

Können Batterien zur ökologischen Sanierung von Schwall-Sunk einen Beitrag leisten?

Diskussionsbeitrag mit grundsätzlichen Überlegungen

Carlos R. Wyss, Jannik Haas, Stefan Vollenweider

Zusammenfassung

Speicherkraftwerke erlauben einen Betrieb, der die schwankende Stromnachfrage flexibel ausgleicht. Die häufigen Änderungen der Stromproduktion, in der Regel mehrmals pro Tag, haben eine hohe Variabilität des Abflusses zur Folge (Schwall-Sunk). Diese unnatürlichen Abflussschwankungen führen zu vielfältigen Beeinträchtigungen der Gewässerökologie in der Rückgabestrecke.

2011 wurde in der Schweiz die Gewässerschutzgesetzgebung revidiert. Die neuen rechtlichen Vorgaben schreiben die Sanierung von wesentlichen ökologischen Beeinträchtigungen durch Schwall-Sunk vor. Im Rahmen einer strategischen Planung wurden schweizweit 675 Wasserkraftwerke bezüglich Schwall-Sunk untersucht. 100 Speicherkraftwerke wurden als sanierungsbedürftig eingestuft.

Die Dämpfung der hydrologischen Auswirkungen von Schwall-Sunk kann primär durch bauliche Massnahmen, auf Antrag der Kraftwerksbetreiber aber auch mit betrieblichen Massnahmen erreicht werden. Im Vordergrund stand in der Massnahmenplanung bislang der ober- und unterirdische Bau von Retentionsvolumina, allenfalls gekoppelt mit betrieblichen Massnahmen.

In diesem Artikel sind grundsätzliche Überlegungen zu Batterie-Energiespeichersystemen (BESS) und zur ökologischen Sanierung von Schwall-Sunk mit BESS zusammengestellt. Mittels einer wirtschaftlichen Berechnung wird aufgezeigt, dass BESS für ausgewählte Speicherkraftwerke eine Alternative zum Bau von Retentionsvolumina darstellen könnten.

Résumé

Les centrales à accumulation permettent une exploitation qui atténue de manière flexible les fluctuations de la demande en électricité. Les changements fréquents de la production d'électricité, en général plusieurs fois par jour, entraînent une grande variabilité du débit (éclusées). Ces variations de débit non naturelles entraînent de multiples atteintes à l'écologie des cours d'eau dans la zone de restitution.

En 2011, la législation sur la protection des eaux a été révisée en Suisse. Les nouvelles dispositions légales prescrivent l'assainissement des atteintes écologiques majeures dues aux éclusées. Dans le cadre d'une planification stratégique, 675 centrales hydroélectriques ont été examinées dans toute la Suisse au regard des éclusées. Cent centrales à accumulation ont été classifiées comme nécessitant un assainissement.

L'atténuation des effets hydrologiques des éclusées peut être obtenue en premier lieu par des mesures de construction, mais aussi, à la demande des exploitants de centrales, par des mesures d'exploitation. Jusqu'à présent, la planification des mesures s'est concentrée sur la construction de volumes de rétention en surface et en sous-sol, éventuellement couplée à des mesures d'exploitation.

Cet article présente des réflexions de base sur les systèmes de stockage d'énergie par batterie (BESS) et sur l'assainissement écologique des éclusées à l'aide des BESS. Un calcul économique montre que les BESS pourraient constituer une alternative à la construction de volumes de rétention pour certaines centrales à accumulation.

1. Einleitung

Speicherkraftwerke erlauben einen Betrieb, der die schwankende Stromnachfrage flexibel ausgleicht. Die häufigen Änderungen der Stromproduktion, in der Regel mehrmals pro Tag, haben eine hohe Variabilität des Abflusses zur Folge (Schwall-Sunk). Diese unnatürlichen Abflussschwankungen führen zu vielfältigen Beeinträchtigungen der Gewässerökologie in der Rückgabestrecke (Bruder et al., 2012; Tonolla et al., 2017).

Ein durch Schwall-Sunk beeinträchtigtes Fließgewässer weist vielfältige ökologische Defizite auf (Bruder et al., 2012; Schweizer et al., 2013). Fische leiden vor

allem unter dem Sunk-Abfluss. Während der Abflussabnahme können Gewässerbereiche trockenfallen und Fische stranden (Scruton et al., 2003). Doch auch der Mangel an konstanten Abflüssen setzt ihnen zu. Untersuchungen im Alpenrhein zeigen, dass der Schwallbetrieb ein wichtiger ökologischer Stressfaktor sein könnte, der die Motivation zum Aufwandern von migrierenden Arten senkt (Mendez, 2007).

Durch Modellierung konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften von Habitaten in Schwall-Sunk-Strecken viel schneller und häufiger wechseln als unter natürlichen Bedingungen. Fische, die bestimmten Habitatseigenschaften folgen, müssen

unter Schwall-Sunk-Betrieb über den ganzen Winter gemittelt eine wesentlich grössere Distanz bewältigen als unter natürlichen Bedingungen (Bätz et al., 2022).

Auch Invertebraten, die eher stabile Habitatseigenschaften (d. h. über Wochen/Monate) bevorzugen, können dynamische Standorte nur schwer besiedeln. Durch die abrupte Erhöhung der Fließgeschwindigkeit bei Schwall können sich Invertebraten nicht mehr am Substrat halten oder rechtzeitig im Kieslückensystem verstecken und werden von der Strömung mitgerissen. Das Trockenfallen von Gewässerbereichen bei Sunk kann zu einer um über 80 Prozent erhöhten Sterblichkeit der Eier führen und somit die Anzahl der daraus resultierenden



Larven massiv reduzieren (Friese et al., 2022).

Wasser- und Auenpflanzen können durch den stetigen Wechsel von Überflutung und Entwässerung sowie durch die Mobilisierung des Substrates bei Schwall erheblichen physiologischen sowie physischen Belastungen ausgesetzt werden. Somit kann Schwall-Sunk auch erhebliche Auswirkungen auf die Auenbiotope haben (Bejarano et al., 2018).

2011 wurde die Gewässerschutzgesetzgebung in der Schweiz revidiert. Das Gesetz verpflichtet die Betreiber von Wasserkraftanlagen, Massnahmen zu ergreifen, um die durch Schwall-Sunk verursachten wesentlichen ökologischen Beeinträchtigungen bis 2030 zu beseitigen. Im Rahmen einer strategischen Planung wurden schweizweit 675 Wasserkraftwerke in Bezug auf Schwall-Sunk untersucht. 100 Speicherkraftwerke wurden als sanierungsbedürftig eingestuft (Bammatter et al., 2015).

Die Schwall-Sunk-Sanierung zielt auf die Dämpfung der Schwall- und Sunkabflüsse sowie der Pegelanstiegs- und Pegelrückgangsraten ab. Für die Sanierung von Schwall-Sunk werden bauliche Massnahmen gegenüber betrieblichen Massnahmen bevorzugt (Art. 39a Abs. 1 GSchG). Typische Beispiele für bauliche Massnahmen sind die Schaffung von Retentionsvolumina zwischen dem Turbinenauslauf und dem Fliessgewässer oder, wenn möglich, die Ausleitung des turbinieren Wassers in einen See oder in ein grösseres Fliessgewässer. Betriebliche Massnahmen können auf Antrag der Kraftwerkbetreiber

einbezogen werden. Das Vollzugshilfemodul «Schwall-Sunk – Sanierungsmassnahmen» rät, die Möglichkeit einer Kombination beider Massnahmenarten in Betracht zu ziehen, um die Effektivität und Verhältnismässigkeit des Sanierungsprojekts zu verbessern (Tonolla et al., 2017).

Im Rahmen eines Ausbauprojektes haben die Kraftwerke Oberhasli AG (KWO) zwischen 2014 und 2016 in Innertkirchen einen kombinierten Speicher (d. h. oberirdisches Retentionsbecken und unterirdischer Speicherstollen) gebaut, der das turbinierte Wasser gleichmässiger in die Hasliaare zurückgibt. Die erste Wirkungskontrolle hat Verbesserungen der gewässerökologischen Situation ergeben (Schweizer et al., 2021).

Der Realisierung von oberirdischen Retentionsvolumina sind jedoch Grenzen gesetzt. Der Platzbedarf und die Auswirkungen solcher Bauwerke auf das Landschaftsbild sind gross. Der unterirdische Bau von Retentionsvolumina (Kavernen) kann durch lokale geologische Bedingungen erschwert werden und zu unverhältnismässig hohen Kosten führen. Kommt dazu die Frage nach der Anpassungsfähigkeit der einmal gebauten Retentionsvolumina, im Laufe ihrer Lebensdauer von mehreren Dutzend Jahren, auf neue Betriebsanforderungen.

In den vergangenen Jahren machte die Entwicklung von Batterie-Energiespeichersystemen (BESS) einen grossen Schritt nach vorne. Diese Entwicklung wird sich fortsetzen. BESS werden nicht nur günstiger, sondern werden auch grössere Ener-

giespeicherkapazitäten pro Einheitsvolumen haben. In diesem Artikel sind grundsätzliche Überlegungen zu BESS und zur ökologischen Sanierung von Schwall-Sunk mit BESS zusammengestellt. Mittels einer vereinfachten wirtschaftlichen Berechnung wird aufgezeigt, dass BESS für ausgewählte Speicherkraftwerke eine Alternative zum Bau von Retentionsvolumina darstellen könnte. Die Frage, wie BESS in Kombination mit einem Retentionsbecken betrieben werden könnte, wird in dieser WEL-Ausgabe im Artikel von Höfkes et al. 2022 aufgegriffen (Batterie-Becken-Hybrid).

2. Batterie-Energiespeichersysteme (BESS) in der Energiewirtschaft

2.1 BESS im Vergleich zu anderen Energiespeichersystemen

Es gibt mechanische, chemische, elektrochemische, elektrostatische, elektromagnetische und thermische Energiespeichersysteme. Sie unterscheiden sich in Bezug auf Leistungsskala, Reaktionszeit, Energie-/Leistungsdichte, Lebensdauer, Entladezeit und Kosten.

Für verschiedene Energiespeichersysteme, wie z. B. Pumpspeicherkraftwerke (PHES in Bild 1) oder Batterie-Energiespeichersysteme (BESS in Bild 1), gibt es theoretisch keine Leistungsobergrenze, vorausgesetzt es gibt genügend Platz. Weltweit existieren viele BESS mit mehr als 100 MW Leistung und einer Speicherkapazität von ein paar Stunden (Sandia National Laboratories, 2021).

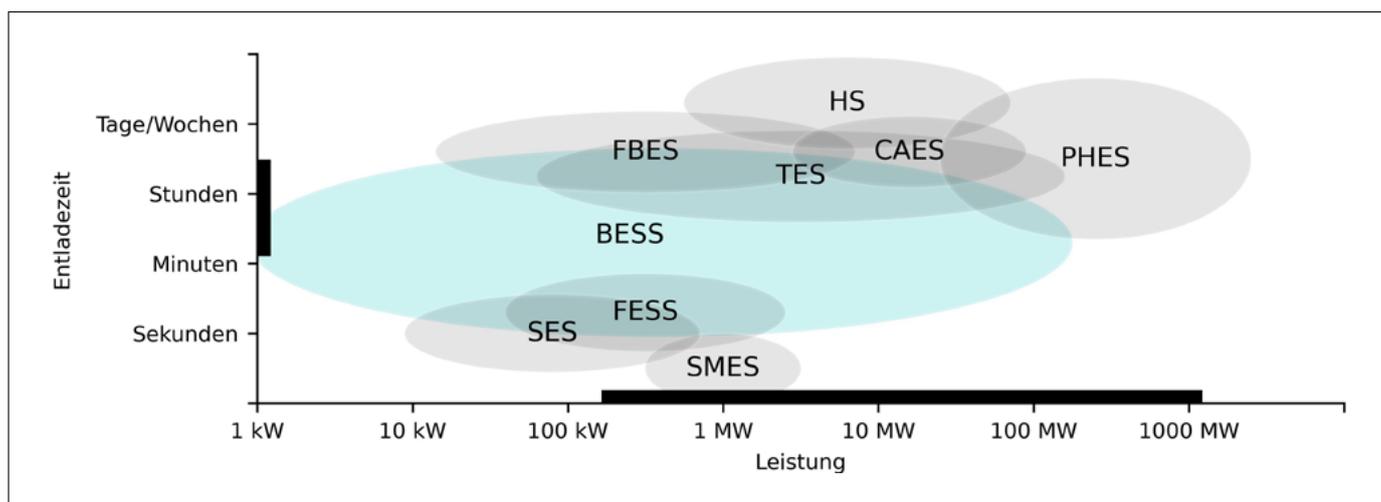


Bild 1: Schematische Veranschaulichung von Energiespeichersystemen, dem möglichen Leistungsbereich und dem Bereich der Entladezeiten (angepasst von Krishan & Suhag, 2019). Der Bereich der Entladezeit und der Leistungsbereich für die Sanierung von Schwall-Sunk in der Schweiz sind an den Achsen fett markiert. Abkürzungen: BESS = Batterie-Energiespeichersystem wie z. B. Lithium-Ionen-Grossbatterien; SES = Superkondensator-Energiespeicher; FESS = Schwungrad-Energiespeicher; SMES = Supraleitender magnetischer Energiespeicher; FBES = Durchflussbatterie-Energiespeicher; TES = thermisches Energiespeichersystem; HS = Wasserstoffspeicher; CAES = Druckluftspeicher; PHES = (Pump-)Speicherkraftwerk.

In diesem Artikel beschränken wir unsere Analyse auf die Verwendung von Lithium-Ionen-Grossbatterien (Li-BESS), weil sich dieses System aus betriebswirtschaftlichen Gründen wegen der breiten Verwendung, des breiten Entladezeitraumes und des Leistungsspektrums (vgl. *Bild 1*) vermutlich am besten für die Sanierung von Schwall-Sunk eignet.

2.2 Verwendung von Lithium-Ionen-Grossbatterien (Li-BESS)

Li-BESS sind nach den Pumpspeicherkraftwerken die weltweit meist gebauten Energiespeicher, und sie sind die am schnellsten wachsende Speichertechnologie überhaupt (*McKerracher et al., 2020; Vandepaer et al., 2019*). Projektionen zeigen für 2028 eine weltweite Kapazität von 200 GW (*McKerracher et al., 2020*). Zudem ist zu erwarten, dass sich die Nachfrage nach Li-BESS bis 2029 verzehnfachen wird (*Kane, 2020*). Dennoch dominieren Wasserspeicherkraftwerke weltweit den Markt für Energiespeicherung. Die Stauseen aller bestehenden konventionellen Speicherkraftwerke zusammen können insgesamt 1500 Terawattstunden (TWh) an elektrischer Energie speichern – das entspricht fast der Hälfte des derzeitigen jährlichen Strombedarfs der Europäischen Union. Das ist etwa 170 Mal mehr Energie, als die weltweite Anzahl der Pumpspeicherkraftwerke heute speichern kann – und etwa 2200 Mal mehr als die gesamte Li-BESS-Kapazität, einschliesslich derjenigen von Elektrofahrzeugen (*International Energy Agency, 2021*).

In der Schweiz bestehen erste Erfahrungen mit Li-BESS zur Energiespeicherung. In Volketswil steht eine von den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich (EKZ) erstellte Li-BESS. Sie hat eine Leistung von 18MW. In Jona steht eine vom Elektrizitätswerk Jona-Rapperswil (EWJR) erstellte Li-BESS mit einer Leistung von 2 MW. Im Fall der Li-BESS der EKZ wurden Leistungssprünge von 2 MW (von -1 MW auf +1 MW und umgekehrt) in weniger als einer Sekunde gemessen (*Koller et al., 2015*). Die beiden Schweizer Li-BESS haben aufgrund der schnellen Reaktionsgeschwindigkeit Anspruch auf den Energieregulierungsmarkt und könnten dadurch rentabel werden.

Neben der schnellen Reaktionsgeschwindigkeit zeichnen sich Li-BESS durch eine relativ geringe Selbstentladung (1 bis 2 Prozent pro Tag), ein geringes Gewicht (im Vergleich zu anderen Batterietypen) und einen hohen Speicherwirkungsgrad (85 bis 95 Prozent der eingesetzten Energie) aus (*Krishan & Suhag, 2019*).

Das Ende der Lebensdauer einer Li-BESS wird arbiträr mit dem Erreichen eines Kapazitätsabfalls von 20 Prozent in Bezug auf seine nominelle Kapazität definiert. Das entspricht ca. 10000 Ladezyklen. Bei zwei bis drei Zyklen pro Tag erreichen Li-BESS damit eine Lebensdauer von 10 bis 13 Jahren. Danach könnten sie ersetzt werden, damit sie weiterhin wie geplant betrieben werden können.

Offen bleiben Fragen zur Umweltbelastung von Li-BESS (*Vandepaer et al., 2019*), insbesondere, weil die derzeitigen Methoden der Lithiumgewinnung mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden sind. Das meiste Lithium wird heute im Lithiumdreieck in der Atacamawüste gewonnen (Argentinien, Bolivien und Chile). Im Lithiumdreieck wird die Hälfte der weltweiten, lithiumierten Lithiumreserven vermutet.

2.3 Überlegungen zu den Umweltbelastungen von Lithium-Ionen-Grossbatterien (Li-BESS)

Wegen der Entstehung von Mega-Batterie-fabriken in Europa werden grosse Anstrengungen unternommen, nachhaltige Recyclingmethoden und Alternativen zu entwickeln (*Vandepaer et al., 2019*). Es entstehen zunehmend grosse Unternehmen, die Li-BESS in industriellem Massstab recyceln können. In der Schweiz hat sich beispielsweise die upVolt GmbH (Smart City Lab Basel) zum Ziel gesetzt, gebrauchte Li-BESS aufzuwerten und deren Lebensdauer zu verlängern.

Die neusten stationären Li-BESS basieren auf Lithium-Eisenphosphat und enthalten weder Nickel noch Kobalt. Eisenphosphat hat somit gegenüber Nickel und Kobalt ökologische wie auch ethische Vorteile. Der Abbau von Nickel und Kobalt erfolgt in Konfliktgebieten, verbunden mit ausbeuterischen Arbeitsbedingungen (*Castelvecchi, 2021*). Der einzige Nachteil der Lithium-Eisenphosphat-Technologie ist die geringere Energiedichte, die bei stationären Grossbatterien jedoch eine kleinere Rolle spielt.

3. Batterie-Energiespeichersysteme (BESS) und die Sanierung von Schwall-Sunk

3.1 Speicherkraftwerk gekoppelt mit einem BESS

Die Sanierung der ökologischen Beeinträchtigungen durch Schwall-Sunk erfolgt meistens durch den Bau eines Retentionsbeckens. Mit dem zusätzlich geschaffenen Rückhaltevolumen lässt sich die Abfluss- resp. die Pegeländerungsrate bei der Wasserrückgabe reduzieren. Als Alternative zu Retentionsbecken schlagen *Anindito et al. (2019)* den Einsatz von BESS vor. Anstatt das turbinierte Wasser zwischenspeichern, wird elektrische Energie zeitweise

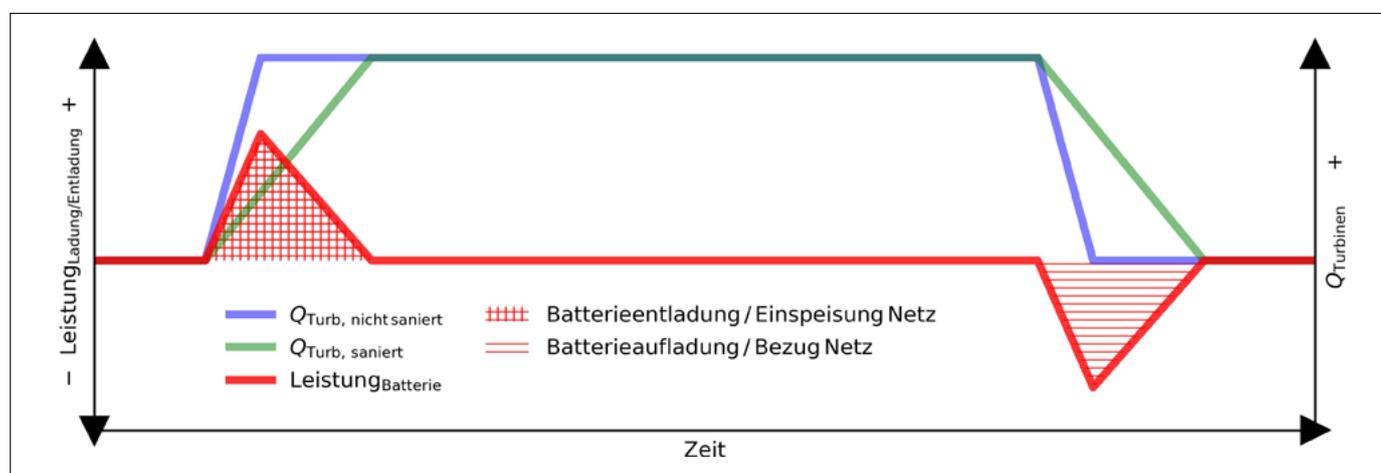


Bild 2: Mögliches Betriebsprinzip eines Speicherkraftwerkes, das mit einem BESS gekoppelt ist. Mit dem BESS ist es möglich, die Turbinen-Stromproduktion langsamer hoch- resp. herunterzufahren. Dies führt zu einer Reduktion der Abfluss- resp. Pegeländerungsrate unterhalb der Wasserrückgabe (Schwall- resp. Sunkrate).

gespeichert und wieder entladen (*Bild 2*). Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten: BESS lassen sich als Alternative zu Retentionsbecken (und/oder betrieblichen Massnahmen) einsetzen oder aber BESS werden mit einem Retentionsbecken verbunden (*vgl. Höfkes et al., 2022*). Der Batterie-Becken-Hybrid wird im Artikel von *Höfkes et al. (2022)* ausführlich beschrieben.

Aus technischen Gründen können nicht alle Turbinen (typen) die ökologisch erforderlichen Abfluss- resp. Pegeländerungsraten erreichen. Insbesondere Francis-Turbinen weisen typischerweise eine begrenzte Möglichkeit zur Regulierung im Teillastbereich auf. In solchen Fällen könnte ein BESS zur Sanierung von Schwall-Sunk nur in Kombination mit einem Turbinenersatz oder mit dem Einsatz einer zusätzlichen Turbine zum Überbrücken von gewissen Leistungsschritten eingesetzt werden. Je nach Anlagenkonstellation kann ein solcher Turbinenersatz konzessionsrechtliche Folgen haben, was wiederum erhebliche Verfahrensrisiken birgt.

Erwähnenswert ist auch ein vorteilhafter Aspekt der Kopplung von BESS mit Speicherkraftwerken. Heutzutage nehmen die Bedeutung und der Bedarf an primärer Frequenzregelung von Wasserkraftwerken aufgrund des steigenden Anteils an schwankenden erneuerbaren Energiequellen deutlich zu. Dies bringt das Problem der zunehmenden Abnutzung der Turbinen mit sich (*Yang et al., 2016*). BESS werden bereits heutzutage eingesetzt, um die schnellen Änderungen des Energiebedarfs auszugleichen, sodass die Turbinen gleichmässiger und im optimalen Betriebsbereich laufen können, wodurch ihre Abnutzung verringert wird (*Bellgraph et al., 2021*).

3.2 Investitionskosten von Retentionsbecken und Lithium-Ionen-Grossbatterien (Li-BESS)

Erfahrungswerte in der Schweiz zeigen, dass die Investitionskosten pro m³ Retentionsvolumen zwischen CHF 240 und 850 pro Kubikmeter variieren, je nach örtlichen Gegebenheiten. Die Dimensionierung des Retentionsbeckens und damit das Rückhaltevolumen für die ökologische Sanierung eines Speicherkraftwerkes hängt massgeblich von den hydrologischen Anforderungen bei der Rückgabe des turbinieren Wassers ab. Für ein Retentionsbecken in der Grösse von 6000 m³ muss mit Kosten zwischen CHF 1,4 Mio. und CHF 5,1 Mio. gerechnet werden. Ein Retentionsbecken in der Grösse von 80000 m³ kostet demnach zwischen CHF 19,2 Mio. und CHF 68 Mio.,

je nach lokalen Gegebenheiten. Retentionsbecken sind auf eine Betriebsdauer von bis zu 80 Jahren ausgelegt.

Die Kostenbetrachtungen zu BESS sind etwas komplizierter. Zur Vereinfachung werden Zahlen zu Lithium-Ionen-Grossbatterien (Li-BESS) beigezogen. Li-BESS sind eine kommerziell verbreitete Technologie. Aufgrund immer weiter sinkender Kosten wird für die Zukunft neben dem Einsatz in Elektroautos auch von einer starken Zunahme stationärer Anwendungen, z. B. zur Sicherung der Netzstabilität, ausgegangen (*Beuse et al., 2020*). Heute liegen die Energiespeicherkosten für Li-BESS bei knapp 200 CHF/kWh. Viele Studien deuten auf eine weitere Kostensenkung um mindestens 50 Prozent bis zum Jahr 2050 hin (*Cole et al. 2021*). Für eine Investitionsrechnung sind ausserdem die Leistungsaufnahme, die Entladezeit, die Anzahl Ladezyklen sowie die Kosten für Betrieb und Unterhalt einzubeziehen. Zur Berechnung stellen *Schmidt et al. (2019)* ein Onlinetool zur Verfügung.

Für ein Berechnungsbeispiel der Investitionskosten wurden für eine Li-BESS folgende Parameter angenommen:

- Leistung: 10 MW
- Entladezeit: 1 Stunde
- Zyklen pro Jahr: 600
- Lebensende bei 600 Zyklen pro Jahr: 10 Jahre
- Energiespeicherkosten der Batterie: 200 CHF/kWh

Das Berechnungstool (www.energystorage.ninja) ergibt folgende Ergebnisse:

- Investitionskosten Li-BESS: CHF 4,5 Millionen
- Betriebs- und Unterhaltskosten für 10 Jahre: CHF 0,7 Millionen
- Ersatz der Li-BESS (nach 10 Jahren): CHF 2,29 Millionen

Die Investitionskosten für eine Li-BESS belaufen sich für dieses einfache Fallbeispiel inklusive Betriebs- und Unterhaltskosten auf CHF 5,2 Mio. Die Lebensdauer der Li-BESS beträgt 10 Jahre. Der Ersatz der Li-BESS würde rund CHF 2,29 Mio. kosten.

3.3 Überlegungen zum Potenzial von Lithium-Ionen-Grossbatterien (Li-BESS) zur Sanierung von Schwall-Sunk

Um das schweizweite Potenzial von Li-BESS zur Sanierung von Schwall-Sunk grob abzuschätzen, können die Investitionskosten für ein Retentionsbecken mit den Investitionskosten für ein Li-BESS verglichen wer-

den. Dieser vereinfachte Vergleich geht von folgenden Annahmen aus:

- Ein Li-BESS wird als Alternative zu einem Retentionsbecken zur Sanierung von Schwall-Sunk eingesetzt. Die Verbindung einer Batterie mit einem Retentionsbecken (Batterie-Becken-Hybrid) wird im Artikel von *Höfkes et al. (2022)* besprochen, *vgl. Artikel in dieser WEL-Ausgabe*.
- Die Batterieleistung entspricht der Leistung des Speicherkraftwerkes ab Generator.
- Das Retentionsvolumen des Beckens entspricht umgerechnet der Energiemenge, welche vom Li-BESS abgegeben werden muss. Dazu gerechnet werden 20 Prozent, um die Energiemenge auch nach 10 Jahren noch zu gewährleisten.
- Die Batterie durchläuft jährlich 600 Ladezyklen und erreicht damit nach 10 Jahren das Lebensende.
- Die Turbinen des Speicherkraftwerkes sind regulierbar.

In einem ersten Schritt werden für den Vergleich die Investitionskosten für die Beckengrössen 30000 m³ und 80000 m³ berechnet. Dies entspricht einer mittleren und einer grösseren Beckengrösse, welche zur Schwall-Sunk-Sanierung eines Speicherkraftwerkes geplant werden könnte. Bei Kosten zwischen 240 CHF/m³ und 850 CHF/m³ ergeben sich Investitionskosten in der Grössenordnung von CHF 7,2 Millionen und CHF 25,5 Millionen bei einer Beckengrösse von 30000 m³ respektive CHF 19,2 Millionen und CHF 68 Millionen bei einer Beckengrösse von 80000 m³.

Mittels der Ausbauwassermenge und der Leistung ab Generator des Speicherkraftwerkes wird in einem zweiten Schritt ermittelt, wie viel elektrische Energie erzeugt wird, bis das entsprechende Becken gefüllt wird. Ein fiktives Speicherkraftwerk mit einer Leistung ab Generator von 15 MW und einer Ausbauwassermenge von 5 m³ pro Sekunde würde gut 25 MWh bis zur kompletten Füllung des Beckens mit einem Volumen von 30000 m³ erzeugen.

In einem dritten Schritt lässt sich nun berechnen, mit welchen Investitionskosten gerechnet werden müsste, falls ein Li-BESS die Schwall-Sunk-Sanierung «übernehmen» würde. Die Li-BESS hätte die Eckwerte 15 MW Leistung, 30 MWh Energieaufnahme (25 MWh plus 20 Prozent, um die Energiemenge auch nach 10 Jahren noch zu gewährleisten), 600 Speicherzyklen pro Jahr und einer Investitionsdauer von 80 Jahren. Das Tool von *Schmidt et al. (2019)*

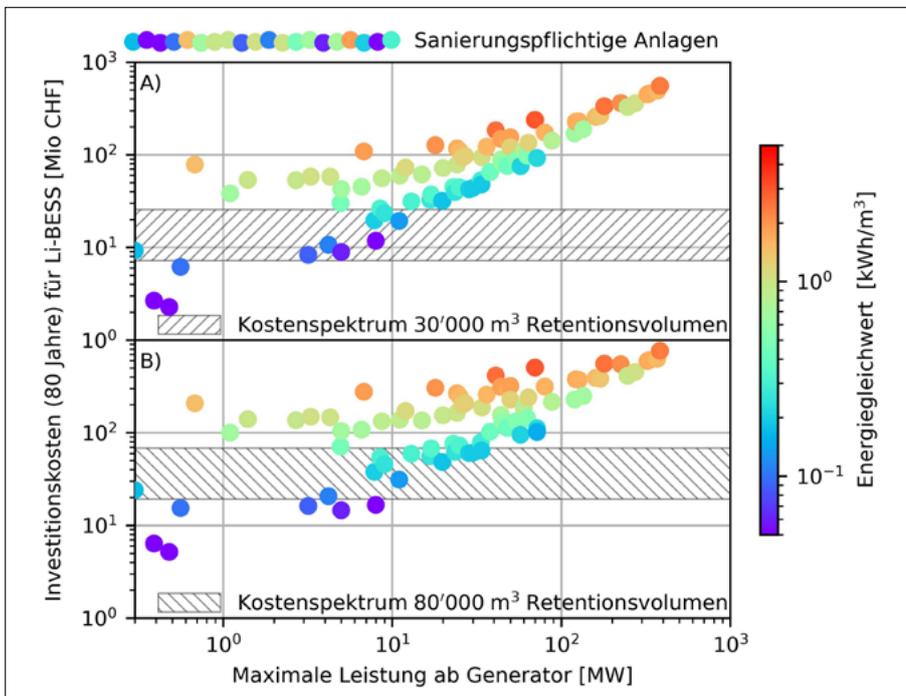


Bild 3: Investitionskosten (y-Achse) der sanierungspflichtigen Speicherkraftwerke (farbige Punkte) für Li-BESS als Alternative zu einem Retentionsvolumen als Funktion der maximalen Leistung ab Generator der Anlage (x-Achse). Die Farbe der Punkte gibt zusätzlich den Energiegleichwert der Anlagen an. Die Berechnung wurde für zwei Beckengrößen, A) 30'000 m³ und B) 80'000 m³, und für 82 der knapp 100 sanierungspflichtigen Anlagen gemacht.

kommt auf Investitionskosten von CHF 11,85 Millionen für die ersten 10 Jahre. Auf 80 Jahre hochgerechnet ergeben sich damit Investitionskosten von CHF 63,3 Millionen, einschliesslich Batteriewechsel (7 Mal) und der Kosten für Betrieb und Unterhalt. Bei der Hochrechnung auf 80 Jahre liegen die Kosten für den Ersatz der Batterie deutlich unter den ursprünglichen Anschaffungskosten (CHF 6 Millionen). Die Kosten für Betrieb und Unterhalt werden als konstant angenommen (ca. CHF 1,18 Millionen alle 10 Jahre).

In einem letzten Schritt können die Investitionskosten des Li-BESS (CHF 65 Millionen) mit den Investitionskosten des Retentionsbeckens (CHF 7,2 Millionen bis CHF 25,5 Millionen) verglichen werden. In diesem fiktiven Fallbeispiel wäre das Li-BESS als Alternative zu einem Retentionsbecken deutlich teurer, selbst wenn mit Retentionsvolumenkosten von 850 CHF/m³ gerechnet werden müsste.

Eine solche Berechnung lässt sich für alle sanierungspflichtigen Speicherkraftwerke vornehmen. Die entsprechenden Eckwerte können der Statistik der Wasserkraftanlagen (WASTA) für 82 der knapp über 100 sanierungspflichtigen Anlagen entnommen werden. Das Bild 3 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung.

Das Bild 3 zeigt, dass die Investitionskosten für Li-BESS mit zunehmender Leis-

tung und zunehmendem Energiegleichwert grösser werden. Der Energiegleichwert definiert sich als kWh/m³ und wird aus der maximalen Leistung ab Generator, dividiert durch die Ausbauwassermenge, berechnet. Ausserdem lässt die Grösse des Retentionsbeckens kaum Rückschlüsse auf die Rentabilität von Li-BESS zu.

Für unsere Grundannahme, die Li-BESS als Alternative zu einem Retentionsbecken einzusetzen zeigt sich ein ziemlich deutliches Bild: Trotz der konservativen Annahmen (Li-BESS als Alternative und nicht als Ergänzung zu einem Retentionsvolumen, hohe Investitionskosten für die Energiespeicherung, geringe Anzahl von Zyklen bis zum Erreichen des Lebensendes und daher zahlreiche Ersetzungen von Li-BESS über 80 Jahre, Energieüberschuss von 20 Prozent gegenüber der maximalen Leistung ab Generator) haben wir einige sanierungspflichtige Anlagen evaluiert, bei denen sich eine Li-BESS als Alternative zu einem Retentionsbecken finanziell lohnen könnte. Wie bereits mehrfach erwähnt, liefern Höfkes et al. (2022) Überlegungen zu einem hybriden Becken-BESS-System.

3.4 Diskussion und offene Fragen

Der einfache Vergleich von geschätzten Investitionskosten für ein Retentionsbecken und für ein Li-BESS als Alternative kann eine Grundlage sein, um zu entscheiden,

ob eine Li-BESS ins Variantenstudium einbezogen werden soll. Für eine ausführliche Potenzialbetrachtung und eine Betrachtung im Rahmen des Variantenstudiums selbst, greift der einfache Vergleich aber zu kurz. Es sind weitere, auch grundsätzlichere Überlegungen notwendig und es müssen offene Fragen beantwortet werden:

- Einzelfallbetrachtung:
 - Ist der Bau eines Retentionsbeckens aus räumlichen Gründen möglich? Gibt es Einschränkungen, z. B. aus raumplanerischen, geologischen oder landschaftsschützerischen Gründen?
 - Welche Möglichkeiten ergeben sich durch die Kombination von Retentionsbecken und BESS (hybrides Becken-BESS-System) oder betrieblichen Massnahmen und BESS? Lässt sich durch die Kombination bspw. eine Kaverne verhindern oder die Auswirkungen auf das Landschaftsbild reduzieren?
 - Lässt sich ein BESS technisch und betrieblich in das Kraftwerkssystem einbinden (Stichwort: begrenzte Regulierbarkeit der Turbine)?
- Technische und betriebliche Fragen:
 - Wie wird sich die Frage der begrenzten Ressourcen (Li) und die notwendige Frage der Priorisierung ihrer Anwendungen, z. B. für die Elektromobilität, entwickeln?
 - Welchen Einfluss hat die Einbindung einer BESS in den Betrieb eines Speicherkraftwerkes? Durch den Einsatz von BESS ist es möglich, vom Energieregulierungsmarkt zu profitieren. Aber wie verlässlich wird diese Einnahmequelle, wenn in Zukunft sämtliche Verbraucher auf Batterien umsteigen (z. B. Photovoltaikanlagen und Batterien für den Hausgebrauch)?
- Allgemeine Fragen und Fragen zum Sanierungsverfahren:
 - Welche Rolle spielt BESS zukünftig im Strommarkt? Kann der Einsatz von BESS im regionalen Kontext zu einem veränderten Bedarf nach Spitzenstrom führen und damit indirekt Einfluss auf Schwall-Sunk haben?
 - Wie hoch ist der Residualwert einer Li-BESS, wenn das BESS für eine zweite Anwendung verwendet wird?
 - Welchen Einfluss hat die Umweltverträglichkeit einer BESS auf die Verhältnismässigkeit (vgl. auch Kap. 2.3)?

- Das Sanierungsverfahren sieht eine vollständige Entschädigung für die Gesamtinvestitionen einschliesslich der mit dem Betrieb verbundenen Kosten für 40 Jahre vor. Gelten BESS als betriebliche oder bauliche Massnahmen?

4. Fazit und Ausblick

Die Auslegeordnung in diesem Artikel zeigt, dass Batterie-Energiespeichersysteme (BESS) bereits heute eine bedeutende energiewirtschaftliche Rolle spielen. Nach den Pumpspeicherkraftwerken sind BESS die weltweit zweitgrössten Energiespeicher, und sie sind die am schnellsten wachsende Speichertechnologie überhaupt.

Die im Titel dieses Artikels gestellte Frage, ob BESS zur Sanierung von Schwall-Sunk einen Beitrag leisten können, lässt sich noch nicht abschliessend beantworten. Heute werden bauliche und allenfalls betriebliche Massnahmen realisiert, um die negativen ökologischen Auswirkungen von

Schwall-Sunk zu minimieren. Hauptsächlich werden Retentionsbecken geplant. Diese sollen das Wasser speichern und gedämpft an das beeinträchtigte Fließgewässer zurückgeben. In *Kapitel 3* wurde aufgezeigt, dass es theoretisch möglich ist, statt Wasser Energie in BESS zu speichern. Entweder indem statt eines Retentionsbeckens ein BESS eingesetzt wird oder indem ein BESS in Kombination mit einem Retentionsbecken realisiert wird. Mit einer vereinfachten Investitionsvergleichsrechnung wurde dargelegt, dass der Einsatz von Lithium-Ionen-Grossbatterien (Li-BESS) als Alternative zum Bau eines Retentionsvolumens bereits heute für einige Fälle eine attraktive Lösung darstellen könnte (Speicherkraftwerke mit geringer Kapazität und niedrigem Energiegleichwert). Für die meisten sanierungspflichtigen Speicherkraftwerke dürfte sich heutzutage Li-BESS als Alternative zu einem Retentionsbecken finanziell nicht lohnen. Welche Sanierungsvarianten werden aber betrachtet, wenn die örtlichen und geologischen Gegebenheiten einen Bau eines

genügend grossen Retentionsvolumens nicht zulassen? Die Kombination von BESS mit einem Retentionsbecken wurde in diesem Artikel nicht näher betrachtet, könnte aber eine Möglichkeit sein. *Höfkes et al. (2022)* machen dazu erste Überlegungen.

Allgemein bestehen noch viele offene Fragen. Die Entwicklung rund um BESS ist dynamisch. Es lohnt sich bestimmt, das Thema weiter zu begleiten und einzelne Fragen zum Sanierungsverfahren und BESS anzugehen.

Danksagung

Wir danken *Dr. Nico Bätz* (Eawag) für seine Unterstützung bei der Entwicklung der in diesem Artikel vorgestellten Überlegungen. Der Artikel wurde unter anderem dank den Kommentaren von *Dr. Steffen Schweizer* (Kraftwerke Oberhasli), *Dr. Pedro Manso* (EPFL) und *Dr. Klaus Jorde* (KJ Consult) verbessert. Dieser Artikel wurde ausserdem unterstützt von der German Research Foundation (DFG-NO 805/11-1).

Quellen:

Anindito, Y., Haas, J., Olivares, M., Nowak, W., & Kern, J. (2019). A new solution to mitigate hydropeaking? Batteries versus re-regulation reservoirs. *Journal of Cleaner Production*, 210, 477–489. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.040>

Bammatter, L., Baumgartner, M., Greuter, L., Haertel-Borer, S., Huber Gysi, M., Nitsche, M., & Thomas, G. (2015). Renaturierung der Schweizer Gewässer: Die Sanierungspläne der Kantone ab 2015. www.bafu.admin.ch/renaturierung

Bätz, N., Judes, C., & Weber, C. (2022). Nervous habitat patches: the effect of hydropeaking on habitat dynamics. *River Research and Applications*. <https://doi.org/10.1002/RRA.4021>

Bejarano, M. D., Jansson, R., & Nilsson, C. (2018). The effects of hydropeaking on riverine plants: a review. *Biological Reviews*, 93(1), 658–673. <https://doi.org/10.1111/brv.12362>

Bellgraph, B., Douville, T., Somani, A., Desomber, K., O'neil, R., Harnish, R., Lessick, J., Bhatnagar, D., & Alam, J. (2021). White Paper: Deployment of Energy Storage to Improve Environmental Outcomes of Hydropower. <https://www.nts.gov/about>

Beuse, M., Steffen, B., & Schmidt, T. S. (2020). Projecting the Competition between Energy-Storage Technologies in the Electricity Sector. *Joule*, 4(10), 2162–2184. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.017>

Bruder, A., Schweizer, S., Vollenweider, S., Tonolla, D., & Meile, T. (2012). Schwall und Sunk: Auswirkungen auf die Gewässerökologie und mögliche Sanierungsmassnahmen. *Wasser Energie Luft*, 104(2012/4), 257–264.

Bruder, A., Vollenweider, S., Schweizer, S., Tonolla, D., & Meile, T. (2012). Schwall und Sunk: Planung und Bewertung von Sanierungsmassnahmen. Möglichkeiten und Empfehlungen aus wissenschaftlicher Sicht. *Wasser Energie Luft*, 104(2012/4), 265–272.

Castelvecchi, D. (2021). Electric cars: The battery challenge. Recycling batteries and reducing the use of scarce metals will be key to the world's transition to electric vehicles. Springer Nature Limited, 596, 336–339.

Cole, W., Frazier, A. W., & Augustine, C. (2021). Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2021 Update. www.nrel.gov/publications.

Friese, N., Weber, C., Rachely, C., Weitbrecht, V., & Bätz, N. (2022). Kleinräumige baulich-morphologische Massnahmen in der Schwall-Sunk-Sanierung: Wirksamkeit für das Makrozoobenthos? *Wasser, Energie, Luft WEL*, 114(1/2022), 9–17.

Höfkes, G., Evers, F., Hohermuth, B., & Boes, R. (2022). Schwall-Sunk-Sanierung mit hybriden Becken-Batterie-Systemen. *Wasser Energie Luft WEL*, 114(3).

International Energy Agency. (2021). *Hydropower Special Market Report: Analysis and forecast to 2030*. www.iea.org

Kane, M. (2020, September). Roskill: Lithium-Ion Battery Market To Expand Ten-Fold By 2029. The automotive industry already consumes 60% of global lithium-ion batteries. <https://insideevs.com/news/427774/roskill-li-ion-battery-market-forecast-2029/>

Koller, M., Borsche, T., Ulbig, A., & Andersson, G. (2015). Review of grid applications with the Zurich 1 MW battery energy storage system. *Electric Power Systems Research*, 120, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2014.06.023>

Krishan, O., & Suhag, S. (2019). An updated review of energy storage systems: Classification and applications in distributed generation power systems incorporating renewable energy resources. *International Journal of Energy Research*, 43(12), 6171–6210. <https://doi.org/10.1002/er.4285>

McKerracher, C., Izadi-Najafabadi, A., O'Donovan, A., Albanese, N., Soulopoulos, N., Doherty, D., Boers, M., Fisches, R., Cantor, C., Frith, J., Mi, S., Grant, A., Zamorano-Cadavid, A., Abraham, A. T., Ampofo, K., Kou, N., Edmonds, W., Berryman, I., Landess, J., & Lyu, J. (2020). BloombergNEF: Electric Vehicle Outlook 2020. <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook-2020/>

Mendez, R. (2007). Diplomarbeit: Laichwanderung der Seeforelle im Alpenrhein. Eawag.

Sandia National Laboratories. (2021). *sandia.gov*. DOE Global Energy Storage Database. The Official Hub for Global Energy Storage Data. <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/projects.html>

Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. *Joule*, 3(1), 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008>

Schweizer, S., Lundsgaard-Hansen, L., Meyer, M., Schläppi, S., Berger, B., Baumgartner, J., Greter, R., Büsser, P., Flück, M., & Schwendemann, K. (2021). Die Schwall-Sunk-Sanierung der Hasliaare. Erste Erfahrungen nach Inbetriebnahme und ökologische Wirkungskontrolle. *Wasser Energie Luft*, 113(2021/1), 1–8.

Schweizer, S., Schmidlin, S., Tonolla, D., Büsser, P., Meyer, M., Monney, J., Schläppi, S., Schneider, M., Tuhtan, J., & Wächter, K. (2013). Schwall/Sunk-Sanierung in der Hasliaare. Phase 1b: Ökologische Bewertung des Ist-Zustands anhand der 12 Indikatoren der aktuellen BAFU-Vollzugshilfe. *Wasser Energie Luft*, 105, 200–207.

Scruton, D. A., Ollerhead, L. M. N., Clarke, K. D., Pennell, C., Alfredeen, K., Harby, A., & Kelley, D. (2003). The behavioural response of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*) to experimental hydropeaking on a Newfoundland (Canada) River. *River Research and Applications*, 19(5–6), 577–587. <https://doi.org/10.1002/rra.733>

Tonolla, D., Chaix, O., Meile, T., Zurwerra, A., Büsser, P., Oppliger, S., & Essyad, K. (2017). Schwall-Sunk – Massnahmen. Ein Modul der Vollzugshilfe Renaturierung der Gewässer. Umwelt-Vollzug, 1701.

Vandepaer, L., Cloutier, J., Bauer, C., & Amor, B. (2019). Integrating Batteries in the Future Swiss Electricity Supply System: A Consequential Environmental Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 23(3), 709–725. <https://doi.org/10.1111/jiec.12774>

Yang, W., Norlund, P., Saarinen, L., Yang, J., Guo, W., & Zeng, W. (2016). Wear and tear on hydro power turbines – Influence from primary frequency control. *Renewable Energy*, 87, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.009>

Autoren:

Carlos R. Wyss, Wasser-Agenda 21, carlos.wyss@wa21.ch
 Jannik Haas, Senior Lecturer, Department of Civil and Natural Resources Engineering, jannik.haas@canterbury.ac.nz
 Stefan Vollenweider, Wasser-Agenda 21, stefan.vollenweider@wa21.ch