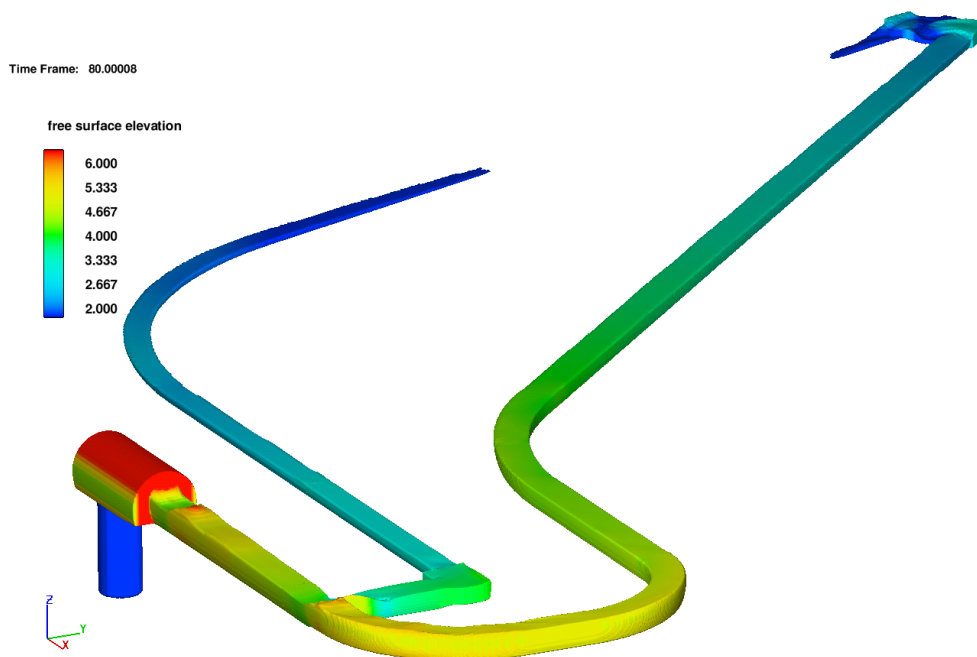


Abb. 8: Exemplarisches Ergebnis der Berechnung des Füllvorganges in der Oberkammer

5. Zusammenfassung

Anhand von drei Beispielen wurden die Möglichkeiten der 3D-numerischen Berechnung bei Wasserkraftwerken aufgezeigt. Dazu gehören die reinen Quantifizierungen von Verlustbeiwerten (in Kombination mit der Kontrolle von lokalen Drücken und Geschwindigkeiten), eine breite Optimierung von hydraulischen Bauteilen und der Nachweis von komplexen Kammern im Wasserschloss.

Durch derartige vertiefte Untersuchungen sind hydraulische Optimierung von Bauwerken aber auch deutliche Verbesserungen der Eingangswerte für 1D-numerische Berechnungen erzielbar. Bedingt durch die genauere Kenntnis von lokalen Verlustbeiwerten reduzieren sich somit der Aufwand und die möglichen Unsicherheiten (Freiheitsgrade) für die Bemessung/Kalibrierung. Die Flexibilität bei der Geometrie erleichtert die Optimierung. Durch die vernachlässigbar geringen Vorhaltekosten der numerischen Berechnung ist eine Begleitung des gesamten Planungs- und Ausführungsprozesses einfach und kostengünstig möglich. Besonders bei der Ertüchtigung von bestehenden Wasserkraftanlagen kann der Wissensgewinn durch die 3D-Numerik Potentiale aufzeigen und bietet die Möglichkeit, Unsicherheiten zu reduzieren.

Literatur

- [1] **Daneshvari, M.; Münch, C.; De Cesare, G.** (2012): Numerical simulation of a new sand trap flushing system. Proceedings of the 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Porto, Portugal, February 9-11, 2012.
- [2] **De Souza, P.; Boillat, J.-L.; Schleiss, A.** (2004): Hydraulic System Modélisation des systèmes hydrauliques à écoulements transitoires en charge, Communication Laboratoire de constructions hydrauliques, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne Nummer 16. <http://infoscience.epfl.ch/record/116165>
- [3] **Dobler, W.; Arch, A.; Larcher, M.; Zenz, G.** (2010): Numerische Untersuchung von Rohrströmungen am Beispiel eines Bifurkators. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 62, Nr. 3, Seiten 54–57.
- [4] **Faber, R.; Fuchs, M.; Puchner, G.** (2012): Numerische Simulation von Hochwässern: Von 1D zu 3D aus Anwendersicht im Ingenieurbereich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft Band 64, Ausgabe 5-6, Seiten 307-313.
- [5] **Gabl, R.** (2012): Numerische und physikalische Untersuchung des Verlustbeiwertes einer asymmetrischen Düse im Wasserschloss. Forum Umwelttechnik und Wasserbau, Innsbruck: *innsbruck university press (iup)* Band 14.
- [6] **Gabl, R.; Achleitner, S.; Sendlhofer, A.; Höckner, T.; Schmitter, M.; Aufleger, M.** (2013): Optimierter Einsatz und Kombination von 3-D-Numerik und physikalischer Modellierung. WasserWirtschaft, Band 103, Heft 5, Seiten 128-131.
- [7] **Gabl, R.; Gems, B.; De Cesare, G.; Aufleger, M.** (2013): Anregungen zur Qualitätssicherung in der 3-D-numerischen Modellierung mit FLOW-3D. Eingereicht bei der WasserWirtschaft.

- [8] **Gabl, R.; Kapeller, G.; Aufleger, M.** (2010): Lawineneinstoß in einen Speichersee – Vergleich numerisches und physikalisches Modell. *WasserWirtschaft*, Band 100, Heft 5, Seiten 26-29.
- [9] **Ghidaoui, M.; Zhao, M.; McInnis, D.; Axworthy, D.** (2005): A review of water hammer theory and practice. *Appl. Mech. Rev.*, 58: pages 49–76.
- [10] **Giesecke, J.; Mosonyi, E.** (2009): *Wasserkraftanlagen – Planung, Bau und Betrieb*. 5. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [11] **Huber, B.** (2010): Physikalischer Modellversuch und Cfd-Simulation einer asymmetrischen Drossel in einem T-Abzweigstück, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 3-4, Seiten 58-61.
- [12] **Lauffer, H.** (1968): *Das Kaunertalkraftwerk*. Springer-Verlag, Wien.
- [13] **Möller, G.; Boes, R.; Theiner, D.; Fankhauser, A.; Daneshvari, M.; De Cesare, G.; Schleiss, A.** (2011): Hybrid modeling of sediment management during drawdown of Räterichsboden reservoir, *Dams and Reservoirs under Changing Challenges – Schleiss & Boes (Eds)*, Taylor & Francis Group, London.
- [14] **Neuhauser, E.** (1984): *Das Kaunertalkraftwerk – Neue Wege der Bautechnik*. Wagner'sche Univ.-Buchhandlung, Innsbruck.
- [15] **Seeber, G.** (1970): Das Wasserschloß des Kaunertalkraftwerkes der TIWAG – Ein neuer Typ eines rückstromgedrosselten Kammerwasserschlosses. *Schweizerische Bauzeitung Sonderdruck* 88. Jahrgang, Heft 1.
- [16] **TIWAG** (abgerufen Juni 2013): Homepage des Projektes auf <http://www.tiroler-wasserkraft.at/>