

THERMISCHE NUTZUNG VON OBERFLÄCHENGEWÄSSERN

MÖGLICHE PHYSIKALISCHE UND ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN DER WÄRME- UND KÄLTENUTZUNG

Schweizer Gewässer enthalten grosse Mengen erneuerbarer Wärme. Ein Teil davon könnte zum Heizen und Kühlen urbaner Infrastrukturen genutzt werden und so nicht erneuerbare Brennstoffe und Elektrizität ersetzen. Solche Nutzungen können aber durch die Rückleitung von erwärmtem oder abgekühltem Wasser die Gewässer beeinflussen. Inwieweit diese thermische Energie genutzt werden kann, ohne die Ökosysteme zu beeinträchtigen, wird nachfolgend aufgezeigt.

Adrien Gaudard, Eawag*

Martin Schmid, Eawag

Alfred Wüest, Eawag

RÉSUMÉ

UTILISATION THERMIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES – APERÇU DES ÉVENTUELS IMPACTS PHYSIQUES ET ÉCOLOGIQUES

Les eaux superficielles suisses renferment d'immenses réserves d'énergie thermique renouvelable, dont une fraction pourrait servir à chauffer et refroidir les infrastructures proches, remplaçant combustibles et électricité. Une telle utilisation repose sur des techniques éprouvées et de nombreux systèmes sont en fonctionnement ou planifiés en Suisse et à travers le monde. Le principe consiste à utiliser l'eau d'un lac, d'une rivière ou d'une nappe phréatique pour en extraire ou y rejeter de la chaleur, selon les besoins. Les lacs profonds et les grandes rivières sont particulièrement adaptés à cet objectif.

La technique implique une modification de la température de l'eau utilisée: généralement un refroidissement en hiver et un réchauffement en été. Les rejets de l'eau utilisée peuvent potentiellement avoir des conséquences physicochimiques, mais aussi écologiques pour les organismes et écosystèmes aquatiques.

Différentes études indiquent que le risque principal se situe dans la sensibilité de plusieurs espèces aux températures trop chaudes – typiquement au-dessus de 25 °C. C'est cependant essentiellement le changement climatique qui met les écosystèmes sous cette pression. Un réchauffement additionnel pourrait ainsi péjorer la situation des espèces vulnérables (p. ex. les truites) au pro-

EINLEITUNG

Aufgrund seiner hohen Wärmekapazität vermag Wasser Wärme sehr effizient zu speichern. Die Oberflächengewässer nehmen natürlicherweise im Frühling und Sommer Wärme von der Sonne und der Atmosphäre auf und geben sie im Winter wieder ab. Dieser Austausch erfolgt langsam. Die Wassertemperatur insbesondere der Seen und grossen Flüsse ändert sich deshalb saisonal und im Tagesverlauf weniger stark als die Lufttemperatur. Die Gewässer eignen sich daher gut zum Heizen oder Kühlen (nachfolgend als thermische Nutzung bezeichnet).

Diese Idee ist nicht neu: Bereits im römischen Reich wurde kaltes Wasser in Gebäuden zirkuliert, um diese abzukühlen. Seen, Flüsse und Grundwasser¹ sind saubere und zuverlässige erneuerbare Wärmespeicher. In der Schweiz wartet dieses grosse Potenzial quasi vor der Haustür, liegen doch die grossen Agglomerationen an Flüssen oder Seen (z. B. Zürich, Genf, Basel, Bern, Lausanne, Zug, Luzern, Biel, Neuenburg, Thun oder Lugano). Dennoch werden als Energiequellen immer noch überwiegend fossile Brennstoffe zum Heizen und Elektrizität zum Kühlen verwendet [1]. Die thermische Nutzung der Oberflächengewässer würde daher bedeutende Einsparungen an fossilen

¹ Die thermische Nutzung des Grundwassers wird in diesem Artikel nicht behandelt.

* Kontakt: adrien.gaudard@eawag.ch

Brennstoffen und Elektrizität erlauben und entspricht damit der Energiestrategie der Schweiz. Sie würde zudem die lokale Energieversorgung fördern und hätte positive wirtschaftliche Auswirkungen.

TECHNIK

Im Winter ist die Temperatur der Oberflächengewässer tief und relativ homogen (häufig zwischen 4 und 10 °C). Trotzdem können konventionelle Wärmepumpen daraus Wärme gewinnen und eine Wärmeträgerflüssigkeit auf mehr als 60 °C erwärmen [2]. Damit können Gebäude und andere Infrastrukturen geheizt werden.

Im Sommer können die Oberflächengewässer zur Kühlung genutzt werden. Solange das dem Gewässer entnommene Wasser kalt genug ist, kann es direkt zur Klimatisierung oder zur Kühlung in der Industrie verwendet werden. Die tiefen Schichten der Seen und gewisse grössere Fließgewässer haben eine tiefe und relativ konstante Temperatur und eignen sich daher besonders für diese Nutzung.

Das erforderliche Know-how existiert seit der Erfindung der Wärmepumpen und der Kühlmaschinen. Bereits 1938 wurde das Rathaus in Zürich mit Wärme aus der Limmat geheizt. Seither wurden jedoch nur wenige weitere Projekte verwirklicht. Dafür mitverantwortlich waren sicher die tiefen Preise für Erdölprodukte und Kohle. Die bisher genutzte Wärmemenge ist insgesamt gering und beschränkt sich auf einige kleine bis mittelgrosse Installationen, wie z.B. den Campus der EPFL und Universität Lausanne, das Quartier der Vereinten Nationen in Genf, einige Quartiere in Zürich oder das neue Fernwärmenetz in La Tour-de-Peilz VD. Grössere Systeme werden allerdings zurzeit in verschiedenen Städten wie Genf, Luzern, Zug oder Zürich geprüft.

Moderne Systeme werden in der Regel in einem geschlossenen Kreislauf betrieben, sodass das gepumpte Wasser nicht in direkten Kontakt mit den Wärmepumpen tritt und somit chemisch nicht beeinträchtigt wird.

AUSWIRKUNGEN AUF DIE OBERFLÄCHENGEWÄSSER

Die thermische Nutzung verändert die Temperatur des genutzten Gewässers. Dieses wird bei Heiznutzung abgekühlt (typischerweise im Winter) und bei Kühl-

nutzung erwärmt (typischerweise im Sommer).

Wenn die dem Wasser abgegebene Kälte bzw. Wärme nicht anderweitig genutzt werden kann, wird das thermisch veränderte Wasser in die Umwelt zurückgegeben, in der Regel in das Entnahmegewässer. Es handelt sich dabei um eine thermische Einleitung (Fig. 1 und 2). Diese kann Auswirkungen auf das be-

troffene Ökosystem haben [3]. Neben der Temperaturveränderung oder thermischen Verschmutzung besteht das Risiko einer Verlagerung von Nährstoffen, wenn die Einleitung nicht in der Nähe der Entnahmestelle erfolgt. Die Auswirkungen sind vor allem lokal, können aber je nach Temperatur und Menge des eingeleiteten Wassers ein Gewässer auch grossräumig beeinflussen.

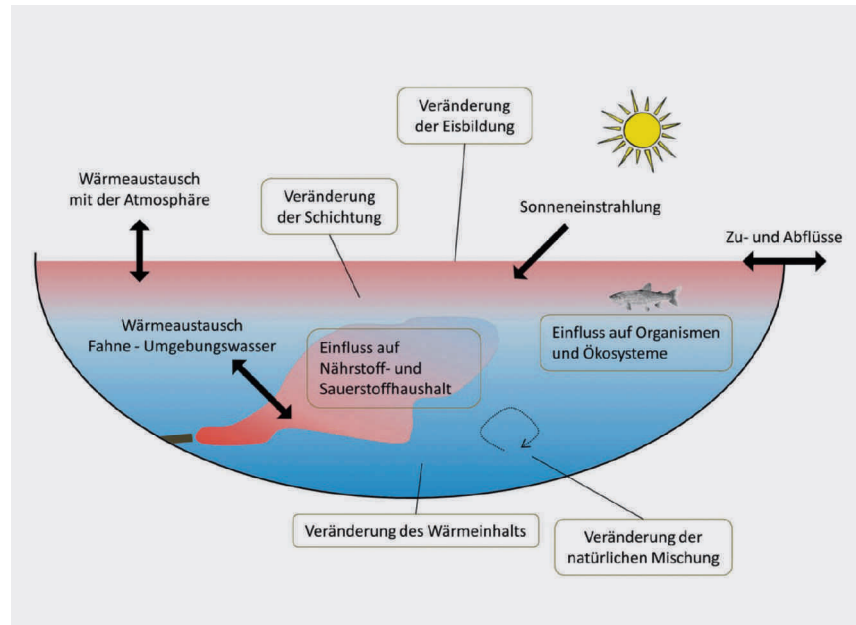


Fig. 1 Thermische Einleitung in einen See: Übersicht über die wichtigsten Wärmeflüsse (Pfeile), die betroffenen Prozesse und möglichen Auswirkungen (eingrahmt).

Rejet thermique dans un lac: aperçu des flux de chaleur importants (flèches) ainsi que des processus touchés et conséquences possibles (encadrés).

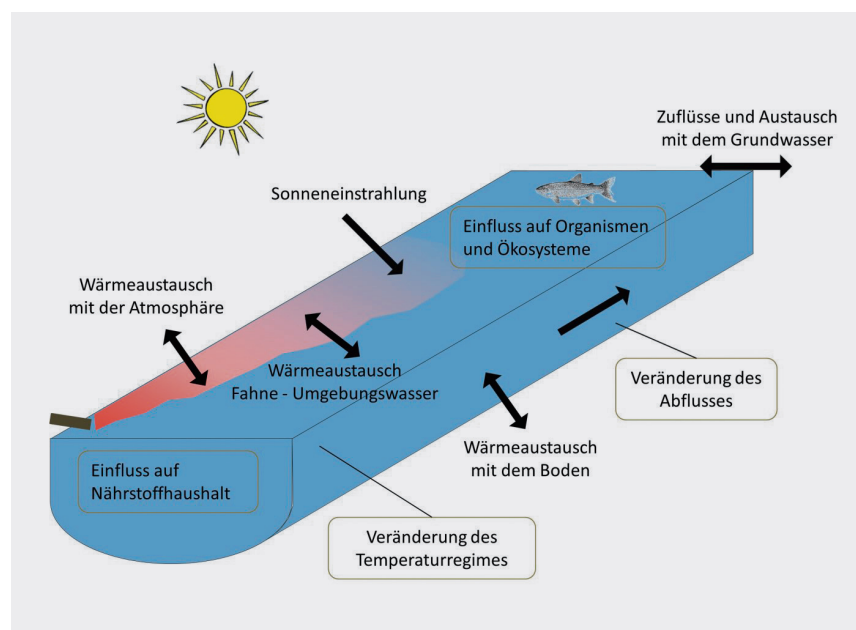


Fig. 2 Thermische Einleitung in ein Fließgewässer: Übersicht über die wichtigsten Wärmeflüsse (Pfeile), die betroffenen Prozesse und möglichen Auswirkungen (eingrahmt).

Rejet thermique dans une rivière: aperçu des flux de chaleur importants (flèches) ainsi que des processus touchés et conséquences possibles (encadrés).

RECHTLICHE GRUNDLAGEN

Eine thermische Veränderung der Gewässer stellt gemäss dem Gewässerschutzgesetz von 1991 eine Verunreinigung dar. Die Gewässerschutzverordnung von 1998 untersagt es daher, die Fliessgewässertemperatur in der Forellenregion um mehr als 1,5 °C zu verändern bzw. um mehr als 3 °C in den übrigen Regionen. Zudem darf die Temperatur 25 °C nicht überschreiten. Im Grundwasser darf die Temperatur nicht um mehr als 3 °C verändert werden, vorbehalten sind örtlich eng begrenzte Veränderungen.

Für Seen besteht hingegen kein konkreter Wert. Die Verordnung verlangt einzig, dass die natürlichen thermischen Verhältnisse, die Verteilung der Nährstoffe und die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen für die aquatischen Organismen nicht nachteilig verändert werden.

PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE AUSWIRKUNGEN

Die Erwärmung oder Abkühlung der Oberflächengewässer verändert die Eigenschaften des Wassers und beeinflusst so verschiedene natürliche Prozesse. Wärmeres Wasser ist spezifisch leichter (die maximale Dichte liegt bei 4 °C), es kann weniger Sauerstoff lösen, und chemische Reaktionen werden beschleunigt (pro 10 °C verdoppelt sich im Allgemeinen deren Geschwindigkeit).

Einleitung in Seen

In Seen bildet die thermische Einleitung eine Wärme- oder Kältefahne, deren Ausbreitung im See durch ihre Dichte, diejenige des umgebenden Wassers und die seeinternen Strömungen bestimmt wird. Wenn der thermische Eintrag nicht in die oberflächennahen Schichten erfolgt, sondern sich in einer bestimmten Tiefe einschichtet, kann ein Rückgabevolumen definiert werden. Dessen mittlere Temperatur wird zunehmend verändert, solange nicht genügend Temperaturexaustausch mit den umgebenden Schichten stattfindet [4]. Ein Eintrag in die Oberflächenschicht kann hingegen durch Wärmeaustausch mit der Atmosphäre schneller ausgeglichen werden.

Die Zufuhr oder die Entnahme von Wärme beeinflusst die natürlichen Mischungsprozesse und die Schichtung im See [5]. Die Auswirkungen hängen von der eingeleiteten bzw. entzogenen Wärmemenge, deren Saisonalität und der Tiefe der Einleitstelle ab [6]. So besteht bei der Einleitung von warmem Wasser an der Oberfläche das Risiko, dass die Dauer der stabilen Schichtung verlängert wird (v. a. vom Frühjahr bis Herbst). Demgegenüber kann der Eintrag von Kälte im Winter die Durchmischung des Wassers fördern, was für die Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers vorteilhaft ist.

Auch die blosser Verlagerung eines Wasservolumens kann Auswirkungen haben. Wird beispielsweise Wasser unterhalb der Sprungschicht (Tiefenzone starker Schichtung) entnommen und oberhalb zurückgeleitet, kann dadurch die Sprungschicht abgesenkt und das Volumen der Oberflächenschicht vergrössert werden. Weil das Tiefenwasser oft nährstoffreicher ist als das Oberflächenwasser, kann dadurch die Produktivität der Algen erhöht werden. Allenfalls sind auch Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Algengemeinschaft möglich. In einem eutrophen, d. h. sehr produktiven See könnte die Entnahme von sauerstoffreichem Wasser an der Oberfläche, kombiniert mit der Rückgabe in die oft sauerstoffarmen und mit reduzierten Ver-

bindungen angereicherten tiefen Schichten, zu einer erhöhten Sauerstoffzufuhr ins Tiefenwasser und somit zu einer Verbesserung der Wasserqualität führen.

Einleitung in Fliessgewässern

In Fliessgewässern wird ein thermischer Eintrag mit der Strömung transportiert und kann sich über mehrere Kilometer erstrecken, bevor er vollständig eingemischt ist, wenn das Einleitsystem nicht eine rasche Durchmischung fördert oder das Fliessgewässer nicht sehr turbulent ist. Unterhalb der Einleitstelle kann daher die Wassertemperatur des Gewässers seitlich heterogen verteilt sein [7]. Stromabwärts nähert sich die Temperatur des Fliessgewässers durch Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und durch seitliche Zuflüsse zunehmend wieder dem natürlichen Zustand an [8]. Ein gewisser Teil der thermischen Verunreinigung kann aber das Meer oder einen weiter flussabwärts liegenden See erreichen. Auch die Art, wie ein Fliessgewässer sich in ein stehendes Gewässer einschichtet, kann durch eine starke Temperaturveränderung beeinflusst werden: So taucht zum Beispiel ein wärmerer Fluss weniger tief ein. Dies kann sich auch auf die Verteilung von Nährstoffen, Sauerstoff oder Partikeln im See auswirken [9].

BIOLOGISCHE UND ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN

Thermische Einträge können lokal gegenüber dem natürlichen Zustand starke Temperaturveränderungen auslösen, auf welche die Organismen und Ökosysteme nicht vorbereitet sind [3].

SIMULATION: BODENSEE

In einer aktuellen Studie wurden die physikalischen Auswirkungen einer realistischen thermischen Nutzung des Bodensees (Oberfläche: 472 km², maximale Tiefe: 251 m, Volumen: 48 km³) modelliert [6]. Die Auswertung verschiedener Szenarien für Wärmeentnahme und/oder Wärmeeintrag (bis zu 1 GW) ergaben folgende Resultate:

- mögliche Verlängerung der sommerlichen Schichtung um maximal wenige Tage, insbesondere bei einer oberflächennahen Wärmeeinleitung
- Verstärkung der winterlichen Durchmischung bei Wärmeeinleitung, d. h. bei der Rückgabe von abgekühltem Wasser
- Veränderung der Oberflächentemperatur in jedem Fall unterhalb von 0,2 °C
- geringere Auswirkungen, wenn die natürliche Schichtung genutzt wird, um den Temperaturunterschied zwischen dem eingeleiteten Wasser und dem Umgebungswasser zu minimieren (Einleitung des erwärmten Wassers in der Nähe der Oberfläche, Einleitung des abgekühlten Wassers in der Tiefe)
- geringere Auswirkungen bei Doppelnutzung (Heizen und Kühlen), auch wenn die saisonale Verteilung der beiden Nutzungen unterschiedlich ist

Aufgrund der Simulationsergebnisse sind bei Nutzungen in der genannten Grössenordnung von 1 GW keine wesentlichen Folgen für das Gesamtökosystem des Bodensees zu erwarten. Mögliche lokale Auswirkungen im Bereich der Rückleitungen müssen für spezifische Projekte einzeln beurteilt werden.

Zusätzlich können weniger ausgeprägte, aber umfassendere Effekte auftreten: In einem See kann das ganze Wasservolumen oder ein Teil davon zunehmend erwärmt oder abgekühlt werden, während in einem Fließgewässer die Wassertemperatur des gesamten Laufs unterhalb der Einleitstelle verändert wird.

Die Beziehungen zwischen Temperatur und aquatischem Leben sind vielfältig und komplex. Praktisch alle wechselwarmen Organismen reagieren auf Temperaturveränderungen, da die Temperatur ihre Fähigkeit zur Nahrungsaufnahme, Fortpflanzung und Entwicklung beeinflusst [10]. Ein Temperaturanstieg beschleunigt ihren Stoffwechsel und erhöht ihre biologische Aktivität. Im Gegensatz dazu verringert eine Abkühlung die Aktivität und führt zu einer Verlangsamung des Stoffwechsels [11].

Jeder aquatische Organismus hat einen optimalen Temperaturbereich. Ausserhalb dieses Bereichs kann der Organismus in Stress oder gar in Lebensgefahr geraten. Die individuellen thermischen Grenzen eines Individuums hängen allerdings von mehreren Faktoren ab [12, 13, 14]: Entwicklungsstadium, Akklimatisierung, Jahreszeit, Verfügbarkeit von Sauerstoff, Auftreten von Schadstoffen und Parasiten, Interaktionen mit anderen Organismen usw. Die Lebensgemeinschaften sind an lokale Verhältnisse angepasst, deshalb können keine allgemeingültigen thermischen Präferenzen definiert werden.

Generell sind komplexe Organismen sensibler gegenüber Temperaturveränderungen als einfache [15]. So sind Mikroorganismen häufig sehr widerstandsfähig, während Fische rasch unter ungünstigen Temperaturen leiden. Besonders kritisch ist eine zusätzliche Erwärmung der Gewässer im Sommer, weil viele Arten aufgrund des Klimawandels bereits nahe an ihrer thermischen Obergrenze leben.

Mobile Organismen, wie die Fische, suchen gezielt nach günstigen Umgebungstemperaturen [13]. Gewisse Arten können deshalb, je nach ihren thermischen Präferenzen, von einem thermischen Eintrag angezogen oder abgestossen werden [16]. Wenn alle Habitate eines Sees oder Fließgewässers für eine Art zu warm oder zu kalt sind, wird dies für die Individuen dieser Art problematisch, weil sie über keine Rückzugsorte mehr verfügen, die ihnen ein Überleben sicherstellen können [8]. In diesem Fall können gewisse Arten ihr Habitat oder ihre Migrationsmöglichkeiten in einem Fließgewässer verlieren oder aus gewissen Regionen ganz verschwinden. Die natürliche thermische Variabilität zahlreicher Fließgewässer wurde durch Begradigungen und Errichtung von Stauanlagen bereits stark verändert.

Die meisten biologischen Zyklen wie die Fortpflanzung, das Schlüpfen oder die Migration werden durch die Temperatur beeinflusst [10, 17]. Eine Temperaturveränderung kann diese Prozesse verlangsamen oder beschleunigen und sie gegenüber anderen saisonalen Zyklen wie Nahrungsangebot oder Verfügbarkeit von Fortpflanzungspartnern verschieben [18].

Feldstudien über Erwärmungen geringen bis mittleren Ausmasses von maximal 2 bis 3 °C zeigten folgende ökologische Auswirkungen:

- Erhöhung des Artenreichtums und der Produktivität [3, 19]
- Beschleunigung und Verstärkung der Algenblüten und damit verbunden ein erhöhtes Nahrungsangebot für Herbivore [19, 20, 21]
- Beschleunigung der Entwicklung der Organismen (früheres Schlüpfen, Jungtiere werden schneller adult usw.) [22, 23]

FALLSTUDIE: STECHLINSEE

Der Stechlinsee in Deutschland (Oberfläche: 4,25 km², maximale Tiefe: 68 m, Volumen: 0,1 km³) ist ein See, der von 1966 bis 1989 für die Kühlung eines Kernkraftwerks genutzt wurde. Aus dem benachbarten Nehmitzsee wurden rund 300 000 m³/Tag Kühlwasser entnommen und um ~10 °C erwärmt in den Stechlinsee oberflächlich eingeleitet [34]. Dank zahlreicher Studien über die Auswirkungen dieser Nutzung ist der Stechlinsee der am besten untersuchte Fall einer thermischen Verunreinigung eines Sees.



*Der am besten untersuchte See bezüglich thermischer Verunreinigung:
Stechlinsee in Norddeutschland*

Lac de Stechlin en Allemagne du Nord – le lac le mieux étudié en ce qui concerne la pollution thermique

Der See wurde im Mittel um 1 °C erwärmt [34]. Wind und Strömungen bestimmten weitgehend die Verteilung der Wärmefahne im See. Die Schichten an der Oberfläche waren besonders im Sommer betroffen, wenn sie natürlicherweise von den tiefen kühlen Schichten isoliert sind. Während Durchmischungsphasen gelangte die Wärme in die tieferen Schichten. Die sommerliche Schichtung wurde verstärkt, jene im Winter hingegen abgeschwächt oder in manchen Wintern sogar vollständig verhindert. Zudem wurde die Eisbildung auf dem See vermindert [4].

Das aus dem Nehmitzsee gepumpte Wasser war nährstoffreicher als dasjenige des Stechlinsees, weshalb eine Zunahme der Planktonbildung und eine Verschlechterung der Sauerstoffbedingungen beobachtet wurden [35]. Die Zusammensetzung des Phytoplanktons, zu Beginn gestört, näherte sich wieder dem Ausgangszustand an, während die Kühlwassernutzung noch in Betrieb war [34]. Die jahreszeitlichen Zyklen des Periphytons wurden z. T. um mehrere Monate gegen vorne verschoben [36]. Vitalität und Produktivität des Benthos nahmen in der kalten Jahreszeit zu [34]. Die hauptsächlich negativen Auswirkungen wurden im Sommer beobachtet, wenn die Einleittemperatur 25 °C überstieg [34]: Verminderung der Produktion, Absterben von Organismen und Freisetzung von Nährstoffen (insbesondere von Phosphat). Der See blieb hingegen oligotroph [35] und es ergaben sich keine negativen Veränderungen der Lebensgemeinschaften, die zweifelsfrei der Erwärmung zugeordnet werden können.

Heute hat sich der Stechlinsee vollständig von dieser thermischen Verunreinigung erholt, und seine Wasserqualität ist ausgezeichnet.

- Verlängerung der Wachstums- und Reproduktionsphasen [22]
- geringere Sterblichkeit im Winter [22]
- Übergang zu einem breiteren Nahrungsangebot für Fische [24]
- Verminderung der gesamten Biomasse, der Artendichte und der mittleren Körpergrösse, insbesondere von wechselwarmen Arten [21, 25, 26]
- Rückgang der an kalte Gewässer angepassten Arten [21, 27, 28, 29, 30]
- stärkere Dominanz von Arten, die eine grosse Spannbreite von Temperaturen ertragen, und typischerweise auch niedrigere Sauerstoffgehalte tolerieren [30, 31]

Die Auswirkungen einer Erwärmung ähneln teilweise jenen, die auch bei der Eutrophierung von Gewässern beobachtet wurden [24, 32]. Eine Erhöhung der Temperatur fördert zudem das Auftreten und die Verbreitung von Krankheiten und erhöht die toxische Wirkung der meisten Schadstoffe [3, 33].

Grundsätzlich kann eine moderate Abkühlung der Oberflächengewässer – vor allem im Sommerhalbjahr – als positiv beurteilt werden, da sie die Auswirkungen des Klimawandels zumindest teilweise kompensieren und kälteliebende Arten unterstützen [6]. Eine ähnliche Kompensation kann sich auch in Fließgewässern unterhalb der Rückleitungen von Stauseen im Alpenraum ergeben, die oft eine Abkühlung im Sommer und eine Erwärmung im Winter bewirken (d. h. gegenläufige Auswirkungen zu einer thermischen Nutzung).

PRAKTISCHE ÜBERLEGUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Es ist wichtig, dass anthropogene Temperaturveränderungen beobachtet und gemessen werden, um sie im Vergleich mit der natürlichen Variabilität beurteilen zu können. Für ein sehr dynamisches Fließgewässer können gegenüber einem See, dessen thermisches Regime natürlicherweise weniger variabel ist, grössere Veränderungen toleriert werden [12]. Besondere Vorsicht ist angebracht bei einer Zunahme der Maximaltemperaturen, einer Abnahme der Minimaltemperaturen sowie bei künstlich erzeugten raschen Temperaturschwankungen.

In der Schweiz sind zu hohe sommerliche Wassertemperaturen der kritischste Fall, da verschiedene Arten nicht dar-

an angepasst sind und direkt darunter leiden könnten. Salmoniden (Forellen, Felchen, Äschen usw.) bevorzugen Temperaturen unterhalb von 20 °C, dies ob schon die Mehrheit von ihnen auch Temperaturen von mehr als 25 °C überleben kann [12]. Andere Arten, z. B. Karpfen, invasive Grundeln und Welse, tolerieren höhere Temperaturen besser und würden dadurch bevorteilt. Dies betrifft die Mehrzahl der Fließgewässer in niedrigen Lagen wie auch die weniger tiefen Seen.

Aus diesem Grund ist die sommerliche Kühlnutzung von Gewässern (für industrielle Zwecke oder Klimatisierung), die hohe Temperaturen erreichen können (typischerweise 25 °C), heikel. Eine moderate Nutzung, d. h. eine Nutzung, bei welcher die Wassertemperatur nicht um mehr als insgesamt wenige Zehntelgrad erhöht wird, sollte allerdings möglich sein. Grössere Kühlnutzungen sollten hingegen nicht mittels Durchlaufkühlung, sondern etwa über Kühltürme betrieben werden oder andere Kühlwasserquellen nutzen, wie zum Beispiel das Wasser tiefer Seen.

Das Problem von zu tiefen Temperaturen im Winter ist weniger verbreitet und betrifft vor allem kleine Fließgewässer und die Oberflächenschicht kleiner Seen, besonders in höheren Lagen. Eine zu starke Abkühlung kann z. B. die Entwicklung des Fischlaichs verhindern und die neue Generation verzögern.

Die Wärmenutzung im Winter ist daher vor allem durch die Effizienz des thermodynamischen Zyklus limitiert. Auch wenn die Wärmenutzung einer Wärmequelle mit tiefer Temperatur möglich ist, benötigen solche Systeme generell eine Wassertemperatur von mindestens 5 °C, damit die Wärmepumpen mit einer zufriedenstellenden Effizienz, d. h. einem akzeptablen Elektrizitätsverbrauch, betrieben werden können [2]. Die grossen Fließgewässer und die meisten Seen sind in der Regel für eine solche Nutzung geeignet.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

In Anbetracht der Ziele der schweizerischen Energiepolitik – eine nachhaltige Energieversorgung sowie eine Verminderung des Energiekonsums und der CO₂-Emissionen – ist die Wärme- und Kältenutzung der Oberflächengewässer sehr attraktiv. Die in der Schweiz verfü-

baren erneuerbaren Ressourcen erlauben eine beträchtliche Nutzung mit geringen Auswirkungen auf die Dynamik der natürlichen Ökosysteme. Mit einer überlegten Planung und Ausgestaltung der verwendeten Systeme sowie einer Koordination unter den verschiedenen Akteuren können die möglichen Risiken genügend begrenzt oder ganz vermieden werden. Basierend auf Messungen der aktuellen Temperaturen und Berechnungen von Wärmebilanzen, allenfalls ergänzt durch einfache Modellrechnungen, kann das thermische Potenzial eines Sees oder Fließgewässers unter Berücksichtigung der betroffenen Ökosysteme und der Nutzungsbedingungen (bei einem See v. a. die Tiefe der Einleitungen, bei einem Fließgewässer v. a. ihre Lage entlang des Flusses) abgeschätzt werden. Auch das Monitoring von Gewässern nach dem Zubau von Wärmenutzungen ist äusserst wichtig, ermöglicht es doch die direkte Beobachtung der möglichen Auswirkungen und daher einen wertvollen Erfahrungsgewinn.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Infras AG et al. (2015): Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2014 nach Verwendungszwecken. Bundesamt für Energie (BFE)*
- [2] *Zogg, M. (2009): Wärmepumpen. «Geothermie – die Energie des 21. Jahrhunderts» Zertifikatslehrgang ETH*
- [3] *Langford, T. E. L. (1990): Ecological effects of thermal discharges. London: Springer Netherlands*
- [4] *Kirillin, G. et al. (2013): Consequences of thermal pollution from a nuclear plant on lake temperature and mixing regime. Journal of Hydrology. 496: p. 47–56*
- [5] *Eawag (1981): Wärmepumpen an Oberflächengewässern. Eawag, Dübendorf*
- [6] *Fink, G. et al. (2014): Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: Capacities and limits. Water Resources Research. 50(9): p. 7285–7301*
- [7] *Lugg, A., Copeland, C. (2014): Review of cold water pollution in the Murray-Darling Basin and the impacts on fish communities. Ecological Management & Restoration. 15(1): p. 71–79*
- [8] *Caissie, D. (2006): The thermal regime of rivers: A review. Freshwater Biology. 51(8): p. 1389–1406*
- [9] *Kennedy, R. H.; Walker, W. W. (1990): Reservoir nutrient dynamics. Reservoir limnology: Ecological perspectives. John Wiley and Sons, New York. p. 109–132*
- [10] *Mulhollem, J. J. et al. (2016): Effects of heated effluent on Midwestern US lakes: Implications for future climate change. Aquatic Sciences. 78(4): p. 743–753*
- [11] *Astles, K. L. et al. (2003): Regulated rivers and fis-*

- heries restoration project: Experimental study of the effects of cold Water pollution on native fish. NSW Fisheries Office of Conservation, 44
- [12] Hunziker, S.; Wüest, A. (2011): Anthropogene Temperaturveränderungen in Flüssen und Seen – eine Literaturanalyse. Eawag
- [13] Coutant, C. C. (1999): Perspectives on temperature in the Pacific Northwest's fresh waters. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, United States, 4849
- [14] Khalanski, M.; Gras, R. (1996): Rejets thermiques en rivières et hydrobiologie: Un aperçu sur l'expérience française. La Houille Blanche. (5): p. 13–18
- [15] Hester, E. T.; Doyle, M. W. (2011): Human impacts to river temperature and their effects on biological processes: A quantitative synthesis. *Journal of the American Water Resources Association*. 47(3): p. 571–587
- [16] Coulter, D. P. et al. (2014): Thermal habitat quality of aquatic organisms near power plant discharges: potential exacerbating effects of climate warming. *Fish Manag Ecol*. 21(3): p. 196–210
- [17] Wedekind, C.; Küng, C. (2010): Shift of spawning season and effects of climate warming on developmental stages of a grayling (*Salmonidae*). *Conservation Biology*. 24(5): p. 1418–1423
- [18] Olden, J. D.; Naiman, R. J. (2010): Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: Modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*. 55(1): p. 86–107
- [19] Ingleton, T.; McMinn, A. (2012): Thermal plume effects: A multi-disciplinary approach for assessing effects of thermal pollution on estuaries using benthic diatoms and satellite imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 99: p. 132–144
- [20] Pyka, J. P. et al. (2013): Long-term trends in changes of the chemical composition of waters in lakes heated by electric power plants. *Archives of Polish Fisheries*. 21(4): p. 343–355
- [21] Moore, M. V. et al. (1996): Consequences of elevated temperatures for zooplankton assemblages in temperate lakes. *Archiv für Hydrobiologie*. 135(3): p. 289–319
- [22] Jeppesen, E. et al. (2010): Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia*. 646(1): p. 73–90
- [23] Küttel, S. et al. (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten schweizerischer Fließgewässer. Eawag
- [24] Jeppesen, E. et al. (2012): Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes. *Hydrobiologia*. 694(1): p. 1–39
- [25] Winder, M. et al. (2009): Lake warming favours small-sized planktonic diatom species. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*. 276(1656): p. 427–435
- [26] Emmrich, M. et al. (2014): Geographical patterns in the body-size structure of European lake fish assemblages along abiotic and biotic gradients. *Journal of Biogeography*. 41(12): p. 2221–2233
- [27] Lessard, J. L.; Hayes, D. B. (2003): Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams. *River Research and Applications*. 19(7): p. 721–732
- [28] Isaak, D. J. et al. (2012): Climate change effects on stream and river temperatures across the northwest U.S. from 1980–2009 and implications for salmonid fishes. *Climatic Change*. 113(2): p. 499–524
- [29] Haynes, J. M. et al. (1989): Response of sport fishes to thermal discharges into the Great Lakes: Is Somerset Station, Lake Ontario, different? *Journal of Great Lakes Research*. 15(4): p. 709–718
- [30] Khalanski, M. et al. (2008): Étude thermique globale du Rhône – Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés. *Hydroécologie Appliquée*. 16: p. 53–108
- [31] Poff, N. L. et al. (2002): Aquatic ecosystems and global climate change. *Pew Center on Global Climate Change*, Arlington, VA. 44
- [32] Feuchtmayr, H. et al. (2009): Global warming and eutrophication: Effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms. *Journal of Applied Ecology*. 46(3): p. 713–723
- [33] Heugens, E. H. W. et al. (2001): A review of the effects of multiple stressors on aquatic organisms and analysis of uncertainty factors for use in risk assessment. *Critical Reviews in Toxicology*. 31(3): p. 247–284
- [34] Richter, D. et al. (1979): Temperatur und Wärmehaushalt des thermisch belasteten Stechlin- und Nehmitzsees. *Akad.-Verlag*
- [35] Koschel, R. H. et al. (2002): Primary production of phytoplankton and nutrient metabolism during and after thermal pollution in a deep, oligotrophic lowland lake (Lake Stechlin, Germany). *Proceedings-International Association of Theoretical and Applied Limnology*. 28(2): p. 569–575
- [36] Casper, S. J. et al. (1985): The plant communities. in *Lake Stechlin*, Springer, p. 129–195

> SUITE DU RÉSUMÉ

fit d'autres (p. ex. les carpes). Par ailleurs, une altération de la température peut perturber le développement, le comportement et la reproduction des organismes, avec au final d'éventuels effets sur la composition et le fonctionnement de l'écosystème. Les refroidissements modérés générés lors de l'utilisation pour le chauffage sont souvent peu critiques.

Une conception réfléchie des systèmes d'extraction de chaleur et de froid permettrait de minimiser les impacts possibles et d'exploiter ces ressources thermiques de manière durable.