

In den Seen steckt viel Energie

Ein winterlicher Wärmeentzug in der Grössenordnung der Energieproduktion von ein oder zwei Kernkraftwerken verändert die Wassertemperatur des Bodensees um weniger als 0,2 Grad Celsius. Das hat keine wahrnehmbaren Auswirkungen auf das Ökosystem. Zu diesem Schluss kommt eine Studie, in der erstmals systematisch simuliert wurde, wie sich Schichtung und Temperaturen im See bei grossen Energieentnahmen im Winter oder bei der Einleitung von Kühlwasser im Sommer verändern. *Von Andri Bryner*



Abb. 1: Die Wärmeenergie aus dem Bodensee liesse sich nutzen, ohne dass sich dies negativ auf das Ökosystem auswirkt (im Bild: Bodensee mit Säntis).

Mit den Zielen einer nachhaltigen Energieversorgung und einer Reduktion des CO₂-Ausstosses wird die Nutzung von Wärme oder Kälte aus Seen zunehmend attraktiv. In der Schweiz stammen noch immer rund 65 Prozent der Energie für das Heizen von Gebäuden aus nicht erneuerbaren fossilen Energieträgern. Da sich gerade an den grösseren Seen wie Bodensee, Zürich-, Vierwaldstätter- oder Genfersee auch grössere Ortschaften befinden, drängt sich die Nutzung des riesigen Wärmepotenzials der tiefen Seen am Alpenrand auf. Einzelne Anlagen stehen zwar schon in Betrieb, so in Zürich, Lausanne oder St. Moritz. Doch sind die bisher genutzten Wärmemengen klein. Zudem haben ältere Wärmepumpen oft schlechte Wirkungsgrade. Das heisst, für den Gewinn von Nutzwärme wird zu viel Antriebsenergie eingesetzt – zumeist Strom, bei grösseren Anlagen auch über Verbrennungsmotoren.

Über thermische Verschmutzung ist wenig bekannt

Klimaschutz, Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Anlagen sind die eine Seite. Auf der anderen Seite stellen sich Fragen nach dem Schutz der Seen vor thermischer Verschmutzung. Davon spricht man, wenn das Einleiten von aufgewärmtem (beim Kühlen) oder abgekühltem Wasser (beim Heizen) zu negativen Veränderungen der Wasserqualität oder der biologischen Gemeinschaften führt. Wissenschaftliche Arbeiten zu diesem Thema sind dünn gesät. Insbesondere zur Frage, ab welcher Grössenordnung eine Rückgabe von kühlerem Wasser in einen See problematisch sein könnte, existieren kaum Untersuchungen. In Flüssen wurden bei abrupten Temperaturabsenkungen von mehr als 3 Grad Celsius höhere Driftraten von Kleintieren beobachtet. Ältere Studien gehen von der Faustregel aus, dass Temperaturänderungen zwischen -0,5 und +0,5 Grad keine oder nur unwesentliche Effekte auf die Ökologie in Flüssen und Seen hätten.

Etwas mehr ist bekannt über die Effekte von künstlich angehobenen Temperaturen: Im Stechlinsee (D) hat der Temperaturanstieg um 1 Grad, bedingt durch Kühlwassereinleitung, zu einer erhöhten Produktionsrate und zu Veränderungen in der Artenzusammensetzung beim Makrozoobenthos geführt. Bei Flüssen weiss man, dass wärmere Temperaturen die Kaltwasser liebenden Fischarten verdrängen – insbesondere dann, wenn die Wassertemperaturen generell schon hoch sind. Es existieren aber unterschiedliche Beobachtungen, ab welchen Differenzen sich signifikante Änderungen einstellen. Einig sind sich verschiedene Autoren lediglich darin, dass bei Erwärmung von über 4 Grad mit negativen Konsequenzen zu rechnen ist.

Realistische Bedarfsszenarien als Basis für Modellierung

Statt mit derart hohen Wärmeentnahmen zu rechnen, die das Wasser an der Seeoberfläche gleich um mehrere Grad abkühlen könnten, haben sich Wissenschaftler der Eawag in einer neuen Studie ein realistisches Nachfrageszenario zurechtgelegt. Sie rechnen mit einem Leistungsbedarf von rund 1 Kilowatt pro Einwohner um den See. Hochgerechnet auf eine Million Men-

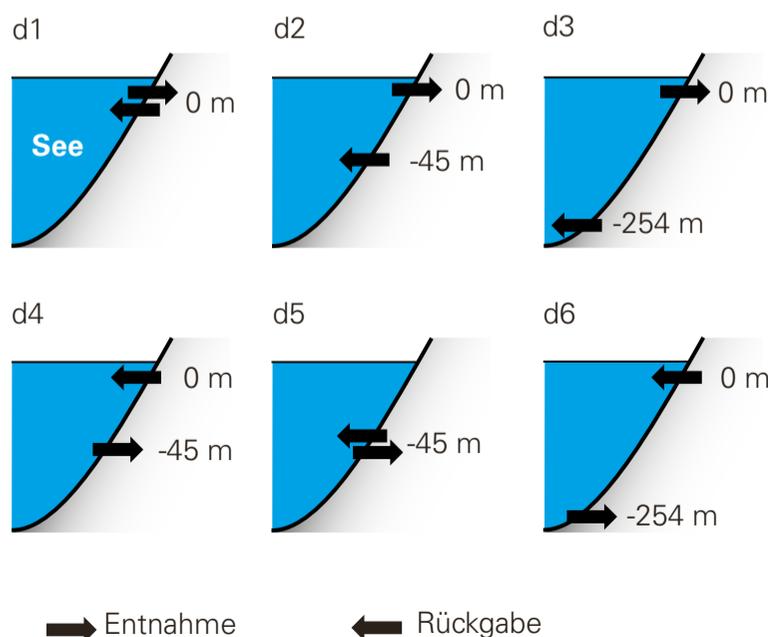


Abb. 2: Unterschiedliche Anordnungen der Wasserentnahme und -rückgabe. Die gleiche Menge, die entnommen wird, wird wieder zugeführt.

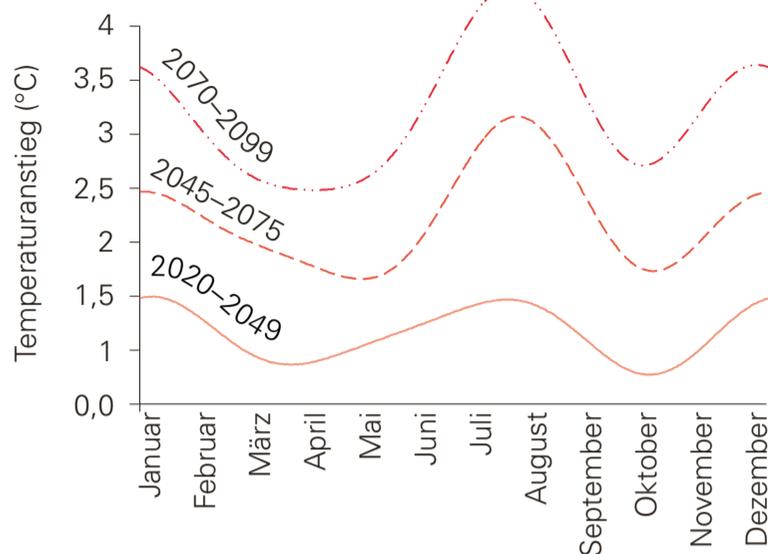


Abb. 3: Temperaturdifferenzen (Luft) am Bodensee unter dem IPCC-Klimaszenario A1B relativ zur Periode 1980 bis 2009.

schen ergeben sich insgesamt etwa 1 Gigawatt oder 2 Watt pro Quadratmeter Seeoberfläche, was ungefähr der Leistung eines Kernkraftwerks entspricht. Verglichen mit den wenigen bereits installierten Wärmepumpen und Kühlwassereinleitungen ist das viel (rund das Dreissigfache), verglichen mit den natürlichen Wärmeflüssen des Bodensees jedoch wenig: Allein über die langwellige Abstrahlung verliert der See zum Beispiel rund 170 Gigawatt und über die Verdunstung 20 Gigawatt.

Um den räumlichen und zeitlichen Verlauf der Temperaturen im See abzuschätzen, verwendeten die Forschenden ein mathematisches Turbulenzmodell. Neben verschiedenen Entnahmemengen und Temperaturdifferenzen berechneten sie Szenarien mit unterschiedlichen Tiefen für die Wasserentnahme und -rückgabe (Abb. 2). Zum Vergleich haben sie auch Situationen modelliert, bei denen dem See so viel Energie zugeführt würde, wie dies der Fall ist, wenn die Szenarien der Klimaerwärmung eintreffen (Abb. 3).

Minimale Veränderungen von 0,2 Grad

Unter dem skizzierten Bedarfsszenario ergeben die Modellierungen nur kleine Änderungen der Wassertemperatur: Maximal um 0,2 Grad Celsius würde der See an der Oberfläche kühler, wenn 1 Gigawatt zu Heizzwecken entnommen würde. Sogar nur um 0,1 Grad schwankt die Temperatur, wenn die Wärmeentnahme im Winter während des Sommers mit einer Wärmerückgabe (durch die Einleitung von verbrauchtem Kühlwasser) kompensiert würde.

Die Modellierung hat gezeigt, dass sich die Temperaturdifferenzen im See je nach Entnahme- und Rückgabentiefe sowohl über die entnommene Wassermenge als auch die Temperaturdifferenz zwischen entnommenem und zurückgegebenem Wasser beeinflussen, das heisst also auch minimieren lassen. Mit Ausnahme einer Einleitung von erwärmtem Wasser in der Tiefe (Abb. 4 rechts, Anordnung d3) haben die unterschiedlichen Entnahme-Rückgabe-Designs aber nur minimalen Einfluss auf die Veränderung der Temperatur.

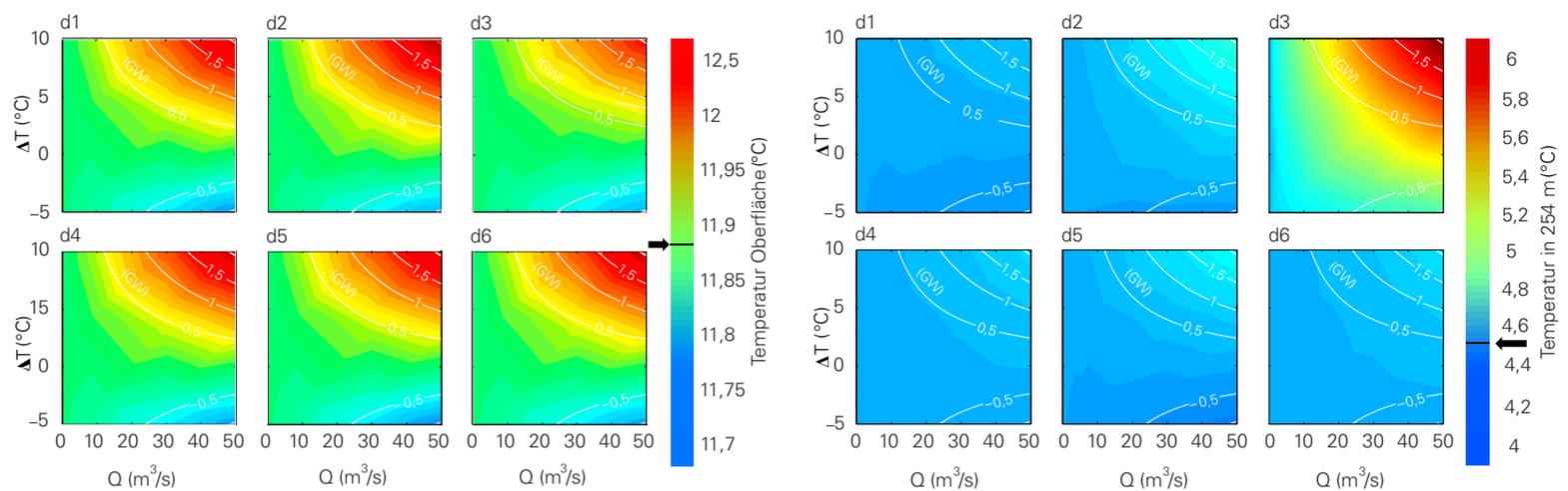


Abb. 4: Mittlere Wassertemperatur an der Seeoberfläche (links) und am tiefsten Punkt in 254 Metern Tiefe (rechts) für die Entnahme- und Rückgabeeinrichtungen d1 bis d6, verschiedene Entnahmemengen (Q von 0 bis 50 m^3/s) und Temperaturdifferenzen zwischen entnommenem und zurückgegebenem Wasser (ΔT von -5 °C bis $+10$ °C). Die weissen Linien entsprechen der ungefähren Entnahme beziehungsweise Rückgabe von thermischer Leistung in Gigawatt (von -1 bis $+2$ GW). Der schwarze Pfeil an den farbigen Temperaturskalen rechts bezeichnet die aktuelle mittlere Temperatur des Oberflächen- respektive Tiefenwassers. Mit Ausnahme einer Einleitung von erwärmtem Wasser in der Tiefe (d3, rechts) beeinflussen die unterschiedlichen Entnahme-Rückgabe-Designs die Temperatur des Sees nur minimal.

Grössere Kühlwasserentnahmen mit Rückgabe von erwärmtem Wasser können die sommerliche Stagnationszeit leicht verlängern, im Mittel allerdings nur um einen Tag pro zugeführtes Gigawatt. Da die meisten Szenarien von mehr Wärmeentnahmen im Winter ausgehen, wird die (erwünschte) Durchmischung des Sees im Herbst und Frühling tendenziell gefördert. «Zumindest teilweise kann eine clevere Projektierung einer grossen Kombianlage helfen, dass die beiden Effekte – zusätzliche Abkühlung im Winter und zusätzliche Erwärmung im Sommer – sich kompensieren», sagt Gabriel Fink, der Erstautor der Studie.

Selbst eine gegenüber dem Szenario «realistisch» doppelt so hohe Wärmerückgabe (2 Gigawatt) in den See wird von der Klimaerwärmung deutlich überlagert. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts entspricht die vom IPCC prognostizierte Erwärmung einer Energiezufuhr von rund 40 Gigawatt (85 Watt pro Quadratmeter). Umgekehrt könnte der Klimawandel mit grösseren Wärmeentnahmen verlangsamt oder sogar kompensiert werden: Zum Ausgleich der vom IPCC bis 2049 prognostizierten Erwärmung müssten dem See bis dahin rund 14 Gigawatt Wärme entzogen werden.

Bei kleinen Seen ist Vorsicht angebracht

Die vom Programm [Interreg IV](#) unterstützte Studie hatte zum Ziel, Möglichkeiten und Grenzen der Wärmenutzung aus dem Bodensee auszuloten. Der Projektverantwortliche Alfred Wüest ist überzeugt, dass sich die Resultate auch auf andere Seen übertragen lassen, jedenfalls auf grosse und tiefe Seen. Bei kleinen und flachen Seen sei Vorsicht geboten. Und lokal müssten allfällige negative Effekte gut im Auge behalten werden. «Aber unter den selbst gesetzten Bedingungen der Studie, dass die Temperaturdifferenzen an der Oberfläche nicht mehr als

0,2 Grad betragen dürfen, sind die Effekte auf die Durchmischung im Winter und die Stagnation des Sees im Sommer vernachlässigbar», sagt Wüest. Auswirkungen auf das Ökosystem seien minimal, insbesondere wenn man sie mit dem Gewinn vergleicht, der durch das Einsparen von fossiler Energie entstehe. Er hofft, dass einige der grossen, zur Zeit in Projektierung stehenden Seewärmeprojekte zum Fliegen kommen, zum Beispiel im Genfersee zum Heizen und Kühlen der ETH und der Universität Lausanne sowie des Uno-Komplexes (Projekt «Genève-Lac-Nations»). Überschlagsmässig hat Wüest darum schon einmal berechnet, wie gross das nutzbare Wärmepotenzial von Boden-, Genfer-, Neuenburger-, Vierwaldstätter- und Thunersee zusammengezählt wäre, würde man bis in Tiefen von 100 Metern maximal 1 Grad Temperaturdifferenz akzeptieren: Über 60 Gigawatt, lautet das Resultat.

Bodenseeanrainer lassen thermische Nutzung zu

Seit 1987 war die Nutzung von Bodenseewasser zum Heizen oder Kühlen sehr stark eingeschränkt. Im Mai 2014 hat nun die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) die Richtlinien gelockert. Eine thermische Nutzung von Seewasser soll so weit zulässig sein, als der Zustand des Sees und seiner Lebensgemeinschaften nicht beeinträchtigt wird. Weiterhin sollen ökologische Schutzaspekte und die Trinkwasserentnahmen mit oberster Priorität berücksichtigt werden, heisst es im neu formulierten Kapitel 5. So darf entnommenes Wasser zum Beispiel nicht stofflich verän-

dert werden. Entnahmetiefen sind nur bis 40 Meter zulässig, die Tiefe der Rückgabe ist so festzulegen, dass die Einschichtung des Wassers zwischen 20 und 40 Metern erfolgt. Die Rückgabetemperatur darf maximal 20 Grad Celsius betragen. Die Temperaturänderung darf ausserhalb einer kleinen Mischungszone 1 Grad Celsius nicht übersteigen. Schliesslich hält die IGKB fest, dass grösseren Anlagen der Vorzug gegeben werden soll, um die Zahl der Eingriffe im See und am Ufer zu begrenzen. Kleinanlagen mit Leistungen unter 200 Kilowatt seien zu vermeiden.

>> Originalpublikation in «Water Resources Research»

Kontakt: alfred.wueest@eawag.ch