
Wärme- und Kältenutzung aus Sempacher- und Baldeggersee

ABSCHÄTZUNG DES POTENZIALS



Adrien Gaudard

Im Auftrag der Dienststelle Umwelt und Energie (uwe) Kanton Luzern

Kastanienbaum, im Januar 2016

1. Hintergrund

In diesem Kurzbericht wird das Wärme- und Kältenutzungspotenzial der Luzerner Mittellandseen (Sempacher- und Baldeggersee) analysiert. Es ist zu erwarten, dass die Seen in unseren Breiten in Zukunft intensiver als Wärmequelle (zum Heizen im Winter) und Wärmesenke (zum Kühlen im Sommer) genutzt werden. Einerseits eignet sich das kühle Tiefenwasser der Seen ideal zur Kühlung der urbanen Infrastruktur und zur Ableitung von Prozesswärme im Sommer. Andererseits kann dem relativ warmen Seewasser im Winter auch Wärme für den Betrieb von Wärmepumpen im Siedlungsgebiet entzogen werden [5].

Wärme- und Kälteenergie von Seen ist eine erneuerbare, saubere, lokale, und noch nicht ausgelastete Quelle thermischer Energie. Bei zu intensiver Nutzung besteht aber das Risiko, dass (a) die Wärmeflüsse, (b) die See- und Abflusstemperaturen, (c) die Dichteschichtung im See und (d) die Wasserqualität und gewisse ökologische Prozesse verändert werden könnten.

Der Sempacher- und der Baldeggersee haben ähnliche physikalische Eigenschaften (Tabelle 1). Beide Wasserkörper bestehen aus einem einzigen zusammenhängenden Becken mit einem kleinen Hauptabfluss (die Suhre, beziehungsweise der Aabach). Der Sempachersee hat im Vergleich zum Baldeggersee bei grösserer Tiefe etwa die dreifache Fläche und das vierfache Volumen. Bei beiden Seen besteht aufgrund der umliegenden grösseren Orte (Sursee und Sempach am Sempachersee, Hochdorf und Hitzkirch am Baldeggersee) potenziell ein ansehnlicher künftiger Bedarf für Wärme- und Kältenutzung.

	Volumen [km ³]	Fläche [km ²]	Max. Tiefe [m]	Aufenthalts- zeit [Jahre]	Einwohner- zahl
Sempachersee	0.660	14.5	87	16.9	25'000
Baldeggersee	0.174	5.2	66	4.2	15'000

Tabelle 1 – Eigenschaften von Sempacher- und Baldeggersee. Einwohnerzahl abgeschätzt für die Ortschaften rund um den See (Abstand von max. 3 km).

Beide Seen wurden besonders in den 1970er Jahren durch hohe Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft und der Siedlungsentwässerung stark belastet. Seither wurden sowohl im Einzugsgebiet wie auch seeintern diverse Gewässerschutzmassnahmen durchgeführt. Seit 1982 (Baldeggersee) und 1984 (Sempachersee) werden beide Seen künstlich belüftet, um eine genügende Versorgung mit Sauerstoff im Hypolimnion zu gewährleisten. Die

verschiedenen Massnahmen haben zwar zu einer deutlichen Verbesserung der Wasserqualität geführt, ohne die künstliche Belüftung würde das Tiefenwasser in beiden Seen gegen Ende der sommerlichen Schichtung aber nach wie vor sauerstofffrei werden. Wärmenutzungssysteme müssen deshalb so gestaltet werden, dass sie weder die Belüftung stören noch zusätzliche Nährstoffe aus dem Tiefenwasser ins Oberflächenwasser eintragen.

Die folgenden Seewassernutzungen bestehen im Sempachersee:

- Eine Trinkwasserfassung, betrieben von Seewasserwerk Sempach (Konzessionswassermengen: 6'600 L/Min, 1.5 Mio. m³/Jahr).
- Nutzung zum Heizen und Kühlen von Spitalgeräten und einem Rechenzentrum, sowie Gebäudeklimatisierung, betrieben vom Schweizerischen Paraplegikerzentrum (Konzessionswassermengen: 6'000 L/Min, 1.5 Mio. m³/Jahr).

Die folgende Seewassernutzung besteht im Baldeggersee:

- Industrielle Kühlwassernutzung, betrieben von Hochdorf Nutritec AG (Konzessionswassermengen: 5'400 L/Min, 1 Mio m³/Jahr). Ein Teil des Kühlwassers wird in die Zuflüsse des Baldeggersees zurückgegeben.

2. Rechtliche Grundlagen

Die Gewässerschutzverordnung (GSchV; 814.201; Stand 2016) formuliert Anforderungen an die Temperatur der Gewässer. Ein Grundsatz hält fest, dass die Schichtung und die Temperaturen in den genutzten natürlichen Gewässern im Vergleich zum natürlichen Zustand nur geringfügig geändert werden dürfen:

Anhang 1 GSchV, 1 Ökologische Ziele für Gewässer / Oberirdische Gewässer, Absatz 3

Die Wasserqualität soll so beschaffen sein, dass: a. die Temperaturverhältnisse naturnah sind.

Spezifische Anforderungen für Fließgewässer beschränken die Temperaturänderungen und die maximale Temperatur des Flusswassers als Folge eines Eingriffs:

Anhang 2⁹⁰ GSchV, 12 Zusätzliche Anforderungen an Fliessgewässer, Absatz 4

Die Temperatur eines Fliessgewässers darf durch Wärmeeintrag oder –entzug gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand um höchstens 3 °C, in Gewässerabschnitten der Forellenregion um höchstens 1,5 °C, verändert werden; dabei darf die Wassertemperatur 25 °C nicht übersteigen. Diese Anforderungen gelten nach weitgehender Durchmischung.

Entsprechende spezifische Anforderungen für stehende Gewässer beschränken ebenfalls die Temperaturänderungen, auch wenn diese Anforderungen an die Eingriffe nicht numerisch formuliert sind:

Anhang 2⁹⁰ GSchV, 13 Zusätzliche Anforderungen an stehende Gewässer, Absatz 3

Für Seen gilt ausserdem: a. Durch Seeregulierungen, Wassereinleitungen und -entnahmen, Kühlwassernutzung und Wärmeentzug dürfen im Gewässer die natürlichen Temperaturverhältnisse, die Nährstoffverteilung sowie, insbesondere im Uferbereich, die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen für die Organismen nicht nachteilig verändert werden.

Im Gegensatz zum Grundwasser und zu den Fliessgewässern gibt es somit für Seen keine numerisch definierte maximal erlaubte Temperaturveränderung. In einem Bericht der Eawag [1] wurde diese Anforderung so interpretiert, dass die Temperaturen in Seen an keinem Ort und zu keiner Zeit um mehr als 1 °C verändert werden sollten. Ausgenommen ist die unmittelbare Einleitstelle, wo lokal aus praktischen Gründen höhere Temperaturabweichungen zugelassen werden dürfen (Erklärung im Anhang). Für diesen Wert von 1 °C gibt es allerdings keine fundierte wissenschaftliche Grundlage. Um den Handlungsspielraum für künftige Eingriffe nicht zu verbauen, empfehlen wir für die Potentialschätzung nur eine Temperaturabweichung von 0.5 °C vorzusehen.

Auch für die Einleitung von thermisch genutztem (sauberem) Wasser gibt es keine spezifisch formulierten Anforderungen. Der Wille des Gesetzgebers kann indirekt aus den Anforderungen für die Einleitung von „verschmutztem“ Wasser sinngemäss abgeleitet werden:

Anhang 3.3 GSchV, Einleitung von anderem verschmutztem Abwasser in Gewässer oder in die öffentliche Kanalisation, 2 Besondere Anforderungen, 21 Durchlaufkühlung, Absatz 4

Für Einleitungen in Fliessgewässer und Flussstau gilt zudem: a. Die Temperatur des Kühlwassers darf höchstens 30 °C betragen; die Behörde kann kurzfristige, geringfügige Überschreitungen im Sommer zulassen.

Dito, Absatz 5

Für Einleitungen in Seen sind zusätzlich zu den Anforderungen nach den Absätzen 1–3 die Einleitungsbedingungen, insbesondere die Temperatur des Kühlwassers, die Einleitungstiefe und die Einleitungsart, entsprechend den örtlichen Verhältnissen im Einzelfall festzulegen.

3. Nutzungsrelevante Prozesse in den Seen

Am tiefsten Punkt der beiden Seen werden seit etwa 40 Jahren – unregelmässig auch früher – Profile der Leitfähigkeit und der Temperatur gemessen (CTD-Profile). Diese historischen Profile sind Momentaufnahmen; aufgrund ihrer geringen zeitlichen Auflösung sind sie nicht für die Analyse kurzfristiger Temperaturschwankungen geeignet. Jedoch erlauben solch lange Zeitreihen die Bestimmung von mittleren saisonalen Temperaturzyklen und starken Abkühlungsereignissen (z.B. das Vorkommen von inverser Schichtung im Winter) und die Abschätzung von zeitlichen Trends.

3.1. Wassertemperatur im Jahresverlauf

Die beobachteten Zeitreihen der Temperaturen sind in Abbildung 1 für den Sempachersee und in Abbildung 3 für den Baldeggersee dargestellt. Die entsprechenden durchschnittlichen jährlichen Temperaturverläufe sind in den Abbildungen 2 und 4 gezeigt. Während sich im Sommer eine ~10 m mächtige Oberflächenschicht ausbildet (Epilimnion), bleibt das Tiefenwasser (Hypolimnion) unterhalb von 25 m Tiefe vom saisonalen Zyklus weitgehend unbeeinflusst, und zeigt nur geringe Temperaturschwankungen zwischen 4 °C und 6.5 °C. Gegen Ende August beginnt sich die Oberfläche abzukühlen. Die Oberflächenschicht wird mächtiger und der Dichteunterschied zwischen Oberflächenschicht und Tiefenwasser wird geringer. Im Winter sind die Dichteunterschiede so gering, dass der Wind den Wasserkörper vollständig durchmischen kann. Dies wird in den Abbildungen durch die blaue/lila Färbung über die gesamte Wassersäule erkennbar. An den tiefsten Stellen wurden im untersuchten Zeitraum mittlere Temperaturanstiege von 0.013 °C (± 0.002 °C) pro Jahr im Sempachersee und 0.020 °C (± 0.002 °C) pro Jahr im Baldeggersee beobachtet.

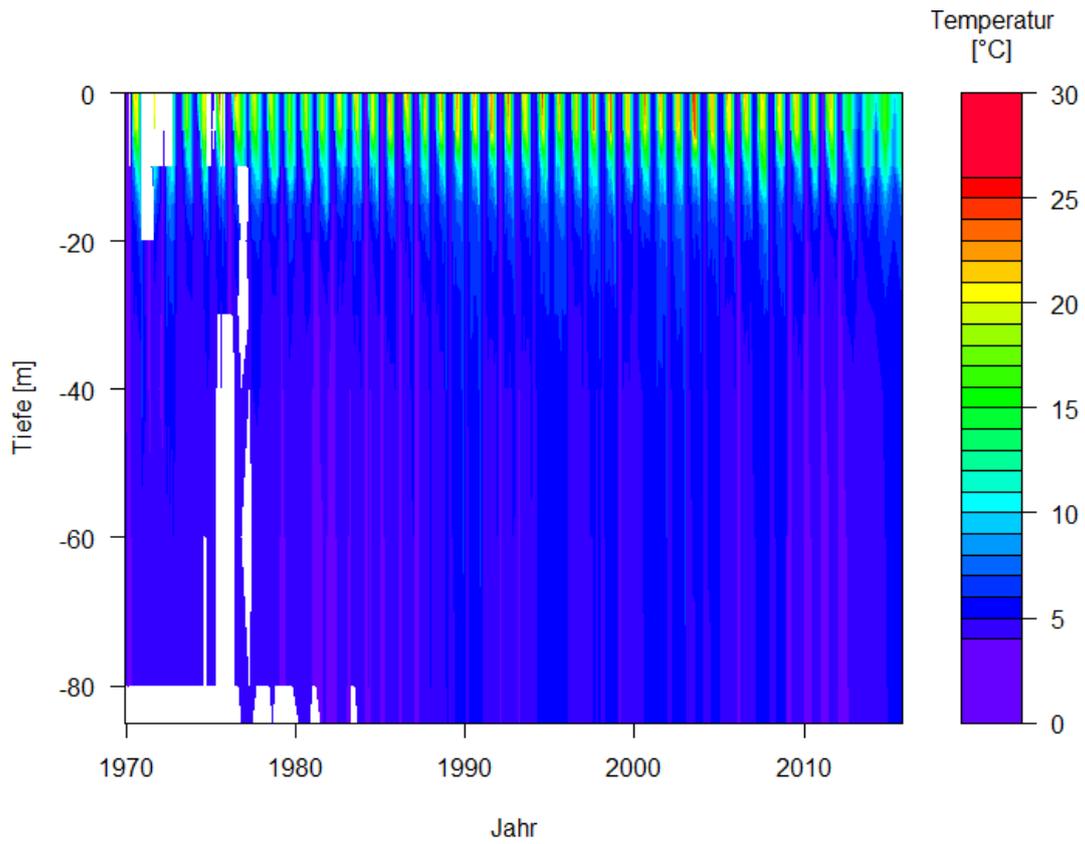


Abbildung 1 – Temperaturprofile seit 1970 im Sempachersee.

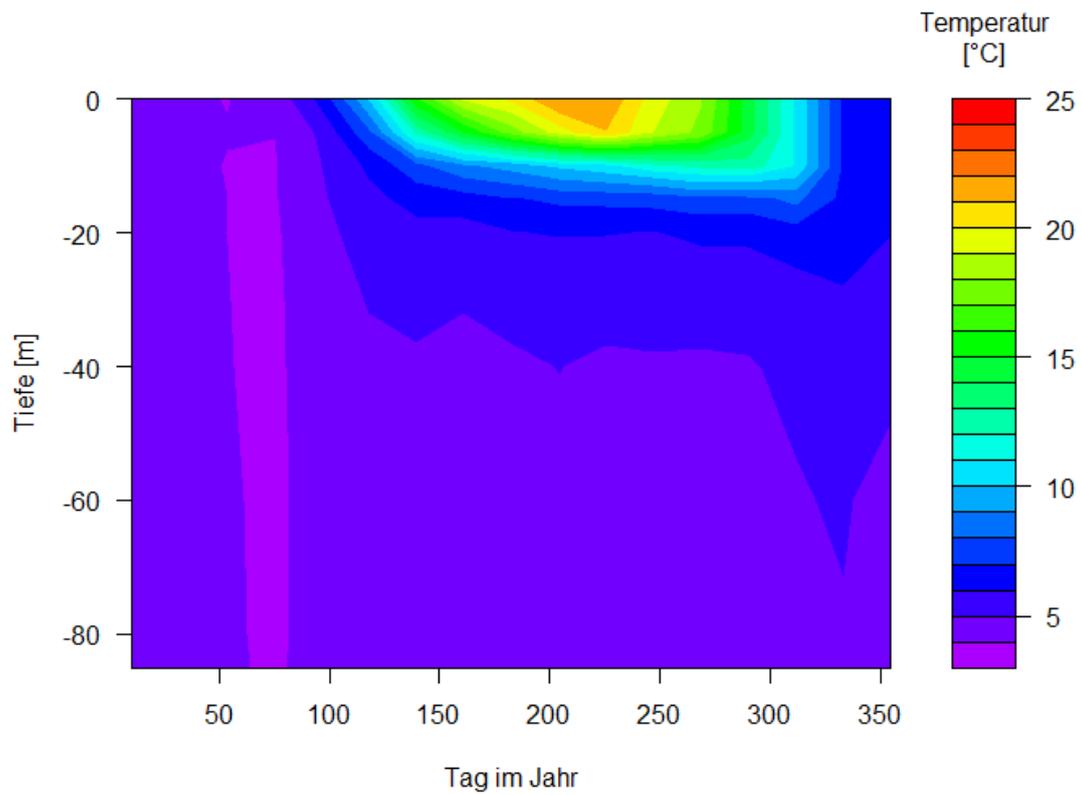


Abbildung 2 – Durchschnittlicher jährlicher Temperaturverlauf im Sempachersee.

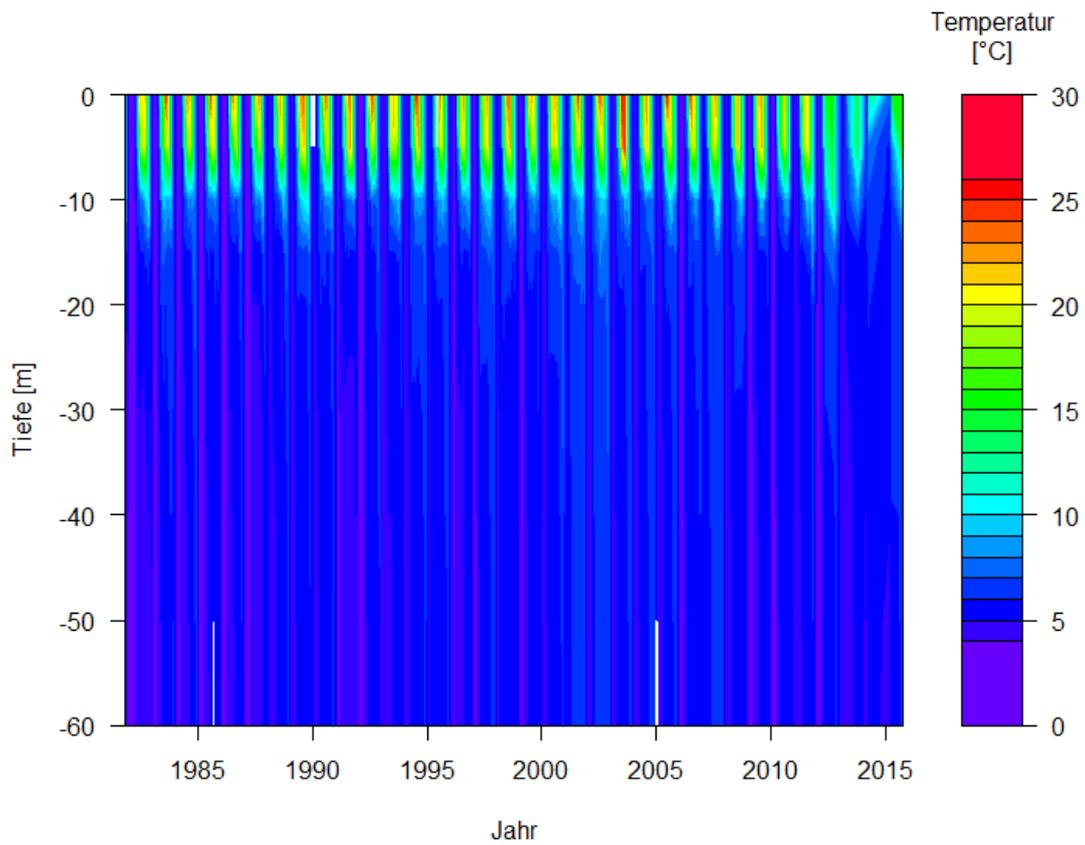


Abbildung 3 – Temperaturprofile seit 1980 im Baldeggersee.

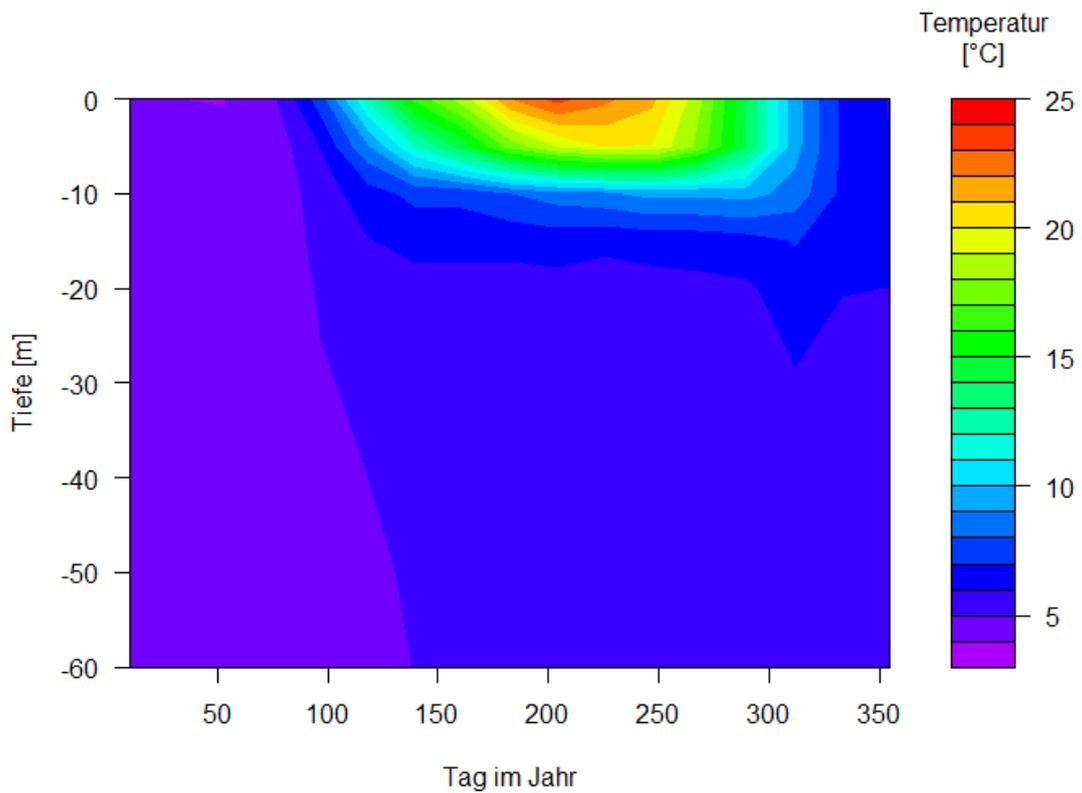


Abbildung 4 – Durchschnittlicher jährlicher Temperaturverlauf im Baldeggersee.

Der Sempacher- und der Baldeggersee werden jeden Winter vollständig gemischt, wobei die Durchmischung auch durch die Zirkulationshilfe (Luft-eintrag) unterstützt wird. Die Wassersäule erreicht regelmässig eine Temperatur von unter 4 °C. In manchen Wintern bildet sich eine inverse Temperaturschichtung aus (d.h., die Oberflächenschicht wird kühler als das Tiefenwasser, da Wasser bei 4 °C die höchste Dichte aufweist). Der Sempachersee ist gegen Ende des Winters meist kühler als der Baldeggersee, weil er aufgrund seiner Exposition und der grösseren Oberfläche stärker durch den Wind gemischt wird.

Für die Abschätzung des technischen Potenzials der beiden Seen für die Wärmenutzung ist es notwendig, die Statistik der Wassertemperaturen zu betrachten. Die beobachteten Mittelwerte, Maxima, und Minima sind für den Sempachersee in Abbildung 5 und für den Baldeggersee in Abbildung 6 dargestellt. Bei der Beurteilung der Minima ist zu berücksichtigen, dass beide Seen innerhalb der Zeitreihen gelegentlich im Winter eisbedeckt waren, zu diesen Zeitpunkten jedoch keine Messungen durchgeführt wurden. Direkt an der Oberfläche eines eisbedeckten Sees beträgt die Wassertemperatur 0 °C.

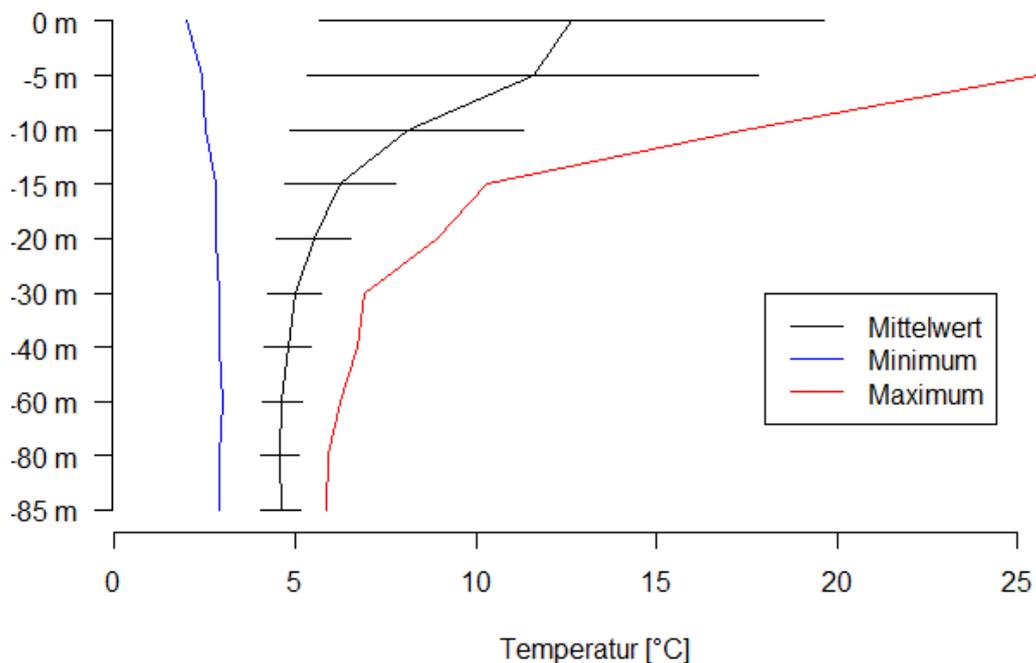


Abbildung 5 – Statistik der Temperaturprofile vom Sempachersee (1954-2015). Die Fehlerbalken zeigen eine Standardabweichung auf jeder Seite des Mittelwerts.

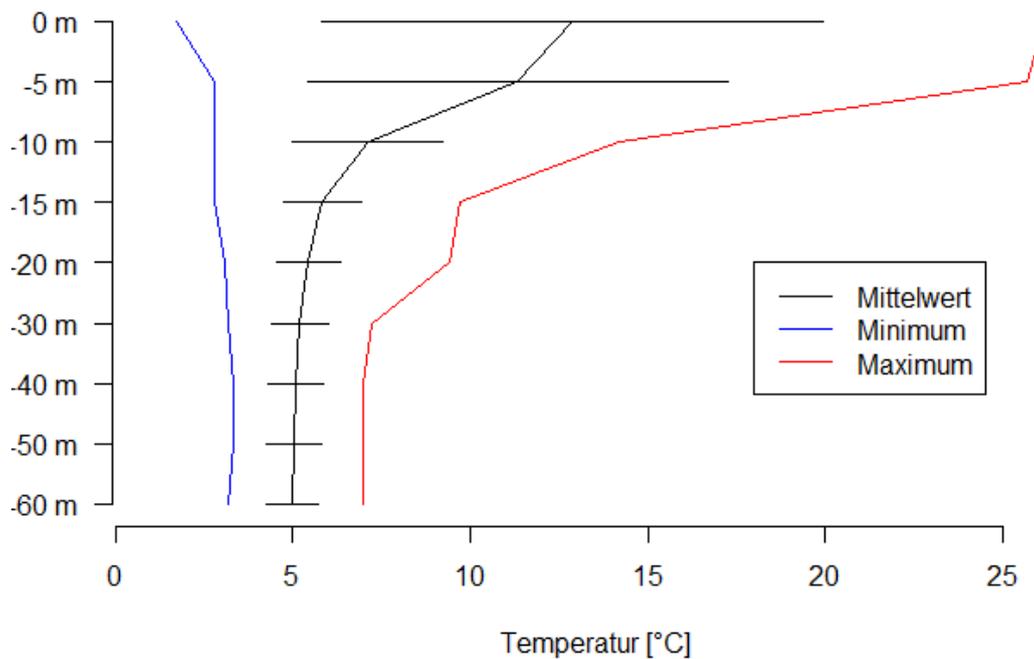


Abbildung 6 – Statistik der Temperaturprofile vom Baldeggersee (1934-2015). Die Fehlerbalken zeigen eine Standardabweichung auf jeder Seite des Mittelwerts.

Aus den gemessenen Temperaturen ergeben sich für die Energienutzung folgende Erkenntnisse:

- Wie erwartet sind die Temperaturen in tieferen Wasserschichten für die überwiegende Zeit kälter und weniger variabel.
- Die Wassertemperatur kann in kalten Wintern (z.B. im Winter 2011-12) unter die Temperatur maximaler Dichte von 4 °C sinken. In diesen Fällen ist das Tiefenwasser unterhalb von 5 bis 15 m Tiefe wärmer als das Oberflächenwasser (Temperaturinversion).
- In besonders kalten Wintern fällt die Temperatur gelegentlich auch in tieferen Schichten unter 3 °C (z.B. Anfang März 1970).
- In 15 m Tiefe beträgt die maximale gemessene Sommertemperatur (Mai bis September) 8.9 °C im Sempachersee und 8.4 °C im Baldeggersee. Diese Temperaturen sind bestens für Kühlzwecke geeignet. In 20 m Tiefe liegen die beobachteten Höchsttemperaturen in beiden Seen knapp über 7 °C.

Die niedrigsten Temperaturen im Winterhalbjahr (von Oktober bis April) sind wichtig für die wärmetechnische Optimierung und den Betrieb von Wärmenutzungsanlagen während speziell kalten Perioden. Die Tabellen 2 und 3 zeigen, zu welchem Anteil bzw. an wie vielen Tagen (in Klammer) die Temperaturen in verschiedenen Wassertiefen in den beiden Seen unter

bestimmte Schwellenwerte fallen. Auch hier sind eisbedeckte Perioden aufgrund fehlender Messungen in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Tiefe	T < 3.5 °C	T < 4 °C	T < 5 °C	T < 6 °C
0 m	8% (18)	16% (34)	36% (76)	48% (102)
10 m	8% (17)	17% (35)	39% (82)	54% (115)
15 m	8% (16)	16% (34)	41% (87)	59% (126)
20 m	7% (16)	16% (34)	42% (90)	70% (148)
30 m	6% (13)	16% (34)	50% (107)	89% (189)
60 m	4% (9)	15% (31)	74% (158)	99% (209)

Tabelle 2 – Sempachersee (1954-2015): durchschnittlicher Anteil der Winterzeit, während welchem die Temperatur unter 3.5, 4, 5 und 6 °C sinkt. In Klammern: Anzahl Tage pro Heizsaison (Oktober bis April).

Tiefe	T < 3.5 °C	T < 4 °C	T < 5 °C	T < 6 °C
0 m	7% (15)	13% (27)	32% (67)	46% (97)
10 m	6% (13)	13% (27)	35% (73)	56% (118)
15 m	5% (11)	13% (27)	37% (78)	61% (129)
20 m	5% (10)	13% (27)	40% (85)	73% (155)
30 m	3% (7)	12% (26)	49% (104)	79% (167)
60 m	1% (3)	14% (30)	59% (125)	89% (188)

Tabelle 3 – Baldeggersee (1934-2015): durchschnittlicher Anteil der Winterzeit, während welchem die Temperatur unter 3.5, 4, 5 und 6 °C sinkt. In Klammern: Anzahl Tage pro Heizsaison (Oktober bis April).

3.2. Sprungschicht und interne Wellen

Die Sprungschicht, oder Thermokline, ist die Zone in der Wassersäule, in welcher sich die Temperatur mit der Tiefe am stärksten ändert. Sie bildet sich im Frühling aufgrund der Erwärmung der Oberflächenschicht aus und bleibt dann bestehen, bis sich der See im Winter wieder durchmischt. Normalerweise entsteht die Sprungschicht nahe an der Oberfläche und verschiebt sich im Laufe des Jahres immer weiter nach unten.

Interne Wellen können in der Wassersäule vertikale Auslenkungen von mehreren Metern bewirken. Dies hat zur Folge, dass die Temperatur in einer festen Tiefe, zum Beispiel an der Stelle einer Wasserfassung, innerhalb von Stunden oder sogar Bruchteilen von Stunden um mehrere Grad schwanken kann [11]. In mittleren Tiefen wird das besonders bei Stürmen im Herbst beobachtet. Bei der Auslegung einer Anlage für den Wärme-

entzug muss diesem Umstand Rechnung getragen werden. Für die Biota der Seen sind kurzfristige Temperaturschwankungen, wie sie bei der Wärmenutzung auftreten können, somit kein neues Phänomen.

Die Beobachtungen zeigen, dass die Sprungschicht im Sempachersee zwischen 5 und 20 m Tiefe, und im Baldeggersee zwischen 5 und 15 m Tiefe auftritt. Wasserentnahmen für thermische Nutzungen sollten diese Tiefenbereiche meiden, weil die Wassertemperatur dort aufgrund von see-internen Wellen innert kurzer Zeit stark schwanken kann.

3.3. Klimatische Erwärmung der Seen

Aufgrund des Klimawandels haben sich Sempacher- und der Baldeggersee bereits messbar erwärmt, und es ist zu erwarten, dass sie sich in Zukunft weiter erwärmen werden. Dabei ist es allerdings wichtig, auch den zeitlichen Verlauf der Veränderungen zu beachten. Nicht nur die Höhe der zukünftigen Erwärmung ist für Ökosysteme relevant, sondern auch die Geschwindigkeit, mit welcher diese Erwärmung erreicht wird, da die Ökosysteme eine gewisse Zeit benötigen, um sich an einen neuen Zustand anzupassen. Die Klimaerwärmung führt zudem zu einer schnelleren Erwärmung in der Oberflächenschicht als im Tiefenwasser und entsprechend zu einer Verstärkung der Dichteschichtung im Sommer [8]. Die Sommerschichtung bildet sich im Frühling früher aus, und dauert im Herbst länger an, wodurch die geschichtete Periode verlängert und die gesamte Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser während der Schichtung erhöht wird [7]. Ausserdem werden mehr Hitzesommer und, langfristig gesehen, auch deutlich wärmere Winter erwartet [3].

Eine Nutzung von Sempacher- und Baldeggersee als Kältequelle im Sommer würde die Geschwindigkeit der Erwärmung der Seen weiter erhöhen und damit die Ökosysteme zusätzlich belasten. Entsprechend ist ein Wärmeeintrag in den See kritischer zu beurteilen als eine Wärmeentnahme. Es wurde mehrfach gezeigt [9] [10], dass die Abkühlung eines Sees durch Wärmeentnahme in einem beschränkten Mass helfen könnte, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Temperaturen im See – allerdings nur sehr geringfügig – zu mildern.

3.4. Nährstoffe

Wenn die Seen geschichtet sind (von April bis Oktober), bildet sich trotz künstlicher Belüftung auch ein Sauerstoffgradient aus, da in den tiefen Schichten mehr Sauerstoff konsumiert als eingetragen wird. In den tiefsten Schichten fällt die Sauerstoffkonzentration gelegentlich unter die gesetzlich geforderten $4 \text{ mgO}_2/\text{L}$. Verantwortlich dafür ist die Zersetzung von absinkendem organischem Material im Hypolimnion und auf dem Seegrund, dessen Produktion durch hohe Nährstoffkonzentrationen in der Oberflächenschicht gefördert wird. Während der sommerlichen Schichtung werden durch diese Prozesse Nährstoffe aus der Oberflächenschicht entfernt und im Tiefenwasser rückgelöst, wodurch ein Nährstoffgradient entsteht. So beträgt z.B. die Nitratkonzentration im Sempachersee rund 0.65 mgN/L im Hypolimnion, aber weniger als 0.2 mgN/L im Epilimnion (Mittelwert seit dem Jahr 2000 für die Monate Mai bis September). Die Einträge von Nährstoffen in die beiden Seen wurden in den letzten Jahrzehnten durch Gewässerschutzmassnahmen stark verringert. Thermische Nutzungen würden diesen Anstrengungen zuwiderlaufen, falls sie einen zusätzlichen Eintrag von Nährstoffen ins Epilimnion bewirken sollten.

4. Praktische Betrachtungen zur Wärmenutzung

4.1. Wärmeentnahme im Winter

Während des Winterhalbjahres (hauptsächlich im Dezember, Januar und Februar) kann Seewasser genutzt werden, um Verwaltungs-, Industrie- und Wohngebäude zu heizen. Dabei wird das Seewasser mit einer Wärmepumpe um wenige Grad abgekühlt, um ein Kältemittel auf eine höhere Temperatur zu bringen. Das Kältemittel kann dann in Heizungssystemen verwendet oder in ein Wärmenetz eingebracht werden.

Im Winter werden die Wasserkörper der beiden Seen dank der Zirkulationshilfe vertikal homogen. Rückgabewasser, das generell kühler ist als das Umgebungswasser, kann sich daher mit einem grossen Volumen mischen und fördert die vertikale Mischung zusätzlich (besonders am Anfang und Ende des Winters). Um das Potenzial für die beiden Seen abzuschätzen, wird deshalb hier angenommen, dass sich das Rückgabewasser im ganzen Seevolumen verteilen kann, und dass die maximal erlaubte Abkühlung des ganzen Volumens $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt. Da Temperaturänderungen von $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$

bereits geringe ökologische Folgen haben könnten, wurde als zweite Option das Potenzial bei einer maximal erlaubten Abkühlung von 0.2 °C berechnet. Bei Temperaturveränderungen, welche unter diesem Wert liegen, ist kaum mit einem messbaren Einfluss zu rechnen. Die entsprechenden jährlichen Potenziale sind in Tabelle 4 angegeben.

	Potenzial bei max. Abkühlung um 0.5 °C	Potenzial bei max. Abkühlung um 0.2 °C
Sempachersee	1390 TJ (175 MW)	555 TJ (70 MW)
Baldeggersee	370 TJ (46 MW)	150 TJ (18 MW)

Tabelle 4 – Wärmenutzungspotenzial des Sempacher- und des Baldeggersees. Die berechnete mittlere Leistung entspricht einem 2200 Stunden dauernden Betrieb.

In kalten Wintern wurde sowohl im Sempacher- wie auch im Baldeggersee beobachtet, dass die ganze Wassersäule unter 4 °C abgekühlt wird. Es ist zwar davon auszugehen, dass die Häufigkeit solch kalter Winter mit der Klimaerwärmung abnehmen wird. Dennoch ist bei der Planung von Wärmenutzungsanlagen zu berücksichtigen, dass die Effizienz der Wärmeentnahme in Kälteperioden aufgrund tiefer Wassertemperaturen abnimmt, dies umso mehr, je näher die Wasserentnahme an der Seeoberfläche liegt.

Bei der Wahl der Entnahmetiefe sind noch weitere Punkte zu beachten. Einerseits ist eine seichtere Wasserentnahme kostengünstiger und dank höheren Wassertemperaturen insbesondere in den Herbstmonaten auch effizienter. Andererseits sind aber Entnahmen aus den obersten Schichten aus mehreren Gründen besonders heikel: die Temperaturschwankungen sind höher, das Wasser enthält mehr organische Partikel, im Winter können sich Temperaturinversionen ausbilden, und die biologische und menschliche Aktivität sind nahe der Oberfläche am grössten. Dies führt in der Regel zu technischen Problemen bzw. zu Nutzungskonflikten in den Uferzonen. Wasserentnahmen zu thermischen Zwecken sind deshalb in einer Tiefe von unter 20 m vorzusehen.

Da die Seen im Winter nicht geschichtet sind, und deshalb mit Entnahmen und Rückgaben von Wasser keine Nährstoffe umgeschichtet werden, ist die Tiefe der Wasserrückgabe im Winter weniger kritisch [12]. Das benutzte (gekühlte) Wasser kann entweder zurück in den See geleitet werden, oder auch in den Seeauslauf – solange die resultierenden Änderungen der Flusstemperatur nicht zu hoch sind. Aufgrund der niedrigen Abflüsse von beiden Seen (rund 1 m³/s im Winter – Abbildungen 7 und 8), ist das Potenzial für die Rückleitung in den Seeauslauf aber eher gering: es beträgt etwa

2.5 MW (20 TJ über 2200 Stunden), wenn das Wasser um 3 °C abgekühlt wird und die Menge des eingeleiteten Wassers auf 20% des natürlichen Abflusses begrenzt wird.

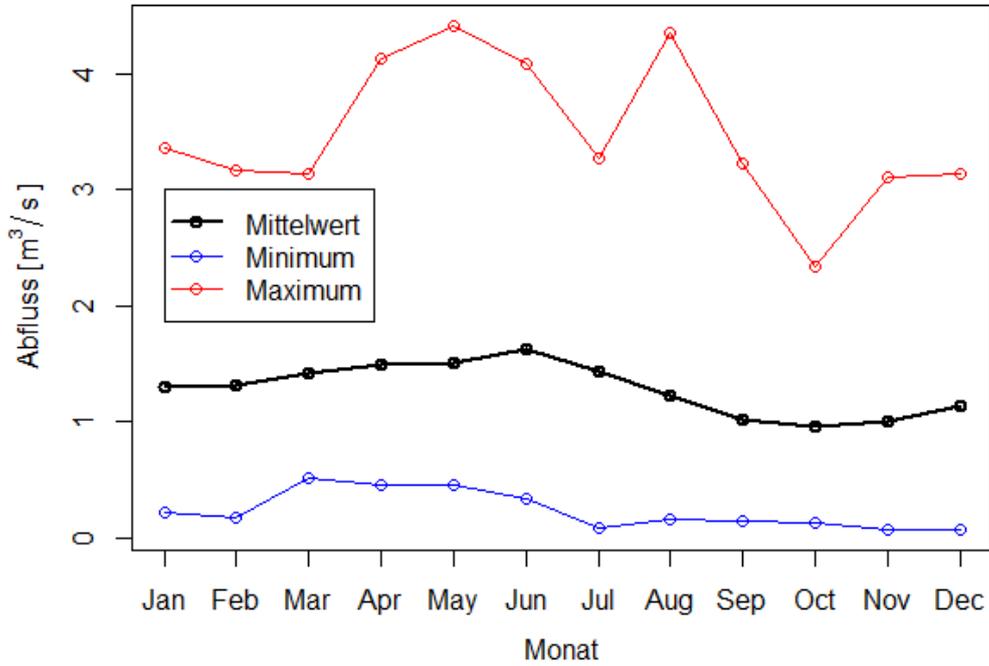


Abbildung 7 – Statistik der Abflüsse aus dem Sempachersee (Suhre) (1976-2013).

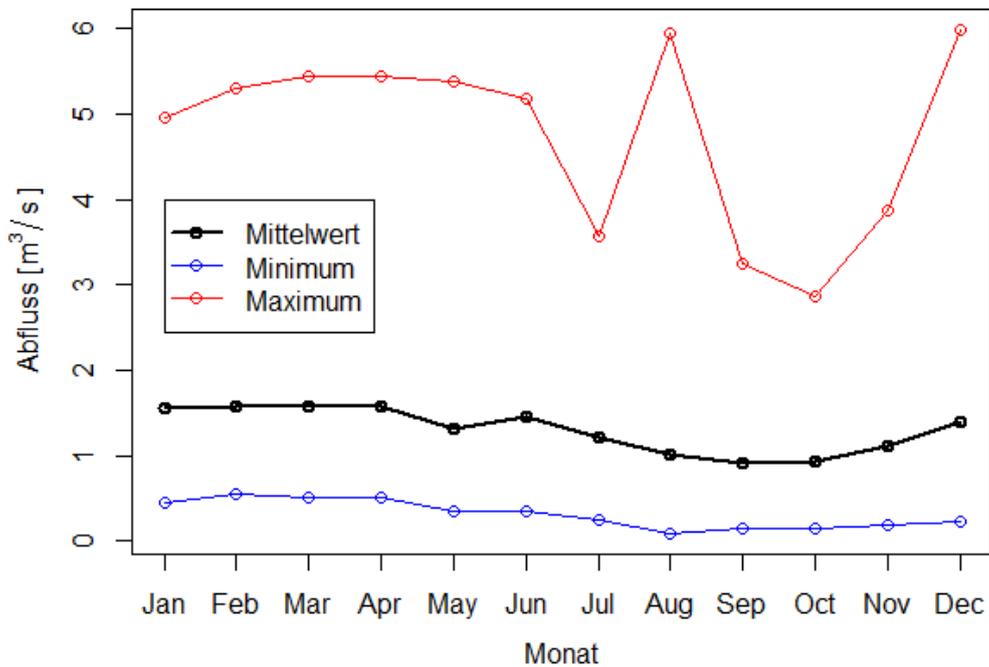


Abbildung 8 – Statistik der Abflüsse aus dem Baldeggersee (Aabach) (1976-2013).

4.2. Wärmeeintrag im Sommer

Während des Sommerhalbjahres erhöht sich die Wassertemperatur in der Oberflächenschicht fortlaufend, während die tieferen Schichten vergleichsweise kühl bleiben. Dieses Tiefenwasser ist daher für die Kältenutzung für Klimaanlage und die Ableitung von Abwärme besonders geeignet. Die Grenze der Schichtung (Sprungschicht) befindet sich bei beiden Seen in einer Tiefe von 20 Metern (siehe oben), was der minimalen Entnahmetiefe für Kühlzwecke entspricht.

Das Wasser ist in dieser Tiefe während des ganzen Sommers ausreichend kalt, so dass es auch nach der Nutzung noch kühler ist als das Oberflächenwasser. In der Regel sind tiefere Entnahmen vorzusehen, weil diese bezüglich Temperaturstabilität günstiger sind und keine Kurzschlüsse mit dem erwärmten Rückgabewasser entstehen können.

Das erwärmte Wasser ist unterhalb der Sprungschicht und keinesfalls ins Oberflächenwasser zurückzuleiten. Die Nährstoffkonzentrationen unterhalb der Sprungschicht sind deutlich höher als im Oberflächenwasser, weshalb eine Einleitung ins Oberflächenwasser neben einer Absenkung der Sprungschicht zusammen mit dem Wärmeeintrag auch das Algenwachstum zusätzlich fördern würde.

Beim Sempachersee könnte auch eine Ableitung in den Seeabfluss in Betracht gezogen werden, sofern die Kriterien für Einleitungen in Fließgewässer eingehalten werden. Beim Baldeggersee ist dies hingegen nicht zu empfehlen, weil dies praktisch einer Einleitung zusätzlicher Nährstoffe in den unterliegenden Hallwilersee gleichkäme.

Generell ist eine zusätzliche Erwärmung durch Kältenutzung in den Schweizer Gewässern aus zwei Gründen viel kritischer zu beurteilen als eine Abkühlung durch Wärmenutzung: erstens sind die Temperaturbedingungen bereits heute schon nahe an der Obergrenze der Temperaturpräferenzen der einheimischen Fauna [6], und zweitens ist aufgrund des Klimawandels auch so von einer zusätzlichen Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten auszugehen. Bei der thermischen Nutzung von Seewasser dürfen vor allem die Maximaltemperaturen in den oberflächennahen Schichten und im Seeausfluss nicht zusätzlich erhöht werden.

Die Schichtung begrenzt die Ausbreitung des Rückgabewassers im Sommer. Weil das Rückgabewasser wärmer ist als das Umgebungswasser, steigt es vom Punkt der Einleitung auf und schichtet sich am unteren Rand der

Sprungschicht ein. Dies wird durch einen langsamen Abwärtstransport über die restliche Seefläche ausgeglichen. Für eine grosszügige Abschätzung des Potenzials nehmen wir an, dass sich die Abwärme zwischen 10 m und 40 m Tiefe verteilt, und eine maximale Temperaturveränderung von 0.5 °C erlaubt wird. In einer zweiten Berechnung wird die Wärme zwischen 15 m und 30 m Tiefe verteilt und die maximal erlaubte Erwärmung beträgt 0.2 °C. Daraus ergibt sich, analog zur Wärmenutzung, ein Potenzial, welches kaum messbare Auswirkungen haben dürfte. Die entsprechenden Werte für beide Seen sind in Tabelle 5 aufgeführt.

	Potenzial bei max. Erwärmung um 0.5 °C (15-40 m Tiefe)	Potenzial bei max. Erwärmung um 0.2 °C (15-30 m Tiefe)
Sempachersee	530 TJ (67 MW)	140 TJ (18 MW)
Baldeggersee	160 TJ (20 MW)	45 TJ (6 MW)

Tabelle 5 – Kältenutzungspotenzial des Sempacher- und des Baldeggersees. Die berechnete mittlere Leistung entspricht einem 2200 Stunden dauernden Betrieb.

Im Falle des Sempachersees könnte das Potenzial durch eine teilweise Rückleitung in den Abfluss (in die Suhre) weiter erhöht werden. Das Kühlwasser soll dabei aber immer kühler als das Flusswasser sein, damit die Suhre nicht zusätzlich zum Klimawandel erwärmt wird. Zudem soll die eingeleitete Wassermenge im Vergleich zum natürlichen Abfluss klein sein. Wenn Wasser mit einer Temperatur von 8 °C gefasst und nach einer Erwärmung um 7 °C in den Seeabfluss eingeleitet wird, ergibt sich für eine Abflussmenge von 10% des mittleren natürlichen Abflusses im Sommer (Abbildungen 7 und 8) ein Potenzial von 4.4 MW (35 TJ über 2200 Stunden).

4.3. Belüftung und Durchmischung

Es ist nicht zu erwarten, dass die Wärme- oder Kältenutzung in den durch die berechneten Potenziale vorgegebenen Grössenordnungen den Belüftungsbetrieb wesentlich beeinflussen wird. Durch die Wärme- und Kältenutzung könnte sich allenfalls die Dauer der Sommerstagnation leicht verändern. Berechnungen für den Bodensee haben gezeigt, dass insbesondere die Einleitung von warmem Wasser unterhalb der Sprungschicht zu einer geringen Verlängerung der Stagnation führen kann, weil im Herbst die zusätzliche Wärme zuerst wieder an die Atmosphäre abgegeben werden muss, damit sich der See vollständig durchmischen kann [5]. Diese Verlängerung beträgt jedoch selbst bei intensiver Kühlnutzung nur wenige Tage.

5. Schlussfolgerungen

5.1. Kritische Faktoren

Bei der Wärmenutzung (im Winterhalbjahr) sind die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Abkühlung des gesamten Seevolumens
- Die Abkühlung der Seeabflüsse

Bei der Kältenutzung (im Sommerhalbjahr) ist das Kühlwasser unterhalb der Sprungschicht rückzuleiten. Zu beachten sind:

- Die Erwärmung des betroffenen Rückgabevolumens im See
- Allfällige künstlich erzeugte Nährstoffflüsse
- Kurzschlüsse zwischen Entnahme und Rückgabe

Dabei ist die Erwärmung des Sees durch die Kältenutzung, insbesondere im Zusammenhang mit der erwarteten weiteren Klimaerwärmung, kritischer zu beurteilen als die Abkühlung durch Wärmenutzung, welche die Durchmischung unterstützt.

5.2. Quantitative Eckwerte für die Planung von Nutzungen

Bei der konkreten Planung von Anlagen zur Nutzung von Wärme- und Kühlenergie aus den Luzerner Seen sind die untenstehenden Punkte zu beachten. Die entsprechenden Informationen sind den verantwortlichen Dienststellen einzureichen, und die gegebenen Verordnungen und Eckwerte zu berücksichtigen:

- Alle Nutzungen
 - Entnahme- und Rückgabeort: Nutzungskonflikte vermeiden
 - Entnahmetiefe: Oberfläche meiden, Effizienz optimieren
 - Entnahmemenge mit saisonaler Verteilung
- Wärmenutzung
 - Abgabe: Temperaturdifferenz (ΔT) max. 7 °C
 - Erwärmung im Rückgabevolumen des Sees: ΔT max. 0.5 °C

- Kältenutzung
 - Rückgabe des Nutzwassers: mind. 20 m, max. 35 m Wassertiefe
 - Nutzungsvolumen: 20 bis 40 m Tiefe
 - Absenkung der Sprungschicht: max. 1 bis 2 m
 - Abgabe ins Tiefenwasser: ΔT max. 7 °C
 - Abkühlung im Rückgabevolumen des Sees: ΔT max. 0.5 °C

Die lokalen Eckwerte beziehen sich dabei jeweils auf die einzelne Anlage, für die Auswirkungen auf den ganzen See (Rückgabevolumen, Absenkung der Sprungschicht) muss die Gesamtheit aller Anlagen im See berücksichtigt werden.

5.3. Optimale Wasserfassungstiefe

Beim heutigen Temperaturregime der Seen empfehlen wir die folgenden optimalen Fassungstiefen:

- Wärmenutzung: etwa 20 m Tiefe
- Kältenutzung: zwischen 20 und 40 m Tiefe
- Kombinierte Anlagen mit einer einzigen Fassung: 20 bis 25 m Tiefe

Vor allem für die Kältenutzung könnten sich die optimalen Entnahmetiefen aufgrund der Klimaerwärmung in Zukunft weiter nach unten verschieben.

5.4. Potenzial

Für beide Seen und beide Formen der Energienutzung wurden jeweils zwei Potenziale berechnet, eines mit grosszügigeren Annahmen für die erlaubten Temperaturveränderungen und die beeinflussten Volumen, eines mit restriktiveren Annahmen. Aufgrund dieser Berechnungen ergeben sich folgende Potenziale:

- Jährliche Wärmenutzungspotenziale von 555 bis 1390 TJ für den Sempachersee und 150 bis 370 TJ für den Baldeggersee; zusätzlich etwa 20 TJ für beide Seen bei Rückgabe in den Seeabfluss.
- Jährliche Kältenutzungspotenziale von 140 bis 530 TJ für den Sempachersee, und 45 bis 160 TJ für den Baldeggersee; zusätzlich etwa 35 TJ für den Sempachersee bei Rückgabe in den Seeabfluss.

6. Weitere Empfehlungen

Die oben abgeschätzten Potenziale basieren auf früheren Berichten, in welchen die physikalischen und ökologischen Auswirkungen von Temperaturveränderungen beurteilt wurden. Bei Nutzungen, welche die genannten Werte überschreiten, oder für welche starke lokale Effekte erwartet werden müssen, ist eine vertiefte Analyse angezeigt. Dies gilt insbesondere für den Fall eines grossen Wärmeeintrags, dessen Auswirkungen in Verbindung mit denjenigen der Klimaerwärmung zu beurteilen sind. Lokal können höhere Temperaturveränderungen auftreten, als diejenigen, welche für die Abschätzung erwähnt wurden; dies sollte aber keine wesentlichen ökologischen Auswirkungen haben.

Wie in früheren Berichten diskutiert, gibt es in einem grösseren Verbund (Verbundnetze, Anergienetze) oft gleichzeitig Bedarf für Kälte und Wärme. Andere Energiequellen (z.B. industrielle Abwärme, Geothermie, etc.), sowie andere Wärme- und Kälteempfänger (z.B. Rechenzentren), können im gleichen Fernwärmenetz eingeschlossen werden. Solche Verbunde haben grundsätzliche drei Vorteile: (a) die Effizienz der Wärmepumpen steigt, da die gleichzeitige Kältenutzung die Wassertemperaturen im Kreislauf erhöht; (b) der Wasserfluss im Kreislauf wird reduziert, da Wasser mehrfach genutzt werden kann; (c) die Zahl der Fassungen im See und das Leitungskaliber werden reduziert. Bei einer kombinierten Nutzung für Kühlung und Heizung können sich die Auswirkungen auf die Temperaturen im See über das Jahr teilweise kompensieren [5].

Der Betrieb der Wärmepumpen (sowohl ihre Effizienz und Lebenszeit, als auch die Temperatur der Wärmequelle) legen die Beständigkeit und die Rentabilität des ganzen Systems grösstenteils fest. Hier schlagen wir vor, die Wärmepumpen für eine Fassungstemperatur um 4 °C zu optimieren.

Bei der Planung von Wasserentnahmen sind uferökologische Argumente (wichtige Laichgebiete, Naturschutzgebiete, usw.) sowie andere Nutzungen (Einleitungen, Fischerei, usw.) zu berücksichtigen. Seewasserleitungen sind so einzubringen, dass Naturschutzgebiete nicht tangiert werden. Bereits bestehende Nutzungen (siehe oben) sowie Leitungen und Anlagen der Seebelüftung sind zu berücksichtigen. Die Trinkwassernutzung hat grundsätzlich Vorrang vor der thermischen Nutzung. Der Baldeggersee ist ein Privatgewässer, die Seeigentümerin (Pro Natura) muss sich mit einer Nutzung einverstanden erklären.

Bei der Planung von Filtern und Wärmetauschern ist zu berücksichtigen, dass der Betrieb durch die Anwesenheit von Phyto- und Zooplankton sowie von Muscheln möglichst nicht gestört werden sollte. Idealerweise zirkuliert das Seewasser in einer separaten Schleife, die vom Wärmenetz getrennt bleibt. Ansonsten müssen diese Anlagenteile wegen Biofilmakkumulation regelmässig chemisch oder mechanisch gereinigt werden. Dabei sind die Vorgaben der Gewässerschutzgesetzgebung zu beachten.

In beiden Seen erreichen die Sauerstoffkonzentrationen gegen Ende Sommer tiefe Konzentrationen. Ohne die künstliche Belüftung würde das Wasser in der Entnahmetiefe anaerob. Gelegentlich kann dies auch mit der Belüftung vorkommen. Das könnte allenfalls dazu führen, dass in den Wasserleitungen reduziertes Mangan oder Eisen aus dem Tiefenwasser oxidiert wird und ausfällt. Dies kann in der Anlage technische Schwierigkeiten verursachen.

Bei Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen kann die Wärme- und Kältenutzung der beiden Seen in Zukunft einen wertvollen Beitrag zu einer erneuerbaren und lokalen Energieversorgung in der Region leisten.

7. Referenzen

- [1] BEW (1981). Wärmepumpen an Oberflächengewässern. Studie Nr. 19. Bundesamt für Energiewirtschaft. Bericht, Eawag, Dübendorf (Güttinger, H. und Imboden, D. M.).
- [2] Bühner, H., & Ambühl, H. (2001). Lake Lucerne, Switzerland, a long term study of 1961-1992. *Aquatic Sciences*, 63(4), 432-456.
- [3] CH2014-Impacts (2014), Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- [4] Faessler, J., Hollmuller, P., Lachal, B. M., & Viquerat, P. A. (2012). Valorisation thermique des eaux profondes lacustres: le réseau genevois GLN et quelques considérations générales sur ces systèmes. *Archives des Sciences*, 65, 215-228.
- [5] Fink, G., Schmid, M., & Wüest, A. (2014). Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: Capacities and limits. *Water Resources Research*, 50(9), 7285-7301.
- [6] Hunziker, S., & Wüest, A. (2011). Anthropogene Temperaturveränderungen in Flüssen und Seen – eine Literaturanalyse. KlimBo Teilprojekt 2.a.
- [7] North, R. P., North, R. L., Livingstone, D. M., Köster, O., & Kipfer, R. (2014). Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global Change Biology*, 20(3), 811-823.
- [8] Schmid, M., Hunziker, S., & Wüest, A. (2014). Lake surface temperatures in a changing climate: a global sensitivity analysis. *Climatic Change*, 124(1-2), 301-315.
- [9] Schmid, M. & Drosner, L. (2014). Energieverbund Zug Machbarkeitsstudie, Technischer Bericht Seewasser, Bericht zH Stadt Zug und AfU Zug.
- [10] Schmid, M. (2014). Abschätzung des Potenzials des Ägerisees für die Wärme- und Kältenutzung, Bericht zH AfU Zug.
- [11] Wüest, A. & Fink, G. (2014). Potential zur Wärme- und Kühleenergienutzung aus dem Vierwaldstättersee, Machbarkeit, Bericht zH AKV, AfU Nidwalden, Stans und Uwe Kanton Luzern.
- [12] Wüest, A. (2012). Potential zur Wärmeenergienutzung aus dem Zürichsee, Machbarkeit, Bericht zH AWEL Zürich.

8. Anhang

Konzept der Vermischungszone und Einschichtung

Die Temperatur im Rückgabewasser bei Kühlwassereinleitung ist deutlich höher als die des Umgebungswassers, so dass die Abwasserfahne aufsteigt. Während des Aufsteigens mischt sich kühleres Umgebungswasser ein bis sich die Abwasserfahne auf die Temperatur des Umgebungswassers abgekühlt hat. In dieser Tiefe schichtet sich das Rückgabewasser in den See ein. Die Einschichtungstiefe ist bestimmt durch die Temperatur im Rückgabewasser, Wasserfluss und Rohröffnung (oder Austrittsgeschwindigkeit) und den Winkel der Rohröffnung.

In Anlehnung an die Richtlinien für den Bodensee (IGKB 2014) gelten folgende Vorgaben:

- Mit Rücksicht auf die Schichtungsverhältnisse ist die Rückgabtiefe des thermisch genutzten Wassers so zu wählen, dass die Einschichtung in einer Zone zwischen 20 bis 40 Meter Wassertiefe erfolgt.
- Beim uwe Luzern geht man von einem maximalen Temperaturänderung (zwischen Entnahme und Rückgabe) von 7°C aus.
- Die Temperaturänderung ausserhalb der Mischungszone, welche sich bei der Wasserrückgabe bildet, muss kleiner als 1 °C sein. Als Mischungszone gilt ein Bereich von 20 x 20 m horizontaler und 10 m vertikaler Ausdehnung (vgl. Abbildung).

Ein einfaches Bemessungswerkzeug zur Abschätzung der Einschichtungstiefe und der Grösse der Mischungszone wurde vom IGKB entwickelt. Es ist an der folgenden Adresse online verfügbar:

http://193.197.158.229/igkb_therm/igkb_therm_jet.php

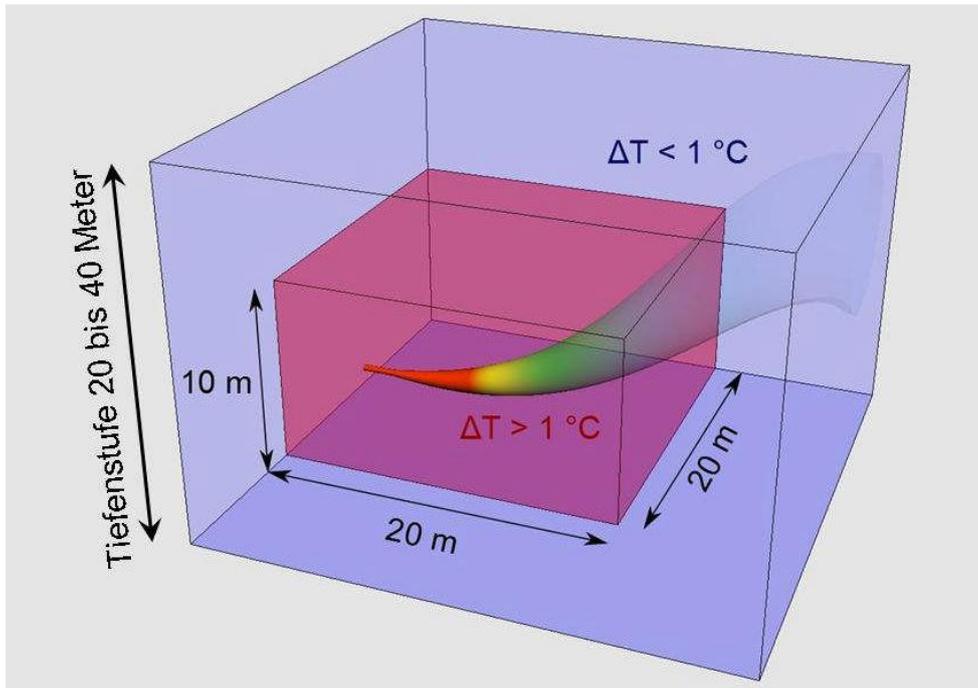


Abbildung – Schematische Darstellung der Mischungszone