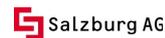


MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWEERTES
ÖSTERREICH

bmlfuwgv.at

SuREmMa
SUSTAINABLE RIVER
MANAGEMENT –
ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE
UND UMWELTRELEVANTE
BEWERTUNG MÖGLICHER
SCHWALLDÄMPFENDER
MASSNAHMEN
FORSCHUNGSBERICHT



IMPRESSUM



Medieninhaber und Herausgeber:
BUNDESMINISTERIUM
FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT,
UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT
Stubenring 1, 1010 Wien
www.bmlfuw.gv.at

Text und Inhalte: Stefan Auer (Universität für Bodenkultur Wien), Simon Führer (Universität für Bodenkultur Wien, alpS GmbH), Martin Fuhrmann (Universität für Bodenkultur Wien, alpS GmbH), Franz Greimel (Universität für Bodenkultur Wien, alpS GmbH), Helmut Habersack (Universität für Bodenkultur Wien), Melanie Haslauer (Universität für Bodenkultur Wien), Christoph Hauer (Universität für Bodenkultur Wien), Patrick Holzapfel (Universität für Bodenkultur Wien, alpS GmbH), Jürgen Neubarth (e3 consult), Markus Pflieger (VERBUND Hydro Power GmbH), Stefan Schmutz (Universität für Bodenkultur Wien), Bernhard Zeiringer (Universität für Bodenkultur Wien, alpS GmbH)

Beteiligung: Hansjörg Gober (KELAG Kärntner Elektrizität AG), Bernhard Gotthardt (Salzburg AG), Thomas Höckner (ÖBB Infrastruktur AG, TIWAG Tiroler Wasserkraft AG), Daniel Hosp (TIWAG Tiroler Wasserkraft AG), Silvia Humer (ÖBB Infrastruktur AG), Gundula Konrad (VERBUND Hydro Power GmbH), Veronika Koller-Kreimel (BMLFUW), Dieter Kreikenbaum (Österreichs Energie), Gernot Ladinig (Vorarlberger Illwerke AG), Thomas Luschnig (KELAG Kärntner Elektrizität AG), Peter Matt (Vorarlberger Illwerke AG), Rupert Nocker (Salzburg AG), Otto Pirker (VERBUND AG), Ludwig Piskernik (ÖBB Infrastruktur AG), Simon Preuschoff (Vorarlberger Illwerke AG), Walter Reckendorfer (VERBUND Hydro Power GmbH), Robert Reindl (TIWAG Tiroler Wasserkraft AG), Hagen Schmöllner (Vorarlberger Illwerke AG), Christoph Wulz (TIWAG Tiroler Wasserkraft AG)

Bildnachweis: Bregenzenerach bei Kennelbach/Franz Greimel (Titelbild); Google Inc. – Google Earth (S.31); Hintergrundbild: Basemap (S.40); BMLFUW/ Pixhunter (S.91)

Gestaltungskonzept: WIEN NORD Werbeagentur
Gestaltung: Christin Haida (alpS GmbH), Ingrid Eder (BMLFUW)

Zitiervorschlag: Greimel, F., Neubarth J., Fuhrmann, M., Führer, S., Habersack H., Haslauer, M., Hauer, C., Holzapfel, P., Auer, S., Pflieger, M., Schmutz, S. & Zeiringer, B. (2017): SuREmMa, Sustainable River Management - Energiewirtschaftliche und umweltrelevante Bewertung möglicher schwalldämpfender Maßnahmen. Forschungsbericht, Wien, 92 Seiten.

Alle Rechte vorbehalten.
Wien, Juli 2017



Original wurde gedruckt von: Zentrale Kopierstelle des BMLFUW,
UW-Nr. 907, nach der Richtlinie „Druckerzeugnisse“ des
Österreichischen Umweltzeichens.

ALLGEMEINES

PROJEKTTITEL

SuREmMa – **Sustainable Rivermanagement** – **Energiewirtschaftliche und umweltrelevante Bewertung möglicher schwalldämpfender Maßnahmen**

PROJEKTFÖRDERUNG

Das Projekt wurde innerhalb des österreichischen K1 Zentrums „alpS – Centre for Climate Change Adaptation“ durchgeführt. Das K1 Zentrum alpS ist Teil des Förderprogramms COMET – Competence Centers for Excellent Technologies, gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), das Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (BWF), sowie durch die Länder Tirol und Vorarlberg. Das COMET Programm wird durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt. Zusätzlich finanziert wurde das Projekt durch Bar- und Eigenleistung der Konsortialpartner KELAG Kärntner Elektrizität AG, ÖBB Infrastruktur AG, Österreichs Energie, Salzburg AG, TIWAG Tiroler Wasserkraft AG, VERBUND Hydro Power GmbH und Vorarlberger Illwerke AG/Vorarlberger Kraftwerke AG.

PROJEKTKONSORTIUM

Das Projektkonsortium bestand aus alpS GmbH, e3 consult und der Universität für Bodenkultur Wien mit dem Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement (IHG) sowie dem Institut für Wasserwirtschaft, Hydrobiologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW). Vertreter der Energiewirtschaft waren KELAG Kärntner Elektrizität AG, ÖBB Infrastruktur AG, Österreichs Energie, Salzburg AG, TIWAG Tiroler Wasserkraft AG, VERBUND Hydro Power GmbH und Vorarlberger Illwerke AG/Vorarlberger Kraftwerke AG. Das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) stand beratend zu Seite.

PROJEKTDATEN

Projektbeginn: 1.9.2014, Projektende: 31.3.2017

Wissenschaftliche Leitung: Stefan Schmutz, Jürgen Neubarth, Christoph Hauer, Helmut Habersack

Fachliche Unterstützung: Veronika Koller-Kreimel

Projektkoordination: Christin Haida, Katrin Schneider

Projektbearbeitung: Simon Führer, Martin Fuhrmann, Hansjörg Gober*, Bernhard Gotthardt*, Franz Greimel, Christoph Hauer, Melanie Haslauer, Daniel Hosp*, Patrick Holzapfel, Thomas Höckner*, Silvia Humer*, Fabian Jung, Gundula Konrad, Dieter Kreikenbaum, Gernot Ladinig, Thomas Luschnig*, Peter Matt*, Rupert Nocker*, Markus Pflieger*, Jürgen Neubarth*, Otto Pirker, Ludwig Piskernik*, Simon Preuschhoff*, Walter Reckendorfer, Robert Reindl*, Hagen Schmöllner*, Christoph Wulz*, Bernhard Zeiringer

* Mitglied der Arbeitsgemeinschaft Energiewirtschaft

ZUSAMMENFASSUNG

IM SINNE EINER NACHHALTIGEN WASSERKRAFTNUTZUNG zur Erreichung der Klimaziele ist es notwendig, sich der Herausforderung zu stellen, die Umweltziele der EU Wasserrahmenrichtlinie zu erreichen, ohne dadurch im Falle von als „erheblich verändert“ ausgewiesene Gewässerabschnitte signifikante Einschränkungen der Gewässernutzung zu verursachen. Damit möglichst sinnvolle und effiziente Lösungswege identifiziert werden können, ist es nötig wissenschaftliche Fakten bzw. klare Tatsachen zu ermitteln und das zugrundeliegende Wirkungsgefüge zu verstehen. Hierzu wurden in einer langjährigen Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Stromerzeuger und Behörden bereits Vorarbeiten geleistet, die eine Basis für ein gegenseitiges vertieftes Verständnis und Akzeptanz der unterschiedlichen Interessen gebildet haben. Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt wird eine Methode erarbeitet, die ökologische Auswirkungen bzw. das ökologische Verbesserungspotential einzelner schwalldämpfender Maßnahmen den entsprechenden systemrelevanten sowie volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen gegenüber stellt. Darauf aufbauend können in einem nächsten Schritt differenzierte Maßnahmenpakete ausgearbeitet werden, die zeitlich und örtlich an die lokalen Gegebenheiten anpasst sind und die Erreichung des Zielzustandes gewährleisten sollen.

Die Europäische Union hat mit ihren Energie- und Klimapaketen sowie ihrem Fahrplan für eine CO₂-arme Wirtschaft bis 2050 die wesentlichen Randbedingungen für die zukünftige Entwicklung des europäischen und damit auch des österreichischen Energiesystems mit Zielen für Klimaschutz, erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Versorgungssicherheit vorgegeben und diese Ziele im Clean Energy Package im November 2016 noch bestärkt. Durch den damit zusammenhängenden starken Ausbau der Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie steigen die Anforderungen an den verbleibenden Kraftwerkspark insbesondere in Bezug auf einen flexibleren Einsatz zur Ausregelung der unvermeidlichen Erzeugungsschwankungen erneuerbarer Energien. Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke stellen aus energiewirtschaftlicher Sicht auf Grund ihrer schnellen Regelfähigkeit eine ideale und ebenfalls erneuerbare Ergänzung zur Wind- und Solarstromerzeugung dar. Sie können beispielsweise im Vergleich zu Kohle- und Gaskraftwerken nicht nur deutlich flexibler eingesetzt werden, sondern es entstehen für die Bereitstellung der für die Systemsicherheit essentiellen Versorgungsaufgaben auch keine zusätzlichen CO₂-Emissionen. Auf Grund der in Österreich besonders günstigen topografischen und hydrologischen Voraussetzungen stellen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke mit einem Anteil von 33% an der insgesamt installierten Kraftwerksleistung von knapp 24.500 MW (2014) das Rückgrat der Stromversorgung dar. Österreichische Speicherkraftwerke haben dabei nicht nur auf nationaler Ebene eine hohe Bedeutung für die Gewährleistung der Systemstabilität und damit für die Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit, sondern sie unterstützen innerhalb des europäischen Stromsystems bereits heute maßgeblich die effiziente Integration der fluktuierenden erneuerbaren Energien.

Der flexible Einsatz von Speicherkraftwerken kann aber auch zu kurzfristigen Abflussschwankungen in den Gewässern, dem sogenannten Schwall, führen. Schwall stellt eine Beeinflussung der natürlichen Abflussdynamik eines Gewässers dar und kann vor allem durch Strandungsphänomene beim Abflussrückgang sowie vermehrte Drift beim Abflussanstieg (Makrozoobenthos, Fischlarven und Juvenilstadien) eine Reihe von ökologischen Folgewirkungen mit sich bringen. Aus fischökologischer Sicht konnte vor allem das Stranden von Larven und Juvenilstadien als einer der Hauptverursacher für das Fehlen von ausreichendem Altersaufbau und Biomasse identifiziert werden. Zudem spielen die Retentionswirkung und die Habitatverfügbarkeit der schwallbelasteten Gewässerstrecke sowie die saisonalen und tageszeitlichen ökologischen und hydrologischen Bedingungen eine wesentliche Rolle. Um die ökologischen Auswirkungen einer Schwallbelastung bewerten zu können, sind zusammenfassend der morphologische Zustand der schwallbelasteten Gewässerstrecke, Häufigkeit und Auftrittszeitpunkt sowie die Intensität der Schwallwellen ausschlaggebend. Um die Intensität einer Schwallbelastung detailliert beschreiben zu können,

sind die Abflussanstiege und Abflussrückgänge der Schwallwellen getrennt zu betrachten, die Intensität der Schwallwellen durch mehrere Intensitätsparameter zu erfassen und im longitudinalen Verlauf darzustellen. Die im Rahmen dieser Studie entwickelte Bewertungssystematik bezieht sich dabei auf das Stranden von Fischlarven und frühen Juvenilstadien als wesentlichen ökologischen Indikator. Die Methodik kann allerdings ebenso für Abflussanstiege sowie andere Schwallparameter angewandt werden, um Schwallbelastungen in vollem Umfang zu erfassen und neben der Strandung andere gewässerökologische Auswirkungen im Detail untersuchen zu können.

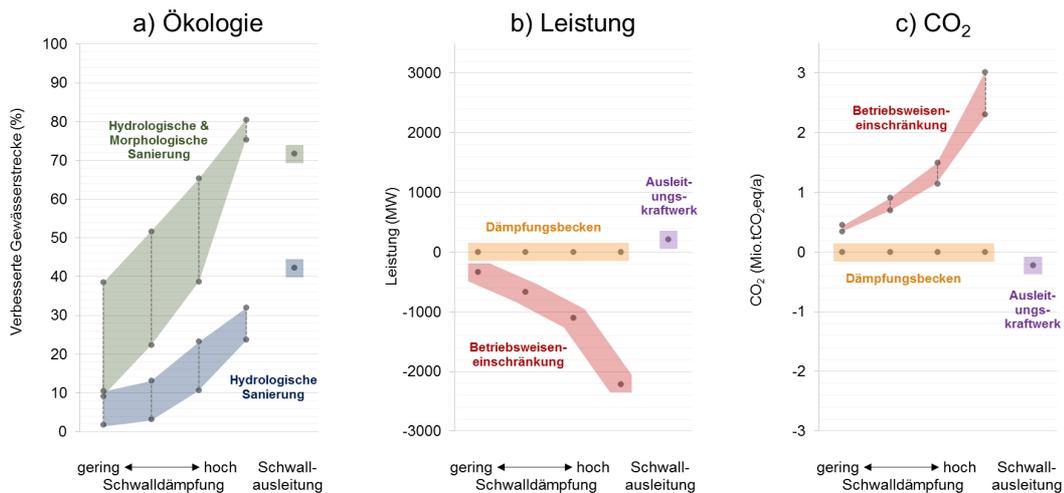
Mit der Wasserrahmenrichtlinie wurden konkrete Umweltziele für die Gewässer festgelegt (guter ökologischer Zustand bzw. gutes ökologisches Potential). Es gilt das sogenannte Verbesserungsgebot sowie das Verschlechterungsverbot. Gemäß Nationalem Gewässerbewirtschaftungsplan sind österreichweit 881 km Fließstrecke als signifikant schwallbelastet identifiziert ; hauptsächlich mittlere bis größere Flüsse in vor- oder inneralpiner Lage wie Drau, Ill, Bregenzerach, Ziller, Salzach, Möll, Enns, Mur, Alpenrhein und Inn. In Österreich sind von Schwallbelastungen betroffene Gewässer großteils per Verordnung als „erheblich veränderter Wasserkörper“ gemäß Wasserrahmenrichtlinie ausgewiesen. Sie müssen den Zielzustand „gutes ökologisches Potential“ erreichen. Bei der Festlegung des guten ökologischen Potentials ist einerseits die ökologische Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Schwallbelastung zu betrachten und andererseits zu bewerten, inwieweit dadurch eine signifikante Einschränkung der Nutzung der Speicherkraftwerke (volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen) zu erwarten ist. Die vorliegende Studie stellt die Grundlage für ein österreichweit anwendbares Bewertungsinstrument dar und ermöglicht erstmals eine Gegenüberstellung der ökologischen Wirksamkeit von schwallydämpfenden Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen und deren systemrelevanten, volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen. Als schwallydämpfende Maßnahmen werden (a) betriebliche Einschränkungen, (b) Dämpfungsbecken und (c) Schwallausleitungskraftwerke jeweils unter bzw. ohne Berücksichtigung der Auswirkungen von (d) zusätzlichen morphologischen Sanierungsmaßnahmen bewertet.

Um eine möglichst hohe Aussagekraft der Bewertungssystematik erreichen zu können, wurde das Forschungsprojekt unter der wissenschaftlichen Leitung der Universität für Bodenkultur Wien (IHG und IWHW - Ökologie/Hydrologie/Morphologie) und e3 Consult (Energiewirtschaft), der fachlichen Unterstützung des Ministeriums für ein lebenswertes Österreich, der Mitarbeit von sechs österreichischen Wasserkraftbetreibern (Vorarlberger Illwerke AG/Vorarlberger Kraftwerke AG, KELAG, ÖBB Infrastruktur AG, Salzburg AG, TIWAG Tiroler Wasserkraft AG und VERBUND Hydro Power GmbH) sowie Oesterreichs Energie in enger Zusammenarbeit mit der alpS GmbH durchgeführt. Das neu entwickelte Bewertungsinstrument wird auf zehn österreichische Speicherkraftwerke als repräsentative Fallbeispiele angewandt. Insgesamt werden durch die Fallbeispiele Kraftwerke und Kraftwerksgruppen mit einer Engpassleistung von rund 4.000 MW erfasst, dies entspricht knapp der Hälfte der in Österreich im Jahr 2014 installierten Speicherkraftwerkskapazität.

Ausgehend vom Istzustand werden zuerst für sämtliche Fallbeispiele „hydrologische Wirkungsszenarien“ bzw. hydrologische Situationen im Kontext zu gewässer- bzw. fischökologischen Auswirkungen festgelegt. Die einzelnen hydrologischen Wirkungsszenarien können durch die unterschiedlichen schwallydämpfenden Maßnahmen umgesetzt und zusätzlich durch morphologische Sanierungsmaßnahmen ergänzt werden: Das Wirkungsszenario „Schwallausleitung“ bezieht sich dabei auf die vollständige Ausleitung der Schwallwellen durch die Maßnahme Schwallausleitungskraftwerk (Schwallausleitungskraftwerke konnten aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten lediglich an vier der zehn Fallbeispiele, bzw. einer Gewässerstrecke von insgesamt 87 km untersucht werden). Die untersuchten Wirkungsszenarien zur „Schwallydämpfung“ reichen von geringer bis hoher Schwallydämpfung und beziehen sich auf den abgestuften Einsatz entweder der Maßnahme betriebliche Einschränkung oder der Maßnahme Dämpfungsbecken, wobei in den 10 Fallbeispielen insgesamt eine Gewässerstrecke von 294 km untersucht wird. Anschließend werden die zu erwartenden ökologischen, die systemrelevanten sowie volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen der einzelnen Wirkungsszenarien/Maßnahmen bewertet und

gegenüber gestellt. Nachstehende Abbildung zeigt eine zusammenfassende Darstellung wesentlicher Ergebnisse:

- a.** Ökologische Wirksamkeit: Ausmaß der zu erwartenden ökologischen Verbesserung in Relation zur insgesamt untersuchten Gewässerstrecke (blau – exkl. morphologischer Sanierungsmaßnahmen; grün – inkl. morphologischer Sanierungsmaßnahmen). Die Schwankungsbreite der ökologisch verbesserten Gewässerstrecke ergibt sich aus den unterschiedlichen kritischen Intensitätswerten zur Einstufung des Strandrungsrisikos für Fischlarven und frühe Juvenilstadien (Abstiegsgeschwindigkeit des Wasserspiegels beim anthropogen erzeugten Abflussrückgang 0,1 bzw. 0,4 cm/min).
Wenn keine morphologischen Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden, kann das Strandrungsrisiko durch Dämpfungsbecken oder betriebliche Einschränkungen maximal soweit verringert werden, dass in rund einem Drittel der insgesamt untersuchten Gewässerstrecke kein Strandrungsrisiko mehr besteht. Wenn man die Habitatvielfalt in diesen Gewässerstrecken durch morphologische Sanierungsmaßnahmen erhöht, kann der Anteil an sanierter Gewässerstrecke maßgeblich vergrößert werden (max. 75% bis 80%). Bei einer Schwallausleitung wird die Schwallbelastung zur Gänze eliminiert – die durch die Bewertungssystematik ausgewiesenen positiven ökologischen Auswirkungen dieser Maßnahme sind folglich ausschließlich vom morphologischen Zustand der betrachteten Gewässerstrecke abhängig: Errichtet man die vier Schwallausleitungskraftwerke, werden Strandrungsphänomene zur Gänze verhindert. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Habitatvielfalt lediglich in rund 40% der untersuchten Gewässerstrecke für Larven- und Jungfische ausreichend ist. Dementsprechend kann auch hier der Anteil an verbesserter Gewässerstrecke durch zusätzliche morphologische Maßnahmen maßgeblich vergrößert werden.
- b.** Erhöhung bzw. Reduktion der in Speicherkraftwerken flexibel bereitstellbaren Erzeugungsleistung als Beispiel systemrelevanter bzw. volkswirtschaftlicher Auswirkungen (rot – betriebliche Einschränkung; orange – Dämpfungsbecken; violett – Schwallausleitungskraftwerk).
Die Errichtung von Dämpfungsbecken hat keine Auswirkungen auf die flexibel bereitstellbare Leistung. Werden im Gegensatz dazu betriebliche Einschränkungen umgesetzt, führt dies in Abhängigkeit des Maßnahmenumfanges zu einer Reduktion der flexibel bereitstellbaren Erzeugungsleistung von bis zu 2.200 MW. Durch die Errichtung der Schwallausleitungskraftwerke könnte die flexibel installierte Erzeugungsleistung – bezogen auf die vier Fallbeispiele - um mehr als 200 MW erhöht werden.
- c.** Erhöhung bzw. Reduktion von CO₂ Emissionen als Beispiel systemrelevanter bzw. volkswirtschaftlicher Auswirkungen (rot – Betriebliche Einschränkung; orange – Dämpfungsbecken; violett – Schwallausleitungskraftwerk).
Die Errichtung von Dämpfungsbecken hat bezüglich CO₂ Emissionen keine systemrelevanten Auswirkungen. Werden betriebliche Einschränkungen umgesetzt, kann eine maßgeblich erhöhte CO₂ Emission die Folge sein (max. 2,3 bis 3 Mio.t_{CO₂eq}/a). Durch Schwallausleitungskraftwerke könnten die CO₂ Emissionen im Gegensatz dazu – bezogen auf die vier Fallbeispiele – um 0,23 Mio.t_{CO₂eq}/a verringert werden.



WESENTLICHE SCHLUSSFOLGERUNGEN

Betriebliche Einschränkungen können im Vergleich zu Schwalldämpfungsbecken grundsätzlich zu den gleichen positiven ökologischen Auswirkungen führen. Aus volks- und betriebswirtschaftlicher Sicht führt diese Maßnahme durch erhöhte CO₂-Emissionen und höhere Kosten im Versorgungssystem, durch die Gefährdung der sicheren Bahnstromversorgung, den Verlust an flexibler Leistung und Erzeugungsmengen, sowie einer betriebswirtschaftlichen Entwertung der Speicherkraftwerke in Abhängigkeit des Maßnahmenumfangs zu deutlich negativen Auswirkungen.

Schwalldämpfungsbecken haben im Vergleich zu betrieblichen Einschränkungen vergleichsweise geringe betriebswirtschaftliche und keine negativen systemrelevanten bzw. volkswirtschaftlichen Auswirkungen. Voraussetzung ist allerdings, dass die topographischen Gegebenheiten die Errichtung eines Dämpfungsbeckens erlauben. Dämpfungsbecken wirken sich aus hydrologischer Sicht sowohl auf Abflussanstiege als auch auf Abflussrückgänge aus. Durch die Errichtung von Dämpfungsbecken kann daher neben dem Strandungsrisiko auch das Driffrisiko vermindert werden.

Schwallausleitungskraftwerke verhindern anthropogene Abflussschwankungen im betrachteten Gewässerabschnitt zur Gänze, wodurch von diesem Maßnahmentyp im Vergleich zu Dämpfungsbecken und Einschränkungen der Betriebsweise die umfassendsten positiven ökologischen Auswirkungen zu erwarten sind, wenn in der Restwasserstrecke eine ökologisch angepasste Restwasserdotations und die Wiedereinleitung in ein geeignetes Gewässer (z.B. See oder Gewässerabschnitt mit erheblich größerem Einzugsgebiet) vorgesehen werden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind Schwallausleitungskraftwerke oft nicht wirtschaftlich darstellbar. Allerdings haben Schwallausleitungskraftwerke maßgebliche positive volkswirtschaftliche Effekte, da diese CO₂-Emissionen durch Verdrängung von Stromerzeugung im konventionellen Kraftwerkspark reduzieren, zusätzliche flexible Leistung und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bereitstellen sowie alternative Investitionen in erneuerbare Energien zur Erreichung der politischen Zielvorgaben vermeiden.

In der integrativen Betrachtung der Maßnahmen zur Minderung der Auswirkung von Schwall kann außerdem gezeigt werden, dass durch eine **Verringerung der hydrologischen Belastung in Kombination mit morphologischen Sanierungsmaßnahmen** der größte Beitrag hinsichtlich Erreichung des „guten Ökologischen Potenzials“ zu erwarten ist, wobei für eine genaue Quantifizierung des Verbesserungspotentials durch hydrologische und morphologische Maßnahmen eine detaillierte Einzelfallbeurteilung erforderlich ist. Der Umfang positiver ökologischer Auswirkungen schwalldämpfender

ZUSAMMENFASSUNG

Maßnahmen kann durch zusätzliche morphologische Maßnahmen maßgeblich vergrößert werden, wohingegen ausschließlich morphologische Maßnahmen in der Regel lediglich dann zielführend sind, wenn die hydrologische Belastung aus bestimmten Gründen nicht verringert werden kann. Insgesamt betrachtet bietet das entwickelte Instrument nunmehr eine generelle Bewertungssystematik für die integrative Beurteilung der ökologischen Wirkungen von Schwall-sanierungsmaßnahmen und deren Folgen für die Wasserkraftnutzung. Eine detaillierte Festlegung der bestmöglichen Kombination von Maßnahmen (Art der Schwalldämpfung, morphologische Sanierung) ist aufgrund der großen Unterschiede zwischen den Wasserkraftanlagen und gewässerspezifischen Rahmenbedingungen sowie aufgrund der möglichen Überlagerung von Schwallwellen unterschiedlicher Kraftwerke fallspezifisch vorzunehmen.

SUMMARY

IN ORDER TO GENERATE AND USE HYDROPOWER SUSTAINABLY and to achieve the climate goals, it is necessary to face the challenge of reaching the environmental objectives of the EU Water Framework Directive, without causing significant restrictions on the use of water in river stretches identified as "heavily modified". Identifying reasonable and efficient solutions requires collecting and analysing facts and scientific data to understand the multidimensional underlying interactive effects. To this end, scientists, hydropower plant operators, and authorities have been cooperating for many years and have built a deep mutual understanding and acceptance of their different concerns. This study presents a method which compares the ecological impacts of hydropeaking mitigation measures, or the ecological potential for improvement, with their impacts on the electricity system, their macroeconomic consequences as well as their impacts on business level. Based on this, in a next step specified packages of measures can be designed and adapted to the local conditions of the respective power plant, to ensure the achievement of the targeted ecological status.

With its energy and climate packages and its roadmap for a low-carbon economy by 2050, the European Union has laid out the essential conditions for the future development of the European energy system, including targets for climate protection, renewable energies, energy efficiency, and security of supply. These targets were further strengthened by the Clean Energy Package introduced in November 2016. Due to increased feeding-in of electricity generation from wind and solar energy as required by European policy, the technical demands on the existing power plants including hydropower plants are increasing, especially with regard to more flexible use intended to balance the unavoidable generation fluctuations of renewable energies. From the perspective of the electricity system, storage and pumped-storage hydropower plants complement perfectly other renewable energies such as wind and solar power because of their rapid control capability. Compared to coal- and gas-fired power plants, hydropower plants can be operated much more flexibly; moreover, they generate no additional CO₂ emissions whilst providing essential energy supply services to ensure system security. Due to the particularly favourable topographic and hydrological conditions in Austria, storage and pumped-storage power plants form the backbone of the national electricity supply; the total capacity of installed storage and pumped-storage power plants represents 33% of the entire Austrian generation capacity. Austrian storage hydropower plants are of great importance for ensuring system stability and security of supply. This is not only relevant at the national level as they also support the efficient integration of intermittent renewable energies into the European electricity system.

The flexible operation of storage hydropower plants can cause short-term flow fluctuation downstream, which is known as "hydropeaking". Hydropeaking interferes with natural flow dynamics of water bodies and can lead to several ecological consequences, mainly due to stranding during flow decrease (downramping) or drifting of macro-zoobenthos, fish larvae, and juvenile fish stages during flow increase events. From the point of view of fish ecology, the stranding of larvae and juveniles has been identified as one of the major causes of the lack of adequate age structure and biomass. Furthermore, retention effects and habitat availability in the hydropeaked river reaches, as well as seasonal and daily hydrological conditions have been identified to be of relevance. As a consequence, the interaction of the morphological state of the river and the frequency, time of occurrence, and intensity of hydropeaking waves are therefore crucial parameters in evaluating the impacts of hydropeaking. Describing in detail the intensity of hydropeaking impacts requires separate consideration of the flow increase and the flow decrease of the hydropeaking wave, the recording of several intensity parameters of the hydropeaking wave, and an assessment of the longitudinal trend. The evaluation system developed in this study refers to the stranding of fish larvae and early juvenile fish stages as the major ecological indicators. However, this methodology can also be applied to assess upramping as well as other hydropeaking parameters and is therefore capable of evaluating hydropeaking impacts entirely. It can also be used to examine impacts - other than stranding - on river ecology in detail.

The Water Framework Directive has set environmental targets for all water bodies (good ecological status or good ecological potential) including requirements for ecological improvement and the deterioration principle. In the National Water Management Plan 2009, 881 km of river stretches in Austria have been identified as significantly affected by hydropeaking, including primarily medium-sized to large rivers situated in the foothills and the central parts of the Alps, such as the Drau, the Ill, the Bregenzerach, the Ziller, the Salzach, the Möll, the Enns, the Mur, the Alpenrhein, and the Inn. By means of decree, water bodies which are affected by hydropeaking are predominantly classified as “heavily modified water bodies” according to the Water Framework Directive, implicating the obligation of achieving the “good ecological potential”. Assessing this potential implies the consideration of the ecological effectiveness of the measures intended to mitigate the effects of hydropeaking on the one hand, as well as the assessment of possibly significant impacts on the operation of storage hydropower plants on macroeconomic and business level on the other hand. This study provides a basis for an evaluation tool which is applicable all across Austria. This tool permits for the first time a comparison of the potential ecological effectiveness of hydropeaking mitigation measures/combinations of measures in terms of their impacts on the electricity system, on macroeconomic and business level. The hydropeaking mitigation measures evaluated in the study are (a) restrictions on the operation of hydropower plants, (b) retention basins, and (c) new build diversion power plants; all three measures are evaluated with or without (d) additional morphological rehabilitation measures.

In order to achieve the greatest possible validity for the methodology, this research project was carried out under the scientific supervision of the University of Natural Resources and Life Sciences (institutes IHG and IWHW for ecology/hydrology/morphology) and e3 consult (for energy economics) with the technical support of the Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management and in collaboration with six Austrian storage hydropower plant operators (Vorarlberger Illwerke AG/ Vorarlberger Kraftwerke AG, KELAG, ÖBB Infrastruktur AG, Salzburg AG, TIWAG Tiroler Wasserkraft AG und VERBUND Hydro Power GmbH) and Oesterreichs Energie, and in close cooperation with alpS GmbH. The newly developed evaluation tool is applied to ten Austrian storage hydropower plants serving as representative case studies. The hydropower plants and their interconnected groups of hydropower plants evaluated by these case studies represent an installed capacity of approx. 4,000 MW. This amounts to almost half of the total capacity of installed storage hydropower plants in Austria in 2014.

Based on the actual state of hydrological conditions, hydrological impact scenarios or hydrological situations which consider the effects on aquatic and fish ecology are defined for all case studies. The hydrological impact scenarios are realised via the hydropeaking mitigation measures mentioned above and may be complemented by additional morphological rehabilitation measures. The “hydropeaking diversion power plant” impact scenario refers to the complete diversion of the hydropeaking wave through a new built hydropeaking diversion power plant (due to natural environment conditions, diversion power plants could only be analysed in four of the ten case studies, totalling river stretches of 87 km). The “hydropeaking mitigation” impact scenarios referring to retention basins and graduated restrictions of the operational of storage hydropower plants range from low to high level of hydropeaking mitigation. A total of 294 km of river stretches are evaluated in the ten case studies. This is followed by an evaluation and comparison of the expected ecological and system-relevant as well as economic impacts.

The following figure presents a summary of the essential results:

- a. Ecological effectiveness: extent of the expected ecological improvements compared to the total river stretches examined (blue – excluding morphological rehabilitation measures; green – including morphological rehabilitation measures).
The range of the ecologically improved river stretches results from the two critical intensity values with regard to the risk of stranding for fish larvae and for early juvenile fish stages (the descending rate for the water level during an event of anthropogenic flow reduction is

set at 0.1 cm/min for fish larvae and 0.4cm/min for early juvenile fish stages).

Implementing the retention basin or operational restrictions measure without any additional morphological rehabilitation measures results in the elimination of the risk of stranding in about one-third of the entire extent of the examined river reaches. Including the improvement of habitat diversity by means of morphological rehabilitation measures in the examined river reaches increases the amount of remediated river stretches substantially (up to 75% - 80%). Diverting the hydropeaking wave by means of a diversion power plant results in the entire elimination of the hydropeaking impact. The positive ecological effects of this measure depend therefore exclusively on the morphological state of the river stretch under consideration. This means that if all four of the possible hydropeaking diversion power plants were installed, the risk of stranding could be entirely averted. However, habitat diversity is only sufficient for fish larvae and juveniles in about 40% of the affected river stretches. Additional morphological measures can substantially increase the proportion of improved river reach in this case as well.

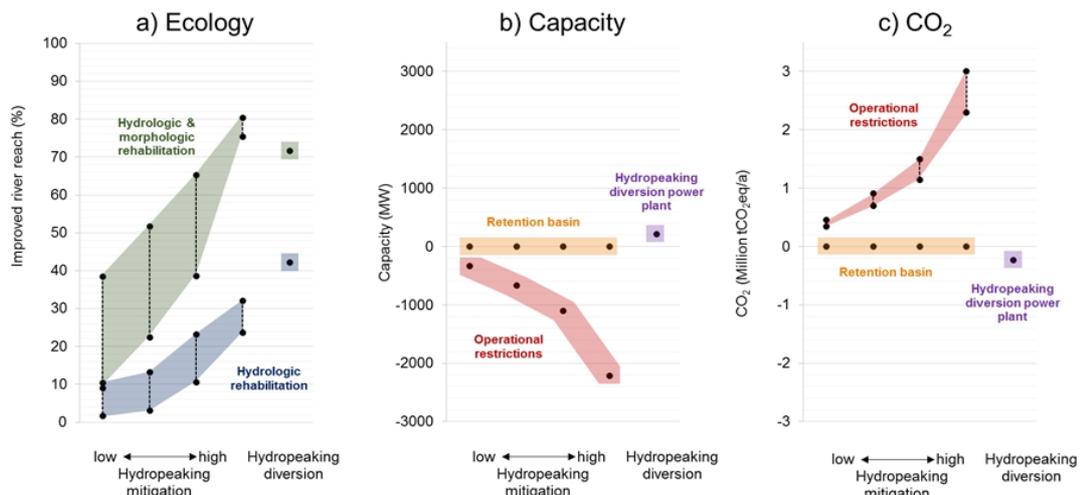
- b. Increase or decrease in the installed capacity of generation and flexibility (red – operational restrictions; orange – retention basin; purple – hydropeaking diversion power plant).

The construction of retention basins has no impact on the installed flexible capacity while implementing operational restrictions results in a reduction in the installed flexible capacity of up to 2,200 MW, depending on the extent of the implemented measures.

The installed flexible capacity could even be increased by more than 200 MW through the construction of hydropeaking diversion power plants at the four possible case study sites.

- c. Increase or decrease in CO₂ emissions as an example of system-relevant and economic impacts (red – operational restrictions; orange – retention basin; purple – hydropeaking diversion power plant).

The construction of retention basins has no system-relevant impact on CO₂ emissions. In case operational restrictions are implemented, the amount of CO₂ emissions could increase substantially (up to max. 2.3 to 3 million tCO_{2eq}/a). Newly built hydropeaking diversion power plants could reduce CO₂ emissions by 0.23 million tCO_{2eq}/a.



MAIN CONCLUSIONS

Generally, **operational restrictions**, can lead to the same positive ecological impacts as retention basins. From macroeconomic and business-level perspective, operational restrictions have distinct negative impacts

resulting from increased CO₂ emissions, higher costs for security of electricity supply, increased insecurity in the railway power supply, the loss of peak electricity generation and flexibility, as well as due to extensive devaluation of the economic performance of hydropower plant operators.

Compared to operational restrictions, **retention basins** have limited impacts on business-level and no negative system-relevant or macroeconomic consequences. However, strict topographical conditions limit the possible construction of such basins. From a hydrological point of view, retention basins affect both, the increase and the decrease of hydropeaking flows. Constructing retention basins can thus decrease the risk of stranding and also drifting.

Hydropeaking diversion power plants would entirely prevent flow fluctuation in the river stretches observed in this study. As a result, this mitigation measure shows the most comprehensive positive effects compared to retention basins and operational restrictions, provided that there is an ecologically appropriate residual flow in place and that there is a suitable location for reintroduction into the water body (e.g. a lake or a water body with a substantially large catchment area). At business level, hydropeaking diversion power plants often are not economically viable. Nevertheless, such power plants provide significant positive economic effects at macroeconomic level, as they reduce CO₂ emissions by replacing electricity generation in conventional power plants, they provide additional capacity as well as electricity generation from renewable energies, and they avoid the need for alternative investments in other renewable energies in order to reach the political targets.

The integrative evaluation of measures to mitigate the impacts of hydropeaking also demonstrates that the greatest contribution to achieving the target of “good ecological potential” can be expected from reductions in hydrological impacts in combination with morphological rehabilitation measures. However, the precise quantification of the potential for improvement arising from hydrological and morphological measures requires a detailed case-by-case evaluation of the specific case. Additional morphological measures can significantly increase the extent of the positive ecological effects of hydropeaking mitigation measures. In general, morphological measures exclusively are only effective when other measures to improve the hydrological conditions have failed.

Summing up, the developed tool provides a general evaluation methodology for an integrative assessment of the ecological impacts of hydropeaking mitigation measures and their consequences for the use of hydropower. Due to the considerable differences between hydropower plants and the local conditions, as well as due to the potential overlapping of hydropeaking waves released from other hydropower plants, a specification of the best possible combination of measures (type of hydropeaking mitigation measure, morphological rehabilitation measures) requires a detailed case-by-case evaluation of the specific circumstances.

INHALTSVERZEICHNIS

IMPRESSUM.....	2
ALLGEMEINES.....	3
ZUSAMMENFASSUNG.....	4
SUMMARY.....	9
1 AUSGANGSSITUATION UND ZIELSTELLUNG.....	15
2 ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG VON SPEICHERKRAFTWERKEN IM ÖSTERREICHISCHEN UND EUROPÄISCHEN STROMVERSORUNGSSYSTEM.....	18
2.1 ENERGIEPOLITISCHE UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN	18
2.2 DIE ROLLE DER SPEICHERWASSERKRAFT IM ÖSTERREICHISCHEN ERZEUGUNGSMIX.....	21
2.3 SYSTEMRELEVANTE AUSWIRKUNGEN BETRIEBLICHER EINSCHRÄNKUNGEN VON SPEICHERKRAFTWERKEN.....	23
3 KURZFRISTIGE ABFLUSSSCHWANKUNGEN IN ÖSTERREICH.....	26
4 METHODISCHE GRUNDLAGEN UND RANDBEDINGUNGEN.....	27
4.1 REPRÄSENTATIVE FALLBEISPIELE.....	28
5 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN.....	32
5.1 ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN VON SCHWALL, SCHWALLINDIKATOREN UND KRITISCHE INTENSITÄTSWERTE.....	32
5.2 HYDROLOGISCHE WIRKUNGSSZENARIEN.....	34
5.3 ERFASSUNG HYDROMORPHOLOGISCHER VERHÄLTNISSE.....	36
5.3.1 ERFASSUNG VON INTENSITÄT UND AUFTRITTSZEITPUNKT ANTHROPOGEN EINGELEITETER ABFLUSSSCHWANKUNGEN UND LONGITUDINALE BETRACHTUNG DER SCHWALLINTENSITÄT ..	36
5.3.2 NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DER AUS DEN ABFLUSSSCHWANKUNGEN RESULTIERENDEN WASSERSPIEGELÄNDERUNGEN.....	38
5.3.3 MORPHOLOGISCHES VARIABILITÄTSSCREENING UND 2D MODELLIERUNG MORPHOLOGISCHER MASSNAHMEN.....	39
5.3.4 AUSWIRKUNGEN POTENZIELLER GEWÄSSERAUFWEITUNGEN.....	41
5.4 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG DER SZENARIENSPEZIFISCHEN HYDROMORPHOLOGISCHEN VERHÄLTNISSE.....	42
5.4.1 MORPHOLOGISCHE DIVERSITÄT UND POTENZIELLE MORPHOLOGISCHE MASSNAHMEN.....	42
5.4.2 BEWERTUNG DES STRANDUNGSRIKOS UNTER DER BERÜCKSICHTIGUNG DER AUSWIRKUNGEN MORPHOLOGISCHER MASSNAHMEN.....	43
5.4.3 LARVENFENSTER.....	47
5.5 ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN.....	50
6 ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN.....	52
6.1 ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNGSSYSTEMATIK.....	52
6.2 BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE AUSWIRKUNGEN SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN.....	54
6.2.1 BETRIEBLICHE EINSCHRÄNKUNGEN.....	54
6.2.2 SCHWALLDÄMPFUNGSBECKEN.....	57
6.2.3 SCHWALLAUSLEITUNGSKRAFTWERKE.....	58
6.2.4 MORPHOLOGISCHE MASSNAHMEN.....	58
6.3 SYSTEMRELEVANTE UND VOLKSWIRTSCHAFTLICHE AUSWIRKUNGEN SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN.....	59

INHALT

6.4	ANWENDUNG DER ENERGIEWIRTSCHAFTLICHEN BEWERTUNGSSYSTEMATIK	61
6.4.1	REPRÄSENTATIVE FALLBEISPIELE	61
6.4.2	FIKTIVES FALLBEISPIEL	65
6.4.3	QUALITATIV-QUANTITATIVE ZUSAMMENFÜHRUNG DER BEWERTUNGSERGEBNISSE	68
7	GEGENÜBERSTELLUNG DER ÖKOLOGISCHEN UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHEN BEWERTUNG	71
8	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	74
9	GLOSSAR	77
10	LITERATUR	83
11	TABELLENVERZEICHNIS	88
12	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	88

1 AUSGANGSSITUATION UND ZIELSTELLUNG

DIE EUROPÄISCHE UNION hat mit ihren Energie- und Klimapaketen sowie ihrem Fahrplan für eine CO₂-arme Wirtschaft bis 2050 die wesentlichen Randbedingungen für die zukünftige Entwicklung des europäischen und damit auch des österreichischen Energiesystems in Bezug auf Klimaschutz, erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Versorgungssicherheit vorgegeben. Der Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird hierbei als wesentlicher Hebel zur langfristigen Reduzierung der Treibhausgasemissionen betrachtet, so dass der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung innerhalb der EU 28 von rd. 16% im Jahr 2005 auf 31 bis 34% bis ins Jahr 2020 erhöht werden soll. Entsprechend den von der EU für 2030 und 2050 geplanten Klimazielen könnte der Anteil erneuerbarer Energien an der europäischen Stromerzeugung bis 2030 auf 45 bis 53% und bis 2050 sogar auf bis zu 80% ausgebaut werden. Auf Grund der gegenüber Wasserkraft, Biomasse und Geothermie auf europäischer Ebene deutlich höheren Ausbaupotenziale von Wind- und Sonnenenergie werden diese beiden Energiequellen den Zubau erneuerbarer Energien dabei dominieren. Durch den Ausbau der Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie steigen auch die Anforderungen an den bestehenden Kraftwerkspark insbesondere in Bezug auf einen flexibleren Einsatz zur Ausregelung der unvermeidlichen Erzeugungsschwankungen volatiler erneuerbarer Energien. Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke stellen aus energiewirtschaftlicher Sicht auf Grund ihrer schnellen Regelfähigkeit eine ideale Ergänzung zur Wind- und Solarstromerzeugung dar. Sie können bspw. im Vergleich zu Kohle- und Gaskraftwerken nicht nur deutlich flexibler eingesetzt werden, es entstehen für die Gewährleistung der für die Systemsicherheit essentiellen Versorgungsaufgaben auch keine zusätzlichen CO₂-Emissionen.

Durch die in Österreich besonders günstigen topografischen und hydrologischen Voraussetzungen stellen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke mit einem Anteil von 33% an der insgesamt installierte Kraftwerksleistung von knapp 24.500 MW (2014) das Rückgrat der österreichischen Stromversorgung dar. Der Anteil von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken an der gesamten Erzeugungsleistung ist damit auf europäischer Ebene nur in Norwegen (rd. 88%), der Schweiz (rd. 60%) und Schweden (rd. 40%) höher als in Österreich. Auf Grund des gleichzeitig sehr hohen Anteils an nicht steuerbaren erneuerbaren Energien (d.h. Windkraft und Photovoltaik) und nicht vollumfänglich steuerbaren Energien (Laufwasserkraft) in Österreich sind Speicherkraftwerke für die nationale Versorgungssicherheit und Systemstabilität sowie für die sichere Bahnstromversorgung von besonderer Bedeutung, da thermische Kraftwerke im Gegensatz zu anderen Ländern nur eingeschränkt für den Ausgleich der Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik zur Verfügung stehen. Österreichische Speicherkraftwerke haben jedoch nicht nur auf nationaler Ebene eine hohe systemrelevante Bedeutung, sondern sie unterstützen innerhalb des europäischen Strommarktes bereits heute maßgeblich die effiziente Integration der fluktuierenden erneuerbaren Energien.

Der flexible Einsatz von Speicherkraftwerken kann jedoch zu kurzfristigen Abflussschwankungen in den Gewässern, dem sog. Schwall, führen. Dabei können sich der Schwall als eine künstlich erhöhte Abflusssituation und der Sunk als eine künstlich verringerte Abflusssituation in Abhängigkeit der Einsatzcharakteristik eines Speicherkraftwerks auch mehrmals täglich abwechseln. Schwallbetrieb führt dementsprechend zu anthropogen erzeugte Abflussschwankungen im Gewässer, wobei zwischen Abflussanstieg und Abflussrückgang unterschieden wird. Schwall zählt zu den hydrologischen Belastungen und stellt einen Eingriff in die natürliche Abflussdynamik eines Gewässers dar. Vom Schwallbetrieb betroffen sind in Österreich hauptsächlich mittlere bis größere Flüsse in vor- oder inneralpiner Lage wie Drau, Ill, Bregenzerach, Ziller, Salzach, Möll, Enns, Mur, Alpenrhein und Inn, die überwiegend der unteren Forellen- oder Äschenregion bzw. dem Übergang zur Barbenregion zuzuordnen sind (Meta-/Hyporhithral bis Epipotamal) [1].

Der Betrieb von Speicherkraftwerken kann sich über vergleichsweise lange Gewässerstrecken auf Fische, Benthos und andere Gewässerorganismen auswirken. Als Hauptbelastung für aquatische Organismen

werden Strandrungsphänomene angesehen, wobei als wichtigste Einflussfaktoren Abstiegsgeschwindigkeit, Gewässermorphologie, Wassertemperatur, Substrat, Tageszeit, Spezies und Organismengröße zu nennen sind. Das Risiko der Strandung tritt beim Abflussrückgang, also beim Abstiegsereignis der Schwallwelle auf. Daneben werden aquatische Organismen beim Abflussanstieg bzw. beim Anstiegsereignis der Schwallwelle vermehrt verdriftet bzw. abgeschwemmt [2], was zumindest einen lokalen Verlust von Jungfischen und Makrozoobenthos bedeutet [3–9]. Ökologische Untersuchungen zu den Auswirkungen der Betriebsweise von schwallerzeugenden Kraftwerken liegen schon aus etlichen Fließgewässern v. a. aus Nord-Amerika und Skandinavien vor [10–15]. Für den Alpenraum existieren Studien aus der Schweiz [2, 4, 16, 17] und Deutschland [18] und auch in Österreich wurden in den letzten Jahren eine Reihe von Forschungsprojekten zum Thema Schwall [19–23] durchgeführt.

Durch die hohe Komplexität der Schwallthematik sind grundsätzlich mehrere Fachdisziplinen gefordert: Ökologie, Hydrologie, Morphologie/Hydraulik und Feststoffhaushalt. Aus hydrologischer Sicht wurden in den bisherigen Forschungsprojekten Modelle entwickelt, die es ermöglichen Häufigkeit und Intensität von Abflussschwankungen durch die Analyse von Abflusszeitreihen zu erfassen [24, 25]. Dadurch konnten ökologische Monitoringdaten den jeweiligen hydrologischen Verhältnissen gegenübergestellt werden [19, 26]. Zudem ermöglicht die hydrologische Charakterisierung beeinflusste Gewässer nach einer standardisierten Methode zu identifizieren [24]. Morphologisch/hydraulische Untersuchungen erfassen den Einfluss unterschiedlicher Faktoren (z.B. reguliert/naturnah; Flussgröße; Gefälle, Feststoffhaushalt) auf die hydraulischen Bedingungen im Gewässer (z.B. Wechselwasserzone, Fließgeschwindigkeit, Schubspannung) [22, 23]. Diese sind letztendlich für die ökologischen Auswirkungen von Schwallwellen ausschlaggebend. Aus Drift- und Strandungsexperimenten in Versuchsrinnen konnten für einzelne Organismengruppen und Altersstadien spezifische kritische Intensitätswerte abgeleitet werden, welche es ermöglichen, ein potenzielles ökologische Nadelöhr aufzuzeigen [19, 20]. Basierend auf den bisherigen Ergebnissen wurden unterschiedliche Maßnahmen behandelt, um ökologische Auswirkungen von Schwall zu verringern [27]. Es liegen nun grundlegende Forschungsergebnisse aus den Fachgebieten Hydrologie, Morphologie/Hydraulik und Ökologie vor. Die Ergebnisse der einzelnen Fachgebiete beziehen sich zwar auf sehr heterogene räumliche Skalenebenen (überregional/national, Gewässerstrecke, kleinräumig), ermöglichen jedoch in der fächerübergreifenden Gesamtanalyse ein umfassendes grundlegendes Prozessverständnis [8].

Mit der Wasserrahmenrichtlinie wurden konkrete Umweltziele für die Gewässer festgelegt (guter ökologischer Zustand bzw. gutes ökologisches Potential), die durch Schwallbelastungen gefährdet werden können. Es gilt das sogenannte Verbesserungsgebot sowie das Verschlechterungsverbot. In Österreich sind von Schwallbelastungen betroffene Gewässer großteils per Verordnung als „stark veränderter Wasserkörper“ gemäß Wasserrahmenrichtlinie ausgewiesen. Sie müssen den Zielzustand „gutes ökologisches Potential“ erreichen. Bei der Festlegung des guten ökologischen Potentials ist einerseits die ökologische Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Schwallbelastung zu betrachten und andererseits zu bewerten, inwieweit dadurch eine signifikante Einschränkung der Nutzung der Speicherkraftwerke (systemrelevante, volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen) zu erwarten ist. Die vorliegende Studie stellt die Grundlage für ein österreichweit anwendbares Bewertungsinstrument dar und ermöglicht erstmals eine Gegenüberstellung der ökologischen Wirksamkeit von schwalldämpfenden Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen und deren systemrelevanten, volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen auf die betroffenen Speicherkraftwerke. Als schwalldämpfende Maßnahmen werden (a) betrieblichen Einschränkungen, (b) Dämpfungsbecken und (c) Schwallausleitungskraftwerke jeweils inklusive und exklusive der Auswirkungen (d) zusätzlicher morphologischer Sanierungsmaßnahmen bewertet. Dadurch wird mit diesem Projekt eine wesentliche Grundlage für die weitere Maßnahmenplanung im Umsetzungsprozess der Wasserrahmenrichtlinie in Österreich geschaffen.

Um die Vorgabe der Wasserrahmenrichtlinie nach einer effizienten Maßnahmenumsetzung zu erfüllen, ist es wichtig verschiedene Fachdisziplinen zusammen zu führen und so gemeinsam mögliche „best-practice“

Lösungen zu entwickeln. Dementsprechend setzt sich das Konsortium dieser Studie aus Vertretern von Energieversorgungsunternehmen, energiewirtschaftlichen Experten, universitären und außeruniversitären Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen und dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, unter der Konsortialführung von alpS zusammen. Die wissenschaftliche Leitung sowie die inhaltliche Verantwortung des ökologischen, hydrologischen und morphologischen Teils lag bei der Universität für Bodenkultur, mit dem Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement (IHG) sowie dem Institut für Wasserwirtschaft, Hydrobiologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW). Der energiewirtschaftliche Teil wurde von e3 consult geleitet. Zur inhaltlichen Leitung stand eine Steuerungsgruppe mit Vertretern aus Wissenschaft und Praxis sowie unterschiedlichen Fachbereichen als zusätzliche Kontrollinstanz zur Seite. Die Projektinhalte wurden von der Universität für Bodenkultur, e3 consult und alpS bearbeitet. Das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) stand beratend und unterstützend zur Seite.

Der vorliegende Forschungsbericht stellt eine Synthese der methodische Herangehensweise und Ergebnisse dar. Hierzu wird in Kapitel 2 die energiewirtschaftliche Bedeutung von Speicherkraftwerken im österreichischen und europäischen Stromversorgungssystem näher erläutert. Kapitel 3 betrachtet die österreichweite Situation hinsichtlich anthropogen erzeugter kurzfristiger Abflussschwankungen. Die methodischen Grundlagen und Randbedingungen dieser Studie sind in Kapitel 4 beschrieben, bevor in Kapitel 5 und 6 die ökologische und energiewirtschaftliche Bewertung schwalldämpfender Maßnahmen erläutert wird. Basierend auf den Ergebnissen von Kapitel 5 und 6 folgt in Kapitel 7 die Gegenüberstellung der ökologischen und energiewirtschaftlichen Bewertungen. Kapitel 8 rundet diese Studie mit den gezogenen Schlussfolgerungen und einem Ausblick ab.

Detailinformationen und -analysen sind in den vier Technischen Berichten A, B, C und D zu finden, die auf den Websites von alp-s, BOKU und e3-consult als pdf-Dokument zur Verfügung stehen (vgl. Abbildung 1).

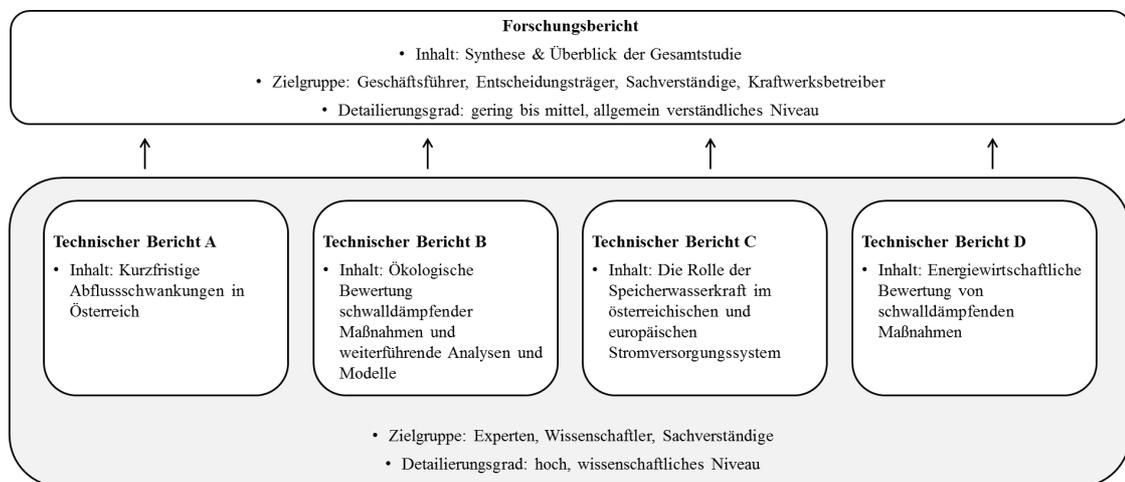


Abbildung 1: Aufbau und Inhalt Forschungsbericht und Technischen Berichte A bis D.

2 ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG VON SPEICHERKRAFTWERKEN IM ÖSTERREICHISCHEN UND EUROPÄISCHEN STROMVERSORUNGSSYSTEM

DURCH DEN AUSBAU DER STROMERZEUGUNG aus Windkraft und Photovoltaik rücken Speicherkraftwerke in den Fokus des energiepolitischen Interesses, da in Folge des Ausbaus der volatilen erneuerbaren Energien ein tiefgreifender Umbau des gesamten Stromversorgungssystems erforderlich sein wird. In der energiepolitischen Diskussion über die weitere Entwicklung des österreichischen und europäischen Stromversorgungssystems besteht auch weitgehend Konsens, dass mittel- und langfristig der Flexibilitätsbedarf stark steigen wird und daher eine hohe Notwendigkeit für den Ausbau der vorhandenen Speicherkapazitäten besteht. U.a. sieht die Europäische Kommission in ihrer Energy Roadmap 2050 [28] sowie in ihrem Energy Infrastructure Priorities for 2020 [29] im Ausbau der Stromspeicherkapazitäten in Europa einen wichtigen Baustein zur Umsetzung der EU Energie- und Klimaziele – nicht zuletzt, da sich durch den steigenden Anteil der schwankenden und nur eingeschränkt prognostizierbaren Stromerzeugung aus Windkraft- und PV-Anlagen das Umfeld für den verbleibenden Kraftwerkspark in den vergangenen Jahren deutlich verändert hat.

Dabei sind grundsätzlich zwei Tendenzen zu beobachten: Zum einen werden konventionelle (fossile) Kraftwerke immer häufiger aus dem Markt gedrängt, wodurch deren wirtschaftlicher Betrieb z. T. dauerhaft nicht mehr möglich ist und damit die in der Vergangenheit sicher verfügbare Erzeugungskapazitäten zukünftig nicht oder nur mehr eingeschränkt zur Verfügung stehen werden. Zum anderen steigt der Bedarf an schnell regelfähiger und flexibler Erzeugungsleistung für den Ausgleich der Schwankungen und Prognosefehler der Wind- und Solarstromerzeugung. Im Gegensatz zu Strom-zu-Strom-Speichern, wie bspw. Pumpspeicherkraftwerke oder Batteriespeicher, ermöglichen Speicherkraftwerke nicht nur die Bereitstellung von Flexibilität für das Stromversorgungssystem, sondern gleichzeitig auch eine Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, d.h. es kann „grüner Strom durch grünen Strom“ ausgeregelt werden. Die zukünftige energiewirtschaftliche Bedeutung österreichischer Speicherkraftwerke wird daher insbesondere auch von den auf EU-Ebene definierten energiepolitischen Rahmenbedingungen in Bezug auf eine weitgehende Dekarbonisierung des Stromerzeugungsbereichs bestimmt werden. Darauf wird im folgenden Kapitel ebenso wie auf die Rolle der Speicherwasserkraft im österreichischen Erzeugungsmix sowie die systemrelevante Auswirkungen möglicher betrieblicher Einschränkungen von Speicherkraftwerken eingegangen. Eine ausführliche Diskussion dieser Aspekte findet sich im Technischen Bericht C „Die Rolle der Speicherwasserkraft im österreichischen und europäischen Stromversorgungssystem unter Berücksichtigung energie- und klimapolitischer Ziele“.

2.1 ENERGIEPOLITISCHE UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die Europäische Union hat mit ihren Energie- und Klimapaketen sowie ihrem Fahrplan für eine CO₂-arme Wirtschaft bis 2050 die wesentlichen Randbedingungen für die zukünftige Entwicklung des europäischen und damit auch des österreichischen Energiesystems in Bezug auf Klimaschutz, erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Versorgungssicherheit vorgegeben [28, 30, 31]. Der Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wird hierbei als wesentlicher Hebel zur langfristigen Reduzierung der Treibhausgasemissionen betrachtet, so dass der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung innerhalb der EU 28 von rd. 16% im Jahr 2005 auf 31 bis 34% bis ins Jahr 2020 erhöht werden kann [32]. Entsprechend den von der EU für 2030 und 2050 geplanten bzw. in Diskussion befindlichen Klimazielen könnte der Anteil erneuerbarer Energien an der europäischen Stromerzeugung bis 2030 auf 45 bis 53% und

bis 2050 sogar auf bis zu 80% ausgebaut werden [28, 33]. Auf Grund der gegenüber Wasserkraft, Biomasse und Geothermie auf europäischer Ebene deutlich höheren Ausbaupotenziale von Wind- und Sonnenenergie werden diese beiden Energiequellen den Zubau erneuerbarer Energien dominieren. Abbildung 2 zeigt hierzu die Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in der EU 28 bis 2014 sowie einen möglichen Entwicklungspfad zur Erreichung der Ausbauziele der EU bis 2050.

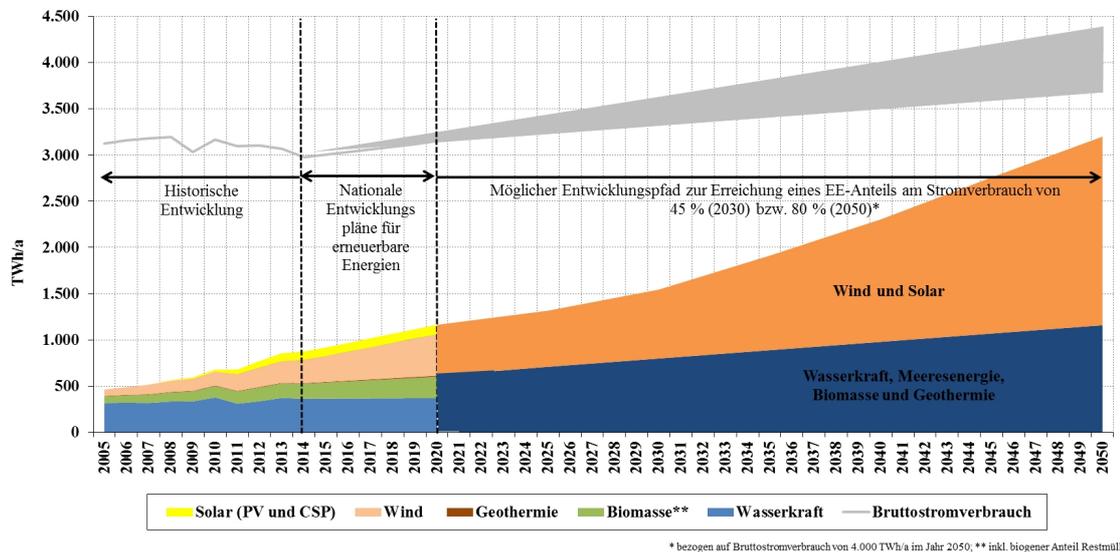


Abbildung 2: Möglicher Entwicklungspfad des Brutto-Stromverbrauchs und Beitrags erneuerbarer Energien in der EU 28 bis 2050 Quelle: eigene Darstellung auf Datenbasis Eurostat und Europäische Kommission.

In Österreich besteht noch ein vergleichsweise hohes technisch-wirtschaftliches Ausbaupotenzial zur Stromerzeugung aus Wasserkraft (rd. 18 bis 20 TWh/a [34]); trotzdem wird auch hier eine deutlich verstärkte Nutzung der Wind- und Sonnenenergie erforderlich werden, wenn die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern und Importen im Stromsektor oder zumindest das Ziel eines 100%-Anteils erneuerbarer Energien an der heimischen Stromerzeugung erreicht werden soll.

Die im europäischen aber auch deutsch-österreichischen Strommarkt zukünftig tragende Rolle der Wind- und Sonnenenergie ist aus energiewirtschaftlicher Sicht insofern von Relevanz, da diese von allen erneuerbaren Energien die größten systemtechnischen Herausforderungen für das bestehende Stromversorgungssystem mit sich bringen. Beide zeigen ausgeprägte Schwankungen im Tages- und Jahresverlauf, eine eingeschränkte Prognostizierbarkeit und häufig eine ungleiche regionale Verteilung. Während die regionale Verteilung der Erzeugungsanlagen vor allem für den Betrieb und Ausbau der Verteil- und Übertragungsnetze relevant ist, haben die nachfolgend zusammengefassten technologieimmanenten Schwankungen sowie die Prognoseungenauigkeit der Stromerzeugung aus volatilen erneuerbaren Energien vor allem folgende Auswirkungen auf den verbleibenden Kraftwerkspark:

- **Reduzierung des Grundlastanteils:** Modelluntersuchungen gehen davon aus, dass bei einem Anteil erneuerbarer Energien an der jährlichen Stromaufbringung von etwa 50% das konventionelle Grundlastband weniger als die Hälfte der heute in Deutschland erforderlichen knapp 60 GW beträgt (vgl. u.a. [33, 35, 36]). Auch unter Berücksichtigung von Ausgleichseffekten zwischen einzelnen Ländern bleibt die Reduktion der Lastspitze durch einen Ausbau der Wind- und PV-Stromerzeugung jedoch vergleichsweise gering, wodurch der Bedarf an gesicherter Erzeugungskapazität auch bei einem massiven Ausbau der Windkraft- und Photovoltaikleistung langfristig weitgehend konstant bleiben wird. Allerdings wird die jährliche Auslastung (Benutzungsdauer) des Kraftwerksparks insgesamt stark zurückgehen, d.h. es kommt zu einer deutlichen Verschiebung aus dem Grundlast- in das Mittel- und Spitzenlastsegment.

- **Steilere Gradienten der Residuallast:** Der Ausbau der erneuerbaren Energien führt nicht nur zu einer Verdrängung konventioneller Grundlastkraftwerke und einem höheren Bedarf an Mittel- und Spitzenlastkraftwerken. Durch die höhere Volatilität und steileren Gradienten der residualen Lastkurve kommt es zu häufigeren und schnelleren Lastwechseln, wodurch steilere Rampen und häufigere An- und Abfahrvorgänge von den restlichen Erzeugungskapazitäten beherrscht werden müssen.
- **Erhöhung des Regelleistungsbedarfs:** Schwankungen von Last sowie Erzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Energien innerhalb einer Viertelstunde bzw. Stunde können nicht über den Handel am Spot- oder Intraday-Markt ausgeglichen werden, sondern erfordern den Einsatz von Regelleistung. Die zukünftige Entwicklung des Regelleistungsbedarfs wird dabei vom Ausbau der erneuerbaren Energien bestimmt werden, so dass mittel- und langfristig mit einem Anstieg des Regelleistungsbedarfs zu rechnen ist (vgl. u.a. [37]).

Das schwankende Angebot an Wind- und PV-Strom hat bereits heute einen unmittelbaren Einfluss auf die Preisbildung an den Strombörsen (sog. Merit-Order Effekt) und damit auf den marktgetriebenen Einsatz von Speicherkraftwerken. Abbildung 3 zeigt hierzu eine Analyse der täglich teuersten Stunden im deutsch-österreichischen Marktgebiet für ausgewählte Jahre. Während im Jahr 2001 hohe Börsenstrompreise vor allem noch in der nachfragestarken Mittagszeit bzw. während der Wintermonate am frühen Abend aufgetreten sind, hat sich dieses Muster bis 2015 durch den Ausbau der PV-Stromerzeugung kontinuierlich zu einer Konzentration hoher Spotpreise in den Morgen- und Abendstunden verschoben.

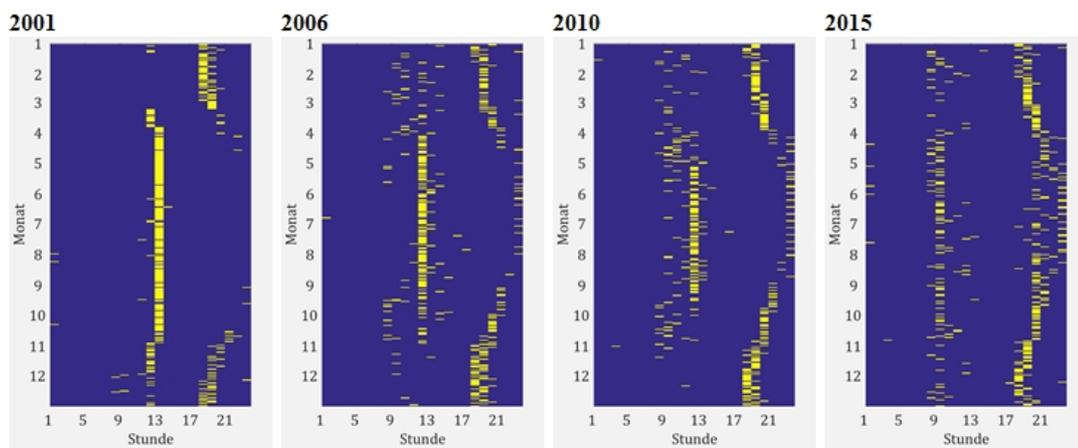


Abbildung 3: Täglich teuerste Stunde im Day Ahead-Spotmarkt Marktgebiet Deutschland-Österreich. Quelle: EPEX Spot, EEX.

Diese sich verändernden Strompreisstrukturen können sich dabei auch in einer geänderten Einsatzcharakteristik von Speicherkraftwerken widerspiegeln, wie in Abbildung 4 exemplarisch anhand der normierten mittleren stündliche Jahreserzeugung von drei der insgesamt zehn für das SuREmMa-Projekt ausgewählten repräsentativen Fallbeispielen dargestellt ist (Anm.: Die Analyse sämtlicher Fallbeispiele ist in Abschnitt 4.1.1 vom Technischen Bericht C zu finden). Trotz der im Jahresverlauf teilweise gegenläufigen Effekte zeigen die Analysen, dass es bei Speicherkraftwerken von einer in der Vergangenheit dominanten Erzeugungsspitze in den Mittagsstunden zu einer Verschiebung in Richtung Morgen- und Abendspitze gekommen ist. Vor allem bei Speicherkraftwerken, die überwiegend im Day Ahead-Markt vermarktet werden (z.B. Fallbeispiel 7) spiegelt das heute häufig ausgeprägte „Erzeugungstal“ in der Mittagszeit das hohe Angebot an Strom aus Photovoltaik im deutsch-österreichischen Strommarkt und damit einhergehend die niedrigeren Spotpreise in diesen Stunden vor allem während der Sommermonate wider.

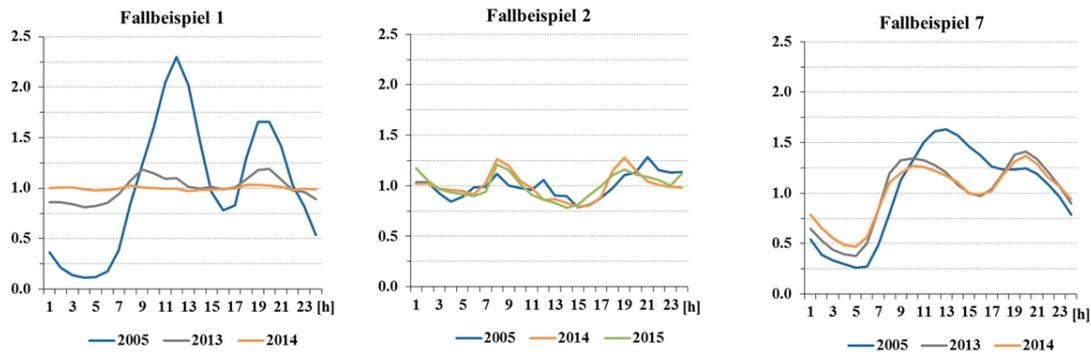


Abbildung 4: Stundenmittlere Erzeugung von drei Fallbeispielen normiert auf mittlere stündliche Jahreserzeugung. Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft.

Allerdings ist diese Tendenz nicht bei allen Fallbeispielen gleich ausgeprägt. Ein davon deutlich abweichendes Erzeugungsmuster zeigt etwa Fallbeispiel 1, das im Jahr 2005 noch eine ausgeprägte Mittags- und Abendspitze, jedoch in den Jahren 2013 und 2014 eine im Mittel über alle Tage des Jahres vergleichsweise konstante Erzeugung hatte. Während sich die Erzeugung des Kraftwerks im Jahr 2005 vorwiegend am Spotmarkt orientierte, wird das Speicherkraftwerk seit der Liberalisierung des österreichischen Sekundärregelmarktes im Jahr 2012 häufig zur Erbringung von Sekundärregelleistung genutzt. Durch den stochastischen Abruf von Sekundärregelleistung bzw. durch die bei fehlendem Abruf über einen längeren Zeitraum konstante Erzeugung erscheint im Jahresmittel die Erzeugung im Tagesverlauf relativ ausgeglichenen, auch wenn bei einer Betrachtung der einzelnen Stunden oder Viertelstunden auf Grund des stochastischen Regelenergieabrufs eine sehr hohe Volatilität des Kraftwerkseinsatz beobachtet werden kann.

2.2 DIE ROLLE DER SPEICHERWASSERKRAFT IM ÖSTERREICHISCHEN ERZEUGUNGSMIX

Auf Grund der günstigen topografischen und hydrologischen Voraussetzungen wird die Stromerzeugung in Österreich traditionell von Wasserkraft dominiert. Im Jahr 2014 hat die Wasserkraft 62,7% zur österreichischen Brutto-Stromerzeugung beigetragen, wobei Speicherkraftwerke (ohne Pumpspeicher) mit rd. 11,2 TWh knapp 27% der Erzeugung aus Wasserkraft bzw. 17% der gesamtösterreichischen Brutto-Stromerzeugung erbracht haben. Bezogen auf die in Österreich Ende 2014 insgesamt installierte Kraftwerksleistung von knapp 24.500 MW liegt der Anteil von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken mit 33% deutlich höher. Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke stellen mit einer installierten Erzeugungsleistung von fast 8 000 MW damit das Rückgrat der österreichischen Stromversorgung dar (Abbildung 5).

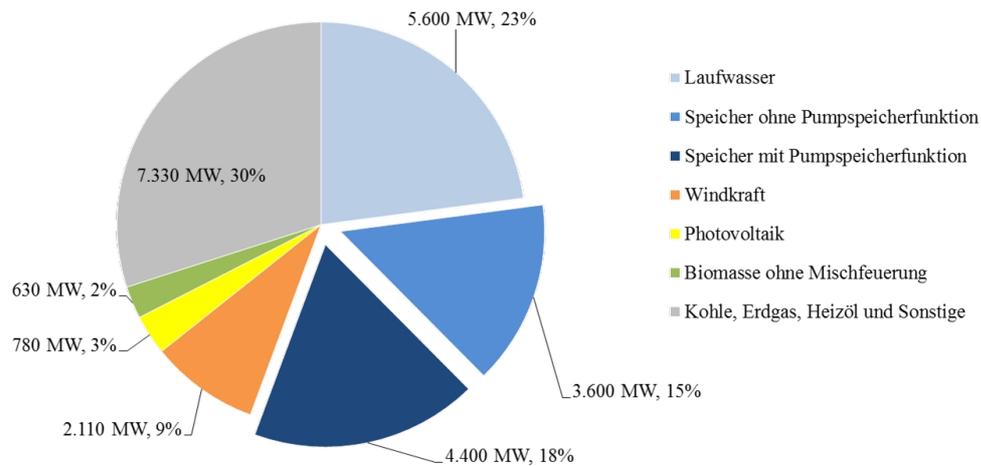


Abbildung 5: Installierte Kraftwerksleistung nach Energieträger in Österreich 2014. Daten: E-Control, Statistik Austria.

Von der in Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken Ende 2014 insgesamt verfügbaren fast 8.000 MW Erzeugungsleistung sind rd. 3.600 MW in Speicherkraftwerken ohne Pumpspeicherfunktion und 4.400 MW in Anlagen mit einer zusätzlichen Pumpleistung von knapp 3.300 MW installiert. Österreich zählt in absoluten Zahlen betrachtet damit zwar nicht zu den größten Speicherkraftwerksnationen Europas. Im Vergleich mit anderen Ländern ist der Anteil von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken an der gesamten Erzeugungsleistung jedoch vergleichsweise hoch. Abbildung 6 zeigt hierzu für ausgewählte Länder den Anteil von Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken an der gesamten installierten Kraftwerksleistung.

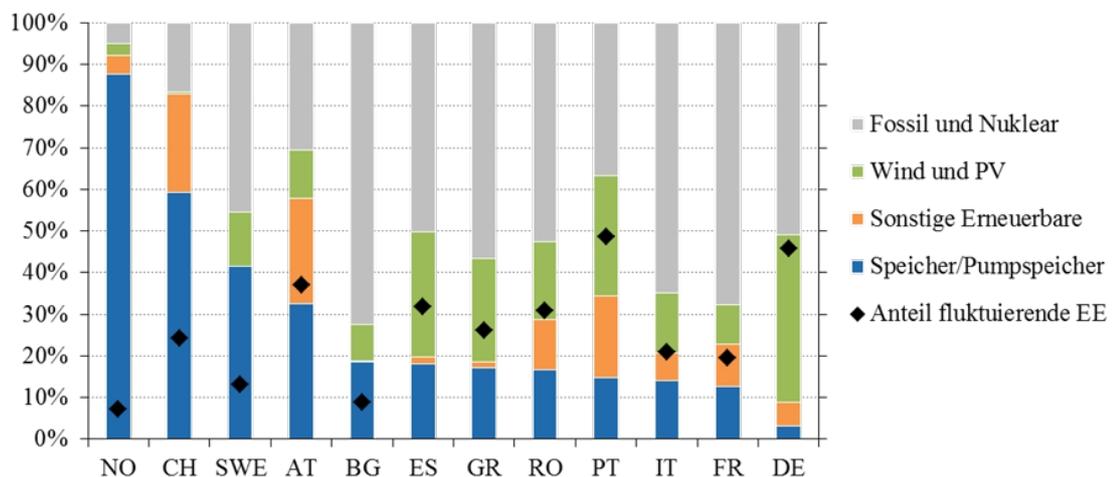


Abbildung 6: Anteil installierte Leistung je Erzeugungstechnologie an gesamter Kraftwerksleistung. Daten: ENTSO-E, E-Control, BfE, TheWindPower, Eurelectric (sonstige erneuerbare Energien im Wesentlichen Laufwasserkraft und Biomasse).

Der Anteil von Speicher und Pumpspeicherkraftwerken an der gesamten Erzeugungsleistung ist dabei in Norwegen (rd. 88%), der Schweiz (rd. 60%) und Schweden (rd. 40%) höher als in Österreich mit knapp 33%. Neben einem hohen Anteil an Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken zeigt der österreichische Erzeugungspark mit ca. 12% auch einen hohen Anteil an nicht steuerbaren volatilen erneuerbaren Energien (Windkraft und Photovoltaik) sowie mit ca. 25% an „sonstigen Erneuerbaren“ (Biomasse, Laufwasserkraft) an der gesamten Erzeugungsleistung. Speicherkraftwerke sind in Österreich daher für die nationale

Versorgungssicherheit und Systemstabilität von besonderer Bedeutung, da thermische Kraftwerke im Gegensatz zu anderen Ländern nur eingeschränkt für den Ausgleich der Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik aber auch z. T. aus Laufwasserkraft zur Verfügung stehen.

Die österreichischen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke haben jedoch nicht nur auf nationaler Ebene eine hohe systemrelevante Bedeutung. Auch innerhalb des bereits heute stark von der Windkraft und Photovoltaik dominierten gemeinsamen deutsch-österreichischen Strommarkts, sowie auf europäischer Ebene unterstützen die österreichischen Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke die effiziente Integration der fluktuierenden erneuerbaren Energien. Neben der Möglichkeit, die Stromerzeugung aus Grundlastkraftwerken sowie volatilen erneuerbaren Energiequellen zeitlich vom Stromverbrauch zu entkoppeln und damit die verbleibende Residuallast zu glätten (d.h. Ausgleich von Leistungs- und Preisschwankungen) können Speicherkraftwerke durch ihre kurze Aktivierungszeit sehr hohe An- und Abfahrsgeschwindigkeiten (Leistungsgradient oder Rampe in MW/min) erreichen, wodurch bspw. Änderungen der Wind- oder Solarstromerzeugung auch sehr kurzfristig ausgeglichen werden können. Durch die damit gegebene Möglichkeit zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen (insbes. Regelleistung und Blindleistung) tragen Speicherkraftwerke auch zur Aufrechterhaltung der Stabilität des Übertragungsnetzes bei. Zusätzlich können Speicherkraftwerke so bewirtschaftet werden, dass ihre Leistung gesichert zur Verfügung steht und diese damit einen wichtigen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten. Daneben können Speicherkraftwerke durch ihre Schwarzstartfähigkeit den Netzwiederaufbau bei Großstörungen unterstützen.

Speicherkraftwerke sind in Österreich nicht nur an das 50 Hz-Netz der öffentlichen Stromversorgung, sondern auch an das mit der bahnspezifischen Frequenz von 16,7 Hz betriebene Netz der österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) angeschlossen. Durch die hohe Lastdynamik des Eisenbahnbetriebs werden die Speicherkraftwerke der ÖBB vor allem zum Ausregeln der Lastspitzen eingesetzt. Der Bedarf an dieser flexiblen Erzeugungsleistung ist in den letzten Jahre kontinuierlich gewachsen, da bspw. durch die Anhebung der Höchstgeschwindigkeit auf 230 km/h in gewissen Streckenabschnitten, der Inbetriebnahmen von Hochgeschwindigkeitsstrecken sowie der Vereinheitlichung von Ankunfts- und Abfahrtszeiten auf der Westbahnstrecke die Dynamik der ÖBB-Last zugenommen hat. Da im Vergleich zum 50 Hz-Netz jedoch nur eine sehr beschränkte Anzahl von 16,7 Hz-Speicherkraftwerken zur Verfügung steht, ist deren uneingeschränkte Bewirtschaftung zur Erbringung der bahnstromspezifischen Systemdienstleistungen von besonderer Bedeutung.

2.3 SYSTEMRELEVANTE AUSWIRKUNGEN BETRIEBLICHER EINSCHRÄNKUNGEN VON SPEICHERKRAFTWERKEN

Zur Gewährleistung einer stabilen und zuverlässigen Stromversorgung müssen zu jedem Zeitpunkt Erzeugung und Verbrauch exakt übereinstimmen. Angebot (Stromerzeugung) und Nachfrage (Stromverbrauch) werden hierzu über verschiedene Märkte mit unterschiedlichen Vorlaufzeiten bis zur physischen Erfüllung „zusammengebracht“. Grundsätzlich kann der Handel von Strom entweder über Börsen oder bilaterale Geschäfte (Over-the-Counter-Handel, OTC) erfolgen, wobei unabhängig davon zwischen einem planbaren Agieren (Terminmarkt und vor allem Day Ahead-Markt) und einem kurzfristigen Reagieren (Intraday-Markt, Bilanzgruppenregelung sowie Abruf von Regelleistung und Redispatch) unterschieden werden kann. Neben der Vermarktung im Day Ahead-Spotmarkt sowie Intraday-Spotmarkt und Regelenergiemarkt kann die Flexibilität von Speicherkraftwerken auch zur untertägigen Ausregelung der eigenen Bilanzgruppe und damit zur Vermeidung von Ausgleichsenergiekosten verwendet werden. Zusätzlich können Speicherkraftwerke auf Anforderung durch die systemverantwortlichen Übertragungsnetzbetreiber über einen sog. Redispatch zur Beseitigung von Netzengpässen eingesetzt werden. Aus diesem breiten Spektrum an Möglichkeiten zur Vermarktung der Flexibilität von Speicherkraftwerken lässt sich auch der in Abbildung 7 zusammengefasst energie- und volkswirtschaftliche „Nutzen“ von Speicherkraftwerken innerhalb des Stromversorgungssystems ableiten, nämlich der Ausgleich von

Leistungs- bzw. Preisschwankungen, das Abfahren großer Leistungsgradienten sowie der kurzfristige Ausgleich von Prognoseabweichungen und damit zusammenhängend eine strompreisdämpfende Wirkung sowie letztendlich Reduktion der volkswirtschaftlichen Kosten für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit und -qualität.

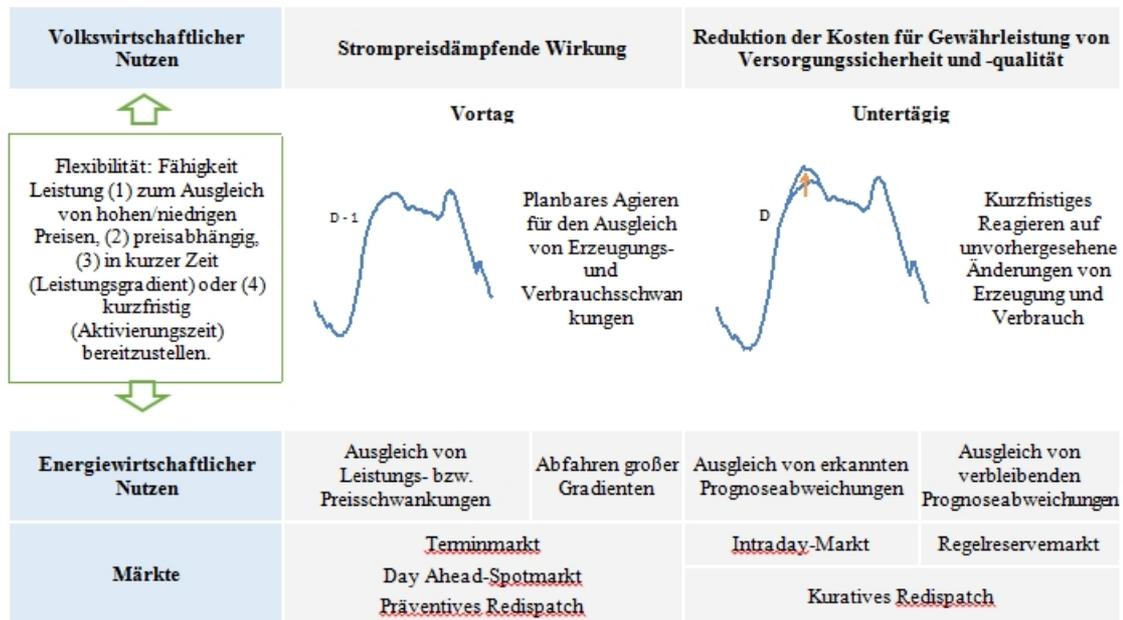


Abbildung 7: Volks- und energiewirtschaftlicher Nutzen der Flexibilität von Speicherkraftwerken in verschiedenen Marktsegmenten. Quelle: Adaptiert nach von Roon [38].

Durch betriebliche Einschränkungen kann der Einsatz von Speicherkraftwerken in den verschiedenen Marktsegmenten in der Regel nicht mehr optimiert erfolgen, wodurch deren Flexibilität nicht mehr vollständig ausgenutzt werden kann. Sowohl die Einschränkungen im Rahmen des „planbaren Agierens“ zum Ausgleich von Erzeugungs- und Verbrauchsschwankungen als auch des „kurzfristigen Reagierens“ auf unvorhergesehene Änderungen von Erzeugung und Verbrauch haben durch ihre Rückwirkungen auf das gesamte Erzeugungssystem sowohl energiewirtschaftliche als auch volkswirtschaftliche Effekte, die im Folgenden zusammengefasst werden:

- **Verlust an flexiblen Erzeugungsmengen zum Ausgleich von Lastschwankungen:** Durch die hohe Flexibilität von Speicherkraftwerken ist eine Einsatzoptimierung im Stunden- bzw. Viertelstundenraster möglich, d.h. in Abhängigkeit von Speicherzufluss und -füllstand kann die Abarbeitung des Wassers in den teuersten Stunden/Viertelstunden eines Tages erfolgen. Bei einer Limitierung des Abflussrückgangs am Rückgabepunkt in das Gewässer ist diese Optimierung jedoch nur noch eingeschränkt möglich, da bei einem erzwungenen langsameren Zurückfahren der Anlage die Erzeugung in Stunden- bzw. Viertelstunden erfolgt, in denen das Speicherkraftwerk an sich bereits wieder im Stillstand wäre. Dadurch wird für den Abfahrvorgang zusätzliches Wasser aus dem Speicher benötigt, das zu einem anderen Zeitpunkt nicht mehr zur Stromerzeugung zur Verfügung steht (d.h. „verlorene“ flexible Erzeugungsmenge).
- **Verlust an flexibler Erzeugungsleistung zum Ausgleich von Prognoseabweichungen:** Eine wesentliche Charakteristik von Speicherkraftwerken stellt die Fähigkeit dar, Leistung mit sehr geringen Vorlaufzeiten und sehr hohen Gradienten bereitstellen zu können. Diese Art der Flexibilität wird insbesondere für den kurzfristigen Ausgleich der Prognoseabweichungen von Erzeugung und Verbrauch auf dem Intraday-Markt bzw. durch den Einsatz von Regelenergie benötigt. Neben dem Verlust von flexibler Erzeugungsmenge haben Einschränkungen in der Betriebsweise von Speicherkraftwerken daher vor allem Auswirkungen auf die Möglichkeit von

Speicherkraftwerken ihre Erzeugungsleistung sehr kurzfristig an die durch vermehrte fluktuierende Einspeisung gestiegenen Anforderungen im Intraday- und Regelreservemarkt anzupassen.

- **Erhöhung der Stromgestehungskosten und CO₂-Emissionen:** Für den restlichen Kraftwerkspark innerhalb des Stromversorgungssystems bedeutet dies, dass während der „erzwungenen“ Abfahrrampen weniger und zu einem anderen Zeitpunkt mehr Strom erzeugt werden muss. Insgesamt steigen durch diesen zusätzlichen Ausgleichsbedarf in den Abfahrrampen von Speicherkraftwerken die Anforderungen an die Flexibilität im verbleibenden konventionellen Kraftwerkspark, da die Volatilität und Gradienten der Residuallast dadurch tendenziell größer werden. Durch die „erzwungenen“ Abfahrrampen der Speicherkraftwerke muss in einzelnen Stunden die Erzeugung des konventionellen Kraftwerksparks reduziert werden, d.h. Kraftwerke gehen in den Teillastbetrieb oder werden vollständig vom Netz genommen, wodurch in der Regel höhere Brennstoff-, Anfahr- und Abfahrkosten sowie CO₂-Emissionen im Kraftwerksportfolio entstehen. Zudem ist zu beachten, dass die zusätzliche Stromerzeugung in den Abfahrrampen zu einem anderen Zeitpunkt zu einer Minderzeugung in Speicherkraftwerken führt, wodurch in diesen Stunden zusätzliche Kraftwerksleistung ans Netz genommen werden muss. Kraftwerke, die dann zum Einsatz kommen, haben in der Regel jedoch höhere variable Kosten als die bereits im Einsatz befindlichen konventionellen Kraftwerke, wodurch der Spotpreis in diesen Stunden steigt. Dadurch wird die potenziell preisdämpfende Wirkung von Speicherkraftwerken geringer und es steigen insgesamt die Stromgestehungskosten. Weil Kraftwerke mit höheren variablen Kosten häufig auch höhere spezifische CO₂-Emissionen haben, können betriebliche Einschränkungen von Speicherkraftwerken auch zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen des gesamten Erzeugungssystems führen, was insgesamt die volkswirtschaftlichen Kosten zur Erreichung der CO₂-Minderungsziele erhöht.
- **Erhöhung der Systemkosten:** Kurz- und mittelfristig können Änderungen im Betrieb von Speicherkraftwerken auf Grund von Limitierungen in des Abflussrückgangs durch eine geänderte Fahrweise des bestehenden Kraftwerksparks ausgeglichen werden, wenn auch zu höheren Systemkosten. Längerfristig wird sich jedoch der Bedarf an Kraftwerksleistung zur Spitzen- und Mittellastsicherung erhöhen, weil der Verlust an Flexibilität in Speicherkraftwerken durch andere Flexibilitätsoptionen ersetzt werden muss. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist dies insofern von Nachteil, als dass die Funktionalität bestehender (Speicher)Kraftwerke durch Neuinvestitionen an anderer Stelle (bspw. Leistungserhöhung in Speicherkraftwerken, Neubau von Pump- oder Batteriespeichern) ersetzt werden muss, damit ein gleichbleibendes Niveau der Versorgungssicherheit und -qualität gewährleistet werden kann.
- **Zusätzlicher Bedarf an Frequenzumformerkapazitäten im 16,7 Hz-Bahnstromsystem:** Durch die im Vergleich zum 50 Hz-Netz der allgemeinen Stromversorgung hohe Lastdynamik im 16,7 Hz-Bahnstromnetz bei einer gleichzeitig verhältnismäßig geringen Anzahl an Erzeugungseinheiten kann bei einer Einschränkung der Betriebsweise einzelner Speicherkraftwerke die dann fehlende Flexibilität nicht notwendigerweise im Bahnstromsystem durch andere (bestehende) Kraftwerke ausgeglichen werden. Dies würde dazu führen, dass zur Aufrechterhaltung einer sicheren Bahnstromversorgung Systemdienstleistungen über bestehende Frequenzumformer aus dem 50 Hz-System bezogen und/oder zusätzliche Frequenzumformer gebaut werden müssen. Neben den Investitionskosten für die ggf. zusätzlich benötigten Frequenzumformerkapazitäten würden insbesondere die zusätzlich entstehenden Wirkungsgradverluste bei der Umformung der Frequenz von 50 auf 16,7 Hz zu einem weniger effizienten Betrieb des gesamten Bahnstromsystems und damit zu einer zusätzlichen finanziellen Belastung des öffentlichen Verkehrs führen.

3 KURZFRISTIGE ABFLUSSSCHWANKUNGEN IN ÖSTERREICH

IN DIESEM KAPITEL wird die Situation bezüglich kurzfristiger Abflussschwankungen in Österreich überblicksmäßig dargestellt. Als Datengrundlage werden dabei einerseits die gemäß dem Entwurf des nationalen Gewässerbewirtschaftungsplan 2015 als signifikant schwallbelastet ausgewiesenen Gewässerstrecken herangezogen. In Österreich sind insgesamt 881 km Fließstrecke in 121 Wasserkörpern als signifikant schwallbelastet eingestuft, das entspricht etwa 2,8% des Gewässernetzes mit einer Einzugsgebietsgröße > 10 km² bzw. rd. 20% des Gewässernetzes über 1000 km² Einzugsgebietsgröße [39]. Andererseits wurden sämtliche hochauflösende Pegelstellen Österreichs hinsichtlich der Auftrittshäufigkeit und Intensität kurzfristiger Abflussschwankungen analysiert (vgl. Abbildung 8; Details – vgl. Technischer Bericht A 1.2) [24].

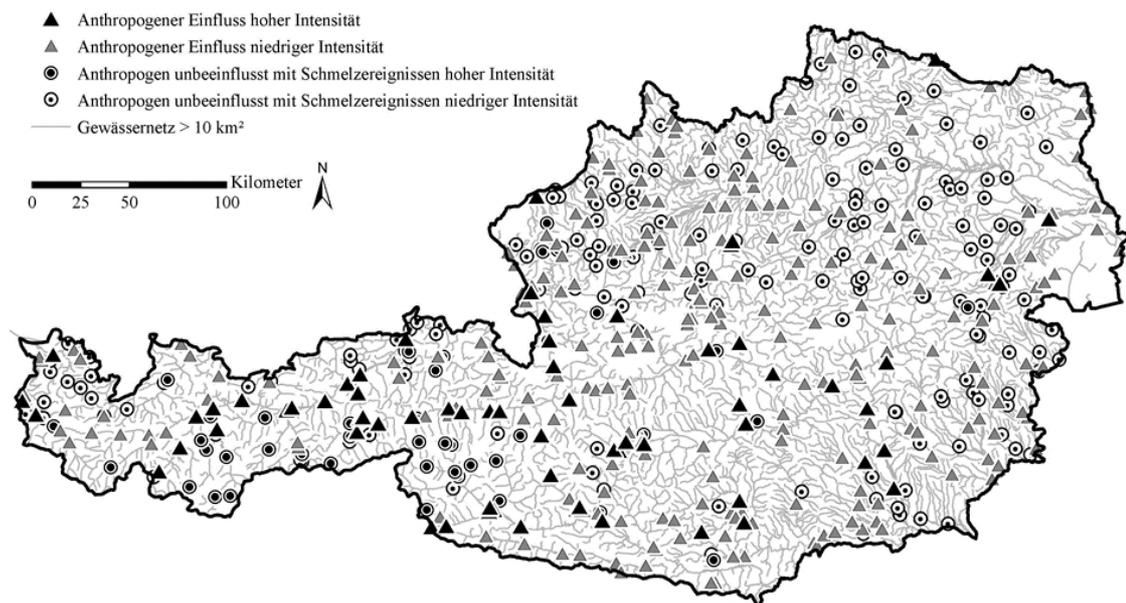


Abbildung 8: Kurzfristige Abflussregime österreichischer Pegelstellen (Anthropogener Einfluss hoher Intensität - N=71; Anthropogener Einfluss niedriger Intensität - N=250; Anthropogen unbeeinflusst mit Schmelzereignissen hoher Intensität - N=44; Anthropogener unbeeinflusst mit Schmelzereignissen niedriger Intensität - N=177; basierend auf Zeitreihen von jeweils 01.01.2004 bis 31.12.2008).

Kurzfristige Abflussschwankungen bezeichnen Abflussänderungen, welche innerhalb eines Zeitraumes von einigen Minuten oder Stunden bis hin zu wenigen Tagen auftreten. Durch die Analyse von Abflussganglinien hochauflösender Pegelstellen (15min Intervall) können unterschiedliche Typen kurzfristiger Abflussschwankungen unterschieden werden. Diese kurzfristigen Abflussschwankungen können natürlichen Ursprungs sein oder anthropogen erzeugt werden. Natürliche Ursachen sind im Wesentlichen Niederschlagsereignisse, Schmelzereignisse von Schnee und Gletschereis sowie Kombinationen aus diesen Ereignissen. Als Ursachen von anthropogen erzeugten Abflussschwankungen kommen in erster Linie Speicherkraftwerke, die zeitlichen Verzögerungen bei der Durchflussteuerung von Kraftwerken, die Teilnahme am Regelenergiemarkt einzelner Ausleitungs- und Laufkraftwerke, Pumpen, Kläranlagen, Kühlwassereinleitungen/-entnahmen sowie Messartefakte infrage [24].

Österreichweit wurden 524 hochauflösende Pegelstellen hinsichtlich Auftrittshäufigkeit und Intensität kurzfristiger Abflussschwankungen im Detail untersucht. Durch ein multivariates statistisches Verfahren werden dabei 4 unterschiedliche Abflussregime unterschieden: 1) Anthropogener Einfluss hoher Intensität bzw. Schwall, 2) Anthropogener Einfluss niedriger Intensität, 3) Anthropogen unbeeinflusst mit

Schmelzereignissen hoher Intensität und 4) Anthropogen unbeeinflusst mit Schmelzereignissen niedriger Intensität (vgl. Abbildung 8 - Die statistische Pegelzuweisung wurde im Falle von nicht nachvollziehbaren Zuweisungen im Einzelfall überprüft und validiert) [24]. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen auf, dass mehr als die Hälfte der österreichischen Pegelstellen durch anthropogene Abflussschwankungen beeinflusst werden, deren Ursachen jedoch nicht immer eindeutig erklärbar sind. Neben einem großräumigen österreichweiten Überblick bzw. einem ersten potenziellen Ansatz zu einem österreichweiten Monitoring kurzfristiger Abflussschwankungen ermöglicht es die statistische Zuweisung von Abflussregimen, unbeeinflusste Pegelstellen standardisiert zu identifizieren und in weiterer Folge den Verhältnissen beeinflusster Pegelstellen gegenüber zu stellen.

4 METHODISCHE GRUNDLAGEN UND RANDBEDINGUNGEN

SCHWALLDÄMPFENDE MASSNAHMEN wirken sich generell durch eine veränderte hydromorphologische Situation im flussab der Schwalleinleitung gelegenen Gewässerabschnitt aus. Eine Änderung der Betriebsweise von schwalleinleitenden Kraftwerken führt direkt zu einer adaptierten hydrologischen Situation im Gewässer. Dasselbe gilt prinzipiell auch für die Errichtung von Schwalldämpfungsbecken, Schwallausleitungen bzw. Schwallausleitungskraftwerke. Neben diesen hydrologisch wirkenden Maßnahmen können Schwallbelastungen durch die Umsetzung von morphologischen Maßnahmen auch indirekt verringert werden. Gewässeraufweitungen können in Schwallstrecken infolge der Querschnittserweiterung zu verminderten Wasserspiegeländerungen führen, wodurch die Ausdehnung der Wasserwechselzone zwischen Schwall- und Sunkabfluss sowie das Strandrungsrisiko vermindert werden kann. Auch Gewässeraufzweigungen können maßgeblich zu einer entschärften hydromorphologischen Situation beitragen. Gewässerstrukturierungen und Renaturierungen führen zu einer erhöhten Habitatvielfalt und Habitatverfügbarkeit, wodurch im jeweiligen Gewässerabschnitt die Wahrscheinlichkeit vergrößert wird, dass bei sämtlichen Abflusssituationen Refugialhabitate zur Verfügung stehen. Auch durch die Anbindung von Zubringergewässern mit unbeeinflusster hydrologischer Situation kann die Verfügbarkeit von Refugialhabitaten erhöht werden, ohne die hydrologische Situation direkt zu beeinflussen. Dementsprechend können schwalldämpfende Maßnahmen zu hydrologisch und morphologisch wirkenden Maßnahmen zusammengefasst werden. Im Rahmen dieser Studie werden grundsätzlich beide Maßnahmengruppen sowie Maßnahmenkombinationen behandelt, wobei als wesentliche Maßnahmentypen hinsichtlich hydrologisch wirkender Maßnahmen (a) betriebliche Einschränkungen, (b) die Errichtung von Dämpfungsbecken und (c) die Errichtung von Schwallausleitungskraftwerken im Detail analysiert werden. Hinsichtlich morphologisch wirkender Maßnahmen werden Gewässeraufweitungen und Gewässerstrukturierungen bzw. -renaturierungen zum Maßnahmenpaket (d) morphologische Maßnahmen zusammengefasst.

Bezugnehmend auf die einzelnen Maßnahmentypen werden im ersten Schritt dieser Studie, ausgehend vom hydrologischen Istzustand, unterschiedliche hydrologische Wirkungsszenarien definiert. Als hydrologisches Wirkungsszenario versteht man im Rahmen dieser Studie eine bestimmte hydrologische Situation im Gewässer, welche in Abhängigkeit des Maßnahmenumfangs durch hydrologische Maßnahmen erreicht bzw. umgesetzt werden kann. Die hydrologischen Wirkungsszenarien werden im Kontext zu gewässerökologischen Auswirkungen definiert (vgl. Kapitel 5.2) und können zusätzlich durch morphologische Maßnahmen erweitert werden (hydromorphologische Maßnahmenkombination). Die einzelnen Wirkungsszenarien werden dann exkl./inkl. morphologischer Maßnahmen hinsichtlich der zu erwartenden ökologischen Auswirkungen im Gewässer analysiert.

Anschließend werden die systemrelevanten, volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen der für die einzelnen Wirkungsszenarien umzusetzenden Maßnahmen bewertet. Bei den systemrelevanten

Auswirkungen werden die Effekte auf die CO₂-Emissionen, die Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit sowie die zusätzlichen Kosten bzw. Einsparungen im Versorgungssystem als Bewertungskriterien berücksichtigt. Als betriebswirtschaftliche Auswirkungen werden hierzu die Kosten bzw. ggf. Erlöse der jeweiligen Maßnahmentypen erfasst. Somit können den ökologischen Auswirkungen direkt die entsprechenden energiewirtschaftlichen Auswirkungen gegenübergestellt werden (vgl. Abbildung 9).

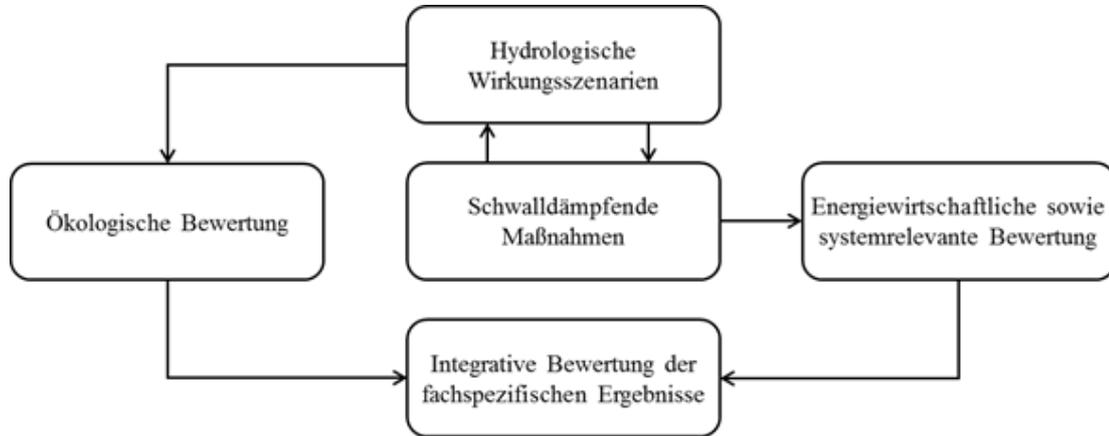


Abbildung 9: Methodischer Ansatz zur integrativen Bewertung ökologischer und energiewirtschaftlicher Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen.

Zur Entwicklung und ersten Anwendung der ökologischen und energiewirtschaftlichen Bewertungssystematik werden 10 Fallbeispiele ausgewählt, wobei versucht wird einen möglichst repräsentativen Querschnitt über den österreichischen Speicherkraftwerkspark in Bezug auf die energiewirtschaftlichen Kenngrößen als auch ökologischen Standorteigenschaften wieder zu geben.

4.1 REPRÄSENTATIVE FALLBEISPIELE

Im Rahmen des SuREmMa-Projekts werden 10 in Betrieb befindliche österreichische Speicherkraftwerke und die flussab gelegenen Gewässerstrecken als Fallbeispiele für die ökologische und energiewirtschaftliche Bewertung schwalldämpfender Maßnahmen anhand einer einheitlichen Bewertungssystematik detailliert analysiert und bewertet. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang, dass jedes Fallbeispiel kraftwerksspezifisch betrachtet wird und damit etwaige Wechselwirkungen zwischen der Schwalleinleitung des Fallbeispiels und möglichen weiteren Schwallbeeinflussungen im flussab gelegenen Gewässerabschnitt im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Außerdem werden bestehende Dämpfungsbecken nicht berücksichtigt, um die direkte Vergleichbarkeit der energiewirtschaftlichen Auswirkungen von Dämpfungsbecken für alle Fallbeispiele gewährleisten zu können.

Die ausgewählten Fallbeispiele sollen im Vergleich zur Situation in Gesamt-Österreich möglichst repräsentative Verhältnisse widerspiegeln. Hinsichtlich der zu erwartenden ökologischen Schwallbelastung kommt dabei dem jeweiligen Ausbaudurchfluss des Kraftwerkes im Verhältnis zur Flussgröße entscheidende Bedeutung zu. Abbildung 10 stellt die hydrologische Situation an den potenziellen Einleitestellen anthropogen erzeugter Abflussschwankungen in Gesamt-Österreich (N=84; Details – vgl. Technischer Bericht A 1.1) den ausgewählten Fallbeispielen gegenüber. Dabei wird als einfache Maßzahl für die jeweilige Schwallintensität das Verhältnis von Ausbaudurchfluss (Q_a) und mittlerem Abfluss (MQ) des Vorfluters bei der Schwall-Einleitestelle dargestellt. Wie die Überblicksdarstellung zeigt, decken die ausgewählten Fallbeispiele den Großteil der österreichweiten Verhältnisse ab. Lediglich Kraftwerke mit im Vergleich zur Flussgröße vergleichsweise kleinem Ausbaudurchfluss können durch die Fallbeispiele nicht abgebildet werden.

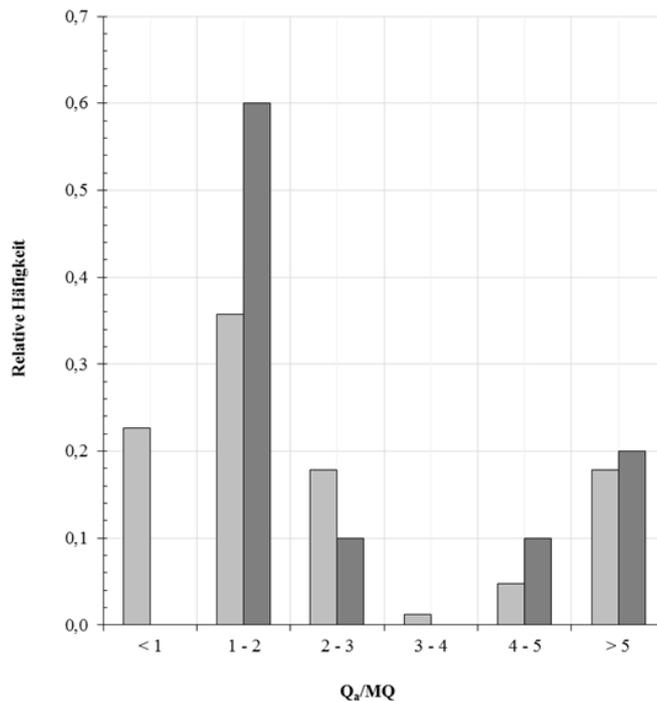


Abbildung 10: Ausbaudurchfluss (Q_a) im Verhältnis zum Mittelwasserabfluss (MQ) bei der Schwall-Einleitestelle – Gegenüberstellung der österreichweiten Gesamtsituation (hellgrau – $N=84$) und der SuREmMa-Fallbeispielauswahl (dunkelgrau – $N=10$).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wesentlichen energiewirtschaftlichen Kenndaten der repräsentativen Fallbeispiele. Insgesamt haben die 10 Fallbeispiele eine Engpassleistung von rd. 1.400 MW und ein Regelarbeitsvermögen von rd. 3,6 TWh/a. Allerdings sind 7 der 10 Fallbeispiele das „letzte“ Kraftwerk innerhalb einer Kraftwerksgruppe, so dass schwalldämpfende Maßnahmen bei den Fallbeispielen eine potenzielle Rückwirkung auf die Oberliegerkraftwerke der Kraftwerksgruppe haben können. Dadurch wird durch die repräsentativen Fallbeispiele indirekt eine Engpassleistung von in Summe rd. 4.000 MW erfasst – d.h. knapp die Hälfte der in Österreich im Jahr 2014 installierten Speicherkraftwerkskapazität – die insbesondere von betrieblichen Einschränkungen am Rückgabepunkt der Fallbeispiele betroffen sein können.

TABELLE 1: ÜBERSICHT REPRÄSENTATIVE FALLBEISPIELE.

Fallbeispiel		Ziller 1	Ziller 2	Drau 1	Drau 2	Möll	Salzach 1	Salzach 2	Salzach 3	Bregenzer Ach	Untere Ill
Kraftwerk	-	Mayrhofen	Gerlos	Amlach	Malta Unterstufe	Außerfragant	Wald	Uttendorf I und II	Kaprun Hauptstufe	Langenegg und Alberschwende	Walgauwerk
Kraftwerksgruppe	-	Zemm-Ziller	Gerlos	Einzelstandort	Malta und Reißbeck-Kreuzeck	Fragant	Einzelstandort	Stubachtal	Kaprun	Einzelstandort	Obere Ill-Lünersee
Gewässer	-	Ziller	Ziller	Drau	Drau	Möll/Drau	Salzach	Stubache/Salzach	Kapruner Ache/Salzach	Bregenzer Ach	Ill
Betreiber	-	VHP	VHP	TIWAG	VHP	KELAG	Salzburg AG	ÖBB-Infrastruktur AG	VHP	VIW-VKW	VIW-VKW
Kraftwerkstyp	-	Jahrespeicher	Jahrespeicher	Tagespeicher	Jahrespeicher	Jahrespeicher ²	Tagespeicher	Jahrespeicher	Jahrespeicher	Tagesspeicher	Tagespeicher
Engpassleistung	MW	355	200	58	41	100	24	128	260	104	86
Regelarbeitsvermögen	GWh/a	700	316	219	118	600	64	224	550	307	356
Ausbauwassermenge	m ³ /s	92	41,5	20	110	23	14	27	36,5	70	68 /100 ¹

¹Turbine 68 m³/s und Rückgabepunkt nach Ausgleichsbecken 100 m³/s;

² Das KW Außerfragant hat grundsätzlich nur einen Tagesspeicher. Der Zufluss der Kraftwerksgruppe Fragant kann jedoch weitestgehend in Oberliegerrspeicher „geparkt“ werden, weswegen insgesamt eine Jahresspeichercharakteristik vorliegt.

Quelle: KELAG Kärntner Elektrizität AG, ÖBB Infrastruktur AG, Salzburg AG, TIWAG Tiroler Wasserkraft AG, VERBUND Hydro Power GmbH, Vorarlberger Illwerke AG.

Da die Ergebnisse der ökologischen und energiewirtschaftlichen Bewertungen zum Teil Rückschlüsse auf betriebsinterne bzw. vertrauliche Daten der Kraftwerksbetreiber ermöglichen, können fallbeispielspezifische Ergebnisse nur in aggregierter oder anonymisierter Form veröffentlicht werden. Um dennoch eine transparente und nachvollziehbare Darstellung des Bewertungsansatzes zu ermöglichen, wird zusätzlich zur Auswahl der repräsentativen Fallbeispiele ein fiktives Fallbeispiel definiert. Dieses fiktive Fallbeispiel bildet ein „typisches“ Speicherkraftwerk in Bezug auf die ökologischen und energiewirtschaftlichen Standortbedingungen der analysierten repräsentativen Fallbeispiele und damit letztendlich des gesamten österreichischen Speicherkraftwerksparks ab.

Das fiktive Speicherkraftwerk hat bei einem Ausbaudurchfluss von 25 m³/s eine Engpassleistung von 100 MW und ein Regelarbeitsvermögen von 230 GWh/a. Die betrachtete Gewässerstrecke (MQ: 7 bis 35 m³/s; EZG: 200 bis 900 km²) erstreckt sich von der Schwalleinleitung unmittelbar beim Krafthaus bis zum Zusammenfluss mit einem größeren Fließgewässer 25 km flussab der Schwalleinleitung. Innerhalb dieser Gewässerstrecke befinden sich mehrere Zubringer unterschiedlicher Größenordnung und insgesamt drei Pegelstellen, deren Abflusszeitreihen neben der Ganglinie des Kraftwerksdurchflusses zur Analyse herangezogen werden können. Die betrachtete Gewässerstrecke ist in den oberen 5 Flusskilometern der Fischregion Metarhithral (untere Forellenregion) und anschließend der Fischregion Hyporhithral (Äschenregion) zuzuordnen. Im näheren Gewässerumfeld befinden sich landwirtschaftlich genutzte Flächen sowie vereinzelt Siedlungsgebiete und Verkehrsflächen (Abbildung 11). Die Gewässermorphologie wechselt zwischen stark regulierten Abschnitten im Bereich der Siedlungen, Gewässerstrecken mit mittlerem Verbauungsgrad und einigen vergleichsweise naturnahen Abschnitten.

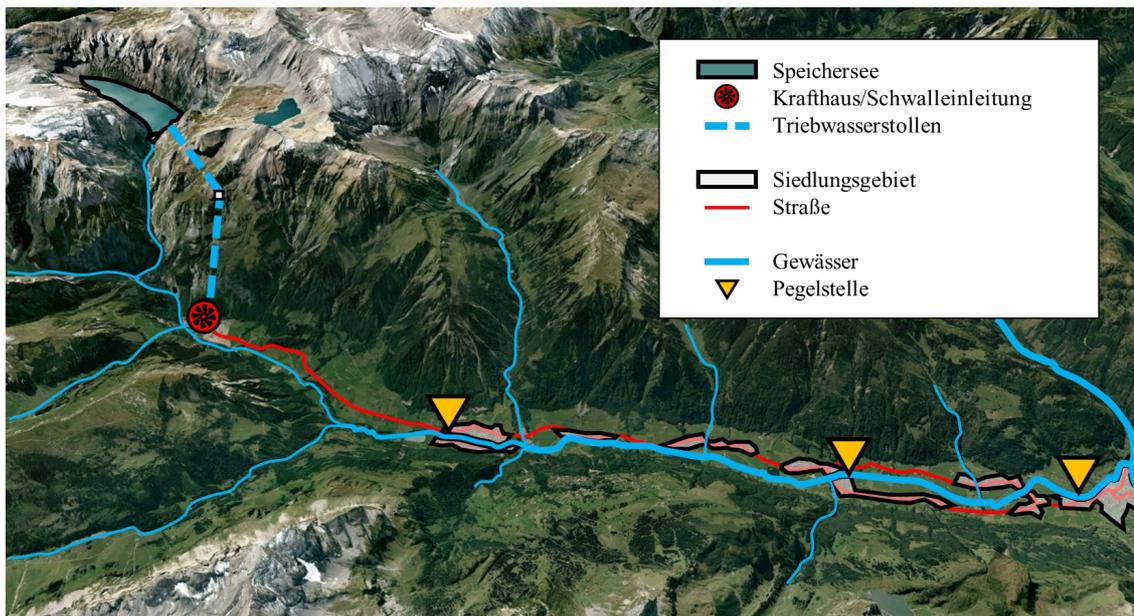


Abbildung 11: Übersichtsdarstellung fiktives Fallbeispiel (Hintergrundbild: Google Inc. – Google Earth 2016-7.1.7.2606).

5 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN

IM FOLGENDEN KAPITEL wird die im vorliegenden Projekt entwickelte Methodik zur ökologischen Bewertung der Schwallbelastung bzw. zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen erläutert. Ausgehend von ökologischen Schwallindikatoren bzw. kritischen Intensitätswerten werden zuerst die hydrologischen Wirkungsszenarien in Abhängigkeit eines bestimmten Maßnahmenumfanges definiert. Anschließend wird die hydromorphologische Situation im betrachteten Gewässerabschnitt erfasst, welche dann aus ökologischen Gesichtspunkten bewertet wird. Die einzelnen Analyseschritte werden dabei anhand des fiktiven Fallbeispiels veranschaulicht, bevor die ökologischen Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen bezogen auf sämtliche Fallbeispiele im Kapitel 5.5 zusammengefasst werden. Zusätzlich wird im Kapitel 5.4.3 auf sog. Larvenfenster eingegangen.

5.1 ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN VON SCHWALL, SCHWALLINDIKATOREN UND KRITISCHE INTENSITÄTSWERTE

Schwall kann eine Reihe von ökologischen Folgewirkungen mit sich bringen. Prinzipiell sind bei allen aquatischen Organismen Reaktionen auf Schwall zu erwarten, die Folgen können jedoch sehr unterschiedlich sein. Näher untersucht wurden diese jedoch bislang v.a. bei Benthischen Wirbellosen (Makrozoobenthos, Fischnährtiere) und Fischen.

Aus fischökologischer Sicht werden Strandungsphänomene als Hauptbelastung angesehen, wobei als wichtigste Einflussfaktoren Abstiegs geschwindigkeit, Gewässermorphologie, Wassertemperatur, Substrat, Tageszeit, Spezies und Organismengröße zu nennen sind, z.B. [4, 19, 40–43]. Flodmark et al. [41] kommen in ihrer Studie an künstlichen Versuchsrinnen sogar zu dem Schluss, dass Schwall relativ wenige direkte Auswirkungen auf Salmoniden hätte, wenn das Stranden vermieden werden könnte. In der Literatur wird zwischen direkter Strandung („beaching“ oder „interstitial stranding“) und Falleneffekten („trapping“ oder „pool trapping“) unterschieden [8, 40, 44–46].

Zur experimentellen Untersuchung von Schwallauswirkungen auf aquatische Organismen wurde 2011 in Lunz am See, Niederösterreich die Schwallversuchsanlage HyTEC (**H**ydromorphological and **T**emperature **E**xperimental **C**hannel) errichtet. Bestimmte Fragestellungen sind in freien Fließgewässern nicht, oder nur eingeschränkt, bearbeitbar und werden deshalb mit Hilfe von eigens konstruierten Fließrinnen experimentell untersucht. Die Anlage befindet sich rd. 400 m flussab des Seeausrines des Lunzer See und besteht im Wesentlichen aus zwei Fließrinnen, einer Mess- bzw. Steuerungsstation sowie einem Fischaufzucht- und -hälterungsbereich. Mittels zweier Druckrohrleitungen wird Wasser in unterschiedlichen Tiefen vom Lunzer See zur Versuchsanlage geleitet, wobei mittels einer Steuerungseinheit die gewünschten Versuchsszenarien hinsichtlich Dotierwassermenge und Mischungsverhältnis sowie der Schwallanstiegs- und -abstiegsgeschwindigkeit programmiert werden können.

Im Zuge von Strandungsexperimenten in der HyTEC Versuchsanlage [19, 43] wurden morphologische Strukturen (Mulden- und Buchtstrukturen) hinsichtlich ihres Einflusses auf das Strandungsrisiko für Fische getestet. Es zeigte sich, dass der zuvor erwähnte Falleneffekt und somit erhöhte Strandrungsrate in den Muldenstrukturen vor allem bei höheren Abstiegs geschwindigkeiten eintreten, während bei geringen Abstiegs geschwindigkeiten keine signifikanten Unterschiede zu Versuchen ohne Muldenstruktur gegeben sind. Bei Sunkabfluss angebundene Buchtstrukturen können das Strandungsrisiko allerdings deutlich verringern. Vor allem flach geneigte Kiesbänke erhöhen aber das Strandungsrisiko [40, 47–49], wobei Bachforellen aufgrund ihrer Standorttreue und Substratgebundenheit stärker davon betroffen sind als z.B. Äschen [50]. Die Abstiegs geschwindigkeit hat hinsichtlich der Strandrungsrate eine besondere Bedeutung.

Versuche in Experimentiertrinnen zeigten eine klare Reduktion des Strandrungsrisikos für Fischlarven und frühe Juvenilstadien bei einer Verminderung der Abstiegs geschwindigkeit [13, 19, 43]. In Auer et al. [43] konnte belegt werden, dass Bachforellenlarven hinsichtlich Abstiegs geschwindigkeit bzw. Strandung sensibler als Äschenlarven reagieren.

Neben dem Strandungsphänomen bei Abflussrückgang, werden Organismen beim Abflussanstieg vermehrt verdriftet bzw. abgeschwemmt [2]. Dies bedeutet zumindest einen lokalen Verlust von Fischlarven und frühen Juvenilstadien und Makrozoobenthos im betroffenen Gewässerabschnitt, z.B. [3–9]. Es wird dabei zwischen Katastrophendrift und Verhaltensdrift unterschieden [2, 4, 8]. Im Besonderen gehen Äschen nach der Emergenz aus dem Schotterkörper unabhängig vom Schwall aktiv in die Drift, um geeignete Larvenhabitate zu besiedeln [51]. Bachforellenlarven zeigen im Gegensatz dazu ein stark strukturgebundenes Verhalten nachdem sie aus dem Substrat emigriert sind. Sie suchen unter anderem am und im Substrat des Gewässers Schutz vor der Strömung [52]. Unabhängig von diesen Driftphänomenen konnte in vielen Studien [19, 43, 53–55] gezeigt werden, dass Schwallereignisse zu vermehrter Abdrift sowohl von Bachforellen- und Äschenlarven als auch von frühen Juvenilstadien der Bachforelle und Äsche führen, wobei die Drift bereits bei Anstiegsereignissen mit vergleichsweise geringer Intensität ausgelöst wird.

Generell kann davon ausgegangen werden, dass sich das Drift- und Strandrungsrisiko für Bachforellen und Äschen mit zunehmenden Alter und Körpergröße deutlich verringern. Juvenilstadien tolerieren größere Fließgeschwindigkeiten und verringern ihre hohe Sensibilität gegenüber Fließgeschwindigkeitsänderungen verglichen mit den Larven, bzw. nutzen bereits Habitate, welche ein geringeres Strandrungsrisiko aufweisen.

In Auer et al. [43] konnte belegt werden, dass sowohl Larven, als auch frühe Juvenilstadien der Äsche in der Nacht häufiger strandeten als am Tag. Oft wurde Strandung in der Nacht registriert, obwohl Fische mit derselben Körpergröße am Tag nicht mehr strandeten. Für die Bachforelle wurden ähnliche Tag/Nacht-Unterschiede festgestellt. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei Äsche und Bachforelle weitere limitierende Stadien wie Laich-, Ei- oder Emergenzstadium von anthropogen bedingten Abflussschwankungen betroffen sind [40, 56–59].

In Schmutz et al. [19, 26] wurde belegt, dass Fische anhand der fünfstufigen nationalen Bewertungsmethode (FIA – Fish Index Austria) gemäß Qualitätszielverordnung eine signifikante Reaktion auf Schwall zeigen. Der fischökologische Zustand (FIA) in Schwallstrecken liegt im Mittel im unbefriedigenden Zustand (Klasse 4) und unterscheidet sich deutlich von den weniger stark belasteten Vergleichsstrecken (Hinsichtlich der Bewertungsmethode wurde für Flüsse mit starker Geschiebeführung das Biomasse KO Kriterium außer Kraft gesetzt.). In Schwallstrecken mit geringem Verbauungsgrad ist der Zustand im Vergleich zu den stärker verbauten Strecken stets besser. Bei einer statistischen Verschneidung von hydrologischen Schwallparametern mit ökologischen Kriterien basierend auf fischökologischen Monitoringdaten, wurde a) die Häufigkeit von Schwallwellen kombiniert mit deren Intensität, b) die morphologische Ausgestaltung des Gewässers und c) die Abstiegs geschwindigkeit als wesentliche Parameter zur Beschreibung der ökologischen Auswirkungen einer Schwallbelastung identifiziert. In Gewässern mit Abstiegs geschwindigkeiten von über 0,4 cm/min entspricht der fischökologische Zustand stets der Klasse 5 (schlechter Zustand). Parallel dazu zeigen Fließrinnenexperimente, dass es ab einem Intensitätsbereich von 0,2 bis 0,6 cm/min Abstiegs geschwindigkeit zu massiver Strandung kommt, insbesondere bei frühen Larvenstadien der Äsche. Diese Werte stimmen gut mit den über das Regressionsmodell mit Freilanddaten ermittelten Werten, ab welchen eine starke Schwallbelastung nachgewiesen wurde (0,4 cm/min), überein. Ergänzende Experimente in den Fließrinnen [43] zeigten, dass auch für die Bachforellenlarve die Strandrungsraten direkt mit der Abstiegs geschwindigkeit zusammenhängen und erst bei einer Abstiegs geschwindigkeit von 0,1 cm/min keine Strandung nachgewiesen werden konnte. Vergleichend gering waren die Strandrungsraten der Äschenlarven bei einer Abstiegs geschwindigkeit von 0,3 cm/min.

Um die ökologischen Auswirkungen einer Schwallbelastung bewerten zu können, sind zusammenfassend die morphologischen Begebenheiten der schwallbelasteten Gewässerstrecke, Häufigkeit und Auftrittszeitpunkt sowie die Intensität der Schwallwellen ausschlaggebend. Um die Intensität einer Schwallbelastung detailliert beschreiben zu können sind (a) die Abflussanstiege und Abflussrückgänge der Schwallwellen (aufgrund der unterschiedlichen ökologischen Auswirkungen) getrennt zu betrachten, (b) die Intensität der Schwallwellen durch mehrere Intensitätsparameter zu erfassen (z.B. Abflussänderungsgeschwindigkeit, Amplitude, Dauer, Sunk-Schwall-Verhältnis) und (c) deren longitudinaler Verlauf darzustellen (Retentionswirkung).

Aus den vorliegenden ökologischen Erkenntnissen kann abgeleitet werden, dass Strandung von Fischlarven und frühen juvenilen Stadien hinsichtlich der negativen ökologischen Auswirkungen von anthropogen erzeugten Abflussschwankungen ein wesentliches ökologisches „Nadelöhr“ darstellt. Im gegenständlichen Bewertungssystem dieser Studie wird daher zur ökologischen Bewertung von Schwallbelastungen der Indikator „Fische“ und das Kriterium „Strandung“ mit kritischen Intensitätswerten für die Abstiegsgeschwindigkeit von 0,1 cm/min bis 0,4 cm/min herangezogen. Dieser Intensitätsbereich bezieht sich auf Larven- bzw. frühe Juvenilstadien von Äsche und Bachforelle und basiert auf den umfangreichen Untersuchungen in der HyTEC Anlage, Freilanduntersuchungen in Österreich sowie internationalen Studien. Im Allgemeinen kann aufgrund der bisherigen Untersuchungen festgehalten werden, dass (a) bei Abstiegsgeschwindigkeiten $<0,1$ cm/min weder für Larven noch für frühe juvenile Stadien ein Strandungsrisiko besteht. (b) Bei Abstiegsgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 0,1 und 0,4 cm/min kann von einem Strandungsrisiko für Fischlarven ausgegangen werden. (c) Bei Abstiegsgeschwindigkeit $>0,4$ cm/min kann von einem sehr hohen Strandungsrisiko sowohl für Fischlarven als auch für frühe juvenile Stadien ausgegangen werden. Als grundsätzliche Möglichkeit zur Vermeidung von Strandungs- und Driftphänomenen während des sensiblen Larvenstadiums wird zudem das „Larfenfenster“ angesehen (vgl. Kapitel 5.4.3), wobei Auftrittszeitpunkt sowie -dauer je Fischart und Gewässer unterschiedlich sind.

Zusammenfassend bezieht sich die entwickelte Bewertungssystematik im Rahmen dieser Studie auf das Stranden von Fischlarven und frühen juvenilen Stadien, kann allerdings ebenso für Abflussanstiege sowie andere Intensitätsparameter angewandt werden, um Schwallbelastungen in vollem Umfang zu erfassen und neben der Strandung andere gewässerökologische Auswirkungen im Detail untersuchen zu können.

5.2 HYDROLOGISCHE WIRKUNGSSZENARIEN

Um die ökologischen und energiewirtschaftlichen Auswirkungen von schwalldämpfenden Maßnahmen mehrerer Fallbeispiele gegenüber stellen zu können, ist aufgrund der Vergleichbarkeit der Ergebnisse die Bewertung von einheitlich definierten Szenarien erforderlich. Daher werden in Abhängigkeit des Maßnahmenumfanges beziehungsweise auf das Kriterium „Strandung“ folgende hydrologische Wirkungsszenarien definiert. Darunter versteht man im Rahmen dieser Studie hydrologische Situationen, die im Kontext zu gewässerökologischen Aspekten festgelegt werden und in Abhängigkeit des Maßnahmenumfanges durch unterschiedliche schwalldämpfende Maßnahmen erreicht bzw. umgesetzt werden können:

- **Szenario A:** Keine anthropogen verursachten Abflussschwankungen im Gewässer.
- **Szenario B:** Der maximale anthropogene Abflussrückgang innerhalb von 15 Minuten überschreitet am Rückgabepunkt in den Vorfluter 40% des zu erwartenden natürlichen Jahresmaximums nicht (GW_{40} – Details - vgl. Technischer Bericht A 1.2/1.3).
- **Szenario C:** Der maximale anthropogene Abflussrückgang innerhalb von 15 Minuten überschreitet am Rückgabepunkt in den Vorfluter 25% des maximalen Kraftwerksdurchflusses (Q_a) nicht.

- **Szenario D:** Der maximale anthropogene Abflussrückgang innerhalb von 15 Minuten überschreitet am Rückgabepunkt in den Vorfluter 50% des maximalen Kraftwerksdurchflusse (Q_a) nicht.
- **Szenario E:** Der maximale anthropogene Abflussrückgang innerhalb von 15 Minuten überschreitet am Rückgabepunkt in den Vorfluter 75% des maximalen Kraftwerksdurchflusse (Q_a) nicht.
- **Szenario F:** Der maximale anthropogene Abflussrückgang innerhalb von 15 Minuten überschreitet am Rückgabepunkt in den Vorfluter 100% des maximalen Kraftwerksdurchflusse (Q_a) nicht.

Anschließend werden die hydromorphologischen Begebenheiten der einzelnen Wirkungsszenarien bei sämtlichen Gewässerstrecken erfasst bzw. modelliert und hinsichtlich der zu erwartenden ökologischen Auswirkungen im Gewässer analysiert, wobei neben dem aktuellen gewässermorphologischen Zustand (ausschließlich hydrologisch wirkende Maßnahmen) auch ein szenarienspezifisch modifizierter gewässermorphologischer Zustand bewertet wird (Maßnahmenkombination aus hydrologisch und morphologisch wirkenden Maßnahmen).

Aus energie- und volkswirtschaftlicher Sicht werden die systemrelevanten Auswirkungen und entstehenden Kosten jener Maßnahmen bewertet, durch welche das jeweilige hydromorphologische Wirkungsszenario grundsätzlich umgesetzt werden könnte, wobei folgende Situationen jeweils inkl./exkl. morphologischer Maßnahmen untersucht wurden:

- Betriebliche Einschränkungen – Wirkungsszenario B bis E
- Schwalldämpfungsbecken – Wirkungsszenario B bis E
- Schwallausleitungskraftwerk – Wirkungsszenario A

5.3 ERFASSUNG HYDROMORPHOLOGISCHER VERHÄLTNISSE

Im folgenden Kapitel werden die zur Bewertung der szenarien- und fallbeispielspezifischen hydromorphologischen Situation angewandten Modelle bzw. durchgeführten Analysen (vgl. Abbildung 12) in den wesentlichen Grundzügen erläutert (Details – vgl. Technischer Bericht B).

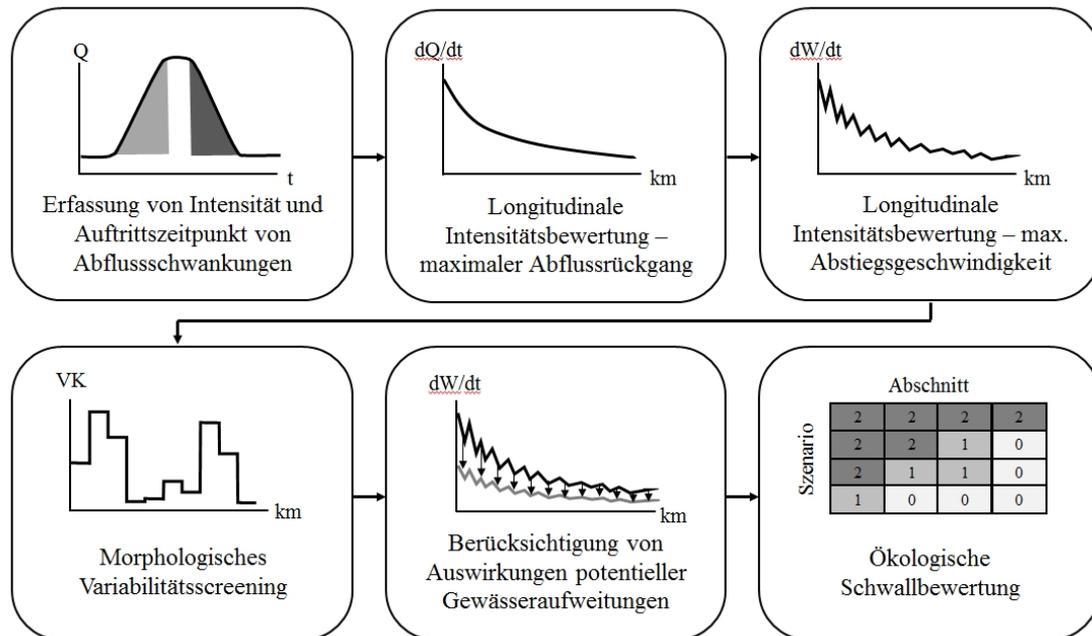


Abbildung 12: Grundlegende Systematik zur ökologischen Bewertung von schwalldämpfenden Maßnahmen.

5.3.1 ERFASSUNG VON INTENSITÄT UND AUFTRITTSZEITPUNKT ANTHROPOGEN EINGELEITETER ABFLUSSSCHWANKUNGEN UND LONGITUDINALE BETRACHTUNG DER SCHWALLINTENSITÄT

Abflussschwankungen können durch die Analyse von Abflussganglinien (z.B. bei Pegelstellen, Turbinendurchflüsse) erfasst werden. Zusammenhängende Abflussan- bzw. -abstiege werden dabei als ein Ereignis oder eine Abflussschwankung bezeichnet (Abbildung 13). Die jeweilige Ereignisintensität eines Abflussan- oder -abstiegsereignisses wird durch mehrere Parameter beschrieben (z.B. Amplitude, Dauer, Sunk-Schwall-Verhältnis, Abflussänderungsgeschwindigkeit). Zudem ist der Auftrittszeitpunkt von Bedeutung. Als grundlegender Schritt werden in dieser Studie sämtliche verfügbaren Abflusszeitreihen einer zu bewertenden Gewässerstrecke hinsichtlich der dokumentierten Abflussschwankungen analysiert (Details – vgl. Technischer Bericht B 1.1). Beim fiktiven Fallbeispiel ist die Häufigkeit und Intensität der Abflussschwankungen somit an vier Stellen punktuell bekannt (vgl. Abbildung 11 – Krafthaus, 3 Pegelstellen).

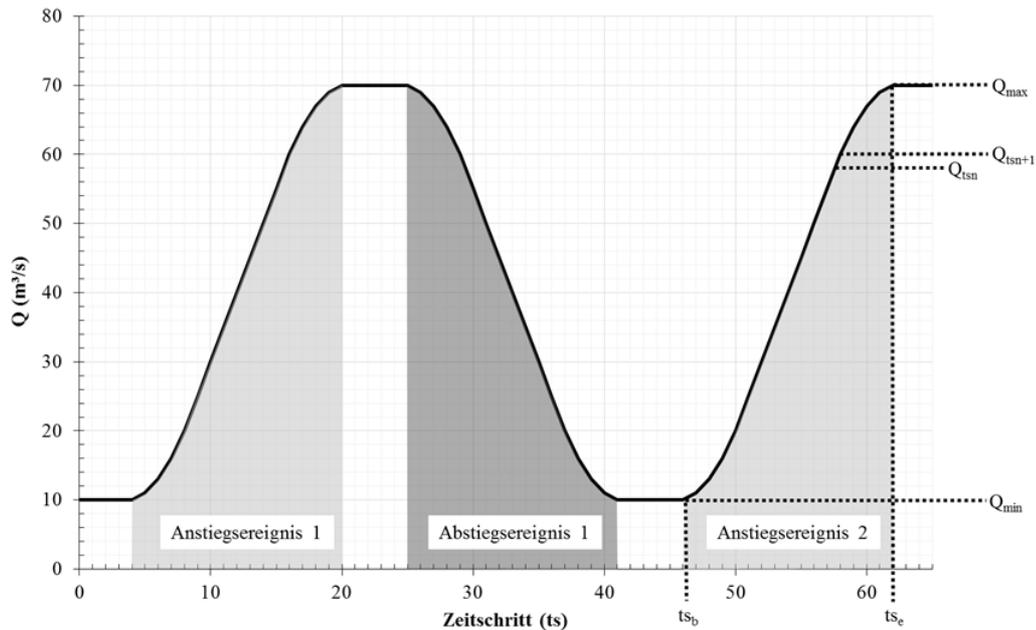


Abbildung 13: Ereignisdefinition und maßgebliche Parameter zur Beschreibung der Ereignisintensität (Q_{\max} : Maximalabfluss des Ereignisses; Q_{tsn} : Abflusswert eines bestimmten Zeitschrittes ($1 \text{ ts} \triangleq 15$ Minuten) während des Ereignisses; Q_{tsn+1} : Abflusswert des darauffolgenden Zeitschrittes während des Ereignisses; Q_{\min} : Minimalabfluss des Ereignisses; ts_b : Zeitschritt Ereignisbeginn; ts_e : Zeitschritt Ereignisende).

Die Intensität von Schwallwellen bleibt im Gewässer allerdings nicht konstant. Durch die unterschiedlichen Retentionswirkungen der Gewässerstrecken (z.B. auf die Abflussänderungsgeschwindigkeit) und durch potenzielle Auswirkungen von Zubringern (z.B. auf das Sunk-Schwall-Verhältnis) ist es unumgänglich, die Intensität der eingeleiteten Abflussschwankungen in einer longitudinalen Betrachtungsweise (Längsschnitt des betrachteten Gewässerabschnittes) darzustellen und zu beurteilen. Dafür ist es erforderlich die vom Speicherkraftwerk ausgehenden Schwallwellen flussab zu verfolgen und die Intensitätsänderungen von Pegelstelle zu Pegelstelle zu erfassen. Die Intensitätsveränderung zwischen den benachbarten Pegelstellen lässt sich dabei durch Regressionsmodelle beschreiben. Um die Intensität der eingeleiteten Abflussschwankungen für die gesamte Gewässerstrecke darzustellen, werden die Einzelmodelle schließlich zu einem Gesamtmodell zusammengefasst (Details – vgl. Technischer Bericht B 1.2). Bezugnehmend auf das fiktive Fallbeispiel ist in Abbildung 14 beispielhaft das Gesamtmodell für den Verlauf der Abflussänderungsgeschwindigkeit eingeleiteter Abstiegsereignisse mit unterschiedlicher Ausgangsintensität (Szenario B bis F) dargestellt.

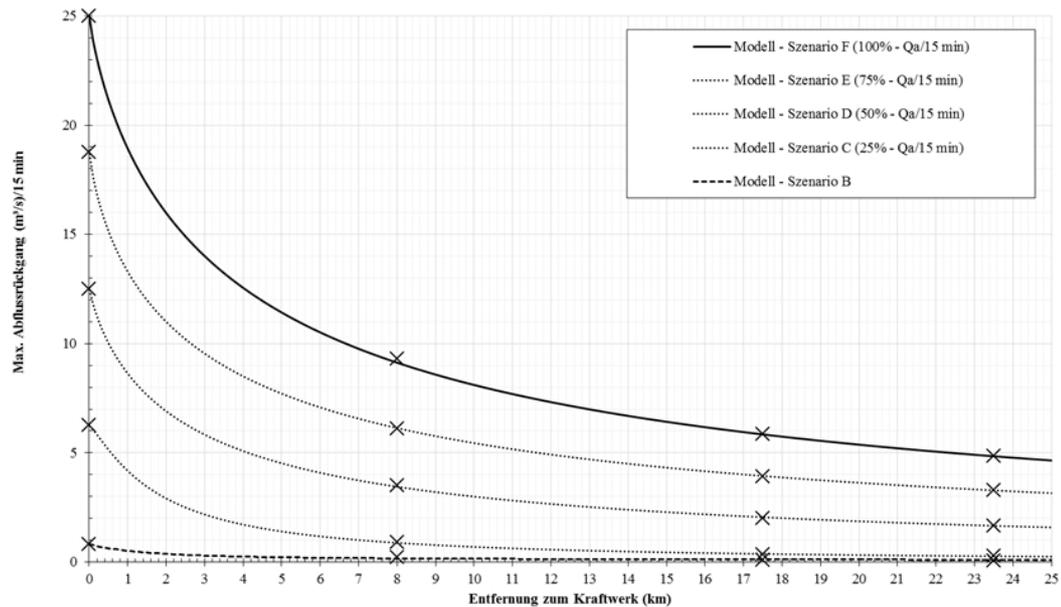


Abbildung 14: Fiktives Fallbeispiel/Retentionskurven dQ/dt - Longitudinale Betrachtungsweise der Abflussänderungsgeschwindigkeit eingeleiteter Schwallwellen mit unterschiedlicher Ausgangsintensität (Szenario B bis F – Die einzelnen Szenarien beziehen sich auf den Ausbaudurchfluss des Kraftwerkes (Q_a) (Szenario C bis F) bzw. auf einen Intensitätswert in Abhängigkeit zur Intensität natürlicher Ereignisse bei der Einleitestelle (Szenario B)) (Kreuze markieren die Lage der Pegelstellen).

5.3.2 NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DER AUS DEN ABFLUSSSCHWANKUNGEN RESULTIERENDEN WASSERSPIEGELÄNDERUNGEN

Abhängig von den hydromorphologischen Begebenheiten einer Gewässerstrecke (Flussgeometrie, Gefällsverhältnisse, Rauigkeitsverhältnisse) resultieren aus bestimmten Abflussschwankungen Wasserspiegelschwankungen mit unterschiedlichem Ausmaß. Deshalb ist es erforderlich, die aus den Abflussschwankungen resultierenden Wasserspiegeländerungen näherungsweise zu bestimmen, damit diese anschließend z.B. den kritischen Intensitätswerten zur Bewertung des Strandrungsrisikos gegenübergestellt werden können. Dabei wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass bei Gewässerabschnitten mit ähnlicher Flussdimension und vergleichbarer Gewässergeometrie auch die Wasserspiegeländerungen ähnlich ausfallen müssen. Um vergleichbare Gewässerstrecken in einzelne Gruppen zusammenzufassen, werden als erster Schritt (a) sämtliche hochauflösende Pegelstellen Österreichs nach den Variablen „Seehöhe“ und „mittlere jährliche Abflusspende“ zu insgesamt 5 Gruppen zusammengefasst. Im nächsten Bearbeitungsschritt (b) werden alle Pegelstellen, die sich innerhalb einer bestimmten Gruppe befinden, hinsichtlich der generellen Abflussverhältnisse beim Pegelprofil untersucht. Dabei werden sämtliche Pegelstellen im Nahbereich von Querbauwerken, in staubeinflussten Gewässerstrecken, in Restwasserstrecken und in künstlichen Gewässern anhand von räumlichen GIS-Analysen sowie Luftbildinterpretation identifiziert und von den weiteren Analyseschritten ausgeschlossen. Anschließend (c) werden die Pegelschlüssel der Pegelstellen, die sich in frei fließenden Gewässerstrecken befinden, in drei Abflussbereiche unterteilt (Niederwasser/Mittelwasser/Hochwasser) und für jeden Abflussbereich die „mittlere spezifische Wasserspiegeländerung“ (entspricht der mittleren Wasserspiegeländerung bei einer Abflussänderung von $1 \text{ m}^3/\text{s}$) mit der Einheit $\text{cm}/(\text{m}^3/\text{s})$ berechnet. Durch Regressionsmodelle in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße kann anschließend (d) für jede Gruppe die mittlere spezifische Wasserspiegeländerung für Gewässerstrecken mit einer bestimmten Einzugsgebietsgröße (getrennt für den Niederwasser-, Mittelwasser- und Hochwasserbereich) näherungsweise bestimmt werden. Im abschließenden Bearbeitungsschritt (e) wird die tatsächliche Breite eines Gewässerabschnittes (bei bettbildendem Wasserstand) den bei der jeweiligen Einzugsgebietsgröße zu erwartenden mittleren Breitenverhältnissen

(gemäß Pegelprofilen) gegenübergestellt und die Abweichung mittels empirisch ermittelten Breitenfaktor berücksichtigt. Zusammenfassend können durch die beschriebene Vorgehensweise die zu erwartenden spezifische Wasserspiegeländerungen (vgl. Abbildung 15) von eingeleiteten Abflussschwankungen (vgl. Abbildung 14) anhand der Parameter Einzugsgebietsgröße, Mittelwasserabfluss und mittlerer Gewässerbreite näherungsweise bestimmt werden (Details – vgl. Technischer Bericht B 1.3).

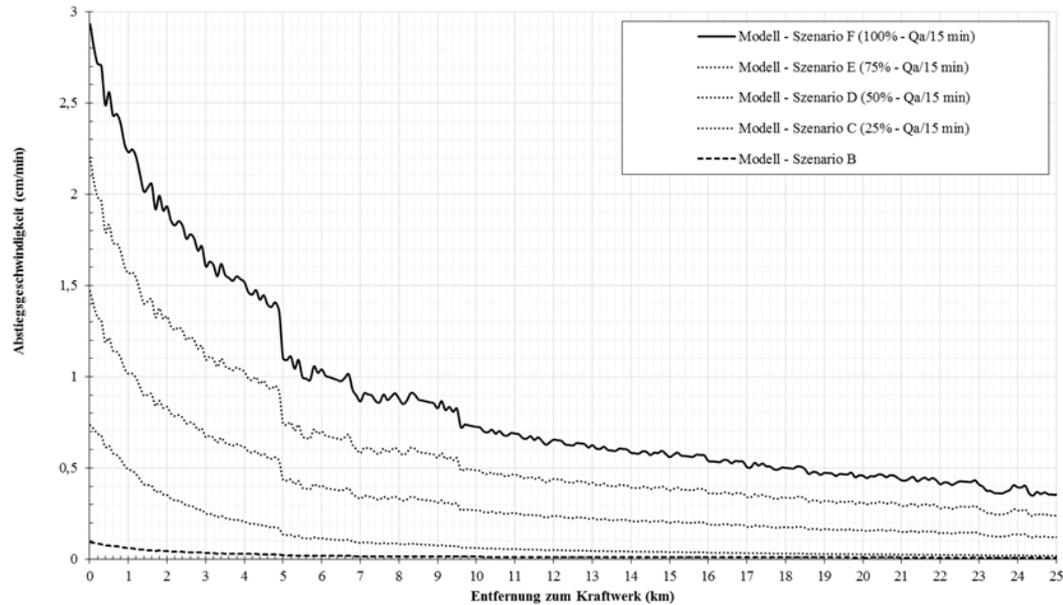


Abbildung 15: Fiktives Fallbeispiel/Retentionskurven dW/dt - Longitudinale Betrachtungsweise der Abstiegsgeschwindigkeit (cm/min) einzelner hydrologischer Szenarien (B-F) bei mittleren Abflussverhältnissen.

5.3.3 MORPHOLOGISCHES VARIABILITÄTSSCREENING UND 2D MODELLIERUNG MORPHOLOGISCHER MASSNAHMEN

In morphologisch belasteten Schwallstrecken ist davon auszugehen, dass die Wirkung einer hydrologischen Sanierung der Schwallbelastung durch zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässermorphologie maßgeblich verstärkt werden kann bzw. im Falle von sehr stark kanalisiertem Gewässerabschnitten mit sehr geringer Habitatverfügbarkeit sogar die Voraussetzung für eine Verbesserung ist.

Als nächsten Schritt ist es daher erforderlich, die morphologischen Gegebenheiten der betrachteten Gewässerabschnitte insbesondere die morphologische Vielfalt als Indikator für die potenzielle Habitatqualität näher zu beschreiben. Dies wird im Rahmen dieses Projektes durch eine neu entwickelte Screeningmethode durchgeführt. Beim entwickelten „morphologischen Variabilitätsscreening“ handelt es sich um eine einfach anwendbare Methode zur Quantifizierung der morphologischen Vielfalt, mit dem Ziel, potenzielle morphologische Defizite entlang der untersuchten Strecken der Fallbeispiele objektiv ausweisen zu können (Details – vgl. Technischer Bericht B 1.4).

Anhand von Luftbildern können morphologisch degradierte Fließgewässerstrecken von morphologisch naturnahen Strecken durch die Variabilität der Gewässerbreite im Längsverlauf unterschieden werden. Als beschreibender Parameter der morphologischen Vielfalt wird daher der Variationskoeffizient (VK) der Gewässerbreite bei bettbildendem Wasserstand („active channel“) gewählt. Zur Validierung des VK der Breite als Maß für die morphologische Heterogenität eines Gewässers wird der von Gostner et al. [60] entwickelte hydromorphologische Index der Diversität (HMID – basierend auf 2D-hydrodynamischen Modellen) herangezogen.

Der VK errechnet sich aus dem Verhältnis von Standardabweichung (σ) zu Mittelwert (μ) und stellt ein standardisiertes Maß der Streuung dar. Mithilfe dieser statistischen Kennzahl ist es möglich, einen Vergleich von Datensätzen mit unterschiedlich großen Mittelwerten (Gewässerbreiten) durchzuführen [61, 62], welche sich im Kontext dieses Projekts aus den unterschiedlichen Größen der betrachteten Fließgewässer ergeben.

Für das morphologische Variabilitätsscreening werden die Fallbeispiele in 500 m Abschnitte (Betrachtungsfenster) unterteilt und daraus 10 Gewässerbreiten von Böschungsoberkante zu Böschungsoberkante bzw. die Breite bei bettbildendem Wasserstand gemessen. Die unten dargestellte Abbildung 16 zeigt beispielhaft die Anordnung von Messprofilen zur Bestimmung des VK mithilfe von Betrachtungsfenstern.

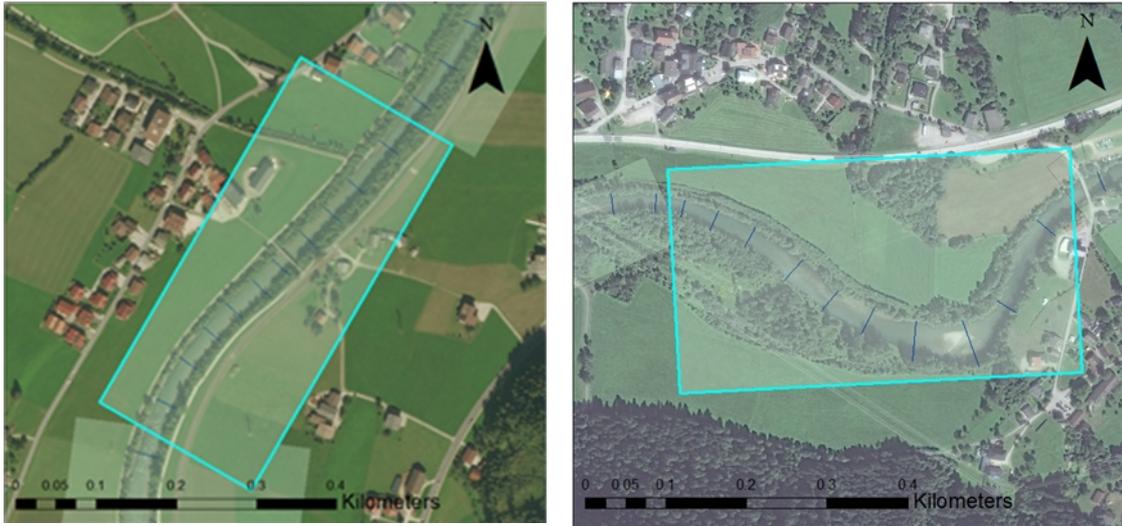


Abbildung 16: Beispiel für die Anordnung von Messprofilen zur Bestimmung des VK mithilfe von Betrachtungsfenstern; links: Abschnitt mit niedriger morphologischer Vielfalt aus Fallbeispiel Ziller mit $VK = 0.03$ (Quelle Orthofoto: Basemap 11/2016); rechts: Abschnitt mit höherer morphologischer Vielfalt aus Fallbeispiel Möll mit $VK = 0.32$ (Quelle Orthofoto: Basemap 11/2016).

Je größer der Wert des VK, umso naturnäher bzw. heterogener (= hohe potenzielle Habitatvielfalt und -verfügbarkeit) ist die betrachtete Gewässerstrecke einzustufen. Umgekehrt weisen stark degradierte, wie z.B. kanalisierte Gewässer einen VK nahe dem Wert 0 auf. Die unten dargestellte Grafik zeigt die ausgewerteten Variationskoeffizienten aller 500 m Abschnitte unterteilt in die im Projekt behandelten Gewässer sowie eine Gesamtdarstellung aller Teilabschnitte (vgl. Abbildung 17). Ein typisches Ergebnis des Variabilitätsscreening bezugnehmend auf das fiktive Fallbeispiel ist in einer longitudinalen Betrachtungsweise in Abbildung 18 dargestellt (Kapitel 5.4.1).

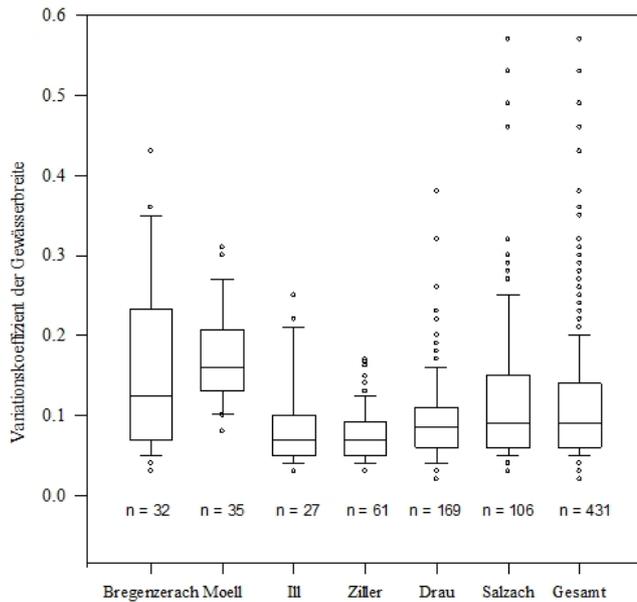


Abbildung 17: Box-Plot- Darstellung der ausgewerteten Variationskoeffizienten aller 500 m Abschnitte unterteilt in die einzelnen Gewässer der Fallbeispiele und gesamt.

Um in schwallbelasteten Gewässerstrecken die ökologische Wirksamkeit einzelner morphologischer Maßnahmen hinsichtlich Habitatverfügbarkeit zusätzlich zu überprüfen, werden morphologische Maßnahmen in bestehende 2D-hydrodynamisch-numerische (HN)-Modelle implementiert und mithilfe der Habitatmodellierung die damit einhergehende Änderung der Habitatverfügbarkeit untersucht (vgl. Technischer Bericht B 2.3). Als Zeigerart wird die Bachforelle (0+, 1+, 2+) gewählt, weil sie in Österreich in allen untersuchten schwallbeeinflussten Gewässern als Leitfischart oder häufige Begleitart vorkommt [63]. Zusätzlich werden folgende Maßnahmentypen hinsichtlich der Änderung der vertikalen Abstiegsgeschwindigkeit (dW/dt) mithilfe des 2D-HN-Modells untersucht: Flussaufweitungen, Herstellung eines Seitengerinnes, Anbindung eines einseitig angebundenen Seitenarms, Restrukturierung und Anbindung von Zubringern sowie der Einbau von „Instream Structures“. Die beiden zuerst genannten Maßnahmentypen unterscheiden sich wesentlich von allen anderen dahingehend, dass neben einer deutlichen Zunahme an nutzbarem Lebensraum für alle untersuchten Altersklassen der Bachforelle auch eine Reduktion der lokal auftretenden vertikalen Abstiegsgeschwindigkeit nachgewiesen wird. Weiters wird aufgezeigt, wie wichtig die Bereitstellung von stabilen Habitaten durch die Anbindung von nicht schwallbelasteten Zubringern für das Gesamtsystem ist (Details – vgl. Technischer Bericht B 2.3).

5.3.4 AUSWIRKUNGEN POTENZIELLER GEWÄSSERAUFWEITUNGEN

Wesentlich ist aus Sicht der Schwallhydraulik, dass eine Verbreiterung des Abflussquerschnitts im Gerinne lokal zu einer Verringerung der Wasserspiegeldifferenz zwischen Schwall- und Sunkabfluss führt und sich somit positiv auf die für das Strandungsrisiko relevante vertikale Abstiegsgeschwindigkeit auswirkt. Zur Quantifizierung der Auswirkungen einer solchen Vergrößerung der Gewässerbite in Bezug auf die vertikalen Abstiegsgeschwindigkeiten werden (hinsichtlich Breite und Gefälle) repräsentative synthetische Gerinne erstellt und die Änderungen der Abstiegsgeschwindigkeiten infolge unterschiedlicher Aufweitungsszenarien (2- bis 3-fach) mithilfe von eindimensionaler (1D) HN-Modellierung ermittelt. Um zusätzlich die Bandbreite an unterschiedlichen hydrologischen Situationen bzw. die variierenden Ausbaugrade der einzelnen KWs abzudecken, werden drei unterschiedliche hydrologische Szenarien in die instationäre HN-Modellierung implementiert (vgl. Tabelle 2).

TABELLE 2: HYDROLOGISCHE SZENARIEN ZUR BESTIMMUNG DER VERTIKALEN ABSTIEGSGESCHWINDIGKEIT MITHILFE DER 1D - HN – MODELLIERUNG.

Szenario	Q_{\min} (m ³ s ⁻¹)	ΔQ (m ³ s ⁻¹)
klein	20	20
mittel	20	80
groß	150	100

Die Ergebnisse aus der HN-Modellierung ermöglichen es, mögliche Flussaufweitungen und deren Auswirkungen auf die vertikale Abstiegsgeschwindigkeit abzuschätzen bzw. zu prognostizieren. D.h. es können die Retentionskurven aus den hydrologischen Modellen (vgl. Abbildung 15) um die relativen Differenzen der Abstiegsgeschwindigkeit in Bezug auf die unterschiedlichen Aufweitungsszenarien systematisch angepasst werden (vgl. Abbildung 20 und Abbildung 21), wenn der Umfang einer potenziellen Aufweitung im Vergleich zur aktuellen Gewässerbreite bekannt ist (keine, zweifache oder dreifache Aufweitung möglich). Die Gewässerstrecken sämtlicher Fallbeispiele werden anhand von Luftbildinterpretation deshalb dahingehend untersucht, ob Grünland als grundsätzlich für Aufweitungen zur Verfügung stehende Fläche vorhanden ist (vgl. Technischer Bericht B 2.2).

Im Rahmen dieser Studie wird davon ausgegangen, dass in den aufgeweiteten Gewässerstrecken durch unterschiedliche morphologische Maßnahmenkombinationen eine ausreichende Habitatvielfalt und somit eine potenziell ausreichende Habitatverfügbarkeit erreicht werden kann (Voraussetzung: sanierter Geschiebehalt). Hinsichtlich des Strandrungsrisikos werden die Auswirkungen von morphologischen Maßnahmen allerdings ausschließlich in Bezug auf eine Verringerung der vertikalen Abstiegsgeschwindigkeit bewertet.

5.4 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG DER SZENARIENSPEZIFISCHEN HYDROMORPHOLOGISCHEN VERHÄLTNISSE

Die ökologische Bewertung der schwalldämpfenden Maßnahmen basiert auf den hydromorphologischen Begebenheiten im Gewässer als Resultat der einzelnen hydrologischen Wirkungsszenarien inkl./exkl. zusätzlicher morphologischer Maßnahmen. Dazu werden im folgenden Kapitel die Ergebnisse der einzelnen Analyseschritte (vgl. Kapitel 5.3.1 – 5.3.4) zusammengeführt und am Beispiel des fiktiven Fallbeispiels aus ökologischer Sicht (vgl. Kapitel 5.1) bewertet.

5.4.1 MORPHOLOGISCHE DIVERSITÄT UND POTENZIELLE MORPHOLOGISCHE MASSNAHMEN

Als erster Schritt wird die morphologische Diversität (indirekt auch Habitatverfügbarkeit) der Gewässerstrecke anhand des morphologischen Variabilitätsscreenings analysiert (vgl. Abbildung 18). Dabei ist ein geringer Variationskoeffizient ein Indikator für stark kanalisierte Flussabschnitte mit geringer morphologischer Diversität (vgl. Kapitel 5.3.3). Mit höherer morphologischer Variabilität steigt die Wahrscheinlichkeit, dass aus morphologischer Sicht nutzbare Habitate – vor allem für Larven- und Jungfischstadien – prinzipiell verfügbar sind. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass der morphologische Sanierungsbedarf umso größer ist, je geringer der Variationskoeffizient ausfällt.

Um den morphologischen Zustand hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen zu berücksichtigen, wird im Rahmen dieser Studie davon ausgegangen, dass die Habitatverfügbarkeit für Larven- und Jungfische bei Variationskoeffizienten kleiner 0,1 so gering ist, dass das ökologische Verbesserungspotential unabhängig von der hydrologischen Situation zur Gänze durch den morphologischen Zustand limitiert wird (vgl. Abbildung 18 – oranger Bereich). Umgekehrt wird davon

ausgegangen, dass das ökologische Verbesserungspotential schwalldämpfender Maßnahmen in Abschnitten mit Variationskoeffizienten über 0,1 in Abhängigkeit der Habitatverfügbarkeit teilweise oder bis zur Gänze ausgeschöpft werden kann. Aufgrund dieser Definition wird ermöglicht, dass das Verbesserungspotential von schwalldämpfenden Maßnahmen (a) auf den morphologischen Istzustand sowie (b) auf einen hypothetisch sanierten morphologischen Zustand bezogen werden kann. Im hypothetisch sanierten Zustand wird davon ausgegangen, dass sämtliche Abschnitte mit einem Variationskoeffizienten $< 0,1$ morphologisch saniert werden können, wenn potenziell Grundflächen zur Verfügung stehen, ohne Siedlungsgebiete und Infrastruktur beanspruchen zu müssen (vgl. Abbildung 18 – grüner Bereich) und wenn die jeweilige hydrologische Situation auf ein Verbesserungspotential schließen lässt (vgl. Kapitel 5.4.2). Der potenzielle Umfang der morphologischen Maßnahmen wird dabei anhand von Luftbildinterpretation ermittelt (vgl. Abbildung 18 – grüner Bereich) und anschließend die zu erwartenden szenarienspezifischen Kosten abgeschätzt (Details – vgl. Technischer Bericht B 2.2).

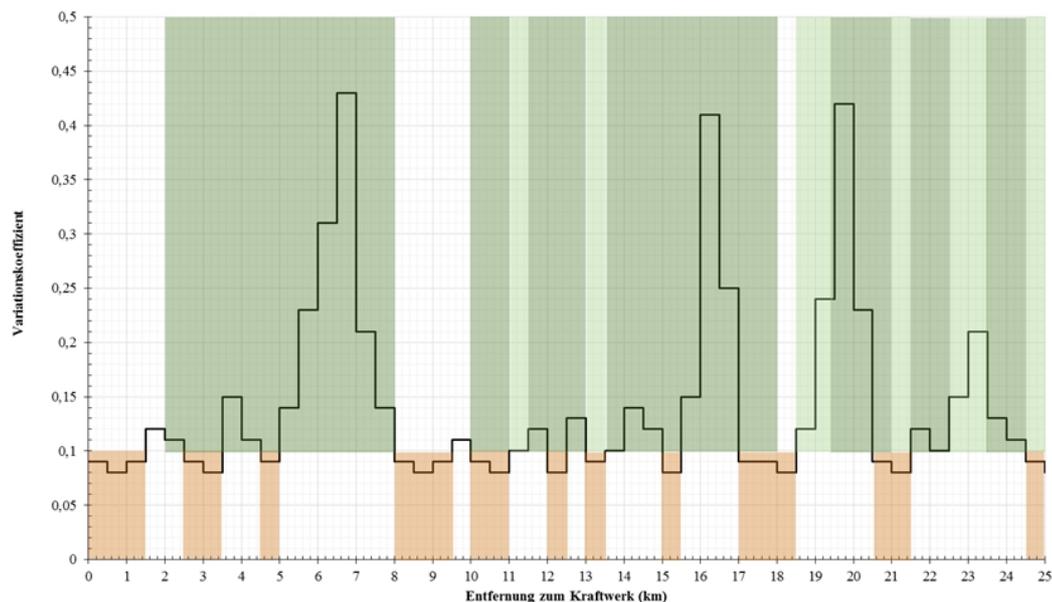


Abbildung 18: Fiktives Fallbeispiel – Gegenüberstellung von Gewässerstrecken, die potenziell aufgeweitet werden können, ohne Siedlungsflächen und Infrastruktur zu beeinflussen (basierend auf Luftbildinterpretation; Aufweitung auf die doppelte (hellgrün) bzw. dreifache (dunkelgrün) aktuelle Gewässerbreite möglich) und stark kanalisierten Gewässerstrecken (orange – Variationskoeffizient $< 0,1$).

5.4.2 BEWERTUNG DES STRANDUNGSRIKOS UNTER DER BERÜCKSICHTIGUNG DER AUSWIRKUNGEN MORPHOLOGISCHER MASSNAHMEN

Nachdem aus flussmorphologischer Sicht die morphologische Diversität bzw. indirekt auch die Habitatverfügbarkeit für den gesamten betrachteten Gewässerabschnitt näherungsweise bestimmt wurde, wird die hydrologische Situation hinsichtlich der zu erwartenden ökologischen Auswirkungen quantifiziert. Hierfür wird im Rahmen dieser Studie das Strandungsrisiko für Fischlarven und frühen Juvenilstadien bzw. die dementsprechenden kritischen Intensitätswerte (0,1 bis 0,4 cm/min) als maßgebliches „ökologisches Nadelöhr“ herangezogen (vgl. Kapitel 5.1), wobei die Situation bei mittleren Abflussverhältnissen bewertet wird. Dabei wird als erster Schritt (a) das Strandungsrisiko für die aktuelle morphologische Situation (vgl. Abbildung 19) bzw. für ein hypothetisches Aufweitungsszenario auf die doppelte (vgl. Abbildung 20) bzw. dreifache aktuelle Gewässerbreite (vgl. Abbildung 21) ermittelt, wobei die Retentionskurven durch die jeweils zu erwartenden Auswirkungen der unterschiedlichen Aufweitungsszenarien angepasst werden (vgl. Kapitel 5.2.4). Zur diskreten Bewertung des Strandungsrisikos wird die Gewässerstrecke in 5 km lange Bewertungsabschnitte geteilt. Anschließend wird der Verlauf der Retentionskurven im jeweiligen Bewertungsabschnitt den kritischen Intensitätswerten bezüglich Strandungsrisiko gegenübergestellt

(vgl. Abbildung 19, 21, 22 – grüner Balken obere/untere Begrenzung). Wenn die Retentionskurven eines bestimmten Szenarios (zur Gänze oder teilweise) im jeweiligen Abschnitt über der oberen Balkenbegrenzung liegen, kann davon ausgegangen werden, dass ein sehr hohes Strandrungsrisiko für Fischlarven und frühe Juvenilstadien besteht (vgl. z.B. Abbildung 19 – Szenario F (roter Rahmen) km 0-25). Liegt der Kurvenverlauf im Bereich des grünen Balkens, kann von einem Strandrungsrisiko für Fischlarven ausgegangen werden (vgl. z.B. Abbildung 20 – Szenario F (roter Rahmen) km 20-25; Abbildung 21 – km 15-25). Liegt die gesamte Kurve unterhalb der unteren Balkenbegrenzung ist davon auszugehen, dass weder für Fischlarven noch für frühe Juvenilstadien ein Strandrungsrisiko besteht (vgl. Abbildung 19, 21, 22 – Szenario B km 0-25).

Im nächsten Schritt (b) werden die Abschnittsbewertungen mit den potenziell umsetzbaren Aufweitungsszenarien verschnitten, um neben der ökologischen Bewertung basierend auf dem morphologischen Istzustand auch einen prinzipiell erreichbaren morphologischen Zustand (vgl. Kapitel 5.3.3/5.3.4) analysieren zu können. Wenn im betrachteten Abschnitt aufgrund von Siedlungen und Infrastruktur keine morphologischen Maßnahmen möglich sind, oder gemäß morphologischem Variabilitätsscreening davon auszugehen ist, dass im jeweiligen Abschnitt Habitate verfügbar sind (vgl. Abbildung 18 – $VK > 0,1$), wird dem jeweiligen Abschnitt die Bewertung des Istzustandes (vgl. Abbildung 19) zugewiesen. Sind im Gegensatz dazu im betrachteten Abschnitt aber morphologische Maßnahmen prinzipiell umsetzbar und hinsichtlich einer Erhöhung der morphologischen Diversität auch zielführend (vgl. Abbildung 18 – $VK < 0,1$), wird in Abhängigkeit des Umfangs der potenziell möglichen Aufweitung (doppelte/dreifache Aufweitung) die Abschnittsbewertung des jeweiligen hypothetischen Aufweitungsszenarios zugewiesen (vgl. Abbildung 20, 22). Zusammenfassend kann durch die beschriebene Vorgehensweise basierend auf den unterschiedlichen hydrologischer Wirkungsszenarien das Strandrungsrisiko und die potenzielle Habitatverfügbarkeit für den aktuellen morphologischen Zustand sowie für einen zielführenden fiktiven morphologischen Zustand bewertet werden. Dies ermöglicht einen Vergleich der ökologischen Wirksamkeit schwalldämpfender hydrologischer Maßnahmen (betriebliche Einschränkung, Dämpfungsbekken, Ausleitungskraftwerk) sowohl inklusive als auch exklusive morphologischer Maßnahmen.

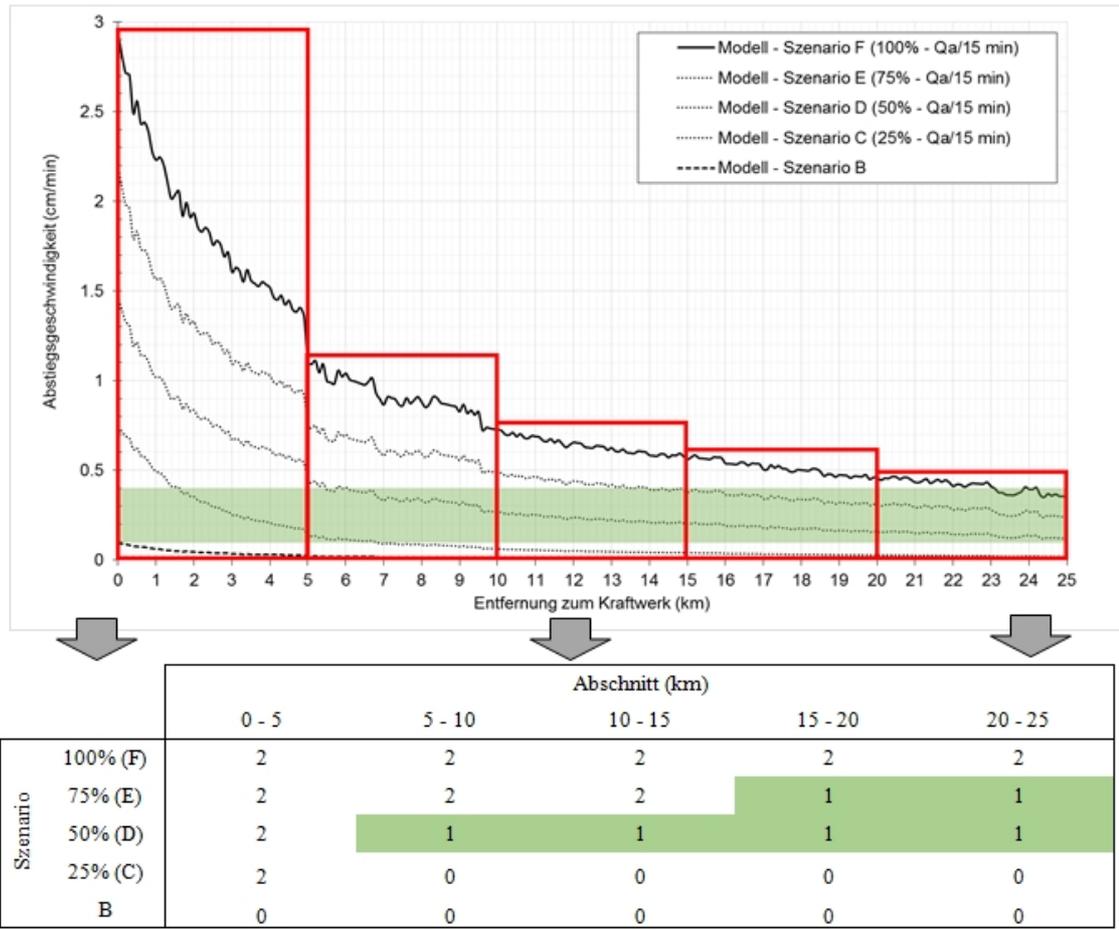
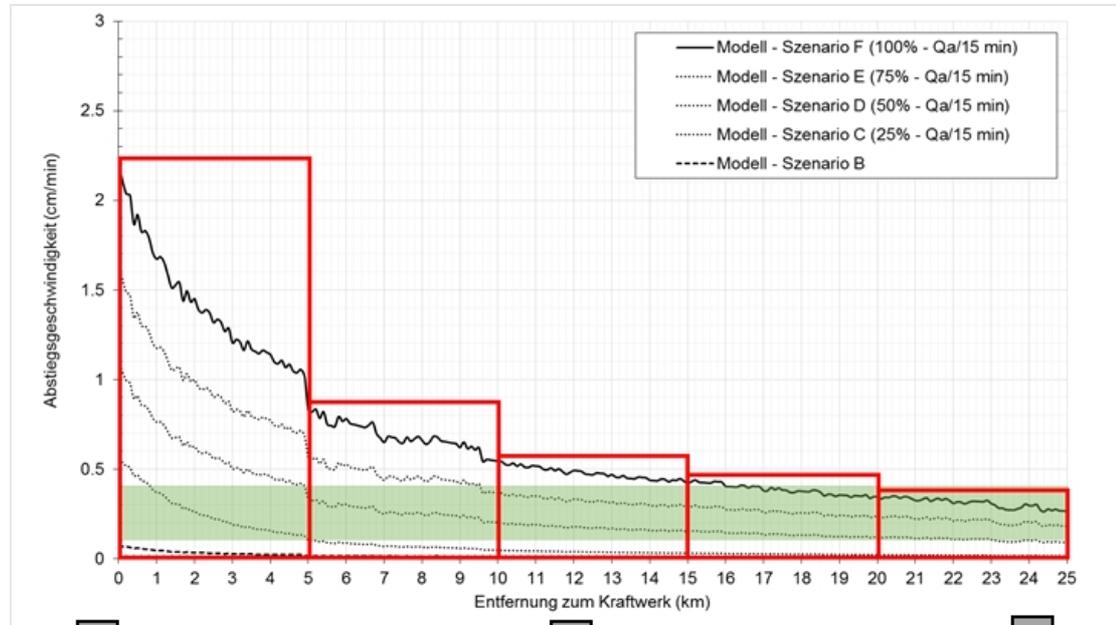


Abbildung 19: Fiktives Fallbeispiel – Longitudinale Bewertung des Strandrungsrisikos für Fischlarven und frühen Juvenilstadien bei aktuellen gewässermorphologischen Verhältnissen (0 – kein Strandrungsrisiko; 1 – Strandrungsrisiko; 2 – sehr hohes Strandrungsrisiko) einzelner hydromorphologischer Szenarien (B-F) durch Verschneidung mit kritischen Intensitätswerten (grüner Bereich) (km – Kilometer; Roter Rahmen beziehen sich auf die Intensität von Szenario F).



Szenario	Abschnitt (km)				
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 25
100% (F)	2	2	2	2	1
75% (E)	2	2	1	1	1
50% (D)	2	1	1	1	1
25% (C)	2	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0

Abbildung 20: Fiktives Fallbeispiel – Longitudinale Bewertung des Strandrungsrisikos für Fischlarven und frühen Juvenilstadien bei einer hypothetischen Aufweitung auf die doppelte aktuelle Gewässerbreite (0 – kein Strandrungsrisiko; 1 – Strandrungsrisiko; 2 – sehr hohes Strandrungsrisiko) einzelner hydromorphologischer Szenarien (B-F) durch Verschneidung mit kritischen Intensitätswerten (grüner Bereich) (km – Kilometer; Roter Rahmen beziehen sich auf die Intensität von Szenario F).

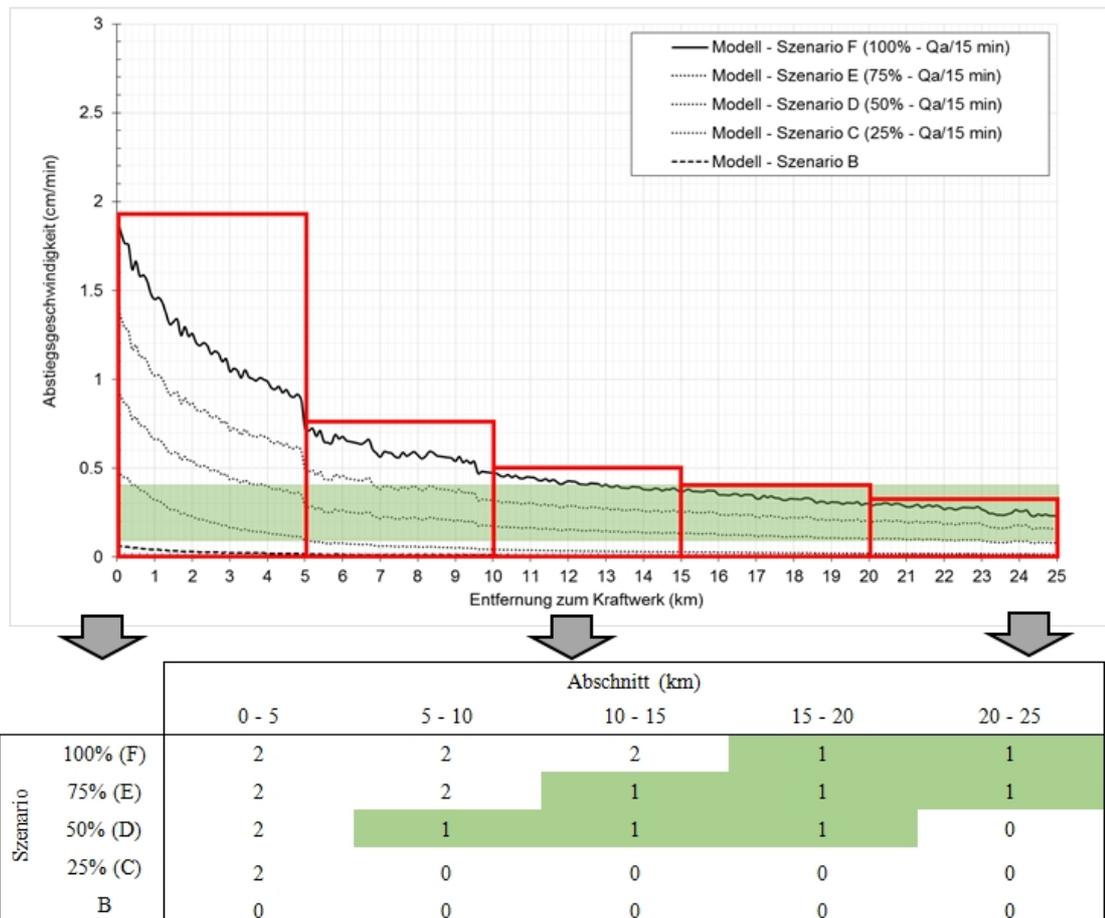


Abbildung 21: Fiktives Fallbeispiel – Longitudinale Bewertung des Strandrungsrisikos für Fischlarven und frühen Juvenilstadien bei einer hypothetischen Aufweitung auf die dreifache aktuelle Gewässerbreite (0 – kein Strandrungsrisiko; 1 – Strandrungsrisiko; 2 – sehr hohes Strandrungsrisiko) einzelner hydromorphologischer Szenarien (B-F) durch Verschneidung mit kritischen Intensitätswerten (grüner Bereich) (km – Kilometer; Roter Rahmen beziehen sich auf die Intensität von Szenario F).

Aus den unterschiedlichen Kurvenverläufen in den Abbildung 19 - Abbildung 21 ist ersichtlich, dass eine hypothetische durchgehende Aufweitung der Gewässerstrecke das Strandrungsrisiko insgesamt verringern könnte. Das prognostizierte Ausmaß einer Verringerung des Strandrungsrisikos hält sich dabei allerdings vor allem zwischen dem zwei- und dreifachem Aufweitungsszenario in Grenzen. Hierzu ist explizit anzumerken, dass die Auswirkungen von potenziellen Gewässeraufweitungen durch die beschriebene Vorgehensweise auf der räumlichen Skalenebene längerer Gewässerstrecken lediglich tendenziell dargestellt werden sollen und eine detaillierte hydraulisch/morphologische Einzelfallbegutachtung keinesfalls ersetzen können.

5.4.3 LARVENFENSTER

Fischlarven reagieren im Vergleich zu Juvenilstadien wesentlich sensibler gegenüber Schwall. Bereits bei geringeren Abstiegsgeschwindigkeiten sind Larven verglichen mit den Juvenilstadien einem höheren Strandrungsrisiko ausgesetzt. Somit sind die Abstiegsgeschwindigkeiten ohne Strandrungsrisiko für Larven deutlich geringer. Der Zeitraum, in dem das sensible Larvenstadium im Gewässer auftritt, wird in weiterer Folge „Larvenfenster“ genannt. Mit einer zeitlichen Eingrenzung des Larvenfensters und der gegenständlichen Bewertungssystematik (vgl. Kapitel 5.3.2 bis 5.4.2) lassen sich die Voraussetzungen für die Definition einer gewässer- und organismenspezifisch angepassten temporären Reduktion der Schwallbelastung schaffen. Im Folgenden wird eine potenzielle Vorgehensweise zur Einstufung des Larvenfensters für die Arten Bachforelle und Äsche vorgestellt (Details – vgl. Technischer Bericht B 2.1).

Laichzeitpunkt, Schlupf und Entwicklungsdauer der Larve zum Jungfisch sind arten- und gewässerspezifisch und hängen v.a. mit der Wassertemperatur zusammen. Außerdem spielen genetisch bedingte Unterschiede (lokale Adaption) der Populationen eine Rolle. Grundlage einer ersten Abschätzung gewässerspezifischer Larvenfenster der Fischarten Äsche (*Thymallus thymallus*) und Bachforelle (*Salmo trutta*) ist eine Befragung von Fischern und Bewirtschaftern der jeweiligen Flüsse, welche den Laichzeitraum der beiden Fischarten aufgrund langjähriger Beobachtung zeitlich eingrenzen konnten (vgl. Tabelle 3). Anhand dieser Laichzeiträume (Bachforelle im Herbst; Äsche im Frühjahr) wird mittels Temperaturdaten der Flüsse (Tagesmittelwerte der letzten 10 Jahre, Pegeldata Hydrographischer Dienst Österreich) und den von der Temperatur abhängigen Entwicklungsphasen bzw. Wachstumsraten der beiden Fischarten (Äsche aus [64]; Bachforelle aus [65]) der Beginn des Larvenstadiums errechnet. Der Beginn des Larvenfensters wird dabei als Zeitpunkt der Emergenz der Fischlarven aus dem Schotterkörper definiert.

TABELLE 3: LAICHZEITRÄUME, WELCHE DIE BASIS DER BERECHNUNG DER IN ABBILDUNG 22 DARGESTELLTEN LARVENFENSTER SIND.

Fluss	Äsche	Bachforelle	Fluss	Äsche	Bachforelle
Bregenzerach	01.05.-30.06	25.11.-07.12.	Große Mühl	20.03.-20.04.	01.10.-15.11.
Ill	20.03.-20.04.	01.11.-30.11.	Kamp	15.04.-15.05.	01.11.-31.12.
Ziller	01.04.-30.04.	01.11.-15.12.	Erlauf	20.03.-20.04.	01.11.-31.12.
Oberer Inn (oberhalb Innsbruck)	01.04.-30.04.	01.11.-31.12.	Mur (Murau)	27.03.-31.05.	01.11.-30.11
Unterer Inn (unterhalb Innsbruck)	15.03.-15.04.	01.11.-31.12.	Zederhausbach	01.05.-07.05.	01.11.-31.12.
Obere Salzach (Mittersill)	01.03.-30.05.	01.10.-31.12.	Isel	31.03.-15.04.	01.11.-31.12.
Saalach	15.04.-15.05.	15.11.-30.11.	Möll	15.03.-31.05.	01.11.-31.12.
Gasteiner Ache	18.03.-15.05.	28.10.-06.01.	Kleine Drau	25.03.-31.03.	01.11.-31.12.
Wagrainer Ache	01.04.-30.04.	01.10.-31.12.	Drau (Sachsenburg)	23.03.-07.04.	01.11.-31.12.
Enns (Stein an der Enns)	20.04.-20.05.	01.11.-31.12.			

Hinsichtlich der zeitlichen Eingrenzung des Larvenfensters wird in dieser Studie der Ansatz verfolgt, die besonders kritische Phase nach der Emergenz temporär zu erfassen. Die Dauer dieser kritischen Phase wird anhand der durchgeführten Strandungsexperimente in der HyTEC Versuchsanlage in Lunz am See [19, 43] abgeschätzt. Während dieser Phase sind die Fischlarven ganz besonders sensibel gegenüber kurzfristigen Abflussschwankungen. Für die Äsche wird dieser Zeitraum mit zwei Wochen und für die Bachforelle mit vier Wochen bemessen. Der Unterschied der beiden Fischarten ist darin begründet, dass sich das Reaktionsvermögen von Äschenlarven schneller vergrößert als das bei Bachforellenlarven der Fall ist. Die Dauer des Larvenfensters der beiden Fischarten ergibt sich folglich aus dem Zeitraum, in dem die Fischlarven aus dem Schotterkörper emergieren (abhängig von Laichzeitraum und Wassertemperatur) zuzüglich der Zeit, während der die Fischlarven als besonders sensibel gegenüber Schwallbelastungen eingeschätzt werden.

Die erläuterte Vorgehensweise – basierend auf einer Befragung von Fischern und Bewirtschaftern – ermöglicht lediglich eine näherungsweise Bestimmung des Larvenfensters beider Fischarten. Für eine genauere Abschätzung des Zeitraums eines „gewässerspezifischen Larvenfensters“ kann der Laichzeitraum, oder auch die Emergenz der Brütlinge aus dem Schotterkörper durch Freilandhebungen ermittelt werden.

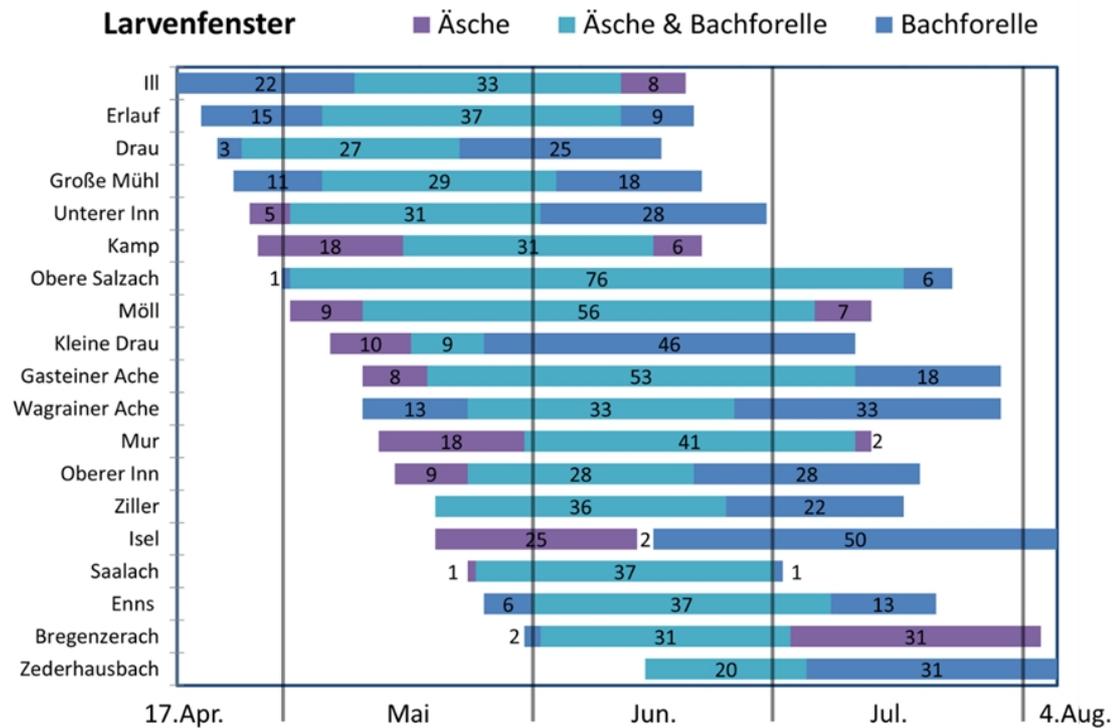


Abbildung 22: Ermittelte Larvenfenster für die Fischarten Äsche (*Thymallus thymallus*) und Bachforelle (*Salmo trutta*) an ausgewählten schwallbelasteten Fließgewässern (betrachtete Gewässerabschnitte sind in Tabelle 3 vermerkt).

Im Rahmen dieser Studie werden die Larvenfenster für 18 schwallbelastete Fließgewässer Österreichs näherungsweise ermittelt (vgl. Abbildung 22). In manchen Flüssen beginnt das Larvenfenster mit der Äsche, in anderen mit der Bachforelle. Ursache dafür ist einerseits der gewässerspezifische Wassertemperaturverlauf vom Bachforellen-Laichzeitraum im Herbst bis zum Frühjahr, der die Entwicklung der Eier fördert oder auch hemmt und andererseits die Unterschiede in den Entwicklungsraten beider Fischarten. Bei gleicher Temperatur entwickeln sich Äschen schneller als Bachforellen [64]. Beispielsweise dauert die Entwicklung von der Eiablage bis zum Schlupf bei konstanten 8°C bei der Äsche 29 Tage, bei der Bachforelle 54 Tage. Hinzu kommt das Äschen nur 4 bis 7 Tage nach erfolgtem Schlupf emergieren [66, 67]. Bachforellen verbringen im Gegensatz dazu einen wesentlich längeren Zeitraum zwischen Schlupf und Emergenz im Schotterkörper [65].

Die mittlere Larvenfensterdauer der analysierten Gewässer beträgt für beide Fischarten 63 Tage. Dies betrifft beispielsweise die Ill, welche im Winterhalbjahr kaum Temperaturen unter 4°C und somit das früheste Larvenfenster aufweist. Das kürzeste Larvenfenster beträgt 39 Tage (Saalach). Hier überschneiden sich Äschen- und Bachforellen-Larvenfenster fast zur Gänze. Der längste Zeitraum ergibt sich mit 83 Tagen für die Obere Salzach im Bereich Mittersill, da hier sehr lange Laichzeiträume angegeben werden, nämlich für die Äsche von März bis Mai und für die Bachforelle von Oktober bis Dezember.

5.5 ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN

Die in den Kapiteln 5.3.2 bis 5.4.2 beschriebene methodische Herangehensweise wird bei sämtlichen Fallbeispielen angewandt. Anhand einer zusammenfassenden Überblicksdarstellung können die zu erwartenden ökologischen Auswirkungen der einzelnen hydrologischen Wirkungsszenarien (vgl. Kapitel 5.2, Abbildung 23 – links) sowie die Auswirkungen kombinierter hydrologischer und morphologischer Maßnahmen (vgl. Abbildung 23 – rechts) analysiert werden.

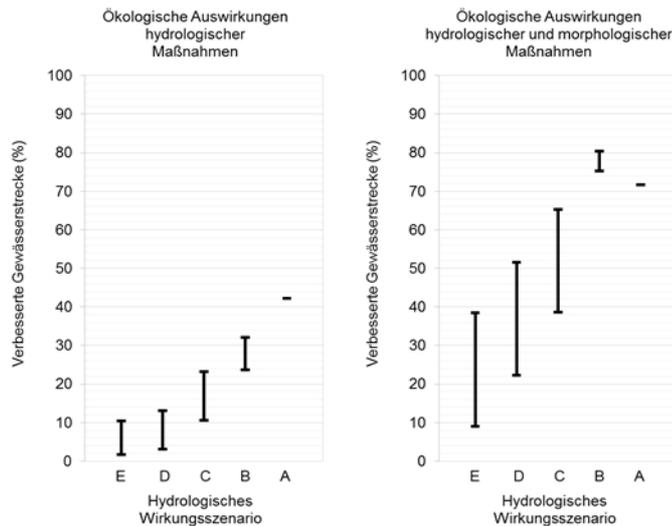


Abbildung 23: Summe der durch das jeweilige Wirkungsszenario verbesserten Gewässerstrecke exklusive (links) und inklusive (rechts) zusätzlicher morphologischer Maßnahmen (Untere Balkenbegrenzung – Gewässerstrecke mit Abstiegsgeschwindigkeiten $< 0,1$ cm/min und Variationskoeffizient der morphologischen Diversität $> 0,1$; Obere Balkenbegrenzung – Gewässerstrecke mit Abstiegsgeschwindigkeiten $< 0,4$ cm/min und Variationskoeffizient der morphologischen Diversität $> 0,1$; Schwallausleitungskraftwerk – Wirkungsszenario A ($N=4$; Betriebliche Einschränkungen bzw. Dämpfungsbecken – Wirkungsszenario B-E ($N=10$)).

Abbildung 23 zeigt die Summe der durch das jeweilige Wirkungsszenario verbesserten Gewässerstrecken aller Fallbeispiele, wobei lediglich jene Abschnitte gezählt werden, in welchen davon ausgegangen werden kann, dass das ökologische Verbesserungspotential aufgrund der morphologischen Diversität bzw. einer potenziellen Habitatverfügbarkeit teilweise oder zur Gänze ausgeschöpft werden kann (vgl. Kapitel 5.4.1). Die Auswirkungen von Wirkungsszenario A beziehen sich jeweils auf die vollständige Ausleitung der Schwallwellen durch die Maßnahme Schwallausleitungskraftwerk, wobei diesbezüglich eine Gewässerstrecke von insgesamt 86,5 km analysiert wird (Schwallausleitungskraftwerke werden aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten lediglich an vier der 10 Fallbeispiele untersucht). Wirkungsszenario B bis E (Schwalledämpfung) beziehen sich auf den abgestuften Einsatz entweder der Maßnahme betriebliche Einschränkung oder der Maßnahme Dämpfungsbecken bzw. auf die insgesamt analysierte Gewässerstrecke von 293,5 km. Die untere Balkenbegrenzung beschreibt den Anteil der verbesserten Gewässerstrecke ohne verbleibendem Strandrungsrisiko für Larven und frühe Juvenilstadien (Abstiegsgeschwindigkeit $< 0,1$ cm/min). Die obere Balkenbegrenzung stellt die Gewässerstrecken ohne Strandrungsrisiko für frühe Juvenilstadien dar (Abstiegsgeschwindigkeit $< 0,4$ cm/min).

Würde man beispielsweise die vier Ausleitungskraftwerke bauen (Wirkungsszenario A), würden in 42% (bzw. 36,5 km) der durch diesen Maßnahmentyp behandelten Gewässerstrecke potenziell Habitate zur Verfügung stehen und kein Strandrungsrisiko mehr vorhanden sein (der jeweilige kritische Intensitätswert für Larven oder frühe Juvenilstadien hat bei der Errichtung eines Schwallausleitungskraftwerkes keine Bedeutung, da angenommen wird, dass sämtliche Schwallwellen ausgeleitet werden). Würden zusätzliche morphologische Sanierungsmaßnahmen umgesetzt, kann davon ausgegangen werden, dass insgesamt in bis

zu 72% der Gesamtstrecke bzw. 62 km ökologische Verbesserungen erzielt werden können. Würde das Strandrungsrisiko der einzelnen Fallbeispiele durch betriebliche Einschränkungen oder die Errichtung von Dämpfungsbecken verringert (Wirkungsszenario B bis E), könnten hinsichtlich Larven bis zu 24% (bzw. 70 km) der durch diese Maßnahmentypen behandelten Gewässerstrecke strandungsbefreit werden. Bis zu 32% der Gewässerstrecken würden in diesem Fall kein Strandrungsrisiko für frühe juvenile Stadien aufweisen. Würden zusätzliche Aufweitungen und strukturschaffende Maßnahmen umgesetzt, kann davon ausgegangen werden, dass ökologische Verbesserungen in bis zu rd. 80% der Gewässerstrecken (230 km) erreicht werden können.

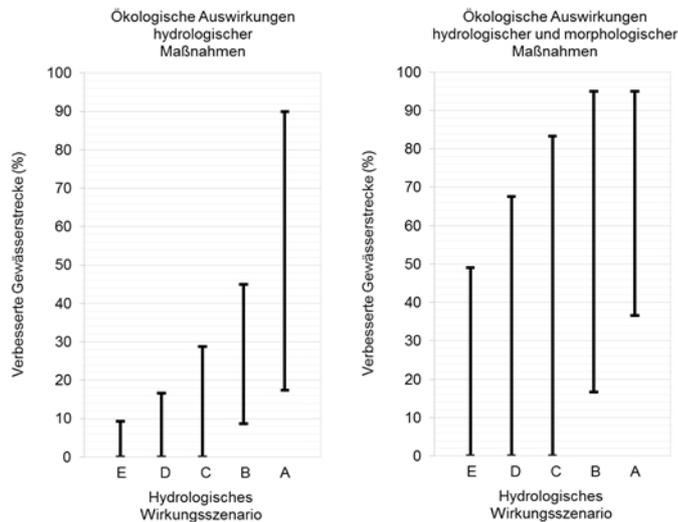


Abbildung 24: Minimaler (untere Balkenbegrenzung) und maximaler (obere Balkenbegrenzung) fallbeispielspezifischer Anteil der durch das jeweilige Wirkungsszenario verbesserten Gewässerstrecke exklusive (links) und inklusive (rechts) zusätzlicher morphologischer Maßnahmen (Anteil der Gewässerstrecke mit Abstiegsgeschwindigkeiten $< 0,1$ cm/min und Variationskoeffizient der morphologischen Diversität $> 0,1$; Schwallausleitungskraftwerk – Wirkungsszenario A (N=4; Betriebliche Einschränkungen oder Dämpfungsbecken – Wirkungsszenario B-E (N=10)).

Analysiert man die ökologischen Auswirkungen einzelner Wirkungsszenarien fallbeispielspezifisch (vgl. Abbildung 24) wird ersichtlich, dass der Umfang der zu erwartenden positiven ökologischen Auswirkungen zwischen den einzelnen Fallbeispielen sehr stark schwankt. Beispielsweise kann es vorkommen, dass in einzelnen schwallbelasteten Gewässerstrecken durch die Umsetzung von Wirkungsszenario C inklusive oder exklusive zusätzlicher morphologischer Maßnahmen hinsichtlich Strandrungsrisiko von keiner maßgeblichen Verbesserung ausgegangen werden muss, während in anderen Gewässerstrecken durch dasselbe Wirkungsszenario in knapp einem Drittel (ohne zusätzliche morphologische Maßnahmen) bzw. in bis zu über 80% der Gewässerstrecke (inkl. zusätzlicher morphologischer Maßnahmen) positive Auswirkungen zu erwarten sind. Eine detaillierte Einzelfallbetrachtung von schwallbelasteten Gewässerstrecken ist daher unumgänglich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die Umsetzung von ausschließlich hydrologischen Maßnahmen zwar ökologische Verbesserungen erzielt werden können, der Umfang positiver ökologischer Auswirkungen jedoch durch zusätzliche morphologische Maßnahmen maßgeblich vergrößert werden kann bzw. im Falle von sehr stark kanalisiertem Gewässerabschnitten mit sehr geringer Habitatverfügbarkeit sogar die Voraussetzung für eine Verbesserung ist. Die Umsetzung von Kombinationen aus hydrologischen und morphologischen Maßnahmen ist aus ökologischer Sicht demnach generell als vorteilhaft anzusehen.

6 ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN

DURCH DEN AUSBAU DER STROMERZEUGUNG aus Windkraft und Photovoltaik rücken Speicherkraftwerke verstärkt in den Fokus des energiepolitischen Interesses, da parallel zum Ausbau der volatilen erneuerbaren Energien ein tiefgreifender Umbau des gesamten Stromversorgungssystems erforderlich sein wird. In der energiepolitischen Diskussion über die weitere Entwicklung des österreichischen und europäischen Stromversorgungssystems besteht daher auch weitgehend Konsens, dass mittel- und langfristig eine hohe Notwendigkeit für den Ausbau der vorhandenen Speicherkapazitäten besteht. U.a. sieht die Europäische Kommission in ihrer Energy Roadmap 2050 [28] sowie in ihrem Energy Infrastructure Priorities for 2020 [29] im Ausbau der Stromspeicherkapazitäten in Europa einen wichtigen Baustein zur Umsetzung der EU Energie- und Klimaziele. Die Umsetzung schwalldämpfender Maßnahmen kann damit nicht nur eine finanzielle Belastung für den jeweils betroffenen Kraftwerksbetreiber (betriebswirtschaftlich) bedeuten, sondern es können dadurch auch negative Effekte auf das übergeordnete österreichische und europäische Stromversorgungssystem und damit letztendlich auch auf die übergeordneten nationalen und europäischen Energie und Klimaziele (systemrelevant und volkswirtschaftlich) entstehen.

Vor diesem Hintergrund wird in diesem Kapitel die im Rahmen des SuREmMa-Projekts entwickelte Systematik zur energiewirtschaftlichen Bewertung der Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen auf Speicherkraftwerke vorgestellt und exemplarisch auf die repräsentativen Fallbeispiele angewendet. Eine ausführliche Beschreibung findet sich im Technischen Bericht D “Energiewirtschaftliche Bewertung von schwalldämpfenden Maßnahmen für repräsentative Fallbeispiele“.

6.1 ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNGSSYSTEMATIK

Die Umsetzung der im SuREmMa-Projekt berücksichtigten hydrologischen und morphologischen Maßnahmen zur Schwalldämpfung können einerseits mit einer finanziellen Belastung für den Kraftwerksbetreiber durch zusätzliche Investitions-, Betriebskosten und/oder Erlöseinbußen verbunden sein. Andererseits können aber auch Auswirkungen auf das übergeordnete österreichische und europäische Stromversorgungssystem entstehen, wenn bspw. durch eine betriebliche Einschränkung eines Speicherkraftwerks weniger flexible Leistung zum Ausgleich von Erzeugungsschwankungen erbracht werden kann und diese langfristig durch eine alternative Flexibilitätsoption ersetzt werden muss. Die energiewirtschaftlichen Bewertung schwalldämpfender Maßnahmen für Speicherkraftwerke umfasst daher sowohl betriebswirtschaftliche Auswirkungen auf den jeweils betroffenen Kraftwerksbetreiber als auch die systemrelevanten und volkswirtschaftlich relevanten Auswirkungen. Tabelle 4 zeigt eine zusammenfassende Übersicht der bewertungsrelevanten Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen für Speicherkraftwerke.

TABELLE 4: ÜBERSICHT DER BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHEN SOWIE SYSTEMRELEVANTEN UND VOLKSWIRTSCHAFTLICHEN AUSWIRKUNGEN SCHWALLDÄMPFENDER MORPHOLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER MASSNAHMEN AUF SPEICHERKRAFTWERKE.

Auswirkungen	Kriterium	Hydrologische Maßnahmen			Morphologische Maßnahmen
		Schwalldämpfungsbecken	Schwallausleitungskraftwerk	Betriebliche Einschränkungen	
Betriebswirtschaftliche Auswirkungen	Kosten	Investitions- und Betriebskosten	Investitions- und Betriebskosten	Investitions- und Betriebskosten Frequenzumformer bei 16,7 Hz Bahnkraftwerken	Investitions- und ggf. laufenden Kosten
	Erlöse oder Erlösminderung	keine ¹	Erlöse aus Verkauf der erzeugten Strommengen	Erlösminderung durch verminderte Einsatzflexibilität	keine
Systemrelevante Auswirkungen	CO ₂ -Emissionen	keine ¹	Reduzierung CO ₂ -Emissionen durch Verdrängung von Stromerzeugung im konventionellen Kraftwerkspark	Erhöhung CO ₂ -Emissionen durch Wirkungsgradverluste im konventionellen Kraftwerkspark; zusätzlicher Effekt aus verminderter Systemintegration fluktuierender Wind- und PV-Stromerzeugung	keine
	Versorgungssicherheit	keine ¹	Bereitstellung zusätzlicher gesicherter Leistung und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien	Verringerung flexibler Leistung und Erzeugungsmengen	keine
	Kosten / Einsparungen im Versorgungssystem	keine ¹	Vermeidung alternativer Investitionen in Erneuerbare zur Erreichung politischer Zielvorgaben	Langfristig erhöhter Zubaubedarf an flexiblen Erzeugungs- und / oder Speicherkapazitäten	keine

¹bei Vernachlässigung möglicher Mindererzeugung durch Verringerung der Fallhöhe
Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft

Zur Bewertung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen werden die Investitions- und Betriebskosten bei Schwalldämpfungsbecken und Schwallausleitungskraftwerken, die Erlöse aus dem Verkauf der erzeugten Strommengen bei Schwallausleitungskraftwerken sowie die Erlösminderung bei betrieblichen Einschränkungen durch die verminderte Einsatzflexibilität des Speicherkraftwerks berücksichtigt. Bei 16,7 Hz-Kraftwerken zur Bahnstromversorgung sind ggf. zusätzliche Investitionskosten in Frequenzumformer erforderlich, wenn durch betriebliche Einschränkungen eines Speicherkraftwerks die sichere Bahnstromversorgung gefährdet ist. Bei den systemrelevanten bzw. volkswirtschaftlichen Auswirkungen werden die Effekte auf die CO₂-Emissionen, die Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit sowie die zusätzlichen Kosten bzw. Einsparungen im Versorgungssystem als Bewertungskriterien berücksichtigt. Während morphologische Maßnahmen sowie Schwalldämpfungsbecken keine direkten systemrelevanten Auswirkungen haben, können Schwallausleitungskraftwerke die CO₂-Emissionen durch Verdrängung von Stromerzeugung im konventionellen Kraftwerkspark reduzieren, zusätzliche gesicherte Leistung und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bereitstellen sowie alternative Investitionen in erneuerbare Energien zur Erreichung der politischen Zielvorgaben an anderer Stelle vermeiden. Demgegenüber können betriebliche Einschränkungen zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen durch Wirkungsgradverluste im konventionellen Kraftwerkspark sowie durch eine ggf. geringere Integration fluktuierender Wind- und PV-Stromerzeugung in das Versorgungssystem führen. Die Effekte betrieblicher Einschränkungen auf die Versorgungssicherheit leiten sich aus der Verringerung der verfügbaren flexiblen Leistung und Erzeugungsmengen ab, die langfristig auch zu einem erhöhten Zubaubedarf an flexiblen Erzeugungs- und / oder Speicherkapazitäten und damit zu höheren Kosten im Versorgungssystem führen können.

6.2 BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE AUSWIRKUNGEN SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN

Bei der Bewertung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen werden die aus Sicht der betroffenen Kraftwerksbetreiber entstehenden monetären Effekte ermittelt. Ausgehend von den fallbeispielübergreifend definierten hydrologischen Wirkungsszenarien werden hierzu die Erlösminderungen betrieblicher Einschränkungen bzw. der damit verbundenen Restriktionen bei der Bewirtschaftung der Speicherkraftwerke bestimmt. Diesen Erlösminderungen werden dann die Kosten der weiteren hydrologischen Maßnahmen zur Schwallanierung durch Dämpfungsbecken und Schwallausleitung sowie durch morphologische Maßnahmen gegenübergestellt.

6.2.1 BETRIEBLICHE EINSCHRÄNKUNGEN

Grundsätzlich wären zur Bewertung der ökonomischen Wirkung betrieblicher schwalldämpfender Maßnahmen auf den Einsatz von Speicherkraftwerken die Effekte auf alle relevanten Marktsegmente zu berücksichtigen. Neben dem Day Ahead- und Intraday-Markt sind dies vor allem die verschiedenen Regelleistungsprodukte. Daneben werden Speicherkraftwerke aber auch zur Bilanzgruppen- und Portfoliooptimierung eingesetzt, um bspw. die Kosten für den Ausgleichsenergiebedarf der eigenen Bilanzgruppe zu minimieren. Allerdings stellt die marktübergreifende Optimierung des Speichereinsatzes eine energiewirtschaftlich sehr komplexe Herausforderung mit hohem Modellierungsaufwand dar. Zusätzlich können vor allem bei der Bilanzgruppenregelung sowie eingeschränkt bei der Vermarktung als Regelenergie unternehmensspezifische Vermarktungsstrategien einen großen Einfluss auf die Quantifizierung der betriebswirtschaftlichen Effekte schwalldämpfender Maßnahmen haben. Vor diesem Hintergrund wird die Bewertung der ökonomischen Wirkung betrieblicher Einschränkungen daher in einem vereinfachenden dreistufigen Verfahren durchgeführt:

- Im ersten Schritt erfolgt die Quantifizierung der Erlösminderungen für die einzelnen hydrologischen Wirkungsszenarien bei einer ausschließlichen Vermarktung der Flexibilität von Speicherkraftwerken im viertel-stündlichen Day Ahead-Spotmarkt. Dieser über eine deterministische Einsatzmodellierung umgesetzte Bewertungsschritt liefert als Ergebnis den im Energiemarkt verlorenen Flexibilitätswert sowie zusätzlich den aus Systemsicht relevanten Verlust an flexibler Erzeugungsmenge.
- In zweiten Schritt wird der Wert der flexiblen Leistung eines Speicherkraftwerks im Intraday- sowie Sekundär- und Tertiärregelleistungsmarkt bestimmt. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der in den einzelnen hydrologischen Wirkungsszenarien verlorenen flexiblen Leistung kann so eine monetäre Quantifizierung der verlorenen flexiblen Leistung erfolgen.
- Im dritten Schritt werden die Ergebnisse aus den beiden vorangegangenen Schritten zusammengeführt und damit die potenziellen Erlösminderungen betrieblicher Einschränkungen für jedes hydrologische Wirkungsszenario bestimmt.

Zur Abbildung der Bandbreite der möglichen langfristigen Entwicklung der stündlichen und viertelstündlichen Strompreischarakteristik wird die deterministische Einsatzmodellierung anhand von zwei unabhängigen Strompreisszenarien der ewi Energy Research & Scenarios GmbH [68] sowie der enervis energy advisor GmbH [69] für die Stützjahre 2025, 2035 und 2050 durchgeführt. In Tabelle 5 sind ausgewählte Parameter der Strompreisszenarien sowie im Vergleich dazu der EPEX und EXAA Day Ahead-Spotpreise 2015 dargestellt – eine detaillierte Beschreibung und Analyse der Strompreisszenarien findet sich im Technischen Bericht C.

TABELLE 5: AUSGEWÄHLTE PARAMETER DER VIERTELSTÜNDLICHEN SPOTPREISE FÜR EPEX UND EXAA DAY AHEAD-SPOTMARKT 2015 SOWIE ENERVIS MARKTPREISSZENARIO BEST GUESS Q I 2016 UND EWI STROMPREISPROJEKTION APRIL 2016 FÜR 2025, 2035 UND 2050 IN €₂₀₁₆/MWH.

	EPEX Spot	EXAA	ewi			enervis		
	2015	2015	2025	2035	2050	2025	2035	2050
Base	31,7	31,7	56,9	75,8	78,6	56,0	75,7	75,4
Min	-164,5	-149,0	-11,1	2,1	-8,7	-25,8	-95,1	-87,7
Max	464,4	381,1	217,9	230,6	246,8	163,6	600,8	1.155,0

Daten: EPEX, EXAA, ewi und enervis

Beide Strompreisszenarien zeigen nach dem Jahr 2020 einen verhältnismäßig starken Sprung vom heutigen Preisniveau von unter 30 €/MWh auf 56,0 (enervis) bzw. 56,9 €₂₀₁₆/MWh (ewi) – ein Bereich der zwischen 2005 und 2011 bereits erreicht wurde. Anschließend gehen die Preisszenarien von einem mehr oder weniger parallelen Anstieg bis 2035 auf 75,7 (enervis) bzw. 75,8 €₂₀₁₆/MWh (ewi) aus. Bis 2050 sieht die Preisprojektion von ewi einen weiteren leichten Anstieg des Basepreises auf 78,6 €₂₀₁₆/MWh während enervis von einer konstanten Entwicklung auf 75,4 €₂₀₁₆/MWh ausgeht.

Die Strompreisszenarien gehen über eine deterministische Einsatzmodellierung in die Ermittlung der Erlösminderungen der hydrologischen Wirkungsszenarien ein und werden mit dem in den einzelnen hydrologischen Wirkungsszenarien „verlorenen“ Flexibilitätswert zu einem abschließenden Gesamtergebnis verknüpft. Den Benchmark zur Ermittlung der ökonomischen Effekte betrieblicher Einschränkungen stellen dabei die Erlöspotenziale im uneingeschränkten Betrieb, d.h. im hydrologischen Wirkungsszenario F, dar. Abbildung 25 zeigt die untere und obere Grenze der Erlöspotenziale für drei generische Speicherkraftwerke mit einer Differenzierung zwischen Day Ahead-Spotmarkt und Flexibilitätswert.

Im Rahmen des Projekts werden zur Quantifizierung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen drei generische Speicherkraftwerke: jeweils ein – Jahresspeicher (JSP), Wochenspeicher (WSP) und Tagesspeicher (TSP) – auf Basis einer Analyse der wesentlichen Kenngrößen des aktuellen österreichischen Speicherkraftwerksparks definiert und ermöglichen damit die Herleitung eines allgemein gültigen und nicht fallbeispielspezifischen Bewertungsansatzes.

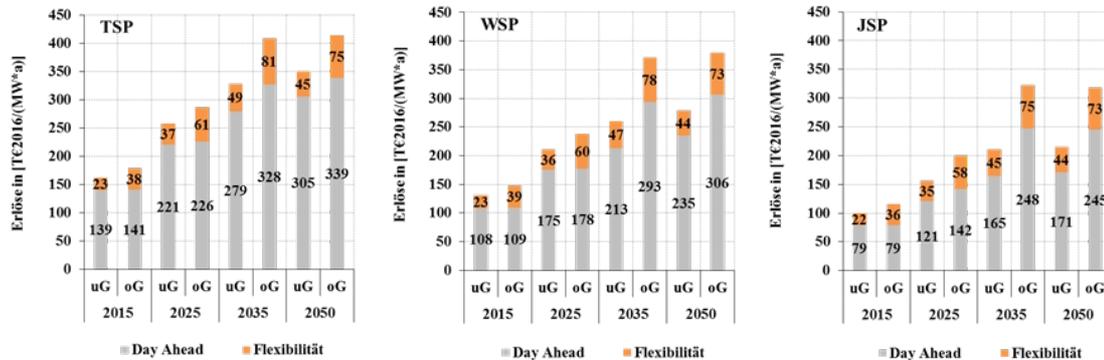


Abbildung 25: Untere (uG) und obere Grenze (oG) der Erlöspotenziale der generischen Speicherkraftwerke ohne betriebliche Einschränkungen (hydrologisches Wirkungsszenario F). Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft.

Bei allen drei generischen Speicherkraftwerken werden die gesamten Erlöspotenziale von den Erlösen aus der Vermarktung der Energie im Day Ahead-Markt dominiert, wobei der Anteil des Flexibilitätswerts an den Gesamterlösen beim Jahresspeicher auf Grund des im Vergleich zum Wochen- und vor allem Tagesspeicher geringeren Regelarbeitsvermögens entsprechend am Größten ist. Trotz der auf Grund der unterschiedlichen Erzeugungsmengen verhältnismäßig stark voneinander abweichenden Erlöspotenzialen der generischen Speicherkraftwerke im uneingeschränkten Betrieb liegen die absoluten Erlösminderungen der drei generischen Speicherkraftwerke für die einzelnen Szenarien in einem sehr ähnlichen Bereich. Für die weiteren Analysen werden die Ergebnisse der generischen Speicherkraftwerke daher zusammengefasst und eine für alle Speicherkraftwerke einheitliche Bandbreite der Erlösminderungen in den einzelnen hydrologischen Wirkungsszenarien gebildet. Dadurch ist auch eine einfache Übertragbarkeit der Ergebnisse von den generischen Speicherkraftwerken auf die exemplarischen Fallbeispiele bzw. andere Speicherkraftwerke gewährleistet.

Um die Vergleichbarkeit der ökonomischen Auswirkungen betrieblicher Einschränkungen mit den Maßnahmentypen Schwalldämpfungsbecken und Schwallausleitungskraftwerk sowie den morphologischen Maßnahmen zu ermöglichen, wird aus den erlösrelevanten Effekten sowie Investitions- und Betriebskosten der hydrologischen und morphologischen Maßnahmen über eine Betrachtungsdauer von 80 Jahren der Kapitalwert und daraus eine rechnerische Annuität (d.h. als rechnerisch real gleichbleibende Zahlungsreihe der jährlichen finanziellen Belastungen über die Betrachtungsdauer von 80 Jahren) auf Grundlage einheitlicher finanzmathematischer Randbedingungen ermittelt. Als Kapitalkosten werden hierzu 7,3% vor Steuern bzw. 5,5% nach Steuern angenommen; die Annuität wird mit einem realen inflationsbereinigten Zinssatz von 3,94% berechnet und für sämtliche Maßnahmen wird eine Umsetzung zum 1.1.2025 unterstellt. Auf Basis dieser Randbedingungen kann die in Abbildung 26 dargestellte Bandbreite der annuitätischen Erlösminderungen betrieblicher Einschränkungen für Speicherkraftwerke bestimmt werden. Die Ergebnisse in Abbildung 26 sind dabei sowohl bezogen auf Engpassleistung (links) also auch auf die verlorene flexible Leistung (rechts) dargestellt. So liegt bspw. im Szenario B und einer des Abflussrückgangs je 15 Minuten auf 3% des maximalen Kraftwerksdurchflusses (Q_a) die jährlichen Erlösminderungen durch betriebliche Einschränkungen je MW verlorene flexible Leistung zwischen 54.000 und 81.000 €₂₀₁₆/a. Diese Ergebnisse werden in weiterer Folge u.a. für die Bewertung betrieblicher Einschränkungen der Fallbeispiele herangezogen.

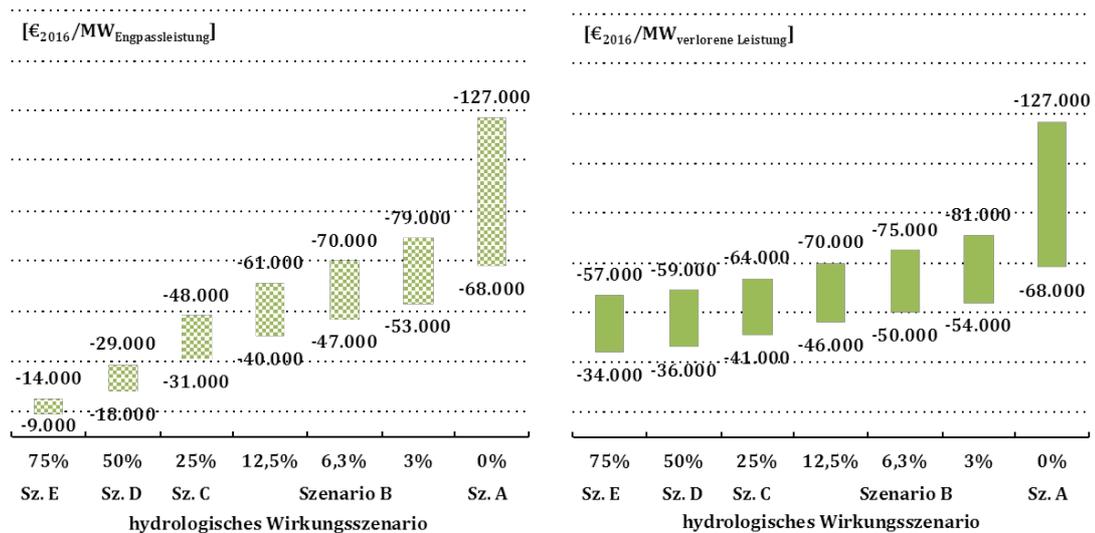


Abbildung 26: Annuität des Kapitalwerts betrieblicher Einschränkungen von Speicherkraftwerken bezogen auf die Engpassleistung (links) und die verlorene flexible Leistung (rechts). Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft (auf 1.000 € gerundet). Anmerkung: Die zu Erreichung des Szenarios B nötige Schwalldämpfung ist vom jeweiligen Fallbeispiel abhängig. Es wurden mehrere hydrologische Szenarien bewertet, um die Bandbreite der Fallbeispiele abzudecken.

6.2.2 SCHWALLDÄMPFUNGSBECKEN

Die Investitionskosten von Schwalldämpfungsbecken zeigen i. Allg. eine sehr ausgeprägte Abhängigkeit vom jeweiligen Standort, so dass kein allgemein gültiger Bewertungsansatz abgeleitet werden kann. Im Rahmen des SuREmMa-Projekts wird für die Fallbeispiele durch den jeweiligen Kraftwerksbetreiber die grundsätzliche technische Umsetzbarkeit der Dämpfungsbecken geprüft, die die zur Erreichung eines hydrologischen Wirkungsszenarios benötigten Beckengrößen ermittelt und eine standortabhängige Kostenabschätzung durchgeführt. Die Bandbreite der hieraus abgeleiteten spezifischen Kosten kann dabei auch für eine erste Einordnung der möglichen Kosten für ein Schwalldämpfungsbecken an weiteren Speicherkraftwerksstandorten herangezogen werden. Die potenzielle Nichtverfügbarkeit benötigter Grundstücke (bspw. weil Flächen nicht zur Verfügung stehen oder (landwirtschaftliche) Flächen nicht verkauft werden) wird bei der Bewertung der technischen Machbarkeit und damit auch der Kostenschätzung eines Dämpfungsbeckens nicht berücksichtigt. Abbildung 27 zeigt hierzu die aus den benötigten Beckenvolumina und den Investitionskosten der Fallbeispiele abgeleiteten spezifischen Kosten der Dämpfungsbecken in den hydrologischen Wirkungsszenarien B_{GW40} bis E. Trotz der relativ hohen Bandbreite der spezifischen Beckenkosten der Fallbeispiele kann aus den in Summe 36 Dämpfungsbecken näherungsweise eine Größenordnung der spezifischen Kosten von Schwalldämpfungsbecken in Abhängigkeit von der Beckengröße abgeleitet werden, die für eine erste Abschätzung möglicher Kosten auch auf andere Speicherkraftwerke angewendet werden kann. Aus den Investitions- und jährlichen Betriebskosten der Schwalldämpfungsbecken werden dann entsprechend der für das SuREmMa-Projekt definierten einheitlichen Randbedingungen (z.B. Abschreibungsdauer, Zinssatz, etc.) der Kapitalwert und die Annuität ermittelt und für die weitere vergleichende Bewertung schwalldämpfender Maßnahmen verwendet.

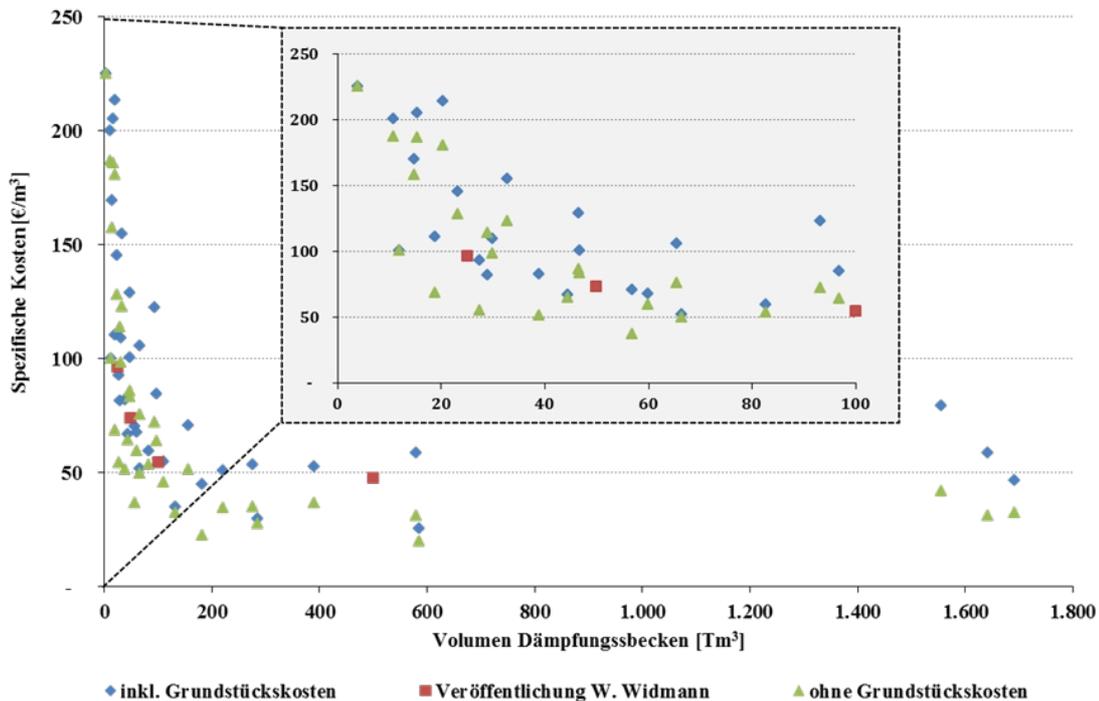


Abbildung 27: Spezifische Kosten von Schwalldämpfungsbecken für exemplarische Fallbeispiele in hydrologischen Wirkungsszenarien B bis E (€₂₀₁₆).

6.2.3 SCHWALLAUSLEITUNGSKRAFTWERKE

Die Kostenstrukturen von Schwallausleitungskraftwerken sind im Vergleich zu Schwalldämpfungsbecken noch deutlich stärker von den Bedingungen am jeweiligen Standort abhängig. Daher lassen sich Aussagen zu betriebswirtschaftlichen Effekten auch bei diesem Maßnahmentyp nur anhand konkreter und nicht generischer Standortbewertungen ableiten. Allerdings können Schwallausleitungskraftwerke nicht an jedem schwallbelastetem Gewässerabschnitt umgesetzt werden, da häufig keine geeigneten wasser- und energiewirtschaftlichen Randbedingungen für den Bau eines Ausleitungskraftwerks vorliegen. Unter Berücksichtigung der für das SuREmMa-Projekt definierten einheitlichen Randbedingungen (z.B. Abschreibungsdauer, Zinssatz, etc.) werden Kapitalwert und Annuität von Schwallausleitungskraftwerken anhand einer vereinfachten dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung für insgesamt vier potenziell umsetzbare Schwallausleitungskraftwerke bestimmt. Die Erlöse für den Verkauf der erzeugten elektrischen Energie werden anhand der jahresmittleren Day Ahead-Spotpreise der im Rahmen dieser Studie herangezogenen Strompreisszenarien der ewi Energy Research & Scenarios GmbH [68] sowie der enervis energy advisor GmbH [69] bewertet.

6.2.4 MORPHOLOGISCHE MASSNAHMEN

Zusätzlich zu den hydrologischen Maßnahmen können morphologische Maßnahmen erforderlich sein, um im Falle von stark regulierten Gewässerabschnitten Lebensraum für Gewässerorganismen zu schaffen und gleichzeitig auch eine Verringerung der Schwallbelastung zu erzielen. Die Kosten morphologischer Maßnahmen zeigen eine sehr hohe Abhängigkeit vom morphologischen Zustand des jeweils zu sanierenden Gewässerabschnitts und damit von den konkret umzusetzenden Maßnahmen sowie der Kosten von Grundstücken, die bspw. für Aufweitungen der Fließstrecken erforderlich sind. Auch für morphologische Maßnahmen wird aus den Investitionskosten und ggf. laufenden Aufwendungen entsprechend der für das SuREmMa-Projekt definierten einheitlichen Randbedingungen (z.B. Abschreibungsdauer, Zinssatz, etc.) der Kapitalwert und die Annuität ermittelt und für die weitere vergleichende Bewertung schwalldämpfender Maßnahmen verwendet.

6.3 SYSTEMRELEVANTE UND VOLKSWIRTSCHAFTLICHE AUSWIRKUNGEN SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN

Neben den betriebswirtschaftlichen Auswirkungen auf den betroffenen Kraftwerksbetreiber können schwalldämpfenden Maßnahmen auch Auswirkungen auf das übergeordnete Stromversorgungssystem haben. Zur Bewertung dieser Auswirkungen werden entsprechend Tabelle 4 (a) als systemrelevante Auswirkungen die Effekte auf die Versorgungssicherheit (verlorene flexible Leistung und Erzeugungsmenge) und (b) als volkswirtschaftliche Auswirkungen die Effekte auf die CO₂-Emissionen sowie die zusätzlichen Kosten bzw. Einsparungen im Versorgungssystem berücksichtigt. Zusätzliche können betriebliche Einschränkungen von 16,7 Hz-Speicherkraftwerken zur Bahnstromversorgung die Energieaufbringung im Bahnstromsystem und damit letztendlich auch den öffentlichen Verkehr verteuern. Auf diesen Effekt wird im Folgenden jedoch nicht näher eingegangen.

- **Verlorene flexible Leistung:** Einschränkungen in Bezug auf den maximalen Abflussrückgang je Viertelstunde am Rückgabepunkt eines Speicherkraftwerks in den Vorfluter haben eine unmittelbare Auswirkung auf die möglichen Leistungsänderungen innerhalb einer Viertelstunde und damit auf die Vermarktungsmöglichkeiten eines Speicherkraftwerks. Bei einer Begrenzung des maximalen Abflussrückgangs auf bspw. 25% des maximalen Kraftwerksdurchflusses Q_a (hydrologisches Wirkungsszenario C) können nur noch 25% der Leistung flexibel vermarktet werden, d.h. die verlorene flexible Erzeugungsmenge liegt bei 75% und ist damit umgekehrt proportional zur Begrenzung des Abflussrückgangs in den hydrologischen Wirkungsszenarien. Dieser direkte Zusammenhang gilt nur für Speicherkraftwerke, die nicht Teil einer Kraftwerksgruppe aus einem System hydraulisch verbundener Anlagen sind. In Abhängigkeit vom maximal zulässigen Abflussrückgang am Rückgabepunkt des „letzten“ Kraftwerks innerhalb der gesamten Kraftwerksgruppe können auch Rückwirkungen auf die Bewirtschaftung der Oberliegerkraftwerke entstehen. Daher ist für Speicherkraftwerksgruppen immer eine individuelle Bewertung der Wechselwirkungen zwischen den Einschränkungen des maximalen Abflussrückgangs am Rückgabepunkt des „letzten“ Kraftwerks in den Vorfluter und den Oberliegerkraftwerken erforderlich. Innerhalb dieser Studie erfolgt die Quantifizierung der „verlorenen“ flexiblen Leistung daher auch fallbeispielspezifisch durch den jeweiligen Kraftwerksbetreiber.
- **Verlorene flexible Erzeugungsmenge:** Neben dem Verlust von flexibler Leistung bewirken Restriktionen im Abflussrückgang für Speicherkraftwerke auch eine zeitliche Verschiebung der Erzeugungsmengen, da die zusätzliche Stromerzeugung in den Abfahrrampen die zu einem späteren Zeitpunkt „frei“ verfügbaren Wassermenge für den optimierten Kraftwerkseinsatz reduziert. Der Kraftwerkspark wird dadurch insgesamt weniger effizient eingesetzt, d.h. es kommt nicht nur für den Speicherkraftwerksbetreiber zu einer Verschlechterung des betriebswirtschaftlichen Ergebnisses, sondern auch zu einem Effizienzverlust im konventionellen Kraftwerkspark und damit insgesamt zu Nachteilen aus volkswirtschaftlicher Sicht. Die in den erzwungenen Abfahrrampen „verlorene“ flexible Stromerzeugung wird im Rahmen des SuREmMa-Projekts aus den Ergebnissen der deterministischen Einsatzmodellierung der drei generischen Speicherkraftwerke mit den ewi- und enervis-Spotpreiszeitreihen abgeleitet. Da die Ergebnisse der einzelnen Stützjahre vergleichsweise ähnlich sind, können diese zusammengefasst werden, so dass für jeden generischen Speicher in jedem hydrologischem Wirkungsszenario die in Abbildung 28 dargestellte Bandbreite der verlorenen Energie in den Rampen und damit der verlorenen flexiblen Erzeugungsmenge abgeleitet werden kann. Zur weiteren Vereinfachung können zusätzlich die Ergebnisse der drei generischen Speicher zusammengefasst und eine Bandbreite der verlorenen flexiblen Erzeugungsmenge als Anteil des von betrieblichen Einschränkungen betroffenen Regelarbeitsvermögens abgeleitet und für die weiteren Bewertungen verwendet werden.

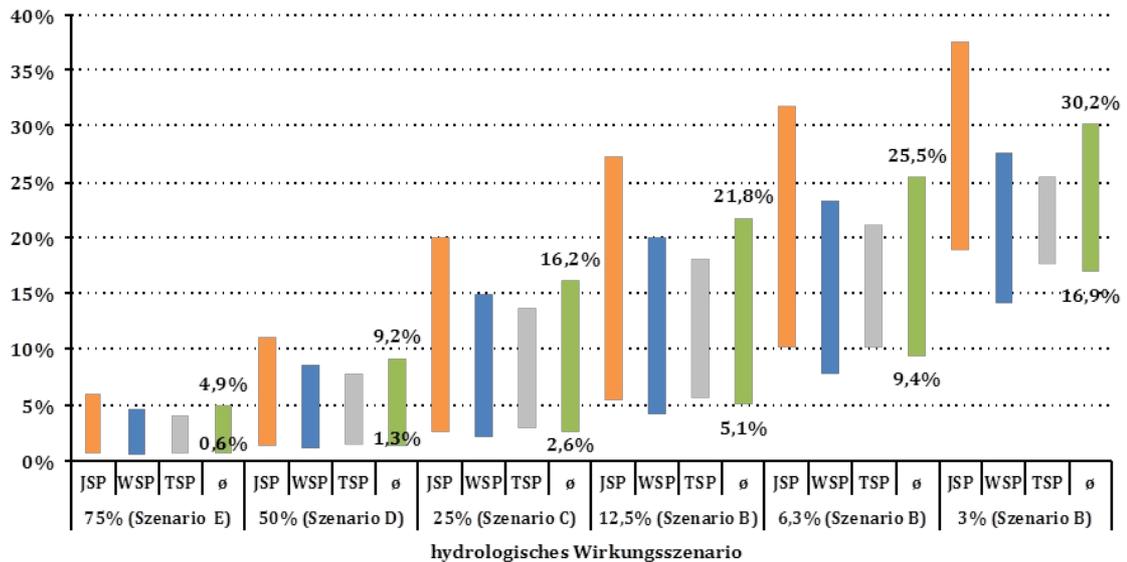


Abbildung 28: Mittlere verlorene Energie in den Rampen bezogen auf Regelarbeitsvermögen in Abhängigkeit von hydrologischem Wirkungsszenario für fiktive Speicherkraftwerke. Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft.

- **Effekte auf CO₂-Emissionen im Versorgungssystem:** Bei Vernachlässigung der CO₂-Emissionen durch den während der Bauphase erforderlichen Material- und Energieeinsatz zeigen die hydrologische Maßnahme Schwalldämpfungsbecken sowie die morphologischen Maßnahmen keine Effekte auf die CO₂-Emissionen im Versorgungssystem. Demgegenüber können Schwallausleitungskraftwerke die CO₂-Emissionen durch Verdrängung von Stromerzeugung im konventionellen Kraftwerkspark reduzieren und betriebliche Einschränkungen zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen durch Wirkungsgradverluste im konventionellen Kraftwerkspark sowie durch eine ggf. geringere Integrationsfähigkeit des Versorgungssystems für fluktuierende Wind- und PV-Stromerzeugung führen. Die Quantifizierung der vermiedenen CO₂-Emissionen von Schwallausleitungskraftwerken erfolgt entsprechend des im „Österreichischen Wasserkatalog Wasser schützen – Wasser nutzen“ beschriebenen Ansatzes anhand eines von den Jahresvolllaststunden abhängigen Verdrängungsmixes von konventionellen Neubaukraftwerken [70]. Die Abschätzung der Effekte betrieblicher Einschränkungen auf die CO₂-Emissionen im Versorgungssystem erfolgt im Rahmen dieser Studie über einen vereinfachten qualitativ-quantitativ Ansatz, der von der Annahme ausgeht, dass durch den Verlust an flexibler Erzeugungsleistung langfristig weniger an Windkraft- und PV-Leistung in das Versorgungssystem integriert werden. Hierzu werden sechs Studien in Bezug auf die Entwicklung der installierten steuerbaren Kraftwerksleistung sowie der erzeugungsseitigen und sonstigen Flexibilitätspotenziale in Deutschland bis 2050 ausgewertet und die Ergebnisse auf Österreich übertragen. Im Ergebnis zeigen die Studien, dass pro MW flexibler Leistung zwischen 1,5 und 2,0 MW an volatilen erneuerbaren Energien installiert sind bzw. im Umkehrschluss der Verlust von 1 MW flexibler Leistung das Zubaupotenzial an volatilen erneuerbaren Energien um 1,5 bis 2,0 MW oder 2.600 bis 3.400 MWh/a verringern könnte. Müsste diese Strommenge in einem modernen Erdgas-GuD-Kraftwerks mit CO₂-Emissionen von rd. 0,4 t_{CO₂eq}/MWh ersetzt werden, können die zusätzlichen CO₂-Emissionen im Versorgungssystem je MW verlorener flexibler Leistung mit jährlich 1.040 bis 1.360 t an CO₂eq-Emissionen abgeschätzt werden.

- **Zusätzliche Investitionen in alternative Flexibilitätsoptionen durch betriebliche Einschränkungen:** Betriebliche Einschränkungen von Speicherkraftwerken haben durch die Rückwirkungen auf das gesamte Erzeugungssystem auch volkswirtschaftliche Effekte, da der Verlust an Flexibilität in bestehenden Speicherkraftwerken langfristig durch andere Flexibilitätsoptionen kompensiert werden muss. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung der Systemkosten durch die zusätzlich erforderlichen Investitionen in alternative Flexibilitätsoptionen. Ein Vergleich der ökonomischen Kenngrößen von ausgewählten Flexibilitätsoptionen zeigt dabei eine Bandbreite der jährlichen Fixkosten alternativer Flexibilitätsoptionen zwischen 50.000 und 150.000 €/MW*a. Diese Bandbreite kann direkt mit der verlorenen flexiblen Leistung in den einzelnen hydrologischen Wirkungsszenarien verknüpft und daraus die langfristigen jährliche Systemkosten durch betriebliche Einschränkungen abgeleitet werden. Zusätzlich sind die ggf. entstehenden variablen Kosten der alternativen Flexibilitätsoptionen zu berücksichtigen (bspw. Brennstoffkosten für Gasturbinen).
- **Vermeidung von Systemkosten durch Schwallausleitungskraftwerke:** Schwallausleitungskraftwerke erhöhen die verfügbare Leistung im Versorgungssystem und stellen zusätzliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bereit. Dadurch können u.a. zur Erreichung der politischen Ausbauziele für erneuerbare Energien Investitionen an anderer Stelle vermieden werden. Die jährlich vermiedenen Kosten lassen sich bspw. anhand der durchschnittlichen Stromgestehungskosten von Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien abschätzen, die anstelle eines Ausleitungskraftwerkes errichtet worden wären – also typischerweise Windkraft oder Photovoltaik. Die Bandbreite der spezifischen Stromgestehungskosten für Windenergie und Photovoltaik liegt mittel- und langfristig etwa bei 60 bis 120 €/MWh. Werden diese mit dem Regelarbeitsvermögen der Ausleitungskraftwerke multipliziert, können die jährlich vermiedenen Systemkosten durch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in einem Schwallausleitungskraftwerk abgeschätzt werden.

6.4 ANWENDUNG DER ENERGIEWIRTSCHAFTLICHEN BEWERTUNGSSYSTEMATIK

Die im Rahmen des SuREmMa-Projekts entwickelte Systematik zur Bewertung systemrelevanter, volks- und betriebswirtschaftlicher Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen für Speicherkraftwerke wird im Folgenden auf die in Kapitel 4.1 beschriebenen repräsentativen Fallbeispiele sowie das fiktive Fallbeispiel angewendet. Da aus den fallbeispielspezifischen Ergebnissen zum Teil Rückschlüsse auf vertrauliche Informationen der Kraftwerksbetreiber möglich wären, werden die Ergebnisse der energiewirtschaftlichen Bewertung der repräsentativen Fallbeispiele im Gegensatz zu den Ergebnissen des fiktiven Fallbeispiels nur in aggregierter Form dargestellt.

6.4.1 REPRÄSENTATIVE FALLBEISPIELE

Tabelle 6 zeigt die Zusammenfassung der aggregierten Ergebnisse der energiewirtschaftlichen Bewertung schwalldämpfender Maßnahmen für die repräsentativen Fallbeispiele in den hydrologischen Wirkungsszenarien B_{GW40}, C, D und E.

TABELLE 6: AGGREGIERTE ERGEBNISSE DER ENERGIEWIRTSCHAFTLICHEN BEWERTUNG SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN FÜR REPRÄSENTATIVE FALLBEISPIELE.

Auswirkung	Kriterium	-	Hydrologisches Wirkungsszenario / maximaler Abflussrückgang am Rückgabepunkt des Fallbeispiels			
			E	D	C	B _{GW40}
			75%	50%	25%	Ø 3,1% ¹
Betriebswirtschaftliche Auswirkungen	Annuität betriebliche Einschränkungen	[Mio. €/a]	-11 bis -19	-24 bis -39	-45 bis 71	-129 bis -215
	Annuität Schwalldämpfungsbecken	[Mio. €/a]	-1,3	-1,7	-2,6	(-14,2) ²
	Annuität Schwallausleitungskraftwerk	[Mio. €/a]	(-13,9) ³			
	Annuität morphologische Maßnahmen ⁴	[Mio. €/a]	-1,0 bis -5,9	-3,3 bis -8,1	-5,9 bis -9,3	-10,3 bis -10,6
Systemrelevante Auswirkungen betrieblicher Einschränkungen	Zusätzliche CO ₂ -Emissionen	[Mio. t _{CO2eq} /a]	0,4 bis 0,5	0,7 bis 0,9	1,1 bis 1,5	2,3 bis 3,0
	Verlorene flexible Leistung	[MW]	333	668	1.102	2.211
	Verlorene flexible Erzeugungsmenge	[GWh/a]	22 bis 170	48 bis 331	92 bis 583	719 bis 1.277
	Kosten alternativer Flexibilitätsoptionen	[Mio. €/a]	17 bis 50	33 bis 100	55 bis 165	111 bis 332
Systemrelevante Auswirkungen ALKW	Vermiedene CO ₂ -Emissionen	[kt _{CO2eq} /a]	229 ³			
	Vermiedene Kosten alternativer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien	[Mio. €/a]	28,8 bis 57,6 ³			

¹ mit der Engpassleistung der Kraftwerke bzw. Kraftwerksgruppe gewichteter mittlerer GW40-Wert;² ohne Kraftwerk Mayrhofen;³ nicht repräsentativ, da nur bei 4 Fallbeispielen möglich;⁴ bei Fallbeispiel Bregenzerrach mit Kraftwerken Langenegg und Alberschwende keine morphologischen Maßnahmen möglich (ALKW = Ausleitungskraftwerk)

Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft

BETRIEBLICHE EINSCHRÄNKUNGEN (ÄNDERUNG DER BETRIEBSWEISE)

Ausgangspunkt der energiewirtschaftlichen Bewertung betrieblicher Einschränkungen ist die in den hydrologischen Wirkungsszenarien verlorene flexible Leistung. Insgesamt werden durch die 10 Fallbeispiele Kraftwerke und Kraftwerksgruppen mit einer Engpassleistung von in Summe rd. 4.000 MW erfasst, d.h. knapp die Hälfte der in Österreich installierten Speicherkraftwerkskapazitäten. Von den analysierten Kraftwerken und Kraftwerksgruppen sind knapp 3.160 MW potenziell von betrieblichen Einschränkungen am Rückgabepunkt der Fallbeispiele betroffen, wobei die untersuchten Fallbeispiele in Summe eine Engpassleistung von rd. 1.360 MW haben. Mit zunehmender Einschränkung der betrieblichen Freiheitsgrade der Fallbeispiele steigen dabei generell auch die Rückwirkungen auf die gesamte Kraftwerksgruppe – Abbildung 29 zeigt dies für die Fallbeispiele anhand der verlorenen flexiblen Leistung durch betriebliche Einschränkungen bzw. der noch verbleibenden flexiblen Leistung in Abhängigkeit von den hydrologischen Wirkungsszenarien. So liegt bspw. im hydrologischen Wirkungsszenario B_{GW40} die verlorene flexible Leistung bei knapp 2.100 MW oder 56% der insgesamt durch die Fallbeispiele abgedeckten Speicherkraftwerkskapazitäten.

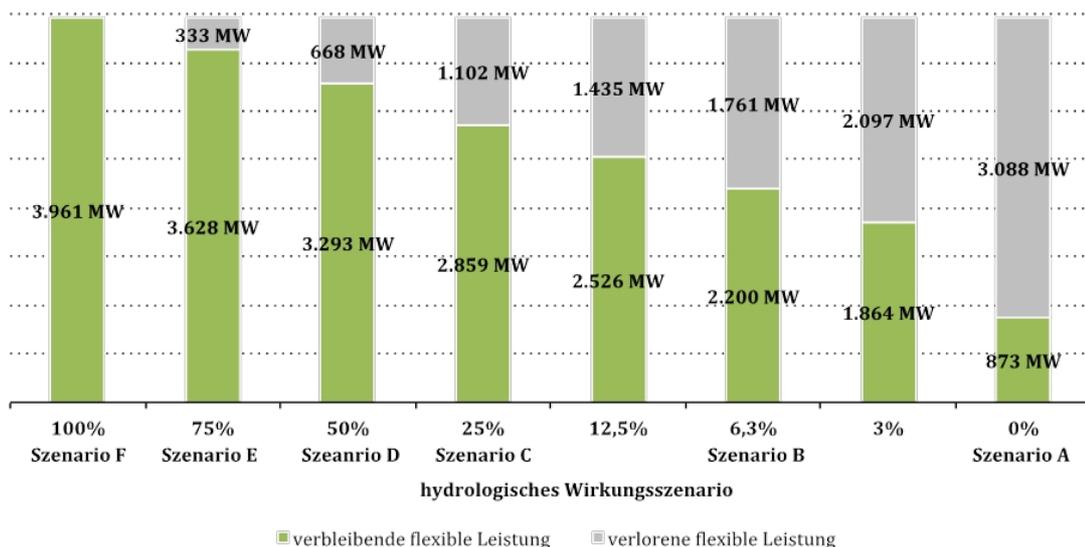


Abbildung 29: Summe der verlorenen und verbleibenden flexiblen Leistung durch betriebliche Einschränkungen der Fallbeispiele in Abhängigkeit von hydrologischem Wirkungsszenario. Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft.

Neben der Quantifizierung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen betrieblicher Einschränkungen (d.h. Erlösminderungen für den Kraftwerksbetreiber) werden aus der verlorenen flexiblen Leistung auch die zusätzlichen CO₂-Emissionen im Versorgungssystem sowie die Kosten alternativer Flexibilitätsoptionen als systemrelevante Auswirkungen betrieblicher Einschränkungen bestimmt.

Auch bezogen auf das Regelarbeitsvermögen der von den 10 Fallbeispielen erfassten Kraftwerke und Kraftwerksgruppen wird mit rd. 5,4 TWh/a knapp die Hälfte des Regelarbeitsvermögens von 11,2 TWh/a der in Österreich im Jahr 2014 installierten Speicherkraftwerkskapazitäten erfasst. Davon sind in Abhängigkeit vom hydrologischen Wirkungsszenario allerdings „nur“ rd. 3,5 bis 4,2 TWh/a von Restriktionen im Abflussrückgang am Rückgabepunkt der Fallbeispiele in den Vorfluter potenziell betroffen. Wird dieses Regelarbeitsvermögen mit der Bandbreite der verlorenen Energie in den Rampen (vgl. Abbildung 28) verknüpft, kann die verlorenen flexiblen Erzeugungsmengen durch betriebliche Einschränkungen für die Fallbeispiele ermittelt werden. Damit liegt etwa im hydrologischen Wirkungsszenario B_{GW40} die verlorene flexible Erzeugungsmenge zwischen 719 und 1.277 GWh/a oder

13 bis 24% des Regelarbeitsvermögens der von den Fallbeispielen erfassten Kraftwerke und Kraftwerksgruppen.

SCHWALLDÄMPFUNGSBECKEN

Für die Fallbeispiele wird durch den jeweiligen Kraftwerksbetreiber die grundsätzliche technische Umsetzbarkeit der Dämpfungsbecken geprüft, die benötigten Beckengrößen ermittelt und eine erste standortabhängige Kostenabschätzung durchgeführt. Die potenzielle Nichtverfügbarkeit benötigter Grundstücke (bspw. weil Flächen nicht vorhanden sind oder weil (landwirtschaftliche) Flächen nicht verkauft werden) wird bei der Bewertung der technischen Machbarkeit eines Dämpfungsbeckens nicht berücksichtigt. Die Kostenschätzungen für die Fallbeispiele basiert daher zum Teil auch auf Vergleichen mit ähnlichen bereits umgesetzten bzw. in Planung befindlichen Projekten unter Berücksichtigung der standortspezifisch abgeschätzten Grundstückskosten. Tabelle 7 zeigt die Investitions- und Betriebskosten sowie Annuitäten der für die jeweiligen hydrologischen Wirkungsszenarien benötigten Schwalldämpfungsbecken der Fallbeispiele.

TABELLE 7: SUMME DER INVESTITIONS- UND BETRIEBSKOSTEN SOWIE ANNUITÄTISCHE KOSTEN VON SCHWALLDÄMPFUNGSBECKEN FÜR FALLBEISPIELE.

		Szenario E	Szenario D	Szenario C	Szenario B _{GW40}
Investitionskosten	[Mio. €]	31,2	41,2	64,1	380,0 ¹
Betriebskosten	[Mio. €/a]	0,27	0,29	0,35	0,67 ¹
annuitätische Kosten	[Mio. €/a]	1,3	1,7	2,6	14,2 ¹

¹ ohne Kraftwerk Mayrhofen (technisch nicht möglich)
Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft

SCHWALLAUSLEITUNGSKRAFTWERKE

Bei den im Rahmen dieser Studie berücksichtigten zehn exemplarischen Fallbeispielen sind aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten nur für die Fallbeispiele Mayrhofen, Außerfragant, Walgauwerk und Langenegg/Alberschwende Schwallausleitungskraftwerke möglich. Tabelle 8 zeigt ausgewählte technische Parameter dieser Schwallausleitungskraftwerke.

TABELLE 8: TECHNISCHE PARAMETER VON MÖGLICHEN SCHWALLAUSLEITUNGSKRAFTWERKEN FÜR FALLBEISPIELE.

Fallbeispiel	Schwallausleitungskraftwerk	Engpassleistung	Regelarbeitsvermögen	Fallhöhe	Länge Stollen
		[MW]	[GWh/a]	[m]	[km]
Mayrhofen	Rotholz	116	170	119	27,0
Außerfragant	Außerfragant	25	101	109	16,9
Walgauwerk	Kapf	25	93	46	8,4
Langenegg	Lochau	43	116	64	9,5

Quelle: KELAG Kärntner Elektrizität AG, VERBUND Hydro Power AG, Vorarlberger Illwerke AG

Auf Grund der Sensibilität der wirtschaftlichen Kennzahlen können die geschätzten Investitionskosten der Schwallausleistungskraftwerke nicht veröffentlicht werden. In Summe repräsentieren die vier Schwallausleistungskraftwerke jedoch ein Investitionsvolumen von rd. 940 Mio. € und zeigen bei einer Bandbreite der spezifischen Investitionskosten (d.h. Investitionskosten bezogen auf jährliches Regelarbeitsvermögen) von 1,1 bis 2,5 €/kWh mittlere spezifische Investitionskosten von knapp 2,0 €/kWh. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der im Technischen Bericht D im Detail angeführten Randbedingungen

für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung ermittelt sich über die Betrachtungszeit von 80 Jahren ein negativer Kapitalwert von -385 Mio. € bzw. mittlere jährliche Kosten (Annuität) von -13,9 Mio. €/a. Diesen betriebswirtschaftlichen Kostenbelastungen stehen jedoch als system- und damit volkswirtschaftlich relevanten Effekte die vermiedenen Systemkosten durch die Vermeidung alternativer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von jährlich 28,8 bis 57,6 Mio. €/a sowie die Vermeidung klimaschädlicher Emissionen von jährlich 229.000 t_{CO₂eq}/a entgegen.

MORPHOLOGISCHE MASSNAHMEN

Eine Kostenabschätzung für morphologische Maßnahmen bei den Fallbeispielen wurde im Rahmen dieses Projekts durch das Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau der Universität für Bodenkultur (BOKU) durchgeführt (Details – vgl. Technischer Bericht B 2.2), wobei für das Fallbeispiel Bregenzer Ach mit den Kraftwerken Langenegg und Alberschwende keine morphologischen Maßnahmen möglich sind (Schluchtstrecke bzw. Regulierungsstrecke im Stadtgebiet von Bregenz). Tabelle 9 zeigt die Investitionskosten sowie die Annuität morphologischer Maßnahmen – auf Grund der Vertraulichkeit und Vorläufigkeit der Kostenstrukturen aggregiert als Summe über alle Fallbeispiele. Die Bandbreite der Investitionskosten leitet sich dabei aus den beiden berücksichtigten Varianten in Bezug auf die im Rahmen dieser Studie herangezogenen kritischen Intensitätswerte von <0,1 cm/min (untere Grenze) und <0,4 cm/min (obere Grenze) ab (vgl. Kapitel 5.1).

TABELLE 9: BANDBREITE INVESTITIONSKOSTEN UND ANNUITÄT MORPHOLOGISCHER MASSNAHMEN BEI REPRÄSENTATIVEN FALLBEISPIELEN FÜR DIE KRITISCHEN INTENSITÄTSWERTE <0,1 CM/MIN (UNTERE GRENZE) UND <0,4 CM/MIN (OBERE GRENZE) (€₂₀₁₆).

		Szenario F	Szenario E	Szenario C	Szenario B _{GW40}
Investitionskosten	[Mio. €]	26,2 bis 160,4	88,4 bis 219,8	160,4 bis 251,9	281,2 bis 286,6
Annuität	[Mio. €/a]	-1,0 bis -5,9	-3,3 bis -8,1	-5,9 bis -9,3	-10,3 bis -10,6

Quelle: BOKU, SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft

6.4.2 FIKTIVES FALLBEISPIEL

Die energiewirtschaftliche Bewertung des fiktiven Fallbeispiels erfolgt nach der gleichen Systematik, wie im vorangegangenen Abschnitt für die repräsentativen Fallbeispiele bzw. im Detail im Technischen Bericht D dargestellt ist. Für das fiktive Fallbeispiel mit einer Engpassleistung von 100 MW, einem Regelarbeitsvermögen von 230 GWh/a und einem Ausbaudurchfluss von 25 m³/s (dies entspricht Jahresvolllaststunden von 2.300 h/a) können dabei alle im Rahmen des SuREmMa-Projekts berücksichtigten schwalldämpfenden Maßnahmen umgesetzt und somit energiewirtschaftlich bewertet werden. Tabelle 10 zeigt die unterstellten Investitions- und Betriebskosten für Schwalldämpfungsbecken sowie die Kosten morphologischer Maßnahmen des fiktiven Fallbeispiels.

TABELLE 10: BANDBREITE INVESTITIONS- UND BETRIEBSKOSTEN SCHWALLDÄMPFUNGSBECKEN SOWIE INVESTITIONSKOSTEN MORPHOLOGISCHER MASSNAHMEN FÜR FIKTIVES FALLBEISPIEL (€₂₀₁₆).

			Szenario E	Szenario D	Szenario C	Szenario B _{GW40}
Schwalldämpfungsbecken	Beckenvolumen ¹	[m ³]	18.000	26.000	53.000	441.000
	Investitionskosten	[Mio. €]	2,7 bis 3,6	3,1 bis 3,9	3,7 bis 5,3	22,1 bis 30,9
	Betriebskosten	[€/a]	36.000	36.000	37.000	53.000
Morphologische Maßnahmen	Investitionskosten	[Mio. €]	bis 11,6 ²	4,5 bis 12,6	12,6	14,7

¹ inkl. 15% Totraum;

² für die Untergrenze ist keine Maßnahme sinnvoll

Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft, BOKU

Das Schwallausleitungskraftwerk des fiktiven Fallbeispiels hat eine Engpassleistung von 43,5 MW und ein Regelarbeitsvermögen von 100 GWh/a. Die Investitionskosten liegen in Anlehnung an die mittleren spezifischen Investitionskosten der möglichen Schwallausleitungskraftwerke bei vier repräsentativen Fallbeispielen (2,0 €/kWh) bei 200 Mio. €₂₀₁₆. Mit diesen Randbedingungen können die in Tabelle 11 dargestellten Ergebnisse der energiewirtschaftlichen Bewertung schwalldämpfender Maßnahmen für das fiktive Fallbeispiel abgeleitet werden.

Die Ergebnisse der Bewertung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen zeigen für das fiktive Fallbeispiel ein sehr ähnliches Bild, wie für die repräsentativen Fallbeispiele. Einschränkungen durch eine Änderung der Betriebsweise führen insgesamt zu einer deutlich höheren Kostenbelastung für den (fiktiven) Kraftwerksbetreiber als ein Schwalldämpfungsbecken. Schwallausleitungskraftwerke können bei stärkeren Beschränkungen des Abflussrückgangs ggü. betrieblichen Einschränkungen einen Kostenvorteil haben, ggü. Dämpfungsbecken in der Regel jedoch erst bei sehr starken Beschränkungen des Abflussrückgangs.

TABELLE 11: ERGEBNISSE DER ENERGIEWIRTSCHAFTLICHEN BEWERTUNG SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN FÜR FIKTIVES FALLBEISPIEL (€₂₀₁₆).

Auswirkung	Kriterium	-	Hydrologisches Wirkungsszenario / maximaler Abflussrückgang am Rückgabepunkt des Fallbeispiels			
			E	D	C	B _{GW40}
			75%	50%	25%	3,0%
Betriebswirtschaftliche Auswirkungen	Annuität betriebliche Einschränkungen	[Mio. €/a]	-0,85 bis -1,40	-1,75 bis -2,85	-3,00 bis -4,65	-5,24 bis -7,76
	Annuität Schwalldämpfungsbecken	[Mio. €/a]	-0,12 bis -0,16	-0,14 bis -0,17	-0,16 bis -0,22	-0,85 bis -1,18
	Annuität Schwallausleitungskraftwerk	[Mio. €/a]	-3,0			
	Annuität morphologische Maßnahmen	[Mio. €/a]	bis -0,43	-0,17 bis -0,47	-0,47	-0,54
System-relevante Auswirkungen betr. Einschränkungen	Zusätzliche CO ₂ -Emissionen	[kt _{CO2eq} /a]	26 bis 43	52 bis 68	78 bis 102	101 bis 132
	Verlorene flexible Leistung	[MW]	25	50	75	97
	Verlorene flexible Erzeugungsmenge	[GWh/a]	1,5 bis 11,3	3,0 bis 21,2	5,9 bis 37,2	11,7 bis 50,1
	Kosten alternativer Flexibilitätsoptionen	[Mio. €/a]	1,3 bis 3,8	2,5 bis 7,5	3,8 bis 11,3	4,9 bis 14,6
System-relevante Auswirkungen ALKW	Vermiedene CO ₂ -Emissionen	[kt _{CO2eq} /a]	49,4			
	Vermiedene Kosten alternativer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien	[Mio. €/a]	5,0 bis 10,0			

Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft (ALKW = Ausleitungskraftwerke)

Durch den Vergleich der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen können diese zwar relativ zueinander gereiht werden, die Ergebnisse liefern jedoch noch keine absolute Einordnung. Um die Größenordnungen der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen besser einordnen zu können, werden im Folgenden die Kosten schwalldämpfender Maßnahmen exemplarisch für das fiktive Fallbeispiel auf die Umsatzerlöse im uneingeschränkten Betrieb bezogen. Die Umsatzerlöse geben allerdings keine Information über den Gewinn des Speicherkraftwerkes beziehungsweise des Speicherkraftwerksbetreibers, da sie lediglich die Erlöse am Day-Ahead-Markt sowie im Intraday- und Regelenergiemarkt ohne Abzug von u.a. Betriebs- und Wartungskosten, Kosten für Reinvestitionen, System- und Netzverlustentgelte sowie Kapitalkosten umfassen. Die mittleren annuitätischen Umsatzerlöse des fiktiven Fallbeispiels liegen in einer Bandbreite zwischen 17,7 und 23,7 Mio. €/a. Dementsprechend spiegeln die Umsatzerlöse keine Gewinne wieder und sollten auch nicht als solche missinterpretiert werden. Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse dieser Bewertung.

TABELLE 12: RELATIVER RÜCKGANG DER UMSATZERLÖSE IM VERGLEICH ZUM UNEINGESCHRÄNKTEN BETRIEB DES FIKTIVEN SPEICHERKRAFTWERKS.

	Hydrologisches Wirkungsszenario / maximaler Abflussrückgang am Rückgabepunkt			
	E	D	C	B _{GW40}
	75%	50%	25%	3%
Betriebliche Einschränkungen	4,8% bis 5,9%	9,9% bis 12,0%	17,0% bis 19,6%	29,7% bis 32,7%
Schwalldämpfungsbecken	0,5% bis 0,9%	0,6% bis 1,0%	0,7% bis 1,2%	3,6% bis 6,7%
Schwallausleitungskraftwerk	12,6% bis 17,0%			

Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft

Der Rückgang der Umsatzerlöse betrieblicher Einschränkungen liegt bereits im Szenario E bei bis zu 6% der Umsatzerlöse im uneingeschränkten Betrieb des fiktiven Fallbeispiels und kann im Szenario B_{GW40} auf mehr als 30% steigen. Für Schwalldämpfungsbecken liegt der Rückgang der Umsatzerlöse im Szenario E zwar noch knapp unter 1%, dieser kann im Szenario B_{GW40} jedoch schon fast 7% betragen. Demgegenüber liegt der Rückgang der Umsatzerlöse für ein Schwallausleitungskraftwerk unabhängig vom hydrologischen Wirkungsszenario bei bis zu 17% der Umsatzerlöse im uneingeschränkten Betrieb.

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang jedoch, dass im Rahmen der SuREmMa-Studie lediglich die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen im Hinblick auf die Reduktion von Schwallbelastungen bewertet werden. Weitere kostenrelevante Maßnahmen (bspw. Dotierwasser, Fischwanderhilfen etc.), die zur Erreichung des guten ökologischen Potentials ggf. erforderlich sind, sind im Rahmen der Verhältnismäßigkeit ökologischer Maßnahmen ergänzend zu berücksichtigen.

6.4.3 QUALITATIV-QUANTITATIVE ZUSAMMENFÜHRUNG DER BEWERTUNGSERGEBNISSE

Die Entwicklung und Anwendung der energiewirtschaftlichen Bewertungssystematik für repräsentative Fallbeispiele hat gezeigt, dass die Ergebnisse der Bewertung von Maßnahmen zur Schwalldämpfung von Speicherkraftwerken stark von standortabhängigen Faktoren abhängig sind. Da mit den Fallbeispielen in Summe knapp 50% der österreichischen Speicherkraftwerksleistung abgedeckt werden, stellen die Ergebnisse jedoch nicht nur die „Betroffenheit“ der einzelnen Fallbeispiele dar, sondern es können auch allgemein gültige Aussagen in Bezug auf die systemrelevanten, volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen abgeleitet werden. Tabelle 13 zeigt hierzu eine

zusammenfassende Gegenüberstellung der Bewertung betriebswirtschaftlicher und volkswirtschaftlicher bzw. systemrelevanter Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen für Speicherkraftwerke als qualitativ-quantitativen Matrix.

- **Schwalldämpfungsbecken:** Schwalldämpfungsbecken haben keine systemrelevanten Auswirkungen, da mit ihnen der Betrieb eines Speicherkraftwerks weiterhin uneingeschränkt möglich ist. Allerdings erfordern sehr starke Restriktionen in der Abstiegseschwindigkeit (Szenario B) sehr großen Dämpfungsbecken, die einen deutlichen Eingriff in das Landschaftsbild und einen hohen Flächenverbrauch nach sich ziehen. Daher werden Schwalldämpfungsbecken im Szenario B mit einer tendenziell negativen volkswirtschaftlichen bzw. systemrelevanten Auswirkung bewertet. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht führen Schwalldämpfungsbecken in Abhängigkeit von der zulässigen Abstiegseschwindigkeit und der notwendigen Beckengröße zu einer Kostenbelastung für die Kraftwerksbetreiber und damit zu „negativen“ betriebswirtschaftlichen Auswirkungen.
- **Schwallausleitungskraftwerke:** Schwallausleitungskraftwerke haben eine „positive“ volkswirtschaftliche bzw. systemrelevante Auswirkung, da diese die CO₂-Emissionen durch Verdrängung von Stromerzeugung im konventionellen Kraftwerkspark reduzieren, zusätzliche gesicherte Leistung und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bereitstellen sowie alternative Investitionen in erneuerbare Energien zur Erreichung der politischen Zielvorgaben vermeiden. Die betriebswirtschaftlichen Auswirkungen von Schwallausleitungskraftwerke zeigen demgegenüber in Abhängigkeit von der standortabhängigen Kostenstruktur eine relativ große Bandbreite von „neutral“ (in Ausnahmefällen) bis „negativ“. Gegenüber Schwalldämpfungsbecken können diese daher betriebswirtschaftliche Vor- oder Nachteile zeigen.
- **Betriebliche Einschränkungen:** Betriebliche Einschränkungen sind sowohl aus volkswirtschaftlicher bzw. systemrelevanter als auch betriebswirtschaftlicher Sicht durch „negative“ bis „stark negative“ Auswirkungen gekennzeichnet, wobei die negativen Effekte mit zunehmender Einschränkung der betrieblichen Freiheitsgrade stärker werden. Aus Systemsicht führen betriebliche Einschränkungen zu einer tendenziellen Erhöhung der CO₂-Emissionen, zu einem Verlust an flexibler Leistung und Erzeugungsmenge, zu einer Gefährdung der sicheren Bahnstromversorgung sowie zu langfristig höheren Kosten im Versorgungssystem. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht können betriebliche Einschränkungen zu einer weitgehenden Entwertung von Speicherkraftwerken führen und zeigen im Vergleich zu Schwalldämpfungsbecken und -ausleitungskraftwerken die mit Abstand größten negativen Effekte. Lediglich in hydrologischen Wirkungsszenarien mit vergleichsweise geringen Restriktionen (Szenario E und in Ausnahmen Szenario D) können bei günstigen Standortbedingungen die Kosten von Schwalldämpfungsbecken und/oder Schwallausleitungskraftwerken sowie morphologischen Maßnahmen über den Kosten betrieblicher Einschränkungen liegen.
- **Morphologische Maßnahmen:** Morphologische Maßnahmen haben keine systemrelevanten Auswirkungen, da mit ihnen der Betrieb eines Speicherkraftwerks weiterhin uneingeschränkt möglich ist. Die Umsetzung morphologischer Maßnahmen führt zu einer Kostenbelastung in einer ähnlichen Größenordnung wie Schwalldämpfungsbecken und damit zu negativen betriebswirtschaftlichen Auswirkungen, wenn man davon ausgeht, dass diese Kosten von den Kraftwerksbetreibern getragen werden. Die Kosten morphologischer Maßnahmen müssen jedoch nicht notwendigerweise von den Kraftwerksbetreibern übernommen werden, so dass dieser Maßnahmentyp nicht zwangsläufig eine negative betriebswirtschaftliche Auswirkung haben muss. Im Weiteren ist im Zusammenhang mit der Bewertung morphologischer Maßnahmen anzumerken,

dass diese im Allgemeinen nicht als Alternative, sondern als Ergänzung zu hydrologischen Maßnahmen zu sehen sind.

TABELLE 13: QUALITATIV-QUANTITATIVE BEWERTUNG SCHWALLDÄMPFENDER MASSNAHMEN FÜR HYDROLOGISCHE WIRKUNGSSZENARIEN B BIS E.

Szenario	Maßnahme	Systemrelevante bzw. volkswirtschaftliche Auswirkungen					Betriebswirtschaftliche Auswirkungen				
		+	o	-	--	---	+	o	-	--	---
E (75%)	Betriebliche Einschränkung		X	X					X	X	
	Dämpfungsbecken		X						X		
	Ausleitungskraftwerk	X					X	X	X		
	Morphologische Maßnahmen		X						X		
D (50%)	Betriebliche Einschränkung			X						X	
	Dämpfungsbecken		X						X		
	Ausleitungskraftwerk	X					X	X	X		
	Morphologische Maßnahmen		X						X		
C (25%)	Betriebliche Einschränkung			X	X					X	X
	Dämpfungsbecken		X						X		
	Ausleitungskraftwerk	X					X	X	X		
	Morphologische Maßnahmen		X						X	X	
B (Ø3,1%)*	Betriebliche Einschränkung					X					X
	Dämpfungsbecken		X	X					X	X	
	Ausleitungskraftwerk	X					X	X	X		
	Morphologische Maßnahmen		X						X	X	

Bewertungsschema: „+“ positiv; „o“ neutral; „-“ negativ; „--“ sehr negativ; „---“ stark negativ;

* RAV-gewichteter Mittelwert der Fallbeispiele

Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft

7 GEGENÜBERSTELLUNG DER ÖKOLOGISCHEN UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHEN BEWERTUNG

IM VORLIEGENDEN KAPITEL werden die ökologischen Auswirkungen bzw. das ökologische Verbesserungspotential einzelner schwalldämpfender Maßnahmen den entsprechenden systemrelevanten, volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen gegenübergestellt. Die Auswirkungen von Wirkungsszenario A beziehen sich dabei jeweils auf die Maßnahme Schwallausleitungskraftwerk, wobei diesbezüglich eine Gewässerstrecke von insgesamt 86,5 km analysiert wird (Schwallausleitungskraftwerke werden aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten lediglich an vier der 10 Fallbeispiele untersucht). Die Wirkungsszenarien B bis E beziehen sich entweder auf die Maßnahme Betriebsweiseneinschränkung oder Dämpfungsbecken bzw. auf die insgesamt analysierte Gewässerstrecke von 293,5 km. In den einzelnen Diagrammen werden jeweils jene Wirkungsszenarien angeführt, die im Rahmen dieser Studie im Bezug zum jeweiligen Maßnahmentyp quantifiziert werden (vgl. Abbildung 30 bis Abbildung 34).

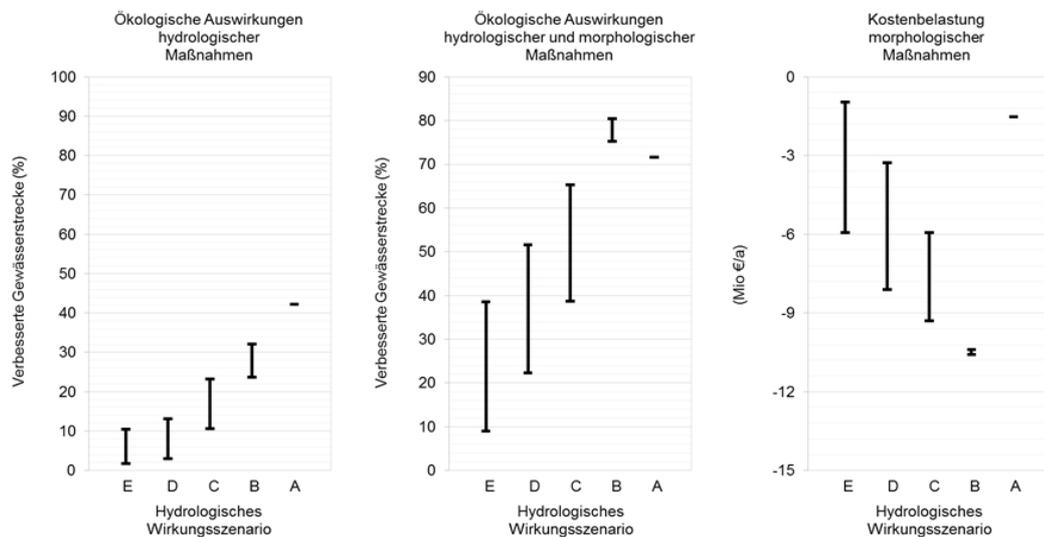


Abbildung 30: Summe der durch das jeweilige Wirkungsszenario verbesserten Gewässerstrecke (vgl. Kapitel 5.5) exklusive (links) und inklusive (Mitte) zusätzlicher morphologischer Maßnahmen (Untere Balkenbegrenzung - Gewässerstrecke mit Abstiegsgeschwindigkeiten $< 0,1$ cm/min und Variationskoeffizient der morphologischen Diversität $> 0,1$; Obere Balkenbegrenzung - Gewässerstrecke mit Abstiegsgeschwindigkeiten $< 0,4$ cm/min und Variationskoeffizient der morphologischen Diversität $> 0,1$; Schwallausleitungskraftwerk - Wirkungsszenario A ($N=4$); Betriebliche Einschränkungen oder Dämpfungsbecken - Wirkungsszenario B-E ($N=10$)) und Summe potenzieller Kosten morphologischer Maßnahmen (vgl. Kapitel 6.4.1) ausgedrückt durch Annuitäten (rechts).

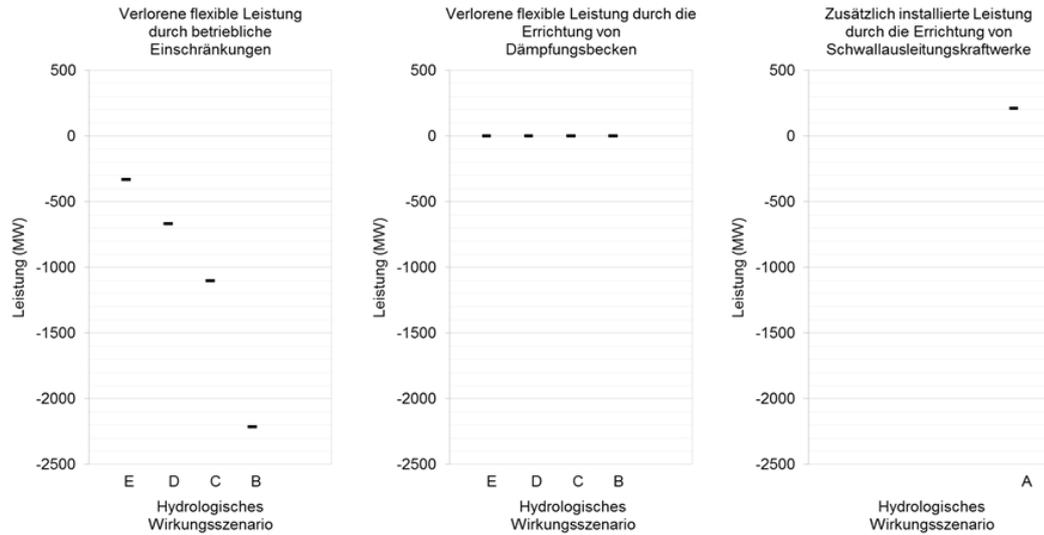


Abbildung 31: Szenarienspezifische Auswirkungen einzelner Maßnahmentypen auf die flexible Leistung der von den Fallbeispielen abgedeckten Speicherkraftwerken sowie zusätzliche installierte Leistung der in vier Fallbeispielen möglichen Schwallausleitungskraftwerken (vgl. Kapitel 6.4.1) (links – Betriebliche Einschränkungen, Mitte – Dämpfungsbecken, rechts – Schwallausleitungskraftwerk).

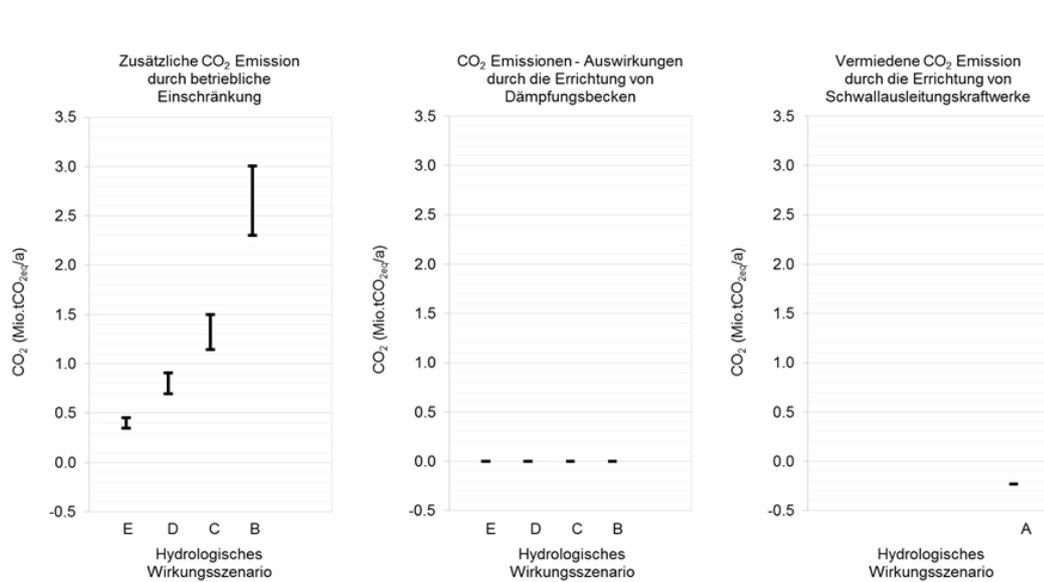


Abbildung 32: Szenarienspezifische Auswirkungen einzelner Maßnahmentypen auf die CO₂-Emissionen im Versorgungssystem (vgl. Kapitel 6.4.1) (links – Betriebliche Einschränkungen, Mitte – Dämpfungsbecken, rechts – Schwallausleitungskraftwerk, Mio.t.CO₂eq – Millionen Tonnen-CO₂-Äquivalent-Emissionen).

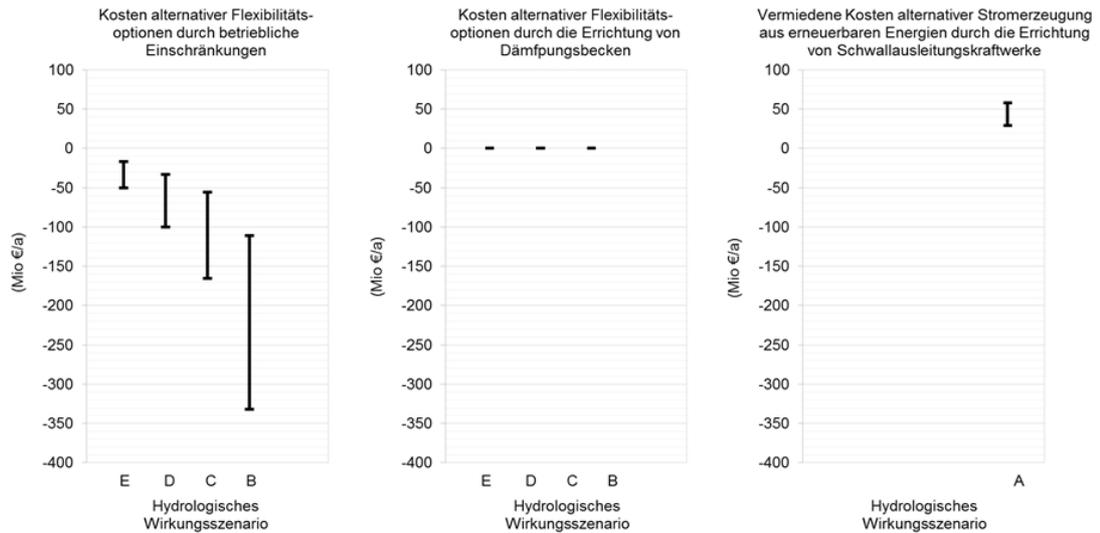


Abbildung 33: Szenarienspezifische Auswirkungen einzelner Maßnahmentypen auf die mittleren jährlichen Kosten alternativer Flexibilitätsoptionen für betriebliche Einschränkungen und Dämpfungsbecken sowie die mittleren jährlichen vermiedenen Kosten alternativer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien für Schwallausleitungskraftwerke (vgl. Kapitel 6.4.1) (links – Betriebliche Einschränkungen, Mitte – Dämpfungsbecken, rechts – Schwallausleitungskraftwerk).

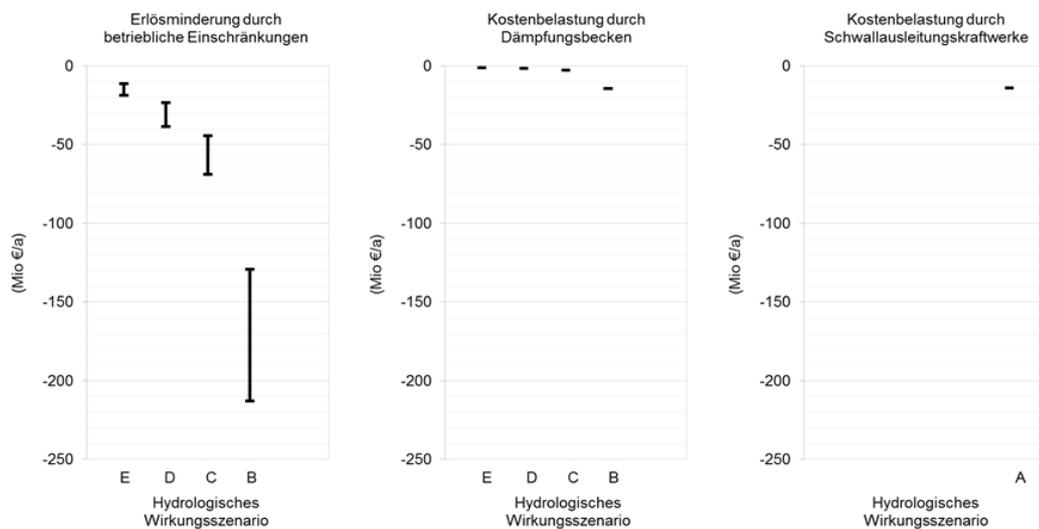


Abbildung 34: Szenarienspezifische Auswirkungen einzelner Maßnahmentypen auf die Erlöspotenziale der von den Fallbeispielen abgedeckten Speicherkraftwerken für betriebliche Einschränkungen sowie mittlere Kostenbelastung für Dämpfungsbecken und Schwallausleitungskraftwerke jeweils ausgedrückt als Annuität (vgl. Kapitel 6.4.1) (links – Betriebliche Einschränkungen, Mitte – Dämpfungsbecken, rechts – Schwallausleitungskraftwerk).

Die direkte Gegenüberstellung von ökologischem Verbesserungspotential und energiewirtschaftlichen Auswirkungen zeigt, dass eine bezüglich Strandrungsrisiko definitionsgemäß übereinstimmende ökologische Wirkung (vgl. Abbildung 30 links/Mitte) durch die Errichtung eines Dämpfungsbeckens im Vergleich zu einer betrieblichen Einschränkung mit geringeren negativen systemrelevanten und volkswirtschaftlichen Auswirkungen erreicht werden kann (vgl. Abbildung 31 bis Abbildung 34 links/Mitte). Während durch betriebliche Einschränkungen aus energiewirtschaftlicher Sicht durchwegs negative bis stark negative Konsequenzen zu erwarten sind, können die Auswirkungen von Dämpfungsbecken als vergleichsweise neutral bezeichnet werden. Zusätzlich erlauben Dämpfungsbecken eine schwalldämpfende Wirkung sowohl

auf Abstiegs- als auch auf Anstiegsereignisse, während hinsichtlich betrieblicher Einschränkungen im Rahmen dieser Studie Abstiegsereignisse adressiert wurden.

Der Umfang der zu erwartenden ökologischen Auswirkungen durch die Errichtung von Schwallausleitungskraftwerken liegt hinsichtlich Strandungsrisiko in einer ähnlichen Größenordnung wie das (vergleichsweise umfangreiche) Wirkungsszenario B bezugnehmend auf betriebliche Einschränkungen bzw. Dämpfungsbecken (vgl. Abbildung 31 bis Abbildung 34 links/Mitte). Schwallausleitungskraftwerke führen im betrachteten Gewässerabschnitt allerdings zu einer Totalausleitung der Schwallwellen, wodurch nicht nur das Strandungsrisiko verhindert wird, sondern in der Restwasserstrecke keine anthropogen erzeugten Abflussschwankungen mehr vorhanden sind. Im Vergleich zu betrieblichen Einschränkungen und der Errichtung von Dämpfungsbecken ist die Errichtung von Schwallausleitungskraftwerke aus ökologischer Sicht daher generell zu bevorzugen, wenn eine Restwasserdotation inkl. ausreichender Dynamik (Hydrologie, Feststoffhaushalt) vorgesehen wird und die Wiedereinleitung in ein geeignetes Gewässer (z.B. See, größerer Fluss) möglich ist, sodass die Schwallbelastung nicht lediglich in einen flussab gelegenen Gewässerabschnitt verschoben, sondern insgesamt maßgeblich verringert wird. Außerdem sind die aus energiewirtschaftlicher Sicht positiven Auswirkungen durch die Errichtung von Schwallausleitungskraftwerke hervorzuheben (vgl. Abbildung 31 bis Abbildung 34 rechts). Diese führen zu einer zusätzlichen Stromerzeugung aus flexibel steuerbaren erneuerbaren Energien und haben dadurch u.a. auch positive Effekte auf die CO₂-Emissionen. Zudem vermeiden Schwallausleitungskraftwerke alternative Investitionen in erneuerbare Energien zur Erreichung der politischen Zielvorgaben, wodurch die aus betriebswirtschaftlicher Sicht oft negativen Effekte in einem volkswirtschaftlichen Kontext ggf. anders bewertet werden können.

8 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

IM SUREMMA-PROJEKT wurde ein **Bewertungsinstrument** entwickelt, welches es ermöglicht, in einer österreichweiten Betrachtung die Wirksamkeit von hydrologischen und morphologischen Maßnahmen zur Schwallreduktion quantifizierend gegenüberzustellen und diese Maßnahmen bzw. auch unterschiedliche schwalldämpfende Maßnahmenkombinationen auf ihre systemrelevanten, volks- und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen zu bewerten. Ziel des Projekts war es, auf Ebene von Gewässerstrecken das Verbesserungspotenzial für eine gezielte Schwallsanierung zu erheben, welches **als Grundlage für eine weiterführende detaillierte Maßnahmenplanung** dienen kann. Die Ergebnisse des vorliegenden Projekts ermöglichen erstmals:

- a. einen Vergleich der ökologischen Wirksamkeit von hydrologischen (betriebliche Einschränkung, Dämpfungsbecken, Schwallausleitungskraftwerk) und morphologischen Maßnahmen (Reduktion vertikale Abstiegs geschwindigkeit durch Aufweitung, indirekt auch Habitatverbesserung unter Voraussetzung von Geschiebedynamik/sanierter Feststoffhaushalt),
- b. eine energiewirtschaftliche Bewertung der unterschiedlichen Möglichkeiten einer Schwallsanierung unter systemrelevanten, volks- und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten,
- c. eine integrative Beurteilung der ökologischen und ökonomischen Effizienz hydromorphologischer Sanierungsmaßnahmen in Schwallstrecken.

Der Fokus des Projekts und der integrativen Bearbeitung lag in der Reduktion des Strandens von Fischlarven und frühen Juvenilstadien beim anthropogen erzeugten Abflussrückgang, welches aus fischökologischer Sicht einer der Hauptverursacher für das Fehlen von ausreichendem Altersaufbau und Biomasse ist. Aus der Gegenüberstellung des ökologischen Verbesserungspotentials mit den systemrelevanten, volks- und

betriebswirtschaftlichen, Auswirkungen einzelner Maßnahmen kann zusammenfassend folgendes Bild abgeleitet werden, wenn man die generellen hydrologischen Auswirkungen der einzelnen schwalldämpfenden Maßnahmen in Betracht zieht:

- **Betriebliche Einschränkungen** können im Vergleich zu Schwalldämpfungsbecken grundsätzlich zu den gleichen positiven ökologischen Auswirkungen, führen. Aus volks- und betriebswirtschaftlicher Sicht führt diese Maßnahme durch erhöhte CO₂-Emissionen und höhere Kosten im Versorgungssystem, durch die Gefährdung der sicheren Bahnstromversorgung, den Verlust an flexibler Leistung und Erzeugungsmengen sowie einer betriebswirtschaftlichen Entwertung der Speicherkraftwerke in Abhängigkeit des Maßnahmenumfangs zu deutlich negativen Auswirkungen.
- **Schwalldämpfungsbecken** haben im Vergleich zu betrieblichen Einschränkungen vergleichsweise geringe betriebswirtschaftliche und keine negativen systemrelevanten bzw. volkswirtschaftlichen Auswirkungen. Voraussetzung ist allerdings, dass die topographischen Gegebenheiten die Errichtung eines Dämpfungsbeckens erlauben. Dämpfungsbecken wirken sich aus hydrologischer Sicht sowohl auf Abflussanstiege als auch auf Abflussrückgänge aus. Durch die Errichtung von Dämpfungsbecken kann daher neben dem Strandrungsrisiko auch das Driftrisiko vermindert werden.
- **Schwallausleitungskraftwerke** verhindern anthropogene Abflussschwankungen im betrachteten Gewässerabschnitt zur Gänze, wodurch von diesem Maßnahmentyp im Vergleich zu Dämpfungsbecken und Einschränkungen der Betriebsweise die umfassendsten positiven ökologischen Auswirkungen zu erwarten sind, wenn in der Restwasserstrecke eine ökologisch angepasste Restwasserdotations und die Wiedereinleitung in ein geeignetes Gewässer (z.B. See oder Gewässerabschnitt mit erheblich größerem Einzugsgebiet) vorgesehen werden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind Schwallausleitungskraftwerke oft nicht wirtschaftlich darstellbar. Allerdings haben Schwallausleitungskraftwerke maßgebliche positive volkswirtschaftliche Effekte, da diese CO₂-Emissionen durch Verdrängung von Stromerzeugung im konventionellen Kraftwerkspark reduzieren, zusätzliche flexible Leistung und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bereitstellen sowie alternative Investitionen in erneuerbare Energien zur Erreichung der politischen Zielvorgaben vermeiden.

In der integrativen Betrachtung der Maßnahmen zur Minderung der Auswirkung von Schwallbelastungen konnte außerdem gezeigt werden, dass durch eine **Verringerung der hydrologischen Belastung in Kombination mit morphologischen Sanierungsmaßnahmen** der größte Beitrag hinsichtlich Erreichung des „guten Ökologischen Potenzials“ zu erwarten ist, wobei für eine genaue Quantifizierung des Verbesserungspotentials durch hydrologische und morphologische Maßnahmen eine detaillierte Einzelfallbeurteilung erforderlich ist. Der Umfang positiver ökologischer Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen kann durch zusätzliche morphologische Maßnahmen maßgeblich vergrößert werden.

Zusammenfassend liegt durch die Ergebnisse des vorliegenden Projektes ein national anwendbares praxisnah erprobtes wissenschaftliches Bewertungsinstrument vor, um im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie verschiedene schwalldämpfende Maßnahmen szenarien im Spannungsfeld aus ökologischen und energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten auf Strecken- sowie Einzugsgebietsebene bewerten und abwägen zu können. Die entwickelte Bewertungssystematik bezieht sich im Rahmen dieser Studie auf das Stranden von Fischlarven und frühen Juvenilstadien als wesentliches ökologisches Nadelöhr, kann allerdings ebenso für Abflussanstiege sowie andere Intensitätsparameter angewandt werden, um Schwallbelastungen in vollem Umfang zu erfassen und neben der Strandung andere gewässerökologische Auswirkungen im Detail untersuchen zu können.

Im Zuge einer detaillierteren Einzelfallbegutachtung von schwallbelasteten Gewässerstrecken sollte aus hydrologischer Sicht neben dem durch die Schwallwellen verursachten Strandrungsrisiko für Äschen und Bachforellen auch Auftrittszeitpunkt und Auftrittshäufigkeit sowie weitere Intensitätskennzahlen (z.B. Amplituden) von anthropogenen Abflussschwankungen betrachtet und im Kontext zu den jeweiligen natürlicherweise auftretenden Abflussschwankungen (ausgelöst z.B. durch Starkregen, Schnee- und Gletscherschmelzen) interpretiert werden. Zudem sollten bei der Bewertung der hydromorphologischen Situation neben den Verhältnissen bei mittleren Abflussbedingungen auch Nieder- und Hochwassersituationen analysiert werden, um ein vollständiges Bild über das gesamte Abflussspektrum zu erhalten. Weiters sind mögliche Überlagerungen bei Mehrfachschwällen zu berücksichtigen. In der Bewertung der morphologischen Maßnahme „Aufweitung“ gilt es außerdem zu berücksichtigen, dass Aufweitungen ohne die Möglichkeiten der benötigten Umlagerungsdynamik bzw. Aufweitungen in Fließgewässerstrecken mit einem Geschiebedefizit keine ausreichende und nachhaltige Verbesserung der Lebensraumvielfalt (z.B. Laichhabitate, Adultfische) gewährleisten. Aus diesem Grund ist für Detailplanungen hinsichtlich Sanierung Gewässermorphologie die Wirksamkeit der Aufweitungen auf die Reduktion der vertikalen Abstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeit als planerische Rahmenbedingung zu sehen, die in der Ausführung/Ausgestaltung der Einzelmaßnahmen zu berücksichtigen ist.

Im Zuge der Umsetzung der notwendigen und geforderten Maßnahmenplanungen des NGP2 hinsichtlich Schwallsanierung wird in der nächsten Umsetzungsperiode (Frist 6 Jahre) für einzelne Speicherkraftwerke eine detaillierte Maßnahmenplanung zur Schwallsanierung erforderlich werden. Aufbauend auf dem vorliegenden SuREmMa-Bewertungsinstrument sowie eines „Screenings“ der Optionen zur Verbesserung der Lebensraumverhältnisse und als Schritt zur Erreichung des „guten Ökologischen Potenzials“ ist es notwendig das Spektrum der (anthropogenen) Einflussgrößen zu erweitern und neben dem übergeordneten Feststoffhaushalt, die Situation der Anbindung der Zubringer bzw. Habitatpotential der Zubringer, Adultfischhabitate, Interaktionen in der Nahrungskette etc. in den Planungen zu berücksichtigen. Dafür ist es unumgänglich, negative Auswirkungen auf die aquatische Fauna umfassend zu verstehen. Abgesehen von Drift und Strandung larvaler und juveniler Stadien der Bachforelle und der Äsche gibt es erhebliche Wissenslücken, beispielsweise schwallbedingte Auswirkungen auf das Laichverhalten, die Embryonalentwicklung oder auf den Schlupfzeitpunkt dieser beiden Fischarten. Auch hinsichtlich der Reaktion anderer Fischarten der Äschen- und Barbenregion, benthischer Invertebraten sowie der Interaktion unterschiedlicher Arten bzw. trophischer Niveaus sowie Thermopeaking besteht dringender Forschungsbedarf. Eine Maßnahmenumsetzung mit adaptiver Forschungsbegleitung (Anpassung von Monitoringstandards, adaptive Berücksichtigung der neuesten Forschungsergebnisse) sowie die Identifikation von Synergieeffekten (z.B. Hochwasserrichtlinie) ist anzustreben.

9 GLOSSAR

Abflussänderungsgeschwindigkeit	Abflussanstieg oder Abflussrückgang pro Zeiteinheit
Abflussanstieg	Positive Abflussänderung pro Zeiteinheit
Abflussregime	Charakteristische Abflussverhältnisse eines Gewässers
Abflussrückgang	Negative Abflussänderung pro Zeiteinheit
Abflussschwankung	Abflussanstieg oder Abflussrückgang
Abstiegsereignis	Kontinuierlicher Abflussrückgang über eine oder mehrere Zeiteinheiten
Abstiegsgeschwindigkeit	Negative Wasserspiegeländerung pro Zeiteinheit
Annuität	Bei der Annuitätenmethode werden alle mit einem Investitionsvorhaben zusammenhängenden Zahlungen in gleich hohe jährliche Raten umgewandelt. Die jährlichen Raten werden als Annuitäten bezeichnet.
Anstiegsereignis	Kontinuierlicher Abflussanstieg über eine oder mehrere Zeiteinheiten
Anstiegsgeschwindigkeit	Positive Wasserspiegeländerung pro Zeiteinheit
Base (Baseload)	Stromlieferung mit konstanter Leistung innerhalb eines standardisierten Lieferzeitraumes über 24 Stunden eines jeden Tages
Benchmark	Maßstab für den Vergleich von Leistungen
Betriebliche Einschränkung	Begrenzender Eingriff in die Betriebsweise eines Kraftwerkes
Betriebskosten	Sammelbegriff für alle Kosten, die durch die Aufrechterhaltung des operativen Betriebs einer Anlage verursacht werden - Unterscheidung in fixe Betriebskosten, zum Beispiel Personalkosten und in variable Kosten z.B. Kosten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe
Bilanzkreis/gruppe	Mehrere Einspeise- und Entnahmestellen innerhalb eines Netzgebietes werden als Bilanzkreise/gruppe bezeichnet. Bilanzkreise/gruppen ermöglichen es, Handelsgeschäfte und physische Stromflüsse aufeinander abzubilden. Handelsgeschäfte mit physischer Erfüllung werden als Fahrplanlieferungen zwischen verschiedenen Bilanzkreisen dargestellt und dem Netzbetreiber übermittelt. Bilanzkreisabweichungen werden durch den Bezug bzw. die Lieferung von Ausgleichsenergie gedeckt.
Blindleistung	Elektrische Leistung, die zum Aufbau von magnetischen oder elektrischen Feldern benötigt wird und nicht zur nutzbaren Arbeit beiträgt; Blindleistung reduziert die effektiv nutzbare Kapazität eines elektrischen Netzes und verursacht Leitungsverluste
Drift	Treiben in der fließenden Welle

GLOSSAR

Emergenzstadium	Entwicklungsstadium in welchem Fischlarven im hyporheischen Interstitial aufsteigen bzw. dieses verlassen
Engpassleistung	Die maximale Dauerleistung, die ein Kraftwerk unter Normalbedingungen abgeben kann; wird durch den schwächsten Anlagenteil (Engpass) begrenzt
Epipotamal	Barbenregion
Feststoffhaushalt	Sediment- und Schwebstofffluss eines Gewässers
Fiktives Fallbeispiel	Zur Dissemination herangezogenes, virtuelles Fallbeispiel, das bezogen auf die realen Fallbeispiele auf einer repräsentativen Datenlage beruht.
Gewässeraufweitung	Verbreiterung eines Gewässerabschnittes
Gewässermorphologie	Gewässerstruktur/Gewässerbeschaffenheit
Gewässerstrukturierung	Erhöhung der Komplexität der Gewässerbeschaffenheit
Grundlast	Die Nachfrage in einem Stromversorgungsgebiet, die während eines Tages nicht unterschritten wird
Hydraulik	Lehre vom Strömungsverhalten der Flüssigkeiten
Hydrologie	Wissenschaft, die sich mit dem Wasser in der Biosphäre der Erde befasst
Hydrologisches Wirkungsszenario	Eine im Kontext zu ökologischen Auswirkungen definierte hydrologische Situation im Gewässer
hydromorphologisch	Die hydrologischen und morphologischen Begebenheiten eines Gewässers betreffend
Hyporheisches Interstitial	Lebensraum im Lückensystem des Sedimentkörpers eines Gewässers
Hyporhithral	Äschenregion
Intensitäts-Schwellenwerte	Schwellenwerte im Bezug zur Intensität von Abflussschwankungen, welche auf bestimmte ökologische Auswirkungen schließen lassen.
Intraday-Markt	Vertragsabschluss und Lieferung erfolgen innerhalb des gleichen Tages
Investitionskosten	Ausgaben für längerfristige Anlagegüter wie z.B. Maschinen, Immobilien oder Betriebs- und Geschäftsausstattung
Juvenilstadium	Entwicklungsstadium eines Organismus vor der Geschlechtsreife
Kapitalkosten	Kosten für das zur Verfügung gestellte Kapital; Unterscheidung in explizite Kapitalkosten (im Wesentlichen effektive Zahlungen für Zinsen bei Aufnahme von Fremdkapital an den Gläubiger) und implizite Kapitalkosten oder auch Opportunitätskosten (entgangene Deckungsbeiträge einer nicht gewählten Handlungsmöglichkeit)

Kapitalwert	Wert sämtlicher durch ein Investitionsprojekt generierten Aus- und Einzahlungen; Der Kapital- oder Barwert wird ermittelt, indem die für die geplante Nutzungsdauer prognostizierten Einzahlungsüberschüsse mit dem Kalkulationszinssatz auf den Bewertungsstichtag abgezinst und um die Anschaffungsausgabe vermindert werden
Larvenfenster	Im Kontext zur veränderlichen Vulnerabilität von Gewässerorganismen definierte Zeitspanne
Makrozoobenthos	Tierische Lebewesen der Bodenzone eines Gewässers (Benthal)
Metarhithral	Untere Forellenregion
Mittellast	Bezeichnet in einem Stromversorgungsgebiet den Bereich der Nachfragekurve, in dem über die Grundlast hinaus zusätzlicher Strom verbraucht wird und die Charakteristik des Stromverbrauchs so ist, dass sie von Mittellastkraftwerken (z.B. GuD- und Steinkohlekraftwerke) abgedeckt werden kann
NGP	Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan
Over-the-Counter-Handel (OTC)	OTC bezeichnet den außerbörslicher Handel mit Kontrakten. Diese können an die individuellen Bedürfnisse angepasst werden und sind deshalb nicht so stark standardisiert wie dies beim Börsenhandel der Fall ist. Ein Over-the-Counter-Markt ist nicht lokalisiert und besitzt keine festen Handelszeiten. Die Verhandlungen erfolgen national und international via Bildschirm- oder Telefonsysteme. Die Geschäfte werden zumeist durch Broker vermittelt.
Peak (Peakload)	Stromlieferung mit konstanter Leistung innerhalb eines standardisierten Lieferzeitraumes von Montag bis Freitag von 8:00 Uhr bis 20:00 Uhr
Pegel/Pegelstelle	Messeinrichtung zur permanenten Erfassung des Wasserstandes zum Zwecke der Durchflussermittlung mittels Pegelschlüssel
Pumpspeicherkraftwerk	Speicherkraftwerk, welches neben Turbinen auch über elektrische Pumpen verfügt, die eine Speicherung elektrischer Energie durch Hinaufpumpen von Wasser ermöglichen
Redispatch	Vom Übertragungsnetzbetreiber angeordneter Eingriff in den marktbasierter, ursprünglich geplanten Einsatz der Kraftwerke (Dispatch) zur Verlagerung der Einspeisung, um Leistungsüberlastungen im Stromnetz vorzubeugen (präventiver Redispatch) bzw. zu beheben (kurativer Redispatch); Unterscheidung des Einsatzes von Redispatch in strom- oder spannungsbedingte Maßnahmen sowie Maßnahmen zum bilanziellen Ausgleich von Einspeisemanagement
Refugialhabitat	Rückzugslebensraum

Regelenergie	Jeder Marktteilnehmer ist dafür verantwortlich, dass Angebot und Nachfrage in seiner Bilanzgruppe in jedem Augenblick ausgeglichen sind. Trotzdem kann es beispielsweise durch Prognosefehler bei Wind- oder PV-Einspeisungen oder durch Kraftwerksausfälle zu Abweichungen kommen, die in Echtzeit ausgeregelt werden müssen. Für jede Regelzone ist dafür der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) zuständig. Dieser beschafft Leistungsreserven und aktiviert diese (Regelenergie), wenn die Summe der tatsächlichen Leistungen von der Summe der angemeldeten Fahrpläne abweicht. Durch den Einsatz von Regelenergie stellt der ÜNB eine ausgeglichene Leistungsbilanz und eine stabile Frequenz im Stromnetz sicher. Man unterscheidet dabei zwischen Primärregelleistung, die automatisch europaweit dezentral bei den beteiligten Kraftwerken innerhalb von wenigen Sekunden aktiviert wird, Sekundärregelleistung, die innerhalb von maximal 5 Minuten automatisch vom ÜNB aktiviert wird, und Tertiärregelleistung / Minutenreserve, die innerhalb von 15 Minuten voll aktivierbar ist und die Sekundärreserve bei länger andauernden Störungen ablöst. Die ÜNB beschaffen die Regelenergie (Leistung, Arbeit) über Ausschreibungen.
Residuallast	Residuallast bezeichnet den Anteil am Stromverbrauch der nach Abzug der volatilen Erzeugung aus den Energieträgern Wind und Sonne noch gedeckt werden muss. Es handelt sich also um den Restbedarf an Strom, der aus disponiblen Quellen gedeckt werden muss.
Restwasserstrecke	Gewässerabschnitt eines Fließgewässers mit künstlich verringerter Wasserführung
Salmoniden	Familie der lachsartigen Fische
Schwall/Schwallabfluss	Durch den Betrieb von Speicher- oder Pumpspeicherkraftwerken künstlich erhöhte Abflusssituation (Plateau einer Schwallwelle)
Schwallausleitungskraftwerk	Ausleitungskraftwerk, welches verhindert, dass in der durch die Errichtung der Anlage entstehenden Restwasserstrecke anthropogen erzeugte Abflussschwankungen auftreten.
Schwallbelastung	Negative ökologische Auswirkungen aufgrund anthropogen erzeugter Abflussschwankungen
Schwalldämpfungsbecken	Künstlicher Retentionsraum zur Intensitätsverringering von anthropogen erzeugten Abflussschwankungen
Schwallwelle	Durch den Betrieb von Speicher- oder Pumpspeicherkraftwerken initiierte Abfolge eines Anstiegsereignisses, Schwallabflusses und Abstiegsereignisses
Schwarzstartfähigkeit	Fähigkeit eines Kraftwerkes aus dem Stillstand ohne Stromversorgung von außen hochzufahren
Speicherkraftwerk	Wasserkraftwerk, welches Wasser in einem Stausee oder Reservoir speichert und bei Bedarf die Energie des Wassers in Strom umwandelt

Spitzenlast	Kurzzeitig auftretende hohe Leistungsnachfrage in einem Stromversorgungsgebiet, die sich oft durch einen starken Anstieg der nachgefragten Leistung auszeichnet, so dass für die Stromversorgung schnell regelbare Spitzenlastkraftwerke eingesetzt werden müssen, wie z.B. Pumpspeicherkraftwerke und Gasturbinen
Strandung	Trockenfallen von Gewässerorganismen aufgrund von Abflussrückgängen
Stromgestehungskosten	Vollkosten, die bei der Stromerzeugung anfallen, in der Regel in Euro je Megawattstunde angegeben; Diese beinhalten Kapitalkosten, fixe und variable Betriebskosten sowie die angestrebte Kapitalverzinsung über den Betriebszeitraum
Spotmarkt	Spotmarkt ist ein Großhandelsmarkt, an dem kurzfristige Geschäfte abgeschlossen werden. Bei Spotgeschäften muss die Lieferung, Abnahme und Bezahlung innerhalb eines kurzen Zeitraumes (in Deutschland: zwei Börsentage) erfolgen. Der Spotmarkt schließt häufig 12 Stunden vor dem Tag der Kontraktausübung – so beispielsweise an der EPEXSPOT. In diesem Fall handelt es sich um einen Day-Ahead-Markt.
Sunk/Sunkabfluss	Durch den Betrieb von Speicher- oder Pumpspeicherkraftwerken künstlich verringerte Abflusssituation
Terminmarkt	Der Terminmarkt ist ein Großhandelsmarkt, an dem Termingeschäfte und Derivate gehandelt werden. Diese umfassen Handelsgeschäft, dessen Vertragsbedingungen (Preis, Menge, Fälligkeit) zum Handelszeitpunkt festgelegt werden, dessen Erfüllung jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt.
Volatilität	Volatilität ist das Maß für die Schwankungsintensität eines Bezugswerts. Dabei gibt die Volatilität nicht die Richtung der Preisschwankungen an, sondern die Amplitude. Je höher die Volatilität, umso stärker kann der Kurs nach oben und unten ausschlagen. Man unterscheidet zwischen der historischen und der impliziten Volatilität. Während die historische Volatilität mit den zurückliegenden Preisen des Underlyings eines bestimmten Zeitraums berechnet wird und in Prozent des Underlying-Durchschnittspreises angegeben wird, ist die implizite Volatilität eine Größe, die aus den beobachteten Preisen für Optionen abgeleitet wird und orientiert damit über die Erwartung der Marktteilnehmer bezüglich der zukünftigen Volatilität.
WRRL	EU – Wasserrahmenrichtlinie

10 LITERATUR

1. Illies J., Botosaneanu L. (1963) Problemes et methodes de la classification et de la zonation ecologique des eaux courantes, considerees surtout du point de vue faunistique. Mitteilungen Internationale Vereinigung fuer Theoretische und Angewandte Limnologie 12:1–57
2. Limnex (2004) Auswirkungen des Schwallbetriebes auf das Ökosystem der Fliessgewässer: Grundlagen zur Beurteilung, Zürich
3. Layzer J., Nehus T., Pennington W., Gore J., Nestler J. (1989) Seasonal variation in the composition of the drift below a peaking hydroelectric project. Regulated Rivers: Research & Management 3(1):29–34
4. Baumann P., Klaus I. (2003) Gewässerökologische Auswirkungen des Schwallbetriebes: Ergebnisse einer Literaturstudie., Bern
5. Meile T., Fette M., Baumann P. (2005) Synthesebericht Schwall/Sunk. Publikation des Rhone-Thur Projektes
6. Gibbins C., Vericat D., Batalla R. (2007) When is stream invertebrate drift catastrophic? The role of hydraulics and sediment transport in initiating drift during flood events. Freshwater Biology 52:2369–2384
7. Schweizer S., Meyer N., Heuberger N., Brechbühl S., Ursin M. (2010) Zahlreiche gewässerökologische Untersuchungen im Oberhasli: wichtige Unterstützung des partizitiven Begleitprozesses von KWOpplus. Wasser Energie Luft 102(4)
8. Young P., Cech J., Thompson L. (2011) Hydropower-related pulsed flow impacts on stream fishes: a brief review, conceptual model, knowledge gaps, and research needs. Reviews in Fish Biology and Fisheries 21:713–731
9. Bruder A. (2012) Bewertung von Massnahmen zur Beseitigung wesentlicher Beeinträchtigungen durch Schwall und Sunk - Grundlagen für den Vollzug
10. Cushman R. M. (1985) Review of ecological effects of rapidly varying flows downstream from hydroelectric facilities. North American Journal of Fisheries Management 5:330–339
11. Harby A., Alfredsen K. T., Fjeldstad H. P., Halleraker J. H., Arnekleiv J. V., Borsanyi P., Flodmark L. E. W., Saltveit S. J., Johansen S. W., Vehanen T., Huusko A., Clarke K., Scruton D. A. (2001) Ecological impacts of hydro peaking in rivers. Proceedings of Hydropower 2001, Bergen
12. Salveit S. J., Halleraker J. H., Arnekleiv J. V., Harby A. (2001) Field experiments on stranding in juvenile atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*Salmo trutta*) during rapid flow decreases caused by hydropeaking. Special Issue: Eighth International Symposium on Regulated Streams. Regulated Rivers: Research & Management 17(4-5):609–622

LITERATUR

13. Halleraker J. H., Saltveit S. J., Harby A., Arnekleiv J. V., Fjeldstad H. P., Kohler B. (2003) Factors influencing stranding of wild juvenile brown trout (*Salmo trutta*) during rapid and frequent flow decreases in an artificial stream. *River Research and Applications* 19(5-6):15–20
14. Vehanen T., Huusko A., Yrjana T., Lahti M., Mäki-Petäys A. (2003) Habitat preference by grayling (*Thymallus thymallus*) in an artificially modified, hydropeaking riverbed: a contribution to understand the effectiveness of habitat enhancement measures. *Journal of Applied Ichthyology* 19(1):15–20
15. Flodmark L. E. W. (2004) Hydropeaking - a potential threat or just a nuisance? Experiments with daily discharge fluctuations and their effects on juvenile salmonids. A collection of IV papers. Faculty of Mathematics and Natural Sciences. Oslo, University of Oslo, Oslo
16. Baumann P. (2004) Rhone-Thur-Projekt. Schlussbericht Rhone Ist-Zustand. Subprojekt I-6: Revitalisierung und Benthos der Rhone., Zürich
17. Künzli F. (2005) Fischökologische Untersuchung in vier schwallbeeinflussten Schweizer Fließgewässern. Diplomarbeit, ETH Zürich
18. Schnell J. (2005) Gewässerökologische Auswirkungen des Schwellbetriebs am Lech im Bereich des Naturschutzgebietes „Litzauer Schleife“
19. Schmutz S., Fohler N., Friedrich T., Fuhrmann M., Graf W., Greimel F., Höller N., Jungwirth M., Leitner P., Moog O., Melcher A., Müllner K., Ochsenhofer G., Salcher G., Steidl C., Unfer G., Zeiringer B. (2013) Schwallproblematik an Österreichs Fließgewässern – Ökologische Folgen und Sanierungsmöglichkeiten, Wien
20. IHG BOKU, BAFU Schweiz (2013-2014) Projekttitle: "Experimentelle Untersuchungen zur Schwallproblematik - Stranden und Drift von juvenilen Äschen und Bachforellen – HydroPeak Alps"
21. SINTEF Norwegen, IHG BOKU (2009-2013) Projekttitle: „Effects of rapid and frequent flow changes – EnviPEAK“
22. IWHW BOKU Projekttitle: "Grundlagen und Methodikentwicklung zur Bewertung des Schwalleinflusses bei unterschiedlichen Flusstypen – Schwall 2012"
23. IWHW BOKU Projekttitle: "Schwall 2015"
24. Greimel F., Zeiringer B., Höller N., Grün B., Godina R., Schmutz S. (2016) A method to detect and characterize sub-daily flow fluctuations. *Hydrological Processes* 30:2063–2078
25. Sauterleute J. F., Charmasson J. (2016) A computational tool for the characterisation of rapid flow fluctuations in flow and stage in rivers. *Environmental Modelling and Software* 55:266–278
26. Schmutz S., Bakken T., Friedrich T., Greimel F., Harby A., Jungwirth M., Melcher A., Unfer G., Zeiringer B. (2015) Response of fish communities to hydrological and morphological alterations in hydropeaking rivers of Austria. *River Research and Applications* 31:919–930

LITERATUR

27. Bruder A., Tonolla D., Schweizer S., Vollenweider S., Langhans S., Wüest A. (2016) A conceptual framework for hydropeaking mitigation. *Science of The Total Environment* 568:1204–1212
28. European Commission (2011) A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050 (Energy Roadmap 2050). COM(2011) 885/2
29. European Commission (2010) Energy infrastructure priorities for 2020 and beyond. A Blueprint for an integrated European energy network, COM(2010) 677
30. European Commission (2008) EU Klima- und Energiepaket. 17. Dezember 2008
31. European Commission (2014) Klima- und energiepolitische Ziele für eine wettbewerbsfähige, sichere und CO₂-arme EU-Wirtschaft bis 2030. 22. Januar 2014
32. Beurskens L., Hekkenberg M. (2011) Renewable energy projections as published in the national renewable Energy Action Plans of the European Member States. Studie im Auftrag der European Environment Agency, Energy Research Center of the Netherlands, 2011., Niederlande
33. Fraunhofer IWES (2015) The European power system in 2030: Flexibility challenges and integration benefits. An analysis with a focus on the pentalateral energy forum region. Studie im Auftrag der Agora Energiewende
34. Pöyry Energy GmbH (2008) Wasserkraftpotentialstudie Österreich. Studie im Auftrag des VEÖ, Wien
35. Saint-Drenan Y.-M., Oehsen A. von, Gerhardt N., Sterner M., Bofinger S., Rohrig K. (2009) Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche. Studie im Auftrag des Bundesverband Erneuerbare Energie e.V., Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Kassel
36. enervis energy advisor GmbH (2014) Der „ideale Kraftwerkspark der Zukunft. Studie im Auftrag der Trianel Kohlekraftwerk Lünen GmbH & Co. KG, Berlin
37. r2b energy consulting (2014) Endbericht Leitstudie Strommarkt. Arbeitspaket Funktionsfähigkeit EOM & Impact-Analyse Kapazitätsmechanismen, Köln
38. von Roon S. (2014) Entwicklung der Erlösmöglichkeiten für Flexibilität auf dem Strommarkt. Gutachten im Auftrag der Deutschen Energie Agentur GmbH (dena), München
39. BMLFUW (2015) Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2015, Wien
40. Hunter M. A. (1992) Hydropower flow fluctuations and salmonids: A review of the biological effects, mechanical causes, and options for mitigation. Technical Report No. 119
41. Flodmark L., Urket H., Halleraker J., Arnekliev J., Vollestad L., Poléo J. (2002) Cortisol and glucose responses in juvenile brown trout to a fluctuating flow regime in an artificial stream. *Journal of Fish Biology* 60:238–248

LITERATUR

42. Sauterleute J. F. (2009) Characterisation of rapid fluctuations in flow and assessment of fish stranding risk in rivers. Diplomarbeit Universität Stuttgart in Kooperation mit SINTEF, Trondheim, Norwegen
43. Auer S., Fohler N., Zeiringer B., Führer S., Schmutz S. (2014) Experimentelle Untersuchungen zur Schwallproblematik - Drift und Stranden von Äschen und Bachforellen während der ersten Lebensstadien. Forschungsbericht
44. Higgins P., Bradford M. (1996) Evaluation of a large-scale fish salvage to reduce the impacts of controlled flow reduction in a regulated river. *North American Journal of Fisheries Management* 16:666–673
45. Hoffarth P. (2004) Evaluation of juvenile fall Chinook salmon entrapment in the Hanford Reach of the Columbia River, Washington
46. Irvine R., Oussoren T., Baxter J., Schmidt D. (2009) The effects of flow reduction rates on fish stranding in British Columbia, Canada. *River Research and Applications* 25:405–415
47. Bauersfeld K. (1978) Stranding of juvenile salmon by flow reductions at Mayfield Dam on the Cowlitz River. 1976 Technical Report 36, Washington
48. Olson F. (1990) Downramping regime for power operations to minimize stranding of salmonid fry in the Sultan River. Contract Report by CH2MHill (Bellevue, WA) for Snohomish County PUD, Bellevue, WA
49. Pflug D., Chantrill C., Mobernd L., Swanson K., Kurko K. (1989) Skagit River fry stranding integration model study. Seattle City Light, Seattle
50. Auer S. (2016) Effects of river bank heterogeneity and time of day on drift and stranding of juvenile European grayling (*Thymallus thymallus*) caused by hydropeaking. *Science of The Total Environment* 575:1515–1521
51. Bardonnnet A., Gaudin P., Persat H. (1991) Microhabitats and diel downstream migration of young grayling (*Thymallus thymallus* L.). *Freshwater Biology* 26:365–376
52. Jonsson B., Jonsson N. (2011) Ecology of Atlantic Salmon and Brown Trout – Habitat as a template for life histories., Dordrecht, Heidelberg, London, New York
53. Crisp D., Hurley M. (1991) Tream channel experiments on downstream movement of recently emerged trout, *Salmo trutta* L. and salmon, *Salmo salar* L. – I. Effect of four different water velocity treatments upon dispersal rate. *Journal of Fish Biology* 39:347–361
54. Vehanen T., Bjerke P., Heggenes J., Huusko A., Mäki-Petäys A. (2000) Effect of fluctuating flow and temperature on cover type selection and behaviour by juvenile brown trout in artificial flumes. *Journal of Fish Biology* 56:923–937
55. Thompson L., Hamilton S., Chun S., Cech Jr. J., Klimley A. (2010) Longitudinal movement of fish in response to a single-day flow pulse. *Environmental Biology of Fishes* 90(3):253–261

LITERATUR

56. Nelson F. (1986) Effects of flow fluctuations on Brown Trout in the Beaverhead River, Montana. *North American Journal of Fisheries Management* 6:551–559
57. Chapman D., Weitkamp D., Welsh T., Dell M., Schadt T. (1986) Effects of river flow on the distribution of chinook salmon redds. *Transactions of the American Fisheries Society* 115:537–547
58. Bunn S., Arthington A. (2002) Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30(4):492–507
59. Crisp D. (1996) Environmental requirements of common riverine European salmonid fish species in fresh water with particular reference to physical and chemical aspects. *Hydrobiologia* 323:201–221
60. Gostner W., Alp M., Schleiss A., Robinson C. (2013) The hydro-morphological index of diversity: a tool for describing habitat heterogeneity in river engineering projects. *Hydrobiologia* 712(1):43–60
61. Lovie P. (2005) Coefficient of variation. *Encyclopedia of statistics in behavioral science*. Wiley, Chichester
62. Abdi H. (2010) Coefficient of variation. In: Salkind N. J. (Hrsg) *Encyclopedia of research design*, London, S 169–171
63. BMLFUW (2010) Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2009. NGP 2009. I BMLFUWUW. 4.1.2/0011-I/4/2010, Wien
64. Jungwirth M., Winkler H. (1984) The temperature dependence of embryonic development of grayling (*Thymallus thymallus*), danube salmon (*Hucho hucho*), arctic char (*Salvelinus alpinus*) and brown trout (*Salmo trutta fario*). *Aquaculture* 38:315–327
65. Crisp D. T. (2000) Trout and salmon. Ecology, conservation, and rehabilitation. Blackwell Science, Oxford
66. Bardonnat A., Gaudin P. (1990) Diel pattern of first downstream post-emergence displacement in grayling, *Thymallus thymallus* (L., 1758). *Journal of Fish Biology* 37:623–627
67. Bardonnat A., Gaudin P., Thorpe J. E. (1993) Diel rhythm of emergence and of first displacement downstream in trout (*Salmo trutta*), Atlantic salmon (*S. salar*) and grayling (*Thymallus thymallus*). *Journal of Fish Biology* 43:755–762
68. ewi EnergyResearch & Scenarios (2016) Strompreisprojektionen für das Marktgebiet DE-AT bis 2050. Analyse im Auftrag der alpS GmbH für das Projekt SuREmMa, Köln
69. enervis energy advisor GmbH (2016) Marktstudie zur Strompreisentwicklung 2016 - 2050. Analyse auf Basis enervis Marktpreisszenario Best Guess Q I 2016 im Auftrag der alpS GmbH für das Projekt SuREmMa, Berlin
70. BMLFUW (2012) Österreichischer Wasserkatalog Wasser schützen - Wasser nutzen. Kriterien zur Beurteilung einer nachhaltigen Wasserkraftnutzung, Wien

11 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Übersicht repräsentative Fallbeispiele.....	30
Tabelle 2: Hydrologische Szenarien zur Bestimmung der vertikalen Abstiegs- geschwindigkeit mithilfe der 1D - HN – Modellierung.	42
Tabelle 3: Laichzeiträume, welche die Basis der Berechnung der in Abbildung 22 dargestellten Larvenfenster sind.	48
Tabelle 4: Übersicht der betriebswirtschaftlichen sowie systemrelevanten und volkswirtschaftlichen Auswirkungen schwalldämpfender morphologischer und hydrologischer Massnahmen auf Speicherkraftwerke.....	53
Tabelle 5: Ausgewählte Parameter der viertelstündlichen Spotpreise für EPEX und EXAA Day Ahead-Spotmarkt 2015 sowie enervis Marktpreisszenario Best Guess Q I 2016 und ewi Strompreisprojektion April 2016 für 2025, 2035 und 2050 in € ₂₀₁₆ /MWh.	55
Tabelle 6: Aggregierte Ergebnisse der energiewirtschaftlichen Bewertung schwalldämpfender Massnahmen für repräsentative Fallbeispiele.....	62
Tabelle 7: Summe der Investitions- und Betriebskosten sowie annuitätische Kosten von Schwalldämpfungsbecken für Fallbeispiele.	64
Tabelle 8: Technische Parameter von möglichen Schwallausleitungskraftwerken für Fallbeispiele.	64
Tabelle 9: Bandbreite Investitionskosten und Annuität morphologischer Massnahmen bei repräsentativen Fallbeispielen für die kritischen Intensitätswerte < 0,1 cm/min (untere Grenze) und < 0,4 cm/min (obere Grenze) (€ ₂₀₁₆).	65
Tabelle 10: Bandbreite Investitions- und Betriebskosten Schwalldämpfungs- becken sowie Investitionskosten morphologischer Massnahmen für fiktives Fallbeispiel (€ ₂₀₁₆).	66
Tabelle 11: Ergebnisse der energiewirtschaftlichen Bewertung schwalldämpfender Massnahmen für fiktives Fallbeispiel (€ ₂₀₁₆).	67
Tabelle 12: Relativer Rückgang der Umsatzerlöse im Vergleich zum uneingeschränkten Betrieb des fiktiven Speicherkraftwerks.	68
Tabelle 13: Qualitativ-quantitative Bewertung schwalldämpfender Massnahmen für hydrologische Wirkungsszenarien B bis E.	70

12 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Aufbau und Inhalt Forschungsbericht und Technischen Berichte A bis D.	17
Abbildung 2: Möglicher Entwicklungspfad des Brutto-Stromverbrauchs und Beitrags erneuerbarer Energien in der EU 28 bis 2050 Quelle: eigene Darstellung auf Datenbasis Eurostat und Europäische Kommission.	19
Abbildung 3: Täglich teuerste Stunde im Day Ahead-Spotmarkt Marktgebiet Deutschland-Österreich. Quelle: EPEX Spot, EEX.	20
Abbildung 4: Stundenmittlere Erzeugung von drei Fallbeispielen normiert auf mittlere stündliche Jahreserzeugung. Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft.	21
Abbildung 5: Installierte Kraftwerksleistung nach Energieträger in Österreich 2014. Daten: E-Control, Statistik Austria.	22
Abbildung 6: Anteil installierte Leistung je Erzeugungstechnologie an gesamter Kraftwerksleistung. Daten: ENTSO-E, E-Control, BfE, TheWindPower, Eurelectric (sonstige erneuerbare Energien im Wesentlichen Laufwasserkraft und Biomasse).	22
Abbildung 7: Volks- und energiewirtschaftlicher Nutzen der Flexibilität von Speicherkraftwerken in verschiedenen Marktsegmenten. Quelle: Adaptiert nach von Roon [38].	24
Abbildung 8: Kurzfristige Abflussregime österreichischer Pegelstellen (Anthropogener Einfluss hoher Intensität - N=71; Anthropogener Einfluss niedriger Intensität – N=250; Anthropogen unbeeinflusst mit Schmelzereignissen hoher Intensität – N=44; Anthropogen unbeeinflusst mit Schmelzereignissen niedriger Intensität – N=177; basierend auf Zeitreihen von jeweils 01.01.2004 bis 31.12.2008).	26
Abbildung 9: Methodischer Ansatz zur integrativen Bewertung ökologischer und energiewirtschaftlicher Auswirkungen schwalldämpfender Maßnahmen.	28

Abbildung 10: Ausbaudurchfluss (Q_a) im Verhältnis zum Mittelwasserabfluss (MQ) bei der Schwall-Einleitestelle – Gegenüberstellung der österreichweiten Gesamtsituation (hellgrau – $N=84$) und der SuREmMa-Fallbeispielauswahl (dunkelgrau – $N=10$).....	29
Abbildung 11: Übersichtsdarstellung fiktives Fallbeispiel (Hintergrundbild: Google Inc. – Google Earth 2016-7.1.7.2606).	31
Abbildung 12: Grundlegende Systematik zur ökologischen Bewertung von schwalldämpfenden Maßnahmen.	36
Abbildung 13: Ereignisdefinition und maßgebliche Parameter zur Beschreibung der Ereignisintensität (Q_{max} : Maximalabfluss des Ereignisses; Q_{tsn} Abflusswert eines bestimmten Zeitschrittes ($1\ ts \triangleq 15$ Minuten) während des Ereignisses; Q_{tsn+1} : Abflusswert des darauffolgenden Zeitschrittes während des Ereignisses; Q_{min} : Minimalabfluss des Ereignisses; ts_b : Zeitschritt Ereignisbeginn; ts_e : Zeitschritt Ereignisende).....	37
Abbildung 14: Fiktives Fallbeispiel/Retentionskurven dQ/dt - Longitudinale Betrachtungsweise der Abflussänderungsgeschwindigkeit eingeleiteter Schwallwellen mit unterschiedlicher Ausgangsintensität (Szenario B bis F – Die einzelnen Szenarien beziehen sich auf den Ausbaudurchfluss des Kraftwerkes (Q_a) (Szenario C bis F) bzw. auf einen Intensitätswert in Abhängigkeit zur Intensität natürlicher Ereignisse bei der Einleitestelle (Szenario B)) (Kreuze markieren die Lage der Pegelstellen).....	38
Abbildung 15: Fiktives Fallbeispiel/Retentionskurven dW/dt - Longitudinale Betrachtungsweise der Abstiegsgeschwindigkeit (cm/min) einzelner hydrologischer Szenarien (B-F) bei mittleren Abflussverhältnissen.	39
Abbildung 16: Beispiel für die Anordnung von Messprofilen zur Bestimmung des VK mithilfe von Betrachtungsfenstern; links: Abschnitt mit niedriger morphologischer Vielfalt aus Fallbeispiel Ziller mit $VK = 0.03$ (Quelle Orthofoto: Basemap 11/2016); rechts: Abschnitt mit höherer morphologischer Vielfalt aus Fallbeispiel Möll mit $VK = 0.32$ (Quelle Orthofoto: Basemap 11/2016).	40
Abbildung 17: Box-Plot- Darstellung der ausgewerteten Variationskoeffizienten aller 500 m Abschnitte unterteilt in die einzelnen Gewässer der Fallbeispiele und gesamt.	41
Abbildung 18: Fiktives Fallbeispiel – Gegenüberstellung von Gewässerstrecken, die potenziell aufgeweitet werden können, ohne Siedlungsflächen und Infrastruktur zu beeinflussen (basierend auf Luftbildinterpretation; Aufweitung auf die doppelte (hellgrün) bzw. dreifache (dunkelgrün) aktuelle Gewässerbreite möglich) und stark kanalisierten Gewässerstrecken (orange – Variationskoeffizient $< 0,1$).....	43
Abbildung 19: Fiktives Fallbeispiel – Longitudinale Bewertung des Strandungsrisikos für Fischlarven und frühen Juvenilstadien bei aktuellen gewässermorphologischen Verhältnissen (0 – kein Strandungsrisiko; 1 – Strandungsrisiko; 2 – sehr hohes Strandungsrisiko) einzelner hydromorphologischer Szenarien (B-F) durch Verschneidung mit kritischen Intensitätswerten (grüner Bereich) (km – Kilometer; Roter Rahmen beziehen sich auf die Intensität von Szenario F).	45
Abbildung 20: Fiktives Fallbeispiel – Longitudinale Bewertung des Strandungsrisikos für Fischlarven und frühen Juvenilstadien bei einer hypothetischen Aufweitung auf die doppelte aktuelle Gewässerbreite (0 – kein Strandungsrisiko; 1 – Strandungsrisiko; 2 – sehr hohes Strandungsrisiko) einzelner hydromorphologischer Szenarien (B-F) durch Verschneidung mit kritischen Intensitätswerten (grüner Bereich) (km – Kilometer; Roter Rahmen beziehen sich auf die Intensität von Szenario F).....	46
Abbildung 21: Fiktives Fallbeispiel – Longitudinale Bewertung des Strandungsrisikos für Fischlarven und frühen Juvenilstadien bei einer hypothetischen Aufweitung auf die dreifache aktuelle Gewässerbreite (0 – kein Strandungsrisiko; 1 – Strandungsrisiko; 2 – sehr hohes Strandungsrisiko) einzelner hydromorphologischer Szenarien (B-F) durch Verschneidung mit kritischen Intensitätswerten (grüner Bereich) (km – Kilometer; Roter Rahmen beziehen sich auf die Intensität von Szenario F).....	47
Abbildung 22: Ermittelte Larvenfenster für die Fischarten Äsche (<i>Thymallus thymallus</i>) und Bachforelle (<i>Salmo trutta</i>) an ausgewählten schwallbelasteten Fließgewässern (betrachtete Gewässerabschnitte sind in Tabelle 3 vermerkt).	49
Abbildung 23: Summe der durch das jeweilige Wirkungsszenario verbesserten Gewässerstrecke exklusive (links) und inklusive (rechts) zusätzlicher morphologischer Maßnahmen (Untere Balkenbegrenzung - Gewässerstrecke mit Abstiegsgeschwindigkeiten $< 0,1$ cm/min und Variationskoeffizient der morphologischen Diversität $> 0,1$; Obere Balkenbegrenzung – Gewässerstrecke mit Abstiegsgeschwindigkeiten $< 0,4$ cm/min und Variationskoeffizient der morphologischen Diversität $> 0,1$; Schwallausleitungskraftwerk – Wirkungsszenario A ($N=4$; Betriebliche Einschränkungen bzw. Dämpfungsbecken – Wirkungsszenario B-E ($N=10$)).....	50
Abbildung 24: Minimaler (untere Balkenbegrenzung) und maximaler (obere Balkenbegrenzung) fallbeispielspezifischer Anteil der durch das jeweilige Wirkungsszenario verbesserten Gewässerstrecke	

exklusive (links) und inklusive (rechts) zusätzlicher morphologischer Maßnahmen (Anteil der Gewässerstrecke mit Abstiegseschwindigkeiten $< 0,1$ cm/min und Variationskoeffizient der morphologischen Diversität $> 0,1$; Schwallausleitungskraftwerk – Wirkungsszenario A (N=4; Betriebliche Einschränkungen oder Dämpfungsbecken – Wirkungsszenario B-E (N=10)).	51
Abbildung 25: Untere (uG) und obere Grenze (oG) der Erlöspotenziale der generischen Speicherkraftwerke ohne betriebliche Einschränkungen (hydrologisches Wirkungsszenario F). Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft.	56
Abbildung 26: Annuität des Kapitalwerts betrieblicher Einschränkungen von Speicherkraftwerken bezogen auf die Engpassleistung (links) und die verlorene flexible Leistung (rechts). Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft (auf 1.000 € gerundet). Anmerkung: Die zu Erreichung des Szenarios B nötige Schwalldämpfung ist vom jeweiligen Fallbeispiel abhängig. Es wurden mehrere hydrologische Szenarien bewertet, um die Bandbreite der Fallbeispiele abzudecken.	57
Abbildung 27: Spezifische Kosten von Schwalldämpfungsbecken für exemplarische Fallbeispiele in hydrologischen Wirkungsszenarien B bis E (€_{2016}).	58
Abbildung 28: Mittlere verlorene Energie in den Rampen bezogen auf Regelarbeitsvermögen in Abhängigkeit von hydrologischem Wirkungsszenario für fiktive Speicherkraftwerke. Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft.	60
Abbildung 29: Summe der verlorenen und verbleibenden flexible Leistung durch betriebliche Einschränkungen der Fallbeispiele in Abhängigkeit von hydrologischem Wirkungsszenario. Quelle: SuREmMa Projektgruppe Energiewirtschaft.	63
Abbildung 30: Summe der durch das jeweilige Wirkungsszenario verbesserten Gewässerstrecke (vgl. Kapitel 5.5) exklusive (links) und inklusive (Mitte) zusätzlicher morphologischer Maßnahmen (Untere Balkenbegrenzung - Gewässerstrecke mit Abstiegseschwindigkeiten $< 0,1$ cm/min und Variationskoeffizient der morphologischen Diversität $> 0,1$; Obere Balkenbegrenzung – Gewässerstrecke mit Abstiegseschwindigkeiten $< 0,4$ cm/min und Variationskoeffizient der morphologischen Diversität $> 0,1$; Schwallausleitungskraftwerk – Wirkungsszenario A (N=4; Betriebliche Einschränkungen oder Dämpfungsbecken – Wirkungsszenario B-E (N=10)) und Summe potenzieller Kosten morphologischer Maßnahmen (vgl. Kapitel 6.4.1) ausgedrückt durch Annuitäten (rechts).	71
Abbildung 31: Szenarienspezifische Auswirkungen einzelner Maßnahmentypen auf die flexible Leistung der von den Fallbeispielen abgedeckten Speicherkraftwerken sowie zusätzliche installierte Leistung der in vier Fallbeispielen möglichen Schwallausleitungskraftwerken (vgl. Kapitel 6.4.1) (links – Betriebliche Einschränkungen, Mitte – Dämpfungsbecken, rechts – Schwallausleitungskraftwerk).	72
Abbildung 32: Szenarienspezifische Auswirkungen einzelner Maßnahmentypen auf die CO ₂ -Emissionen im Versorgungssystem (vgl. Kapitel 6.4.1) (links – Betriebliche Einschränkungen, Mitte – Dämpfungsbecken, rechts – Schwallausleitungskraftwerk, Mio.t _{CO₂eq} – Millionen Tonnen-CO ₂ -Äquivalent-Emissionen).	72
Abbildung 33: Szenarienspezifische Auswirkungen einzelner Maßnahmentypen auf die mittleren jährlichen Kosten alternativer Flexibilitätsoptionen für betriebliche Einschränkungen und Dämpfungsbecken sowie die mittleren jährliche vermiedenen Kosten alternativer Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien für Schwallausleitungskraftwerke (vgl. Kapitel 6.4.1) (links – Betriebliche Einschränkungen, Mitte – Dämpfungsbecken, rechts – Schwallausleitungskraftwerk).	73
Abbildung 34: Szenarienspezifische Auswirkungen einzelner Maßnahmentypen auf die Erlöspotenziale der von den Fallbeispielen abgedeckten Speicherkraftwerken für betriebliche Einschränkungen sowie mittlere Kostenbelastung für Dämpfungsbecken und Schwallausleitungskraftwerke jeweils ausgedrückt als Annuität (vgl. Kapitel 6.4.1) (links – Betriebliche Einschränkungen, Mitte – Dämpfungsbecken, rechts – Schwallausleitungskraftwerk).	73



**MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH**

bmlfuwgv.at

FÜR EIN LEBENSWERTES ÖSTERREICH.

UNSER ZIEL ist ein lebenswertes Österreich in einem starken Europa: mit reiner Luft, sauberem Wasser, einer vielfältigen Natur sowie sicheren, qualitativ hochwertigen und leistbaren Lebensmitteln.

Dafür schaffen wir die bestmöglichen Voraussetzungen.

WIR ARBEITEN für sichere Lebensgrundlagen, eine nachhaltige Lebensart und verlässlichen Lebensschutz.



**MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTEES
ÖSTERREICH**

www.bmlfuw.gv.at