

Potential zur Wärmeenergienutzung aus dem Zürichsee

- Machbarkeit -



Wärmeentzug (Heizen) und Einleitung von Kühlwasser

Autor Alfred Wüest, Eawag – Seestrasse 79, CH-6047 Kastanienbaum
EPFL – ENAC/IEE/APHYS, CH-1015 Lausanne

Auftraggeber AWEL, Amt für Abfall Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich
Abteilung Gewässerschutz und Abteilung Energie

Begleitgruppe Wärmeenergienutzung aus dem Zürichsee
Pius Niederhauser, AWEL, Abt. Gewässerschutz
Alex Nietlisbach, AWEL, Abt. Energie
Sascha Gerster, AWEL, Abt. Energie
Marco Calderoni, AWEL, Abt. Wasserbau
Felix Schmid, Stellvertreter des Energiebeauftragten, Stadt Zürich

Kastanienbaum, im Dezember 2012

1 Hintergrund des Kurzberichtes

Künftig soll der Zürichsee als Wärmeenergiequelle und als Wärmeenergiespeicher intensiver genutzt werden. Einerseits eignet sich das kühle Tiefenwasser des Sees im Sommer ideal zur Kühlung der urbanen Infrastruktur und zur Ableitung von Prozesswärme (Wüest und Imboden 1992). Andererseits kann dem relativ warmen Seewasser im Winter Wärme zur Heizung (Wärmepumpen) entzogen werden.

Nutzung von Seewasser zu Heiz- und Kühlzwecken ist aus energiepolitischer Sicht erwünscht und kann bei Berücksichtigung der gesetzlichen und ökologischen Vorgaben voraussichtlich nachhaltig betrieben werden. In jüngster Vergangenheit ist eine markante Zunahme von Anlagen für die energetische Nutzung des Seewassers festzustellen. Es ist damit zu rechnen, dass diese Entwicklung - insbesondere bei der Kühlung von Gebäuden - in Zukunft weiterhin anhalten oder sich sogar noch verstärken wird. Basierend auf dem Konzept Energieversorgung 2050 der Stadt Zürich wurde abgeschätzt, dass für das untere Seebecken (vorwiegend Stadt Zürich) ein maximaler Bedarf von Wärme- und Kälteenergie durch Nutzung des Zürichsees von ~400 GWh pro Saison besteht (Mitteilung Felix Schmid, Stadt Zürich).

Im vorliegenden Kurzbericht soll abgeschätzt werden, ob dieser Bedarf und allenfalls eine künftige Steigerung auf 800 GWh pro Saison das Potential des Seebeckens bei Zürich übersteigt und welche Rahmenbedingungen zu beachten sind, damit mittel- bis langfristig das Potential möglichst nachhaltig ausgeschöpft werden kann.

Für die Beurteilung sind zwei hydrologische Faktoren wichtig: (1) Das stadtseitige Seebecken kann nicht isoliert betrachtet werden: der Wasserkörper des gesamten Zürichsees ist zusammenhängend und Dichteunterschiede (v.a aufgrund von Temperaturdifferenzen) zwischen dem stadtseitigen Seebecken und dem Hauptbecken breiten sich rasch über den ganzen See aus. (2) Im Weiteren soll die Limmat in die Überlegungen einbezogen werden, da sich der überwiegende Teil des Wärme- und Kältebedarfs in der Nähe des Seeausflusses befindet. Es ist jedoch zu beachten, dass durch das Ableiten von Tiefenwasser aus dem See die Struktur der Seeschichtung und die Wasserqualität der Limmat verändert werden. Diese Überlegungen sollen in diesen Kurzbericht einfließen.

Das Ziel dieses Berichtes zuhanden des AWEL besteht darin, abzuschätzen, ob die vorgesehene thermische Energienutzung zu grundsätzlichen Problemen (No-Go's) führen könnte und welche kritischen Faktoren bei der Ausarbeitung der Projekte zu berücksichtigen sind.

2 Fragestellungen

Gegenstand dieses Kurzberichtes sind potentielle Wärmeenergienutzungen aus dem Zürichsee für Kühlung und Heizung von je 400 und je 800 GWh pro Saison. Es sollen, auf dem Niveau einer Machbarkeitsstudie, die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Mit welchen Temperaturänderungen ist im See und/oder in der Limmat zu rechnen?
- Welches sind die kritischen Randbedingungen bezüglich
 - Betrieb (Volumina der Wasserentnahme und Wasserrückgabe),
 - Entnahme- und Einleitungstiefen,
 - Veränderung der Schichtung im See und lokale Einflussfaktoren,
 - Anzahl der Wasserentnahmefassungen und Wasserrückleitungsstellen,
 - Abfluss der Limmat, und
 - Jahreszeit?
- Welche Fragen (kritischen Aspekte) sind bei der Projektierung von künftigen Anlagen als Grundlagen für das Konzessionsverfahren zu klären?
- Ist das Potential der Wärmeenergienutzungen für Kühlung und Heizung grösser als die vorgegebenen 400 / 800 GWh pro Saison?

3 Problemanalyse

Eine Zusammenfassung der Problemanalyse befindet sich in Tabelle 1, wo in deren Fussnoten die Argumente in Kurzform aufgeführt sind.

3.1 Wärmehaushalt und Schichtung des Zürichsees

(i) Schichtung im Jahresverlauf – Vom Frühling bis Hochsommer speichert der Zürichsee Wärme mit einer Rate von durchschnittlich $\sim 70 \text{ W/m}^2$ welche er im Herbst/Winter im gleichen Umfang wiederum verliert. Dagegen sind die mit der vorgesehenen Wärmeenergienutzung verbundenen Wärmeflüsse von 2.7 und 5.5 W/m^2 (gemäss Tabelle 2) gering jedoch nicht vernachlässigbar. Der Zusammenhang zwischen Wärmelast E (W) und Erwärmung $\partial T/\partial t$ ($^{\circ}\text{C/s}$) ist gegeben durch

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

wobei V das betroffene Seevolumen und $\rho C_p = 4.2 \times 10^6 \text{ J}/(\text{°C m}^3)$ die Wärmekapazität bedeutet. Dieser Zusammenhang zeigt auf, dass ein grosses „Empfängervolumen“ V zu einer geringen Erwärmung führt. Dem steht gegenüber, dass grössere Volumen in grössere Tiefen reichen und somit längere Leitungen zum Ufer notwendig werden. Hier schlagen wir als Kompromiss für das Nutzungsvolumen die Schicht von 15 bis 30 m Tiefe vor, weil damit einerseits die biologisch deutlich aktivere Oberflächenschicht nicht verändert wird und andererseits die von der Wasserversorgung genutzte Tiefenschicht unterhalb 30 m Tiefe nicht betroffen wird. Es ist jedoch zu beachten, dass die lichtschwache Planktothrix sich im Zürichsee auch unterhalb 15 m Tiefe einschichtet und entwickelt. Ein Ausweichen von ihrem Lebensraum würde jedoch zu unrealistisch grossen Nutzungstiefe führen und die Rückleitung von Kühlwasser praktisch verunmöglichen.

(ii) Entnahme und Einleitungstiefe im See – Die Entnahmen des Seewassers sollte so gestaltet sein, dass Fische nicht eingezogen werden. Ansonsten spielt die Lage / Tiefe für den See unmittelbar keine Rolle, ausser es würden so grosse Mengen entnommen, dass dadurch die Schichtung des Sees beeinflusst würde (Abschnitt 3.2(i) unten).

Im Sommer (Kühlwasser) sollte die Entnahme unterhalb der Sprungschicht (Figur 2) erfolgen, um möglichst kühles Wasser zu fassen. Im Winter (Heizen) ist möglichst warmes Wasser erwünscht, so dass die Entnahme nicht allzu tief und auch nicht unmittelbar an der Oberfläche (Wahrscheinlichkeit der inversen Schichtung mit Temperaturen bis 0 °C) erfolgen sollte.

Die Rückgabe des Wassers kann im Winter oberflächlich erfolgen, weil die nächtliche Abkühlung zu Konvektion an der Oberfläche führt und somit das Wasser jede Nacht über ein grosses Volumen der Oberflächenschicht verteilt wird. Im Sommer sollte die Rückgabe unterhalb der Sprungschicht erfolgen, 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. Betrifft die Rückgabe nur eine geringe Wassermenge, die kühler ist als das Oberflächenwasser, so kann die Rückgabe auch im Sommer oberflächlich erfolgen.

Bei der Entnahme wird das Seewasser in der Tiefe des Fassungsrohres und mit der entsprechenden Dichte in der Tiefe entzogen (selective withdrawal; Kataoka et al 2000; Woods 2001). Das Wasser wird aus einer Schicht mit einer gewissen Mächtigkeit D (m) der Schichtung entzogen, welche gegeben ist durch

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

wobei N^2 ($1/\text{s}^2$) die Stabilität der Wassersäule und Q_E die Fassungsmenge (m^3/s) bezeichnet. Für die in Figur 2 angegebene Temperaturschichtung (Sommer) würde die Entnahmeschicht

bei einer Fassung von $Q_E = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Mächtigkeit von $D = 5.5 \text{ m}$ aufweisen. Durch die vertikale Oszillation der Schichten (internen Wellen; interne Seiches) wird die Entnahmetiefe noch mehr verbreitert. Aus diesem Grund erfolgt die Entnahme immer über eine um mehrere Meter breite Zone, auch wenn die Entnahmeöffnung sich in einer festen Tiefe befindet.

3.2 Evaluation der Ausleitungs- und Einleitungsoptionen

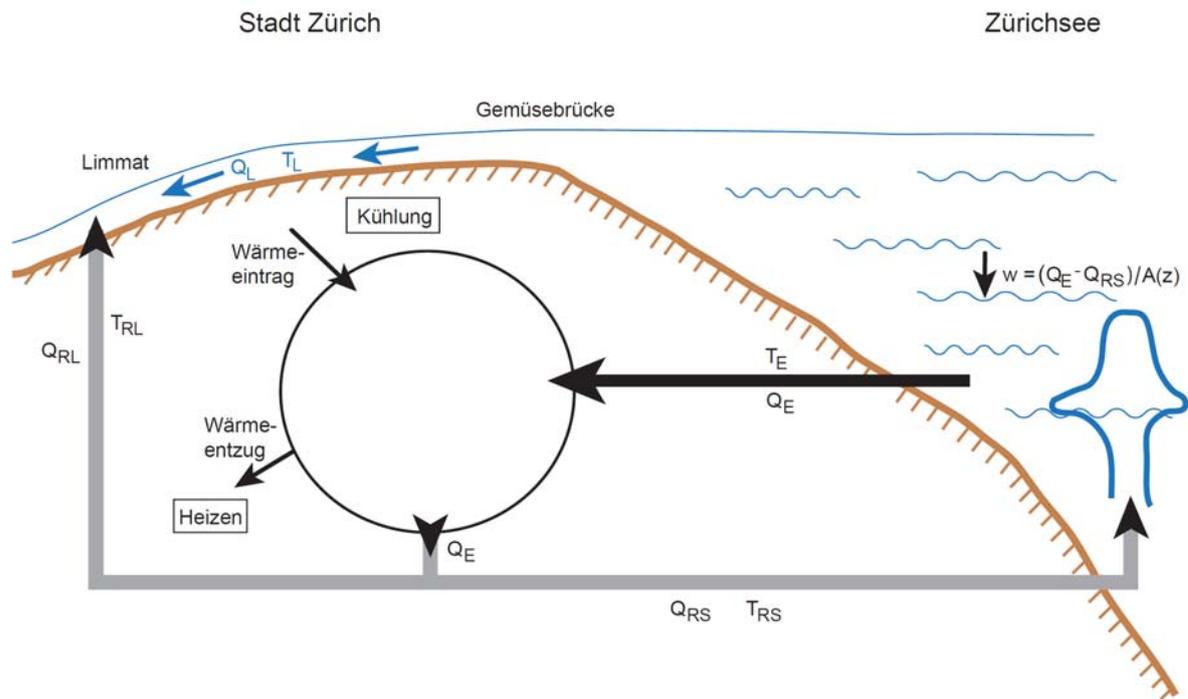
(i) Erwärmung durch Absenkung (Wasserentnahme) im See - Bei der Entnahme von Wasser aus dem See wird die Wassersäule des Sees um das entsprechende Volumen abgesenkt (Figur 1). Dies betrifft das gesamte Seevolumen, welches über dem Entnahmeniveau liegt. Bei einer Wasserentnahme von $Q_E \text{ (m}^3/\text{s)}$ beträgt die Absenkrate $w(z) = Q_E/A(z)$ wobei $A(z)$ (m^2) die Querschnittsfläche des Sees in der Tiefe z bezeichnet. Da diese Querschnittsfläche mit der Tiefe z im See abnimmt, ist $w(z)$ am grössten beim Entnahmeniveau und am kleinsten an der Seeoberfläche. Typische Werte sind in der Tabelle 2 gegeben: Eine Tiefenwasserentnahme von Q_E (= 70 Mio m^3 pro Sommersaison) würde zu einer Absenkung in 10 m Tiefe ($A(10 \text{ m}) = 58.3 \text{ km}^2$) von 1.2 m führen (Tabelle 2).

Umgekehrt führt die Rückgabe von Wasser in den See zu einer entsprechenden Volumenverschiebung oberhalb des Rückgabeneiveaus nach oben, $w(z) = -Q_{RS}/A(z)$, wobei Q_{RS} (m^3/s) die Wasserrückgabe in den See bedeutet (Figur 1). Erfolgen sowohl Entnahme als auch Rückgabe im See, so addieren sich Absenk- und Anheberate oberhalb der entsprechenden Entnahme- und Rückgabetiefen und die Verschiebungen der Schichtung können sich bei ähnlichen Wassermengen weitgehend kompensieren ($w(z) = (Q_E - Q_{RS})/A(z)$; Figur 1).

Die Absenkung, welche sich aufgrund der Entnahme von Seewasser ergibt, bringt wärmeres Wasser aus geringerer Tiefe noch unten in den Bereich von kühlerem Wasser (Figur 2). Diese Absenkung des Temperaturprofils $T(z)$ durch die Verschiebung nach unten führt zu einer Erwärmung von

$$\partial T(z)/\partial t = (Q_E/A(z)) \partial T(z)/\partial z$$

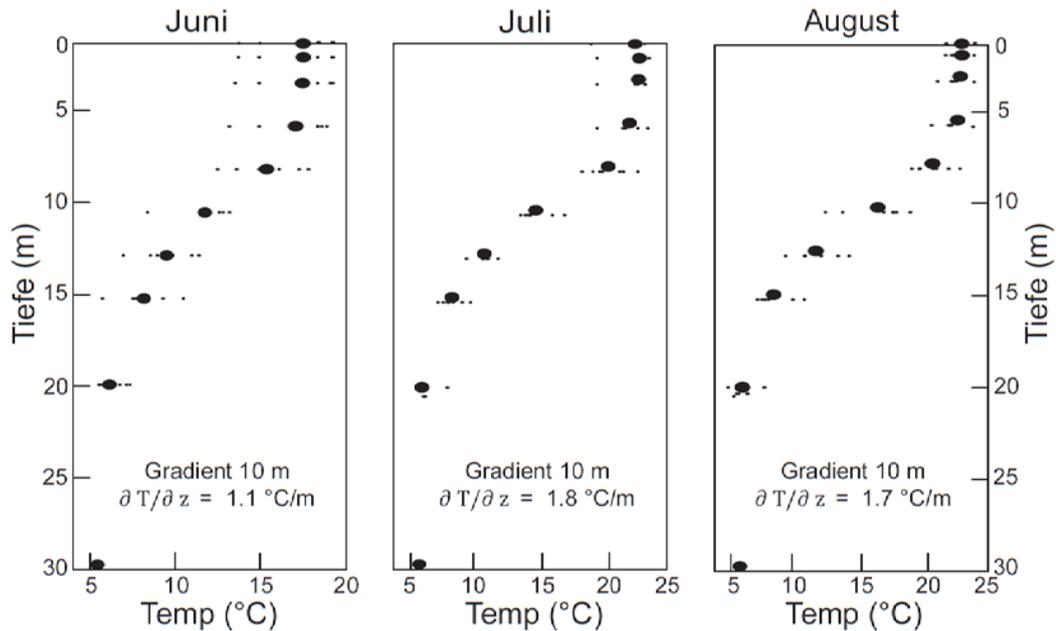
Diese Situation ist in der Figur 2 dargestellt. Im obigen Beispiel würde bei einer Absenkung von 1.2 m in 10 m Tiefe ($A(10 \text{ m}) = 58.3 \text{ km}^2$; Tabelle 2) die Temperatur um $\sim 1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ zunehmen, weil der natürliche Temperaturgradient in dieser Tiefe $\sim 1.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ beträgt (Figur 2; Tabelle 2). Zudem würde Ende August die Oberflächenschicht um $\sim 1.2 \text{ m}$ mächtiger (tiefer).



Figur 1 - Wärmenutzungskonzept am unteren Seebecken des Zürichsees: Die Wassermenge Q_E wird dem See mit der Temperatur T_E entzogen und nach verschiedenen Stufen von Wärmeeintrag und Wärmeentzug wird das Wasser dem Gewässer zurückgegeben. Ein Teil davon wird in den See (Q_{RS}, T_{RS}) und ein Teil in die Limmat (Q_{RL}, T_{RL}) zurückgeführt. Im See werden die Wasserschichten oberhalb der Entnahme in der Tiefe z mit der Rate von $(Q_E - Q_{RS})/A(z)$ abgesenkt. Auch wenn T_{RL} deutlich höher ist als T_E , so wird die Limmat gekühlt, so lange $T_{RL} < T_L$ ist.

(ii) Erwärmung durch Kühlwasser im See - Bei der Einleitung von Kühlwasser verändert sich die Temperatur des betroffenen Seevolumens, welches für die Rückgabe vorgesehen ist. Üblicherweise wird das erwärmte Wasser in eine grössere (kühlere) Tiefe eingeleitet und mit der Dimensionierung des aufsteigenden thermischen Schleiers (Figur 1) kann das „Rückgabevolumen“ vorbestimmt werden (Heinz et al. 1992). Je grösser dieses „Rückgabevolumen“ gewählt wird, desto geringer ist die Temperaturveränderung. Gemäss dem Beispiel in Tabelle 2 würde sich das Seevolumen von 15 bis 30 m Tiefe bei einer Nutzung von 400 / 800 GWh pro Saison um ~ 0.5 / ~ 1.1 °C erwärmen.

Die Rückgabe des erwärmten Kühlwassers soll nicht an der Oberfläche erfolgen, um einerseits nicht zusätzlich Nährstoffe in die produktive Oberfläche einzutragen und um andererseits die Schichtung der biologisch-aktiven Oberfläche im Bereich der Einleitung (Ufernähe) nicht zu verändern. Zwar könnte das erwärmte Kühlwasser unter Umständen während des Hochsommers sogar eine Abkühlung im Rückgabevolumen erzeugen, doch während des restlichen Jahreszeit würde so ufernahes Oberflächenwasser erwärmt.



Figur 2 – Temperaturprofile im Zürichsee während der Kühlsaison (Wärmeeinleitung) von Juni, Juli, August 2005 bis 2011. Die grossen Symbole sind Mittelwerte und die kleinen Symbole bedeuten die sieben Einzelwerte von 2005/11. Für diese drei Monate betragen die vertikalen Temperaturgradienten in 10 m Tiefe $dT/dz = 1.1$ (Jun), 1.8 (Jul) und 1.7 °C/m (Aug). Der Temperaturgradient dT/dz variiert mit der Tiefe und erreicht in 10 m Tiefe das Maximum (stärkste Schichtung). Aus diesem Grund wird im Text und in Tabelle 2 die Absenkrate in 10 m Tiefe betrachtet.

(iii) Übermässige Erwärmung der Limmat im Sommer – Die Temperaturen des Limmatwassers, T_L , können im Sommer sehr hohe Werte annehmen. Beispielsweise wurden im Sommer 2003 Maxima von 28.3 °C erreicht und während 40 Tagen lag die Temperatur des abfliessenden Seewassers über 25 °C (Hydrol. Jahrbuch, AWEL; 2012). Auch bei durchschnittlicher Wetterbedingung stieg die Temperatur der Limmat in den letzten 20 Jahren für einige Tage über 25 °C (Hydrol. Jahrbuch, AWEL; 2012). Auf Grund solch hoher Temperaturen im Sommer ist eine zusätzliche Erwärmung des Flusses nicht akzeptabel. Daraus ergibt sich unmittelbar, dass **Kühlwasser nicht von der Seeoberfläche oder aus der Limmat** entnommen werden kann, falls das erwärmte Kühlwasser anschliessend in die Limmat abgeleitet würde.

Die Rückführung von Kühlwasser stellt dann kein Problem dar, falls das Wasser in der (kühleren, T_E) Tiefe des Zürichsees entnommen wird und das rückgeleitete Kühlwasser – auch nach Erwärmung – eine geringere Temperatur als das oberflächlich aus dem See abfliessende Limmatwasser aufweist ($T_{RL} < T_L$). In diesem Fall – Entnahme Tiefenwasser und Rückgabe Limmat – führt die Rückgabe des Kühlwassers sogar zu einer erwünschten Abkühlung der Limmat. Diese Bedingung sollte einfach einzuhalten sein, da Tiefenwasser T_E meist kühler als 8 °C ist und falls die dimensionierte Erwärmung $\Delta T = 10$ bis 12 °C nicht überschreitet.

Trotzdem ist darauf zu achten, dass die Menge des entnommenen Tiefenwassers sich in Grenzen hält: (1) wegen der Erwärmung durch Absenkung (Punkt (i) oben) und (2) weil zudem das hydraulische Regime der Seeoberfläche verändert wird (wesentlicher Teil des Limmatabflusses wäre nicht mehr von der Oberfläche des Sees; Veränderung Algen-Wachstums).

Tabelle 1 Evaluation verschiedener Optionen der Wasserentnahme und Wasserrückgabe

	Wasserentnahme See	Wasserrückgabe See	Wasserentnahme Limmat	Wasserrückgabe Limmat
Wärmeentzug im Winter	<i>unkritisch⁽¹⁾</i>	<i>unkritisch⁽²⁾</i>	<i>ineffizient⁽³⁾</i>	<i>mässig kritisch⁽⁴⁾</i>
Wärmeeintrag im Sommer	<i>unkritisch bei adäq. Konzept⁽⁵⁾</i>	<i>mässig kritisch⁽⁶⁾</i>	<i>sehr kritisch, keine Option⁽⁷⁾</i>	<i>unkritisch bei adäq. Konzept⁽⁸⁾</i>

Fussnoten

⁽¹⁾ Im Verlaufe des Winters wird der See durch die natürliche Abkühlung bis zur Entnahmetiefe weitgehend homogen gemischt. Die Wasserentnahme hat somit keinen Einfluss auf die Schichtung im See. Auch andere Wassereigenschaften werden nicht tangiert.

⁽²⁾ Im Winter kühlt sich der See natürlicherweise ab. Durch den Wärmeentzug (Heizung) würde der See zusätzlich abgekühlt, jedoch aufgrund der Grösse des Zürichsees nur in bescheidenem Umfang. Diese zusätzliche Abkühlung würde die saisonale Tiefenmischung, welche das Tiefenwasser mit Sauerstoff versorgt, begünstigend unterstützen. Kritisch würde die Rückgabe des abgekühlten Seewassers nur dann, wenn das ganze Seevolumen massiv ($> 1^\circ\text{C}$) abgekühlt würde. Im Falle des Zürichsees wäre dies erst ab einem Wärmeentzug von 3800 GWh / Saison (drei Monate D,J,F) möglich.

⁽³⁾ Die Wasserentnahme aus der Limmat wäre nur problematisch bei sehr grossen Ableitungen während Perioden von sehr tiefen Abflüssen. Diese Situation könnte auftreten, wenn in trockenen / kalten Wintern die Wasserführung zu gering würde. Zu solchen Zeitpunkten sind jedoch die Wassertemperaturen minimal und potentiell unter 4°C (inverse Schichtung im See). Die Wärmenutzung von solch kaltem Oberflächenwasser würde somit ineffizient und sollte vermieden werden. Die Entnahme aus dem See ist in dieser Situation günstiger, da im Tiefenwasser mindestens $\sim 4^\circ\text{C}$ garantiert ist.

⁽⁴⁾ Die Einleitung von abgekühltem Seewasser in die Limmat würde dann problematisch, falls: (i) besonders grosse Wassermengen mit (ii) besonders tiefen Temperaturen während Perioden mit (iii) besonders geringem Abfluss der Limmat zugeführt würden.

Wahrscheinlich spielt diese Situation in der Praxis keine Rolle, da unter diesen Bedingungen die Wärmenutzung ineffizient wird und zudem die Möglichkeit besteht das kalte Wasser in den See einzuleiten.

⁽⁵⁾ Im Sommer ist der See geschichtet und die Entnahme von Wasser aus der Tiefe führt zu einer Absenkung der Schichtung des gesamten Sees oberhalb der Entnahmetiefe (Abschnitt 3.2). Als Folge der Absenkung steigen die Temperaturen aller Wasserschichten oberhalb der Entnahmetiefe (Figur 2). Die Temperaturzunahme ist umso grösser (i) je stärker die Schichtung und (ii) je grösser die Wasserentnahme ist. Um die Absenkung zu minimieren, ist es deshalb wichtig eine wesentliche Erwärmung des Kühlwassers zu erlauben (z.B. $\Delta T \approx 10$ bis 12°C), damit der Wasserfluss Q_E gering bleibt. Beispiel: Bei einer Tiefenwasserentnahme im See bei 8°C und einer Erwärmung um $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, ergäbe sich eine Einleitungstemperatur in die Limmat (oder in den See) von 18°C was an beiden Stellen keine Probleme erzeugen würde (die Limmat würde im Sommer dadurch gekühlt). Rechenbeispiel im Abschnitt 4.1.

⁽⁶⁾ Die Rückgabe des warmen Wasser muss genügend tief erfolgen, so dass (i) das aufsteigende (leichte) Rückgabewasser nicht Nährstoffe ins Oberflächenwasser transportiert und (ii) das Oberflächenwasser nicht zusätzlich erwärmt wird. Wenn die Rückgabe über einen genügend grossen Tiefenbereich erfolgt, kann die Temperaturänderung im See limitiert werden (Rechenbeispiel im Abschnitt 4.1; Tabelle 2). Die Rückgabe in den See hat den Vorteil, dass das Seewasser oberhalb der Rückgabentiefe nicht abgesenkt wird. Damit wird das Metalimnion kaum erwärmt und die Oberflächenschicht wird nicht verbreitert.

⁽⁷⁾ Die Temperatur des Limmatwassers erreicht im Sommer regelmässig $> 25^\circ\text{C}$ und kommt als Kühlwasser nicht in Frage, da sonst sehr warmes Wasser anfallen würde, welches kaum sinnvoll zu „entsorgen“ wäre. Gemäss der verwaltungsinternen Absprache (Bewilligungspraxis für Wärmeeinleitung bei Gewässern mit natürlichen Temperaturen von über 25°C ; AWEL / ALN, 2005) sollte diese Option nicht in Betracht gezogen werden. Siehe auch Problematik in der Aare durch KKW Mühleberg (Meier et al. 1997).

⁽⁸⁾ Gemäss ⁽⁵⁾ stellt die Rückgabe des Kühlwassers in die Limmat kein Problem dar, solange das Kühlwasser die Limmat nicht erwärmt. Dies kann erreicht werden, wenn das Kühlwasser aus grösserer Tiefe des Sees stammt. In diesem Fall kann die Temperaturzunahme (oder –abnahme) in der Limmat durch geeignete Dimensionierung limitiert werden.

4 Rechenbeispiele

4.1 Wärmeeintrag (Kühlwasser) von 400 / 800 GWh pro Sommersaison

Im folgenden Beispiel gehen wir von einem Wärmeeintrag durch Kühlwasser von 400 und 800 GWh pro Sommersaison aus (Tabelle 2). Die Werte sind so gewählt, dass sie ein optimistisch-realistisches Szenario (400 GWh pro Sommer) und ein maximal mögliches Szenario umfassen (800 GWh pro Sommer). Wir nehmen an, die Kühlleistung am Zürichsee werde während den drei Sommermonaten (J,J,A) ausgeschöpft (2200 Stunden). Wie die in Tabelle 2 dargestellten Rechnungen zeigen, ergibt sich bei diesem Umfang der Kühlung ein differenziertes Bild: Einerseits ergeben sich lokal viel zu grosse Erwärmungen (Limmat oder See) wenn das Nutzungskonzept ungünstig gewählt wird und andererseits ist dieses Volumen der Wärmeenergienutzung durchaus realisierbar, wenn zwei wesentliche Randbedingungen (siehe unten) eingehalten werden.

Der durch die Nutzung veränderte Wärmefluss für den gesamten See beträgt bloss 2.7 resp. 5.5 W/m². Selbst wenn alles Kühlwasser zurück in den See geleitet würde, so könnte die Erwärmung des Seewassers in der Rückgabebzone von 30 bis 15 m Tiefe bei 1 °C gehalten werden. Allerdings müsste ein wesentlicher Teil der Rückgabe bis in ~30 m Tiefe erfolgen. In der praktischen Realisierung ist davon auszugehen, dass ein wesentlicher Teil der Rückleitung in die Limmat erfolgt, sodass sich die Erwärmung des Sees entsprechend reduzieren würde.

Kritisch kann jedoch die Absenkung der Oberflächenschicht werden, falls sehr viel Wasser dem See entnommen würde und dieses Wasser nach der Erwärmung in die Limmat abgeleitet würde. Es wird deshalb aufgezeigt, dass enorme Wassermengen notwendig wären, falls bei der Kühlung für das Rückgabewasser nur eine Erwärmung von $\Delta T = 3 \text{ °C}$ zugelassen würde (Tabelle 2). Durch die entzogenen Wassermengen (114 resp 229 Mio m³), würde das Metalimnion in 10 m Tiefe während den drei Sommermonaten um mehrere Meter abgesenkt (Tabelle 2), was im Metalimnion zu einer lokalen Erwärmung von mehreren °C führen würde. Diese Kombination von geringer Erwärmung des Kühlwassers und Ableitung in die Limmat würde zu einer Veränderung der Schichtung des Zürichsees führen, was in dieser Form nicht akzeptabel ist. Wird jedoch das Kühlwasser im Rahmen von 10 bis 12 °C erwärmt – was mit einer Kühlung der Limmat im Sommer einhergeht – treten diese Probleme nicht auf, da das Metalimnion nur um 0.6 bis 1.2 m abgesenkt wird (Tabelle 2). Der geringste Eingriff in den See und die Limmat ergibt sich, wenn ähnlich grosse Mengen des Kühlwassers in den See und die Limmat abgeleitet werden (Figur 1). Die Details der vertikalen und zeitlichen Verteilung der Entnahme und Rückgabe sollte im Rahmen einer Projektstudie ausgearbeitet werden. Auf dem Niveau der Machbarkeit (dieser Bericht) ist die Feststellung wichtig, dass - basierend auf den obigen Rechnungen - die Realisierung grundsätzlich möglich, jedoch einer kritischen Analyse zu unterziehen ist.

Tabelle 2 Einleitung Kühlwasser 400 GWh / 800 GWh pro Saison

Annahmen	Effekt 400 GWh pro Sommer	Effekt 800 GWh pro Sommer
Wärmeinput durch Kühlwasser	400 GWh / Saison	800 GWh / Saison
Wärmefluss pro Seefläche	2.7 W/m ²	5.5 W/m ²
Zeitraum Erwärmung (Einleitung Kühlwasser) während 3 Monaten (J,J,A)	2200 h	
Mittlere Leistung, 3 Monate	182 MW	364 MW
Seevolumen, 15 bis 30 m Tiefe	655 Mio m ³	
Erwärmung in diesem Seevolumen, falls gesamte Einleitung in den See	0.52 °C	1.1 °C
Niedrigster Abfluss Limmat, Sommer 2003 ⁽¹⁾	22.6 m ³ /s ⁽¹⁾	
Erwärmung voll zu Lasten der Limmat während Periode des niedrigsten Abflusses	1.9 °C	3.8 °C
Erwärmung Kühlwasser $\Delta T = 3\text{ °C}$		
Menge Kühlwasser bei $\Delta T = 3\text{ °C}$	114 Mio m ³	229 Mio m ³
Absenkung 10 m Tiefe (Rückgabe in Limmat)	2.0 m ⁽²⁾	3.9 m ⁽²⁾
Temperaturgradient dT/dz; 10 m Tiefe	1.54 °C/m ⁽³⁾	
Erwärmung in 10 m Tiefe durch Absenkung	3.0 °C	6.0 °C
Erwärmung Kühlwasser $\Delta T = 10\text{ °C}$		
Menge Kühlwasser bei $\Delta T = 10\text{ °C}$	34 Mio m ³ (4.4 m ³ /s)	69 Mio m ³ (8.9 m ³ /s)
Absenkung 10 m Tiefe (Rückgabe in Limmat)	0.6 m	1.2 m
Erwärmung in 10 m Tiefe durch Absenkung	0.91 °C	1.8 °C
Erwärmung Kühlwasser $\Delta T = 10\text{ °C}$ Rückgabe Kühlwasser: 50% See / Limmat		
Absenkung 10 m Tiefe (50% in Limmat)	0.3 m	0.6 m
Erwärmung in 10 m Tiefe durch Absenkung	0.45 °C	0.91 °C
Temperatureffekt Limmat	Abkühlung	

Fussnote

⁽¹⁾ abgeschätzt aus Differenz Abfluss Hard und Abfluss Sihlhölzli (siehe Anhang)

⁽²⁾ Seefläche in 10 m Tiefe ist $A(10\text{ m}) = 58.3\text{ km}^2$.

⁽³⁾ Mittelwert der Monate Juni, Juli und August von 2005 bis 2011 (Daten AWEL).

4.2 Wärmeentzug (Wärmepumpen) von 400 / 800 GWh pro Wintersaison

Im folgenden Beispiel wird angenommen, dass das Potential für Heizbedarf am Zürichsee 400 / 800 GWh pro Winter (Monate: D,J,F) betrage. Die in **Tabelle 3** dargestellten Rechnungen zeigen, dass für die Wassertemperaturen im See als auch in der Limmat keine kritischen Veränderungen eintreten würden, solange das Nutzungskonzept die wichtigen Grundbedingungen (Tabelle 1) respektiert.

Im Winter ist der Wasserkörper des Sees bis in Dutzende von Metern weitgehend homogenisiert, so dass sich der Wärmeentzug auf ein sehr grosses Volumen verteilen würde und somit die Temperaturabnahme nur im Bereich $\sim 0.1\text{ °C}$ liegen würde.

Eine wesentlich grössere Abkühlung ergibt sich, wenn das Wasser in die Limmat eingeleitet würde, da sich der Wärmenzug dann nur auf den Abfluss auswirkt. Gemäss **Tabelle 3** beträgt die Abkühlung für $Q_{347} \sim 1.1\text{ °C}$ und beim niedrigsten je gemessenen Abfluss im Win-

ter (1963) sogar $\sim 1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei einem Wärmeentzug von 400 GWh pro Winter. Hier gelangt man in einen Bereich, der als deutliche Beeinflussung des Limmatwassers betrachtet werden muss. Aus diesem Grund wäre es vorteilhaft, wenn nicht die gesamte Rückgabe in die Limmat erfolgen würde, sondern ein Teil zurück in den See.

Kritische Bedingungen könnten vor allem dann auftreten, wenn der Abfluss des Seewassers extrem tiefe Temperaturen aufweist, wie dies bei inverser Schichtung in sehr kalten Wintern vorkommt. Für diesen Fall ist es wichtig, dass die Entnahme aus dem See in grösserer Tiefe ($> 15\text{ m}$) erfolgt, da dort das Wasser noch mindestens $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ warm ist, während es an der Oberfläche deutlich kühler sein kann. Somit ergäbe sich die Situation, dass das Limmatwasser nach der Durchmischung des eingeleiteten (abgekühlten Seewassers) nur eine sehr geringfügige Temperaturänderung (plus und minus sind möglich) erfahren würde.

Es ist zu beachten, dass für anhaltend **kalte Perioden** im Winter **kein Wasser** aus dem See entnommen werden kann, welches deutlich **über $4\text{ }^{\circ}\text{C}$** warm ist und somit ist die **Effizienz** der Wärmepumpen entsprechend **gering**.

Tabelle 3 Einleitung abgekühltes Wasser nach Wärmepumpen 400 / 800 GWh pro Saison.

Annahmen	Effekt 400 GWh pro Winter	Effekt 800 GWh pro Winter
Wärmeentzug	400 GWh / Saison	800 GWh / Saison
Wärmefluss pro Seefläche	2.7 W/m^2	5.5 W/m^2
Zeitraum Kühlung, 3 Monate (D,J,F)	2200 h	
Mittlere Leistung, 3 Monate	182 MW	364 MW
Seevolumen, 15 bis 30 m Tiefe	655 Mio m^3	
Abkühlung in diesem Seevolumen, falls gesamte Einleitung in dieses Volumen	$0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$	$1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Abfluss Limmat $Q_{347}^{(*)}$	$38.5\text{ m}^3/\text{s}$	
Abkühlung Limmat für Q_{347} falls voll zu Lasten der Limmat während dieser Periode	$1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$
Niedrigster Limmat-Abfluss im Winter, 1963	$27\text{ m}^3/\text{s}$	
Abkühlung Limmat, falls voll zu Lasten Limmat während Periode niedrigsten Abflusses	$1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fussnote

^(*) abgeschätzt aus Differenz Abfluss Hard und Abfluss Sihlhölzli.

5 Schlussfolgerungen für Projektierung künftiger Anlagen

5.1 Kritische Faktoren

Bei der Ausarbeitung des Nutzungskonzeptes sind die folgenden kritischen Faktoren zu berücksichtigen:

Wärmeeinleitung (Kühlwasser)

- Erwärmung des betroffenen Rückgabevolumens im See (15 bis 30 m Tiefe)
- Absenkung des Metalimnions (betrifft Erwärmung)
- Erwärmung der Limmat
- Anteil der Tiefenwasserableitung (Veränderung des Limmatwassers).

Wärmeentzug (Heizung / Wärmepumpen)

- Abkühlung des gesamten Seevolumens (3.3 km³)
- Abkühlung der Limmat.

Für die Planung vorgeschlagene Randbedingungen:

Erwärmung / Abkühlung im Rückgabevolumens des Sees	maximal 0.5 °C
Absenkung des Metalimnions	maximal 1 m
Maximale Kühlwasserableitung in die Limmat	1/3 des natürlichen Abflusses
Maximale Temperaturerhöhung des Kühlwassers	$\Delta T = 12 \text{ °C}$
Maximale Erhöhung der Temperatur in der Limmat, Sommer	0 °C
Maximale Abkühlung der Limmat (Sommer und Winter)	-1 °C

5.2 Wärmeeintrag – Schlussfolgerungen

Gemäss dem Rechenbeispiel in 4.1 und den Fussnoten in Tabelle 1 sind bei der Ausarbeitung der Projekte die folgenden Punkte zu beachten:

Rückgabe des Kühlwassers

- Keine Wasserrückgabe in die obersten 10 m (Oberfläche) des Sees (Nährstofftransport zur Oberfläche; lokale Erwärmung / Schichtung der Oberfläche; Veränderung der Schichtung).
- Bei Rückgabe des Kühlwassers in den Zürichsee ist darauf zu achten, dass die Wasserentnahme im See in ausreichender Tiefe erfolgt, so dass das eingeleitete Kühlwasser im Sommer kühler ist als das Oberflächenwasser des Sees - und damit auch kühler als das Limmatwasser. In 15 m Tiefe ist das Wasser immer kühler als 10 °C (Figur 2). Zudem sind die zeitlichen Temperaturschwankungen in dieser Tiefe gering, sodass sich die Tiefe von 15 m zur Entnahme von Kühlwasser ideal eignet (geringere

Tiefen führen bei starken internen Beckenschwingungen (interne Seiches) zu beträchtlichen Temperaturschwankungen).

- Ideale Rückgabetiefe im See ist unterhalb 15 m Tiefe, um die Beeinflussung des Algenwachstums im See zu minimieren. Die Dimensionierung der Einleitung ist so zu gestalten, dass sich das eingeleitete Kühlwasser nicht oberhalb 15 m Tiefe einschichtet. Um das Einschichten zwischen 15 und 30 m Tiefe zu gewährleisten, eignen sich Rückleitungstiefen von 20 bis 35 m Tiefe. Die Details der Einleitung sind im Einzelfall zu klären (Tiefe, Ausgestaltung Bauwerk, Ausströmungsgeschwindigkeit, etc).
- Da die Tiefenverteilung des Sees inhomogen ist, sollten die vorgeschriebenen Rückgabetiefen nicht nur vom Projekt abhängig sein, sondern auch von der Lage entlang des Zürichsees. Aufgrund der geringen Seetiefe im Bereich der Stadt sollten die geringen Rückgabetiefen von ~20 m für dieses Gebiet verwendet werden, während seeaufwärts (zB Raum Thalwil / Richterswil) tiefere Rückgabetiefen sinnvoll sind.
- Da im Winter das Seewasser bis in Dutzende von Metern Tiefe homogenisiert ist und nur geringfügige Temperaturunterschiede bestehen, könnte die Einleitung von Kühlwasser auch oberflächlich erfolgen. Wahrscheinlich wird diese Situation jedoch nicht eintreten, da das erwärmte Wasser für Wärmepumpen verwendet werden könnte.
- Die Rückgabe von Kühlwasser in die Limmat ergibt kein Problem, falls das Kühlwasser im Sommer kühler ist als das Limmatwasser. Dies kann erreicht werden, indem das Wasser aus dem See in ausreichender Tiefe (> 15 m) entnommen wird und nicht mehr als 10 bis 12 °C aufgewärmt wird.
- Gewässerökologisch unerwünschte Nebeneffekte könnten dann auftreten, wenn derart viel Kühlwasser abgeleitet würde, dass der Limmatabfluss praktisch nur noch aus Kühlwasser bestehen würde. Er wäre sinnvoll, bei der Ausarbeitung des Wärmenutzungskonzeptes die maximale Kühlwasserrückgabe in die Limmat zu beschränken (z.B. auf ~ 1/3 des minimalen Abflusses im Sommer oder ~8 m³/s gemäss Tabelle 2). Bei einer Wärmeabgabe von 400 / 800 GWh pro Saison und bei einem $\Delta T = 10$ °C führt dies nicht zu kritischen Temperaturen und Wasserflüssen (Tabelle 2).

Entnahme des Kühlwassers

- Grundsätzlich ist die Tiefe der Wasserentnahme aus seeökologischen Gründen nicht bedeutend. Es gelten die zwei folgenden Einschränkungen:
- Der Entnahme von Kühlwasser aus der Tiefe des Sees sind wegen der Absenkung des Metalimnions Grenzen gesetzt. Dieses Problem kann entschärft werden durch: (i) stärkere Erwärmung des Kühlwassers (Ableitung von kleineren Wasservolumen) und/oder Rückgabe eines Teils des Kühlwassers in die Tiefe des Sees statt in die Limmat.

- Die Entnahme von Limmatwasser zu Kühlzwecken im Sommer ist weder energetisch noch ökologisch sinnvoll (zu grosser Erwärmung des bereits warmem Abflusses von der Seeoberfläche) und sollte nicht in Betracht gezogen werden.

5.3 Wärmeentzug – Schlussfolgerungen

Gemäss diesen Überlegungen und den Fussnoten in **Tabelle 1** sind bei der Ausarbeitung der Projekte die folgenden Punkte zu beachten:

- Aus Gründen der Effizienz wäre es vorteilhaft, wenn die Entnahmetiefen zwischen Oberfläche und mindestens 15 m Tiefe je nach Temperaturschichtung gewählt werden könnte. Da dies wohl oft nicht realisierbar ist, sollte eine Entnahmetiefe von ~15 m empfohlen werden.
- Für extrem kalte Perioden sollte die Rückgabe des abgekühlten Seewassers in die Limmat konservativ dimensioniert werden. Da die Wasserrückgabe den See viel weniger beeinflusst als die Limmat, sollte die Möglichkeit der Rückgabe in den See im Nutzungskonzept eingeplant werden.

5.4 Maximale Wärmeenergienutzung Zürichsee

Ausgehend von den Rechenbeispielen in Abschnitt 4 und den Randbedingungen für die Planung ergeben sich die folgenden maximalen Nutzungen:

- Für die **Wärmeeinleitung (Kühlwasser)** ergibt sich eine Nutzung von 400 GWh pro Sommersaison (Monate J,J,A) falls das Seevolumen von 15 bis 30 m Tiefe um 0.5 °C erwärmt werden kann. Im Weiteren sind 390 GWh pro Sommersaison nutzbar, wenn das Metalimnion (10 m Tiefe) um 0.5 m abgesenkt und das erwärmte Wasser in die Limmat abgegeben werden kann (bei einer Erwärmung von $\Delta T = 12$ °C). Diese totale Nutzung Wärmeeinleitung (Kühlwasser) ist somit konsistent mit dem möglichen Potential von ~800 GWh pro Sommersaison.
- Für den **Wärmeentzug (Heizung / Wärmepumpen)** ergibt sich eine maximal mögliche Nutzung von Wärmeenergie von 1900 GWh pro Saison (Monate D,J,F) falls das gesamte Seevolumen um 0.5 °C abgekühlt werden kann. Diese Wärmemenge ist deutlich grösser als die vorgesehene Nutzung. Falls nur die Limmat als Medium zur Verfügung steht, wäre die Nutzung durch den Abfluss der Limmat beschränkt (Planungsunsicherheit; ~400 GWh pro Wintersaison).

6 Referenzen

AWEL 2012, Hydrol. Jahrbuch;

www.awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/wasserwirtschaft/messdaten.html.

Heinz, G., D.M. Imboden und A. Wüest (1992). Einsee - Ein Computerprogramm zur Behandlung der Abwasser- und Kühlwasserrückgabe in Seen. Bericht, Eawag, 76 p.

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.

Meier, W., P. Reichert, und A. Wüest (1997). Auswirkung des Kernkraftwerkes Mühleberg auf den Wärmehaushalt der Aare, Bericht 84218, Eawag, 72 p plus Appendix.

Wood, I. R. (2001), Extensions to the theory of selective withdrawal, *Journal of Fluid Mechanics*, 448, 315-333.

Wüest A. und D.M. Imboden (1992). Einleitungskonzept Zürichsee (Untersee): Zusammenfassung. Bericht, Eawag, 30 p.

Dank

Ich möchte mich bei den Kollegen vom AWEL und der Stadt Zürich, welche in der Begleitgruppe mit Diskussion und schriftlichem Input zum Kurzbericht beigetragen haben, herzlich bedanken. Besonderen Dank geht an Pius Niederhauser und Felix Schmid für die vielfältigen Anregungen. Gabriel Fink und Martin Schmid (beide Eawag) danke ich für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts.