

Wasserstandsschwankungen verhindern das Wachstum bodenlebender Algen in Stauseen – eine Herausforderung für den nachhaltigen Ausbau der Wasserkraft

Philipp Hirsch

Zusammenfassung

Der Ausbau der Wasserkraft ist ein entscheidender Baustein in der Energiewende hin zu einem nachhaltigeren Energiesystem, hat aber auch Auswirkungen auf die Gewässerökologie. In einem Forschungsprojekt der Universität Basel wurde erstmals in der Schweiz der Fokus auf die Auswirkungen von Wasserkraft oberhalb eines Staudamms, nämlich im Stausee selbst, gelegt. In Experimenten in einem nachgebauten Stauseeufer wurde festgestellt, dass Wasserstandsschwankungen zu einem starken Verlust der Ökosystemproduktivität, gemessen an der Biomasse bodenlebender Algen, führen. Die Daten deuten auf eine starke Beeinflussung des gesamten Ökosystems Stausee hin, da bodenlebende Algen vor allem in nährstoffreichen alpinen Seen ein wichtiger Grundbaustein der Nahrungskette sind. Weitere Experimente mit tierischen Organismen und vor allem auch vergleichende Untersuchungen in Stauseen mit unterschiedlich starken Wasserstandsschwankungen sind nötig, um noch weitergehende Schlüsse zu ziehen.

1 Einleitung

Wasserkraft ist eine der wichtigsten regenerativen Energiequellen. Alleine in der Schweiz werden rund 50 % des Elektrizitätsbedarfs durch Wasserkraft gedeckt. Ein Ausbau der Wasserkraft in Zukunft wird ein wichtiger Bestandteil der Energiewende sein. Die ökologischen Auswirkungen der Wasserkraft sind zunehmend in den Fokus der Forschung gerückt. Trotz ihrer Regenerativität und obwohl Wasserkraft eine weitgehend CO₂-neutrale Energiequelle ist, wurde zunehmend klar, dass der Ausbau der Wasserkraft stark in die Natur eines Gewässers eingreift. Die prominentesten Eingriffe sind jene in die Gewässermorphologie. Aus ökologischer Sicht am besten untersucht ist dabei die Barrierewirkung von Querbauwerken, die einen Fluss sozusagen unpassierbar für auf- oder absteigende Fische machen. In letzter Zeit kam eine bisher fast völlig unbeachtete ökologische

Adresse des Autors: Dr. Philipp Hirsch, Universität Basel, Programm MGU, Vesalgasse 1, CH-4051 Basel; E-Mail: philipp.hirsch@unibas.ch

Auswirkung der Wasserkraft hinzu – nämlich jene auf die Wasserstandsschwankungen in Stauseen. Mit der Energiewende und dem zunehmenden Ausbau von regenerativen Energien verändert sich die Nutzungsdynamik für die Wasserkraft. Wasserkraftwerke werden zunehmend als Energiespeicher dienen und die volatilen (also leicht veränderlichen) Beiträge der anderen regenerativen Energien abpuffern (*Gurung et al. 2016*).

Diese zukünftige Veränderung des Energiesystems wird bewirken, dass Wasserstandsschwankungen sich in ihrem Ausmass und ihrer zeitlichen Dynamik verändern (*Hirsch et al. 2017*). Dadurch könnten auch ihre ökologischen Auswirkungen zunehmen, sobald vermehrt regenerative Energien den Strommix in der Schweiz bereichern. Diese Verschärfung folgt aus einer zunehmenden Internationalisierung und Veränderung des Strommarktes in der Schweiz. Strom aus Wind und Sonne wird immer dann dem Strommarkt zugeführt, wenn jeweils Wind- und Sonnenperioden deren Produktion erlauben. Wird mehr Strom aus Wind und Sonne produziert als im Netz unmittelbar verbraucht wird, entsteht eine Überproduktion und der Strompreis sinkt. Die Wasserkraftwerksbetreiber haben nun einen Anreiz, ihre Turbinen still stehen zu lassen und das angestaute Wasser ihres Stausees zurückzuhalten. Speisen Wind und Sonne wieder weniger Energie ein, steigt der Preis und die Kraftwerksbetreiber haben wieder einen Anreiz, das Wasser zu turbinieren. In diesem Fall wird dann möglichst schnell möglichst viel Wasser turbinieren, um die Preisspitzen optimal auszunutzen (*Barry et al. 2015*).

Dieses System von Turbinieren und Rückhalten von Wasser erzeugt neuartige Schwankungen im Wasserspiegel des Stausees (Abb. 1) und im Abflussregime unterhalb der Staumauer, die ihrerseits ökologische Auswirkungen haben werden. Damit kommt der Forschung nun eine neue Aufgabe zu: Es braucht neue Ansätze um abzuschätzen, wie sich die zukünftige Veränderung des Energiesystems auf die Ökologie eines Gewässers auswirkt. Die Auswirkungen von Wasserstandsschwankungen auf die Gewässerökologie sind bisher kaum erforscht. Studien zu den ge-



Abb. 1 Niedrigwasser im Schluchsee (Süd-Schwarzwald, D) verursacht durch Turbinierung grosser Wassermengen im dortigen Kraftwerk. *Foto: P. Hirsch, Universität Basel, 2014*

wässerökologischen Veränderungen nach Aufstauung für ein Wasserkraftwerk beziehen sich meist auf vergleichende Untersuchungen vor und nach Staudammbau (Rydin et al. 2008). Durch eine Reihe von weiteren Faktoren, die sich im Stausee ändern, braucht es deshalb experimentelle Ansätze, um die Rolle von Wasserstandsschwankungen mechanistisch zu untersuchen.

In diesem Artikel wird auf die neueste Forschung zu dieser neuen und wichtigen Facette der gewässerökologischen Forschung eingegangen. Konkreter Fokus der Untersuchungen waren die Auswirkungen der Energiewende auf Wasserstandsschwankungen und damit gewässerökologische Parameter in einem Stausee. Die massgebliche Forschungsfrage dabei war: Was ist der Einfluss von zukünftiger Nutzung der Wasserkraft auf die Wasserstandsschwankungen in einem alpinen Stausee und was sind die ökologischen Auswirkungen davon? Zur Beantwortung dieser Fragen wurden Experimente in einem nachgebildeten Ufer eines Stausees durchgeführt.

2 Methoden

Die Forschungsfrage nach den Auswirkungen von Wasserstandsschwankungen wurde in einem kontrollierten Grossversuch experimentell beantwortet. Dazu wurden am limnologischen Institut der Universität Konstanz Versuche in einer simulierten Uferzone durchgeführt. In zwei jeweils 10 m langen, 1.5 m breiten und 2 m tiefen Becken wurde jeweils auf circa 3 m Länge eine flach auf den Boden abfallende Uferneigung eingebaut (Abb. 2 A). Mit Sand als Unterlage und Wasser aus dem Bodensee wurde so die Uferzone eines alpinen Stausees nachgebildet. Der Bodensee mit seinem sehr nährstoffarmen Wasser eignete sich dabei besonders gut zur Simulation eines alpinen Stausees. In typischerweise nährstoffarmen alpinen Stauseen sind die Algen auf dem Boden der Seeufer ein essentieller Grundbaustein des Seeökosystems (Hampton et al 2011). Gleichzeitig sind diese Algen durch ein Trockenfallen des Ufers bei Turbinierung von Wasser besonders betroffen. Als Grundparameter für die ökologischen Auswirkungen von Wasserstandsschwankungen wurde also der Einfluss auf die benthische Primärproduktion gewählt. Benthische Primärproduktion wurde hierbei indirekt gemessen als die Menge an aufgewachsenem Blattfarbstoff Chlorophyll a (Chl a). Diese Menge ist wiederum stellvertretend für die Menge an aufgewachsenen benthischen Algen. Eine Reihe von Studien belegt, dass mit steigender Menge benthischer Algen eine grössere Basis für eine fruchtbarere Nahrungskette im ganzen See entsteht. Je mehr Chl a, desto mehr Algen, desto mehr Primärproduktion, desto produktiver auch die weiteren höheren Nahrungskettenbausteine wie Invertebraten und schlussendlich Fische (Rydin et al. 2008).

Zur genauen Quantifizierung der Algen bzw. des Chl a wurden 10 x 10 cm Kacheln auf dem Boden der Uferzone auf mehreren Tiefenstufen ausgebracht (Abb. 2 B). Von diesen Kacheln wurde der Algenbewuchs dann mittels eines speziellen Probenahme-Geräts entnommen und im Labor photometrisch quantifiziert. Eine genaue Beschreibung der Probenahme und Analyse ist bei Peters et al. (2005) nachzulesen. Weitere Wasserparameter wie Temperatur und Nährstoffgehalt wurden geloggt bzw. täglich bestimmt und in beiden Becken konstant gehalten.

Über sechs Wochen hinweg wurde der Wasserstand in einem Becken konstant gehalten, während er in einem anderen Becken schwankte. Die Dynamik der Wasserstandsschwankungen richtete sich nach vorangegangenen Forschungen, wonach der Wasserstand über Wochen oder Monate hinweg recht stabil bleiben kann und so grundsätzlich den Bewuchs von Algen erlaubt, aber durch die täglichen Änderungen im Strompreis typische Schwankungen von 0.5 m innert 12 h Intervallen vorkommen. Genaue Muster und Hintergründe der angelegten Schwankungen werden in den entsprechenden Forschungsartikeln erläutert (Hirsch et al. 2014, Hirsch et al. 2016).

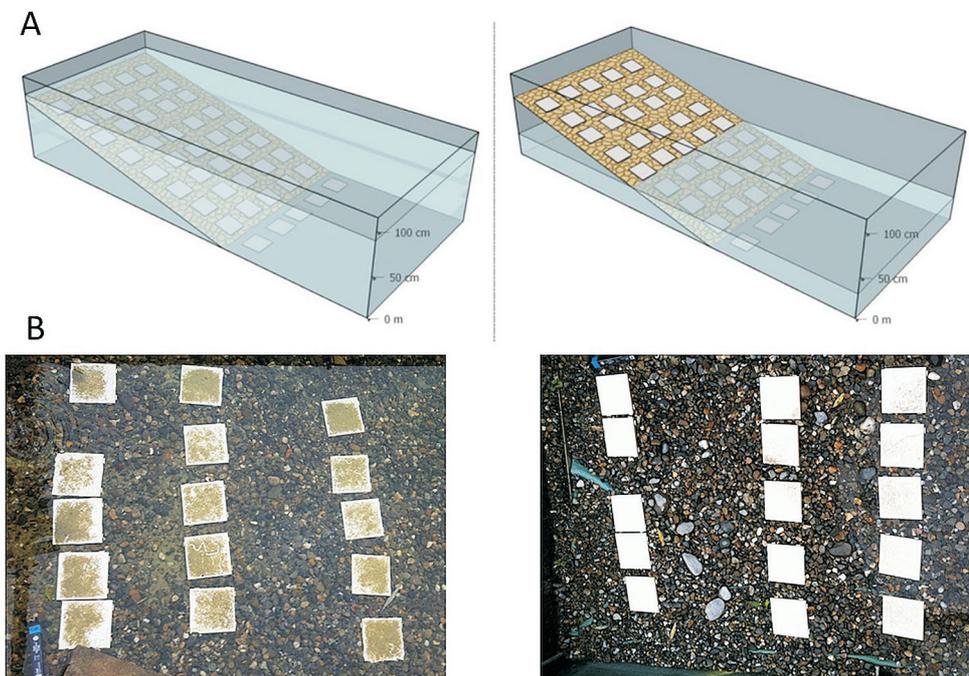


Abb. 2 A) Schematische Zeichnung der zwei Versuchsbecken mit jeweils maximal hohem (links) und maximal niedrigem (rechts) Wasserstand. B) Foto der obersten eingesetzten Kacheln im Becken mit stabilem Wasserstand mit deutlich erkennbarem Algenwuchs (links) und Kacheln ohne Algenbewuchs (rechts) aus dem Becken mit schwankendem Wasserstand. *Schema und Fotos: K. Apolloni, Universität Basel, 2015*

Dieses Szenario entspricht einem Ausblick in den zukünftigen Strommarkt: Der Betreiber des Stausees reagiert auf die Preisschwankungen durch dynamischere Turbinierung. Das bedeutet, es geschieht ein schnelleres Leerlaufenlassen auch innerhalb kürzerer Zeit, wenn die Preise hoch sind.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Experimentes ergaben einen substantiellen Verlust an Primärproduktion (gemessen als Chl a Konzentration) im Becken mit Wasserstandsschwankungen. Vor allem der oberste Bereich, in welchem das Ufer am längsten trockenfällt, zeigt erwartungsgemäss kaum noch Algenwachstum (Abb. 3 A). Besonderes Augenmerk ist hierbei darauf zu richten, dass die Primärproduktion auch in Tiefen abnimmt, die nie trockenfallen und stets mit Wasser bedeckt sind (Abb. 3 B). Der negative Effekt der Wasserstandsschwankungen auf die Primärproduktion ist somit auch unterhalb der Niedrigstwasserstandslinie messbar.

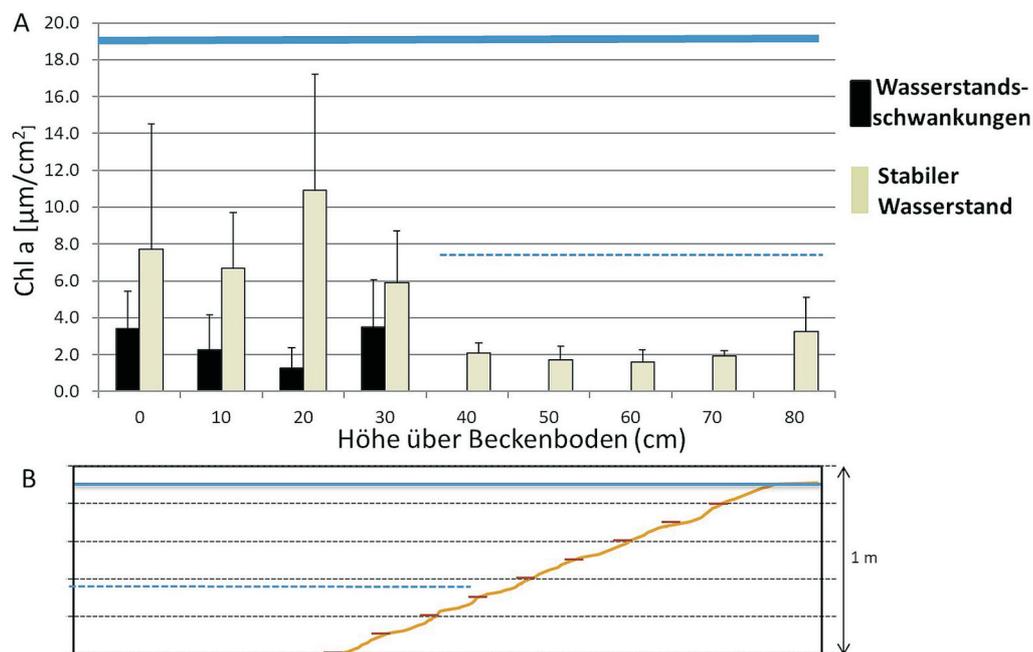


Abb. 3 A) Einfluss von Wasserstandsschwankungen auf die Primärproduktion in zwei Versuchsbecken der Universität Konstanz. Die blaue fette und gestrichelte Linie zeigt jeweils den maximalen und minimalen Wasserstand im Versuch an. B) Schemazeichnung des Versuchsbeckens im Längsschnitt mit der künstlichen Uferzone (gelb), den Kacheln (braun) als Flächen für den Algenbewuchs, die Messstufen der unter A gezeigten Höhenstufen sind durch gestrichelte graue Linien dargestellt.

Grafik: P. Hirsch und K. Apolloni, Universität Basel, 2015

4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Wasserstandsschwankungen stark auf die Primärproduktion in Stauseen auswirken könnten. Bereits bestehende Forschungen, welche Seen vor und nach der Einstauung über Jahre hinweg verglichen, machten die Beobachtung, dass Fische schlechter wachsen und generell der Nährstatus von Stauseen abnimmt. Als Mechanismus für diese Effekte könnte man nun auch den Verlust an benthischen Algen durch die Wasserstandsschwankungen weiter untersuchen.

Bisherige Forschungen zu den ökologischen Auswirkungen der Wasserkraft haben nur in sehr geringem Masse die Gewässerökologie oberhalb der Staumauer betrachtet. Unsere Ergebnisse verdeutlichen, dass Wasserstandsschwankungen, wie sie durch die derzeitige Stromnutzung entstehen, auch die Gewässerökologie von Stauseen beeinflussen könnten.

Wichtig ist jedoch zu bedenken, dass sich die kleinen Masstäbe des Experiments nur schlecht verallgemeinern lassen auf einen ganzen Stausee. Durch Konstanthalten der wichtigsten Wasserparameter wie Temperatur und vor allem Nährstoffgehalt wurde simuliert, dass die Schwankungen in einem grossen Wasserkörper passieren. Bisherige Versuche zu Wasserstandsschwankungen fanden in kleinen replizierten Teichen statt (Evtimova & Donohue 2014). Durch solche Replikatel lässt sich eine robustere Statistik erzielen. Jedoch ist in solch kleinen Systemen weder die ex-

akte Dynamik einer Wasserstandsschwankung, so wie sie in einem Stausee geschieht, möglich, noch lässt sich vermeiden, dass sich Prozesse abspielen, die in einem grossen Wasservolumen nicht vorkämen. Beispielsweise erwärmt sich ein kleiner experimenteller Wasserkörper bei Niedrigwasserstand schneller als bei hohem. Ein Phänomen, das bei einer Wasserstandsschwankung von 0.5 m über einen halben Tag in einem alpinen Stausee kaum zu erwarten wäre. Für eine robustere Abschätzung der gewässerökologischen Folgen von Wasserstandsschwankungen in Stauseen wären mehrjährige Langzeitmessungen der Primärproduktion in einem Stausee nötig.

Dass Stauseen auch im alpinen Raum Ökosysteme mit wichtigen Ökosystemdienstleistungen sind, veranschaulicht eine kurze Recherche zu Stauseen in der Schweiz. Von 97 beim Bundesamt für Energie gelisteten alpinen Stauseen über 1000 m Meereshöhe gibt es bei über einem Drittel (38 %) eine kommerzielle Angelfischerei (🎣). Das Vorhandensein einer kommerziellen Angelfischerei wurde hierbei abgeleitet aus Online-Informationen zum Kauf von Angellizenzen für das entsprechende Gewässer. Für das Wachstum von Fischpopulationen in alpinen Stauseen ist eine benthische Primärproduktion von grosser Wichtigkeit (Hirsch et al. 2017). Die Perspektive auf Stauseen als Ökosysteme mit Ökosystemdienstleistungen zeigt also den Forschungsbedarf für eine noch bessere Abschätzung der Folgen von Wasserstandsschwankungen in Stauseen.

5 Fazit

Das Fazit dieser aktuellen Forschungen ist, dass sich die ökologischen Auswirkungen der Wasserkraft in Zukunft verändern werden. Während die Richtung und Dynamik dieser Veränderungen noch nicht konkret vorhergesagt werden können, müssen doch die ökologischen Auswirkungen von Wasserstandsschwankungen besser untersucht werden. So wie sich der Strommarkt durch zunehmende Einspeisung regenerativer Energien ändert, so werden sich auch die Effekte auf die Gewässerökologie ändern. Unsere Forschungen zeigen, dass dabei ein spezieller Fokus auf die Effekte oberhalb einer Staumauer gelegt werden sollte. Dieser Fokus zielt auf eine echte Forschungslücke. Noch immer ist die grosse Mehrzahl von gewässerökologischen Untersuchungen zur Wasserkraft auf die Einflüsse unterhalb eines Stausees, zum Beispiel auf die Barrierewirkung von Flusskraftwerken für den Fischeaufstieg, beschränkt.

Ein Ausblick in die Energieprojekte der Schweiz macht deutlich, dass das grösste Entwicklungspotenzial im Ausbau von Speicherkraftwerken, besonders Pumpspeicherkraftwerken, gesehen wird: Laut dem Bundesamt für Energie (BFE) haben Pumpspeicherkraftwerk-Projekte die höchste Realisierungswahrscheinlichkeit verglichen mit Flusskraftwerken (*Bundesamt für Energie BFE 2013*).

Auch höher gelegene Stauseen bieten dem Menschen wichtige Ökosystemdienstleistungen wie aus der fischereilichen Bewirtschaftung abgelesen werden kann. Vor diesem Hintergrund ist eine eingehendere Untersuchung der gewässerökologischen Auswirkungen von Wasserstandsschwankungen in solchen Systemen von besonderer Wichtigkeit.

Dank

Dank gilt den zahlreichen Unterstützern unserer Arbeit, die unsere Forschung ermöglichen. Dies sind insbesondere die Universität Basel, das Bundesamt für Umwelt (BAFU), die Forschungsstelle für Nachhaltige Energie- und Wasserversorgung (FoNEW) und die Kantone Basel-Stadt, Basel-Land, Aargau, Solothurn und Zürich. Für den Zugang zu den Aussenanlagen der Universität

Konstanz geht Dank an Prof. Karl-Otto Rothhaupt und Prof. Reiner Eckmann. Für die praktische Unterstützung geht Dank an das Personal des Limnologischen Instituts der Universität Konstanz, besonders an Martin Wolf und Christian Fiek. Ein Grossteil der Daten dieses Artikels geht auf erfolgreich beendete Masterarbeiten innerhalb des Programms Mensch-Gesellschaft-Umwelt zurück, hier sei besonders Katharina Appoloni und Christina Geiger gedankt. Für die fruchtbare interdisziplinäre Zusammenarbeit geht ausserdem Dank an Sebastian und Moritz Schillinger und Prof. Hannes Weigt.

Literatur

- Barry M., Baur P., Gaudard L., Giuliani G., Hediger W., Romerio F., Schillinger M., Schumann R., Voegeli G. & Weigt H. 2015. The Future of Swiss Hydropower – A Review on Drivers and Uncertainties. *FO NEW Discussion Paper* 2015/01.
- Bundesamt für Energie BFE 2013. *Perspektiven für die Grosswasserkraft in der Schweiz*. Bern. Online verfügbar: www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/33285.pdf [Eingesehen am 12.04.2019]
- Evtimova V. & Donohue I. 2014. Quantifying ecological responses to amplified water level fluctuations in standing waters: an experimental approach. *Journal of Applied Ecology* 51:1282–1291.
- Gurung A.B., Borsdorf A., Fureder L., Kienast F., Matt P., Scheidegger C., Schmocker L., Zappa M. & Volkart K. 2016. Rethinking Pumped Storage Hydropower in the European Alps. A Call for New Integrated Assessment Tools to Support the Energy Transition. *Mountain Research and Development* 36: 222–232.
- Hampton S.E., Fradkin S.C., Leavitt P.R. & Rosenberger E. E. 2011. Disproportionate importance of nearshore habitat for the food web of a deep oligotrophic lake. *Marine and Freshwater Research* 62: 350–358.
- Hirsch P., Schillinger M., Appoloni K., Burkhart-Holm P. & Weigt H. 2016. Integrating Economic and Ecological Benchmarking for a Sustainable Development of Hydropower. *Sustainability* 8: 875.
- Hirsch P.E., Eloranta A.P., Amundsen P.-A., Brabrand Å., Charmasson J., Helland I.P., Power M., Sánchez-Hernández J., Sandlund O.T., Sauterleute J.F., Skoglund S., Ugedal O. & Yang H. 2017. Effects of water level regulation in alpine hydropower reservoirs: an ecosystem perspective with a special emphasis on fish. *Hydrobiologia*: 1–15.
- Hirsch, P.E., Schillinger S., Weigt H. & Burkhart-Holm P. 2014. A Hydro-Economic Model for Water Level Fluctuations: Combining Limnology with Economics for Sustainable Development of Hydropower. *Plos One* 9: e114889.
- Peters L., Scheifhacken N., Kahlert M. & Rothhaupt K.O. 2005. An efficient in situ method for sampling periphyton in lakes and streams. *Archiv für Hydrobiologie* 163: 133–141.
- Rydin E., Vrede T., Persson J., Holmgren S., Jansson M., Tranvik L. & Milbrink G. 2008. Compensatory nutrient enrichment in an oligotrophicated mountain reservoir – effects and fate of added nutrients. *Aquatic Sciences* 70: 323–336.

Internetquelle

-  www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/karten/einzugsgebietgliederung-schweiz.html

