

KANTONE
URI, SCHWYZ, OBWALDEN
NIDWALDEN, LUZERN



AUFSICHTSKOMMISSION
VIERWALDSTÄTTERSEE



Potential zur Wärme- und Kühlenergie- nutzung aus dem Vierwaldstättersee

Wärmeentzug (Heizen) und Einleitung von Kühlwasser

Machbarkeit

Dezember 2014

Dank

Ich möchte mich bei den Fachkollegen von uwe Luzern und der AKV, welche die Arbeit mit Unterlagen, Diskussionen und schriftlichem Input unterstützt haben, herzlich bedanken; insbesondere bei Philipp Arnold, Werner Göggel, Moritz Kulawik, Robert Lovas und Gérald Richner. Bei Eliane Scharmin bedanke ich mich für Figuren und Durchsicht.

Autoren	Alfred Wüest	Eawag – Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum EPFL – ENAC/IEE/APHYS, 1015 Lausanne
	Gabriel Fink	Eawag – Seestrasse 79, 6047 Kastanienbaum
Auftraggeber	Aufsichtskommission Vierwaldstättersee (AKV), c/o AfU NW, Stans Umwelt und Energie (Uwe), Kanton LU, Luzern	

Kastanienbaum, im Dezember 2014

1 Hintergrund

In diesem Kurzbericht soll das Wärme- und Kältenutzungspotential des Vierwaldstättersees abgeschätzt werden. Es wird erwartet, dass künftig die Seen in unseren Breiten als Wärmequelle (heizen, Winter) und als Wärmesenke (kühlen, Sommer) intensiver 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 zur Heizung im Siedlungsgebiet (Wärmepumpen) entzogen werden (Fink et al 2014a).

In jüngster Vergangenheit ist ein markantes Interesse an Anlagen zur thermischen Nutzung von Seewasser festzustellen. Beispiele dafür sind: Wärme für das *Hotel Palace St Moritz* aus dem St. Moritzersee, Wärmenutzung (Kühlen und Heizen) für den *Campus Uni-Lausanne / EPFL* aus dem Genfersee, Kühlung des *Centro Svizzero di Calcolo Scientifico* (Hochleistungsrechenzentrum Lugano) mittels Wasser des Luganersees, das Projekt *Freecooling Maladiere* (Kühlen und Heizen, Lac Neuchâtel) und *Genève Lac Nations* in Genf (Kühlen und Heizen; Mermoud et al 2007; Genfersee). Daneben sind diverse Projekte in der Machbarkeits- oder Planungsphase wie beispielsweise, *Energieverbund Zug* (Heizen, Zugersee; Schmid 2014a), oder Energieversorgung der Stadt Zürich (Kühlen und Heizen; Jakob et al 2014; Wüest 2012), sowie diverse Projekte am Bodensee. Dass die Richtlinien der IGKB bezüglich Wärmenutzung aus dem Bodensee angepasst wurden, widerspiegelt dieses Interesse (IGKB 2014). Es ist damit zu rechnen, dass diese Entwicklung in den nächsten Jahrzehnten anhalten wird. Deshalb ist es sinnvoll für eine vorausschauende Planung das Potential einzelner Gewässer im Voraus abzuklären.

Das Ziel dieses Berichtes zuhanden der Aufsichtskommission Vierwaldstättersee (AKV) und der Dienststelle Umwelt und Energie (Uwe) des Kantons Luzern besteht darin, die Wärmenutzungspotentiale der Teilbecken des Vierwaldstättersees abzuschätzen. Zudem sollen die Rahmenbedingungen und kritischen Faktoren evaluiert werden, damit mittel- bis langfristig die Wärme- und Kältepotentiale möglichst nachhaltig und im Einklang mit den gesetzlichen Gewässerschutzbestimmungen und den ökologischen Vorgaben genutzt werden können.

Für die Beurteilung sind drei hydrologisch-morphologische Faktoren wichtig: (1) Der Vierwaldstättersee ist durch Schwellen in Teilbecken mit reduziertem Austausch aufgeteilt. Die Wasserkörper innerhalb dieser Teilbecken sind jedoch zusammenhängend und Dichteunterschiede (aufgrund von Temperaturdifferenzen) zwischen den Buchten und den offenen Seebecken gleichen sich über diese Teilbecken aus. (2) Der westliche Teil der Luzernerbucht ist sehr flach, was die Möglichkeiten der Wärme- und Kältenutzung massiv einschränkt. (3) Zudem soll die Reuss in die Überlegungen einbezogen werden, da sich der überwiegende Teil des Wärme- und Kühlenergiebedarfs in der Nähe des Abflusses des Vierwaldstättersees befindet. Das Ableiten von Tiefenwas-

ser aus dem See beeinflusst die Struktur der Seeschichtung als auch die Wasserqualität der Reuss. All diese hydrologisch-morphologischen Faktoren sollen in diesen Kurzbericht einfließen.

2 Fragestellungen

Gegenstand dieses Kurzberichtes sind potentielle künftige Wärme- und Kälteenergienutzungen aus dem Vierwaldstättersee. Im Vordergrund steht die Sorge, dass durch eine zu intensive Nutzung, (i) die Wärmeflüsse, und/oder (ii) die See- und Reusstemperaturen und/oder (iii) die Dichteschichtung im See zu stark verändert werden könnten. Es sollen, auf dem Niveau Machbarkeitsstudie, die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie gross ist das Potential der thermischen Nutzung vom Vierwaldstättersee zu Kühl- und Heizzwecken?
- Mit welchen Temperaturänderungen ist im See und/oder in der Reuss zu rechnen?
- Mit welchen Veränderungen der Schichtung ist im See zu rechnen?
- Gibt es kritischen Aspekte (wie Entnahme- und Einleitungstiefe, lokale Einflussfaktoren), welche bei der Projektierung von künftigen Anlagen zu berücksichtigen sind?
- Diese Fragen sollen für die vier folgenden Teilbecken betrachtet werden:
 - Alpnachersee (AL)
 - Westbecken (VI) des Vierwaldstättersees bestehend aus Luzernerbucht, Horwerbucht, Küssnacherbecken, Kreuztrichter und Vitznauerbecken
 - Gersauerbecken (einschliesslich Schwibbogen, GB), und
 - Urnersee (UR).
- Zudem sollen die folgenden Teilbereiche im Detail betrachtet werden:
 - Horwerbucht (HB),
 - Luzernerbucht (westliche LB = flacher Teil; süd-östliche LB = tiefer Teil), und
 - der untiefe Alpnachersee (AL).

3 Rechtliche Grundlagen

Die Gewässerschutzverordnung (GSchV; 814.201; Stand 2014) formuliert Anforderungen an die Temperatur der Gewässer. Ein Grundsatz hält fest, dass die Schichtung und die Temperaturen in den genutzten natürlichen Gewässern nur sehr geringfügig relativ zum natürlichen Zustand geändert werden sollen:

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 Anforderungen spezifisch 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 (BEW, 1981) 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 sollen (Erklärung im Anhang A3). 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 Flusstau 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.

4 Datengrundlage

Die folgenden Hintergrundinformationen wurden in diesem Bericht verwendet:

- Abflussstatistik Reuss (Geissmattbrücke; LHG/BAfU)
- Temperaturstatistik Reuss (Geissmattbrücke; LHG/BAfU)
- Temperaturprofile Kreuztrichter 1960 – 1996 (Eawag, AKV).

Zudem treffen wir für die Abschätzung des Potentials die folgenden Annahmen:

- Das Seewasser soll maximal um 0.5 °C erwärmt / abgekühlt werden dürfen
- Der geschätzte Kühlenergieverbrauch für die aktuellen Betriebe in Luzern beträgt ~38 GWh/Jahr (Richtplan Energie Stadt Luzern, 2. Zwischenbericht, econcept AG, 29. November 2014).
- Für die Gemeinden Luzern, Horw und Kriens wird der Kältebedarf für 2050 auf 200 – 250 GWh geschätzt (Kulawik M., pers Mitteilung).
- Basierend auf OcCC (2007) nehmen wir an, der Wärmebedarf für 100,000 Einwohner betrage ~700 GWh/Saison (Haushalte und Dienstleistungen).
- Basierend auf der Prognose von econcept (2014) beträgt der Wärmebedarf der Stadt Luzern aktuell ~1250 GWh/Saison (~810 GWh für Dienstleistungen und ~440 für Wohnen) und es wird erwartet, dass der Bedarf bis Mitte 21. Jahrhundert auf ~900 GWh/Saison sinkt.

4.1 Abflussstatistik Reuss

Die Abflussmessungen der LHG/BAfU erfolgen bei der Station 2152 (Geissmattbrücke, Anhang A1). Für die Analyse der Wärmenutzung im Vierwaldstättersee sind die folgenden Beobachtungen relevant: Der mittlere Jahresabfluss beträgt 110 m³/s bei einer Variation von 77 m³/s (1949) bis 139 m³/s (1999). Minimale Abflüsse werden zwischen Oktober und April erreicht (Tagesmittel 18 m³/s in 1963) während die maximalen Abflüsse zwischen Mai und September auftreten (473 m³/s im August 2005, Maximalwert). Bei Einhaltung des Kriteriums, dass die Temperaturänderung nicht mehr als 0.5 °C betragen soll, ergibt sich ein maximal möglicher Wärmeentzug im Winter von ~40 MW für den minimalen Abfluss von 18 m³/s (Leistung = 4.2x10⁶ x 18 x 0.5). Die hohen Abflüsse im Sommer verdünnen allfällige Rückgaben von Kühlwasser deutlich und ergeben somit unbedeutende Temperaturveränderungen. Trotzdem plädieren wir dafür, dass im Sommer Kühlwasser nicht mit einer höheren Temperatur als diejenige der Reuss eingeleitet wird.

4.2 Temperaturstatistik Reuss

Die Temperaturmessungen der LHG/BAfU erfolgen bei der Station 2152 (Geissmattbrücke, Anhang A2). Für die Analyse der Wärmenutzung im Vierwaldstättersee sind die folgenden Beobachtungen relevant: Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 11.7 °C mit einer Variation von 10.2 °C

(1980) bis 13.3 °C (1999). Minimale Temperaturen werden im Februar/März erreicht (1.9 °C in März 2006) während die maximalen Temperaturen zwischen Juni und August auftreten (26.2 °C in August 2003). Daraus ergibt sich, dass die Wärmenutzung im Winter in der Reuss während kalten Perioden sehr ineffizient würde, da die Ausgangstemperatur zu gering ist. Andererseits zeigt sich, dass im Hochsommer die Reuss keinesfalls zur Kühlung genutzt werden kann. Dafür kann mit der Einleitung von Kühlwasser, welches aus dem Tiefenwasser des Vierwaldstättersees stammt, sogar eine geringfügige Linderung dieser hohen Temperaturen in der Reuss bewirkt werden.

4.3 Temperaturprofile Kreuztrichter 1960 bis 1996

Im Kreuztrichter wurden im Zeitraum von 1960 bis 1996 (mit Ausnahme einer Lücke in den 1970er Jahren, sichtbar in Abbildung 1) regelmässig Temperaturprofile gemessen (CTD-Profilen, teilweise monatlich). Diese lange Zeitreihe von historischen Profildaten erlaubt die mittleren saisonalen Temperaturzyklen, extreme Abkühlungsereignisse (Februar 1963) und die zeitlichen Trends der Temperaturprofile zu bestimmen.

Die Abbildung 1 stellt die jahreszeitlichen Schwankungen der gesamten Temperaturprofile von 1960 bis 1996 für die obersten 50 m des Westbeckens dar (an der Stelle Kreuztrichter). Während sich im Sommer eine ~5 m mächtige Oberflächenschicht ausbildet (Epilimnion), bleibt das Tiefenwasser (Hypolimnion) vom saisonalen Zyklus weitgehend unbeeinflusst und die Temperaturen bleiben praktisch konstant (Abbildung 2). Um Ende August beginnt sich die Oberfläche abzukühlen, die Oberflächenschicht wird mächtiger und die Dichteunterschiede zwischen Oberflächenschicht und Tiefenwasser werden geringer (Tabelle 1). Für die Wärmenutzung im Winter ist die Feststellung wichtig, dass die obersten 50 m des Seewassers in jedem Winter vollständig durchmischt werden. Dies ist in Abbildung 1 anhand der blauen Färbung über die 50 m tiefe Wassersäule erkennbar.

An der tiefsten Stelle der Messungen kann im Zeitraum zwischen 1960 und 1996 ein mittlerer Temperaturanstieg von 0.014 °C (± 0.004 °C) pro Jahr beobachtet werden (Tabelle 2). An der Oberfläche liegt der Trend von 0.039 °C/Jahr im Bereich der Abschätzungen, die auch für den Zürichsee, Bodensee oder Genfersee gemacht wurden (Schmid et al 2014; Fink et al 2014b). Für die Dimensionierung von Kühlwasser-Nutzungen ist deshalb auch in Zukunft mit einer weiteren Erwärmung zu rechnen.

Für die Nutzung der Wärme im Winter ist es wichtig, die Statistik der Wassertemperaturen zu betrachten. Tabelle 1 zeigt für die Heizperiode (Wärmeentzug, Monate Oktober bis April) die Mittelwerte, Maximalwerte, und Minimalwerte für die Temperaturen von 1960 bis 1996. Tabelle 3 zeigt die Zeitanteile für verschiedene Wassertiefen, während denen die Wassertemperatur unter ein bestimmtes Niveau fällt. Diese Informationen sind wichtig für die energetische Optimierung und den Betrieb während speziell kalten Perioden.

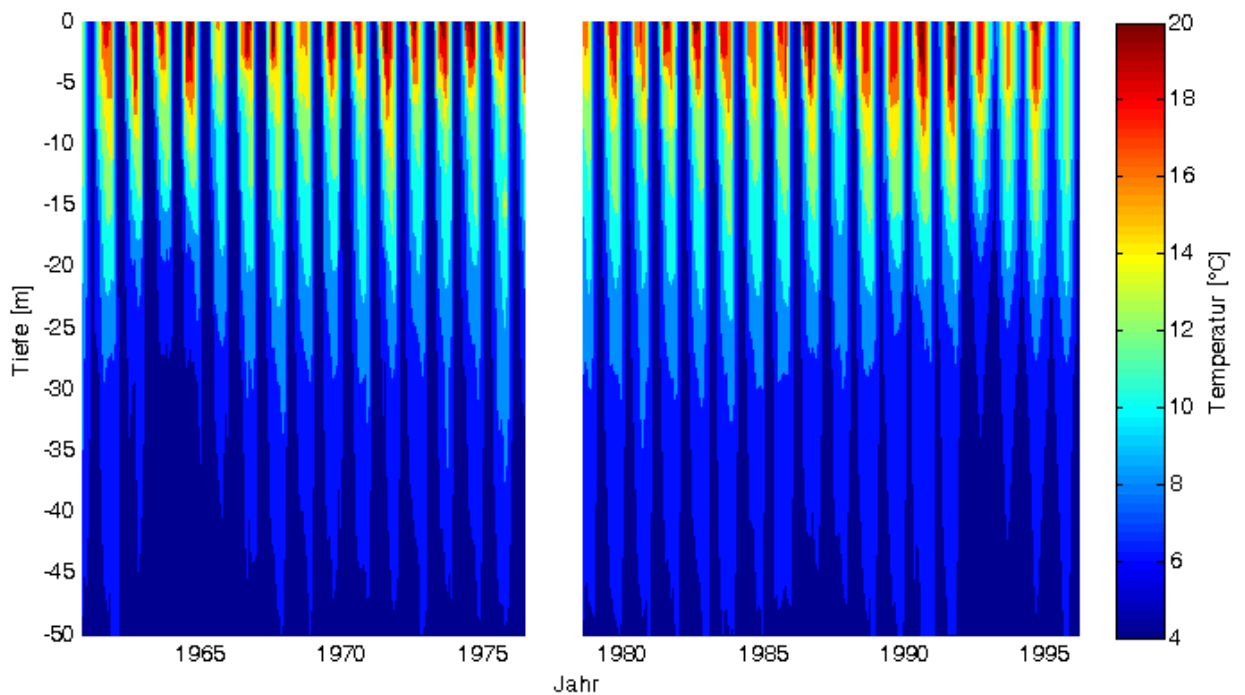


Abbildung 1 - Historische Temperaturprofile von 1960 bis 1996 im Kreuztrichter. Zwischen 1976 und 1978 liegen keine Daten vor.

Tabelle 1 Historische Temperaturprofile Kreuztrichter (Daten: 1960 - 1996).
Statistik für Heizperiode (Oktober bis April)

Tiefe	Mittelwert	Minimum	Maximum
0	7.6	1.0	18.5
0.5	7.5	1.1	18.5
1	7.5	1.1	18.4
1.5	7.5	1.2	18.3
2.5	7.5	1.3	18.2
3.8	7.4	1.4	18.1
5	7.4	1.5	18.0
7.5	7.3	1.8	15.6
10	7.2	2.0	14.8
12.5	7.1	2.3	13.9
15	6.9	2.5	14.4
17.5	6.8	2.7	12.0
20	6.6	2.8	11.4
25	6.2	3.0	10.0
30	5.9	3.1	9.3
50	5.2	3.4	7.4
75	4.9	3.6	7.2
90	4.8	3.6	6.7
100	4.7	3.6	6.3
110	4.7	3.7	5.7

Tabelle 2 Zeitliche Trends der Wassertemperatur im Kreuztrichter (Daten 1960 bis 1996)

Tiefe [m]	Erwärmung (Trend) [°C/Jahr]	95% Konfidenz-Intervall [°C/Jahr]
0	0.039	0.059
0.5	0.039	0.058
1	0.039	0.057
1.5	0.040	0.056
2.5	0.042	0.055
3.8	0.044	0.050
5	0.045	0.048
7.5	0.037	0.039
10	0.037	0.035
12.5	0.036	0.031
15	0.035	0.029
17.5	0.033	0.026
20	0.032	0.023
25	0.025	0.017
30	0.025	0.013
50	0.021	0.006
75	0.018	0.004
90	0.016	0.004
100	0.014	0.004
110	0.014	0.004

Tabelle 3 Anteil der Zeit während welcher die Temperatur unter das Niveau von 4, 5, 6, 7 °C sinkt. 100% = 212 Tage (Oktober - April). In Klammern = Anzahl Tage pro Heizsaison (Daten: 1960 – 1996).

Tiefe [m]	T < 4 °C	T < 5 °C	T < 6 °C	T < 7 °C
0	5% (11)	22% (47)	43% (92)	55% (117)
10	4% (9)	25% (53)	49% (104)	62% (130)
20	4% (9)	28% (59)	56% (118)	67% (142)
25	5% (10)	29% (61)	59% (125)	67% (143)
30	5% (10)	30% (64)	62% (132)	74% (156)
35	5% (11)	32% (67)	63% (134)	79% (167)
40	5% (10)	33% (69)	65% (137)	95% (201)

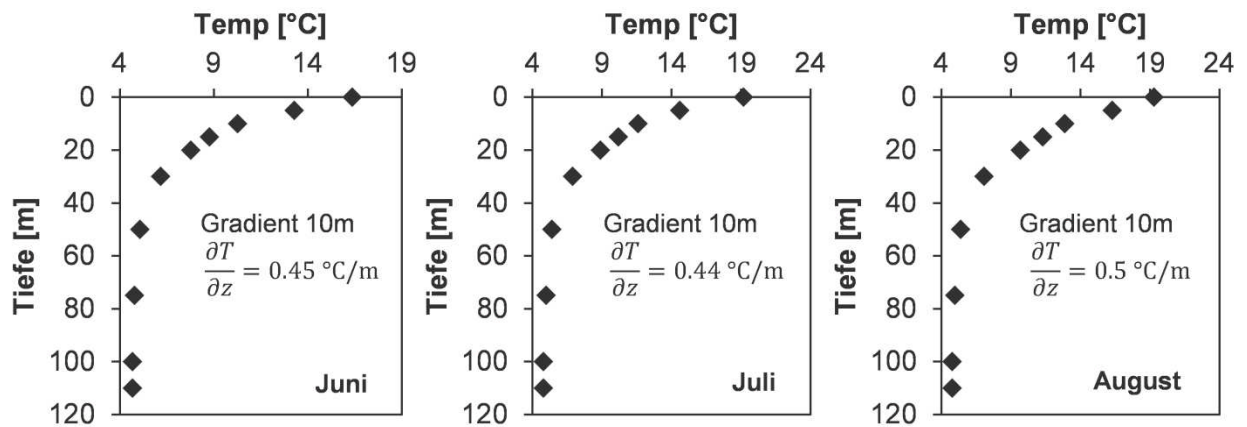


Abbildung 2 - Mittlere Temperaturprofile im Kreuztrichter während des Hochsommers (Kühlsaison, Wärmeeintrag) für Juni, Juli, August basierend auf den historischen Temperaturprofilen (hier 1961 bis 1991). Für diese drei Monate betragen die vertikalen Temperaturgradienten in 10 m Tiefe $dT/dz = 0.45$ (Jun), 0.44 (Jul) und 0.50 °C/m (Aug). Der Gradient dT/dz variiert mit der Tiefe und erreicht in 10 m Tiefe das Maximum (stärkste Schichtung → Sprungschicht). Aus diesem Grund wird im Text und in Tabelle 5 die Absenkung in 10 m Tiefe betrachtet.

5 Wärme- und Kältenutzungspotential

5.1 Zusammenhang zwischen Nutzung, Temperatur und Schichtung

Der Zusammenhang zwischen Wärmeleistung E (W) und Erwärmung $\partial T/\partial t$ (°C/s) ist gegeben durch

$$\partial T/\partial t = E / (V \rho C_p)$$

wobei V das betroffene Seevolumen und $\rho C_p = 4.2 \times 10^6$ J/(°C m³) die Wärmekapazität bedeutet.

Dieser Zusammenhang zeigt auf, dass ein grosses „Empfängervolumen“ V zu einer geringen Temperaturänderung führt. Dem steht gegenüber, dass grössere Volumen in grössere Seetiefen reichen und somit bei der Wärmeeinleitung längere Zuleitungen zum Ufer notwendig machen (dies ist bei Wärmenutzung nur bedingt der Fall). Hier schlagen wir für das Nutzungsvolumen für die Einleitung von Kühlwasser die Schicht von 20 bis 35 m Tiefe vor, da sich die grösseren Trinkwasserfassungen (beispielsweise ewl Seeburg) in der Regel in bis zu 40 m Seetiefe befinden. Mit dieser Wahl wird einerseits die biologisch aktive Oberflächenschicht (siehe Lage der Sprungschicht in Abbildung 2) nicht verändert und andererseits die von der Trinkwasser-Versorgung genutzte Tiefenschicht unterhalb von 40 m Tiefe kaum betroffen.

Für den Wärmeentzug im Winter gehen wir von einem Volumen von mindestens den obersten 50 m in allen Teilbecken des Sees aus. Auch in der Zukunft wird die Tiefe der durchmischten

Schicht von Winter zu Winter stark variieren, doch wurde bisher auch in sehr milden Wintern immer mindestens 50 m Tiefe erreicht (historische Profile; Abbildung 1).

5.2 Annahmen für die Abschätzung des Nutzungspotentials

Die Teilbecken des Vierwaldstättersees sind (abgesehen vom Alpnachersee) miteinander verbunden (Restriktion Nase unterhalb 45 m Tiefe), sodass sich bei künftigen Wärmenutzungen die Temperaturveränderungen über die Bereiche der Teilbecken hinaus auswirken und somit die Veränderungen stark abgeschwächt werden. Da wir den Austausch zwischen den Becken ungenügend kennen, nehmen wir sehr konservativ an, dass sich die Wärmenutzung nur im betrachteten Teilbecken auswirkt. Im weiteren treffen wir die Annahmen, dass (1) die Temperaturänderungen im entsprechenden Seevolumen auf maximal 0.5 °C beschränkt wird, und (2) dass die Dauer der Kühltisaison und der Heizsaison 2200 Stunden (entsprechend drei Monate Vollast) beträgt. Die erste Annahme basiert auf der Überlegung, dass mit 0.5 °C zwar die Hälfte der maximal akzeptablen Temperaturänderung von 1 °C (BEW, 1981) ausgeschöpft würde, dass jedoch den künftigen Generationen noch Spielraum belassen würde. Die nachfolgenden Abschätzungen und Vergleiche mit dem realistischen Bedarf zeigen, dass diese Annahme unkritisch ist.

5.3 Kühlpotential der Teilbecken

Für die Kühltisaison (Sommer) treffen wir zusätzlich die Annahme, dass sich die Abwärme in den Volumina der Teilbecken zwischen 20 bis 40 m Tiefe (Richtlinien Bodensee, IGKB 2014) auswirken wird. Die entsprechenden akzeptablen Wärmemengen und thermischen Leistungen sind in der Tabelle 4 aufgelistet. Die totale saisonale Wärmemenge von ~1100 GWh (äquivalent zu einer dauernden Leistung von ~500 MW) entspricht einem mehrfachen des zurzeit geschätzten Kühlbedarfs der Stadt Luzern von ~38 GWh (Meyer, pers. Mitt.) und dem künftigen Bedarf der Agglomeration Luzern (~200 GWh, Kulawik M., pers Mitteilung). Diese Angabe mag eine Unterschätzung sein, falls der künftige Kühlbedarf in Wohnungen aufgrund der Klimaveränderung ansteigen wird (OcCC 2007). Trotzdem zeigt dieser Vergleich, dass das Potential für Kühlung aus dem Westbecken VI des Vierwaldstättersees – wo wir die mit Abstand grössten Nutzungen erwarten – mit ~550 GWh (Tabelle 4) mehrfach über dem realistischerweise zu erwartenden Kühlbedarf liegt. Wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird, liegt das zusätzliche Kühlpotential der Reuss in einem ähnlichen Rahmen.

Tabelle 4 – Kühlpotential für die vier Teilbecken des Vierwaldstättersees (für $\Delta T = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$) ⁽¹⁾

Teilbecken ⁽²⁾	AL	VI	GE	UR	Total
Oberfläche, km ²	4.8	58.9	30.3	22.0	116.0
Beckenvolumen, km ³	0.10	4.35	4.41	3.16	12.02
Teilvolumen 20 - 40 m, Mio m ³	26.5	948	561	404	1940
Wärmeinhalt 20 - 40 m, TJ ⁽³⁾	56	2000	1200	850	4100
Wärmeinhalt 20 - 40 m, GWh	15.5	553	327	236	1132
Leistung 20 - 40 m, MW (2200 Std)	7	251	149	107	514 ⁽⁴⁾

Fussnoten

⁽¹⁾ Für die Berechnung der Wärmemenge wurde eine maximale Temperaturänderung von 0.5 °C angenommen.

⁽²⁾ AL = Alpnachersee, VI = Hornerbucht + Kreuztrichter + Küssnachterbecken + Vitznauerbecken,

GE = Gersauerbecken, UR = Urnersee.

⁽³⁾ TJ = Terajoule = 10¹² J = 278 MWh.

⁽⁴⁾ Die flächenbezogene Wärmeleistung beträgt 4.5 W/m² bei einer totalen thermischen Leistung von 514 MW.

Tabelle 5 Kühlpotential des Westbeckens VI/ Luzernerbucht (Entnahme im Tiefenwasser) mit Rückgabe in die Reuss

Kühlwasser aus Teilbecken VI	Wert
Temperaturgradient in 10 m Tiefe im Sommer (Teilbecken VI; Abbildung 2)	0.5 °C/m ⁽¹⁾
Absenkung Sprungschicht in 10 m Tiefe bei tolerierter Erwärmung um 1 °C (Teilbecken VI)	2.0 m ⁽²⁾
Fläche in 10 m Tiefe des Westbeckens VI	54 km ²
Nutzbare Menge Kühlwasser für Rückgabe in Reuss (Fläche VI in 10 m Tiefe mal Absenkung)	108 Mio m ³
Erwärmung Kühlwasser (Annahme)	$\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ⁽³⁾
Menge Kühlwasser mit $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	108 Mio m ³ (13 m ³ /s)
Kühlpotential Ableitung Tiefenwasser ⁽⁴⁾	4500 TJ (1250 GWh; 570 MW)

Fussnoten

⁽¹⁾ Temperaturgradienten im Kreuztrichter (Abbildung 2).

⁽²⁾ Eine Absenkung der Wasserschichten um 2 m erzeugt bei einem Gradienten von 0.5 °C/m eine T-Erhöhung von 1 °C.

⁽³⁾ zB Erwärmung des Kühlwassers von 8 auf 18 °C (kühler als Reuss im Sommer); diese tolerierte Erwärmung kann auch anders definiert werden; die Rückgabe-Temperatur des Kühlwassers darf die Reuss-Temperatur nicht überschreiten.

⁽⁴⁾ Annahme, dass Kühlperiode 2200 Stunden beträgt.

5.4 Kühlpotential der Reuss

Die Entnahme von Reusswasser (oder Oberflächenwasser vom See) zur Kühlung und anschliessenden Rückgabe des Kühlwassers in die Reuss ist wegen der bereits heute warmen Flusstemperaturen im Sommer nicht akzeptabel. Jedoch kann kaltes, tiefgefasstes Seewasser (z.B. ~8 °C) nach Aufnahme von Wärme in die Reuss eingeleitet werden, sofern das rückgeleitete aufgewärmte Kühlwasser nicht wärmer ist als das Reusswasser (in jedem Fall < 25°C; für Temperaturen Reuss siehe Anhang A2). Dadurch wird ein geringer kühlender Effekt für die Reuss resultieren und somit sind diese Rückleitungen weitgehend unproblematisch.

Die folgende Rechnung zeigt die Grössenordnung der Kühlkapazität der Reuss. Dieses Kühlpotential ist wesentlich durch die Absenkung der Sprungschicht im Westbecken VI des Vierwaldstättersees limitiert. Durch die Entnahme von kühlem Seewasser aus der Tiefe werden die Wasserschichten im See entsprechend dem entnommenen Volumen abgesenkt. Da die Temperatur nach oben zunimmt, führt das Absenken der Sprungschicht zu einer Temperaturerhöhung (Abbildung 2), die durch das Produkt von Gradient $\partial T/\partial z$ mal Absenkung Q_E/A gegeben ist.

$$\partial T/\partial t = Q_E/A \times \partial T/\partial z$$

Wie in Tabelle 5 dargestellt, führt der Gradient von 0.5 °C/m in 10 m Tiefe zu einer Temperaturerhöhung von 1 °C, falls die Sprungschicht um 2 m abgesenkt wird. Die entsprechende Wassermenge beträgt ~100 Mio m³ (oder 13 m³/s während 2200 Stunden Kühlung), welche in die Reuss abgegeben werden kann (Tabelle 5). Die thermische Leistung der Kühlung hängt zudem davon ab, um wieviel die Temperatur des Tiefenwassers (ΔT) bei der Kühlung erhöht wird. Bei einer Erhöhung von 10 °C (z.B. von 8 auf 18 °C) ergibt sich somit eine thermische Leistung von 570 MW (1250 GWh). Dies ist ein enormes Potential für Stadt und Umgebung von Luzern, welches selbst unter pessimistischen Annahmen nicht ausgeschöpft wird. Durch die Einmischung von Tiefenwasser aus dem See in den Abfluss würde das Reusswasser in seinen Eigenschaften nur sehr wenig verändert, da der typische Abfluss während den drei Sommermonaten ~160 bis ~210 m³/s beträgt und somit mindestens eine Grössenordnung über der Kühlwasserabgabe liegen würde.

Die beiden Kühlpotentiale (des Westbeckens VI (251 MW) und der Reuss (570 MW)) für den Standort der Stadt Luzern können addiert werden. Das Kühlpotential der Reuss ist grösser als dasjenige des Westbeckens VI. Das sehr grosse Kühlpotential der am Seeauslauf gelegenen Stadt Luzern macht vor allem Anergienetze interessant (siehe Kap. 6.6).

5.5 Wärmepotential der Teilbecken

Für die Heizsaison (Winter) treffen wir die Annahme, dass die obersten 50 m des Seewassers um maximal 0.5 °C abgekühlt werden. Die entsprechenden akzeptablen Wärmemengen und thermischen Leistungen sind in der Tabelle 6 aufgelistet. Die totale Wärmemenge von 2900 GWh (Tabelle 6) ist ein gewaltiges Potential. Zum Vergleich wird der Wärmebedarf in der Schweiz für 2050 auf ~57 TWh geschätzt (~17 TWh im Dienstleistungssektor, ~40 TWh in Privaten Haushalten, OcCC 2007). Umgerechnet auf 100,000 Einwohner von Stadt und Umgebung von Luzern ergibt dies einen Wärmedarf von ~700 GWh, was konsistent ist mit der Erwartung von econcept (2014) von ~900 GWh. Selbst wenn diese Wärmemenge nur vom Westbecken VI des Vierwaldstättersee entnommen würde (Tabelle 6; 1400 GWh von VI) könnte damit der gesamte Siedlungsraum mit Wärme aus dem Vierwaldstättersee versorgt werden. Auch dieser Vergleich zeigt, dass das Potential des Vierwaldstättersees für Heizen deutlich über dem realistischen Wärmebedarf liegt.

Tabelle 6 Wärmepotential für die vier Teilbecken des Vierwaldstättersees

Teilbecken	AL	VI	GE	UR	Total
Oberfläche, km ²	4.8	58.9	30.3	22.0	116.0
Volumen, km ³	0.10	4.35	4.41	3.16	12.02
Teilvolumen 0 - 50 m, Mio m ³	103	2444	1422	1023	4992
Wärmeinhalt 0 - 50 m, PJ *	0.22	5.1	3.0	2.1	10.4
Wärmeinhalt 0 - 50 m, GWh	60	1425	830	597	2910
Leistung 0 - 50 m, MW (2200 Std)	27	650	380	270	1320

Fussnoten:

* PJ = Petajoule = 10¹⁵ J = 278 GWh.

Für die Berechnung der Wärmemenge wurde eine maximale Temperaturänderung von 0.5 °C angenommen.

AL = Alpnachersee, VI = Horwerbuch + Kreuztrichter + Küssnacherbecken + Vitznauerbecken, GE = Gersauerbecken, UR = Urnersee.

Die flächenbezogene Wärmeleistung beträgt 11 W/m² bei einer gesamten thermischen Leistung von 1320 MW.

5.6 Zusammenfassung der Wärme- und Kühlpotentiale

Die Kälte – und Wärmepotentiale sind in der nachfolgenden Tabelle 7 zusammengefasst und mit den zu erwarteten klimatische Wärmeflüssen verglichen (Abschnitt 6.5).

Tabelle 7 Vergleich der Wärme-und Kältepotentiale mit Klimawandel

		Inhalt [GWh]	Leistung [MW]*	Flächenspezi- fisches Potent- ial [W/m ²]
Kälte Seebecken	AL	15	7	
	VI	553	251	
	GE	327	149	
	UR	236	107	
	Total Seebecken	1132	514	4.5
Kälte Reuss	Rückgabe See- wasser in Reuss	1250	570	5
Seebecken VI und Reuss	Summe Seebecken VI und Reuss	1800	820	
Wärme Seebecken	AL	60	27	
	VI	1425	650	
	GE	830	380	
	UR	597	270	
	Total Seebecken	2910	1320	11
Wärmefluss Klimawandel	Fink et al. 2014b, Abschnitt 6.5			~50 - 55

Fussnote: (*) Mittlere Leistung bei einem Betriebe über 2200 Std.

5.7 Separate Betrachtung der Horwerbucht

Das Konzessionsgesuch der Seenergy Horw AG (2014) sieht eine zeitlich gestaffelte Steigerung der Wärmenutzung in acht Etappen vor. Die Wärmebezüge zu Beginn und beim Endausbau (8. Etappe) sehen wie folgt aus:

Etappe 1	3 GWh/Saison	und	1.25 Mio m ³ /Saison	(Heizen)
	0.35 GWh/Saison	und	0.075 Mio m ³ /Saison	(Kühlen)
Etappe 8	50 GWh/Saison	und	10 Mio m ³ /Saison	(Heizen)
	10 GWh/Saison	und	2.4 Mio m ³ /Saison	(Kühlen)

Die vorgesehenen Nutzungen von 10 GWh im Sommer (Kühlen) und von 50 GWh im Winter (Heizen), stellen absolut betrachtet sehr grosse Wärmeleistungen dar (~25 MW im Winter, ~5 MW im Sommer). Der Vergleich mit den Tabellen 4, 5, 6 und 7 zeigt jedoch, dass mit diesem Projekt relativ bescheidene Anteile des Potentials im Westbecken VI des Vierwaldstättersees genutzt würden. Die 50 GWh im Winter entsprechen ~3.5% des Potentials von 1425 GWh (Tabelle 6) und die 10 GWh im Sommer machen nur ~2% bezüglich des Kühl-Potentials im Westbecken (550 GWh, Tabelle 4) aus.

Zu diesem Schluss kommen auch die beiden Gutachten von kup (Lang und Mirbach 2013, 2014) in denen die Modellrechnungen für die Wasserrückgaben dargestellt sind. Aufgrund dieser Modellrechnungen ist im Abstrombereich mit Temperaturanomalien von maximal um ~0.1 °C zu rechnen. Grundsätzlich ist die Horwerbucht nicht als isoliert zu betrachten, auch wenn offensichtlich der Austausch mit den hintersten Bereichen des Vitznauerbeckens deutlich reduziert ist. Eingeleitete Temperaturdifferenzen (z.B. Rückgabe von Kühlwasser) erzeugen jedoch unmittelbar gerichtete Dichteströmungen, welche von den beckenweiten Strömungen erfasst und grossflächig verteilt werden (mehr im Abschnitt 5.4). Es ist deshalb – abgesehen vom Nahfeld der Einleitungen – auch lokal nicht mit Temperaturänderungen von mehr als ~0.1 °C zu rechnen.

5.8 Separate Betrachtung der Luzernerbucht

Für die Wärmenutzung müssen wir die Luzernerbucht (Abbildung 3) in zwei Teilbecken betrachten: der flache Bereich westlich Verkehrshaus / Tribtschen und die tiefe Luzernerbucht süd-östlich Verkehrshaus / Tribtschen (Hilbe et al 2011; Hilbe und Anselmetti 2012). Der flache Teil ist nur wenige Meter tief. Eine ausgeprägte Kante bildet den Übergang von der flachen zur tiefen Luzernerbucht (Abbildung 3), welche auf der Höhe Hermitage / Schönbühl bereits schon über 70 m tief ist.

Grundsätzlich hat die Entnahme von Seewasser keine ökologische Bedeutung für den See, auch nicht für den flachen Teil der Luzernerbucht. Allfällige Nachteile betreffen eher techni-

sche Belange, weil Oberflächenwasser mehr organisches Material enthält und somit diese biologischen Partikel zu Problemen bei den Wärmetauschern führen können. Im Sommer ist die flache Luzernerbucht jedoch für Kühlwasserentnahme ungeeignet, da das zusätzlich erwärmte Rückgabewasser zu warm würde, um in ein Gewässer abgegeben zu werden (ausser das sehr warme Wasser hätte eine technische Verwendung).

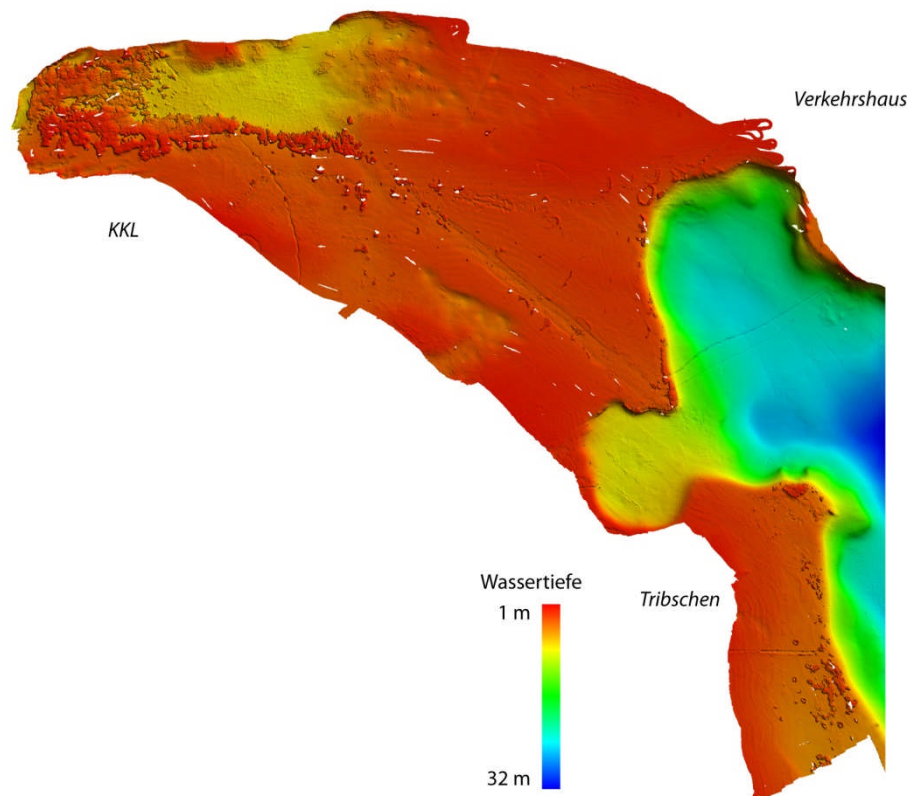


Abbildung 3 - Bathymetrie des Seebeckens Luzern. Die Strukturen in der Nähe des Ausflusses der Reuss sind Wasserpflanzen. Das Geländemodell zeigt in diesen Bereichen also den Bewuchs und nicht die Morphologie des Seebodens. Die geschätzte Unsicherheit der Tiefenangaben betragen ~15 bis ~30 cm (Daten: Hilbe und Anselmetti 2012).

Die Rückgabe von Wasser ist für das kleine Volumen des flachen Teils der Luzernerbucht problematisch. Da im Winter das abgekühlte Wasser entweder via Reuss ausgespült wird oder in tiefere Bereiche der Luzernerbucht absinkt und sich mit einem grossen Seevolumen vermischt, kann die Wasserrückgabe während der Heizperiode toleriert werden. Im Sommer jedoch ist der flache Teil der Luzernerbucht für Kühlwasserrückgabe ungeeignet, da die Oberflächenschicht verändert würde. Allerdings sollte es kein grosses Problem darstellen die Rückgabe in den Reuss-Abfluss zu geben und dort eine geringe Abkühlung zu bewirken.

Der tiefe Teil der Luzernerbucht ist mit dem offenen Westbecken VI verbunden und somit für die Kühlwasser Nutzung geeignet.

Die nachfolgende Tabelle fasst diese Überlegungen zusammen.

Luzernerbucht	Wasserentnahme	Wasserrückgabe
Flacher Teil	Winter (Wärme): bedingt geeignet ^(*)	Winter: geeignet
	Sommer (Kühlung): ungeeignet	Sommer: ungeeignet Rückgabe in Reuss: geeignet
Tiefer Teil	Winter (Wärme): geeignet	Winter: geeignet
	Sommer (Kühlung): geeignet	Sommer: geeignet Rückgabe in Reuss: geeignet

Fussnote: ^(*) Entnahme in untiefem Wasser hat den Nachteil von biologischen Partikeln im gefassten Wasser (potentielle Probleme mit Wärmetauschern).

5.9 Separate Betrachtung Alpnachersee

Für die Wärme- und Kältenutzung im Alpnachersee ist nur insofern eine spezielle Betrachtung notwendig, als dass die Wärmemengen aufgrund des geringen Beckenvolumens – welches zusammenhängend ist - klein sind. Insbesondere die Kältenutzung würde nur eine kleine bis mittlere Anlage zulassen.

6 Nutzungsrelevante Prozesse im See

6.1 Entnahme– und Einleitungstiefen

Die Lage / Tiefe der Seewasserentnahme spielt für den Wasserkörper des Sees unmittelbar keine Rolle, ausser es würden derart grosse Mengen entnommen, dass dadurch die Schichtung des Sees beeinflusst würde (Abschnitt 5.4). Wie oben gezeigt sind diese Mengen sehr gross (im Bereich von ~100 Mio m³ im Westbecken). Wichtiger für die Seewasserentnahme sind die lokalen Eingriffe durch den Bau von Leitungen (Naturschutz, Fischhabitats, ökologisch oder landschaftlich wichtige Gebiete, etc.). Ebenfalls ein wichtiger Aspekt sind die biogeochemischen Inhaltsstoffe (Plankton, Kalzit), welche Wärmetauscher inkrustieren und verstopfen können. Deshalb wurde bisher oft relativ tief gefasst, um hohe Partikelkonzentrationen in der Oberflächenschicht zu vermeiden.

Im Sommer (Kühlwasser) sollte die Entnahme unterhalb der Sprungschicht (Abbildung 1) erfolgen, um möglichst kühles Wasser zu fassen. Im Winter (Heizen) ist möglichst warmes Was-

ser erwünscht, so dass die Entnahme nicht allzu tief und auch nicht unmittelbar an der Oberfläche (Wahrscheinlichkeit der inversen Schichtung ($< 4\text{ °C}$) mit Temperaturen bis 0 °C) erfolgen sollte.

Die Rückgabe des Wassers kann im Winter oberflächlich erfolgen (nach Wärmepumpe), weil die nächtliche Abkühlung zu Konvektion an der Oberfläche führt und somit das Wasser jede Nacht über ein grosses Volumen der Oberflächenschicht verteilt wird. Bezüglich lokaler ufernaher Eingriffe gelten die gleichen Argumente (siehe oben). Im Sommer sollte die Rückgabe unterhalb der Sprungschicht erfolgen (Kühlwasser), um einerseits nicht zusätzlich Nährstoffe in die produktive Oberfläche einzutragen und um andererseits die Schichtung der biologisch-aktiven Oberfläche bei der Einleitung in Ufernähe nicht zu verändern.

6.2 Vertikale Breite der Entnahme- und Einleitungszonen

Auch wenn die Entnahme und die Rückgabe des Seewassers nur durch eine einzige Öffnung erfolgt, so erfasst die Entnahme und Rückgabe im Seewasserkörper immer eine mehrere Meter breite vertikale Schicht. Dafür sind zwei Prozesse verantwortlich: (i) die vertikale Ausdehnung der Fassungs- und Rückgabeschicht (Selective Withdrawal; Anhang A4) und (ii) die vertikale Auslenkung der Seewasserschichten aufgrund der internen Wellen. Der erste Beitrag (i) hängt vom Wasserfluss Q und der Stabilität N^2 der Wassersäule ab (Anhang A4). Der zweite Beitrag (ii) hängt von der Schichtung und der Anregung durch den Wind ab. Die grössten Auslenkungen (bis einige 10 m in tiefen Seen) treten im Herbst auf. Dies ist relevant vor allem für die Temperaturschwankungen des gefassten Wassers zu Beginn der Heizperiode (Abschnitt 6.3, Abbildung 4).

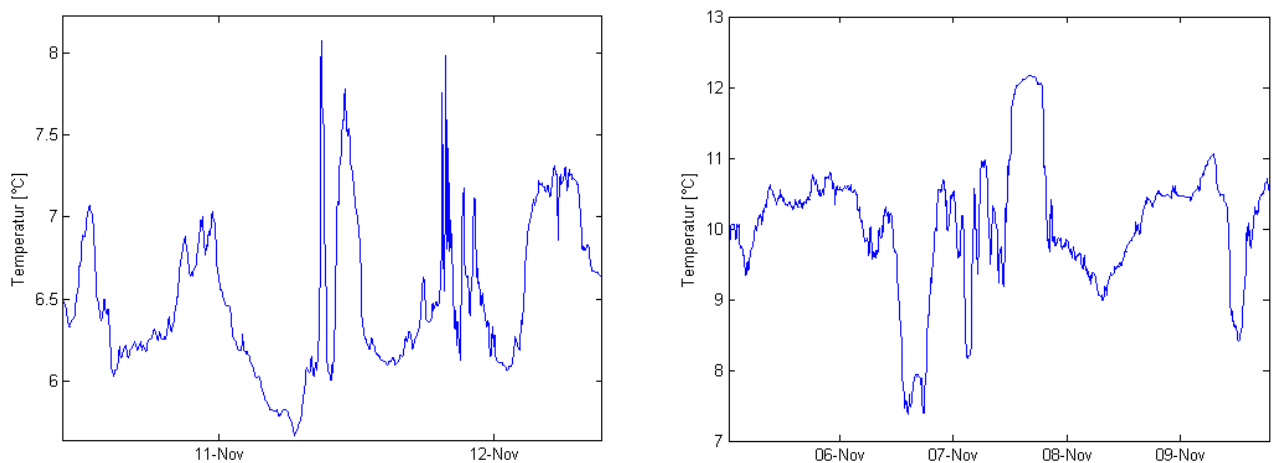


Abbildung 4 Links: Temperaturverlauf in 35 m Tiefe der Horwerbucht am 11 November 2013. Beispiel für eine Temperaturzunahme von $+2\text{ °C}$ innerhalb 17 Minuten. Rechts: Temperaturverlauf vom 5 bis 10 November 2013 in 20 m Tiefe der Horwerbucht mit Temperaturänderungen von $> 2\text{ °C}$ ($+2.8\text{ °C}$ innerhalb 2 Stunden am 6 November 2013).

6.3 Natürliche Schwankungen der Temperatur im gefassten Wasser

Durch die vertikalen Auslenkungen der internen Wellen gelangen dauernd andere Schichten des Seewassers vor die Öffnung der Fassung. Deshalb schwanken die Temperaturen des gefassten Wassers teilweise um mehrere °C innerhalb von wenigen 10 Minuten. Bei der Auslegung der Anlage für den Wärmeentzug muss diesem Umstand Rechnung getragen werden. Abbildung 4 illustriert zwei typische Beispiele wie sie in der Horwerbucht im Herbst 2013 auftraten.

Diese natürlichen Temperaturschwankungen von mehreren °C in sehr kurzer Zeit sind insofern relevant als bei der Einleitung von Kühlwasser lokal kurzfristig vergleichbare Temperaturschwankungen auftreten könnten. Für die Biota des Vierwaldstättersees ist somit dieses Phänomen der kurzfristigen Temperaturschwankungen nicht neu.

6.4 Horizontale Mischung

Die horizontale Mischung ist insofern wichtig, weil Temperaturdifferenzen, welche durch die Nutzung erzeugt werden (Rückgabe von kühlerem oder wärmerem Wasser), durch horizontale Strömungen im betrachteten Becken verteilt und somit ausgeglichen werden. Die Quantifizierung der horizontalen Mischung gehört zu den am schlechtesten bekannten physikalischen Prozessen in Seen. Grundsätzlich gilt, dass grössere Temperaturdifferenzen (grössere Dichteunterschiede) und stärkere Windanregung zu rascherem horizontalen Ausgleich führt. Im Falle des Vierwaldstättersees verfügen wir über einige Messungen, sodass wir zumindest ansatzweise die Mischungsraten schätzen können (Peeters et al 1996). Gemäss Abbildung 5 breitet sich eine lokale Störung in 11 Tagen auf eine Fläche von $\sim 1 \text{ km}^2$ aus und es würde ~ 5 Monate dauern bis die gesamte Fläche des Westbeckens (VI, $\sim 59 \text{ km}^2$, Tabelle 4) betroffen wäre. Diese Abschätzungen sind konsistent mit den Darstellungen in den Kup- Gutachten (Lang und Mirbach 2013, 2014), welche zeigen, dass die Temperaturdifferenzen von der Einleitungsstelle von den beckenweiten Strömungen erfasst und durch die horizontale Diffusion grossflächig verteilt werden.

Bei intensiver Nutzung tragen zwei weitere Faktoren zum horizontalen Ausgleich bei: (1) grosse Einleitungen, welche grosse Temperaturdifferenzen erzeugen, bewirken auch grössere Austauschgeschwindigkeiten. Oder anders formuliert: markante Temperaturinseln können sich langfristig nicht halten. (2) Wir können davon ausgehen, dass die Rückleitungen von Kühlwasser an verschiedenen Stellen des Sees erfolgen werden und sich schon deshalb die nutzungsbedingten Temperaturdifferenzen lateral verteilen.

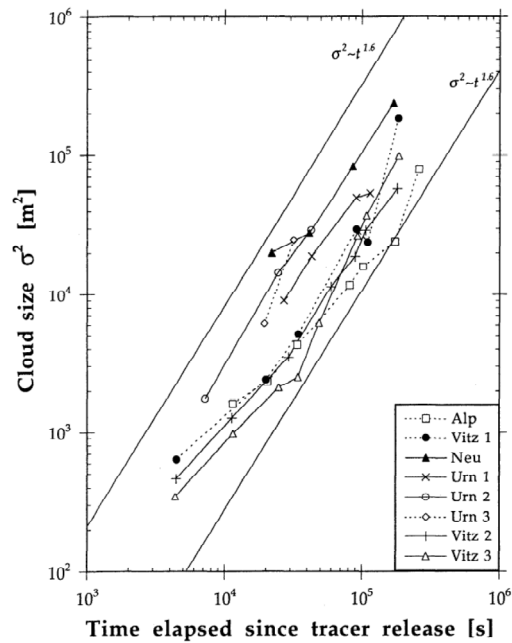


Abbildung 5 Horizontale Ausbreitung des Tracers Uranin nach Punktinjektionen (Peeters et al 1996). Gemäss dieser Abbildung verbreitert sich eine lokale Störung nach 10^6 s (= 11 Tage) auf eine Fläche von 1 km^2 und nach ~ 5 Monaten auf die gesamte Fläche des Westbeckens (59 km^2 , VI in Tabelle 4).

6.5 Rolle der klimatisch bedingten Erwärmung des Vierwaldstättersees

Die erwarteten Veränderungen der Wärmeflüsse sind in der Publikation Fink et al (2014b) für den Bodensee im Detail untersucht worden. In weiteren Studien wurde die Reaktion des Zürichsees und des Genfersees auf die Klimaänderung untersucht und dabei stellte sich heraus, dass diese drei Gewässer bezüglich Wärmehaushalt und Temperatur praktisch gleich reagieren. Tatsächlich sind die in der Tabelle 2 aufgeführten Erwärmungen vergleichbar mit den drei anderen Seen. Basierend auf dem IPCC Report (2013; mittleres Szenario A1B) berechneten wir die erwarteten Änderungen der Wärmeflüsse für den Bodensee (Fink et al 2014b). Daraus ergibt sich für die Mitte des Jahrhunderts (2045 bis 2075) eine Erhöhung des mittleren Wärmeflusses von der Atmosphäre ins Seewasser von $\sim 53 \text{ W/m}^2$ (Fink et al 2014b) und eine Temperaturzunahme an der Oberfläche von $\sim 1.9 \text{ }^\circ\text{C}$. Im Vergleich mit dem maximalen Potential für Kühlen (Wärmeeintrag $\sim 4.5 \text{ W/m}^2$, Tabelle 4) und für Heizen (Wärmeentzug von $\sim 11 \text{ W/m}^2$, Tabelle 6) fällt die Klimaänderung massiv stärker ins Gewicht. Es ist sogar so, dass die erwartete klimatisch-bedingte Erwärmung der Seeoberfläche um $\sim 1.9 \text{ }^\circ\text{C}$ selbst bei einer maximalen Wärmenutzung (Heizen) im Winter nur zu einem bescheidenen Teil (weniger als $\sim 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$) abgeschwächt würde.

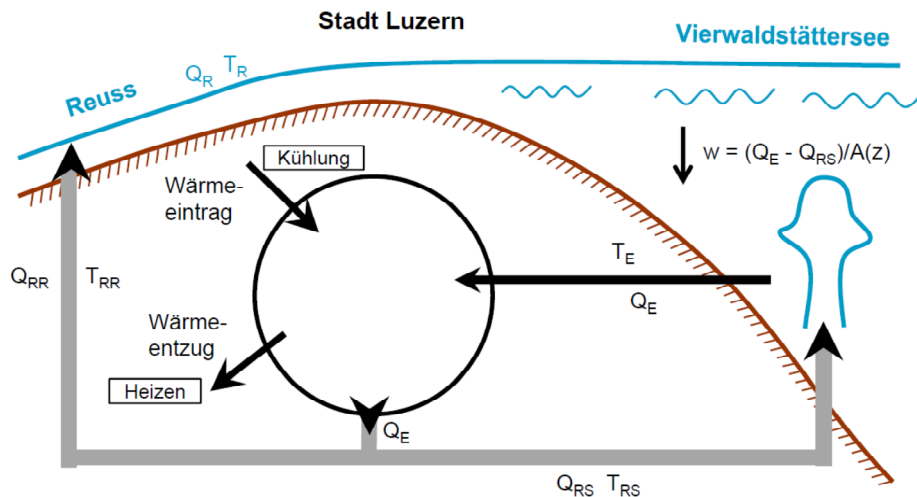


Abbildung 6 Schema des Wasserflusses für einen Verbund von Kühlen und Heizen (Beispiel Stadt Luzern) an einem Seeausfluss, sodass die Option besteht das gefasste Wasser (Q_E, T_E) sowohl in den Abfluss (Q_{RR}, T_{RR}) als auch in den See (Q_{RS}, T_{RS}) abzugeben, wobei $Q_E = Q_{RR} + Q_{RS}$ ($RR =$ Rückfluss Reuss; $RS =$ Rückfluss See). Im See werden die Wasserschichten oberhalb der Entnahmetiefe mit der Rate von $w = (Q_E - Q_{RS})/A(z)$ abgesenkt. Auch wenn T_{RR} deutlich höher ist als T_E , so wird die Reuss (T_R) gekühlt, solange $T_{RR} < T_R$ ist. $A(z)$ ist die Querschnittsfläche in der Tiefe z . Da diese im See abnimmt, ist $w(z)$ am grössten beim Entnahmeniveau und am kleinsten an der Seeoberfläche.

Eine Tiefenwasserentnahme von $Q_E = 100 \text{ Mio m}^3$ pro Sommersaison würde zu einer Absenkung in 10 m Tiefe ($A(10 \text{ m}) = 54 \text{ km}^2$) von -2 m führen und somit die Schicht um 1°C erwärmen. Umgekehrt führt die Rückgabe von Wasser in den See zu einer entsprechenden Volumenverschiebung oberhalb des Rückgabenniveaus nach oben, $w(z) = -Q_{RS}/A(z)$, wobei Q_{RS} (m^3/s) die Wasserrückgabe in den See bedeutet. Erfolgen sowohl Entnahme als auch Rückgabe im See, so addieren Absenken und Anheben oberhalb der entsprechenden Entnahme- und Rückgabebetiefen und die Verschiebungen der Schichtung können sich bei ähnlichen Wassermengen weitgehend kompensieren, d.h. $w(z) = (Q_E - Q_{RS})/A(z)$.

6.6 Vorteile von Anergienetzen

Wie die konzeptuelle Abbildung 6 für den Fall der Stadt Luzern illustriert, gibt es in einem grösseren Verbund (Verbundnetze, Anergienetze) gleichzeitig Bedarf für Kühlen und Bedarf für Heizen. Solche Verbunde haben grundsätzliche drei Vorteile: (i) die Effizienz der Wärmepumpen steigt, da Kühlen die Wassertemperaturen im Kreislauf erhöht (Abbildung 6), (ii) der Wasserfluss im Kreislauf wird reduziert, da Wasser mehrfach genutzt werden kann (Abwärme wirkt gleichzeitig als Heizung) und (iii) die Zahl der Fassungen im See und das Leitungsvolumen wird reduziert. Wenn ein Nutzungsgebiet (wie beispielsweise die Städte Zürich, Luzern, Thun, Biel, Genf, etc.) zudem an einem Seeausfluss liegt (mit gewöhnlich hoher Wasserführung) besteht wahlweise die Möglichkeit der Rückgabe des Wassers in den See oder in den Abfluss (Abbildung 6). Selbstverständlich ist auch eine Kombination von beiden Rückgaben möglich.

7 Schlussfolgerungen zum Wärme- und Kühlpotential

7.1 Quantitative Eckwerte für die Planung von Nutzungen

Bei der Nutzung von Wärme- und Kühlenergie aus dem Vierwaldstättersee sind die folgenden kritischen Faktoren zu berücksichtigen:

Eckwerte See

Kühlen; Nutzungsvolumen	20 – 40 m Tiefe (IGKB 2014)
Kühlen; Absenkung der Sprungschicht	maximal 1 - 2 m
Kühlen; Temperaturerhöhung bei Abgabe ins Tiefenwasser	$\Delta T = \text{maximal } 7 \text{ }^\circ\text{C}$
Kühlen; Einhalten der Vermischungszone (Anhang A3)	$< 1^\circ\text{C}$ in einem Volumen von 20 x 20 x 10 m
Kühlen; Rückgabe des Nutzwassers	Mind. 20 m Wassertiefe, maximal 35 m Wassertiefe
Kühlen und Heizen; Abkühlung / Erwärmung im Rückgabevolumen des Sees	maximal $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$
Heizen; Maximale Abkühlung	$\Delta T = \text{maximal } 7 \text{ }^\circ\text{C}$

Zusätzliche Eckwerte bei Wasserrückgabe in Reuss (Entnahme Tiefenwasser See)

Kühlen; Erwärmung der Reuss im Hochsommer	$0 \text{ }^\circ\text{C}$ (keine zusätzliche Erwärmung)
Kühlen; Temperaturerhöhung mit Abgabe in die Reuss	$\Delta T = \text{maximal } 10 \text{ }^\circ\text{C}$, Einleitung unter der Wassertemperatur der Reuss.
Heizen; Abkühlung der Reuss (alle Nutzungen zusammen)	maximal $-1,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

7.2 Schlussfolgerungen für die Nutzung des thermischen Potentials

Für die Nutzung von Kühl- und Wärmeenergie ziehen wir - aufgrund der dargelegten Analyse - die folgenden Schlüsse:

Entnahme von Kühlwasser aus See

- Wasserentnahme im See müssen in ausreichender Tiefe erfolgt, so dass das eingeleitete Kühlwasser (nach der Erwärmung) kühler ist als das Oberflächenwasser und es somit

nicht an die Oberfläche aufsteigen kann. Für das Westbecken (Teilbecken VI) gilt die Einschränkung, dass der Ableitung von Kühlwasser aus der Tiefe des Sees, wegen der Absenkung der Sprungschicht, Grenzen gesetzt sind.

- Die Temperaturen der Reuss können im Sommer sehr hohe Werte annehmen. Beispielsweise wurde im Sommer 2003 (<http://www.hydrodaten.admin.ch>) ein Maximum von 26.2 °C erreicht. Die Entnahme von Reusswasser oder von Oberflächenwasser des Sees zu Kühlzwecken im Sommer ist deshalb weder energetisch noch ökologisch akzeptabel. Wird in der Reuss die Wassertemperatur von 25°C überschritten, kann kein Kühlwasser mit über 25°C mehr eingeleitet werden (zusätzliche Erwärmung der Reuss).
- Bei der Planung von Wasserentnahmen sind uferökologische Argumente (wichtige Laichgebiete, Naturschutzgebiete, etc) sowie andere Nutzungen (Einleitungen, etc) zu berücksichtigen.

Rückgabe von Kühlwasser in See und Reuss

- Um die Temperatur und die Dichteschichtung (z.B. lokale Erwärmung / Schichtung der Oberfläche), den Nährstoffhaushalt des Sees und die biologische Aktivität in der oberflächennahen Schicht nicht nachteilig zu verändern, soll die Rückgabe des Kühlwassers im Sommerhalbjahr immer unter die Sprungschicht erfolgen (unter 20 m Seetiefe).
- Bei einer Rückgabtiefe in den See von unterhalb 20 m Tiefe werden die biologischen Vorgänge im See (Algenwachstum) kaum beeinflusst. Die Dimensionierung der Einleitung kann so gestaltet werden, dass das eingeleitete Kühlwasser sich zwischen 20 und 40 m Tiefe einschichtet. Um das Einschichten so zu gewährleisten, sind die Details der Einleitung im Einzelfall zu klären (Tiefe, Leitungsdurchmesser, Winkel, Ausströmungsgeschwindigkeit, ΔT , etc). Wie im Anhang A3 dargestellt, ist im unmittelbaren Nahbereich ein Volumen von einigen 20 x 20 x 10 m Dimension mit höheren Temperaturen als 1 °C zu rechnen (IGKB 2014). Andererseits erscheint es uns jedoch sinnvoll, die Anzahl der Leitung für Seewassernutzungen klein zu halten um damit die Eingriffe am See zu minimieren.
- Weil der stadtsseitige Teil der Luzernerbucht sehr flach ist (nur wenige Meter tief) ist dieser Teil des Vierwaldstättersees für die Rückgabe von Kühlwasser nicht geeignet.
- Auch die Rückgabe von Kühlwasser in den Alpnachersee, mit seinem kleinen Volumen von Tiefenwasser unterhalb 20 m Tiefe, ist nur in sehr beschränktem Umfang möglich.
- Die Rückgabe von Kühlwasser in die Reuss ergibt auch im Sommer wenig Probleme, falls dieses kühler ist als das Reusswasser. Dies kann erreicht werden, indem das Kühlwasser in ausreichender Tiefe (z.B. > 20 m) aus dem See entnommen und nur massvoll erwärmt wird (z.B. maximal um 10 °C). Somit bleibt das erwärmte Kühlwasser kühler als das Reusswasser, welches dadurch geringfügig abgekühlt wird.

- Gewässerökologisch unerwünschte Nebeneffekte könnten allenfalls auftreten, wenn derart viel Kühlwasser abgeleitet würde, dass der Abfluss der Reuss vorwiegend aus Kühlwasser bestehen würde. Selbst bei einer Wärmeabgabe von 1200 GWh pro Saison und einem $\Delta T = 10\text{ °C}$ (entspräche einem Wasserfluss von $13\text{ m}^3/\text{s}$) führte dies nicht zu kritischen Änderungen der Temperaturen und der Eigenschaften des Reusswassers (Tabelle 5). Der Abfluss während den drei Sommermonaten würde mindestens eine Grössenordnung über der Kühlwasserabgabe liegen.
- Im Winter sollte aus Gründen der Nutzungseffizienz möglichst kein (erwärmtes) Kühlwasser eingeleitet werden (falls solches überhaupt anfällt). Das aufgewärmte Wasser ist der Abwärmenutzung zuzuführen.

7.3 *Einschätzung der Potentiale*

Kühlenergienutzung

- Das Potential für die Nutzung von Kühlenergie (**Wärmeeinleitung von Kühlwasser**) beträgt ~ 1100 GWh pro Sommersaison, was einer Leistung von ~ 550 MW entspricht (4.5 W/m^2 Seefläche, Tabelle 4). Im Weiteren sind ~ 1200 GWh pro Sommersaison nutzbar (~ 550 MW, Tabelle 4), wenn im Westbecken (Luzernerbucht, Horwerbucht, Küssnacht-erbecken und Vitznauerbecken) das entnommene Kühlwasser aus dem See nach der Erwärmung (z.B. $\Delta T = 10\text{ °C}$) in die Reuss abgegeben wird (Tabelle 5).
- Die beiden Potentiale (Becken VI und Ableitung in Reuss) können aufsummiert werden.
- Für Kühlung aus dem Westbecken des Vierwaldstättersees – wo im städtischen Raum die grösste Nutzung für Kühlenergie erwartet wird – steht mit dem genannten Kühlpotential ein Mehrfaches der realistisch zu erwartenden Nutzung zu Verfügung.
- Die klimabedingte Erwärmung der natürlichen Gewässer verunmöglicht die Nutzung von Kühlenergie nicht, da die Abwärme in einer Tiefenzone von 20 bis 40 m Tiefe des Vierwaldstättersees zugegeben wird. In dieser Tiefe betrug die Erwärmung in der zweiten Hälfte des 20. JH ungefähr 0.2 bis 0.3 °C / Jahrzehnt. Wichtig für die Planung ist der Vorteil, dass tiefgefasstes Kühlwasser, welches nach der Erwärmung in die Reuss abgegeben wird, das Reusswasser abkühlt, solange das Tiefenwasser nur massvoll (z.B. von 8 °C auf 18 °C) erwärmt wird.

Wärmeenergienutzung

- Für den **Wärmeentzug (Heizung / Wärmepumpen)** ergibt sich eine maximal mögliche Nutzung von Wärmeenergie von 2900 GWh pro Heizsaison (Tabelle 6). Diese Wärmemenge ist deutlich grösser als die realistischerweise zu erwartende Nutzung.

- Selbst wenn die Wärme nur vom Westbecken entnommen würde (1400 GWh; Tabelle 6), so könnte damit der gesamte Siedlungsraum (100'000 Einwohner Stadt Luzern und Umgebung) mit Wärme vom Vierwaldstättersee versorgt werden. Der abgeschätzte künftige Bedarf für dieses Gebiet (~900 GWh pro Saison) zeigt, dass das Potential des Vierwaldstättersees für Wärmenutzung deutlich über dem realistischen Bedarf liegt.
- Falls nur die Reuss für den Wärmeentzug zur Verfügung stehen würde, wäre die Nutzung durch den minimalen Winterabfluss beschränkt. Beim kleinsten Abfluss von 18 m³/s wäre nur eine Nutzung von ~40 MW möglich. Zudem wäre die Wärmenutzung im Februar gelegentlich wegen den tiefen Temperaturen sehr ineffizient. Der Reuss-Abfluss eignet sich für die Wärmenutzung nur beschränkt.

Vergleich mit den natürlichen Wärmeflüssen und dem Klima

- Vom Frühling bis Hochsommer speichern die Alpenrandseen Wärme mit einer Rate von durchschnittlich ~70 W/m² (Fink et al 2014b) welche im Herbst/Winter im gleichen Umfang wiederum an die Atmosphäre abgegeben wird. Dagegen sind die mit der Wärmenutzung verbundenen Wärmeflüsse von ~4.5 W/m² (Tabelle 4; Kühlenergienutzung; Erwärmung des Sees) und von ~11 W/m² (Tabelle 6; Wärmeenergienutzung; Abkühlung des Sees) zwar gering jedoch nicht vernachlässigbar.
- Im Vergleich zu den erwarteten klimatischen Veränderungen sind diese Wärmenutzungen allerdings gering. Modellrechnungen für den Bodensee zeigen (Fink et al 2014a), dass eine Wärmeeinleitung (Kühlwasser) von bis zu 85 W/m² möglich wäre, um den gleichen Effekt wie die erwartete klimatische Erwärmung zu bewirken (Fink et al 2014a). Unter dieser Perspektive kann ein Wärmeentzug im Winter für Wärmenutzung (Heizen) nur begrüsst werden, um der klimatischen Erwärmung wenigstes in bescheidenem Rahmen entgegenzuwirken.

8 Referenzen

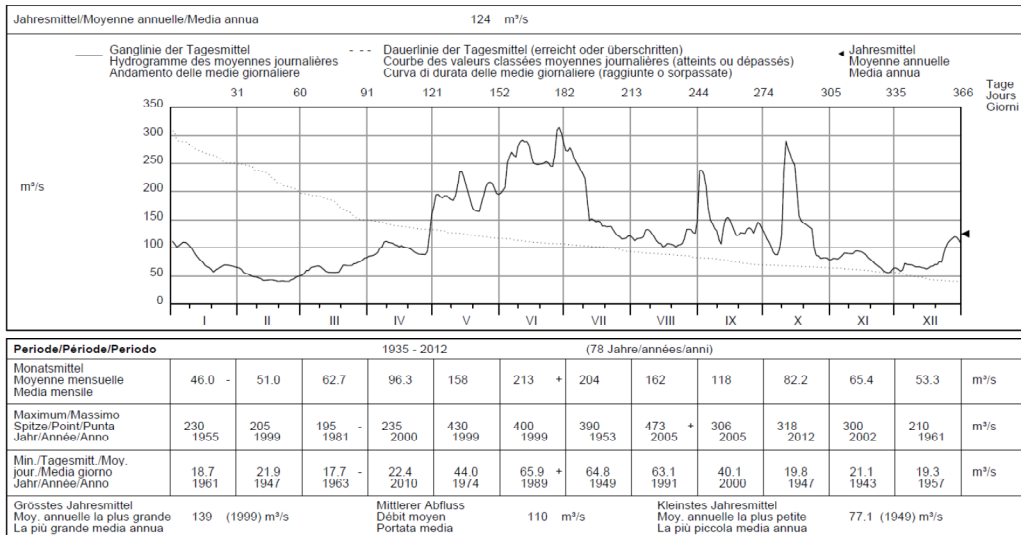
- BEW (1981). Wärmepumpen an Oberflächengewässern. Studie Nr. 19. Bundesamt für Energiewirtschaft. Bericht, Eawag, Dübendorf (Güttinger H und D.M. Imboden).
- Econcept (2014). Richtplan Stadt Luzern, 2. Zwischenbericht vom 29. November 2014.
- Faessler, J., et al. (2012). Valorisation thermique des eaux profondes lacustres: le réseau genevois GLN et quelques considérations générales sur ces systèmes. *Archives des Sciences*, 65: 215 - 228
- Fink, G., M. Schmid and A. Wüest (2014a). Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: Capacities and limits. *Water Resources Research*. 50: 7285–7301, doi:10.1002/2014WR015509.
- Fink, G., M. Schmid, B. Wahl, T. Wolf and A. Wüest (2014b). Heat flux modifications related to climate-induced warming of large European lakes. *Water Resources Research*. 50: 2072 – 2085, doi: 10.1002/2013WR014448.

- Hilbe M., Anselmetti F.S., Eilertsen R.S., Hansen L., Wildi W. (2011) Subaqueous morphology of Lake Lucerne (Central Switzerland): implications for mass movements and glacial history. *Swiss Journal of Geosciences*, 104: 425 – 443, doi:10.1007/s00015-011-0083-z.
- Hilbe M., und Anselmetti F.S. (2012) Kurzbericht zur hydrographischen Vermessung «Luzerner Seebecken». Eawag, Dübendorf, 21. Mai 2012
- IGKB (2014). Bodensee-Richtlinien der IGKB 2005 mit Änderung des Kapitels 5 vom 13.05.2014. Dokument auf: <http://www.igkb.org/publikationen/vorschriften/>
- Jakob, M., Gross, N., Flury, K., Martius, G., Sunarjo, B. (2014). Konzept Energieversorgung 2050. Szenarien für eine 2000-Watt-kompatible Wärmeversorgung für die Stadt Zürich. Energiebeauftragter der Stadt Zürich, 33 p.
- Lang U. und S. Mirbach (2013). Modellierung der hydrodynamischen Verhältnisse im Zusammenhang mit einer geplanten Seewassernutzung in der Horwer Seebucht. Bericht zH P. Berchtold, Gebrüder Amberg AG und Etienne AG. Kup, Stuttgart.
- Lang U. und S. Mirbach (2014). Untersuchung zur Erweiterbarkeit der Leistung der thermischen Nutzung in der Horwer Bucht. Bericht zH P. Berchtold, Seenergy Horw AG. Kup, Stuttgart.
- Mermoud, A., et al. (2007). HCR building: Measuring cooling installations and auditing for deep lake direct cooling network connectivity. Genève, 68 p.
- Meyer M. econcept AG, E-Mail Mitteilung 18 August 2014. Der geschätzte Kälteverbrauch für die aktuellen Betriebe in Luzern beträgt ~38 GWh/Jahr.
- OcCC (2007). Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Scnat, Bern, Schweiz
- Peeters, F., A. Wüest, G. Piepke and D.M. Imboden (1996). Horizontal mixing in lakes. *Journal Geophysical Research* **101**: 18361-75.
- Schmid, M., S. Hunziker, and A. Wüest (2014). Lake surface temperatures in a changing climate: a global sensitivity analysis. *Climatic Change*. 124(1-2): 301-315, doi:10.1007/s10584-014-1087-2.
- Schmid, M. (2014a). Energieverbund Zug Machbarkeitsstudie, Technischer Bericht Seewasser, Bericht zH Stadt Zug und AfU Zug.
- Schmid, M. (2014b). Abschätzung des Potenzials des Ägerisees für die Wärme- und Kältenutzung, Bericht zH AfU Zug.
- Seenergy Horw AG, Konzessionsgesuch vom 25.7.2014
- Viquerat, P.A., Lachal, B.M., Hollmuller, P. (2012). *Connexion des bâtiments de l'ONU au réseau GLN: analyse de la première année de fonctionnement*. SIG. Genève.
- Wüest A, G. Fink und H. Ehmman (2014). Empfehlungen für eine nachhaltige Wärmenutzung am Bodensee. Richtlinien. KlimBo Teilprojekte 4.h, 4p und Anhänge, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW).

9 Anhang

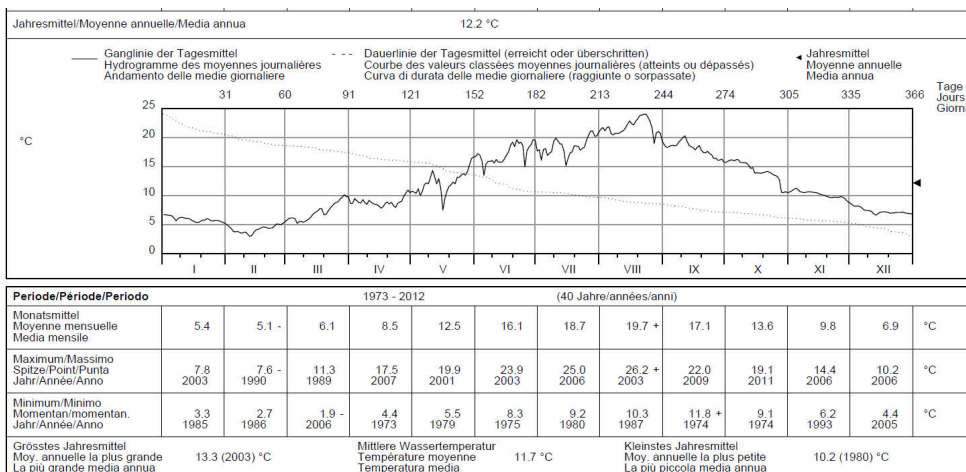
Anhang A1

Abflussstatistik der Reuss, Station 2152 Geissmattbrücke Luzern, LHG/BAfU



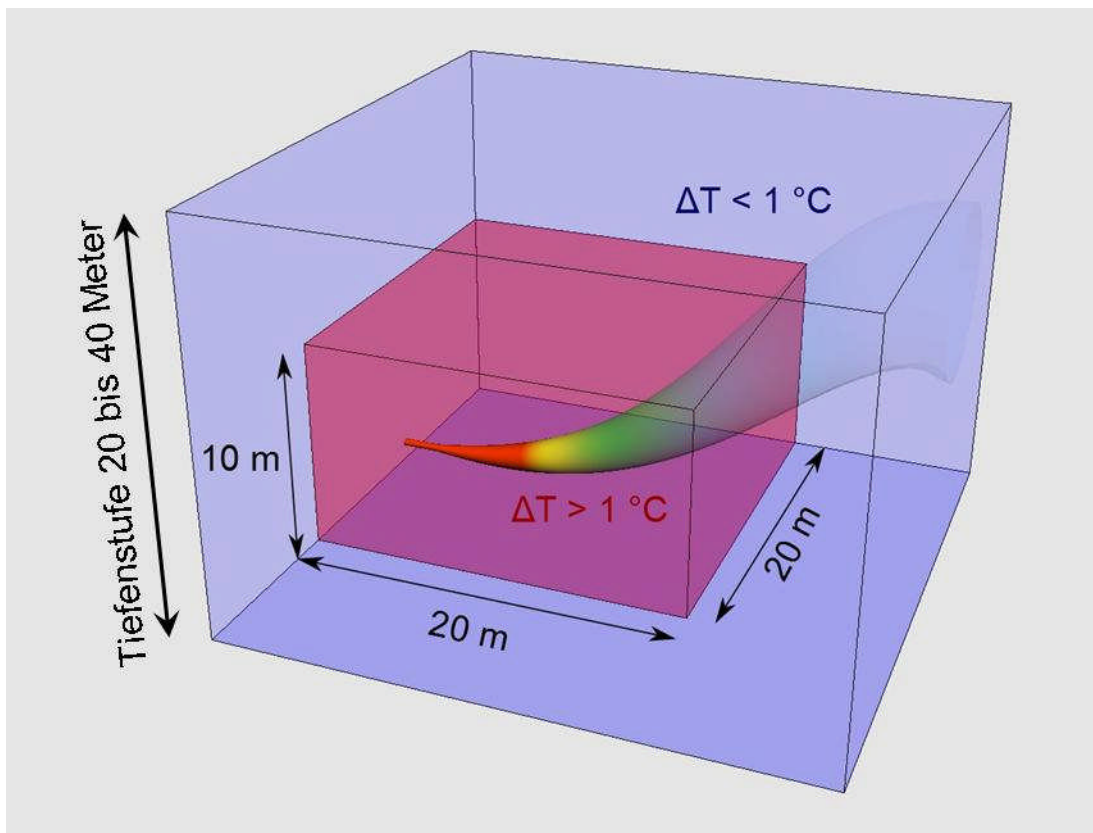
Anhang A2

Temperaturstatistik der Reuss, Station 2152 Geissmattbrücke Luzern, LHG/BAfU



Anhang A3

Konzept der Vermischungszone, welche sich bei der Wasserrückgabe bildet



Die Temperatur im Rückgabewasser bei Kühlwassereinleitung ist deutlich höher als die des Umgebungswassers, so dass der Schleier aufsteigt. 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, 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 Delta $\Delta T = 7^\circ\text{C}$ aus
- Die Temperaturänderung ausserhalb der Mischungszone muss kleiner als 1°C sein. Als Mischungszone gilt ein Bereich von 20 mal 20 Meter horizontaler und 10 Meter vertikaler Ausdehnung.

Anhang A4 Selective Withdrawal

Bei der Entnahme wird das Seewasser in der Tiefe der Öffnung des Fassungsrohres und mit der entsprechenden Dichte in dieser Tiefe gefasst (Selective Withdrawal; Kataoka et al 2000; Woods 2001). Das Wasser stammt jedoch aus einer Schicht mit einer gewissen Mächtigkeit D (m), welche gegeben ist durch

$$D = 1.8 \times (Q_E / N)^{1/3}$$

wobei N^2 ($1/s^2$) die Stabilität der Wassersäule und Q_E die Fassungsmenge (m^3/s) bezeichnet. Für die in Abbildung 2 angegebene Temperaturschichtung (Sommer) würde die Entnahmeschicht bei einer Fassung von $Q_E = 1 m^3/s$ in 20 m Tiefe eine Mächtigkeit von $D = \sim 5.5$ m aufweisen. Durch die vertikale Oszillation der Schichten (interne Wellen; interne Seiches) wird die Entnahmetiefe noch zusätzlich verbreitert. Aus diesem Grund erfolgt die Entnahme immer über eine um mehrere Meter breite Zone, auch wenn eine schmale Entnahmeöffnung sich in einer festen Tiefe befindet.

Literatur:

- Kataoka, T., M. Tsutahara, and M. Tanaka (2000), Point sink flow in a linearly stratified fluid of finite depth, *Physics of Fluids* 12(11), 2775-2786.
 Wood, I. R. (2001), Extensions to the theory of selective withdrawal, *Journal of Fluid Mechanics*, 448, 315 - 333.

Anhang A5 Temperatur Kreuztrichter Februar / März 1963

Datum	Tiefe (m)	Temp (°C)	Leitf (bei 20 °C)	Leitf (bei 25 °C)
11.02.1963	0	1	189	210.5
11.02.1963	5	1.5	190	211.6
11.02.1963	10	2	190	211.6
11.02.1963	15	2.5	190	211.6
11.02.1963	20	2.8	190	211.6
11.02.1963	30	3.2	190	211.6
11.02.1963	50	3.6	192	213.8
11.02.1963	75	3.9	195	217.2
11.02.1963	100	4.1	199	221.6
11.02.1963	110	4.2	201	223.8
12.03.1963	0	2.8	189	210.5
12.03.1963	5	2.9	188	209.4
12.03.1963	10	2.9	188	209.4
12.03.1963	15	2.9	189	210.5
12.03.1963	20	2.9	189	210.5
12.03.1963	30	3.1	188	209.4
12.03.1963	50	3.4	190	211.6
12.03.1963	75	3.6	194	216.0
12.03.1963	100	3.6	195	217.2
12.03.1963	110	3.7	197	219.4