



Hydraulische Auslegung und Optimierung des Kavernenspeichers des PSW Forbach

Hannes Blindenhöfer, Wolfgang Richter

Kurzfassung

Im Zuge der Erneuerung und Erweiterung des Rudolf-Fettweis-Werks Forbach beabsichtigt die EnBW AG den Bau und Betrieb des Pumpspeicherkraftwerks (PSW) Forbach – Neue Unterstufe – einem Neubau von Schwarzenbachwerk und Murgwerk in Kavernenbauweise mit ausgebauter Pumpspeicherfunktion. Dabei wird die vorhandene Schwarzenbachtalsperre weiterhin als Oberbecken genutzt. Um die Speicherkapazität des PSW Forbach zu erhöhen muss ein zusätzliches Volumen von ca. 200 000 m³ im Unterwasserbereich bereitgestellt werden. Nicht zuletzt um die ökologischen Auswirkungen möglichst gering zu halten und die Akzeptanz in der Bevölkerung zu erhöhen wurde die Möglichkeit eines untertägigen Kavernenspeichers ausgewählt, um das unterwasserseitige Stauraumvolumen zu erhöhen. Der Kavernenspeicher wurde von der Tractebel Engineering GmbH auf der Grundlage einer 1D-Berechnung und der Erfahrung der Hydraulikingenieure entworfen und dimensioniert. Der Fokus lag hierbei auf der Sicherstellung, dass während des Pumpbetriebs keine Luft in die Pumpturbine eingezogen werden kann. Um ein ausreichendes Nachfließen zu ermöglichen wurden die Fließwiderstände und die Stollenneigungen genauer untersucht und festgelegt.

Die Auslegung des Kavernenspeichers wurde von der TU Graz mittels hydraulischen 1D- und 3D-Berechnungen überprüft und dessen Funktionalität bestätigt. Die hydraulischen Verluste im Unterwasserbereich konnten im Zuge einer Optimierung durch die TU Graz um nahezu 30 % reduziert werden. Außerdem wurde die maximale Wellenbildung im Kavernenspeicher mittels 1D-numerischer Simulationen untersucht und als unbedenklich erachtet.

Die Untersuchungen ergaben auch interessante Fragestellungen für weitere Forschung, um die Wirtschaftlichkeit von Kavernenspeichern zu erhöhen. Auch aus diesem Grund stellt die Abwicklung des PSW Forbach ein Projekt dar, das neben seinen technischen Herausforderungen und Besonderheiten auch ein gutes Beispiel dafür ist, dass aus einer Zusammenarbeit von Forschung und Consulting neue und wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden können.

Abstract (English)

In the course of the renovation and extension of the Rudolf-Fettweis hydropower plant Forbach, EnBW AG intends the construction and operation of the Forbach pumped storage plant (PSP). This includes the reconstruction of the Schwarzenbach and Murg hydro power plants, integrated in a new cavern power plant with extended pump storage capacity. The existing storage of the Schwarzenbach dam as upper reservoir will continue to be used. In order to increase the overall storage capacity of the Forbach PSP an additional volume of approx. 200,000 m³ must be provided in the lower reservoir. For this the option of an underground storage cavern was selected, which has amongst others the benefits of small ecological impacts as well as a good acceptance in the local communities. The underground storage cavern was designed by Tractebel Engineering GmbH on the basis of the experience of the hydraulics engineers and by applying a 1-dimensional flow simulation model. The main emphasis was on avoiding the development of vortices and potential air intrusion during pump operation. To avoid a flow separation, which might promote the development of vortices or air intrusion, the flow resistance and tunnel slopes were studied in detail.

In a subsequent step, the underground storage cavern was checked by the TU Graz in a 1-dimensional as well as a 3-dimensional flow model and its functionality could be confirmed. In an optimization process, the hydraulic head losses at the intake bay within the storage cavern could be reduced by 30%. Furthermore, the development of surge waves during transient scenarios was examined and considered as uncritical with regard to potential choking effects.

In general, interesting questions for further research, e.g. to increase the economic efficiency of underground storage caverns, have arisen in the course of the studies. Thus, the project of the Forbach PSP is a great example how the cooperation of the consulting industry and universities can lead to learning effects that might be valuable for future projects.

1 Einleitung

Das Pumpspeicherkraftwerk (PSW) Forbach wird als Teil der Erneuerung und Erweiterung des zwischen 1914 und 1926 gebauten, Rudolf-Fettweis-Werkes errichtet. Das PSW Forbach stellt ein Konzept dar, wie ein langlebiges Hochdruckwasserkraftwerk mit einem wertvollen Speicher, wie der Schwarzenbachtalsperre, zu einem flexiblen Pumpspeicherkraftwerk aufgerüstet werden kann um den modernen Anforderungen des Stromnetzes und der Energietransformation Rechnung zu tragen.

Hierzu wird der Unterwasserbereich mit einem Kavernenspeicher ausgerüstet werden, welcher zusammen mit dem bereits vorhandenen Ausgleichsbecken Forbach das erforderliche Wasservolumen für den Betrieb des neuen Pumpspeicherkraftwerks bereithalten soll. Durch die Integration von zukünftig drei Turbinen des Murgwerks und einer Pumpturbine des Schwarzenbachwerks in einem gemeinsamen Kavernenkraftwerk kann es durch zeitgleiche Lastfallsituationen zu sehr komplexen Abflussverhältnissen im Kavernenspeicher kommen. Ziel der hydraulischen Dimensionierung des Kavernenspeichers war es trotz dieser Herausforderungen einen ungestörten zeitgleichen (oder auch individuellen) Betrieb von Murgwerk und Schwarzenbachwerk zu gewährleisten, ohne dass es zu Betriebseinschränkungen aufgrund des physikalischen Entwurfs kommt.

2 Das Forbach Projekt und die wichtige Rolle der Pumpspeicherwerke für die Energiewende

Die Energiewende beschreibt den Umbau des Energiesystems auf erneuerbare Stromerzeugung aus Wasser, Wind und Sonnenenergie. Da Wasserkraft für die Primärerzeugung nicht ausreichen wird, sind insbesondere große Ausbauten von Wind und Photovoltaikanlagen notwendig. Da diese jedoch sehr fluktuierende Erzeugungscharakteristiken über die Jahreszeiten aufweisen sind große Energiemengen verlässlich zu speichern und mit großen Leistungen vorzuhalten um eine adäquate Netzfrequenzhaltung garantieren zu können. Die großen Vorteile von Pumpspeicherkraftwerken sind im Wesentlichen:

- Hoher Wirkungsgrad
- Hoher Speicher-Erntefaktor
- Große Leistung
- Lange Lebensdauer
- Geringe Spezifische Kosten
- Geringe Treibhausgas Emissionen

Daraus ergeben sich erhebliche volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Vorteile gegenüber anderen Speichertechnologien. Insbesondere sind auch die ökologischen Auswirkungen von PSW signifikant geringer als beispielsweise für Batterien, wenn die Herstellungsprozesse über den Lebenszyklus mitbetrachtet werden (Immendoerfer, et al. 2017). Auch weisen Pumpspeicherkraftwerken die geringsten Treibhausgasemissionen im Vergleich zu anderen Speichertechnologie für die Stromspeicherung auf (Abdon, et al. 2017).

Die Effizienz des PSW Forbach zeichnet sich insbesondere durch den Ausbau einer seit über 100 Jahren genutzten Energieinfrastruktur aus. Durch den Ausbruch und die Nutzung von Felshohlräumen wird die Speicherkapazität des Ausgleichsbeckens wirtschaftlich und ohne übertägige Beeinträchtigung erweitert. Untertägige Pumpspeicherkraftwerke können auch generell eine wirtschaftliche Speicheroption darstellen. Beispielhaft ist hierbei die untertägige Erweiterung des PSW Nassfeld in Österreich mit 175.000 m³ (Pikl, Richter and Zenz 2019). Umfassend wird das Thema der Untertage PSW von Pickard beschrieben (Pickard 2012).

Abb. 1 zeigt den Speicher-Erntefaktor (Energy stored of energy invested). Dieser beschreibt den Quotienten aus der gespeicherten Energie über die Lebensdauer dividiert durch die Energie welche für dessen Herstellung benötigt wird. Der signifikante Faktor der PSW (pumped storage hydropower) unterstreicht dessen energie-ökonomische Zukunftsfähigkeit.

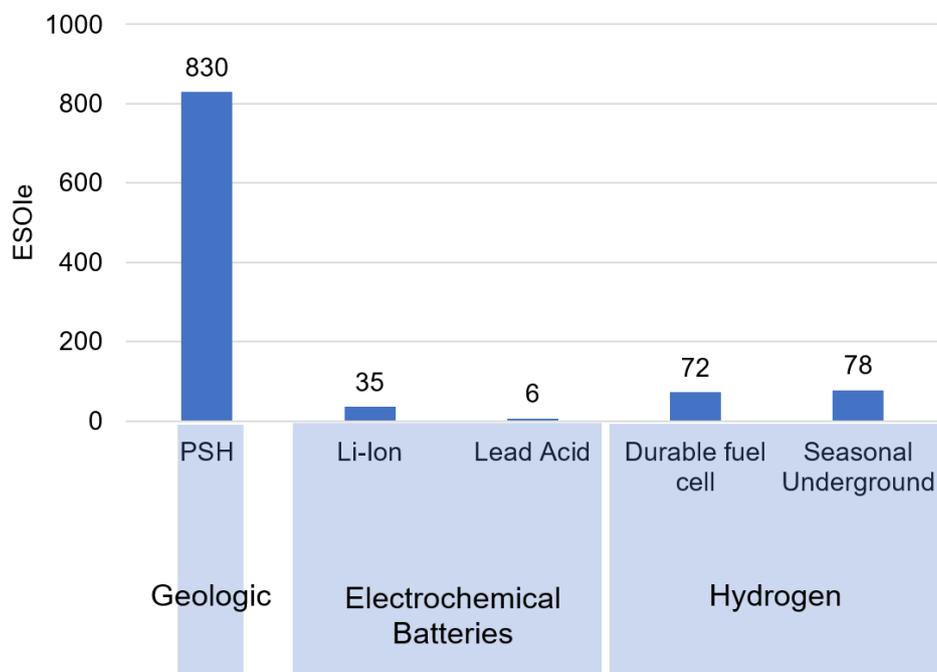


Abb. 1: Speicher-Erntefaktor Technologievergleich (Pellow, et al. 2015), (modifiziert)

Abb. 2 zeigt das Anlagenschema des Kraftwerkssystems Forbach mit den Ausbauoptionen der Oberstufe und der Unterstufe mit dem Kavernenspeicher. Diese Unterstufe des Ausbaus ist Gegenstand der Untersuchungen und der hydraulischen Optimierungen.

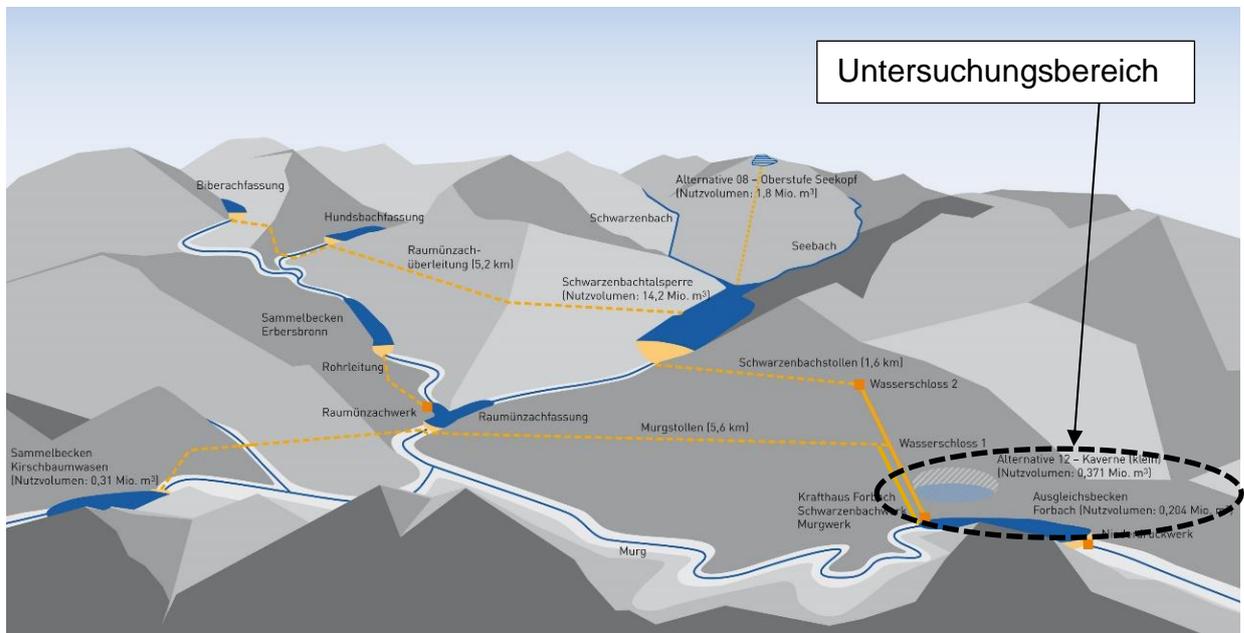


Abb. 2: Übersicht Kraftwerkssystem Forbach mit Ausbautvorhaben

3 Dimensionierung des Kavernenspeichers

Um genügend Stauraum für den zukünftigen Pumpspeicherbetrieb des Schwarzenbachwerks bereit zu stellen soll das bestehende Ausgleichsbecken um einen untertägigen Kavernenspeicher erweitert werden.

Wie in Abb. 3 dargestellt, besteht dieser Kavernenspeicher aus einem Hauptstollen, der das Ausgleichsbecken mit dem Unterwasser (UW)-Druckwasserstollen des Murgwerks sowie des Schwarzenbachwerks verbindet. Entlang des Hauptstollens sind sechs Nebenstollen an den Hauptstollen angeschlossen, die mit ihrem gedrunenen Querschnitt den Großteil des benötigten Stauvolumens zur Verfügung stellen. Für den Anschluss des Hauptstollens an die Unterwasser-Druckstollen wird eine Kopfkaverne ausgebrochen.

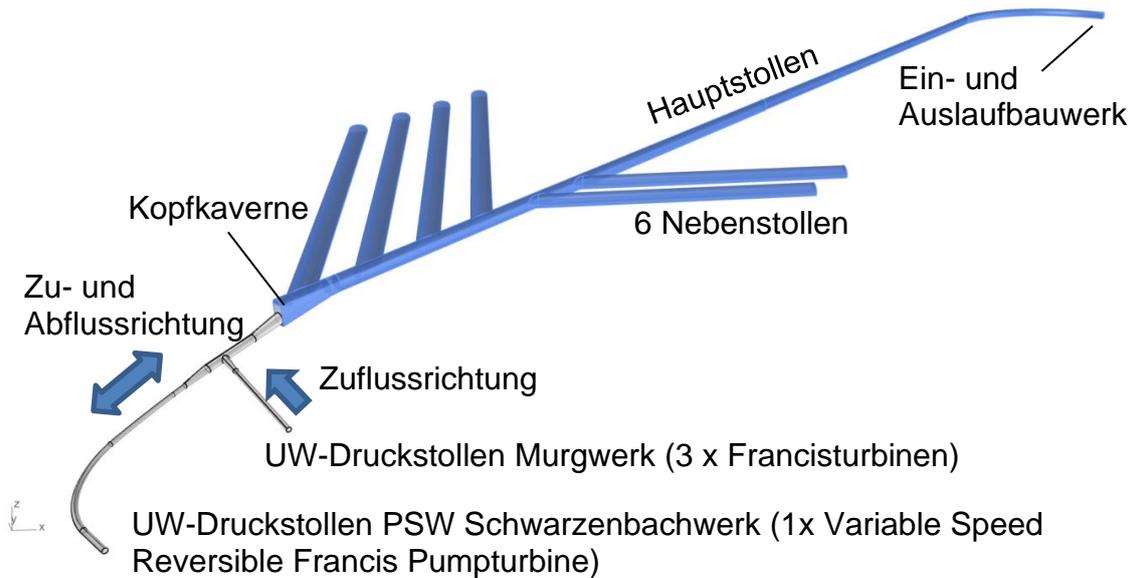


Abb. 3: Gesamtgeometrie Kavernenspeicher

Der Entwurf und die Dimensionierung des Kavernenspeichers berücksichtigen neben der grundsätzlich benötigten Bereitstellung des Speichervolumens, auch (i) die Bemessung der Querschnitte und Sohlagen, (ii) die Bemessung der Totraumgräben in den Nebenstollen, (iii) die Bemessung der Ein- bzw. Auslaufdiffusoren der UW-Stollen, sowie (iv) die Sicherstellung einer ausreichenden Einlaufüberdeckung am Einlauf- bzw. Auslaufbauwerk zum UW-Stollen des Schwarzenbachwerks in der Kopfkaverne.

Die erforderlichen Sohlbreiten und Sohlagen wurden so ausgewählt, um ein Abreißen des Zuflusses bei dem Entwurfsabfluss (aufgrund ungünstiger hydraulischer Radien) unter allen Umständen zu vermeiden, da dies sonst zu Betriebseinschränkungen führen könnte. Auch die Totraumgräben in den Nebenstollen werden bereitgestellt, um den hydraulischen Radius bei niedrigen Wasserständen hoch zu halten, um somit ein ausreichendes Nachfließen sicherzustellen.

Der Auslaufdiffusor des Murgwerks wurde mit einem inneren Öffnungswinkel von 8° und einer großen Fläche am Ende des Diffusors vordimensioniert, um Strömungsablösungen zu vermeiden und geringe Fließgeschwindigkeiten zu erreichen. Damit können die hydraulischen Verluste gering gehalten und die potentielle Wirbelbildung in der Kopfkaverne während simultanem Betrieb des Murgwerks und des Schwarzenbachwerks minimiert werden.

Die Bereitstellung einer ausreichenden Einlaufüberdeckung soll sicherstellen, dass es während des Pumpbetriebs des Pumpspeicherkraftwerks nicht zu einer Wirbelbildung mit Lufteinzug oberhalb des UW-Stollens des Murgwerks kommt. Die benötigte Einlaufüberdeckung wurde mit der empirischen Formel nach

Gordon (Gordon 1970) ermittelt, jedoch um eine nicht unerhebliche Sicherheit erhöht um der Drallwirkung, die durch den seitlichen Zufluss des Murgwerks entstehen kann und die Wirbelbildungs- bzw. Lufteintragungsgefahr erhöhen könnte, Rechnung zu tragen.

Der auf diese Weise vordimensionierte Kavernenspeicher wurde von der TU Graz mit 1D- sowie 3D-numerischen Strömungssimulationen geprüft und bestätigt. Hierbei wurde auch das Zuschlagen der Kaverne aufgrund von auftretenden Schwall- und Sunkwellen bei zyklischen Schaltvorgängen untersucht und ausgeschlossen. Damit wird einerseits die druckstoß-reflektierende Wirkung der Kopfkaverne beibehalten und andererseits ein Ausblasen von komprimierter Luft vermieden.

4 Optimierungen des Kavernenspeichers durch numerische Simulationen

Der Kavernenspeicher wurde mittels 3D-numerischer Simulationen mit Ansys CFX bezüglich der lokalen Einlaufverluste der Stollenanschlüsse untersucht. Es wurden hierbei Variantenstudien durchgeführt um den hydraulisch günstigsten Anschluss zu erhalten.

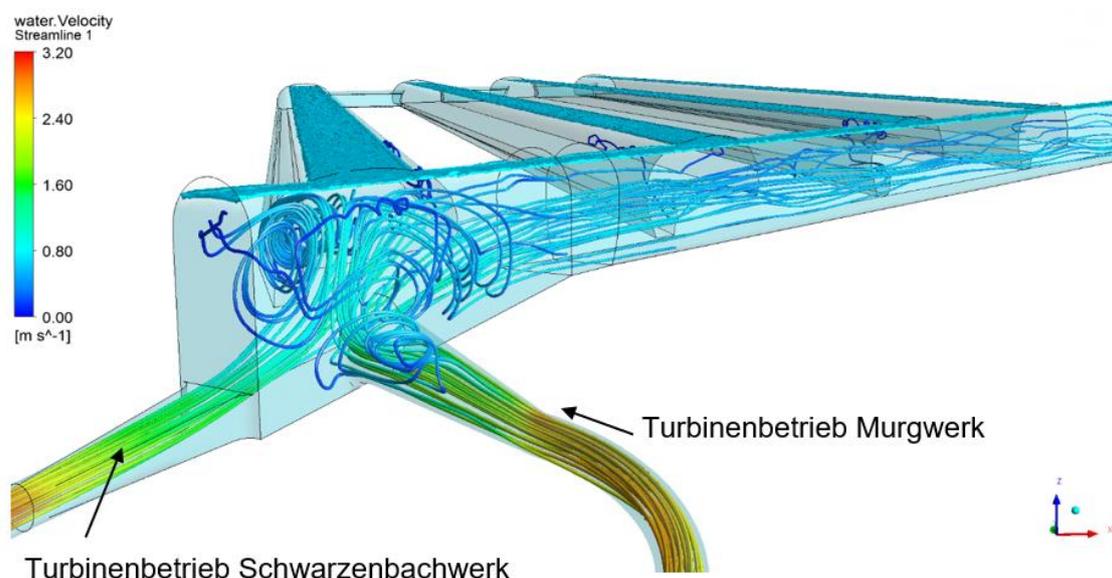


Abb. 4: 3D CFD Turbinenzufluss in die Kopfkaverne des Kavernenspeichers

Abb. 5 zeigt die untersuchten Geometrievarianten für den Kavernenanschluss. Es wurde hierbei die Stollengeometrie sowie die Geometrie der Kopfkaverne modifiziert. Als hydraulisch beste Lösung hat sich Variante 8) mit einem Bifurkator im Stollen gezeigt. Hierbei kann effizient der hydraulische Kurzschluss zwischen

dem Murgwerk und dem Schwarzenbachwerk sowie die Zustände im Turbinenbetrieb und Pumpbetrieb des Schwarzenbachwerks betrieben werden.

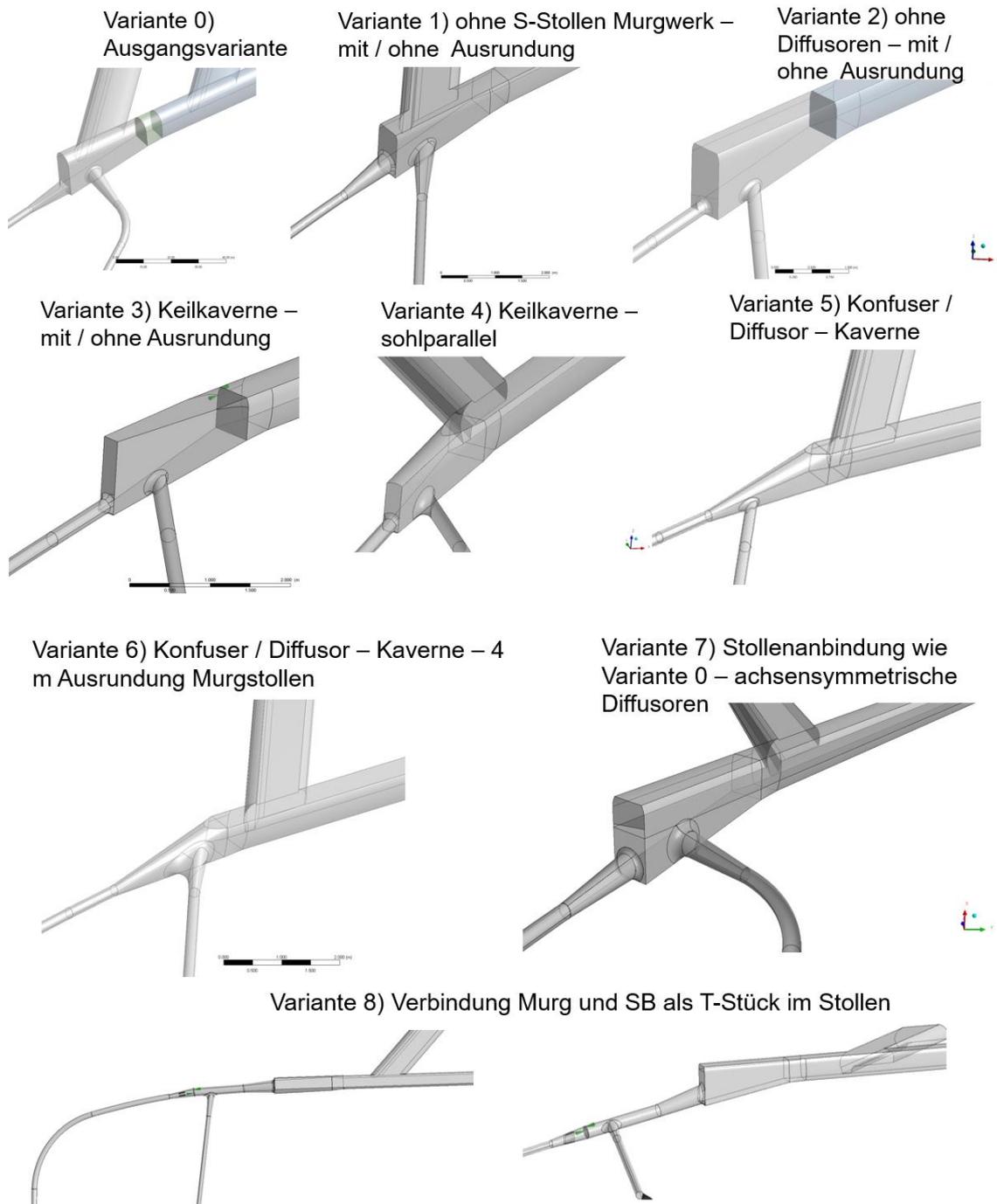


Abb. 5: Variantenstudie – Geometrievergleiche für Kavernenanschluss, Variante 8) Ausführungsvorschlag

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Pumpspeicherkraftwerke sind aufgrund ihrer hohen Energiespeichereffizienz, der langen Lebensdauer und der hohen Flexibilität ideale Speicher- und Ausgleichskraftwerke für den Umbau des Energiesystems auf volatile erneuerbare Primärenergiequellen wie Sonnen- und Windkraft. Das Projekt PSW Forbach stellt ein Upgrade eines bestehenden Wasserkraftwerks mit großem Speichersee auf ein flexibles Pumpspeicherkraftwerk mit der Integration eines zweiten Hochdruckwasserkraftwerks dar. Die hierfür notwendige Erweiterung des Unterwasser-Speichers wird mittels eines aufzufahrenden Kavernenspeichers bewerkstelligt. Dadurch befinden sich alle relevanten und neu zu bauenden Bauwerke vollkommen untertägig. Der Kavernenspeicher wurde für den flexiblen hydraulischen Betrieb, inkl. dem hydraulischen Kurzschlussbetrieb entworfen und durch die Anwendung von 3-dimensionaler numerischer Modellierung optimiert.

Aufgrund der Untersuchungen an der Speicherkaverne von Forbach werden von der TU Graz inzwischen verstärkt Forschungsaktivitäten für die Entwicklung von vollständigen Untertage PSW und der optimalen Nutzung und Auslegung von Kavernenspeichern durchgeführt.

Durch die Nutzung von Felsholräumen, und den sich daraus ergebenden Freiheitsgraden, bieten Kavernenspeicher eine ideale Möglichkeit Pumpspeicherkraftwerke zu erweitern bzw. neu zu bauen.

Referenzen

- Abdon, A., X. Zhang, D. Parra, M. K. Patel, Ch. Bauer, und J. Worlitschek. 2017. «Techno-economic and environmental assessment of stationary electricity storage technologies for different time scales.» *Energy* 1173 - 1187.
- Gordon, J.L. 1970. «Vortices at Intakes.» *Water Power Journal* 137-138.
- Immendoerfer, A., I. Tietze, H. Hottenroth, und T. Viere. 2017. «Life-cycle impacts of pumped hydropower storage and battery storage.» *Int J Energy Environ Eng* 231–245.
- Pellow, M. A., Ch. J.M. Emmott, Ch. J. Barnhart, und S.J. Benson. 2015. «Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis.» *Energy Environ. Sci.*, 8: 1938--1952.
- Pickard, W. F. 2012. «The History, Present State, and Future Prospects of Underground Pumped Hydro for Massive Energy Storage.» *Proceedings of the IEEE*, DOI: 10.1109/JPROC.2011.2126030 100 (2): 473 - 483.
- Pikl, F.G., W. Richter, und G. Zenz. 2019. «Großtechnische, wirtschaftliche und effiziente untertägige Energiespeicher; Large-scale, economic and efficient underground energy storage.» *Geomechanics and Tunneling*, DOI: 10.1002/geot.201900007 12 (3): 251-269.

Adressen der Autoren

Hannes Blindenhöfer (korrespondierender Autor)

Tractebel Engineering GmbH

Friedberger Strasse 173, 61118 Bad Vilbel

Email: hannes.blindenhoefer@tractebel.engie.com

Wolfgang Richter

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz

AT-8010 Graz, Stremayrgasse 10/2

Email: wolfgang.richter@tugraz.at