

Versuchsanstalt für Wasserbau
Hydrologie und Glaziologie
der Eidgenössischen
Technischen Hochschule Zürich

Mitteilungen

262

Wasserbau-Symposium 2021

Wasserbau in Zeiten von Energiewende,
Gewässerschutz und Klimawandel

15. - 17. September 2021 in Zürich

Band 1

Zürich, 2021



Herausgeber: Prof. Dr. Robert Boes

ETH zürich



Wasserbau-Symposium 2021

**Wasserbau in Zeiten von Energiewende,
Gewässerschutz und Klimawandel**

15. - 17. September 2021 in Zürich

Band 1

**Strategie und Innovation in der Wasserkraft
Gewässerschutz als Herausforderung für die Wasserkraft
Naturgefahren**

Veranstalterin:

ETH zürich

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie
und Glaziologie, ETH Zürich

In Zusammenarbeit mit:



Lehrstuhl und Versuchsanstalt für
Wasserbau und Wasserwirtschaft,
Technische Universität München



Institut für Wasserbau und
Wasserwirtschaft,
Technische Universität Graz

Organisation:

Prof. Dr. Robert Boes

Yannick Marschall

Pia Steinbak

Dr. David Vetsch

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie
und Glaziologie, ETH Zürich

Im Eigenverlag der
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie
ETH Zürich
CH-8093 Zürich

Tel.: +41 - 44 - 632 40 91
Fax: +41 - 44 - 632 40 92
e-mail: info@vaw.baug.ethz.ch

Zürich, 2021

ISSN 0374-0056

DOI 10.3929/ethz-b-000499751



Hydraulische Energiespeicherung untertage: effizient, vielseitig, innovativ

*Underground Pumped-Storage Hydropower:
future-proof, versatile, innovative*

Franz Georg Piki, Wolfgang Richter, Gerald Zenz

Kurzfassung

Pumpspeicherkraftwerke sind das robuste Nonplusultra für ausgeglichene und stabile elektrische Energiesysteme, denn diese führen nicht nur im großen Stil Lastverschiebungen durch und regeln kurzfristige Schwankungen im elektrischen Netz aus, sondern sorgen auch für die immer wichtigere Netzstützung durch große träge Massen und große Lastgradienten. Gerade in Zeiten des fundamentalen energetischen Systemumbaus und des globalen Klimaschutzes sind konkrete Neubauprojekte aus lokalen ökologischen Gründen immer schwieriger realisierbar. Mangelnde topographische Voraussetzungen schließen eine Errichtung von konventionellen Pumpspeicherkraftwerken außerdem meist vollkommen aus.

Unterirdische Pumpspeicherkraftwerke werden zum vielversprechenden Ansatz für die Bewältigung verschiedenster Herausforderungen des notwendigen Energieumbaus für ein klima- und umweltfreundliches Zeitalter. Sie ermöglichen zudem von natürlichen Randbedingungen zumeist unabhängige, flexibel adaptierbare Kraftwerksanlagen und garantieren maximale Umweltverträglichkeit über den gesamten Lebenszyklus bei nahezu unlimitiertem Ausbaupotenzial. Darüber hinaus ist die langlebige untertägige Bauausführung Grundlage für die neu entwickelte, multifunktionale Energiespeicherung in thermischen Pumpspeicherkraftwerken zur zusätzlichen saisonalen Wärme- und/oder Kältespeicherung. Eine weitere innovative technologische Evolution sind unterirdische Meerwasser-Pumpspeicherkraftwerke, die integrativ mit einer Meerwasserentsalzungsanlage kombiniert werden.

Abstract

Pumped-storage hydropower is the efficient and most mature grid-scale energy storage for balanced and stable electrical energy systems. Underground pumped hydro is becoming a promising concept to address various challenges and enabling completely new, multifunctional plant concepts regardless topography and geographical limits. Thermal pumped-storage hydropower as combined electric

and thermal energy storage is the innovative technological evolution for a holistic and resource-efficient, renewable energy supply.

Another pioneering and future-proof technological innovation are underground seawater pumped-storage plants that are synergistically combined with a seawater desalination plant.

1 Einleitung

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts sind Pumpspeicherkraftwerke (PSKW) unabdingbares und systemrelevantes Rückgrat des elektrischen Energiesystems. Aufbauend auf dem technisch bewährten Prinzip der hydroelektrischen Speichertechnologie werden PSKW durch einen interdisziplinären Entwicklungsprozess seit jeher an die Bedürfnisse der Elektrizitätswirtschaft angepasst, wodurch sie mit hochflexiblen Betriebsweisen auch den Anforderungen einer zusehends erneuerbar basierten, volatilen Energieversorgung gerecht werden. Mit der notwendigen Ökologisierung und Dekarbonisierung des Energiesystems, der Industrie und des Verkehrs steigt zudem massiv der Bedarf an jederzeit abrufbarer, effizient gespeicherter Energie und Leistung, unabhängig von der temporär entkoppelten Primärenergieerzeugung unerschöpflicher aber intermittierender Energieträger.

Zuverlässige Energiespeicher sind auch am thermischen Sektor für eine klima- und umweltgerechte Energieversorgung von zentraler Bedeutung. Unter anderem sind großtechnische saisonale Wärmespeicher die forcierte Technologie für eine versorgungssichere und bedarfsgerechte Bereitstellung von erneuerbarer Fernwärme für urbane Gebiete und Städte. Hocheffizient ist dabei die seit Jahrzehnten großtechnisch eingesetzte Heißwasser-Wärmespeicherung in unausgekleideten Felskavernen mit saisonalen Wirkungsgraden von über 90% (Åsberg, 2011).

Zwei Energiespeichertechnologien, ein gemeinsamer Energieträger: Es liegt auf der Hand, die Vorteile beider etablierter hydraulischer Energiespeichersysteme durch die energetische Hybridnutzung des Wassers in sogenannten thermischen PSKW zu vereinen (Pikl, 2017). Zusammen mit physikalischer Vernetzung von elektrischer und thermischer Energieinfrastruktur erlaubt diese technologische Errungenschaft die effiziente und sektorenübergreifende Kopplung erneuerbarer Primärenergieerzeuger mit diversen Energiekonsumenten zur nachhaltigen und gesamtintegrativen Energieversorgung.

2 Untertägige Pumpspeicherkraftwerke

Bereits für die ersten Hochkulturen der Menschheitsgeschichte waren insbesondere zur Trinkwasserversorgung errichtete Untertagebauwerke unverzichtbare

Grundlage für langfristigen Wohlstand, Wachstum und sozialen Frieden (Garbrecht, 1995). Die beständigen und robusten, bei stabilen Untergrundverhältnissen jedenfalls bis zur nächsten Gebirgsfaltung dauerhaften Bauwerke, weisen zudem technische Lebensdauern auf, die oftmals die Nutzungsdauern übersteigen.

Der zentrale Eckpfeiler der entwickelten Energiespeicherkombination ist die vollkommen unterirdische Errichtung von PSKW mit geschlossenem Wasserkreislauf. Die Unabhängigkeit gegenüber topographischen und geographischen Gegebenheiten ermöglicht nicht nur die standortvariable Errichtung in zuvor erkundeten, geeigneten geologischen Bereichen von Tallagen bzw. in der peripheren Umgebung von Ballungsräumen und Städten, sondern erleichtert auch die Erschließung und die Logistik für Bau und Betrieb. Die Nähe zu bestehenden Energienetzen erleichtert die wirtschaftliche Anbindung an das Energiesystem, wobei unter Umständen eine direkte Integration ins Niederspannungsnetz eine Option darstellt.

Durch die unmittelbare übereinanderliegende Anordnung der Speicherkavernen ermöglicht ein kurzes, primär auf den Druckschacht als direkte vertikale Verbindung reduziertes Triebwassersystem eine sehr kompakte Ausführung (Pikl, 2017). Mit der Realisierung von sehr großen und von natürlichen Gegebenheiten unabhängigen Fallhöhen können auszubrechende Speichervolumina einerseits und die Dimensionen der Triebwasserführung und der Maschinen andererseits für festgelegte Energiemengen bzw. installierte Kraftwerksleistungen signifikant reduziert werden. Dadurch werden Investitionen und die Wirtschaftlichkeit eines Projekts direkt optimierbar. Die optionale mehrstufige Ausführung ermöglicht die Skalierbarkeit von PSKW in die Tiefe, so dass mit der seriellen Stufenteilung, neben der üblichen Parallelschaltung von Maschinensätzen in den Kraftstationen, auch erhöhte flexible Betriebsweisen der Gesamtanlage einhergehen.

Außerdem wird maximale Umwelt- und Naturverträglichkeit über den gesamten Lebenszyklus gewährleistet. Naturlandschaften bleiben unberührt, mit dem künstlich geschaffenen Wasserkörper wird weder in den natürlichen Wasserhaushalt sowohl von Grund- als auch Oberflächenwässern eingegriffen, noch spielen Schwall- und Sunkerscheinungen als gewässerökologische Einwirkungen eine Rolle. Der geschlossene, von natürlichen Gewässern und der obertägigen Biosphäre entkoppelte unterirdische Wasserkreislauf schließt den Sedimenteintrag, Verlandungen und Verdunstungsverluste grundsätzlich aus und sichert gleichbleibendes Wasservolumen, sowie uneingeschränkten Betrieb über die gesamte Lebensdauer. Der Kraftwerksbetrieb ist außerdem frei von Emissionen jeglicher Art. Nachteilig ist lediglich die eingeschränkte freizeitliche touristische Nutzbarkeit, die viele große Talsperren in den Alpen auszeichnet.

3 Thermische Pumpspeicherkraftwerke

Basierend auf der unterirdischen Errichtung werden die energetisch dual genutzten PSKW (Abb. 1) technisch an die bis zu 90 °C heißen Wassertemperaturen und dadurch bedingten thermischen bzw. mechanischen Beanspruchungen adaptiert (Pikl, 2017; Pikl *et al.*, 2017). Das hohe Temperaturniveau wird mit der Vernetzung von verschiedenen Wärmequellen und der effizienten Wärmepumpentechnologie über Fernwärmeübertragungsleitungen erreicht. Das Ein- und Ausspeichern der Wärme in den vom Fernwärmenetz unabhängigen Wasserkörper des PSKW erfolgt mit Wärmetauschern bzw. Sekundärsystemen, was eine effiziente Integration von Power-to-Heat zur Sektorkopplung ermöglicht. Das umgebende Gebirge der heißwasserbeaufschlagten Bauwerke ist nicht nur natürliche Wärmedämmung und schützt vor äußeren Einflüssen, sondern ist auch zusätzliche wärmespeichernde Masse. Darüber hinaus garantiert der Luftdruckausgleichsschacht konstanten Luftdruck im Speicherkavernensystem unabhängig von den Staupegeln, und verhindert Wärme- und Verdunstungsverluste an die Umwelt (Pikl, 2017). Der Luftstrom ausgleichender Luftmassen kann überdies mit einer bidirektional anströmbaren Luftturbine energetisch genutzt werden.

Untertägige Heißwasser-PSKW mit geschlossenem Wasserkreislauf ermöglichen zudem die thermische Nutzbarmachung von hydraulischen Strömungsverlusten des Kraftwerkbetriebs (Pikl *et al.*, 2019a). Die größtenteils in Wärme übergehenden Reibungsverluste werden ohne weitere Betriebs-einrichtungen zur direkt verwertbaren thermischen Energie, wodurch der Gesamtwirkungsgrad des Heißwasser-Pumpspeichers auf über 98% in Bezug auf die elektrische Eingangsenergie gesteigert werden kann. Darüber hinaus bietet die jederzeitige Erweiterbarkeit von Speichervolumen bzw. die mögliche asymmetrische Größenauslegung der Speicherkavernen oder ein Leistungszubau zusätzliche Flexibilisierungsoptionen, um das kombinierte Speichersystem sich verändernden Versorgungsanforderungen oder (energie-) wirtschaftlichen Randbedingungen anzupassen.

Die Wärmespeicherung kann nicht nur im Wasserkörper und in den umgebenden Gebirgsbereichen der Speicherkavernen erfolgen, sondern auch im verbleibenden Hohlraumvolumen des Speicherkavernensystems (Pikl *et al.*, 2019a). Bereits hochtemperiertes Wasser wird dazu aus dem Pumpspeichersystem entnommen, um daraus mit energieeffizienten Technologien, insbesondere Hochtemperatur-Wärmepumpen, Wasserdampf zu erzeugen, der anschließend im luftgefüllten Hohlraumvolumen über dem freien Wasserspiegel der unterirdischen Speicherbauwerke, unabhängig von den anderen Energiespeichermöglichkeiten, vorgehalten wird.

Aufgrund des energieintensiven Phasenüberganges können beträchtliche zusätzliche thermische Energiemengen in der Gasphase gespeichert werden, die über einen geschlossenen Kreislauf sowohl für Industrieprozesse und das regenerative Beheizen von Gewächshäusern zur lokalen, jahreszeitlich unabhängigen Nahrungsmittelproduktion eingesetzt werden können.

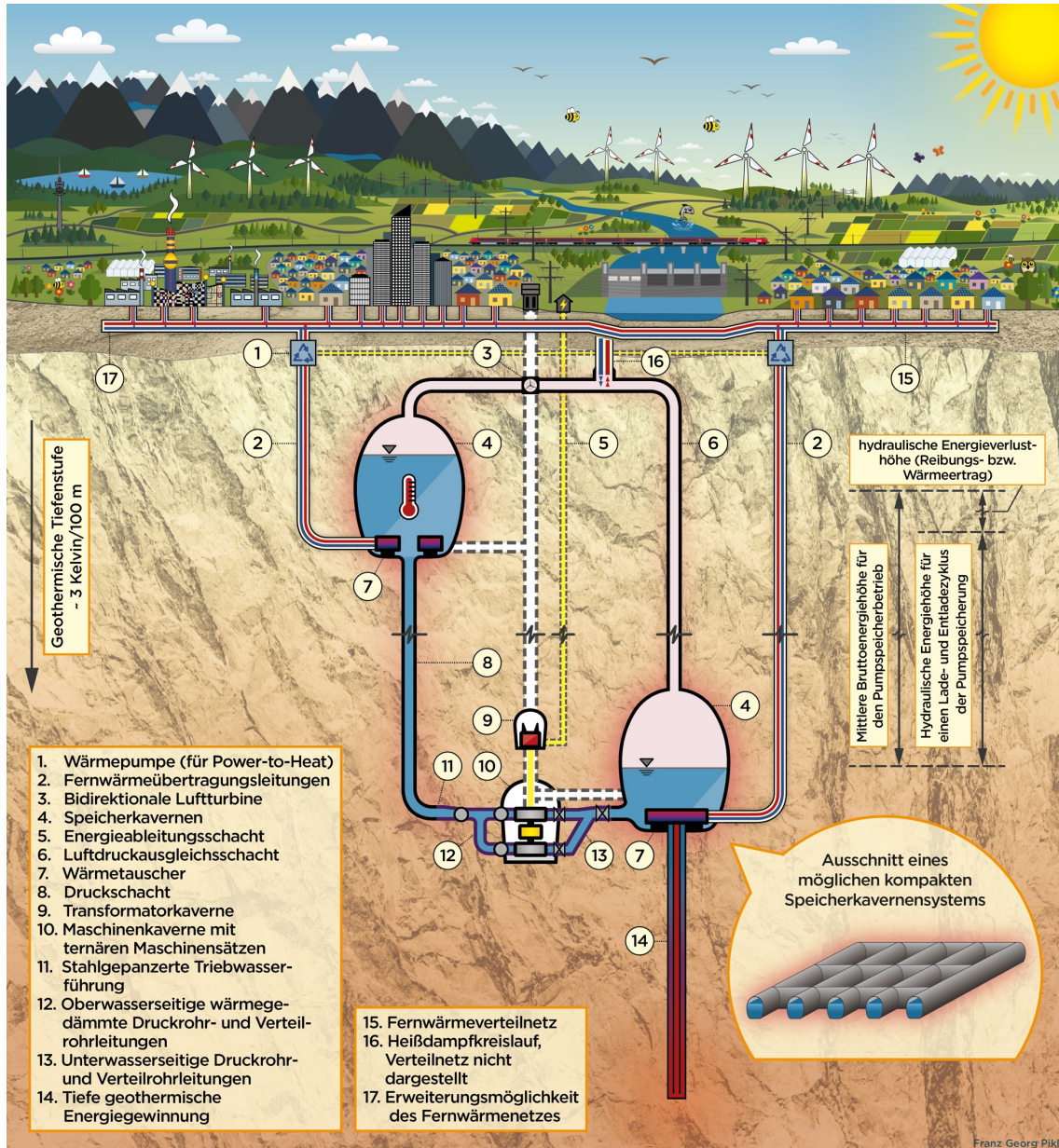


Abb. 1: Vision eines großtechnischen thermischen PSKW zur universellen und effizienten Energieversorgung ganzer Städte und deren peripheren Umgebung

4 Unterirdische Meerwasser-Pumpspeicherkraftwerke

Konventionelle Meerwasser-PSKW, die sich dem Meer als unterem Reservoir bedienen, sind vermehrt projektierte Alternative zu herkömmlichen Süßwasser-

Pumpspeichern, deren Errichtung ist jedoch vom Relief der Erdkruste küstennaher Gegenden abhängig. Bildet umgekehrt der Ozean das natürliche Oberbecken und tiefliegende Speicherkavernen das künstlich geschaffene Unterbecken, können nicht nur die genannten Potenziale der unterirdischen Bauweise genutzt werden, sondern leistungsstarke PSKW in unmittelbarer Nähe von Küstenmetropolen und großen Verbrauchern realisiert werden (Abb. 2). Wohlstandssichernde und elementare Lebensgrundlage ist neben der zuverlässigen Energieversorgung auch die ständige Verfügbarkeit ausreichenden und sauberen Trinkwassers. In bevölkerungsreichen, aber wasserarmen Küstenregionen wird die essenzielle Wasserversorgung oftmals durch Meerwasserentsalzungsanlagen ergänzt. Die bedeutendste der allesamt energieintensiven Entsalzungsverfahren ist die Umkehrosmose, wo Meerwasser unter hohem Druck durch semipermeable Membranen gepresst wird.

Beide Schlüsseltechnologien der Energiespeicherung und der Meerwasserentsalzung können effektiv und ressourcenschonend in unterirdischen Meerwasser-PSKW zusammengeführt werden. Für die Umkehrosmose wird der erforderliche Druck dabei nicht klassisch mit Hochdruckpumpen erzeugt, sondern über den hybrid genutzten Druckschacht des Meerwasser-PSKW und den in entsprechenden Tiefenlagen anstehenden, immer verfügbaren hydraulischen Druck. Die Vorbehandlung des Meerwassers erfolgt größen- und konzeptabhängig entweder noch an der Oberfläche oder direkt vor der Entsalzungsanlage. Der nach dem Entsalzungsprozess anstehende Restdruck befördert das saubere Wasser in eigens dafür vorgesehene Kavernen zur temporären Zwischenspeicherung. Die verbleibende geodätische Höhendifferenz zu den Verbrauchern wird mit Pumpen überbrückt, wobei das Hochpumpen direkt in den Speicherbetrieb des Pumpspeichersystems integriert wird, oder die erforderliche Energie von jenem bezogen wird. Die zusätzliche Errichtung oberer Speicher(-kavernen) ermöglicht außerdem die Realisierung eines vollständig vom Meerwasser-PSKW unabhängigen Süßwasser-Pumpspeichersystems. Darüber hinaus erfolgt die Rückführung der abgeschiedenen Sole in das Meer in sehr verdünnter Form, nachdem diese dem Druckschacht des Meerwasser-PSKW während dem Pumpbetrieb zugegeben wird. Dadurch werden ökologische Auswirkungen auf die marine Flora und Fauna nachhaltig reduziert.

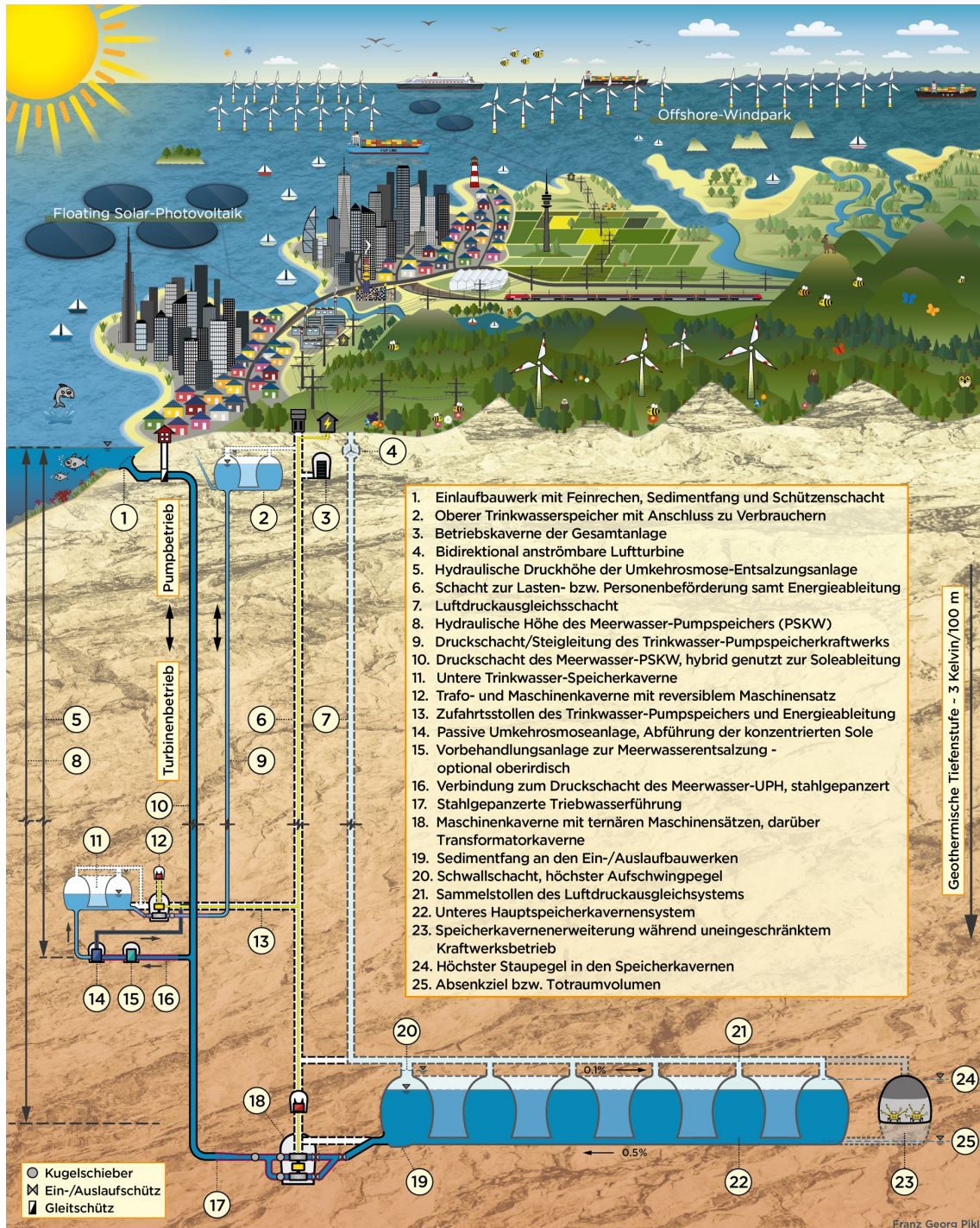


Abb. 2: Unterirdisches Meerwasser-PSKW, synergetisch kombiniert mit einer energie-effizienten passiven Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage

5 Wirtschaftlichkeit unterirdischer Pumpspeicherkraftwerke

Ressourceneffiziente PSKW weisen bei hochwertiger Auslegung, regelmäßiger Wartung und konsequenten Instandhaltungsmaßnahmen technisch unbegrenzte Lebensdauern auf. Sie sind zuverlässige Vermögenswerte eines sich stets wan-

delnden, anspruchsvollen Energiesystems mit steigendem Energiebedarf. Untersuchungen zeigen, dass vollständig unter Tage errichtete PSKW nicht nur sehr kosteneffizient realisiert werden können, sondern zumeist auch wirtschaftlicher sind als neue, konventionelle PSKW mit oberirdischen Speichern (Pikl *et al.*, 2019a; Pikl und Richter, 2019b; Chas. T. Main, 1982; Willett, 1981) (Abb. 3). Ausschlaggebend dafür ist, dass durch adaptierbare und große hydraulische Höhen gezielt wirtschaftlich maßgeschneiderte Anlagenkonzepte für vorgegebene Investitionsvolumina ausgearbeitet werden können. Eine besonders ökonomische Möglichkeit bietet zudem die Erweiterung von bestehenden, oberirdischen Speichern durch tiefliegende Speicherkavernen, um eine signifikante Erhöhung des Energieinhalts herbeizuführen und dabei ähnlich den unterirdischen Meerwasser-PSKW bereits vorhandene Speicherpotenziale nachhaltig zu erschließen (Abb. 3).

Thermische Pumpspeicherkraftwerke erfahren durch die gekoppelte saisonale thermische Energiespeicherung bei nahezu unverändertem Ressourcenverbrauch gegenüber konventionellen PSKW einen bedeutenden gesamtökonomischen Wertzuwachs, nicht zuletzt durch die signifikante Steigerung der spezifischen Energiedichte. In weiterer Folge können die spezifischen Investitionskosten für unterirdische Heißwasser-Pumpspeicher deutlich gesenkt werden (Abb. 3).

6 Zusammenfassung

Wertbeständige unterirdische Pumpspeicherkraftwerke sind die wirtschaftliche, umwelt- wie klimafreundliche und langlebige Weiterentwicklung einer seit über 110 Jahren technisch notwendigen, erprobten und verfügbaren Technologie zur großtechnischen Speicherung elektrischer Energie und sicheren Strom-netzstabilisierung. Mit der Standortflexibilität und der Wahl von geologisch geeigneten Gebieten, der auf wirtschaftliche Forderungen abstimmbaren großen hydraulischen Höhen und gleichzeitig reduzierten Speichervolumina sowie der jederzeitigen und einfachen Skalierbarkeit von Kraftwerksleistung und Energiespeichervermögen ergeben zusammen mit betrieblichen Vorteilen bis dato noch nicht da gewesene Flexibilisierungsmöglichkeiten von Pumpspeicherkraftwerken.

Die gesamtsystematische und interdisziplinäre Vereinigung von ausgereiften technologischen Anwendungen ermöglicht darüber hinaus Synergien und die Erschließung neuer ökonomischer Potenziale. Die innovativen, multifunktionalen unterirdischen Pumpspeicherkraftwerke stehen für eine neue und zukunftssichere Generation von Energiespeichern, die nicht auf Einzellösungen fundieren, sondern das Gesamtsystem sektorenübergreifend verflechten und eine langfristige Gesamtlösung zur Versorgung mit lebensbestimmenden Ressourcen bieten.

So kann über ein ausgefeiltes Zusammenspiel bewährter Technologien in thermischen Pumpspeicherkraftwerken regenerative Energien für verschiedenste Anwendungszwecke höchst effizient aus einem vereinten hydraulischen Energiespeichersystem zur Verfügung stellen. Damit wird einerseits wertvolle regenerative Primärenergie energieeffizient und ressourcenschonend durch Synergieeffekte, wie zum Beispiel dem Wärmeertrag aus den hydraulischen Reibungsverlusten, nutzbar. Andererseits kann damit die unabdingbare ökologische Transformation des Energiesystems leistbar, ressourcenschonend und rasch erfolgen - bei gleichzeitigem Schutz und Erhalt von ursprünglichen Landschaften und Naturräumen.

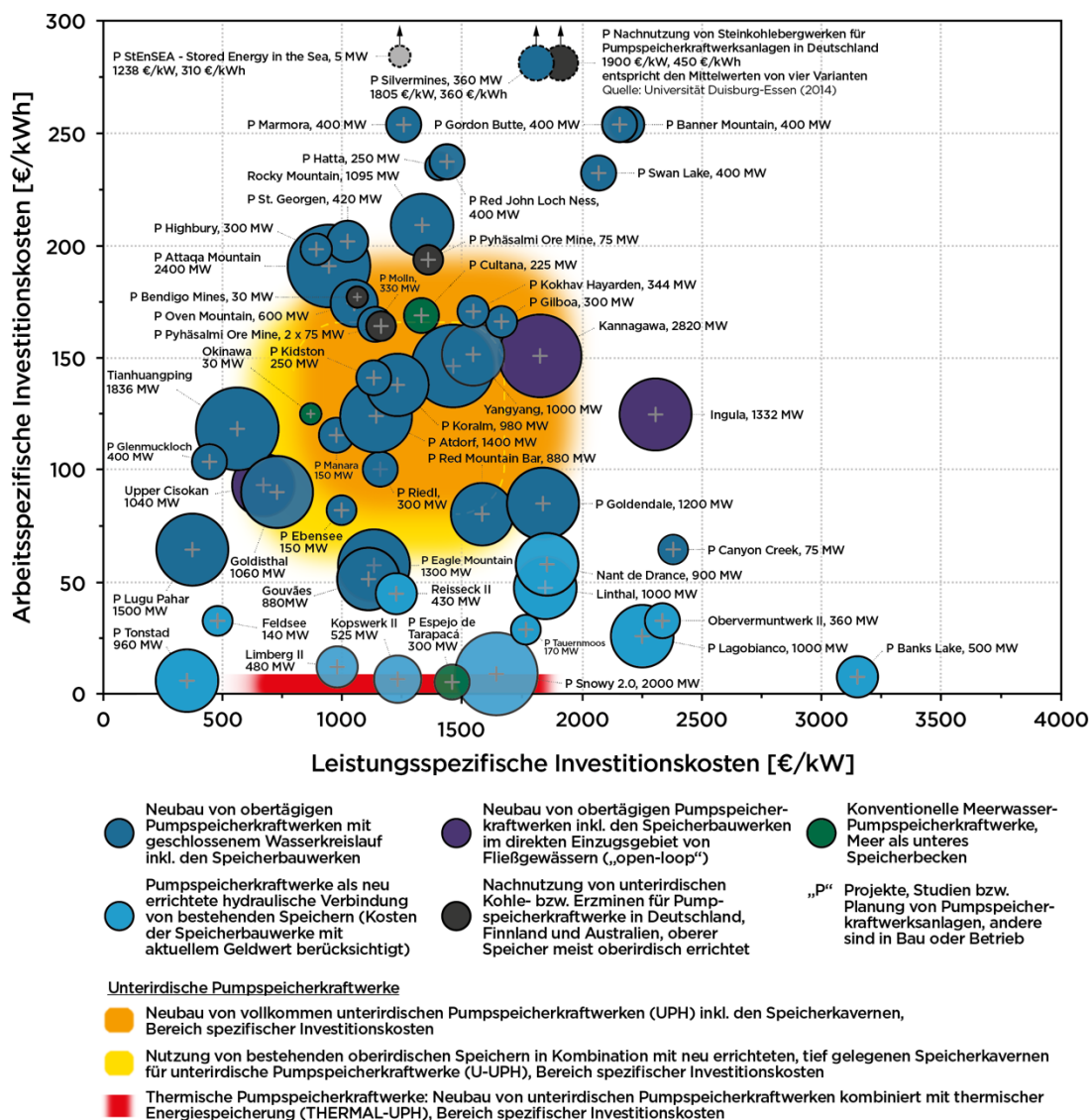


Abb. 3: Gegenüberstellung der spezifischen Investitionen von PSKW mit leistungsspezifischen [€/kW] und arbeitsspezifischen Kosten [€/kWh], bezogen auf die installierte Turbinenleistung und den einmaligen Energieinhalt des Oberbeckens, Preisbasis 2020

Referenzen

- Åsberg, C. (2011). Solar heat with seasonal storage in Lyckebo, Master's thesis, Uppsala University, Sweden.
- Chas. T. Main, Inc. (1982). Report on Technical Feasibility of Underground Pumped Hydroelectric Storage in a Marble Quarry Site in the Northeast United States, U.S. Department of Energy, Washington.
- Garbrecht, G. (1995). Meisterwerke antiker Hydrotechnik, Teubner: Stuttgart, Leipzig.
- Pikl, F.G. (2017). Kombination der Pumpspeichertechnologie mit thermischer Energiespeicherung, Masterarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz.
- Pikl, F.G., Richter, W., Zenz, G. (2017). Pumpspeichertechnologie kombiniert mit thermischer Energiespeicherung – Kraftwerks- und Druckstollenkonzept, Geomechanics and Tunnelling, 10(5), 611-619.
- Pikl, F.G., Richter, W., Zenz, G. (2019a). Großtechnische, wirtschaftliche und effiziente untertägige Energiespeicher, Geomechanics and Tunnelling, 12(3), 251-269.
- Pikl, F.G., Richter, W. (2019b). Economic analysis of pumped-storage hydropower facilities, Unpublished research study, Graz University of Technology.
- Willett, D.C. (1981). Preliminary design study of underground pumped hydro and compressed-air energy storage in hard rock, Vol. 1: Executive Summary, Buffalo.

Adressen der Autoren

DI Franz Georg Pikl (korrespondierender Autor)

DI Dr. Wolfgang Richter, Prof. DI Dr. Gerald Zenz

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz

AT-8010 Graz, Stremayrgasse 10/2

franz.pikl@tugraz.at