

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Pummer, Elena; Cofalla, Catrina; Schüttrumpf, Holger

Analyse der Strömungen in unterirdischen Pumpspeicherwerken

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische
Hydromechanik**

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103447>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pummer, Elena; Cofalla, Catrina; Schüttrumpf, Holger (2014): Analyse der Strömungen in unterirdischen Pumpspeicherwerken. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 50. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 265-275.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Analyse der Strömungen in unterirdischen Pumpspeicherwerken

Elena Pummer
Catrina Cofalla
Holger Schüttrumpf

Als Ober- und Unterbecken für Pumpspeicherwerke könnten statt natürlicher oder künstlicher Seen auch belüftete Kavernensysteme untertage genutzt werden. Die Veränderung der Strömungen durch die Geometrieänderung der Becken könnte allerdings erhebliche Auswirkungen auf die Energieerzeugung bzw. -speicherung dieser Kraftwerke haben und sollte in diesem Zusammenhang analysiert werden. Um die Strömungsprozesse grundlegend zu analysieren, werden am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) numerische 3D- und 2D-Simulationen mit experimentellen Modellversuchen kombiniert. Dadurch werden die Vorteile dieser beiden Methoden genutzt und die Nachteile kompensiert. Ausgezeichnete Ergebnisse konnten u. a. mit den Softwarepaketen OpenFOAM und TELEMAC-2D erreicht werden.

Mithilfe dieser Methoden werden verschiedene Geometrien für Kavernensysteme von Pumpspeicherwerken bezüglich ihrer strömungstechnischen Eigenschaften untersucht und verbessert. Hier vorgestellt wird die Analyse der Fließgeschwindigkeiten, Wellenhöhen und Dämpfungseigenschaften, die mit unterschiedlichen Durchflüssen, Füllgraden und Füllzeiten für den Turbinen- und Pumpbetrieb in verzweigten Kavernensystemen getestet werden. Bei diesen Untersuchungen stimmen die Messergebnisse der verschiedenen Methoden sehr gut überein.

Die Idee der unterirdischen Pumpspeicherwerke soll einen flexibleren Ausbau der derzeit in der Standortwahl limitierten Pumpspeicherwerke ermöglichen. Dieser wird durch das Streben nach einer erneuerbaren Energieversorgung und die dadurch entstehende steigende Energiespeichernachfrage gefordert. Die aktuelle Studie soll einen Beitrag für die Umsetzung dieser unterirdischen Pumpspeicherwerke leisten.

Stichworte: Kavernen, Strömungsprozesse, experimentelle Modellversuche, numerische 2D- und 3D-Simulation

1 Einführung

Die Planungen der Bundesregierung, den Erneuerbare-Energien-Anteil in Deutschland stark auszubauen, führen zu einem erheblich größeren Bedarf an

Speichern (*Leonhard et al.*, 2008). Für Pumpspeicherwerke wird gewöhnlich ein Becken auf dem Berg und ein Becken im Tal angeordnet und durch den Höhenunterschied elektrische Energie in Form von potentieller Energie gespeichert (*Giesecke*, 2009). Die begrenzten Ausbaumöglichkeiten dieser Speicher führten zu der Idee, Pumpspeicherwerke mit unterirdischen Kavernensystemen zu errichten (*Schüttrumpf*, 2011). Dabei müssen nicht beide, aber mindestens ein Speicher unterirdisch angeordnet sein. Das Funktionsprinzip unterscheidet sich nicht von dem konventioneller Kraftwerke. Resultierend entstehen eine Ungebundenheit an die natürliche Topographie und ein geringerer Flächenbedarf an der Erdoberfläche, wodurch ein Ausbau auch an bisher nicht geeigneten Standorten ermöglicht werden könnte (*Allen*, 1977).

Diese Kraftwerke wurden bislang nicht realisiert. Die Strömungsprozesse sind daher unbekannt und unterscheiden sich aufgrund der Kavernenbauweise erheblich von denen in konventionellen Pumpspeicherwerken. Um wie bei konventionellen Pumpspeicherwerken, sowohl auf der Energieangebots- als auch auf der Energienachfrageseite agieren zu können und Energieüberschüsse und -mängel auszugleichen, werden am IWW die Strömungen mithilfe experimenteller und numerischer Modellversuche untersucht. Es soll eine strömungsoptimierte Geometrie für die Kavernen entwickelt werden, die in den Abmessungen möglichst kompakt und somit kostengünstig und umweltverträglich ist. Ziel dieses Papers ist es, auf Basis der experimentellen Modellversuche, die numerischen Untersuchungen der Strömungsprozesse eines verzweigten Kavernensystems für unterirdische Pumpspeicherwerke darzustellen und die Unterschiede der Ergebnisse aus 3D- und 2D-Simulationen darzulegen. Zudem sollen die aus den Simulationen gewonnenen Erkenntnisse zu Füll- und Leervorgängen und zu den Anforderungen an die Geometrie eines solchen Kavernensystems aufgedeckt werden.

2 Möglichkeiten für zukünftige unterirdische Pumpspeicherwerke in Deutschland

2.1 Energiewirtschaftliche Anforderungen und Funktion

Entscheidend für die Simulation der Strömungen sind als gegebene Randbedingungen die energiewirtschaftlichen Anforderungen an Pumpspeicherwerke, die deren Fahrweise bestimmen. In Deutschland werden Pumpspeicherwerke u. a. zum Erzeugungsausgleich genutzt, wobei es sich dabei um kurz- bis mittelfristige Zeiträume handelt (*dena*, 2010). Sie stellen Systemdienstleistungen bereit, worunter die Bereitstellung von Regelleistung zur Frequenzhaltung im Stromnetz zu verstehen ist. Dafür werden innerhalb von wenigen Sekunden die sogenannte Primärregelleistung und innerhalb von fünf Minuten die sogenannte Se-

kundärregelleistung abgerufen. Plötzliche Kraftwerksausfälle im Verbundnetz können durch Reserveleistung aufgefangen bzw. Überschussleistung bei Ausfällen großer Abnehmer aufgenommen werden. Zudem kann die Netzspannung auf einem konstanten Wert innerhalb der Spannungsebenen durch Blindleistungsbe- reitstellung gehalten werden (dena, 2010). Weiterhin können Pumpspeicher ohne Stromzufuhr hochgefahren werden und bei einem Netzzusammenbruch zum Hochfahren anderer Kraftwerke genutzt werden (Popp, 2010).

Simuliert werden müssen demnach schnelle Betriebswechsel zwischen Turbinen- und Pumpbetrieb. Das Kraftwerk darf nur so stark beansprucht werden dass die volle Stabilität jeder Zeit gewährleistet ist. Der ungünstigste strömungstechnische Fall wäre ein plötzlicher Kraftwerksausfall, also ein Betriebsstopp.

2.2 Aufbau in Abhängigkeit von Standorteigenschaften

Der entscheidende Unterschied von unterirdischen zu konventionellen Pumpspeicherwerken ist die Geometrie des Kavernensystems, die sich erheblich von der eines Sees unterscheidet. Dabei gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten für den Aufbau des Kavernensystems. Zum einen könnte ein System aus verzweigten Kavernen mit großem Längen-/ Höhenverhältnis und zum anderen könnten einzelne Behälter mit großem Höhen-/ Längenverhältnis genutzt werden (vgl. Abbildung 1). Beides wurde noch nicht realisiert.

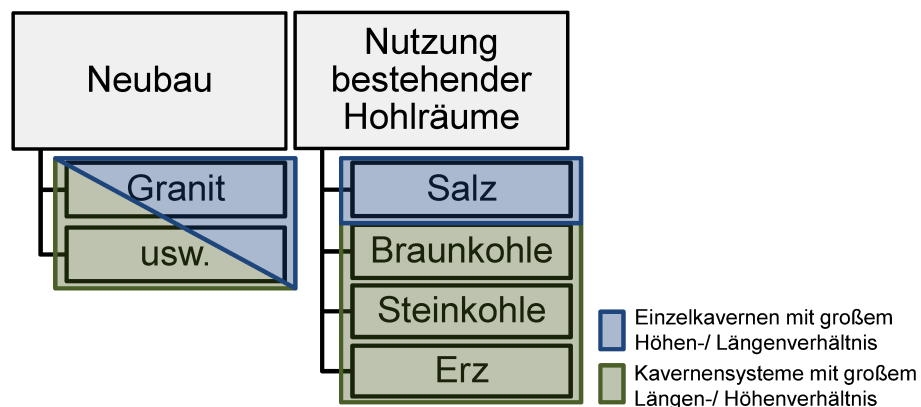


Abbildung 1: Aufbau der Kavernen in Abhängigkeit des Standorts

Für den Aufbau entscheidend ist es, ob das Kraftwerk neu errichtet wird, z. B. im ungestörten Granit, oder ob bereits bestehende Hohlräume genutzt werden. Wie Abbildung 1 zeigt, sind im Falle eines Neubaus wahrscheinlich beide Aufbauvarianten möglich, bei bestehenden Hohlräumen könnten im Salz einzelne Kavernen, in der Braun- und Steinkohle und im Erz verzweigte Systeme möglich sein. Im Folgenden werden ausschließlich Untersuchungen zum verzweigten System vorgestellt.

2.3 Möglichkeiten der Aufbauvariation

In vergangenen Studien wurden unterirdische Pumpspeicherkonzepte meist theoretisch und vor allem unter geotechnischen, maschinentechnischen, baubetrieblichen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht, wobei wasserbauliche Aspekte nur hintergründig behandelt wurden (*Pummer, 2013a*). Geometrievarianten an Kavernensystemen unterscheiden sich vor allem in den Abmessungen im Querschnitt, aber auch in der Länge, der Anzahl und der Steigung sowie der Verbindung der Kavernen miteinander. Abbildung 2 zeigt das idealisierte Ausgangsmodell des IWW, das auf einer Analyse und Synthese bisheriger Forschungsergebnisse beruht, und anhand dessen die Strömungsprozesse sowie die Auswirkungen auf diese durch Geometrieänderungen untersucht werden.

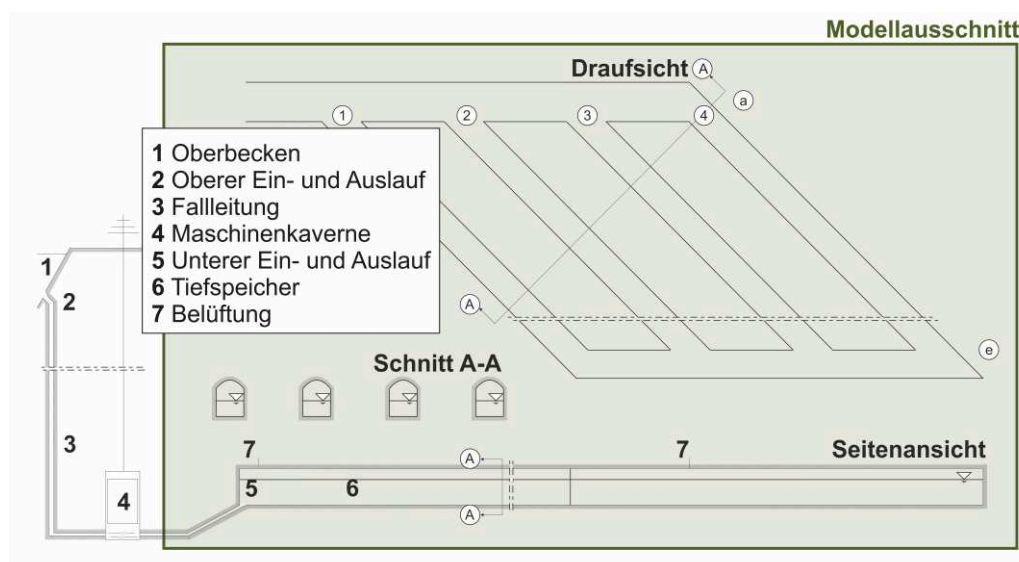


Abbildung 2: Idealisiertes Ausgangsmodell des IWW (verändert nach *Pummer, 2013a*)

3 Möglichkeit der numerischen Simulation der Strömungsprozesse

3.1 Ermittlung der strömungstechnischen Anforderungen an die numerische Simulation durch experimentelle Modellversuche

Das idealisierte Ausgangsmodell (vgl. Abbildung 2) wurde zur Ermittlung der Strömungsprozesse, die als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten numerischen Verfahrens dienen, in der Versuchshalle des IWW als experimentelles Modell mit entsprechender Messtechnik im Maßstab 1:100 errichtet. Es wurde zur besseren Anschaulichkeit mit offenen Kanälen und nicht in Kavernenbauweise gebaut, was durch den vorhandenen Freispiegelabfluss möglich war. Das belüftete System soll anschließend im numerischen Modellversuch untersucht

werden. Zu Beginn des Füllvorgangs (Turbinenbetrieb) steht das Wasser mit einem Wasserspiegel in Höhe des Absenkziels (0,02 m) ausgependelt im System. Das Wasser verteilt sich bereits kurz nach Versuchsbeginn vom Verteilungskanal auf die einzelnen Kanäle, die sich meist der Reihe nach füllen, wie es Abbildung 3 zeigt. Im Verbindungskanal am Ende der Kanäle treffen die Wellen aufeinander. Die Leerung des Systems (Pumpbetrieb) erfolgt analog.

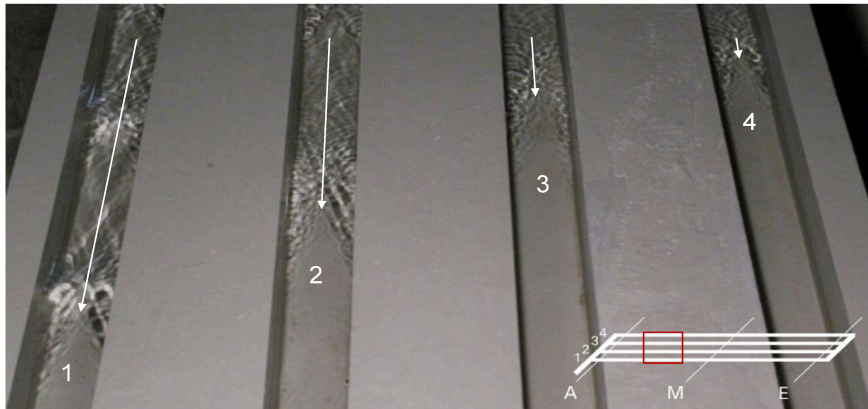


Abbildung 3: Füllvorgang im physikalischen Modell (Kanäle)

Das Öffnen oder Schließen der Absperrorgane und die dadurch entstehende plötzliche Veränderung des Durchflusses führen zu Veränderungen des Wasserspiegels, die als Schwall (Anstieg) und Sunk (Absenken) bezeichnet werden. Kurz nach dem Übergang vom Druck- zum Freispiegelabfluss im Verteilungskanal kommt es zu einem Wechselsprung (vgl. Abbildung 4). In der Abbildung zu erkennen sind Verwirbelungen, Bläschenbildung und Lufteintrag. Danach wird das Wasser durch die Aufteilung auf die einzelnen Kanäle an den Kanalwandungen reflektiert, was die Energie der Wellen beeinflusst und die Wellenhöhe unter Umständen vergrößert. Hinzu kommen Einzelwellen, sogenannte solitäre Wellen, die ebenfalls im System beobachtet und messtechnisch erfasst werden. Sie breiten sich ohne Formveränderung in den einzelnen Kanälen im Modell aus. An den Kanalenden treffen die Wellen im Verbindungskanal aufeinander, das Wasser wird erneut reflektiert und strömt zurück.

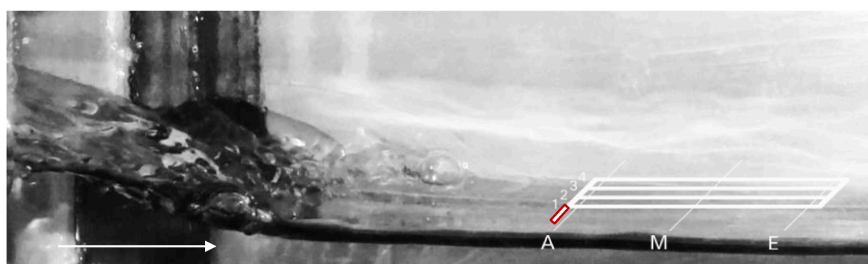


Abbildung 4: Lokale Prozesse im physikalischen Modell (Einlaufbauwerk)

3.2 Auswahl Simulationsverfahren und Modellerstellung

Für die numerische Modellierung der vorliegenden turbulenten Strömungen wurden verschiedene 3D- und 2D-Softwarepakete am IWW getestet. Ausgezeichnete Ergebnisse konnten mit den beiden Softwarepaketen OpenFOAM (3D) und TELEMAC-2D erzielt werden, die im Folgenden vorgestellt werden.

Für die Betrachtung von Details der Strömung, Geschwindigkeitsverteilungen über die Tiefe, sowie Untersuchungen zur Belüftung sind 3D-Modellierungen unabdingbar. Für das OpenFOAM-Modell wird die Geometrie des Kavernensystems nicht vereinfacht und entsprechend der des experimentellen Modells nachgebaut. Das Berechnungsgitter wird als dreidimensionales unregelmäßiges hauptsächlich hexaederisches Netz erstellt. Zugrunde liegende mathematische Gleichungen sind die Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Fluide. Als Diskretisierungsmethode wird die Finite-Volumen-Methode und als statistischer Ansatz für die Darstellung der Turbulenzen das k - ε -Modell verwendet. Für die Berechnung wird der OpenFOAM-Solver *interFoam* genutzt, der speziell für die Berechnung von Zweiphasenströmungen mit inkompressiblen und unvermischbaren Stoffen entwickelt wurde. Der Phasenübergang von Wasser und Luft wird dabei mit Hilfe der Volume-of-Fluid Methode bestimmt (*Plenker, 2012*).

Für die Betrachtung des allgemeinen Ablaufs der Füll- und Leervorgänge sind 2D-Modellverfahren ausreichend. Deren Vorteil ist eine erhebliche Rechenzeiterparnis und eine erhebliche Zeitersparnis bei der Modellerstellung gegenüber der 3D-Modellverfahren. Für den Aufbau des Kavernensystems im 2D-Modell werden Vereinfachungen bezüglich der Geometrie getroffen. Das Berechnungsnetz wird als zweidimensionales unregelmäßiges Dreiecksnetz erstellt. Zugrunde liegende mathematische Gleichungen sind die 2D-Saint-Venant-Gleichungen. Als räumliche Diskretisierung wird die Finite-Elemente-Methode und als zeitliche eine semi-implizite Formulierung angewendet. Als Turbulenzmodell wird ebenfalls das Standard- k - ε -Modell verwendet (*Kreyenschulte, 2013*).

3.3 Aufbau Variantenstudie

Um generelle Aussagen über einen optimalen Aufbau des Modells treffen zu können, wird eine Vielzahl von Varianten u. a. auf ihre Fließgeschwindigkeiten, Wellenhöhen und Dämpfungseigenschaften hin untersucht, da diese entscheidend für die Funktion des Kraftwerks sind (*Pummer, 2013b*). Variiert werden dabei zum einen der Durchfluss, der Füllgrad und die Geometrie. Dabei wird der Schwerpunkt auf den Einfluss der Verteilungskanallänge, der Kanalabstände, der Kanalanzahl und der Kanallänge gelegt. Im Folgenden wird ein Ausschnitt der Ergebnisse für die Geometrievarianten im Naturmaßstab und in offener Bauweise dargestellt. Die allgemeinen Aussagen über festgestellte Trends in den

Auswirkungen geometrischer Variationen auf die Eigenschaften des Speichers sind allerdings für jede geometrische Konfiguration gesondert zu überprüfen.

4 Ergebnisse der numerischen Simulation

4.1 Fließgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Geometrie

Für das Kavernensystem ist eine gleichmäßige und unter geringen Fließgeschwindigkeiten stattfindende Füllung und Leerung anzustreben, um hohe Belastungen durch Schubspannungen an den Wandungen zu vermeiden.

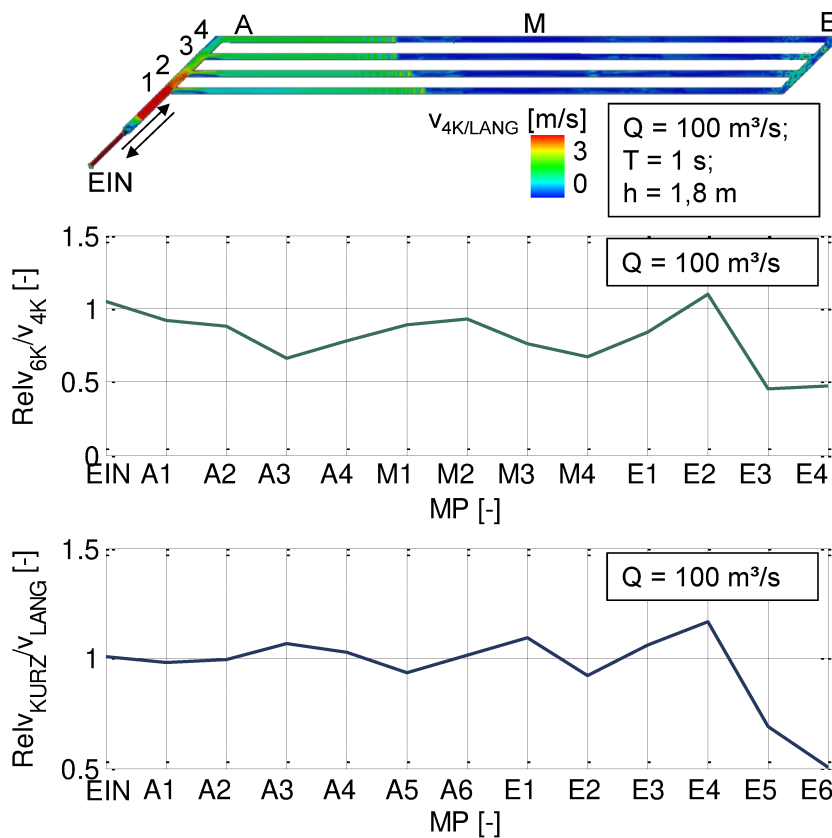


Abbildung 5: Resultierende Fließgeschwindigkeiten (oben) und Vergleich der tiefengemittelten maximalen Fließgeschwindigkeiten der Varianten (Mitte und unten)

Abbildung 5 (oben) zeigt die Fließgeschwindigkeiten während eines Füllvorgangs im System mit vier langen Kanälen ($v_{4K/LANG}$). Die Messpunkte (MP) befinden sich in jedem Kanal am Anfang (A) in der Mitte (M) und am Ende (E) des Systems. Die Fließgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Anzahl der Kanäle ab. Abbildung 5 (Mitte) zeigt die Fließgeschwindigkeit relativ von sechs (v_{6K}) zu vier Kanälen (v_{4K}), wobei sich diese in den Anfangspositionen auf bis zu 70% verringert, in den Endpositionen sogar auf bis zu 50%. Eine

Variation der Verteilungskanallänge verändert die Dauer bis zur Aufteilung und somit bis zur Veränderung der Fließgeschwindigkeit, gleiche Trends sind für den Kanalabstand zu beobachten. Kaum eine Auswirkung ist durch eine Variation der Kanallänge zu beobachten, wie ebenfalls der Vergleich in Abbildung 5 (unten) zeigt, in dem die Fließgeschwindigkeiten relativ von sechs kurzen (v_{KURZ}) zu sechs doppelt so langen Kanälen (v_{LANG}) dargestellt sind (Kreyenschulte, 2013). Lediglich in den hinteren Kanälen ist eine deutliche Verringerung der Geschwindigkeiten von rd. 70% (E5) und rd. 50% (E6) zu erkennen. Dabei muss noch überprüft werden, ab wann eine Grenzlänge erreicht wird, ab der Füll- und Leervorgänge nur noch unter erschwerten Bedingungen stattfinden können.

4.2 Wellenhöhe und Beckenschwingung in Abhängigkeit der Geometrie

Die maximale Höhe der durch das Kanalsystem laufenden Wellen ist ein Maß für die dynamische Belastung der Speicherkonstruktion. Je kleiner die Wellen sind, desto ruhiger erfolgt der Füll- und Leervorgang und desto geringer sind die Druckschwankungen über dem Einlaufbauteil. Im Verteilungs- und Verzweigungsbereich treten die größten Belastungen durch hohe Wellen auf, da die Strömung nach Verlassen der Sammelkanäle hier umgelenkt werden muss. Ein Vergleich der Wasserstände der beiden numerischen Modelle ($h_{\text{MW:NUM}}$) zum Mittelwert der Ergebnisse der experimentellen Modellversuche ($h_{\text{MW:EXP}}$) zeigt Abbildung 6.

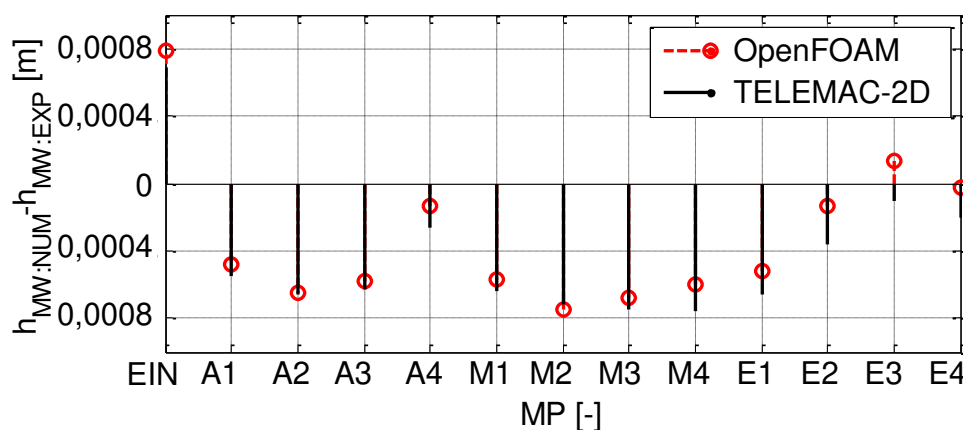


Abbildung 6: Abweichung der mittleren Wasserstände aus TELEMAC-2D und OpenFOAM von den Mittelwerten der Messung, $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{\text{MAX}} = 10 \text{ m}$, (verändert nach Kreyenschulte, 2013)

Für die unterschiedlichen Geometrien sind Trends in den Wellenhöhen erkennbar. Dabei sind ein kurzer Verteilungs- und Verzweigungskanal und ein kleiner Kanalabstand in Bezug auf die Wellenhöhe tendenziell besser geeignet, so wie eine große Kanalanzahl und eine kurze Kanallänge (Paschmann, 2012).

Nach dem Ende der Befüllung ist ein zügiges Abklingen der Beckenschwingung im Hinblick auf die Betriebswechsel eines unterirdischen Pumpspeicherwerks von Vorteil. Die Druckschwankungen durch die Wasserspiegelauslenkungen über dem Einlaufbauteil werden dadurch möglichst gering gehalten. Dabei entsprechen die Trends der Dämpfungseigenschaften denen der Wellenhöhen (*Paschmann*, 2012).

5 Fazit

Für die Simulation der Strömungen in verzweigten Kavernensystemen von Pumpspeicherwerken werden in Abhängigkeit der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland am IWW ergänzend zu experimentellen sowohl numerische 3D- als auch 2D-Modellversuche mit OpenFOAM und TELEMAC-2D durchgeführt. Hierbei stimmen die Simulationsergebnisse zu den Füll- und Leervorgängen mit denen der experimentellen Modellversuche überein. Für eine detaillierte Untersuchung der lokalen Prozesse sind allerdings numerische 3D-Simulationen notwendig. In diesem Paper wird ein Ausschnitt der Ergebnisse zu Fließgeschwindigkeiten, Wellenhöhen und Dämpfungseigenschaften in Abhängigkeit der Geometrie verzweigter Kavernensysteme, dargestellt.

Im Rahmen der gesamten Studie werden die geometrischen Einflussparameter sowie die Wechselwirkungen mit dem anstehenden Material noch weiter untersucht und detailliert die lokalen Strömungsprozesse analysiert. Generelles Ziel sind allgemeingültige Aussagen, nach denen die Kavernen in Zukunft geplant werden können, bevor Detailuntersuchungen für spezielle Kraftwerksvorhaben durchgeführt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Realisierung aus strömungstechnischen Gesichtspunkten zwar zu großen Herausforderungen führt, aber möglich sein sollte, und dass die bisher genutzten numerischen 3D- und 2D-Modellverfahren für die Strömungssimulation geeignet sind.

6 Literatur

- Allen, A. E. (1977): Potential for conventional and underground pumped-storage. In: Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions, Jahrgang: 96, Heft: 3. Harza Engineering Company, Chicago, USA, 1977
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hrsg.) (2010): Pumpspeicherwerke und ihr Beitrag zum Ausbau erneuerbarer Energien - Zentrale Ergebnisse des energiewirtschaftlichen Gutachtens zum Neubauvorhaben Pumpspeicherwerk Atdorf. Studie im Auftrag der Schluchseewerk AG. Berlin, 2010
- Giesecke, J./Monsonyi, E. (2009): Wasserkraftanlagen, Planung, Bau und Betrieb. 5., aktualisierte und erweiterte Auflage. Springer, Heidelberg, 2009
- Kreyenschulte (2013): Hydrodynamisch-numerische Simulation der Strömungsvorgänge in verzweigten Tiefspeichern von Pumpspeicherwerken mit einem tiefengemittelten 2D-Modellverfahren. Masterarbeit, unveröffentlicht. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University, Aachen, 2013
- Leonhard, W. et al. (2008): Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. Studie im Auftrag des Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V (VDE). Frankfurt, 2008
- Paschmann, C. (2012): Hydrodynamische Untersuchungen der Füll- und Entleerungsvorgänge im unterirdischen Tiefspeicher eines Pumpspeicherkraftwerkes anhand eines physikalischen Modellversuches. Diplomarbeit, unveröffentlicht. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University, Aachen, 2012
- Plenker, D. (2012): Numerische Untersuchungen der Füllvorgänge im unterirdischen Tiefspeicher eines Pumpspeicherkraftwerkes mit OpenFOAM. Diplomarbeit, unveröffentlicht. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University, Aachen, 2012
- Popp, M (2010): Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- Pummer, E. et al. (2013a): Hybride Modellierung zur Analyse der Strömungsphänomene in Pumpspeicherwerken mit unterirdischem Tiefspeicher. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft, Jahrgang: 6, Heft: 9, S. 504-508. DWA, Hennef, 2013
- Pummer, E. et al. (2013b): Experimental and Numerical Investigations regarding the Hydraulic Performance of Underground Pump Storage Reservoirs. In: Proceedings of 2013 IAHR Congress. Tsinghua University Press, Peking, China, 2013
- Schüttrumpf, H. (2011): Pumpspeicherkraftwerke – Eine Notwendige Ergänzung zum Ausbau regenerativer Energien. Newsletter interdisziplinäre Foren der RWTH Aachen, Nr.2, Aachen, 2011

Autoren:

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Elena Pummer

Institut für Wasserbau und
Wasserwirtschaft
RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 17
52056 Aachen

Tel.: +49 241 80 25748
Fax: +49 241 80 25750
E-Mail: pummer@iww.rwth-aachen.de

Dipl.-Ing. Catrina Cofalla
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf

Institut für Wasserbau und
Wasserwirtschaft
RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 17
52056 Aachen

Tel.: +49 241 80 25263
Fax: +49 241 80 25750
E-Mail: cofalla@iww.rwth-aachen.de
schuettrumpf@iww.rwth-
aachen.de