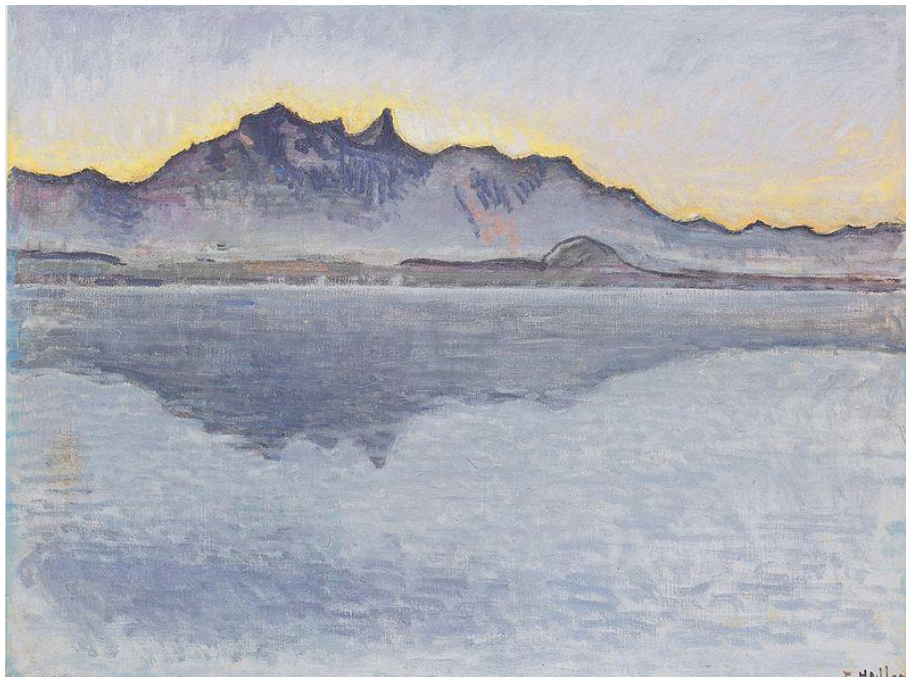

Wärme- und Kältenutzung aus Brienzer-, Thuner- und Bielersee

ABSCHÄTZUNG DES POTENZIALS
UND BEEINFLUSSUNG DER SEEÖKOSYSTEME



Adrien Gaudard

Kastanienbaum, 2. März 2016

Bericht im Auftrag des Amtes für Wasser und Abfall des Kantons Bern.

Titelbild: Ferdinand Hodler, Thunersee mit Stockhornkette am Abend,
Wikipedia

1. Hintergrund

In diesem Kurzbericht wird das Wärme- und Kältenutzungspotenzial der drei grossen Berner Seen (Brienzer-, Thuner- und Bielersee) analysiert. Es ist zu erwarten, dass Seen in unseren Breiten künftig 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 urbaner Infrastruktur und zur Ableitung von Prozesswärme im Sommer. Andererseits kann dem relativ warmen Seewasser im Winter auch Wärme zum Heizen im Siedlungsgebiet (Wärmepumpen) entzogen werden [7].

Wärme- und Kälteenergie von Seen ist eine erneuerbare, saubere, lokale, und noch nicht ausgelastete Quelle von 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 Brienzer- und der Thunersee haben ähnliche physikalische Eigenschaften, während der Bielersee deutlich weniger tief ist (Tabelle 1). Die ersten beiden Becken liegen am Alpennordhang und bestehen aus einem einzigen steilen, tiefen Wasserkörper mit einem Hauptzufluss und -abfluss (Aare). Die Wasseraufenthaltszeit in diesen beiden Seen beträgt deutlich mehr als ein Jahr. Der Bielersee, am Jurasüdfuss gelegen, besteht aus mehreren Teilbecken mit verschiedenen Zuflüssen, die sein Wasser schnell erneuern (Tabelle 1). Die Aare fliesst durch den ganzen Kanton Bern und verbindet diese drei Seen.

| | Volumen [km ³] | Fläche [km ²] | Max. Tiefe [m] | Aufenthalts- zeit [Tage] | Einwohner- zahl |
|-------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|
| Brienzersee | 5.17 | 29.8 | 259 | 980 | 15'000 |
| Thunersee | 6.50 | 48.3 | 217 | 680 | 70'000 |
| Bielersee | 1.12 | 39.3 | 74 | 60 | 70'000 |

Tabelle 1 – Eigenschaften von Brienzer-, Thuner- und Bielersee. Ungefähre Einwohnerzahl abgeschätzt für die Ortschaften rund um den See (Abstand von max. 3 km).

Bei beiden Seen besteht aufgrund der umliegenden grösseren Orte (vor allem Thun und Biel) potenziell ein ansehnlicher künftiger Bedarf für Wärme- und Kältenutzung.

2. Rechtliche Grundlagen

Für Fließgewässer sind die maximal erlaubten Temperaturänderungen und die maximal erlaubten Temperaturen in der Gewässerschutzverordnung klar geregelt:

Die Temperatur eines Fließgewässers darf durch Wärmeeintrag der -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.¹

Im Gegensatz zu den Fließgewässern gibt es für Seen keine exakt definierte maximal erlaubte Temperaturveränderung:

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.²

In einem früheren Bericht [2] 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 (mit Ausnahme von sehr lokalen Veränderungen im Bereich von Rückleitungen).

3. Nutzungsrelevante Prozesse in den Seen

Am tiefsten Punkt der drei Seen werden seit mehr als 20 Jahren monatliche 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 im Seewasser geeignet. Jedoch erlauben solch lange Zeitreihen die Bestimmung von mittleren saisonalen Temperaturzyklen und starken Abkühlungsereignissen, sowie die Abschätzung von zeitlichen Trends.

¹ Anhang 2⁹⁰ Gewässerschutzverordnung (SR 814.201), 12 Zusätzliche Anforderungen an Fließgewässer, Absatz 4. Stand 2016.

² Anhang 2⁹⁰ Gewässerschutzverordnung (SR 814.201), 13 Zusätzliche Anforderungen an stehende Gewässer, Absatz 3. Stand 2016.

3.1. Wassertemperatur im Jahresverlauf

Die beobachteten Zeitreihen der Temperaturen im Brienersee sind in Abbildung 1 dargestellt. Diese sind weitgehend auch für den Thunersee repräsentativ. Der entsprechende mittlere jährliche Temperaturverlauf ist in Abbildung 2 gezeigt. Im Sommer bildet sich in beiden Seen eine ~30 m mächtige Oberflächenschicht aus (Epilimnion). Das Tiefenwasser (Hypolimnion) unterhalb von 60 m Tiefe bleibt vom saisonalen Zyklus weitgehend unbeeinflusst, und zeigt nur geringe Temperaturschwankungen zwischen 5 °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. In besonders kalten Wintern kühlen die Seen im Frühjahr soweit ab, dass der Wind die verbleibende geringe Schichtung durchbrechen kann und sich die gesamte Wassersäule durchmischt (z.B. im Winter 2005-06). An der tiefsten Stelle wurde im Brienersee im untersuchten Zeitraum ein Temperaturanstieg von 0.014 °C (\pm 0.002 °C) pro Jahr beobachtet.

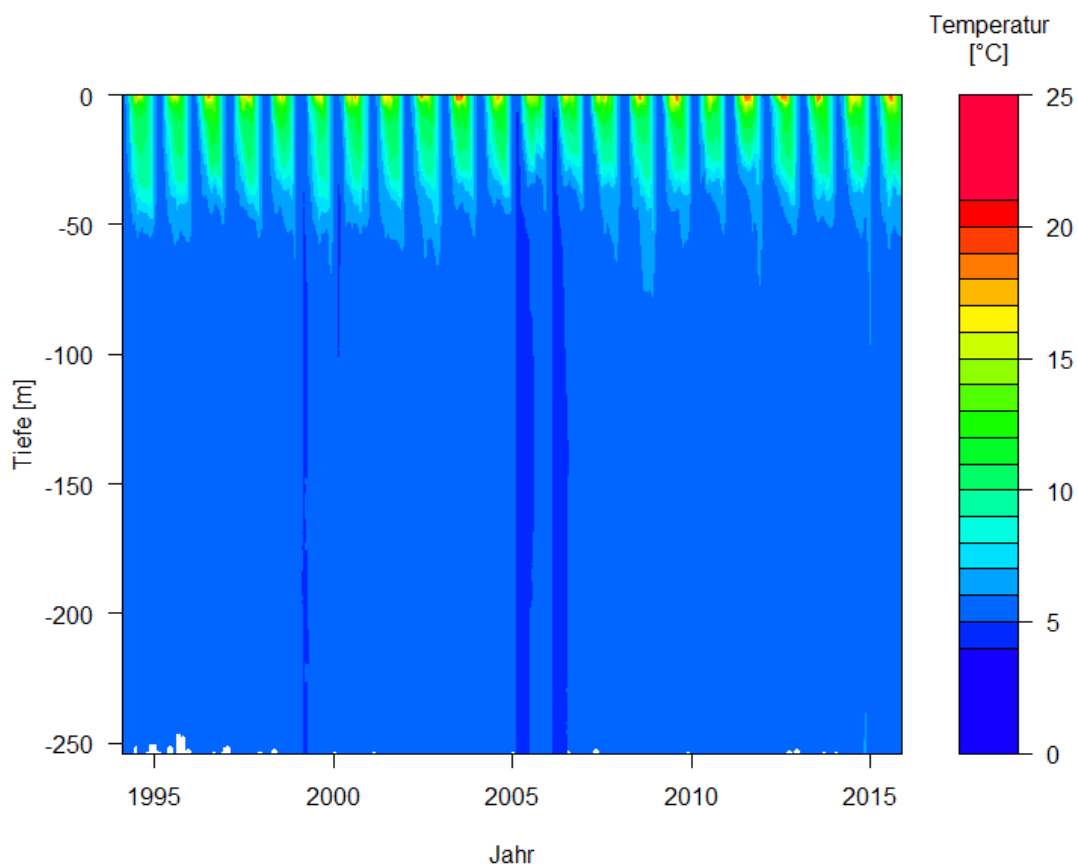


Abbildung 1 – Temperaturprofile seit 1994 im Brienersee.

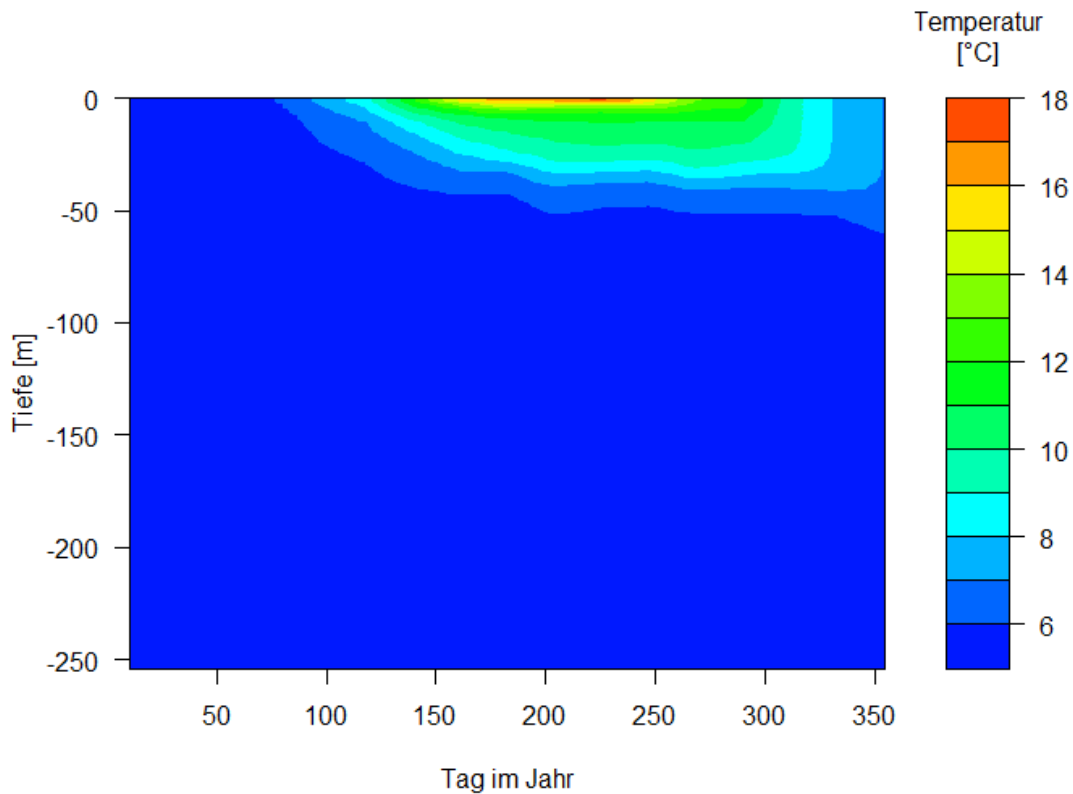


Abbildung 2 – Durchschnittlicher jährlicher Temperaturverlauf im Brienersee.

Abbildung 3 zeigt die im Bielersee von 1994 bis 2015 beobachteten Temperaturen. Der entsprechende mittlere jährliche Temperaturverlauf ist in Abbildung 4 dargestellt. Das Verhalten ist hier deutlich anders als in den beiden anderen Seen: der See ist seichter und die Aufenthaltszeit viel kürzer, was zu einer weniger stabilen Dichteschichtung und zu höheren Temperaturvariationen führt. Die Mischung wird zusätzlich durch die stärkere Windexposition unterstützt. Im Herbst führt die Mischung regelmässig zu einer Erwärmung bis in die tiefsten Schichten, und der See wird jeden Winter vollständig durchmischt. Insgesamt ist der Bielersee deutlich wärmer als Briener- und Thunersee, welche zudem im Sommer durch Schmelzwasser abgekühlt werden.

Für die Abschätzung des technischen Potenzials der beiden Seen für die Wärmenutzung ist es wichtig, die Statistik der Wassertemperaturen zu betrachten. Die beobachteten Mittelwerte, Maxima, und Minima sind für den Brienersee in Abbildung 5 und für den Bielersee in Abbildung 6 dargestellt.

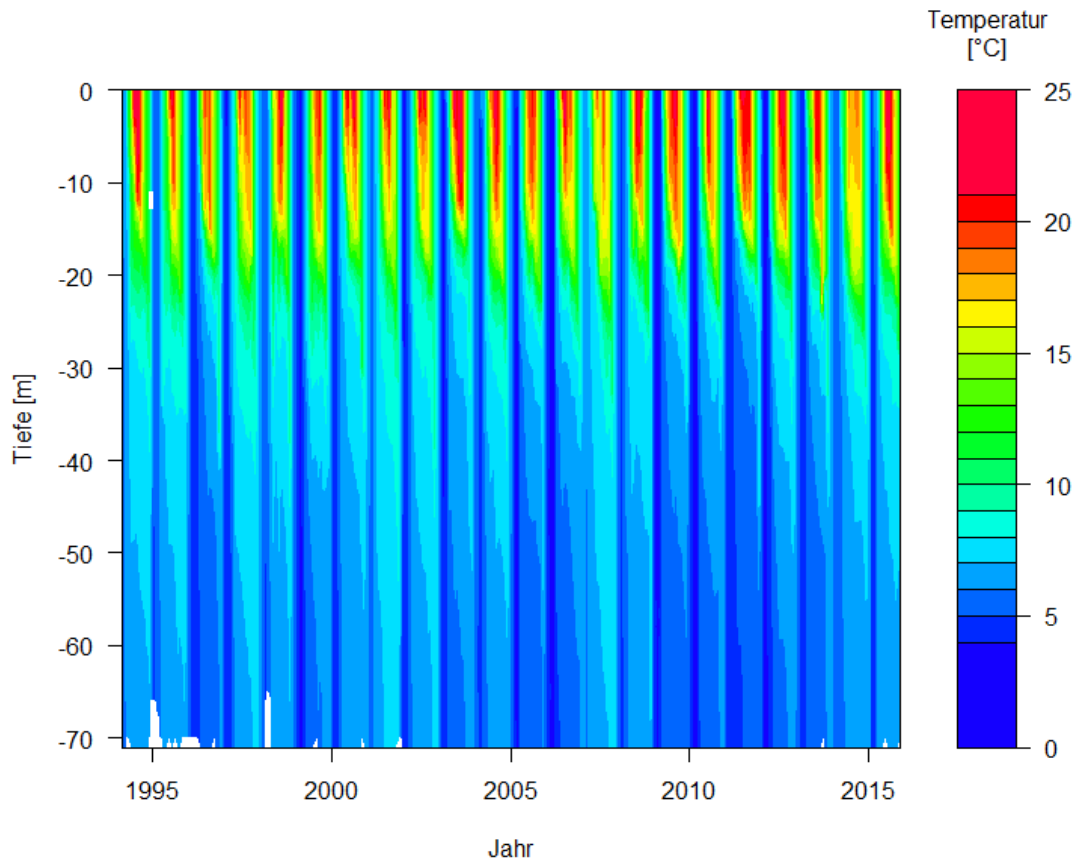


Abbildung 3 – Temperaturprofile seit 1994 im Bielensee.

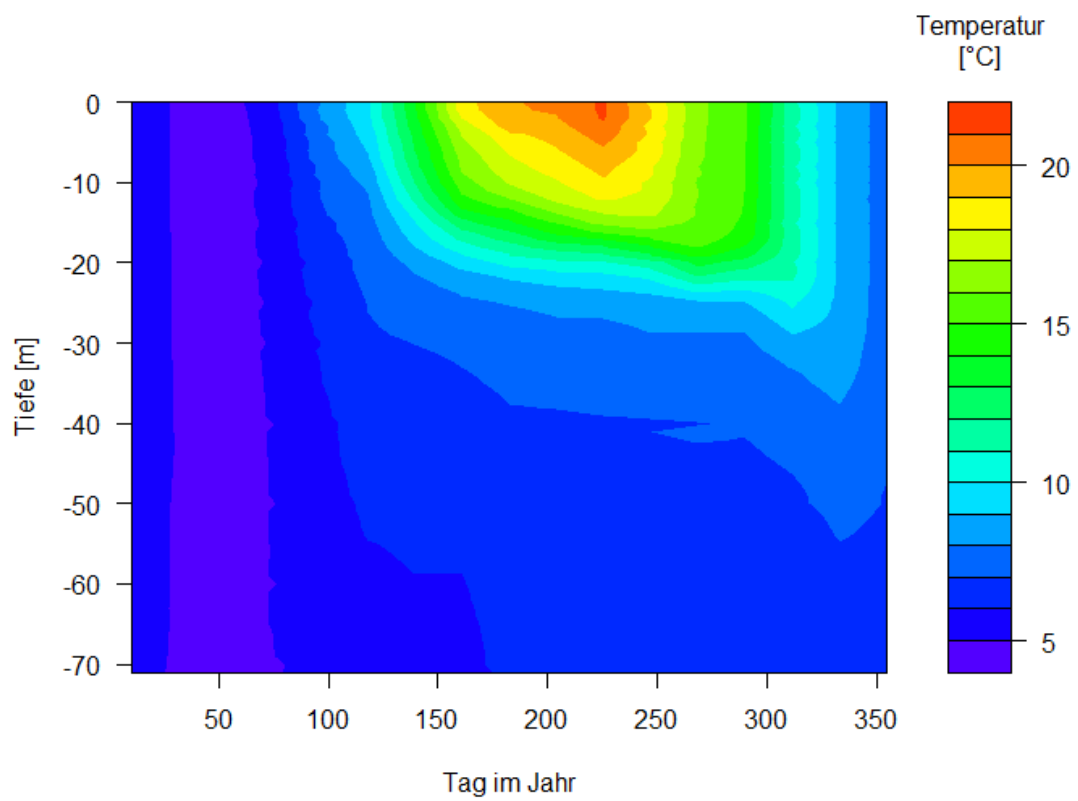


Abbildung 4 – Durchschnittlicher jährlicher Temperaturverlauf im Bielensee.

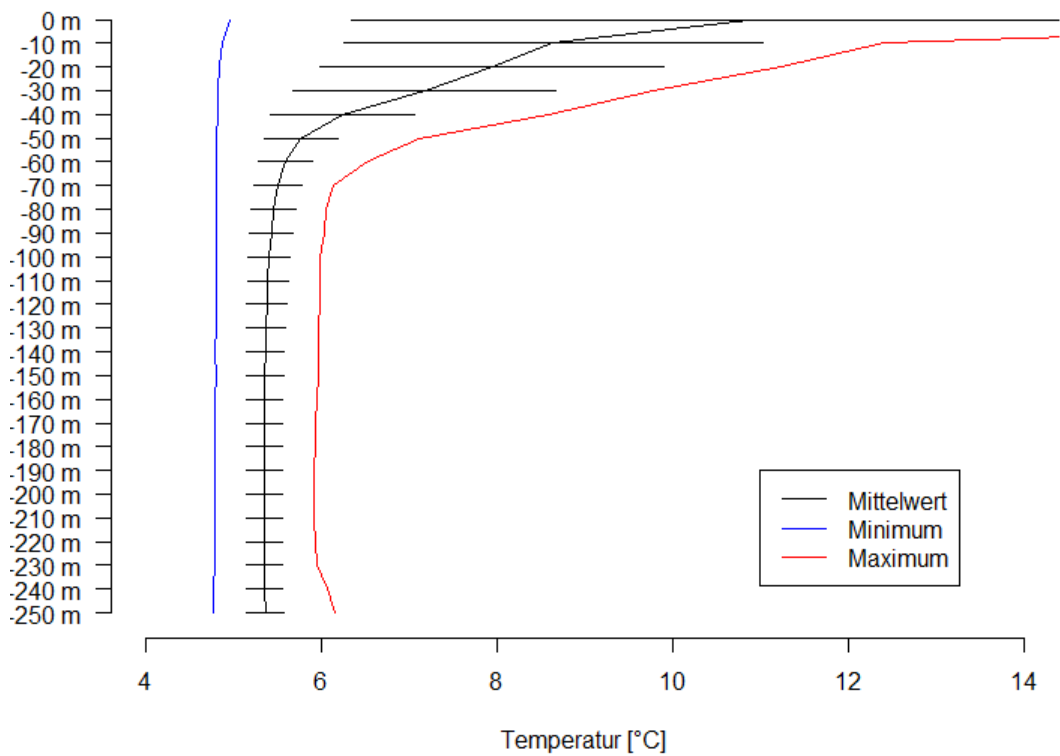


Abbildung 5 – Mittelwerte, Standardabweichungen, Minima und Maxima der Temperaturprofile im Brienzensee (1994-2015).

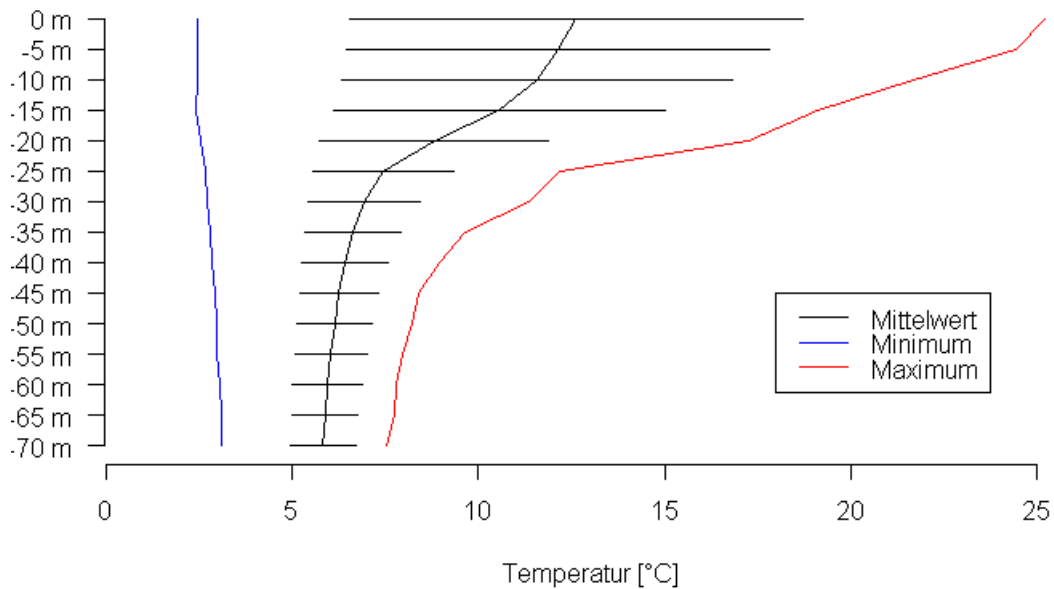


Abbildung 6 – Mittelwerte, Standardabweichungen, Minima und Maxima der Temperaturprofile im Bielersee (1994-2015). Die Temperaturskala unterscheidet sich von derjenigen in Abbildung 5.

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

- Im Briener- und Thunersee wurden keine Temperaturen unter 4.7 °C beobachtet. Daraus ergibt sich auch in kalten Wintern eine zuverlässige Wärmequelle. Wie erwartet sind die Temperaturen in tieferen Wasserschichten generell kälter und weniger variabel.
- Im Bielersee kann die Wassertemperatur in kalten Wintern (z.B. im Winter 2011-12) unter das Dichtemaximum von 4 °C sinken. In diesen Fällen ist das Tiefenwasser unterhalb von 10 bis 15 m Tiefe wärmer als die Oberfläche (Temperaturinversion).
- Ganzjährig ausreichend kühles Wasser für Kühlwassernutzungen ist erst in vergleichsweise tiefen Schichten vorhanden. Die Tiefe, in welcher die maximale Sommertemperatur (Mai bis September) weniger als 9 °C beträgt, und die sich daher zur Kältenutzung am besten eignet, ist 37 m im Brienersee, 28 m im Thunersee und 32 m im Bielersee. In den beiden Alpenseen bleibt die Temperatur ab 50 m Tiefe unterhalb von 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 bis 4 zeigen zu welchem Anteil bzw. an wie vielen Tagen die Temperaturen in verschiedenen Wassertiefen in den drei Seen unter bestimmte Schwellenwerte fallen.

| Tiefe | T < 5 °C | T < 5.5 °C | T < 6 °C | T < 7 °C |
|-------|----------|------------|-----------|------------|
| 0 m | 2% (4) | 17% (37) | 37% (78) | 52% (111) |
| 10 m | 5% (10) | 25% (52) | 43% (92) | 59% (125) |
| 20 m | 5% (11) | 27% (56) | 46% (98) | 61% (129) |
| 30 m | 7% (14) | 30% (63) | 51% (109) | 63% (133) |
| 40 m | 7% (15) | 31% (66) | 57% (120) | 78% (166) |
| 60 m | 8% (17) | 44% (93) | 92% (194) | 100% (212) |

Tabelle 2 – Brienersee (1979-2015): durchschnittlicher Anteil der Winterzeit, während welchem die Temperatur unter 5, 5.5, 6 und 7 °C sinkt. In Klammern: Anzahl Tage pro Heizsaison (Oktober bis April).

| Tiefe | T < 5 °C | T < 5.5 °C | T < 6 °C | T < 7 °C |
|-------|----------|------------|-----------|------------|
| 0 m | 7% (15) | 23% (48) | 35% (73) | 47% (100) |
| 10 m | 8% (17) | 24% (50) | 37% (79) | 50% (107) |
| 20 m | 10% (21) | 25% (54) | 42% (89) | 56% (118) |
| 30 m | 12% (25) | 33% (69) | 49% (104) | 63% (133) |
| 40 m | 11% (24) | 37% (79) | 61% (129) | 97% (206) |
| 60 m | 12% (25) | 54% (114) | 95% (202) | 100% (212) |

Tabelle 3 – Thunersee (1979-2015): durchschnittlicher Anteil der Winterzeit, während welchem die Temperatur unter 5, 5.5, 6 und 7 °C sinkt. In Klammern: Anzahl Tage pro Heizsaison (Oktober bis April).

| Tiefe | T < 4 °C | T < 5 °C | T < 6 °C | T < 7 °C |
|-------|----------|----------|-----------|-----------|
| 0 m | 8% (16) | 20% (43) | 32% (67) | 46% (98) |
| 10 m | 9% (18) | 24% (50) | 36% (76) | 51% (108) |
| 20 m | 9% (18) | 24% (50) | 39% (83) | 54% (115) |
| 30 m | 8% (17) | 25% (52) | 41% (88) | 58% (123) |
| 40 m | 7% (16) | 27% (57) | 45% (95) | 68% (145) |
| 60 m | 6% (13) | 29% (62) | 55% (117) | 87% (185) |

Tabelle 4 – Bielersee (1979-2015): durchschnittlicher Anteil der Winterzeit, während welchem die Temperatur unter 4, 5, 6 und 7 °C sinkt. In Klammern: Anzahl Tage pro Heizsaison (Oktober bis April).

Der Brienersee ist im Winter leicht wärmer als der Thunersee, und in beiden sind die Temperaturen deutlich weniger variabel als im Bielersee, wo eine relativ grosse Temperaturamplitude bis zum Seegrund beobachtet wird.

Im Bielersee werden im Winter oft Temperaturinversionen beobachtet. Sie breiten sich manchmal über die ganze Wassersäule aus. Diese Ereignisse sind wichtig für die Wärmenutzung, da sie an den kältesten Tagen auftreten, wenn auch der Heizbedarf am grössten ist. Tabelle 5 zeigt die Häufigkeiten und Stärke solcher Ereignisse, basierend auf den vorhandenen Daten. Die Temperaturinversionen sind in allen Schichten etwa gleich häufig, aber ihre Stärke nimmt mit der Tiefe ab (besonders ab einer Tiefe von 40 m). Die tiefsten beobachteten Temperaturen betragen 2.4 °C an der Seeoberfläche und 3.1 °C am tiefsten Punkt (Abbildung 6). Diese Temperaturinversionen und Tiefsttemperaturen sind für die Planung von Anlagen zur Wärmenutzung relevant.

| Tiefe | $T < T_{\text{Seegrund}}$ | $T_{\text{Seegrund}} - T$ (Mittelwert) |
|---------|---------------------------|---|
| 0-5 m | 18% | 0.201 °C |
| 10-15 m | 21% | 0.186 °C |
| 20-25 m | 21% | 0.186 °C |
| 30-35 m | 21% | 0.170 °C |
| 40-45 m | 21% | 0.138 °C |
| 50-55 m | 24% | 0.132 °C |
| 60-65 m | 18% | 0.065 °C |

Tabelle 5 – Bielersee (1979-2015): durchschnittlicher Anteil der Monate Dezember bis März, während welchem die Temperatur in einer bestimmten Tiefe unter die Seegrundtemperatur sinkt, und entsprechender durchschnittlicher Temperaturunterschied.

3.2. Natürliche Temperaturschwankungen

Interne Wellen können in der Wassersäule vertikale Auslenkungen von mehreren Metern bewirken. Deshalb kann 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 [15] (Abbildung 7). In mittleren Tiefen wird das besonders bei Stürmen im Herbst beobachtet. Bei der Auslegung der Anlage für den Wärmeentzug muss diesem Umstand Rechnung getragen werden. Für die Biota der Seen sind somit kurzfristige Temperaturschwankungen kein neues Phänomen.

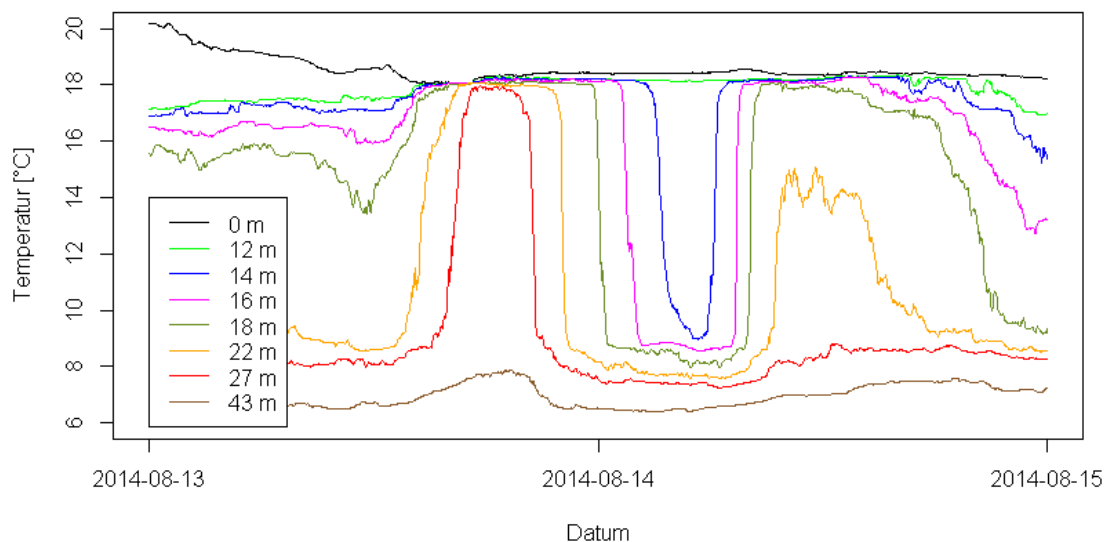


Abbildung 7 – Temperatur-Zeitreihen während eines Sturms im Bielersee. Im Bereich der Thermokline wurden innerhalb von wenigen Stunden Temperaturschwankungen von bis zu 10 °C beobachtet.

3.3. Morphologie

In Seen mit einer speziellen Morphologie können bestimmte Wasserkörper isoliert bleiben und daher viel längere Aufenthaltszeiten aufweisen. Es ist in solchen Fällen wichtig, dass die Seenutzung gut auf die verschiedenen Becken verteilt ist, um mögliche negative lokale Effekte zu vermeiden.

Der Bielersee besteht aus drei Becken. Aufgrund dieser speziellen Morphologie und der Anordnung der Zu- und Abflüsse besteht vor allem beim Lüscherzerbecken und in geringerem Mass im Neuenstädterbecken ein gewisses Risiko von erhöhten lokalen Auswirkungen. Das Lüscherzerbecken entspricht ca. einem Drittel des Seevolumens und ist vom Hauptbecken durch eine rund 10 m hohe Schwelle leicht getrennt. Es wird deshalb empfohlen, die Wärmenutzung im Lüscherzerbecken auf ein Drittel der im folgenden Kapitel berechneten Nutzungspotenziale zu beschränken. Das Neuenstädterbecken hat zwar ein noch geringeres Volumen, wird aber durch den Zufluss vom Zihlkanal in der Regel innerhalb von wenigen Monaten durchgespült, was die Auswirkungen einer thermischen Nutzung mildert. Im Brienzer- und Thunersee ist hingegen nicht zu erwarten, dass die Morphologie bei der Wärmeverteilung eine Rolle spielt.

3.4. Klimatische Erwärmung der Seen

Aufgrund des Klimawandels haben sich die Seen schon messbar erwärmt, und es ist zu erwarten, dass sie sich in Zukunft weiter erwärmen werden. Weil die Ökosysteme eine gewisse Zeit benötigen, um sich an einen neuen Zustand anzupassen, ist allerdings nicht nur die Höhe der zukünftigen Erwärmung relevant, sondern auch die Geschwindigkeit, mit welcher diese erreicht wird. Die Klimaerwärmung führt zudem zu einer schnelleren Erwärmung in der Oberflächenschicht als im Tiefenwasser und entsprechend zu einer Verstärkung der Dichteschichtung im Sommer [12]. Die Sommerschichtung bildet sich im Frühling früher aus, und dauert im Herbst länger an, wodurch die Dauer der geschichteten Periode verlängert und die gesamte Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser während der Schichtung erhöht werden [10]. Ausserdem werden mehr Hitzesommer und, langfristig gesehen, deutlich wärmere Winter erwartet [3].

Eine Nutzung von Brienzer-, Thuner- und Bielersee als Kältequelle im Sommer würde die Geschwindigkeit der Erwärmung der Seen weiter erhöhen und damit dem Ökosystem die Anpassung an den Klimawandel erschweren. Entsprechend ist ein Wärmeeintrag in den See auf jeden Fall

kritischer zu beurteilen als eine Wärmeentnahme. Es wurde mehrfach gezeigt [13] [14], dass die Abkühlung eines Sees durch Wärmeentnahmen in einem beschränkten Mass helfen könnte, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Temperaturen im See – allerdings nur sehr geringfügig – zu mildern.

3.5. Nährstoffe und ökologisches Gleichgewicht

Der Brienersee ist ein nährstoffarmes (oligotrophes) Gewässer, mit geringer biologischer Produktion. Dafür verantwortlich ist hauptsächlich sein vergletschertes Einzugsgebiet, aus welchem nur wenig Nährstoffe aber hohe Konzentrationen von Schwebstoffen eingetragen werden [9]. Im Thunersee ist die Situation ähnlich, wobei die biologische Aktivität wegen des klareren Wassers etwas höher ist. In beiden Seen ist bis zum Seegrund genügend Sauerstoff vorhanden.

Der Bielersee ist nährstoffreicher und kann als meso-eutroph bezeichnet werden. In den tiefsten Schichten fallen die Sauerstoffkonzentrationen gegen Ende der sommerlichen Schichtung regelmässig unter die gesetzliche Anforderung von 4 mg/L. Im Sommer werden auch zwischen 10 und 25 m Tiefe niedrige Werte beobachtet, welche durch den Abbau von frischem organischem Material aus den produktiven überliegenden Schichten verursacht werden.

Die Wassertemperatur im Sommer ist im Bielersee oft nahe am oberen Ende des optimalen Temperaturbereichs einiger der anwesenden Makroorganismen. So werden gewisse Fischarten (z.B. die Salmoniden) durch Temperaturen über 20 °C beeinträchtigt. Es ist davon auszugehen, dass dieser Effekt in Zukunft durch den Klimawandel noch verstärkt wird.

4. Praktische Betrachtungen zur Energienutzung

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 sind die Seen vertikal weitgehend homogen. Rückgabewasser, das generell kühler ist als das Umgebungswasser, kann sich daher mit einem grossen Volumen mischen. Um das Potenzial der Seen abzuschätzen, wird hier angenommen, dass sich das Rückgabewasser über das ganze Seevolumen verteilen kann, und dass die maximal erlaubte Abkühlung des ganzen Volumens 0.5 °C beträgt. Da Temperaturänderungen von 0.5 °C bereits gewisse ökologische Folgen haben können, und da sich tiefe Seen oft nicht bis zum Seegrund vollständig mischen, wurde als zweite Option das Potenzial für das Volumen zwischen der Oberfläche und 100 m Tiefe (50 m für den Bielersee) und für eine maximal erlaubte 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 6 angegeben.

| | Potenzial bei max. Abkühlung um 0.5 °C | Potenzial bei max. Abkühlung um 0.2 °C |
|-------------|--|--|
| Brienzersee | 10'860 TJ (1'370 MW) | 2'120 TJ (270 MW) |
| Thunersee | 13'650 TJ (1'720 MW) | 3'260 TJ (412 MW) |
| Bielersee | 2'360 TJ (300 MW) | 890 TJ (111 MW) |

Tabelle 6 – Wärmenutzungspotenziale des Brienzer-, Thuner- und Bielersees. Die berechnete mittlere Leistung entspricht einem Betrieb während 2200 Stunden.

In kalten Wintern wurde im Bielersee beobachtet, dass die ganze Wassersäule unter 4 °C abgekühlt wird. Es ist zwar davon auszugehen, dass die Häufigkeit 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 wohl effizienter. Andererseits sind aber die obersten Schichten aus mehreren Gründen besonders heikel: die Temperaturschwankungen sind höher, im Winter können sich Temperaturinversionen ausbilden, und die biologischen und menschlichen Aktivitäten sind nahe der Oberfläche am grössten. Es ist deshalb sinnvoll, in den Alpenseen Wasserentnahmen in mindestens 10 m Tiefe zu planen, und im Bielersee in mindestens 20 m Tiefe.

Da die Seen im Winter nicht geschichtet sind und deshalb keine Nährstoffe umgeschichtet werden können, ist die Tiefe der Wasserrückgabe im Winter kein kritischer Parameter [16]. Das benutzte (gekühlte) Wasser kann entweder zurück in den See geleitet werden, oder auch in den Seeabfluss – sofern die Flusstemperatur dadurch nicht zu stark verändert wird. Da die Aare einen grossen Abfluss aufweist (im Winter generell mehr als 10 m³/s, 30 m³/s und 90 m³/s aus dem Briener-, Thuner- bzw. Bielersee), könnte problemlos ein wesentlicher Teil der Rückgabe dorthin erfolgen. Um die Potenziale abzuschätzen wird angenommen, dass das entnommene Seewasser um 5 °C abgekühlt wird und 20% der oben genannten Abflüsse durch rückgeleitetes Wasser ersetzt werden (Tabelle 7). Unter diesen Bedingungen beträgt die Abkühlung der Aare nach völliger Mischung etwa 1 °C. Restriktiver könnte die Abkühlung der Aare auch auf 0.5 °C begrenzt werden, wodurch die angegebenen Potenziale halbiert würden.

| | Abflussmenge | Potenzial |
|-------------------------|----------------------|-------------------|
| Aare aus dem Brienersee | 2 m ³ /s | 330 TJ (42 MW) |
| Aare aus dem Thunersee | 6 m ³ /s | 1'000 TJ (126 MW) |
| Aare aus dem Bielersee | 18 m ³ /s | 3'000 TJ (378 MW) |

Tabelle 7 – Wärmenutzungspotenziale bei einer Rückgabe in die Seeabflüsse.
Die berechnete gesamte Wärmeenergie entspricht jeweils einer konstanten Nutzung mit der gegebenen Leistung über 2200 Stunden.

4.2. Wärmeeintrag im Sommer

Während des Sommerhalbjahrs 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.

Generell ist eine zusätzliche Erwärmung durch Kältenutzung in den Schweizer Gewässern aus zwei Gründen viel kritischer zu beurteilen als eine Abkühlung durch Wärmenutzung: erstens ist aufgrund des Klimawandels auch so von einer zusätzlichen Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten auszugehen, und zweitens sind die Temperaturbedingungen heute schon nahe an der Obergrenze der Temperaturpräferenzen eines Teils der einheimischen Fauna [8]. Bei einer Rückleitung von erwärmtem Wasser aus Kältenutzungen in den Seeabfluss ist eine Entnahmetiefe von mindestens 30 bis 40 m im See nötig; das Wasser ist in dieser Tiefe während des ganzen Sommers genügend kalt, dass es auch nach der Nutzung noch kühler als das Oberflächenwasser ist.

In manchen Seen besteht das Risiko, dass durch Wärme- und Kältenutzungen der Nährstoffhaushalt beeinflusst wird, wenn zum Beispiel nährstoffreiches Tiefenwasser nach der Nutzung in die Oberflächenschicht eingeleitet wird. In den beiden oligotrophen Alpenseen besteht diese Gefahr nicht, weil die Unterschiede in den Nährstoffkonzentrationen zwischen den verschiedenen Schichten sehr gering sind. Im Bielersee hingegen würde eine Rückleitung ins Oberflächenwasser einen zusätzlichen Eintrag von Nährstoffen bewirken. Für eine Kältenutzung von 740 TJ während des Sommers (Tabelle 8) mit einem Temperaturunterschied von 10 °C würden maximal 32'000 kg Stickstoff bzw. 450 kg Phosphor aus dem Tiefenwasser ins Oberflächenwasser verschoben. Dies entspricht etwa 1% der Nährstoffe, welche im gleichen Zeitraum von der Aare in den See eingebracht werden [1]. Entsprechend wären die Auswirkungen dieses zusätzlichen Nährstoffeintrags auch im Bielersee gering.

Eine Wasserrückgabe ins Oberflächenwasser bewirkt allerdings auch eine Absenkung der Sprungschicht und ist deshalb für grössere Mengen (mehrere m³/s) dennoch nicht zu empfehlen. Beispielsweise würde ein konstanter Fluss von 1.5 m³/s aus dem Tiefenwasser ins Epilimnion die Sprungschicht des Bielersees während des Sommers um rund einen halben Meter absenken. Als Folge davon würde wahrscheinlich auch die Sommerschichtung verstärkt und verlängert, und damit die Auswirkungen des Klimawandels weiter verstärkt. Es ist deshalb zu empfehlen, grössere Wassermengen generell in tiefere Schichten zurückzuleiten.

Die Schichtung begrenzt die Ausbreitung des Rückgabewassers im Sommer. Weil das Letztere 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 30 m und 80 m Tiefe verteilt (30 m und 70 m im Bielersee), und eine maximale Temperaturveränderung von 0.5 °C erlaubt ist. In einer zweiten Berechnung wird die Wärme zwischen 40 m und 70 m Tiefe verteilt (40 m und 60 m im Bielersee) und die maximal erlaubte Erwärmung beträgt 0.2 °C. Daraus ergibt sich, analog zur Wärmenutzung (siehe oben), ein Potenzial, welches kaum messbare Auswirkungen haben dürfte. Die entsprechenden Werte für die drei Seen sind in Tabelle 8 aufgeführt.

| | Potenzial bei max. Erwärmung um 0.5 °C | Potenzial bei max. Erwärmung um 0.2 °C |
|-------------|---|---|
| Brienzersee | 2'550 TJ (320 MW) | 610 TJ (77 MW) |
| Thunersee | 4'000 TJ (500 MW) | 960 TJ (120 MW) |
| Bielersee | 740 TJ (93 MW) | 140 TJ (17 MW) |

Tabelle 8 – Kältenutzungspotenziale des Brienzer-, Thuner- und Bielersees. Die berechnete mittlere Leistung entspricht einem Betrieb während 2200 Stunden.

Ein zusätzliches Potenzial ergibt sich, wenn das erwärmte Wasser in den Seeabfluss (Aare) abgegeben werden kann. Weil das Tiefenwasser während des Sommers immer deutlich kälter ist als die Aare, kann es selbst nach der Erwärmung durch die Nutzung noch in die Aare eingetragen werden, ohne diese zu erwärmen. Für die Berechnung der entsprechenden Potenziale in Tabelle 9 wurden folgende Annahmen getroffen: das gefasste Wasser weist eine Temperatur von 8 °C auf und wird durch die Kältenutzung vor der Rückleitung in die Aare um 10 °C erwärmt, und die eingeleitete Wassermenge beträgt 5% des mittleren natürlichen Abflusses im Sommer. Diese Annahmen entsprechen den Bedingungen, dass die Aare nicht zusätzlich erwärmt wird und die eingeleitete Wassermenge im Vergleich zum natürlichen Abfluss klein sein soll.

Die abgeschätzten Potenziale sind für die beiden Alpenseen in etwa gleich gross wie für die Rückleitung in den See (Tabelle 8), für den Bielersee sogar deutlich höher. Die Nutzung ist hier wohl nicht durch das Potenzial sondern eher durch den regionalen Bedarf begrenzt. Die Ableitung von grösseren Wassermengen aus dem Tiefenwasser in den Abfluss ist allerdings auch wegen der Absenkung der Sprungschicht (siehe oben) nicht empfehlenswert. Deshalb sind in Tabelle 9 zusätzlich die Potenziale angegeben, für welche die Absenkung der Sprungschicht 1 m nicht überschreitet. Bei einem Temperaturgradienten von 0.5 °C/m, einem üblichen Wert für die drei untersuchten Seen, entspricht dies einer Erwärmung von 0.5°C im entsprechenden Tiefenbereich. Als restriktivere Forderung könnte die Absenkung der Sprungschicht auf 0.5 m begrenzt werden, wodurch sich die angegebenen Potenziale halbieren würden.

| | Abflussmenge | Potenzial bei der angegebenen Abflussmenge | Potenzial bei max. Absenkung der Sprungschicht um 1 m |
|--------------------------|----------------------|--|---|
| Aare aus dem Brienzersee | 5 m ³ /s | 1'650 TJ (210 MW) | 1'830 TJ (230 MW) |
| Aare aus dem Thunersee | 10 m ³ /s | 3'300 TJ (420 MW) | 1'150 TJ (145 MW) |
| Aare aus dem Bielersee | 15 m ³ /s | 5'000 TJ (630 MW) | 1'000 TJ (125 MW) |

Tabelle 9 – Kältenutzungspotenziale bei einer Rückgabe in die Seeabflüsse. Die berechnete gesamte Energie entspricht jeweils einer konstanten Nutzung mit der gegebenen Leistung über 2200 Stunden. Das jeweils kleinere der beiden Potenziale gilt, wenn beide Kriterien (Abflussmengen und Absenkung der Sprungschicht) angewendet werden.

4.3. Durchmischung

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 auch 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 [7]. Diese Veränderung beträgt nur wenige Tage, sie verstärkt aber die Auswirkungen des Klimawandels, der ebenfalls zu einer Verlängerung der Stagnation führt.

4.4. Ökologische Auswirkungen

In den beiden grossen, oligotrophen Seen (Brienzer- und Thunersee) wird nicht erwartet, dass aufgrund der Seewassernutzung kritische Temperaturen für die im See lebenden Organismen erreicht werden. Wie bereits erwähnt, sollte im Bielersee erwärmtes Wasser besonders im Sommer nicht in die oberen Schichten zurückgeleitet werden. Die möglichen Auswirkungen einer solchen Rückleitung wären verstärkte Eutrophierung und eine Benachteiligung von Organismen, welche kühlere Temperaturen bevorzugen.

Im Sommer ist eine tiefere Temperatur grundsätzlich positiv für das Ökosystem entlang der gesamten Aarestrecke (von Thun bis zur Mündung in dem Rhein). Verschiedene Faktoren haben die Temperaturen in der Aare in den letzten Jahrzehnten deutlich erwärmt, insbesondere im Frühling und Sommer. Höhere Sommertemperaturen begünstigen Fischkrankheiten wie die Proliferative Nierenkrankheit (PKD), senken den Sauerstoffgehalt des

Wassers und erhöhen den physiologischen Stress von kälteliebenden Arten wie Bachforellen und Äschen [5]. Die Einleitung von kühlerem Wasser in die Aare könnte den Trend zur Erwärmung etwas abschwächen, allerdings selbst bei intensiver Nutzung kaum mehr als um wenige Zehntel Grad. Das entnommene Seewasser müsste zu diesem Zweck nach der Nutzung noch kühler sein als des Flusswasser, bzw. das Oberflächenwasser des Sees.

4.5. Derzeitige Nutzungen

Seenutzungen

Im Briener- und im Thunersee bestehen bereits einige kleine Wärmenutzungsanlagen, meistens zur Heizung von Schwimmbädern, Hotels und Büros. Die gesamte Leistung der bestehenden Anlagen ist im Vergleich zu den oben genannten Wärmepotenzialen aber sehr gering. Zusätzlich sind Trinkwasserentnahmen und Abwassereinleitungen vorhanden. Letztere leiten Abwassermengen von etwa 10'000 Einwohnergleichwerten in den Brienersee, 70'000 in den Thunersee und 10'000 in den Bielersee.

Bei der Planung neuer Anlagen sind Nutzungskonflikte mit diesen bestehenden Anlagen zu berücksichtigen. Zum Beispiel soll kein Kurzschluss zwischen Entnahme und Rückgabe zweier Anlagen auftreten, und die Umgebung von bestehenden Abwasser- und Hochwassereinleitungen sollte gemieden werden.

Aarenutzung: Kernkraftwerk Mühleberg

Seit einigen Jahrzehnten wird Aarewasser zur Kühlung des Kernkraftwerks Mühleberg verwendet. Dadurch wird die Aare im Jahresmittel um 1.3 °C erwärmt (bis zu 3.4 °C im Winter) [4]. Berechnungen haben gezeigt, dass der Hauptteil dieser zusätzlichen anthropogenen Wärme den Bielersee erreicht, welcher durchschnittlich um etwa 0.3 °C erwärmt wird [11]. Am stärksten sind die Auswirkungen auf den See im Winter mit einer Erwärmung von bis zu 0.6 °C. Die Abwärme kann zudem die Sommerstagnation um einige Tage verlängern. Das Potenzial des Bielersees für die Kältenutzung ist demnach durch die Kühlung des Kernkraftwerks bereits weitgehend ausgeschöpft, mit Ausnahme der Nutzung mit Rückleitung in den Seeabfluss. Die geplante Abschaltung des Kernkraftwerkes wird dieses Potenzial in Zukunft wieder freisetzen. Allerdings wird durch die fehlende Erwärmung des Bielersees dann gleichzeitig auch die Effizienz der Wärmenutzung vermindert. Diese Effekte sind aber schwach im Vergleich mit denjenigen, die in Zukunft aufgrund der Klimaerwärmung erwartet werden.

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) sollte kein Kühlwasser in die Oberfläche eingeleitet werden (d.h., die Rückgabe soll unterhalb der Sprungschicht erfolgen). Zu beachten sind:

- Die Erwärmung des betroffenen Rückgabevolumens im See
- Allfällige künstlich erzeugte Nährstoffflüsse

Dabei ist die Erwärmung des Sees durch die Kältenutzung, insbesondere im Zusammenhang mit der voraussehbaren Klimaerwärmung, kritischer zu beurteilen als die Abkühlung durch Wärmenutzung.

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

| Gegenstand | Zur Beurteilung notwendige Informationen | Empfehlungen |
|--|--|---|
| Nutzung | Leistung; Wärmeflüsse | |
| Entnahme | Ort und Tiefe; saisonal aufgelöste Entnahmemenge | Nutzungskonflikte vermeiden; Effizienz optimieren |
| Rückgabe | Ort und Tiefe; saisonal aufgelöste Temperatur | Grosse Wassermengen unterhalb der Sprungschicht zurückgeben |
| Vermischungszone und Einschichtungstiefe | Abschätzung | Erklärung im Anhang (Online-Tool) |
| Erwärmung im Rückgabevolumen des Sees | Abschätzung | ΔT max. 0.5 °C |
| Erwärmung des Seeabflusses | Abschätzung | Maximaltemperaturen nicht erhöhen |

5.2. Optimale Wasserfassungstiefe

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

- Im Briener- und Thunersee
 - Für Wärmenutzung, zwischen 20 und 30 m Tiefe
 - Für Kältenutzung, zwischen 30 und 60 m Tiefe
 - Für kombinierte Anlagen mit einer einzigen Fassung in rund 30 m Tiefe
- Im Bielersee
 - Für Wärmenutzung, zwischen 20 und 30 m Tiefe
 - Für Kältenutzung, zwischen 40 und 70 m Tiefe
 - Für kombinierte Anlagen mit einer einzigen Fassung in rund 35 m Tiefe

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

5.3. Potenzial

Für die drei Seen und die beiden Formen der Energienutzung wurden jeweils zwei Potenziale berechnet, eines mit grosszügigeren und eines mit restriktiveren Annahmen für die erlaubten Temperaturveränderungen und die beeinflussten Volumen. Aus diesen Berechnungen ergibt sich jeweils ein „grüner Bereich“ (kaum messbare Auswirkungen) und ein „oranger Bereich“ (keine wesentlichen ökologischen Auswirkungen erwartet), welche in Tabelle 10 zusammengefasst sind. Beim Bielersee sollte zudem weniger als ein Drittel des Nutzungspotenzials im Lüscherzerbecken erfolgen.

| Nutzung | Rückgabe | Brienersee | Thunersee | Bielersee |
|-----------------------------|----------|------------|-----------|-----------|
| Heizen (Winterhalbjahr) | See | 2'120 TJ | 3'260 TJ | 890 TJ |
| | | 10'860 TJ | 13'650 TJ | 2'360 TJ |
| | Abfluss | 165 TJ | 500 TJ | 1'500 TJ |
| | | 330 TJ | 1'000 TJ | 3'000 TJ |
| Kühlung (Sommerhalbjahr) | See | 610 TJ | 960 TJ | 140 TJ |
| | | 2'550 TJ | 4'000 TJ | 740 TJ |
| | Abfluss | 915 TJ | 575 TJ | 500 TJ |
| | | 1'650 TJ | 1'150 TJ | 1'000 TJ |

Tabelle 10 – Zusammenfassung der Wärme- und Kältenutzungspotenziale des Briener-, Thuner- und Bielersee.

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, ist eine vertiefte Analyse angezeigt. Dies gilt insbesondere für den Fall eines grossen Wärmeeintrags, dessen Auswirkungen in Verbindung mit denjenigen der Klimaerwärmung beurteilt werden müssen. Lokal können höhere Temperaturveränderungen auftreten, als diejenigen, welche für die Abschätzung erwähnt wurden; dies sollte aber keine wesentlichen ökologischen Auswirkungen haben (siehe auch Erläuterungen zur Vermischungszone im Anhang).

Zwei grössere Städte (Thun und Biel) befinden sich direkt an den Seeabflüssen. Geplante Wärme- und vor allem Kältenutzungen in diesen Städten sollten das genutzte Wasser möglichst in die Aare einleiten und damit das Potenzial der Aare nutzen, um das Nutzungspotenzial der Seen für weiter aufwärts gelegene Anlagen nicht unnötig einzuschränken.

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 grundsätzlich drei Vorteile: (a) die Effizienz der Wärmepumpen steigt, da Kühlen die Wassertemperaturen im Kreislauf erhöht, (b) der Wasserfluss im Kreislauf wird reduziert, da Wasser mehrfach genutzt werden kann (Abwärme wirkt gleichzeitig als Heizung), und (c) die Zahl der Fassungen im See und das Leitungsvolumen wird reduziert. Wenn ein Nutzungsgebiet (wie beispielsweise die Städte Thun oder Biel) an einem Seeabfluss liegt, besteht zudem die Möglichkeit der Rückgabe des Wassers in den Abfluss, was das Potenzial weiter erhöhen kann. Selbstverständlich ist auch eine Kombination von beiden Rückgaben möglich. Bei einer kombinierten Nutzung für Kühlung und Heizung können sich auch die Auswirkungen auf die Temperaturen im See teilweise kompensieren [6].

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 Wassertemperatur um 6 °C im Briener- und Thunersee und um 5 °C im Bielersee zu optimieren.

Bei der Planung von Wasserentnahmen sind uferökologische Argumente (wichtige Laichgebiete, Naturschutzgebiete, usw.) sowie andere Nutzungen (Einleitungen, Fischfang, usw.) zu berücksichtigen.

Bei der Planung von Filtern und Wärmetauschern ist das Vorhandensein von Phyto- und Zooplankton sowie von Muscheln zu berücksichtigen. Der Betrieb sollte durch deren Anwesenheit möglichst nicht gestört werden. Idealerweise zirkuliert das Seewasser in einer separaten Schleife, die vom Wärmenetz getrennt bleibt. Ansonsten müssen die feinen Anlagen wegen Biofilmmakulation regelmässig chemisch und zuweilen mechanisch gereinigt werden.

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

7. Referenzen

- [1] BAFU (2010). Wasserqualität, Basisdaten aus dem Biodiversitäts-Monitoring Schweiz BDM. Bericht E13.
- [2] BEW (1981). Wärmepumpen an Oberflächengewässern. Studie Nr. 19. Bundesamt für Energiewirtschaft. Bericht, Eawag, Dübendorf (Güttinger, H. und Imboden, D. M.).
- [3] CH2014-Impacts (2014). Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, 136 pp.
- [4] Eawag (1997). Auswirkungen des Kernkraftwerkes Mühleberg auf den Wärmehaushalt der Aare. GBL, Eawag, Dübendorf.
- [5] Escher, M., Bettge, K. & Wedekind, C. (2012). Gewässerzustand Aaretal, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 187 pp.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Hunziker, S. & Wüest, A. (2011). Anthropogene Temperaturveränderungen in Flüssen und Seen – eine Literaturanalyse. KlimBo Teilprojekt 2.a.
- [9] Jordi, B., Bossard, P., Breitenstein, M., Bürgi, H. R., Filella, M., Finger, D., Huggenberger, P., Jakob, A., Jaun, L., Kirchhofer, A., Müller, B., Rellstab, C., Spaak, P., Sturm, M., Wüest, A. & Zeh, M. (2006). Brienzersee: ein Ökosystem unter der Lupe, 24 pp.
- [10] 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.
- [11] Raman, R.L. (Manuscript in preparation).
- [12] 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.
- [13] Schmid, M. & Drosner, L. (2014). Energieverbund Zug Machbarkeitsstudie, Technischer Bericht Seewasser, Bericht zH Stadt Zug und AfU Zug.
- [14] Schmid, M. (2014). Abschätzung des Potenzials des Ägerisees für die Wärme- und Kältenutzung, Bericht zH AfU Zug.

- [15] Wüest, A. & Fink, G. (2014). Potential zur Wärme- und Kühlenergienutzung aus dem Vierwaldstättersee, Machbarkeit, Bericht zH AKV, AfU Nidwalden, Stans und Uwe Kanton Luzern.
- [16] 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 ein aufsteigender Schleier entsteht. Während des Aufsteigens mischt sich kühleres Umgebungswasser ein bis sich der Schleier 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, den Wasserfluss und Grösse der Rohröffnung (oder die 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 Rückgabentiefe des thermisch genutzten Wassers so zu wählen, dass die Einschichtung in einer Zone zwischen 20 bis 60 Meter Wassertiefe erfolgt.
- Die Temperaturänderung ausserhalb der Mischungszone, welche sich bei der Wasserrückgabe bildet, muss kleiner als 1 °C sein. Als Mischungszone gilt ein Bereich von 20 mal 20 Meter horizontaler und 10 Meter vertikaler Ausdehnung (vgl. Abbildung).

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

http://193.197.158.229/igkb_therm/igkb_therm_jet.php

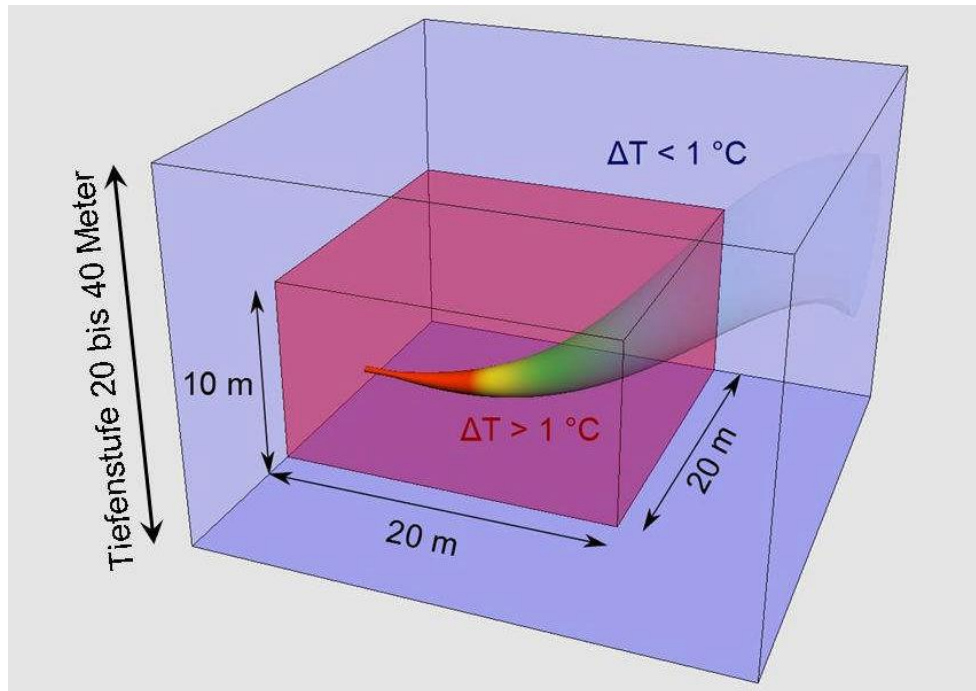


Abbildung – Schematische Darstellung der Mischungszone (IGKB, 2014)

Referenz

IGKB (2014). Bodensee-Richtlinien 2005 (mit Änderung des Kapitels 5 vom 13.05.2014)