Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 114 (2022)

Heft: 3

Artikel: Schwall-Sunk-Sanierung mit hybriden Ausgleichsbecken-Batterie-Systemen

Autor: Höfkes, Gereon / Evers, Frederic / Hohermuth, Benjamin

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1002774

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Schwall-Sunk-Sanierung mit hybriden Ausgleichsbecken-Batterie-Systemen

Gereon Höfkes, Frederic Evers, Benjamin Hohermuth, Robert Boes

Zusammenfassung

Speicherwasserkraftwerke sind in der Lage, flexibel Strom zu erzeugen, um einen schwankenden Strombedarf zu decken. Dies führt jedoch zu stark intermittierenden Produktionsmustern mit einem schnellen An- und Herunterfahren der hydraulischen Maschinen. Bereits heute spielen Speicherkraftwerke eine zentrale Rolle für die Versorgungssicherheit und die Anforderungen an ihre Flexibilität werden durch Zubau von neuen erneuerbaren Energien tendenziell zunehmen. Der Flexibilität sind einerseits jedoch technische Grenzen gesetzt, da häufige, schnelle Lastwechsel die Turbinen stärker beanspruchen können. Andererseits erfordert das Gewässerschutzgesetz eine Dämpfung künstlicher Abflussschwankungen (Schwall-Sunk), um bei der Rückgabe in den Vorfluter nachteilige Auswirkungen auf aquatische Ökosysteme zu limitieren. Eine mögliche Alternative ist, die Lastwechsel durch stationäre Grossbatterien zu glätten und so Speicherkraftwerke weiter zu flexibilisieren. Die vorgestellte Abschätzungsmethode ermöglicht eine Vordimensionierung von Grossbatterien als Ergänzung zu einer Schwall-Sunk-Sanierung mittels Ausgleichsbecken. Neben technischen werden dabei auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt. Anhand dreier Fallbeispiele wird die Abschätzungsmethodik auf bestehende Kraftwerkanlagen angewendet.

Résumé

Les centrales hydrauliques à accumulation sont capables de produire de l'électricité de manière flexible afin de répondre à une demande en électricité fluctuante. Il en résulte toutefois des schémas de production fortement intermittents, avec des démarrages et des arrêts rapides des machines hydrauliques. Aujourd'hui déjà, les centrales à accumulation jouent un rôle central dans la sécurité d'approvisionnement et les exigences en matière de flexibilité auront tendance à augmenter en raison de l'augmentation des nouvelles énergies renouvelables. D'une part, la flexibilité est toutefois soumise à des limites techniques, car les changements de charge fréquents et rapides peuvent solliciter davantage les turbines. D'autre part, la Loi sur la protection des eaux exige un amortissement des variations artificielles de débit (éclusées) afin de limiter les effets négatifs sur les écosystèmes aquatiques lors de la restitution dans les eaux réceptrices. Une alternative possible est de lisser les variations de charge par de grandes batteries stationnaires et de flexibiliser ainsi davantage les centrales à accumulation. La méthode d'évaluation présentée permet de pré-dimensionner les grandes batteries en complément d'un assainissement des éclusées au moyen de bassins de compensation. Outre les aspects techniques, les aspects économiques sont également pris en compte. La méthode d'évaluation est appliquée à des centrales existantes à l'aide de trois exemples de cas.

Einleitung

Speicherwasserkraft ermöglicht eine flexible Bereitstellung elektrischer Energie. Neben einer saisonalen Verlagerung der Produktion, z. B. vom Sommer in den Winter, kann die Strombereitstellung dem im Tagesverlauf wechselnden Bedarf unmittelbar angepasst werden. Insbesondere auch in Verbindung mit der Integration neuer erneuerbarer Energien wie Photovoltaik und Windkraft kommt der Speicherwasserkraft eine Schlüsselrolle zu, was gleichzeitig erhöhte Anforderungen an ihre kurzfristige Verfügbarkeit stellt. Diese Flexibilität erfordert häufige und schnelle Lastwechel der Turbinen. Die dadurch verursachten künstlichen Schwall- und Sunkabflüsse verändern das natürliche Abflussregime in Flüssen und können aquatische Ökosysteme nachteilig beeinflussen *(Bruder et al., 2012)*. Eine direkte Möglichkeit, im Rahmen einer Sanierung diese Einwirkungen zu minimieren, stellen Ausgleichsbecken dar *(z. B. Schweizer et al., 2021)*. Als bauliche Massnahme zielen diese darauf ab, den Betrieb der Wasserkraftanlagen (WKA) ohne Einschränkungen weiterführen zu können. Neben dem benötigten Beckenvolumen hängen die Kosten für den Bau von Ausgleichsbecken von diversen Einflussgrössen ab. Diese umfassen unter anderem die Auslegung des Beckens, d. h. ob das Becken ober- oder unterirdisch gebaut werden soll, ob das Becken aktiv oder passiv gesteuert wird, oder ob das turbinierte Wasser über Pumpen zwischengespeichert oder in den Vorfluter abgelassen werden muss *(Widmann, 2008)*. Neben diesen technischen Einflussgrössen können allerdings auch die Kosten für den Landerwerb bzw. überhaupt die Flächenverfügbarkeit einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten einer Sanierungsmassnahme haben. Insbesondere in vergleichsweise dicht besiedelten Regionen wie an vielen Talflüssen in der Schweiz kann dies für die Umsetzung eines Sanierungsprojekts entscheidend sein.

Als Alternative zu Ausgleichsbecken schlagen *Anindito et al. (2019)* den Einsatz von Batterie-Energie-Speicher-Systemen (BESS) vor. Anstatt das turbinierte Wasser zwischenzuspeichern, wird dabei elektrische Energie zeitweise gespeichert und wieder entladen, während die Turbinen gemäss ökologischen Vorgaben für die maximalen Schwall- und Sunkraten hoch- und runtergefahren werden. BESS auf Basis von Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind eine kommerziell verbreitete Technologie; aufgrund voraussichtlich 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)*. Gegenüber Ausgleichsbecken haben BESS als Schwall-Sunk-Sanierungsmassnahme den Vorteil, weniger abhängig von den topografischen Gegebenheiten sowie bestehenden Flächennutzungen in Kraftwerknähe zu sein und können daher prinzipiell flexibler positioniert werden. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang auch eine örtliche Bündelung mehrerer BESS einer Wasserkraftkaskade.

Während der Artikel von *Wyss et al. (2022)* in dieser WEL-Ausgabe auf die grundlegenden Voraussetzungen für den Einsatz von BESS als Möglichkeit zur Schwall-Sunk-Sanierung fokussiert, stellt dieser Beitrag eine Methode zur Abschätzung benötigter BESS-Kapazitäten, -Leistungen und -Kosten vor. Anhand dreier Fallbeispiele bestehender Anlagen wird insbesondere das Potenzial hybrider Becken-Batterie-Systeme untersucht.

Abschätzungsmethode

Um an potenziellen Standorten den Sanierungsansatz eines Ausgleichsbeckens mit anderen Optionen der Schwall-Sunk-Sanierung, namentlich BESS und hybriden Becken-BESS, vergleichen zu können, wurde zunächst eine Abschätzungsmethode in drei Schritten entwickelt. In einem ersten Schritt werden anhand von Produktionsdaten und hydrologischen Daten des beeinflussten Gewässers massgebliche Bemessungsszenarien abgeleitet. Diese Szenarien dienen in einem darauffolgenden Schritt als Eingangsgrössen für die Dimensionierung eines Beckens, eines BESS bzw. eines hybriden Becken-BESS. Der letzte Schritt umfasst eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand von Preisentwicklungsprognosen für BESS über die kommenden Jahrzehnte. Die einzelnen Schritte der Abschätzungsmethode werden im Folgenden näher erläutert.

Bemessungsszenarien

Die Bemessungsszenarien wurden anhand bestehender Produktionsdaten der drei Fallbeispiele abgeleitet. *Bild 1* zeigt ein Flussdiagramm der Vorgehensweise. Neben den turbinierten Abflüssen der einzelnen Anlagen wurden als hydrologische Randbedingung statistische Abflussdaten der beeinflussten Gewässer berücksichtigt. Im Falle der WKA A und B handelte es sich dabei um auf Tagesmittelwerte reduzierte Abflüsse, während aufgrund der Datenverfügbarkeit für WKA C das 5-Prozent-Perzentil der Tagesmittelwerte jeweils eines Monats verwendet wurde. Als ökologische Randbedingungen wurden hypothetische Szenarien auf Basis von maximalen Abflussanstiegs- bzw. -abnahmeraten definiert, da für die untersuchten Standorte noch keine einzuhaltenden Vorgaben bestanden. Im Zeitraum Mitte März bis Mitte Mai betrugen die ökologischen Vorgaben für die Abflussänderungsraten rund 10 Prozent der Werte des restlichen Jahrs. Weitere ökologische Randbedingungen, wie beispielsweise Maximalabflüsse, wurden nicht berücksichtigt. Anhand der Produktionsdaten sowie der übrigen Eingangsparameter wurde dann eine Ereignisanalyse durchgeführt um festzustellen, in welchen Zeiträumen die ökologischen Randbedingungen durch eine WKA ohne Sanierungsmassnahmen nicht eingehalten werden können. Die betreffenden Ereignisse wurden dann als diskrete, synthetische Regulierungsereignisse erfasst, welche als Eingangsgrössen für die Dimensionierung der einzelnen Sanierungsoptionen verwendet wurden.

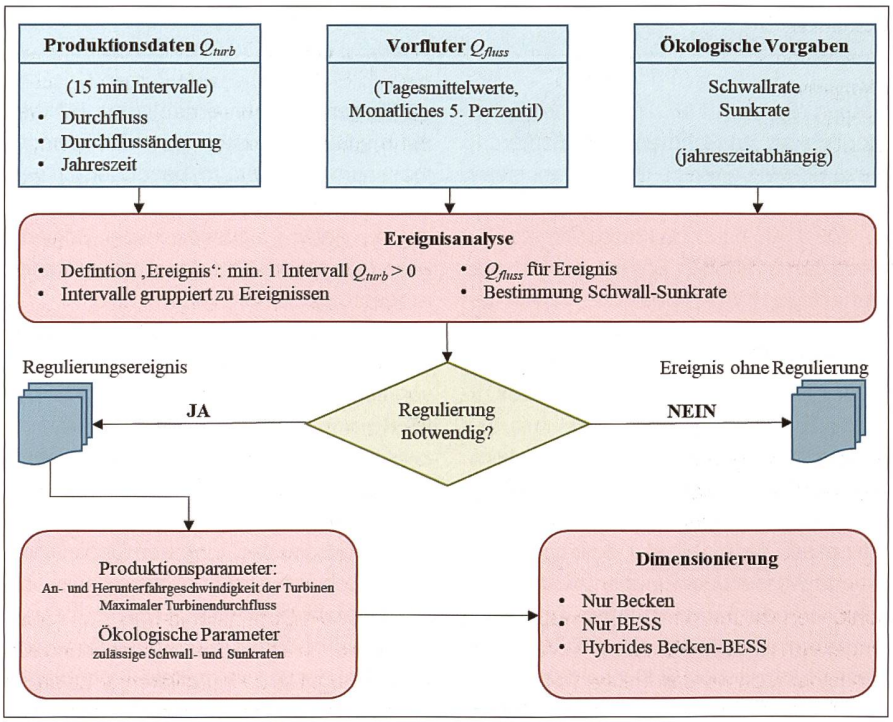

Bild 1: Flussdiagramm zur Ableitung der Bemessungsszenarien.

Ausgleichsbecken

Ausgleichsbecken werden als Sanierungsmassnahme für gewöhnlich bezüglich ihrer Höhenlage zwischen den Turbinen und dem Gewässer angeordnet und dienen dazu, die Abflussanstiegs- und -abnahmeraten durch Zwischenspeicherung zu reduzieren *(Bild 2a)*. Als bauliche Massnahmen ermöglichen ausreichend dimensionierte Ausgleichsbecken der WKA ohne betriebliche Einschränkungen elektrische Energie zu produzieren. *Bild 3* zeigt ein vereinfachtes Schema zur Regulierung eines Schwall-Sunk-Ereignisses mit Hilfe eines Ausgleichsbeckens. Der Turbinendurchfluss Q_{turb} [m³/s] kann dabei anhand des Energiegleichwerts *EGW* [kWh/m³], auch als Arbeitswert bezeichnet, in die momentane Nettoleistung der WKA umgerechnet werden: $P\,[\mathrm{kW}] = 3600 \cdot Q_{turb} \cdot EGW$. Die Regulierung wird im Folgenden als aus zwei unabhängig voneinander ablaufenden Zyklen bestehend betrachtet. Zur Regulierung des Schwallabflusses wird zunächst durch Entleerung eines bereits teilgefüllten Beckens ein Vorschwall gemäss den ökologischen Vorgaben eingeleitet. Sobald die Turbinen angefahren werden und deren Durchfluss den Momentanabfluss aus dem Becken übersteigt, füllt sich das Becken wieder. Der Regulierungszyklus ist abgeschlossen, wenn der Turbinendurchfluss dem Beckenabfluss ins Gewässer entspricht. Der Zyklus zur Regulierung des Sunkabflusses läuft entsprechend in umgekehrter Reihenfolge ab. Das für einen Regulierungszyklus benötigte Beckenvolumen lässt sich anhand der in *Bild 3* schraffiert dargestellten Flächen ermitteln. Im Rahmen der Abschätzungsmethode werden dabei die benötigten Volumina der Zyklen zur Regulierung der Schwall- und Sunkabflüsse addiert. Dieser Ansatz folgt der Annahme, dass der Zyklus zur Regulierung des Schwallabflusses zeitlich unmittelbar an jenen des Sunkabflusses anschliesst. Dabei handelt es sich um eine

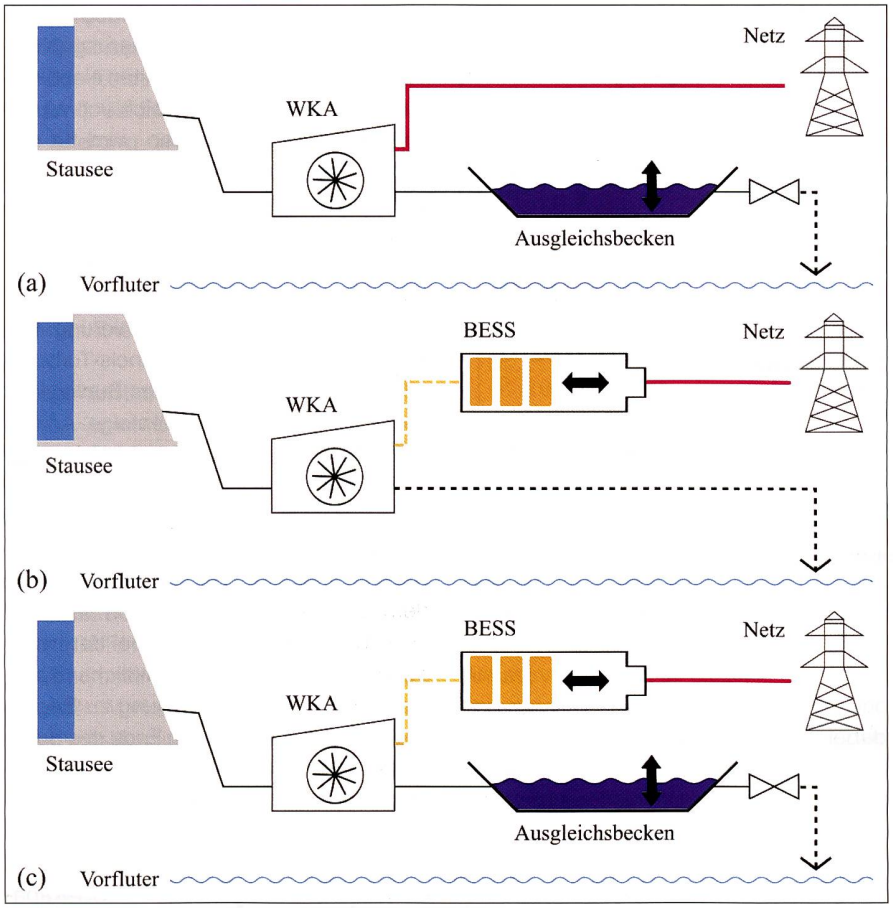

Bild 2: Integration von Schwall-Sunk-Sanierungsmassnahmen: (a) nur Ausgleichsbecken, (b) nur BESS und (c) hybrides Becken-BESS (WKA: Wasserkraftanlage, BESS: Batterie-Energiespeichersystem).

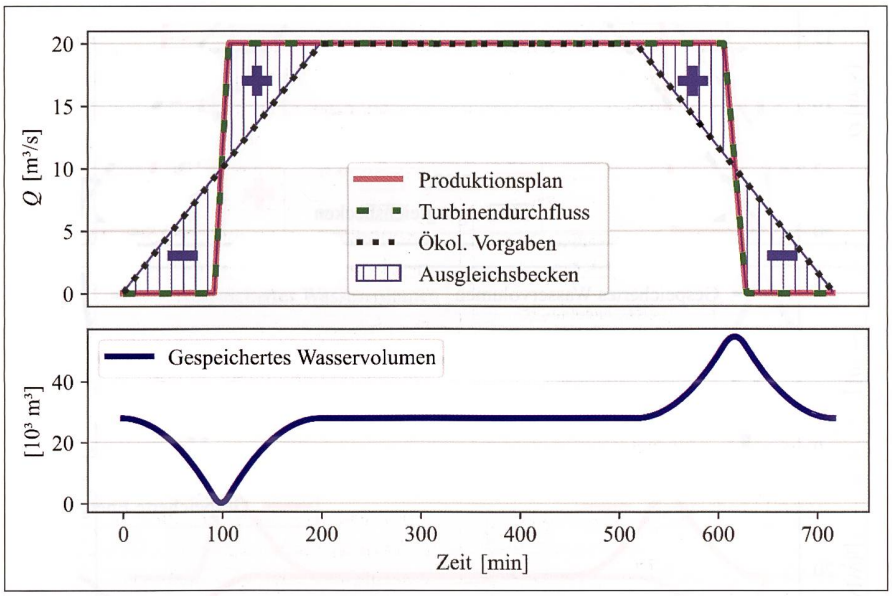

Bild 3: Funktionsprinzip einer Schwall-Sunk-Regulierung mit einem Ausgleichsbecken: Durchfluss (oben) und im Becken gespeichertes Wasservolumen (unten) über die Zeit (–: Entleerung des Beckens, +: Füllen des Beckens).

konservative Annahme, denn durch eine kontinuierliche Entleerung des Beckens zwischen den beiden Zyklen liesse sich das benötigte Volumen im Idealfall um bis zu 50 Prozent reduzieren. Ein geringerer Volumenbedarf bestünde auch für den Fall, dass der Schwallzyklus noch nicht abgeschlossen ist und der Sunkzyklus bereits eingeleitet wird. Im Rahmen der Abschätzungsmethode wurden solche Optimierungen der Beckensteuerung jedoch nicht berücksichtigt.

BESS

Die Steuerung eines BESS zur Regulierung von Schwall-Sunk gestaltet sich sehr ähnlich zu jener eines Ausgleichsbeckens. In *Bild 2b* ist die Integration eines BESS zwischen WKA und Netz dargestellt. Der Turbinenabfluss wird dabei weiterhin direkt in das Gewässer geleitet. Anstelle eines Vorschwalls aus einem Becken wird der Schwallzyklus durch ein kontinuierliches Anfahren der Turbinen gemäss den ökologischen Vorgaben eingeleitet *(Bild 4)*. Es wird dafür zunächst angenommen, dass die Turbinen vollständig von 0 bis 100 Prozent regelbar seien. Zu Beginn des Anfahrens wird noch keine elektrische Energie an das Netz abgegeben, sondern das BESS wird geladen. Wenn die Turbinen eine Teilbeaufschlagung von 50 Prozent erreicht haben und die an das Netz zu liefernde Energie die Momentanproduktion übersteigt, wird die Differenz durch das BESS bereitgestellt, bis der Regulierungszyklus abgeschlossen ist. Für den Sunkzyklus erfolgt die Regulierung erneut in umgekehrter Reihenfolge. Als Vereinfachung wird das BESS zunächst als ideale Batterie angenommen, d. h. dass die geladene Energie 1:1 ohne Verluste wieder entladen werden kann. Um eine möglichst geringe Kapazität des BESS zu erreichen, werden die ge- und entladene Energie ausgeglichen. Die benötigte BESS-Nettokapazität lässt sich analog zum Beckenvolumen anhand der schraffierten Flächen in *Bild 4* bestimmen. Eine Umrechnung von Beckenvolumen V [m³] zu BESS-Nettokapazität C [kWh] kann in erster Näherung durch Multiplikation mit dem Energiegleichwert EGW [kWh/m³] erfolgen: $C = V \cdot EGW$. Für die Berechnung der BESS-Bruttokapazität wurden Aufschläge für den Batteriewirkungsgrad (10 Prozent), die Entladetiefe (20 Prozent) sowie kalendarische Alterung der Batteriezellen (20 Prozent) berücksichtigt. Dadurch, dass für das Laden des BESS mehr Energie produziert werden muss als später genutzt werden kann, muss die WKA mit dieser Sanierungsmassnahme mehr produzieren als ohne. Dieser Umstand wird bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einbezogen. Wie bereits bei den Ausgleichsbecken werden die BESS-Kapazitäten zur Regulierung von Schwall- und Sunkabfluss addiert und Optimierungen zwischen den Regulierungszyklen nicht berücksichtigt. Neben der Kapazität ist auch die installierte Leistung des BESS für die Dimensionierung und insbesondere auch für die Kostenberechnung von Bedeutung. Die zu installierende Leistung ergibt sich aus der maximalen Differenz zwischen der Momentanproduktion der

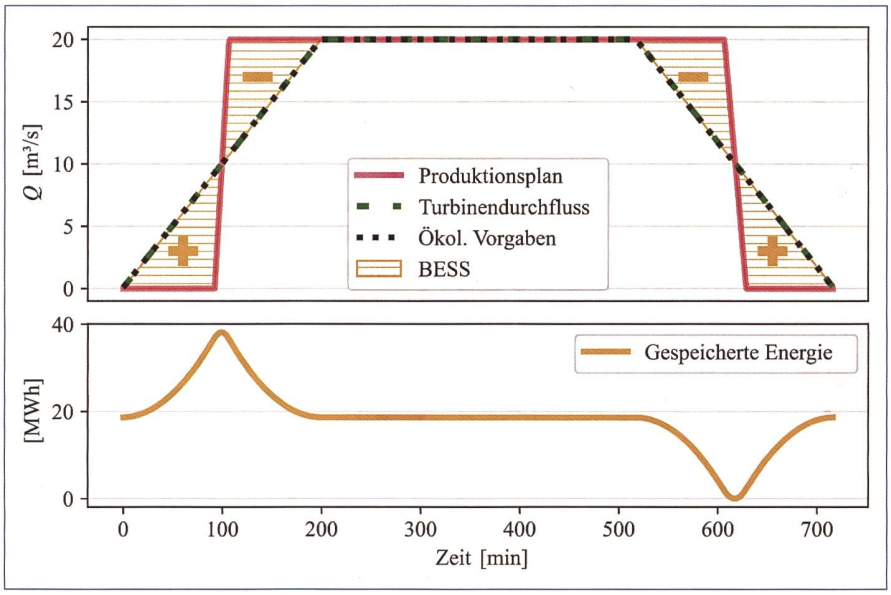

Bild 4: Funktionsprinzip einer Schwall-Sunk-Regulierung mit einem BESS: Durchfluss (oben) und im BESS gespeicherte Energie (unten) über die Zeit (+: Laden des BESS, –: Entladen des BESS).

Turbinen und der an das Netz gelieferten Energie *(Bild 4)*. Für die Abschätzungsmethode wird die Netto- gleich der Bruttoleistung angesetzt. Da Turbinen nicht von 0 bis 100 Prozent regelbar sind und bei abnehmender Beaufschlagung unterhalb eines Minimalwertes erhebliche Einbussen beim Wirkungsgrad aufweisen, würde eine vollständige Sanierung mit einem BESS als Option ausscheiden, wenn die ökologischen Vorgaben ohne Ausnahme einzuhalten sind. Insbesondere Francis-Turbinen haben eine untere Grenze des Betriebsbereichs von ca. 70 Prozent der maximalen Beaufschlagung. Daher wird im Folgenden die Dimensionierung einer hybriden Kombination von Ausgleichsbecken und BESS betrachtet.

Hybrides Becken-BESS

Bild 2c zeigt die kombinierte Sanierung mit Ausgleichsbecken und BESS. Der Einsatz eines BESS ermöglicht es dabei, das Beckenvolumen gegenüber einer vollständigen Sanierung mit einem Ausgleichsbecken zu reduzieren. In den *Bildern 5 und 6* sind die Regulierungsschemata eines hybriden Becken-BESS für Pelton- bzw. Francis-Turbinen dargestellt. Bei der Schwallregulierung für Pelton-Turbinen wird ein Vorschwall durch ein vergleichsweise kleines Ausgleichsbecken eingeleitet, bevor die Turbine direkt zur unteren Grenze ihres Betriebsbereichs bei einer Teilbeaufschlagung von ca. 20 Prozent hochgefahren wird *(Bild 5)*. Nach einer kurzen Dauer konstanter Produktion werden die Turbinen gemäss den ökologischen Vorgaben weiter hochgefahren bis die gewünschte Gesamtleistung erreicht ist. Die Regulierung erfolgt dabei analog einer vollständigen BESS-Sanierung. Die schraffierten Flächen in *Bild 5* zeigen eine deutliche Reduktion des benötigten Beckenvolumens im Vergleich zu einer vollständigen Sanierung mit einem Ausgleichsbecken. Demgegenüber entspricht die BESS-Kapazität mit der vorgestellten Abschätzungsmethode jedoch jener einer vollständigen Sanierung mit einem BESS. Da Francis-Turbinen einen eingeschränkteren Regelbereich von ca. 70 bis 100 Prozent aufweisen, wird für das hybride Becken-BESS ein im Vergleich zum Ansatz für Pelton-Turbinen grösseres Beckenvolumen benötigt *(Bild 6)*. Die Kapazität des BESS kann in diesem Fall jedoch kleiner dimensioniert werden als bei einer vollständigen BESS-Sanierung. Sowohl für Pelton- als auch Francis-Turbinen erfolgt die Regulierung eines Sunkzyklus in entgegengesetzter Reihenfolge. Analog zu einem reinen Ausgleichsbecken oder BESS liesse sich der Betrieb des hybriden Becken-BESS zwischen Schwall- und Sunkzyklen optimieren, um das Beckenvolumen und/oder die BESS-Kapazität zu reduzieren. Gerade hinsichtlich des Ausgleichsbeckens ergibt sich bei der hybriden Variante ein gewisser zeitlicher Spielraum, da die Beckenregelung zu Beginn des Schwallzyklus und am Ende des Sunkzyklus erfolgt *(Bilder 5 und 6)*. Ein optimierter Betrieb zwischen den Zyklen wird jedoch im Rahmen der Abschätzungsmethode auch für das hybride Becken-BESS nicht berücksichtigt und die BESS-Kapazitäten der einzelnen Zyklen addiert. Für

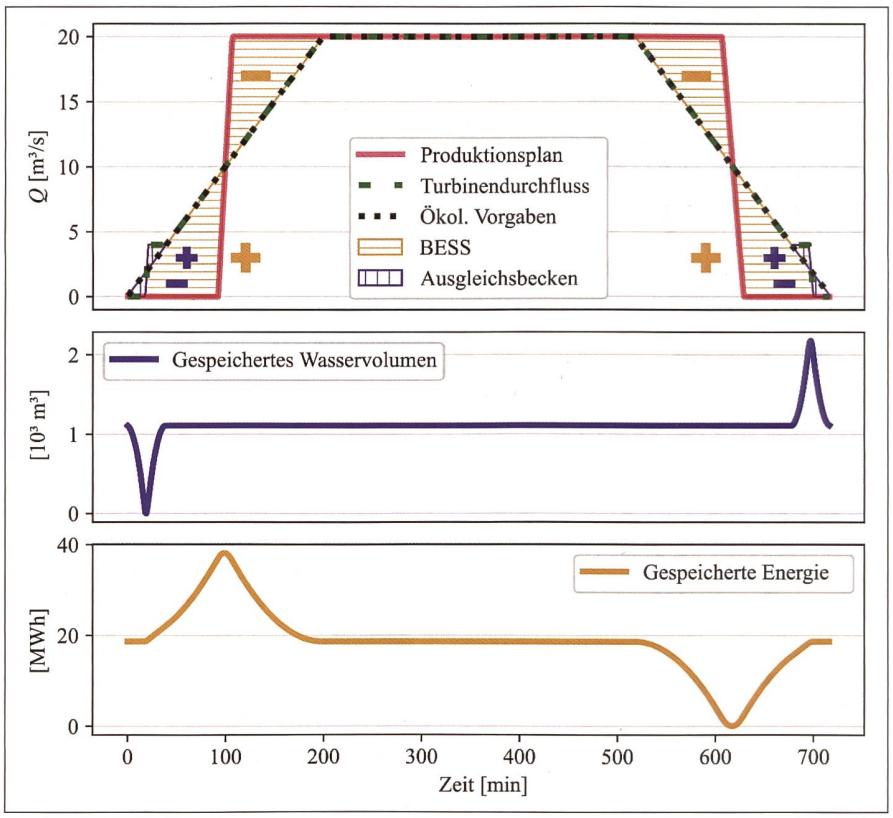

Bild 5: Funktionsprinzip einer Schwall-Sunk-Regulierung mit einem BESS-Becken-Hybrid an einer WKA mit Pelton-Turbine: Durchfluss (oben), im Becken gespeichertes Wasservolumen (Mitte) und im BESS gespeicherte Energie (unten) über die Zeit (–: Entleerung des Beckens, +: Füllen des Beckens bzw. +: Laden des BESS, –: Entladen des BESS).

die Berechnung der Bruttokapazität der BESS-Komponente sind ebenfalls Aufschläge für den Batteriewirkungsgrad (10 Prozent), die Entladetiefe (20 Prozent) sowie Alterung der Batteriezellen (20 Prozent) zu berücksichtigen; auch die Bestimmung der installierten Netto- bzw. Bruttoleistung des BESS leitet sich aus der maximalen Differenz der Momentanproduktion der Turbinen und der an das Netz gelieferten Energie ab.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Da die Kosten für Ausgleichsbecken in hohem Masse standortabhängig sind, erfolgt im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kein direkter Vergleich einer vollständigen Sanierung mit einem Becken und einem hybriden Becken-BESS. Es wird stattdessen ein Gleichgewichtspreis *GGP* [CHF/m³] ermittelt, für welchen die Gesamtkosten der BESS-Komponente der hybriden Variante durch das gegenüber einer vollständigen Beckensanierung eingesparte Volumen geteilt wird. Der *GGP* lässt sich dann mit den spezifischen Einheitspreisen eines Ausgleichsbecken an einem bestimmten Standort vergleichen.

Die Einheitskosten eines BESS pro Kilowattstunde [kWh] lassen sich gemäss dem Ansatz von *Cole et al. (2021)* in Abhängigkeit der installierten Kapazität [kWh] und Leistung [kW] berechnen. D.h. bei zwei BESS mit gleicher Kapazität ist jenes teurer, welches die höhere Leistung hat, also schneller ge- bzw. entladen werden kann. *Cole et al. (2021)* geben die Einheitskosten pro Kilowattstunde für drei Preisszenarien «Hoch», «Mittel» und «Tief» an. *Bild 7* zeigt als Beispiel die Preisentwicklung bis 2050 für ein 2-Stunden-BESS, d.h. das System kann in 2 Stunden vollständig ge- bzw. entladen werden. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Fallstudien wurden jeweils die zu installierenden BESS-Brutto-Kapazitäten bzw. -leistungen berücksichtigt.

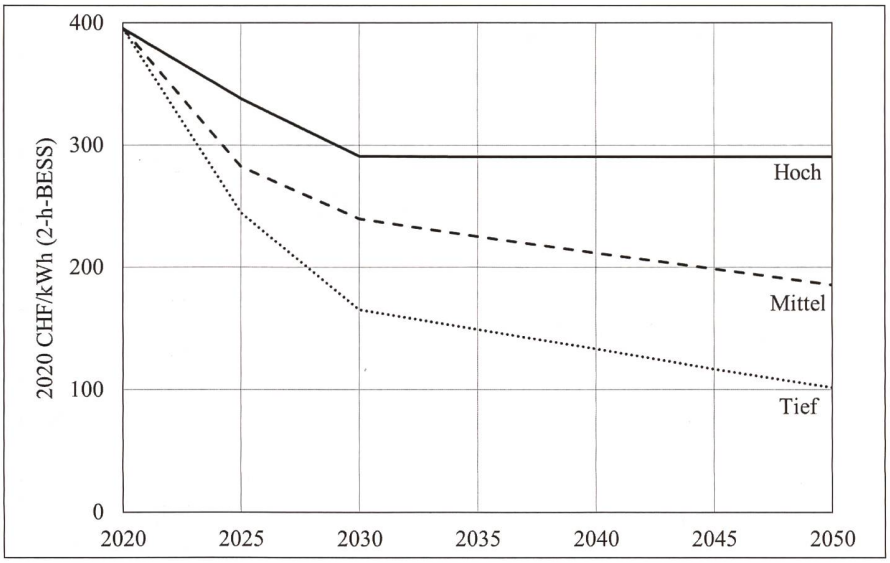

Bild 7: Preisszenarien für ein 2-Stunden-BESS, abgeleitet nach Cole et al. (2021), 1 $ ≈ 0,9 CHF.

Die Betriebslebensdauern von Ausgleichsbecken und BESS unterscheiden sich erheblich. Während Ausgleichsbecken als wasserbauliche Anlagen mehrere Jahrzehnte betrieben werden können, erreichen BESS das Ende ihrer Lebensdauer bereits nach ca. 10 bis 15 Jahren; unter günstigen Randbedingungen auch etwas später *(Cole et al., 2021)*. Daher werden BESS nach dem Erreichen des Endes ihrer Betriebslebensdauer, welches meist mit einer Reduktion der ursprünglichen Kapazität um 20 Prozent definiert wird *(Stroe et al., 2015, Naumann et al., 2018)*, ersetzt. Ein etwaiger Restwert oder Teilersatz der BESS-Komponenten nach Ende der Lebensdauer wurde für das Abschätzungsverfahren nicht berücksichtigt. Da der Ansatz von *Cole et al. (2021)* nur Preisszenarien von 2020 bis 2050 angibt *(Bild 7)*, wurden die BESS-Kosten ab 2050 als konstant angenommen. Neben den Kosten für die BESS-Erneuerung wurden auch jährliche Betriebskosten in Höhe von 5,4 CHF/kW sowie die Produktionsverluste infolge des BESS-Wirkungsgrades mit 0,05 CHF/kWh angesetzt. Im Rahmen einer dynamischen Investitionsrechnung wurden ab 2030 alle Zahlungsströme über einen Zeitraum von 40 Jahren mit internen Zinssätzen von 3 Prozent bzw. 5 Prozent auf das Jahr 2020, dem Referenzjahr der Preisszenarien nach *Cole et al. (2021)*, diskontiert, um schliesslich den GGP zu berechnen.

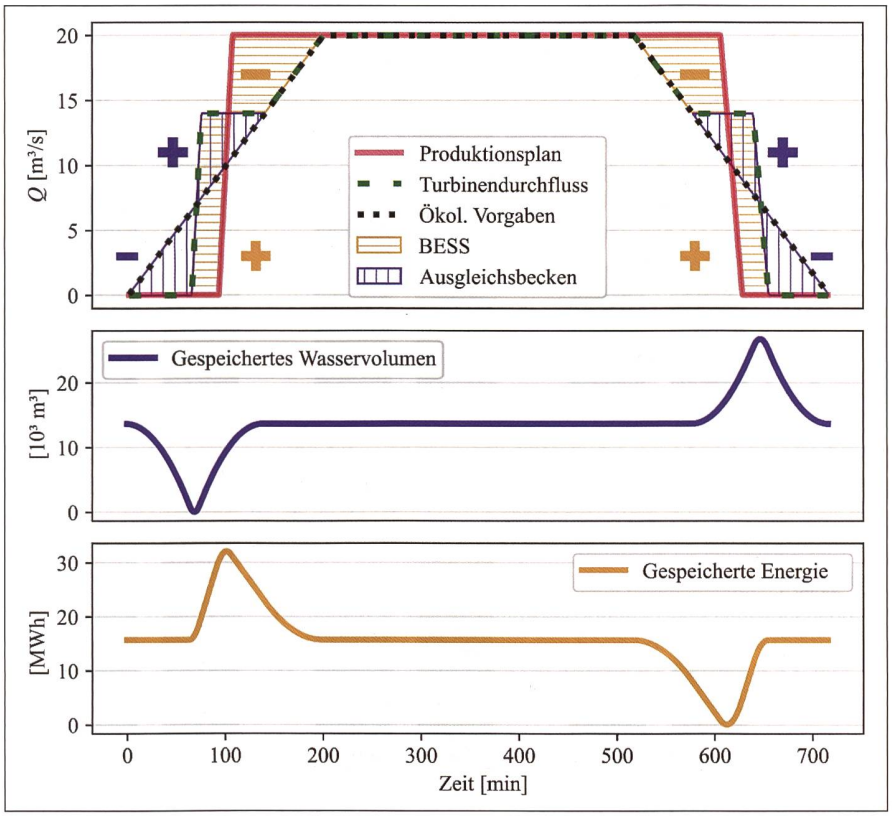

Bild 6: Funktionsprinzip einer Schwall-Sunk-Regulierung mit einem BESS-Becken-Hybrid an einer WKA mit Francis-Turbine: Durchfluss (oben), im Becken gespeichertes Wasservolumen (Mitte) und im BESS gespeicherte Energie (unten) über die Zeit (–: Entleerung des Beckens, +: Füllen des Beckens bzw. +: Laden des BESS, –: Entladen des BESS).

Fallstudien

Eine Übersicht der technischen Daten der drei untersuchten Wasserkraftanlagen (WKA) A, B und C ist *Tabelle 1* zu entnehmen. Der maximale Turbinendurchfluss und die installierte Leistung sind dabei als gerundete Werte angegeben. In WKA A und B sind Francis-Turbinen installiert, während WKA C Pelton-Turbinen aufweist. Zur Vereinfachung wurden allerdings alle drei WKA als Anlagen mit einer einzelnen Maschineneinheit betrachtet. Dadurch ergeben sich als untere Grenzen des Regelbereichs 70 Prozent bzw. 20 Prozent. Die Energiegleichwerte EGW liegen zwischen 0,35 und 2,35 kWh/m³. Die ökologischen Vorgaben für WKA B beziehen sich sowohl auf Schwall- als auch Sunkabfluss, während bei WKA A und C nur der Sunkabfluss zu regulieren ist. Alle Vorgaben bezüglich Sunkabfluss unterliegen einer zusätzlichen saisonalen Einschränkung zwischen Mitte März und Mitte Mai, welche den Sunkabfluss auf 10 Prozent der Werte des übrigen Jahres reduziert. Die für eine Dimensionierung jeweils massgeblichen Bemessungsszenarien wurden anhand des 95. Perzentils der Ereignisanalyse abgeleitet, d. h. die ökologischen Vorgaben können in 95 Prozent der Regulierungsereignisse eingehalten werden.

Bild 8 zeigt die durch den Einsatz eines hybriden Becken-BESS mögliche Volumenreduktion des Ausgleichsbeckens gegenüber einer vollständigen Sanierung mit einem Ausgleichsbecken. Aufgrund des eingeschränkten Regelbereichs der Francis-Turbinen in WKA A und B beträgt die Volumenreduktion «nur» 51 Prozent im Vergleich zu den 96 Prozent bei WKA C mit einer Pelton-Turbine *(Tabelle 1)*. Aus *Bild 8* ist ferner ersichtlich, dass das Verhältnis von installierter BESS-Kapazität zu -Leistung nicht konstant ist. *Bild 9* zeigt die GGP als Ergebnis der in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung untersuchten Szenarien. In Abhängigkeit der Preisszenarien, der Betriebslebensdauer des BESS und des internen Zinssatzes liegen die GGP ungefähr zwischen 350 und 1000 CHF/m³, 2000 und 5600 CHF/m³ bzw. 1000 und 3000 CHF/m³ für die WKA A, B bzw. C. Die Analyse der Produktionsdaten und Regulierungsereignisse ermöglicht darüber hinaus Rückschlüsse auf die BESS-Betriebs- und Standzeiten. Während das BESS von WKA A im Durchschnitt einmal pro Tag in Betrieb genommen werden müsste, wäre dies bei WKA B und C wesentlich seltener der Fall. *Bild 10* verdeutlicht, dass der BESS-Betrieb zur Schwall-Sunk-Regulierung saiso-

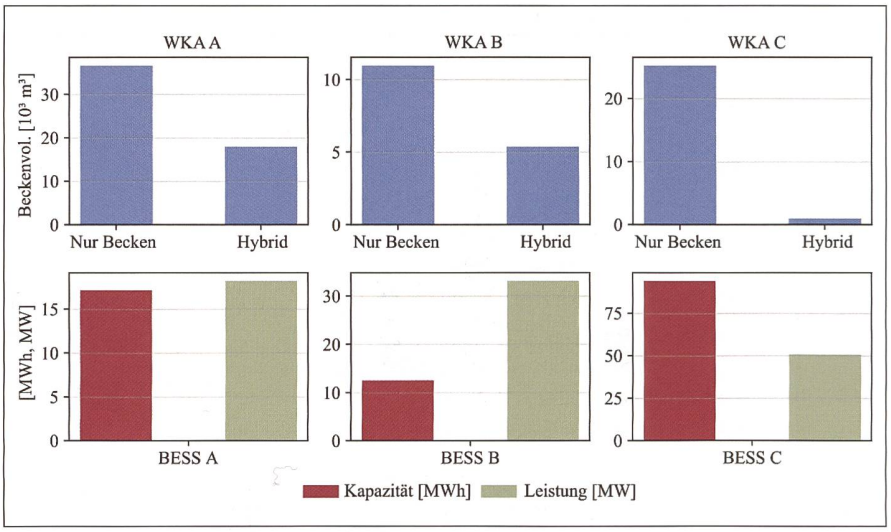

Bild 8: Reduktionspotenzial der Ausgleichsbecken durch hybrides Becken-BESS (oben) und dazugehörige BESS-Kapazitäten und -Leistungen für WKA A, B und C.

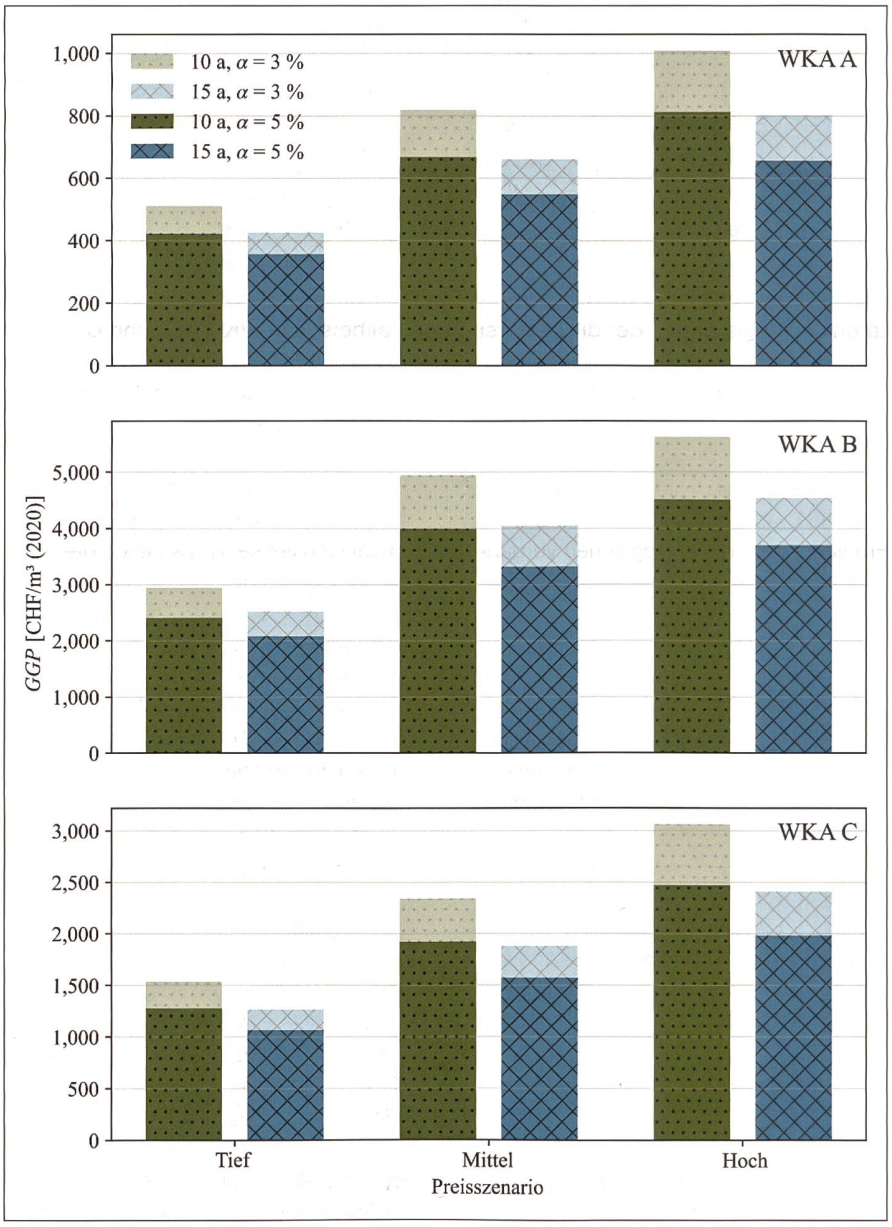

Bild 9: Spezifische Gleichgewichtspreise GGP für das Ersetzen eines Kubikmeters Beckenvolumen in Abhängigkeit von Preisszenario, BESS-Betriebslebensdauer und internem Zinssatz für WKA A, B und C.

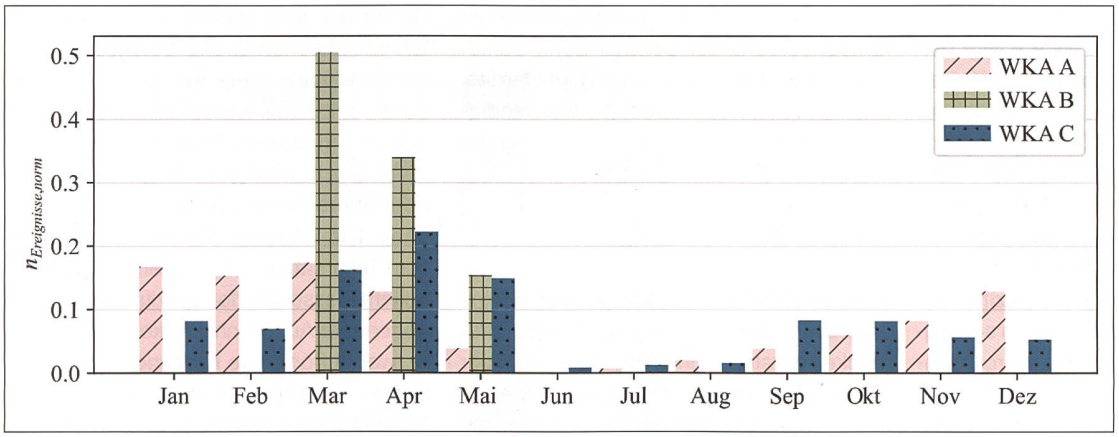

Bild 10: Relative saisonale Auftretenshäufigkeit von Regulierungsereignissen für WKA A, B und C.

	Einheit	WKA A	WKA B	WKA C
Turbinentyp	[-]	Francis	Francis	Pelton
Ausbaudurchfluss	[m^3/s]	60	20	20
Installierte Leistung	[MW]	90	60	190
Energiegleichwert	[kWh/m^3]	0.35	0.86	2.35
Ökol. Vorgaben	[-]	Sunk	Schwall + Sunk	Sunk
Beckenvolumen (nur Becken)	[$10^3 m^3$]	37	11	25
BESS-Kapazität (nur BESS)	[MWh]	20	15	94
BESS-Leistung (nur BESS)	[MW]	12	24	51
Beckenvolumen (Hybrid)	[$10^3 m^3$]	18	5	1
BESS-Kapazität (Hybrid)	[MWh]	17	13	94
BESS-Leistung (Hybrid)	[MW]	18	42	51
Volumenreduktion	[%]	51	51	96

Tabelle 1: Technische Daten und abgeschätzte Beckenvolumina, BESS-Kapazitäten und -Leistungen der drei untersuchten Fallbeispiele WKA A, B und C.

nal beeinflusst wird. Allgemein sind in den Sommermonaten weniger Regulierungen notwendig. Im Falle von WKA B treten Regulierungsereignisse ausschliesslich in den Monaten März, April und Mai auf, d. h. im Frühjahr, wenn die ökologischen Vorgaben wesentlich strenger sind.

Diskussion

Die vorgestellte Abschätzungsmethode basiert auf einer Reihe von Vereinfachungen und Annahmen. Daher sind bei einer Anwendung der Methode die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- Die Abschätzungsmethode umfasst keine zeitabhängige, dynamische Regelstrategie. Um eine effiziente Steuerung von Ausgleichsbecken und BESS zu ermöglichen, wird z. B. eine gewisse Vorlaufzeit benötigt, um eine Vorentleerung des Beckens zu starten oder das BESS durch eine Vorproduktion zu laden. Für eine standortspezifische Detailuntersuchung sollte eine dynamische Regelstrategie implementiert werden.
- Der Wirkungsgrad sowohl von Turbinen als auch BESS wurde als konstant angenommen. Im Vergleich zum für die Abschätzungsmethode vorausgesetzten Ein-Turbinen-System kann bei einer WKA mit mehreren Turbinen die Effizienz über den ganzen Regelbereich verbessert werden. Zusätzlich liesse sich so auch die untere Grenze des Regelbereichs reduzieren, wodurch sich im Falle des hybriden Becken-BESS geringere Beckenvolumina ergäben. Insbesondere bei Anlagen mit Francis-Turbinen wäre dies von Vorteil. Es ist zudem zu berücksichtigen, dass reduzierte An- und Abfahrgradienten einen positiven Einfluss auf die Lebensdauer der Turbinen haben können.
- Die angesetzten BESS-Preisszenarien berücksichtigen neue Batteriezellen, und das Ende von deren Betriebslebensdauer wird allgemein bei 80 Prozent der ursprünglich installierten Kapazität angesetzt. Es bestehen allerdings auch Überlegungen, die Batterien von E-Autos nach Ende ihrer Betriebslebensdauer für stationäre BESS-Anwendungen einzusetzen. Die Option des Einsatzes gebrauchter Batteriezellen könnte zusätzliche Kosteneinsparungen ermöglichen.
- Die ökologischen Vorgaben beziehen sich nur auf die Einhaltung maximaler Schwall- bzw. Sunkgradienten. Ein maximaler Gesamtabfluss wird beispielsweise nicht berücksichtigt.
- Der Einsatz von BESS zur Schwall-Sunk-Sanierung soll die ökologischen Auswirkungen der Wasserkraftnutzung reduzieren. Die Abschätzungsmethodik fokussiert auf technische und wirtschaftliche Aspekte eines (teilweisen) Ersatzes von Ausgleichsbecken durch BESS; es wird kein Vergleich der direkten Umweltauswirkungen des Baus bzw. der Produktion von Ausgleichsbecken bzw. BESS durchgeführt. Während im Falle von Ausgleichsbecken die direkten Auswirkungen als eher lokal bis regional begrenzt anzunehmen sind, können diese bei der ressourcen- und energieintensiven Produktion von BESS auch zu grossen Teilen im Ausland anfallen *(Dehghani-Sanij et al., 2019)*.

Die Vereinfachungen und Annahmen der Abschätzungsmethodik sorgen tendenziell für eine Überschätzung der Kosten für die BESS-Komponente bei einer Sanierung mit einem hybriden Becken-BESS und damit auch zu einem höheren GGP. Der GGP ist stark von den angesetzten Preisszenarien abhängig. So beträgt die Zunahme des GGP von Szenario «Tief» zu «Hoch» bei den untersuchten Fallbeispielen ca. 80 bis 100 Prozent. Die Unsicherheiten infolge der angenommenen BESS-Betriebslebensdauer und des internen Zinssatzes sind wesentlich geringer. Werden alle variierten Parameter berücksichtigt, nehmen die jeweiligen GGP vom niedrigsten zum höchsten Wert um ca. 200 Prozent zu. Da die Wirtschaftlichkeit eines hybriden Becken-BESS letztlich von den Kosten für ein Ausgleichsbecken als Alternative abhängt, ist eine abschliessen-

de Beurteilung in hohem Masse standortspezifisch. Der GGP von WKA A liegt beispielsweise bereits im Bereich der Kosten für ein Ausgleichsbecken in Kavernenbauweise mit ca. 500 bis 800 CHF/m³ *(Widmann, 2008; Bieri et al., 2016)*. Doch auch bei WKA, bei welchen in Anlagennähe nur ein begrenztes Ausgleichsbeckenvolumen realisiert werden kann und bei einer notwendigen Vergrösserung die spezifischen Grenzkosten pro Einheitsvolumen sprunghaft ansteigen würden, kann der ergänzende Einsatz eines BESS interessant werden, auch wenn das vollständige Reduktionspotenzial hinsichtlich des Beckenvolumens nicht vollständig ausgeschöpft wird. Die Wirtschaftlichkeit eines hybriden Becken-BESS kann weiterhin verbessert werden, wenn das BESS nicht ausschliesslich zur Schwall-Sunk-Regulierung genutzt wird. Wie in *Bild 10* ersichtlich, sind die jeweiligen BESS nicht permanent für diese eine Aufgabe in Betrieb. Durch Mehrfachnutzungen wie beispielsweise zur Frequenzregulierung oder Strom-Arbitrage können Einnahmen generiert werden, die den GGP senken würden. Insbesondere in der Schweiz stellt sich allerdings die Frage, wie mögliche Mehrfachnutzungen bei der Entschädigung der Schwall-Sunk-Sanierungmassnahmen berücksichtigt werden. Ähnlich verhält es sich bei der Notwendigkeit einer regelmässigen Erneuerung der Batteriezellen nach 10 bis 15 Jahren.

Fazit

Aus technischer Sicht können BESS eine interessante Ergänzung für Ausgleichsbecken darstellen, insbesondere wenn der für ein Becken zur Verfügung stehende Platz sehr begrenzt ist. An Anlagen mit Pelton-Turbinen ergibt sich dabei ein grösseres Potenzial zur Reduktion des Beckenvolumens als bei Francis-Turbinen. Da der Anteil von Pelton-Turbinen am gesamten Turbinenpark in der Schweiz im internationalen Vergleich besonders hoch ist *(Morf, 2021; Mühlmann, 2021)*, vor allem auch an Hochdruck-Speicherkraftwerken, ist die Verwendung von BESS a priori für die nationale Schwall-Sunk-Sanierung von Interesse. Gleichzeitig weisen Anlagen mit Pelton-Turbinen jedoch tendenziell einen höheren Energiegleichwert auf, wodurch auch die benötigte BESS-Kapazität steigt. Die für die drei Fallbeispiele abgeschätzten spezifischen Grenzkosten, ab denen der Teilersatz eines Ausgleichsbeckens durch ein BESS wirtschaftlich ist, liegen jedoch am oberen Ende der Baukostenspanne von heutigen Ausgleichsbecken oder überschreiten diese um ein Mehrfaches. Die Wirtschaftlichkeit eines BESS zum Teilersatz eines Beckens ist daher in hohem Masse standortspezifisch. Da BESS gegenüber Ausgleichsbecken auch weitere, wertschöpfende Nutzungen zulassen, liessen sich höhere Kosten jedoch zumindest teilweise wieder kompensieren. Offene Fragen hinsichtlich des Einsatzes von BESS zur Schwall-Sunk-Sanierung umfassen unter anderem die Regelbarkeit der Turbinen entsprechend ökologischer Vorgaben, den BESS-Betrieb sowie Aspekte der Finanzierung.

Danksagung

Die Autoren danken der Axpo AG und insbesondere Martin Kuhn für die Bereitstellung der Daten der untersuchten Anlagen.

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.
Beuse, M., Steffen, B., Schmidt, T. S. (2020). Projecting the competition between energy-storage technologies in the electricity sector. Joule, 4(10), 2162–2184.
Bieri, M., Zünd, B., Gasser, M., Schleiss, A. (2016). Intervention strategies to mitigate hydropeaking: Two case studies from Switzerland. In HYDRO 2016, International Conference and Exhibition «Achievements, opportunities and challenges».
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(4), 257–264.
Cole, W., Frazier, A. W., Augustine, C. (2021). Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2021 Update. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20–79236.
Dehghani-Sanij, A. R., Tharumalingam, E., Dusseault, M. B., Fraser, R. (2019). Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 104, 192–208.
Morf, S. (2021). Einsatz verschiedener Wasserturbinen an Schweizer Wasserkraftanlagen. Bachelorarbeit, VAW, ETH Zürich (unveröffentlicht).
Mühlmann, S. (2021). Einsatz verschiedener Wasserturbinen an Schweizer Wasserkraftanlagen. Bachelorarbeit, VAW, ETH Zürich (unveröffentlicht).
Naumann, M., Schimpe, M., Keil, P., Hesse, H. C., Jossen, A. (2018). Analysis and modeling of calendar aging of a commercial LiFePO4/graphite cell. Journal of Energy Storage, 17, 153–169.
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(1), 1–8.
Stroe, D. I., Swierczynski, M., Stroe, A. I., Teodorescu, R., Laerke, R., Kjaer, P. C. (2015). Degradation behaviour of Lithium-ion batteries based on field measured frequency regulation mission profile. In 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (pp. 14–21). IEEE.
Widmann, W. (2008). Schwallreduzierung durch Zwischenbecken bei Speicherkraftwerken. Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft, 60(3), 65–72.
Wyss, C. R., Haas, J., Vollenweider, S. (2022). Können Batterien zur ökologischen Sanierung von Schwall-Sunk einen Beitrag leisten?. Wasser Energie Luft WEL, 114(3).

Autoren:

Gereon Höfkes, ehemals ETHZ-Masterstudent an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), 8093 Zürich, gereon.hoefkes@alumni.ethz.ch
Frederic Evers, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), 8093 Zürich, evers@vaw.baug.ethz.ch
Benjamin Hohermuth, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), 8093 Zürich, hohermuth@vaw.baug.ethz.ch
Robert Boes, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), 8093 Zürich, boes@vaw.baug.ethz.ch