

Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung



IMPRESSUM

Auftraggeber

Amt für Wasser und Energie des Kantons St. Gallen

Autoren

Martin Schmid, Adrien Gaudard*

Referenzierung

Schmid M, Gaudard A (2019). Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung. Bericht im Auftrag des Amts für Wasser und Energie des Kantons St. Gallen, Eawag, Kastanienbaum.

Publikationsdatum

3. Juli 2019

Titelbild

© User: roland zh / Wikimedia Commons / CC-BY-SA-3.0

*Adrien Gaudard ist im Februar 2019 auf einer Skitour tödlich verunglückt.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Hintergrund	4
2	Rechtliche Grundlagen	5
3	Eigenschaften des Zürich-Obersees	7
3.1	Morphologie und Wasserbilanz	7
3.2	Bestehende thermische Belastungen.....	8
4	Temperaturverhältnisse im Zürich-Obersee	10
4.1	Messdaten	10
4.2	Numerische Modelle	10
4.3	Wassertemperaturen im Jahresverlauf.....	11
4.4	Tiefe Temperaturen im Winter	15
4.5	Hohe Temperaturen im Sommer	16
4.6	Kurzfristige Temperaturschwankungen	18
4.7	Schlussfolgerungen für die Wärme- und Kältenutzung	18
5	Sauerstoff und Nährstoffe	19
5.1	Sauerstoffkonzentrationen	19
5.2	Nährstoffkonzentrationen.....	20
5.3	Schlussfolgerungen für die Wärme- und Kältenutzung	20
6	Auswirkungen des Klimawandels	21
7	Potenzial der Wärme- und Kältenutzung im Zürich-Obersee	23
7.1	Potenzial für Wärmeentnahmen.....	23
7.2	Potenzial für Wärmeeinleitungen	26
8	Schlussfolgerungen.....	30
8.1	Potenziale für die Wärme- und Kältenutzung	30
8.2	Entnahme- und Rückleitungstiefen	30
8.3	Weitere Empfehlungen	31
	Danksagungen	32
	Literatur.....	33

1 HINTERGRUND

In diesem Kurzbericht wird das Potenzial des Zürich-Obersees zur Wärme- und Kältenutzung analysiert. Wärme und Kälte aus Oberflächengewässern, und speziell aus Seen, ist eine erneuerbare, lokale, und noch nicht ausgelastete Quelle thermischer Energie. Das Tiefenwasser der Seen eignet sich aufgrund seiner stabilen und auch im Sommer kühlen Temperaturen ideal zur Kühlung von Infrastruktur und zur Ableitung von Prozesswärme. Im Winterhalbjahr kann dem Seewasser mit Wärmepumpen genügend Wärme zum Heizen von Gebäuden entzogen werden.

Gaudard et al. (2019b) haben das Potenzial und die maximale regionale Nachfrage für alle grösseren Seen und Flüsse der Schweiz für die Wärme- und Kältenutzung abgeschätzt. Sie kamen zum Schluss, dass für die meisten Gewässer das Potenzial die regionale Nachfrage deutlich übersteigt. Die Auswertung für diese grosse Anzahl an Gewässern basierte aber auf allgemeinen Annahmen und soll deshalb nicht als Grundlage für die Nutzung eines einzelnen Gewässers dienen. Der Zürich-Obersee ist zudem aufgrund seiner geringen mittleren Tiefe und der hohen Bevölkerungsdichte eines der Gewässer, bei welchen die Nachfrage das Potenzial übersteigen könnte.

Die Entnahme oder Zufuhr von Wärme beeinflusst das Temperaturregime eines Sees. Die direkte Auswirkung ist eine Erwärmung oder eine Abkühlung des Wassers im Nahbereich der Rückleitung. Die zugeführte Wärme oder Kälte verteilt sich im See durch horizontale Mischung über die ganze Fläche, und in Abhängigkeit von den saisonalen Mischungsprozessen über einen gewissen Tiefenbereich. Die Abkühlung oder Erwärmung gewisser Tiefenbereiche beeinflusst wiederum die saisonalen Mischungsprozesse und kann beispielsweise zu einer Veränderung der Dauer der Sommerschichtung führen oder die Intensität der Wintermischung beeinflussen. Die Veränderungen im Temperaturregime eines Sees hängen deshalb neben der genutzten Wärmemenge auch davon ab, in welchen Tiefen das Wasser für die Nutzung entnommen und wieder zurückgeleitet wird (Fink et al., 2014). Aus diesem Grund ist es nicht möglich, einfache Beziehungen zwischen der thermischen Belastung eines Sees und den Auswirkungen auf das Temperaturregime zu erstellen. Die Auswirkungen einer klar definierten Wärme- oder Kältenutzung auf das Temperaturregime können aber mit Hilfe von numerischen Modellen gut abgeschätzt werden (Schmid, 2014).

Veränderungen im Temperaturregime können sich in der Folge auch auf die chemischen und biologischen Prozesse in einem See auswirken (Gaudard et al., 2017; Gaudard et al., 2018). Beispielsweise kann eine Verlängerung der Sommerschichtung zu einem häufigeren Auftreten von Sauerstoffknappheit im Tiefenwasser eines Sees führen (Kobler et al., 2019), oder die Erwärmung eines Sees kann den Lebensraum für kälteliebende Arten verringern, weshalb diese durch andere Arten verdrängt werden können (Magee et al., 2017).

Die Gewässer in der Schweiz wurden in den letzten Jahrzehnten durch den Klimawandel bereits messbar erwärmt, und eine weitere deutliche Erwärmung wird erwartet. Da der Klimawandel nicht durch rein lokale Massnahmen beeinflusst werden kann, wird nach Angaben des Bundesamtes für Umwelt (Bafu) als "möglichst unbeeinflusster Zustand" im Sinne des Gewässerschutzgesetzes (Kapitel 2) der Zustand betrachtet, der sich beim aktuellen Klima unter natürlichen Bedingungen einstellen würde. Trotzdem muss der Klimawandel bei der Beurteilung von Wärme- und Kältenutzungen mit in Betracht gezogen werden. Ökosysteme benötigen Zeit, um sich an ein verändertes Klima anzupassen. Eine Wärmeeinleitung in ein Gewässer beschleunigt die durch den Klimawandel bereits stattfindende Erwärmung und erhöht dadurch die Belastung des Ökosystems zusätzlich. Ein Wärmeentzug könnte allenfalls die Auswirkungen des Klimawandels etwas dämpfen und damit den Ökosystemen mehr Zeit für die Anpassung erlauben.

In diesem Bericht wird das Potenzial des Zürich-Obersees für die Wärme- und Kältenutzung in dem Sinne abgeschätzt, dass die angegebenen Wärmemengen dem See zugeführt oder entnommen werden können, ohne dass die thermische Struktur des Sees in einem Mass verändert wird, bei welchem negative Folgen für die Ökosysteme im See zu erwarten sind. Dabei werden die speziellen Verhältnisse im Zürich-Obersee und die zu erwartenden Folgen des Klimawandels berücksichtigt.

Das geschätzte Potenzial gilt für den Zürich-Obersee insgesamt, nicht für einzelne Anlagen. Die Auswirkungen mehrerer Anlagen auf den See kumulieren sich. Bereits bestehende Anlagen müssen entsprechend bei der Planung neuer Anlagen berücksichtigt werden. Bei grösseren Anlagen sind zudem die lokalen Auswirkungen aufgrund der Eigenschaften der spezifischen Anlage genauer zu untersuchen.

2 RECHTLICHE GRUNDLAGEN

Die Auswirkungen einer thermischen Nutzung auf ein Oberflächengewässer müssen sich in dem Rahmen bewegen, der durch die Gewässerschutzverordnung (GSchV) definiert wird. Grundsätzlich gelten dabei die **allgemeinen Anforderungen** an die Temperaturverhältnisse:

GSchV, Anhang 1, 1³

Die Wasserqualität soll so beschaffen sein, dass:

a. Die Temperaturverhältnisse naturnah sind.

GSchV, Anhang 2, 12³

Durch Wasserentnahmen, Wassereinleitungen und bauliche Eingriffe dürfen die Hydrodynamik, die Morphologie und die Temperaturverhältnisse des Gewässers nicht derart verändert werden, dass dessen Selbstreinigungsvermögen vermindert wird oder die Wasserqualität für das Gedeihen der für das Gewässer typischen Lebensgemeinschaften nicht mehr genügt.

Für **Fliessgewässer** werden maximale Temperaturveränderungen definiert. Diese gelten im Vergleich zum möglichst unbeeinflussten Zustand. Das heisst, bereits bestehende Temperaturveränderungen müssen bei der Planung einer neuen Anlage berücksichtigt werden.

GSchV, Anhang 2, 12⁴

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.

Dieser Artikel setzt Obergrenzen für die Erwärmung eines Fliessgewässers. Diese Grenzen können für ein spezifisches Gewässer aber auch tiefer gesetzt werden, wenn sonst die allgemeinen Anforderungen nicht mehr erfüllt sind. In bestimmten Fällen können nach GSchV, Anhang 3.3, 21⁴ von den Behörden auch höhere Erwärmungen zugelassen werden.

Für **Seen** werden in der GSchV keine Grenzwerte definiert. Es gilt vielmehr allgemein:

GSchV, Anhang 2, 13³

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.

In einem früheren Bericht (Eawag, 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 (mit Ausnahme von sehr lokalen Veränderungen im Bereich von Rückleitungen). Ein solcher Grenzwert kann aber nicht unbedingt sicherstellen, dass die natürlichen Funktionen des Gewässers erhalten bleiben und die Lebensbedingungen für die Organismen nicht nachteilig verändert werden. So haben sich beispielsweise die Wintertemperaturen von Dezember bis Februar im Zürichsee von 1981 bis 2013 um weniger als 1 °C erwärmt (Schmid und Köster, 2016), diese Erwärmung hat aber bereits zu deutlichen Veränderungen bei der winterlichen Durchmischung und in der Folge zu einer Veränderung der Nährstoffverfügbarkeit (Schwefel et al., 2019) und der Algenzusammensetzung geführt (Yankova et al., 2017).

In diesem Bericht schätzen wir das Potenzial für die Wärme- und Kältenutzung deshalb basierend auf folgenden Grundsätzen ab:

- Die Folgen des Klimawandels sollen möglichst nicht weiter verstärkt werden. Dies bedeutet insbesondere, dass die das Oberflächenwasser nicht weiter erwärmt und die Dauer der Sommerschichtung nicht zusätzlich verlängert werden sollte (siehe Kapitel 6).
- Eine leichte Erwärmung des Tiefenwassers erachten wir als akzeptabel. Diese verstärkt zwar die Erwärmung durch den Klimawandel. Andererseits erhöht der Klimawandel die Temperatur im Oberflächenwasser mehr als im Tiefenwasser, was zu einer stärkeren und länger dauernden Sommerschichtung führt. Eine leichte Erwärmung des Tiefenwassers wirkt dem etwas entgegen und unterstützt die Mischung im Winter. Wir verwenden hier zwei Richtwerte: eine Erwärmung um 0.2 °C betrachten wir als kaum messbar und für die Ökosysteme nicht relevant. Bei einem Wärmeeintrag, der zu einer Erwärmung von bis 0.5 °C oder mehr führen würde, empfehlen wir eine vertiefte Abklärung.
- Eine Abkühlung des Sees erachten wir als weniger kritisch als eine Erwärmung. Im Winter kann eine Abkühlung die saisonale Mischung unterstützen und damit zu einer Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse führen. Sie kann die Auswirkungen des Klimawandels so vielleicht sogar etwas abmildern, sicher aber nicht vollständig kompensieren, auch weil die Wärmeentnahme eine andere Saisonalität aufweist als die Erwärmung durch den Klimawandel. Für die Wärmeentnahme verwenden wir deshalb etwas höhere Richtwerte: eine Abkühlung bis 0.5 °C wird als unkritisch betrachtet, bei einer Abkühlung um bis zu 1.0 °C empfehlen wir vertiefte Abklärungen. Das Potenzial für eine maximale Abkühlung um 0.2 °C wird zum Vergleich ebenfalls angegeben.

3 EIGENSCHAFTEN DES ZÜRICH-OBERSEES

3.1 MORPHOLOGIE UND WASSERBILANZ

Der Zürich-Obersee ist 10.5 km lang, 2.5 km breit und 48 m tief (BUWAL, 1994). Er hat eine Oberfläche von 20.25 km² und ein Volumen von etwa 0.42 km³ (Tabelle 1). Der See besteht aus zwei Becken mit ähnlich grossem Volumen. Die maximale Tiefe von 48 m wird im östlichen Bollinger Becken erreicht. Dieses ist etwas länger und schmaler als das westliche, bis 37 m tiefe Lachner Becken. Rund um den Zürich-Obersee liegen mehrere Amphibienlaichgebiete und Flachmoore, sowie ein Zugvogelreservat von nationaler Bedeutung.

Der Hauptzufluss ist der Linthkanal, welcher den Abfluss des Walensees und weitere Zuflüsse aus der Linthebene einschliesst und am östlichen Ende in den Zürich-Obersee mündet. Dieser entwässert 83% des gesamten Einzugsgebietes des Obersees von 1564 km² (Kobler und Schmid, 2017). Weitere Zuflüsse sind die Jona, die Wägitaler Aa und mehrere kleinere Bäche. Die Linth floss ursprünglich direkt in den Zürich-Obersee. Sie wurde mit der Linthkorrektur um 1807 bis 1822 in den Walensee umgeleitet. Der mittlere Abfluss der Linth bei der hydrologischen Messstation des Bundesamts für Umwelt (Bafu) in Weesen von 1935 bis 2016 betrug 54.3 m³/s. Die Messstation hat ein Einzugsgebiet von 1082 km². Hochgerechnet auf das ganze Einzugsgebiet ergibt sich ein mittlerer Abfluss von 79 m³/s oder 2.5 km³/a.

Schliesslich wird über das Etzelwerk auch der grösste Teil des Abflusses des Sihlsees in den Zürich-Obersee eingeleitet. Dieser trägt knapp 10 % zu den gesamten Zuflüssen des Zürich-Obersees bei (Kobler und Schmid, 2017). Das Etzelwerk ist ein Pumpspeicherwerk, das heisst, es wird auch Wasser aus dem Zürich-Obersee in den Sihlsee gepumpt. Die gepumpten Mengen entsprechen aber im Mittel nur etwa 1% der gesamten Zuflüsse. Aus den Zuflüssen und dem Seevolumen ergibt sich eine mittlere Wasseraufenthaltszeit von etwa 2 Monaten.

Tabelle 1: Volumen in verschiedenen Tiefenbereichen der beiden Becken des Zürich-Obersees. Berechnet von Kobler et al. (2018) aus dem digitalen Höhenmodell von Swisstopo (swisstopo Art. 30 GeoIV: 5704 000 000 / DHM25@2003)

Tiefenbereich	Volumen Bollinger Becken (Mio. m ³)	Volumen Lachner Becken (Mio. m ³)	Gesamtvolumen (Mio. m ³)
0 bis 5 m	44.3	51.5	95.9
5 bis 10 m	37.6	45.0	82.6
10 bis 15 m	32.9	36.2	69.1
15 bis 20 m	28.3	25.6	53.9
20 bis 25 m	22.9	19.5	42.4
25 bis 30 m	19.2	14.2	33.4
30 bis 35 m	16.3	7.8	24.1
35 bis 40 m	13.3	0.8	14.1
> 40 m	9.6		9.6
Total	224.5	200.4	424.9

3.2 BESTEHENDE THERMISCHE BELASTUNGEN

Die Temperatur des Zürich-Obersees wird schon heute durch verschiedene menschliche Einflüsse verändert:

Im Zürich-Obersee sind bereits einige **Anlagen zur Wärme- und Kältenutzung in Betrieb**, darunter zwei grössere Anlagen in Rapperswil. Eine Anlage nutzt den See für eine industrielle Kühlung, mit einem maximalen konzessionierten Wasserbezug von 4'200 l/min (0.07 m³/s) und einer maximalen Kühlleistung von bis zu 7 MW. Das Wasser wird in einer Tiefe von 7 m aus dem See entnommen und nach dem Wärmeeintrag über eine Meteorwasserleitung in den See zurückgeleitet. Der Wärmeeintrag liegt bei maximaler Leistung in derselben Grössenordnung wie das in Kapitel 7.2 abgeschätzte Potenzial. Dabei ist aber zu erwähnen, dass die anfallende Abwärme heute durch den Anlagebetreiber teilweise im Betrieb genutzt wird. Der tatsächliche Wärmeeintrag in den See fällt somit geringer aus. Da der Wärmeeintrag oberflächlich erfolgt, ist davon auszugehen, dass zumindest im Sommerhalbjahr, wenn das Oberflächenwasser im Zürich-Obersee durch den Durchfluss in weniger als einem Monat ersetzt wird, ein grosser Teil dieses Wärmeeintrags in den Zürichsee abfließt. Die zweite Anlage wird zum Heizen des Kinderzoos genutzt und erlaubt eine maximale Wasserentnahme von 2'160 l/min mit einer Wärmeentnahme von bis zu 0.72 MW. Daneben beziehen im Kanton Schwyz rund ein Dutzend kleinere Wärmepumpen Wärme aus dem Zürich-Obersee. Im Vergleich zum unten abgeschätzten Potenzial (Kapitel 7.1) sind die bestehenden Wärmenahmen gering, und die entsprechenden Einflüsse auf die Temperatur des Sees vernachlässigbar.

Die Auswirkungen des **Etzelwerks** auf die Temperaturen im Zürich-Obersee wurden im Rahmen der Neukonzessionierung des Etzelwerks mit einem gekoppelten Modell für die beiden Seen untersucht (Kobler und Schmid, 2017). Insgesamt führt das Turbinieren von Wasser aus dem Sihlsee zu einer leichten Abkühlung des Obersees um rund 0.1 °C.

Das gereinigte Abwasser der **Kläranlagen** von Lachen (37'500 Einwohnergleichwerte) und Jona (31'667 EGW) wird in den Zürich-Obersee eingeleitet. Die Temperatur von gereinigtem Abwasser schwankt typischerweise saisonal zwischen minimal 10 und maximal 25 °C (Wanner, 2009). Das Abwasser ist damit vor allem im Winter deutlich wärmer als der Zürich-Obersee. Die von der ARA Untermarch in Lachen auf ihrer Webseite veröffentlichten Betriebsdaten von 2014 zeigen einen Abfluss < 0.1 m³/s. Der Abfluss der Kläranlage Jona beträgt im Mittel 0.15 m³/s. Damit liegt der gesamte Abfluss der beiden Anlagen im Bereich von wenigen Promille des totalen Zuflusses der Zürich-Obersee, und die Auswirkungen auf die Temperatur des gesamten Sees sind entsprechend klein.

Die Linth führte ursprünglich direkt in den Zürich-Obersee, wurde aber mit der **Linthkorrektion** anfangs des 19. Jahrhunderts in den Walensee umgeleitet. Die Temperatur des Walensees und damit des Seeabflusses im Linthkanal bei Weesen ist vor allem im Sommerhalbjahr deutlich höher als die Temperatur der Linth bei Mollis, mit Temperaturunterschieden von 5 bis 6 °C in den Monaten Juli bis September (Abbildung 1). Der Abfluss bei Mollis beträgt rund 60% des gesamten Abflusses der Linth bei Weesen. Es ist deshalb anzunehmen, dass die Temperatur der Linth beim Zufluss in den Zürich-Obersee ohne die Linthkorrektion im Sommer rund 3 °C und im Winter etwa 0.5 °C kühler wäre. Aufgrund der kurzen Wasseraufenthaltszeit von nur etwa 2 Monaten im Zürich-Obersee dürfte dies zu einer deutlichen Erwärmung des Sees geführt haben, vor allem im Sommer in dem Tiefenbereich, in welchem sich die Linth in den See einschichtet.

Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung

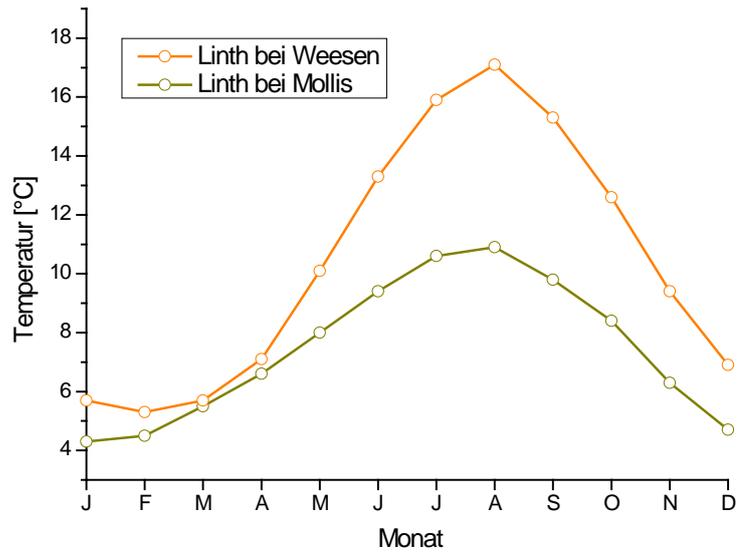


Abbildung 1: Mittlerer jährlicher Verlauf der Wassertemperatur der Linth für die Jahre 1971 bis 2017 an den Messstellen des Bundesamtes für Umwelt 2372 (Mollis) und 2104 (Weesen).

4 TEMPERATURVERHÄLTNISSE IM ZÜRICH-OBERSEE

4.1 MESSDATEN

Die Wassertemperaturen im Zürich-Obersee werden durch die Wasserversorgung der Stadt Zürich (WVZ) im Auftrag der Anrainerkantone St. Gallen und Schwyz regelmässig am tiefsten Punkt des westlichen Beckens des Sees gemessen. Die Messungen wurden von 1972 bis 2005 monatlich durchgeführt, seit 2006 alle zwei Monate.

Die Messungen wurden in zwei Berichten ausgewertet. Gammeter und Forster (2002) untersuchten die Messdaten von 1972 bis 2000. Sie stellten fest, dass der See jeden Winter vollständig durchmischt wird. Die vollständige Mischung wird meist bereits im Dezember, in wärmeren Wintern erst im Januar erreicht und dauert bis im März an. In kalten Wintern kann sich an der Oberfläche auch eine inverse Schichtung ausbilden, und windgeschützte Buchten können zufrieren.

Schildknecht et al. (2013) werteten die Zeitreihen bis 2010 weiter aus. Sie stellten für den homogenen Datensatz der Jahre 1976 bis 2005 eine Erwärmung der mittleren Temperaturen in der Oberflächenschicht (bis 20 m Tiefe) von 0.3 °C pro Jahrzehnt fest. Dieser Wert ist vergleichbar mit der mittleren Erwärmung des Zürichsees um 0.4 °C von 1981 bis 2013 (Schmid und Köster, 2016). Beim Zürichsee hat diese Erwärmung zu einer deutlichen Verminderung der Intensität und Tiefe der winterlichen Mischung geführt, mit entsprechenden Folgen für die Sauerstoffkonzentrationen (North et al., 2014) und die Algenzusammensetzung (Posch et al., 2012; Yankova et al., 2017). Der Zürich-Obersee hingegen wird aufgrund seiner geringeren Tiefe und der niedrigeren Temperaturen nach wie vor jeden Winter vollständig gemischt.

4.2 NUMERISCHE MODELLE

Im Rahmen von verschiedenen Projekten wurden an der Eawag und der EPFL numerische Modelle für die Berechnung der Temperatur im Zürich-Obersee erstellt. Diese können verwendet werden, um die Temperaturen zwischen den Messdaten zu interpolieren, um die Auswirkungen von verschiedenen Einflussfaktoren zu analysieren, oder um die zukünftigen Temperaturverhältnisse in Klimaszenarien abzuschätzen.

Die Temperaturen aller grösseren Seen der Schweiz werden für den Zeitraum von 1981 bis heute mit dem **eindimensionalen physikalischen Seemodell Simstrat** berechnet und wöchentlich auf der Webseite simstrat.eawag.ch veröffentlicht (Gaudard et al., 2019a). Für den Zürich-Obersee werden die Wetterdaten von Meteoschweiz von der Station in Wädenswil und die Abfluss- und Temperaturdaten des Bafu von der Station in Weesen als Eingangsgrössen verwendet. Das Modell wurde mit den beobachteten Temperaturdaten der Wasserversorgung der Stadt Zürich (WVZ) von 1981 bis 2010 geeicht. Die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (root mean square error, RMSE) beträgt 1.0 °C. Dies ist für einen See mit vergleichsweise geringer Tiefe und grossem Durchfluss ein guter Wert. Die Temperaturschwankungen und entsprechend die Fehler sind in der Oberflächenschicht und der Sprungschicht deutlich grösser als im Tiefenwasser, weshalb der mittlere Fehler bei flacheren Seen grösser ist. Dieser Zusammenhang wurde auch bei der Simulation der Temperatur mit einem anderen Modell in Seen weltweit festgestellt (Bruce et al., 2017). Auch die kurze Aufenthaltszeit erhöht die Unsicherheiten bei der Simulation, weil die Zuflüsse kurzzeitigen Temperaturschwankungen und horizontalen Inhomogenitäten verursachen, welche durch das eindimensionale Modell nicht aufgelöst werden. Das kalibrierte eindimensionale Modell wird in Kapitel 7 für die Berechnung einzelner Szenarien für die Wärme- und Kältenutzung verwendet.

Das eindimensionale Modell wird zudem aktuell im Rahmen des Projektes Hydro CH2018 für die Abschätzung der Auswirkungen verschiedener Klimaszenarien auf die Temperaturverhältnisse in 26 Seen eingesetzt, unter anderem auch für den Zürich-Obersee. Bei diesen Berechnungen können allerdings die Zuflüsse nicht berücksichtigt werden, weil für diese keine Szenarien vorliegen. Aus diesem Grund ist vor allem bei Seen mit kurzer Aufenthaltszeit wie dem Zürich-Obersee mit grösseren Unsicherheiten bei den Modellrechnungen zu rechnen. In Kapitel 6 werden Ergebnisse dieser Berechnungen dargestellt. Diese sind allerdings aufgrund der grossen Unsicherheiten eher als Anhaltspunkt denn als Vorhersagen zu verstehen.

Ein **gekoppeltes zweidimensionales Modell** für den Sihlsee und den Zürich-Obersee wurde mit der Software **CE-QUAL-W2** erstellt, um für die Neukonzessionierung des Etzelwerks die Auswirkungen verschiedener Szenarien der Kraftwerksnutzung auf die beiden Seen abzuschätzen (Kobler und Schmid, 2017; Kobler et al., 2018). «Zweidimensional» bedeutet hier, dass neben der vertikalen auch die Längsachse eines Sees im Modell aufgelöst wird, und eine homogene Temperaturverteilung über die Breite angenommen wird. Dieses Modell wurde mit Messdaten von beiden Seen kalibriert und erreichte für die beobachteten Temperaturen von 1998 bis 2015 einen RMSE von 0.97 °C. Das Modell wurde verwendet, um die Verteilung der vorkommenden Temperaturen in den beiden Becken des Sees in Kapitel 4.3 mit grösserer zeitlicher Auflösung abzuschätzen als dies die monatlichen bis zweimonatlichen Messungen ermöglichen. Leider erlaubt die Software CE-QUAL-W2 nicht, Wasser aus dem See zu entnehmen, und mit veränderter Temperatur wieder einzuleiten, um so die Auswirkungen von Wärmenutzungen konkret simulieren zu können.

Schliesslich ist der Zürichsee, einschliesslich des Zürich-Obersees einer der Seen für welche auf der Plattform Meteolakes (meteolakes.ch) der EPFL **dreidimensionale Simulationen** mit der Software **Delft3D** durchgeführt wurden. Für den Zürichsee wurden bisher die Jahre 2015 bis 2019 simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächentemperaturen im Zürich-Obersee aufgrund der Zuflüsse im Sommer oft deutlich kühler sind als im Zürichsee, und entsprechend auch im Bollinger Becken etwas kühler als im Lachner Becken. Ansonsten zeigen sich im Vergleich zu grösseren Seen wie dem Genfersee innerhalb des Zürich-Obersees eher geringe horizontale Unterschiede.

4.3 WASSERTEMPERATUREN IM JAHRESVERLAUF

Der **mittlere Jahresverlauf der Wassertemperatur** im Lachner Becken des Zürich-Obersees, simuliert mit dem zweidimensionalen Modell CE-QUAL W2 für die Jahre 1998 bis 2015, ist in Abbildung 2 dargestellt, derjenige am tiefsten Punkt im Bollinger Becken in Abbildung 3. Im Vergleich mit anderen Seen im Mittelland, beispielsweise dem Sempacher- oder Baldeggersee (Gaudard, 2016b), zeigen sich die Auswirkungen der Zuflüsse und der entsprechend kurzen Wasseraufenthaltszeit deutlich. Die mittleren Höchsttemperaturen im Sommer bleiben mit etwa 22 Grad eher tief. Die Sprungschicht wird durch die Zuflüsse, die sich im Sommer dort einschichten, ausgeweitet. Entsprechend ist der höchste Temperaturgradient in der Sprungschicht deutlich kleiner und die saisonale Erwärmung erreicht tiefere Schichten als in anderen Seen. Wie bereits eine frühere Studie zeigte, ist dieser Effekt in Jahren mit hohem Abfluss verstärkt und dann im Bollinger Becken ausgeprägter als im Lachner Becken (Örn, 1983). Die Zuflüsse bewirken auch, dass der See im Bollinger Becken im Winter meist vollständig gemischt bleibt, während sich im Lachner Becken auch eine inverse Schichtung mit Oberflächentemperaturen unterhalb von 4 °C ausbilden kann.

Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung

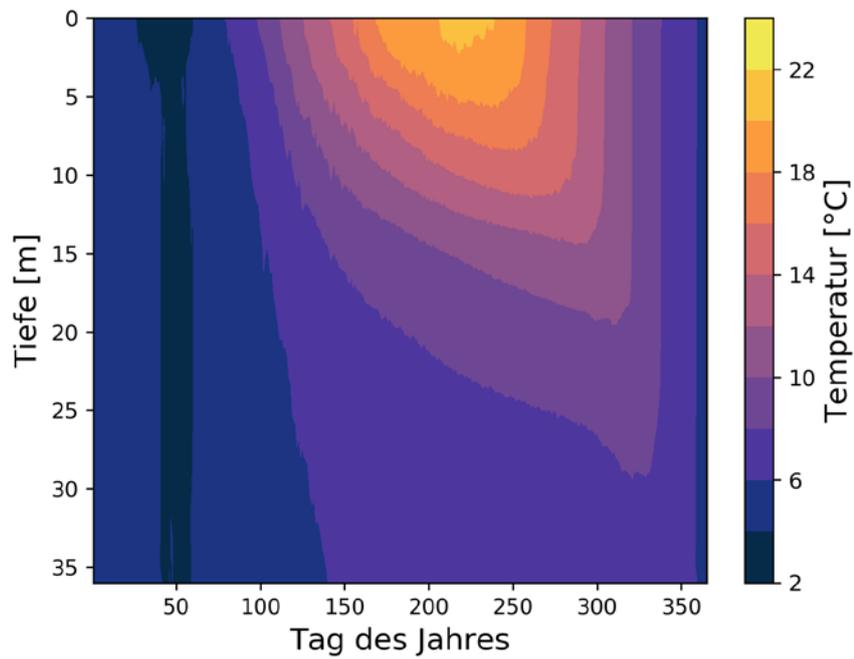


Abbildung 2: Mittlerer jährlicher Temperaturverlauf im Zürich-Obersee für die Jahre 1998 bis 2015 an der Messstelle bei Lachen, simuliert mit dem zweidimensionalen numerischen Modell CE-QUAL-W2.

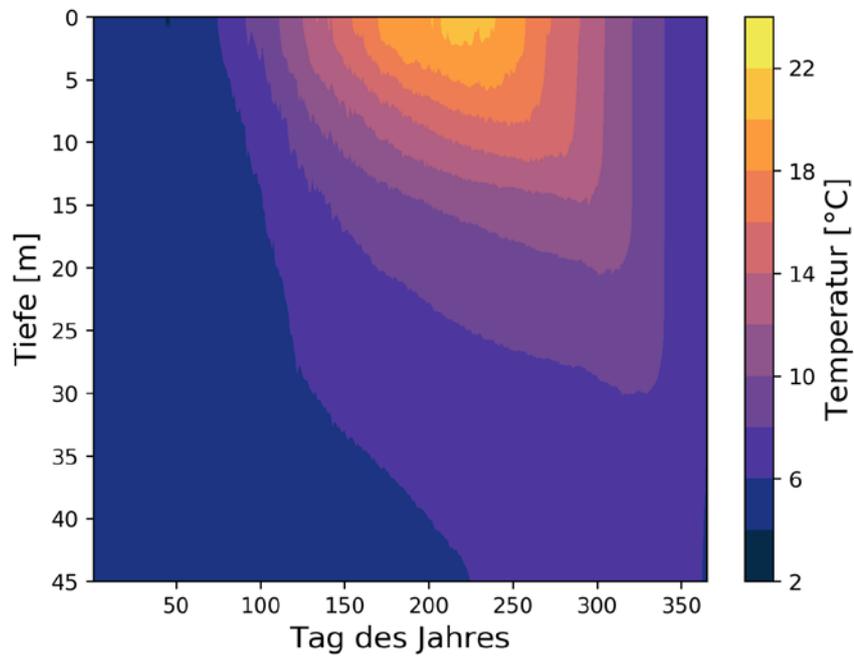


Abbildung 3: Mittlerer jährlicher Temperaturverlauf am tiefsten Punkt des Zürich-Obersees im Bollinger Becken für die Jahre 1998 bis 2015, simuliert mit dem zweidimensionalen numerischen Modell CE-QUAL-W2.

Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung

Für die Wärme- und Kältenutzung sind nicht nur die mittleren Temperaturverhältnisse von Bedeutung, sondern auch deren **statistische Verteilung**. Diese ist im Folgenden für die Messwerte im Lachner Becken für die Jahre 1981 bis 2018 (Abbildung 4) und für die simulierten Temperaturen für die Jahre 1998 bis 2015 für das Lachner Becken (Abbildung 5) und das Bollinger Becken (Abbildung 6) dargestellt. Im Winter und im Tiefenwasser ändern sich die Temperaturen von Jahr zu Jahr in einem Bereich von etwa 3°C, im Oberflächenwasser betragen diese Variationen in den Sommermonaten etwa 10 °C. In warmen Sommern werden im August gelegentlich Oberflächentemperaturen von bis zu 25 °C erreicht.

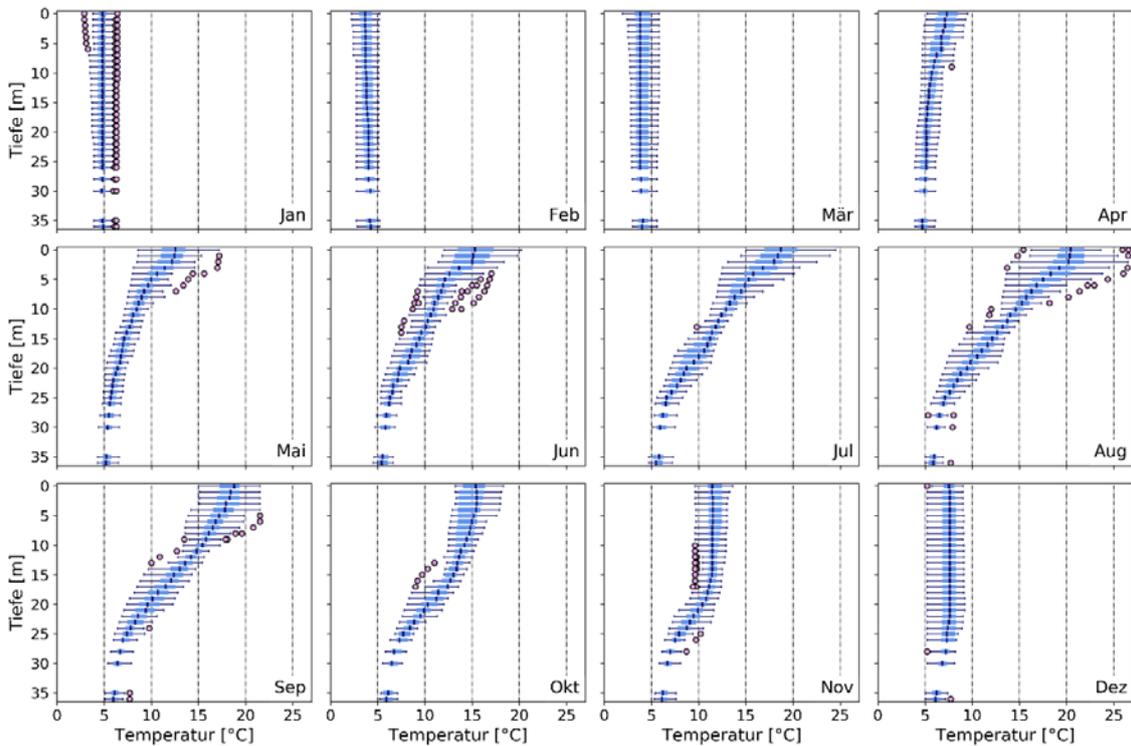


Abbildung 4: Beobachtete Verteilung der Temperaturen an der Messstelle bei Lachen in den Jahren 1981 bis 2018 für jeden Monat des Jahres. Alle Box-Plots zeigen die Mediane, die Quartile (Boxen), den gesamten Datenbereich, sofern dieser innerhalb des 1,5-fachen des Interquartilbereichs liegt (Antennen), und die Ausreißer ausserhalb der Antennen (Punkte).

Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung

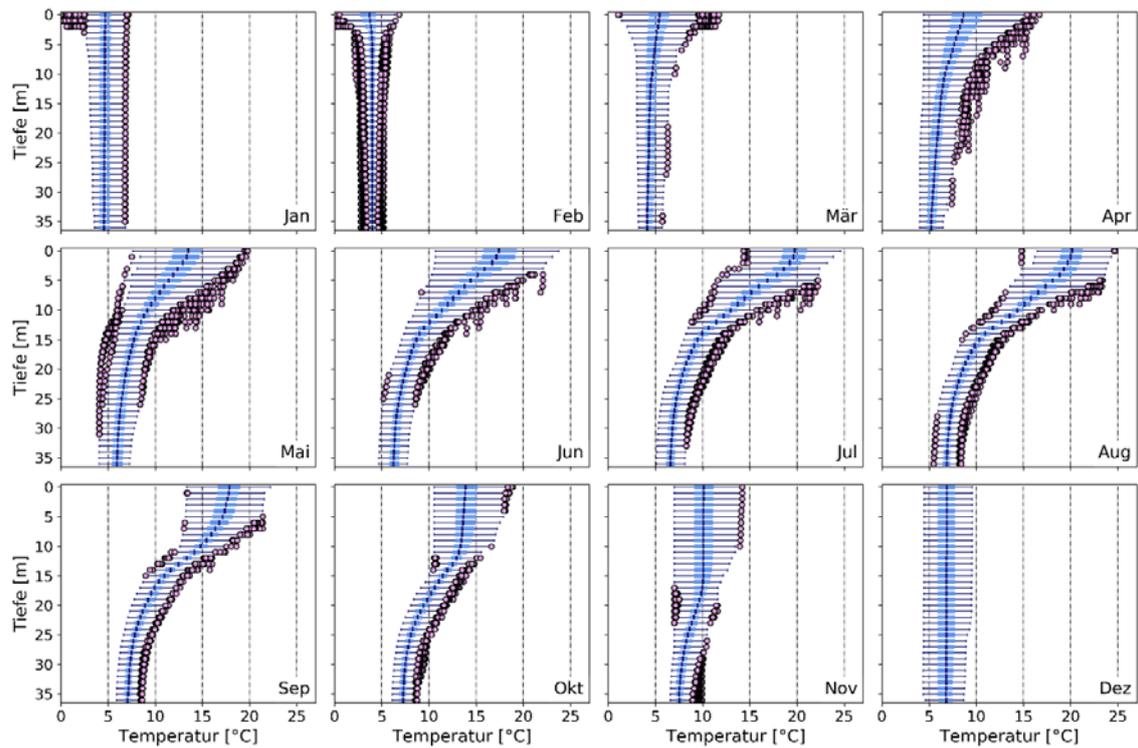


Abbildung 5: Simulierte Verteilung der Temperaturen an der Messstelle bei Lachen in den Jahren 1998 bis 2015 für jeden Monat des Jahres.

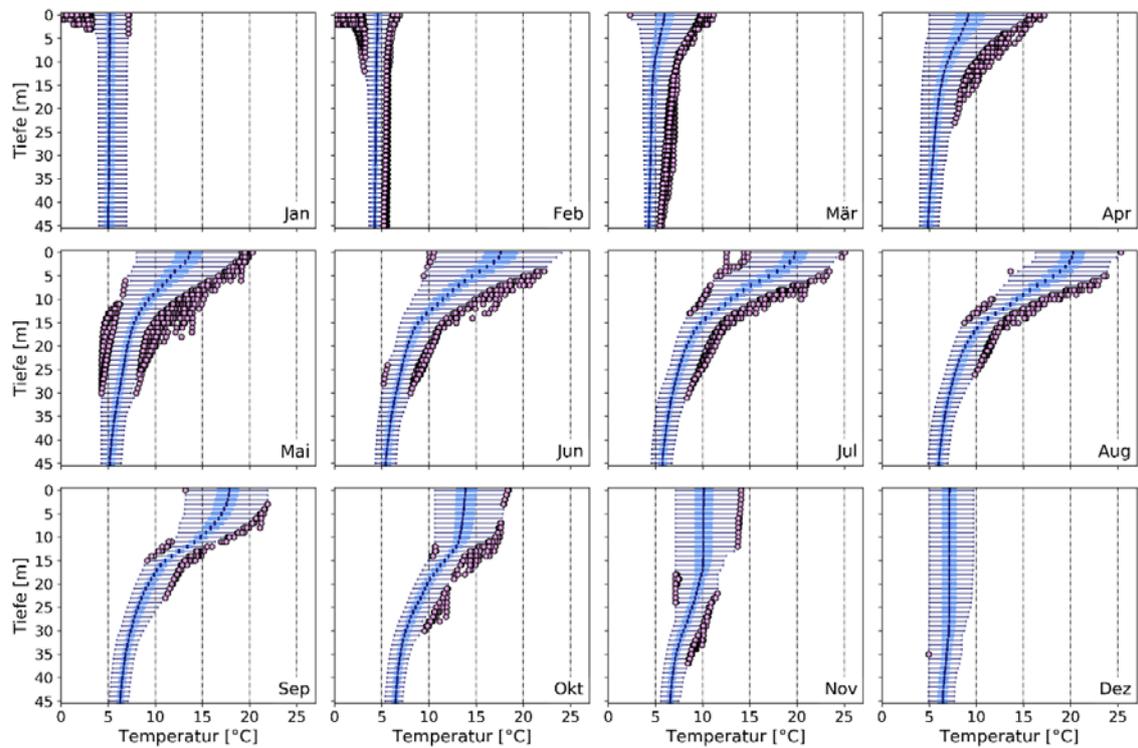


Abbildung 6: Simulierte Verteilung der Temperaturen am tiefsten Punkt des Obersees in den Jahren 1998 bis 2015 für jeden Monat des Jahres.

4.4 TIEFE TEMPERATUREN IM WINTER

Für die Nutzung des Obersees als Wärmequelle zum Heizen sind die tiefsten Temperaturen im Winter von besonderem Interesse. Bei tiefen Wassertemperaturen ist die Wärmenutzung deutlich weniger effizient, einerseits, weil die Leistungszahl der Wärmepumpe mit der Temperatur abnimmt (Zogg, 2009), andererseits auch, weil bei besonders tiefen Temperaturen unterhalb von 4 °C das Wasser nur noch wenig abgekühlt werden kann.

Abbildung 7 zeigt aufgrund der Modellrechnungen im Lachner Becken und im Bollinger Becken, an wie vielen Tagen pro Jahr bestimmte Temperaturen unter 3.5 °C in den Jahren 1998 bis 2015 unterschritten wurden. Abbildung 8 zeigt dasselbe für Temperaturen von 4 bis 8 °C.

Eine Temperatur unter 3.5 °C wird unterhalb von 10 m Tiefe an durchschnittlich 2 bis 5 Tagen pro Jahr erreicht, der Wert von 3 °C wird nur selten unterschritten. Im Bollinger Becken treten tiefe Temperaturen in den Modellrechnungen deutlich seltener auf als im Lachner Becken. Dies wird durch die Nähe des Zuflusses verursacht, dessen Temperatur nie unter 4 °C sinkt. Kältere Wintertemperaturen im Lachner Becken wurden auch schon bei einer Auswertung von Messungen aus den Jahren 1950 bis 1975 festgestellt (Örn, 1983).

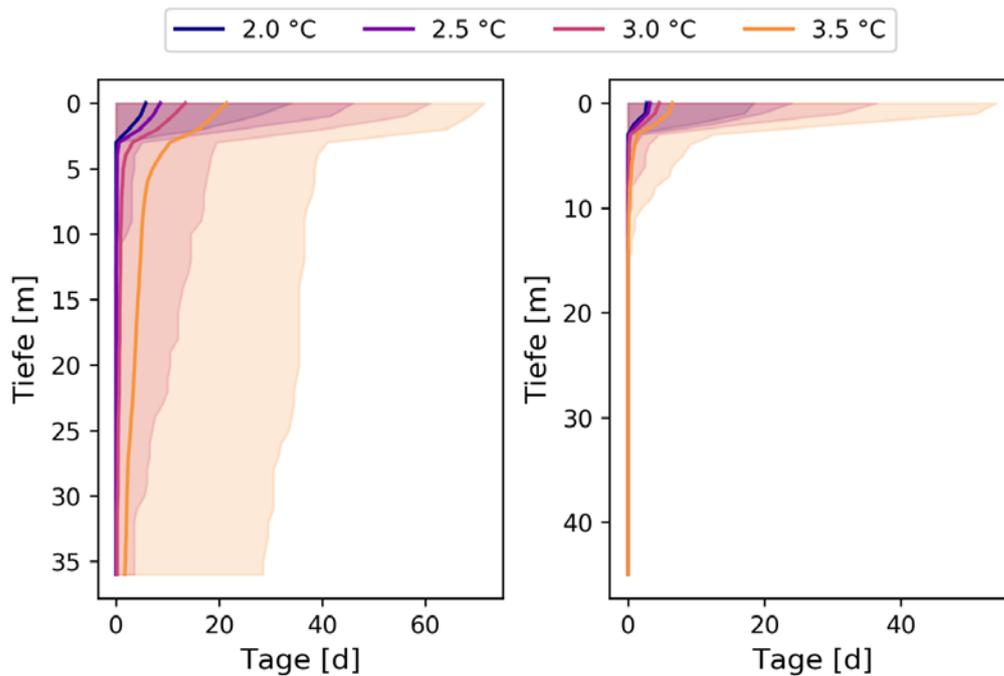


Abbildung 7: Anzahl der Tage, an welchen Temperaturen zwischen 2.0 und 3.5 °C während der Heizsaison (Oktober bis April) in einer bestimmten Tiefe des Lachner Beckens (links) und des Bollinger Beckens (rechts) unterschritten werden, basierend auf den Simulationsrechnungen. Die ausgezogenen Linien zeigen den Median, die schraffierten Bereiche die Minimal- und Maximalwerte für die simulierten Jahre 1998 bis 2015.

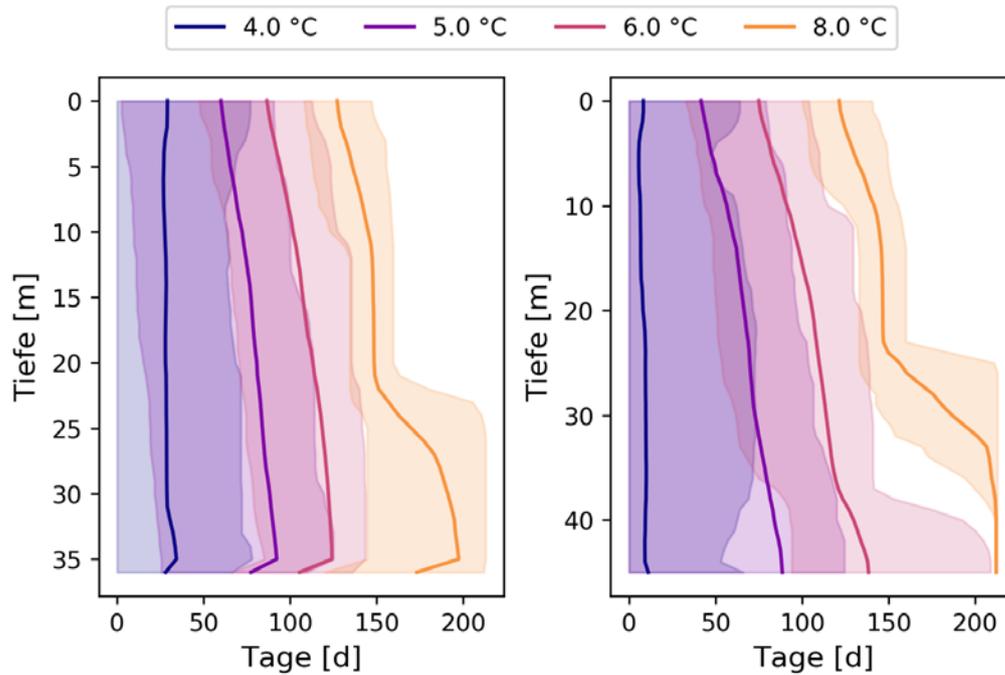


Abbildung 8: Anzahl der Tage, an welchen Temperaturen zwischen 4.0 und 8.0 °C während der Heizsaison (Oktober bis April) in einer bestimmten Tiefe des Lachner Beckens (links) und des Bollinger Beckens (rechts) unterschritten werden, basierend auf den Simulationsrechnungen. Die ausgezogenen Linien zeigen den Median, die schraffierten Bereiche die Minimal- und Maximalwerte für die simulierten Jahre 1998 bis 2015.

4.5 HOHE TEMPERATUREN IM SOMMER

Aufgrund seiner vergleichsweise geringen Tiefe ist das Wasservolumen, welches im Sommer durchgehend niedrige Temperaturen aufweist, im Zürich-Obersee eher klein. In beiden Becken treten bis in 20 m Tiefe gelegentlich Temperaturen von über 10 °C auf (Abbildung 9), was für das Lachner Becken auch durch die Beobachtungen gestützt wird (Abbildung 5). Selbst am tiefsten Punkt können Temperaturen von 8 °C (Lachner Becken), bzw. 7 °C (Bollinger Becken) erreicht werden. Temperaturen über 18 °C werden nur in den obersten 10 m erreicht (Abbildung 10), und 24 °C wird nur in einzelnen Jahren an wenigen Tagen überschritten.

Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung

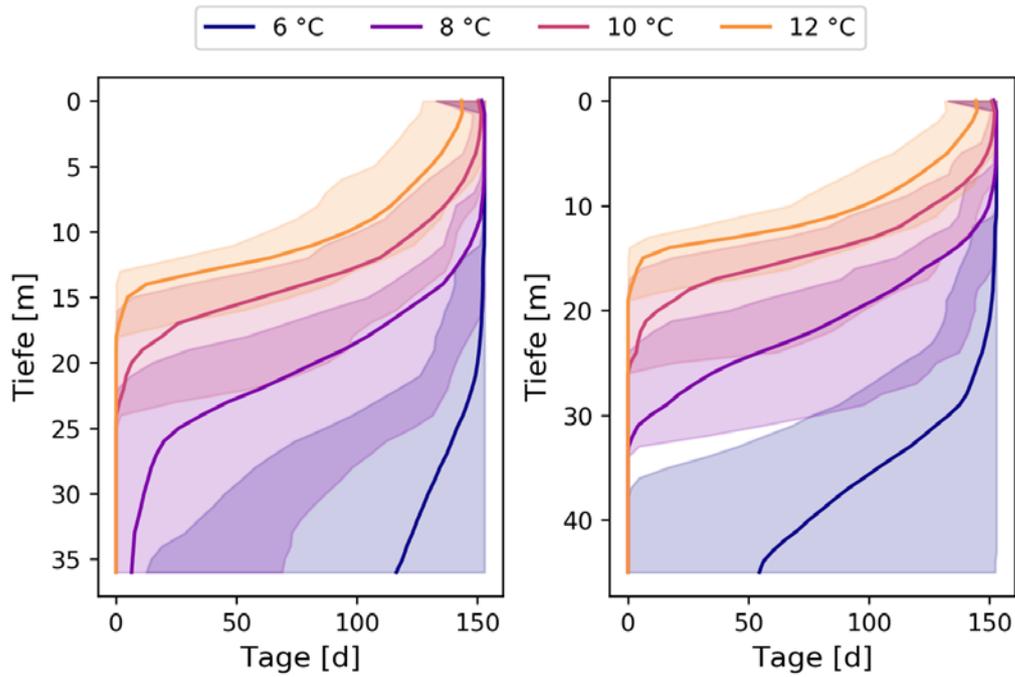


Abbildung 9: Anzahl der Tage, an welchen Temperaturen zwischen 6.0 und 12.0 °C während der Sommersaison (Mai bis September) in einer bestimmten Tiefe des Lachner Beckens (links) und des Bollinger Beckens (rechts) überschritten werden, basierend auf den Simulationsrechnungen. Die ausgezogenen Linien zeigen den Median, die schraffierten Bereiche die Minimal- und Maximalwerte für die simulierten Jahre 1998 bis 2015.

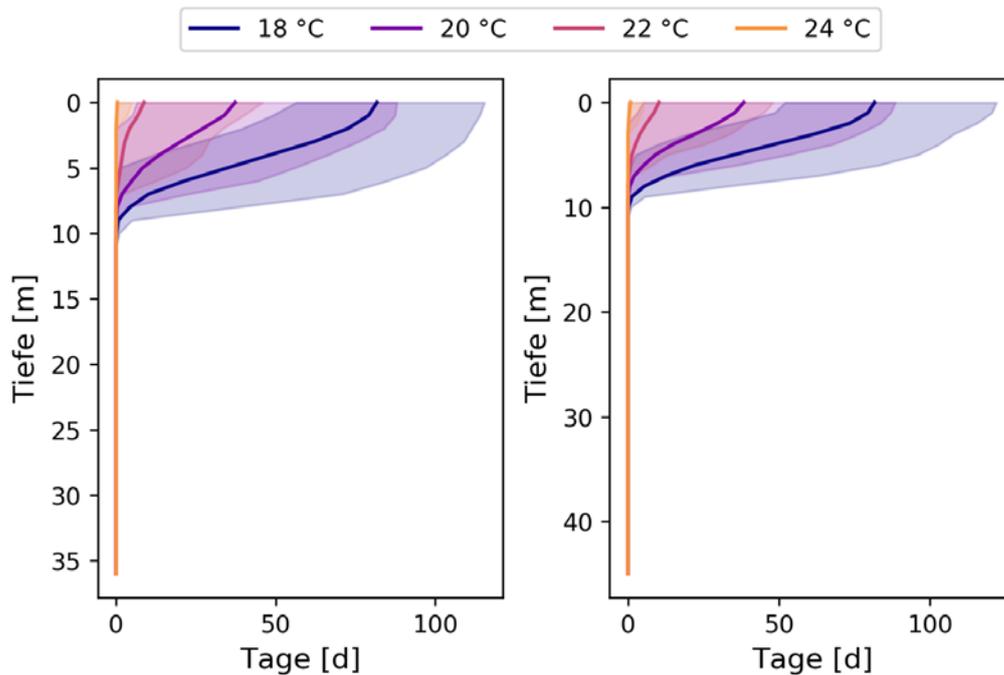


Abbildung 10: Anzahl der Tage, an welchen Temperaturen zwischen 18.0 und 24.0 °C während der Sommersaison (Mai bis September) in einer bestimmten Tiefe des Lachner Beckens (links) und des Bollinger Beckens (rechts) überschritten werden, basierend auf den Simulationsrechnungen. Die ausgezogenen Linien zeigen den Median, die schraffierten Bereiche die Minimal- und Maximalwerte für die simulierten Jahre 1998 bis 2015.

4.6 KURZFRISTIGE TEMPERATURSCHWANKUNGEN

An der Stelle einer Wasserfassung in einem See können sich zusätzlich zu den bisher besprochenen Temperaturvariationen kurzfristige Temperaturschwankungen aufgrund von internen Wellen ergeben. Vertikale Auslenkungen um mehrere Meter sind bei stärkerem Wind durchaus üblich. Diese Auslenkungen sind am stärksten an den Enden des Sees in Längsrichtung. Im Zürichsee wurden beispielsweise bei einem Sturm vertikale Auslenkungen der 10 °C Isotherme von bis zu 10 m beobachtet und auch bei normalen Wetterbedingungen periodische Auslenkungen von rund 2 m (Horn et al., 1986). Für den Zürich-Obersee liegen keine entsprechenden Messungen vor. Aufgrund der geringeren Grösse und damit Angriffsfläche für den Wind ist aber mit weniger hohen internen Wellen als im Zürichsee zu rechnen, und auch die Simulationen für die Jahre 2015 bis 2019 mit dem dreidimensionalen Modell (meteolakes.ch) zeigen keine besonders starken Auslenkungen.

4.7 SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE WÄRME- UND KÄLTENUTZUNG

Aus den gemessenen Temperaturen ergeben sich für die Wärmenutzung des Zürich-Obersees folgende Erkenntnisse:

- Vor allem im Lachner Becken kann die Wassertemperatur in kalten Wintern bis in grössere Tiefen deutlich unter 4 °C sinken. Es ist deshalb bei der Nutzung von Seewasser für Heizzwecke damit zu rechnen, dass in kalten Wintern gelegentlich andere Wärmequellen benötigt werden, um den Wärmebedarf zu decken.
- Ganzjährig ausreichend kühles Wasser für Kühlwassernutzungen ist in beiden Becken erst in vergleichsweise tiefen Schichten vorhanden. Bis in etwa 25 m Tiefe können die Höchsttemperaturen im Sommer 10 °C erreichen.
- Für beide Nutzungsarten ist entsprechend eine Entnahmetiefe von mindestens 20 bis 25 m zu empfehlen, um gleichmässige Temperaturen für den Betrieb der Anlagen zu gewährleisten, und um Temperaturen unter 4 °C zum Heizen und Temperaturen über 10 °C zum Kühlen möglichst zu meiden.

5 SAUERSTOFF UND NÄHRSTOFFE

5.1 SAUERSTOFFKONZENTRATIONEN

Abbildung 11 zeigt die beobachteten Sauerstoffkonzentrationen im Lachner Becken. Während der Sommerschichtung nehmen die Sauerstoffkonzentrationen unterhalb der Sprungschicht kontinuierlich ab und erreichen im September in den meisten Jahren Werte unterhalb von 5 mg/L. Unterhalb von 25 m Tiefe werden gelegentlich und am tiefsten Punkt regelmässig sauerstofffreie Verhältnisse gemessen.

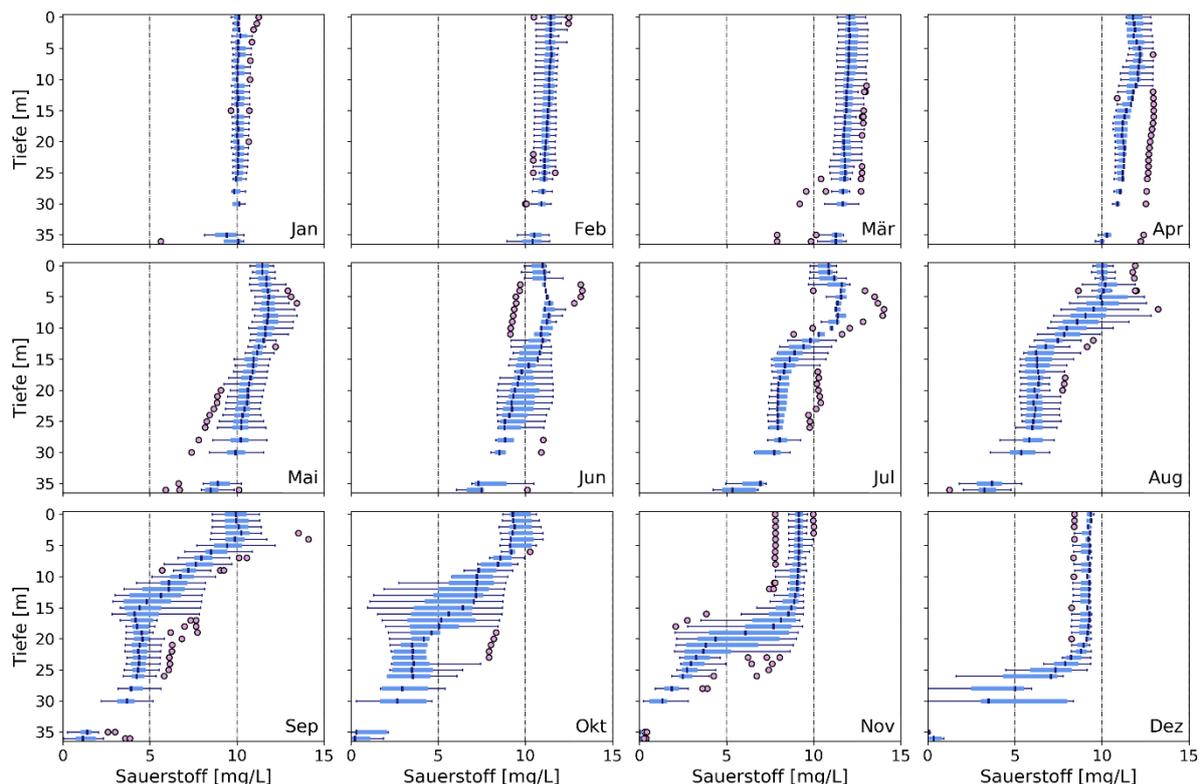


Abbildung 11: Beobachtete Verteilung der Sauerstoffkonzentrationen an der Messstelle bei Lachen in den Jahren 2001 bis 2018 für jeden Monat des Jahres. Alle Box-Plots zeigen die Mediane, die Quartile (Boxen), den gesamten Datenbereich, sofern dieser innerhalb des 1.5-fachen des Interquartilbereichs liegt (Antennen), und die Ausreisser ausserhalb der Antennen (Punkte). Weil bis 2005 monatlich und anschliessend nur noch zweimonatlich gemessen wurde, ist die Datengrundlage nicht für alle Monate gleich gut.

Für das Bollinger Becken liegen keine neueren Messungen vor. In den Jahren 1989 bis 1990 wurden in beiden Becken Vergleichsmessungen durchgeführt (Gammeter und Forster, 2002). Diese zeigten ähnliche Verhältnisse in beiden Becken bis in 20 m Tiefe. In grösseren Tiefen wurden im Lachner Becken vor allem im Spätsommer deutlich tiefere Konzentrationen beobachtet als im Bollinger Becken. Ähnliche Beobachtungen wurden auch schon in einer Untersuchung von Messungen aus den 1960er und 1970er Jahren gemacht (Örn, 1983). Die Hauptursache für diese Unterschiede liegt wohl in der grösseren Tiefe des Bollinger Beckens. Dort steht deshalb für die gleiche Seefläche ein grösseres Tiefenwasser-Volumen und damit nach der saisonalen Mischung auch mehr Sauerstoff zur Verfügung, um den Sauerstoffbedarf während des Sommers zu decken.

5.2 NÄHRSTOFFKONZENTRATIONEN

Die Konzentrationen von Phosphat und Gesamtphosphor liegen im Zürich-Obersee grundsätzlich während des ganzen Jahres und in allen Tiefen ungefähr bei 2 µg-P/L bzw. 10 µg-P/L. Lediglich wenn in den tiefsten Schichten gegen Ende des Jahres sauerstofffreie Verhältnisse auftreten, können die Phosphorkonzentrationen in diesen Schichten aufgrund der Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment stark ansteigen. Bei der Mischung im Winter ergeben sich dann vorübergehend erhöhte Phosphatkonzentrationen um 5 µg-P/L im ganzen See.

Die gelösten Stickstoffkonzentrationen (Summe von Stickstoff in Nitrat und Nitrit) bewegen sich im Winter über die ganze Tiefe im Bereich zwischen 0.6 und 0.8 mg-N/L. Im Sommer sinken die Konzentrationen im Oberflächenwasser auf 0.4 bis 0.6 mg-N/L und bleiben im Tiefenwasser in etwa konstant. Aus diesen Werten kann geschlossen werden, dass im Zürich-Obersee der gelöste Phosphor und nicht der Stickstoff für das Algenwachstum limitierend ist (Schildknecht et al., 2013).

5.3 SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE WÄRME- UND KÄLTENUTZUNG

Aus den gemessenen Sauerstoff- und Nährstoff-Konzentrationen ergeben sich für die Energienutzung folgende Erkenntnisse:

- Weil das gelöste Phosphat für das Algenwachstum im Zürich-Obersee limitierend ist und dessen Konzentrationen mit Ausnahme der tiefsten Bereiche ganzjährig tief und vertikal homogen verteilt sind, besteht im Zürich-Obersee keine Gefahr, dass ein Wasseraustausch zwischen verschiedenen Schichten zu einer für die Organismen im Seen nachteiligen Veränderung der Nährstoffverteilung führen könnte. Ausgenommen davon sind Wasserentnahmen aus den tiefsten Schichten (unterhalb von 30 m im Lachner Becken und von 40 m im Bollinger Becken, wo gelegentlich hohe Phosphatkonzentrationen auftreten können).
- Da die Sauerstoffkonzentrationen bereits in 10 m Tiefe im Spätsommer in manchen Jahren unter 5 mg/L fallen können, ist für kälteliebende Fischarten zu dieser Jahreszeit der verfügbare Lebensraum, in welchem nicht zu hohe Temperaturen und genügend Sauerstoff vorhanden sind, auf einen kleinen Tiefenbereich beschränkt. Aus diesem Grund ist für den Zürich-Obersee nicht zu empfehlen, für Wärme- und Kältenutzung Wasser aus tiefen Schichten zu entnehmen und oberflächennah wieder einzuleiten. Dadurch würde erstens das verfügbare Volumen für die Sauerstoffzehrung weiter verkleinert und zweitens die Untergrenze der warmen Oberflächenschicht abgesenkt, und damit möglicherweise der Lebensraum für kälteliebende Arten von oben und von unten her weiter eingeschränkt.

6 AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS

Die Seen in der Schweiz haben sich aufgrund des Klimawandels bereits deutlich erwärmt, und werden sich voraussichtlich weiter erwärmen. Im Zürichsee hat die Oberflächentemperatur in den Jahren 1981 bis 2013 im Jahresmittel um rund 0.4 °C pro Jahrzehnt zugenommen, wobei die Erwärmung in den Frühlingsmonaten besonders hoch war (Schmid und Köster, 2016). Ähnliche Tendenzen wurden auch in anderen Seen Mitteleuropas beobachtet (Woolway et al., 2017).

Die Folgen des Klimawandels für die Temperatur und Schichtung im Zürich-Obersee wurden in zwei verschiedenen Projekten abgeschätzt.

Kobler et al. (2019) simulierten mit dem Modell CE-QUAL-W2 die Temperaturen im Zürich-Obersee basierend auf Vorhersagen für die Veränderung der Lufttemperatur in den Klimaszenarien CH2011 (CH2011, 2011) für das Szenario A2 aus dem Vierten Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2007). Die Simulationen ergaben für das Ende des 21. Jahrhunderts eine Erwärmung des Oberflächenwassers um 1.5 bis 2 °C und des Tiefenwassers um etwa 0.5 °C im Sommerhalbjahr und 1.0 bis 1.5 °C im Winterhalbjahr.

Im Rahmen des Projektes Hydro CH2018 werden aktuell die Auswirkungen der Klimaszenarien CH2018 (NCCS, 2018) auf die Temperaturen der meisten grösseren Seen der Schweiz untersucht. Die verwendeten Klimaszenarien CH2018 basieren auf den RCP-Szenarien aus dem Fünften Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2013). Die Simulationen wurden mit dem eindimensionalen physikalischen Seemodell Simstrat durchgeführt. Die Berechnungen sind zum Zeitpunkt der Publikation dieses Berichts noch nicht vollständig abgeschlossen, es handelt sich entsprechend um vorläufige Ergebnisse. Für den Zürich-Obersee reproduziert das verwendete Modell, welches die Zuflüsse nicht mitberücksichtigen kann (Kapitel 4.2), die Oberflächentemperaturen gut, überschätzt aber die Tiefenwassertemperaturen im Sommer um einige Grad. Die Temperaturunterschiede zwischen dem heutigen Klima (Mittelwert von 1982 bis 2010) und dem Klima gegen Ende des 21. Jahrhunderts (Mittelwert von 2071 bis 2099) geben aber trotzdem einen Hinweis auf die zu erwartenden Veränderungen (Abbildung 12).

Für RCP2.6, ein Szenario in welchem die Treibhausgasemissionen ab dem Jahr 2020 kontinuierlich vermindert werden, ergibt sich bis Ende des 21. Jahrhunderts eine Erwärmung der Oberflächentemperatur um etwa 1 °C. Für RCP8.5, ein Szenario mit weiterhin deutlich zunehmenden Treibhausgasemissionen, wird eine Erwärmung des Oberflächenwassers im Bereich von 3 bis 4 °C erwartet. RCP4.5 liegt sowohl bei den Treibhausgasemissionen wie auch bei den simulierten Temperaturveränderungen zwischen den beiden anderen Szenarien. Für die Tiefenwassertemperaturen sagt das Modell im Sommer für alle Szenarien nur eine geringe Erwärmung voraus. Diese Ergebnisse sind aber mit einer grossen Unsicherheit behaftet, weil diese Version des Modells, vermutlich wegen der fehlenden Zuflüsse, die Tiefenwassertemperaturen generell nicht gut reproduzieren kann.

Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung

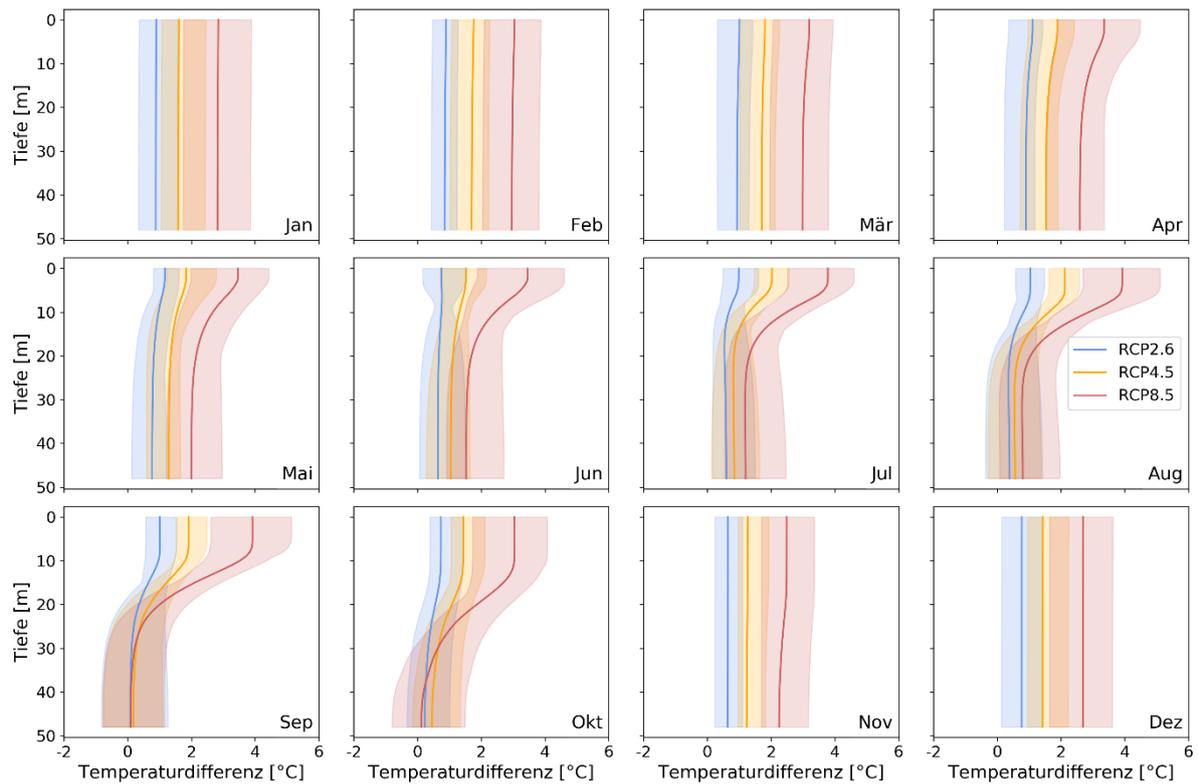


Abbildung 12: Simulierte Veränderung der mittleren monatlichen Wassertemperaturen im Zürich-Obersee für das Ende des 21. Jahrhunderts (Mittelwert von 2017 bis 2099) im Vergleich zur Referenzperiode (1982 bis 2010) für die drei CO₂-Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5. Die Berechnungen wurden mit dem Seemodell Simstrat durchgeführt auf Grundlage der Klimaszenarien CH2018 (NCCS, 2018). Die schattierten Flächen zeigen die tiefsten und höchsten Werte basierend auf je 7 unterschiedlichen Klimamodellen für RCP2.6 und RCP4.5 und von 17 Klimamodellen für RCP8.5. Weil diese hier verwendete Version des Modells die Zuflüsse nicht berücksichtigt und die Tiefenwassertemperaturen deshalb nicht gut reproduzieren kann, bestehen vor allem bei den Projektionen für das Tiefenwasser grössere Unsicherheiten.

7 POTENZIAL DER WÄRME- UND KÄLTENUTZUNG IM ZÜRICH-OBERSEE

7.1 POTENZIAL FÜR WÄRMEENTNAHMEN

Ein Bedarf für die Wärmeentnahme aus Seen zum Heizen von Gebäuden besteht vor allem während des Winterhalbjahres. Dabei wird das Seewasser mit einer Wärmepumpe um einige Grad abgekühlt, um ein Kältemittel auf eine höhere Temperatur zu bringen. Das Kältemittel wird dann in Heizungssystemen verwendet oder in ein Wärmenetz eingebracht.

Der Zürich-Obersee ist in den Monaten Dezember bis März, wenn der grösste Teil der Wärmeentnahmen stattfindet, meist vollständig gemischt. Für die Abschätzung des Potenzials wird deshalb hier angenommen, dass sich das Rückgabewasser mit dem ganzen Seevolumen mischen kann.

Zudem wird im Zürich-Obersee aufgrund der vergleichsweise kurzen Aufenthaltszeit auch ein beträchtlicher Anteil des Seevolumens während der Wintermonate ausgetauscht. Die Linth bei der Bafu-Messstation bei Weesen hat in den Wintermonaten einen mittleren Abfluss von 25 bis 30 m³/s. Wenn wir die übrigen Zuflüsse vernachlässigen und konservativ mit einem Zufluss von 25 m³/s rechnen, ergibt sich über vier Monate ein Zuflussvolumen von 264 Mio. m³. Dieses Wasser verbleibt im Schnitt während der Hälfte der Wintermonate im See und nimmt deshalb auch nur die Hälfte der eingetragenen Kälte auf, wenn der Kälteeintrag zeitlich homogen verteilt ist.

Wie in Kapitel 2 erläutert, gibt es für die maximal erlaubte Temperaturänderung von Seen keine festen Grenzwerte und es liegen auch wenig Informationen vor, wie sich eine geringe Abkühlung eines Sees auf die im See lebenden Organismen auswirkt. Grundsätzlich ist aber eine Abkühlung sicher weniger problematisch als eine Erwärmung oder allenfalls sogar erwünscht, da sich Gewässer aufgrund des Klimawandels ohnehin erwärmen. In der Studie zur Abschätzung des Potenzials der grösseren Schweizer Seen wurde eine maximale Abkühlung von 1 °C zugelassen (Gaudard et al., 2019b). In Studien zur Abschätzung des Potenzials von einzelnen Seen haben wir üblicherweise mit einer maximalen Abkühlung des ganzen Volumens um 0.5 °C gerechnet (Gaudard, 2016a; Gaudard, 2016b). Weil Temperaturänderungen von 0.5 °C bereits gewisse ökologische Folgen haben können, und weil sich die Temperatur nicht unbedingt gleichmässig auf das ganze Volumen verteilt, haben wir als weitere Option auch das Potenzial für eine maximale Abkühlung um 0.2 °C berechnet. Die entsprechenden Potenziale sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Potenzial für die Wärmeentnahme aus dem Zürich-Obersee bei verschiedenen Annahmen für die maximal erlaubte Abkühlung des Seevolumens und mit oder ohne Berücksichtigung des Austausches eines Teils des Volumens durch die Zu- und Abflüsse.

	Potenzial bei max. Abkühlung um 1.0 °C	Potenzial bei max. Abkühlung um 0.5 °C	Potenzial bei max. Abkühlung um 0.2 °C
ohne Wasseraustausch	1'785 TJ	893 TJ	357 TJ
mit Wasseraustausch	2'338 TJ	1'169 TJ	486 TJ

Aus dem Potenzial für die Wärmeentnahme können die Potenziale für die Wärmeleistung, die aus dem See entnommen werden kann, und für die mittlere Heizleistung von mit Seewasser betriebenen Wärmepumpen abgeschätzt werden. Dabei wird angenommen, dass die entnommene Wärme auf 2'200 Betriebsstunden verteilt wird und die Wärmepumpen eine mittlere Leistungszahl von 3.5 aufweisen. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 3 (Wärmeleistung aus dem See) und Tabelle 4 (Heizleistung der Wärmepumpen) angegeben.

Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung

Tabelle 3: Potenzial für die mittlere Wärmeleistung, die aus dem Zürich-Obersee entnommen werden kann, basierend auf dem Potenzial für die Wärmeentnahme und einer Betriebsdauer von 2'200 Stunden in den Monaten Dezember bis März.

	Potenzial bei max. Abkühlung um 1.0 °C	Potenzial bei max. Abkühlung um 0.5 °C	Potenzial bei max. Abkühlung um 0.2 °C
ohne Wasseraustausch	225 MW	113 MW	45 MW
mit Wasseraustausch	295 MW	148 MW	59 MW

Tabelle 4: Potenzial für die mittlere Heizleistung von Wärmepumpen Zürich-Obersee basierend auf dem Potenzial für die Wärmeentnahme, einer mittleren Leistungszahl der Wärmepumpen von 3.5 im Winter, und einer Betriebsdauer von 2'200 Stunden in den Monaten Dezember bis März.

	Potenzial bei max. Abkühlung um 1.0 °C	Potenzial bei max. Abkühlung um 0.5 °C	Potenzial bei max. Abkühlung um 0.2 °C
ohne Wasseraustausch	316 MW	158 MW	63 MW
mit Wasseraustausch	413 MW	207 MW	83 MW

Zur Überprüfung der auf diese Weise geschätzten Potenziale wurde mit dem kalibrierten eindimensionalen Modell Simstrat eine Simulation für die oben berechnete Wärmeentnahme für eine maximale Abkühlung um 1.0 °C mit Berücksichtigung des Wasseraustausches durchgeführt. Dabei wurde die Wärmemenge von 2'338 TJ nicht über 2200 Betriebsstunden sondern gleichmässig auf die Monate Dezember bis März verteilt aus dem Tiefenbereich von 20 bis 30 m entnommen. Daraus ergibt sich eine konstante Wärmeentnahme von 222 MW, entsprechend einer konstanten Heizleistung von 311 MW bei einer Leistungszahl von 3.5. Abbildung 13 zeigt den saisonalen Verlauf der Abkühlung des Zürich-Obersees für die oben berechnete Wärmeentnahme, gemittelt über die Jahre 1982 bis 2018.

Die Modellrechnungen ergeben eine während des Winters zunehmende Abkühlung des ganzen Sees, welche Ende März im langjährigen Mittel etwa 0.6 °C erreicht (Abbildung 13) im Jahr mit der grössten Temperaturdifferenz etwas mehr als 1.0 °C (Abbildung 14). Im Verlauf des Sommers bleiben die Temperaturen des Tiefenwassers im Mittel gut 0.3 °C und maximal etwa 0.8 °C unter den Normalwerten. Die Oberflächentemperaturen hingegen verändern sich nur geringfügig. Eine Akkumulation der Kälte über mehrere Jahre findet nicht statt, da der See jedes Jahr vollständig durchmischt wird. Der genaue zeitliche Verlauf und die Tiefenverteilung der Abkühlung hängen natürlich vom Verlauf der Wärmeentnahme und von den Entnahme- und Rückleitungstiefen ab. Zudem kann im eindimensionalen Modell die Aufteilung des Obersees in zwei Becken nicht berücksichtigt werden. Die Simulationsrechnung soll deshalb nur als ein Beispiel für die möglichen Auswirkungen einer Wärmenutzung betrachtet werden. Sie bestätigt aber die Grössenordnung der in Tabelle 3 abgeschätzten Potenziale für eine maximale Abkühlung um 1 °C.

Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung

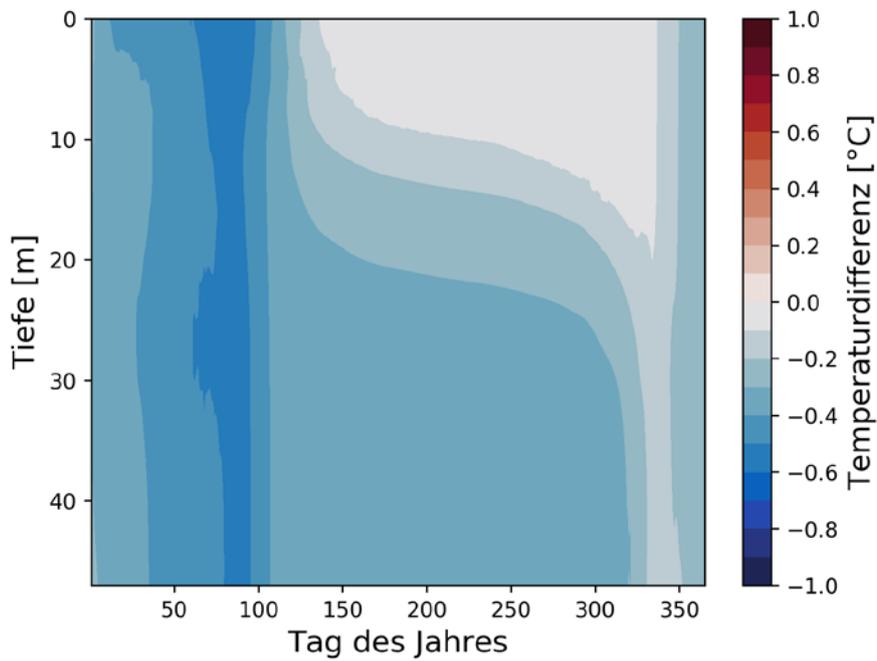


Abbildung 13: Simulierte mittlere Veränderung der Wassertemperaturen im Jahresverlauf im Zürich-Obersee bei konstantem Wärmeentzug von 222 MW aus 20 bis 30 m Tiefe in den Monaten Dezember bis März für die Jahre 1982 bis 2018, berechnet mit dem eindimensionalen physikalischen Seemodell Simstrat.

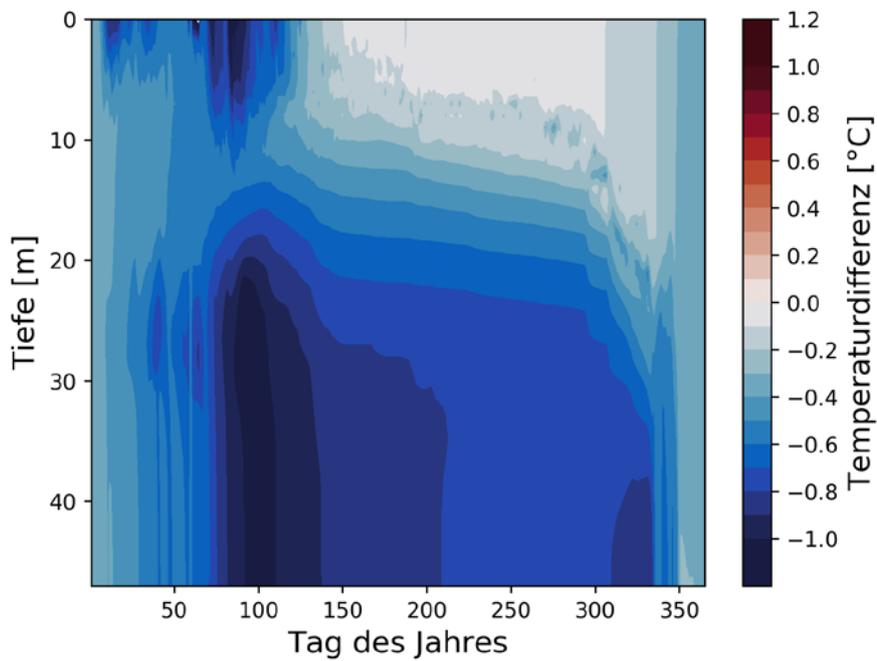


Abbildung 14: Simulierte maximale Veränderung der Wassertemperaturen im Jahresverlauf im Zürich-Obersee für ein Szenario bei konstantem Wärmeentzug von 222 MW aus 20 bis 30 m Tiefe in den Monaten Dezember bis März für die Jahre 1982 bis 2018, berechnet mit dem eindimensionalen physikalischen Seemodell Simstrat.

7.2 POTENZIAL FÜR WÄRMEEINLEITUNGEN

Während des Sommerhalbjahrs erhöht sich die Wassertemperatur in der Oberflächenschicht fortlaufend, während die tieferen Schichten vergleichsweise kühl bleiben. Dieses Tiefenwasser ist daher für die Kältenutzung für Klimaanlage und die Ableitung von Abwärme besser geeignet.

Die Auswertung der Wassertemperaturen in Kapitel 4.5 hat gezeigt, dass im Zürich-Obersee Temperaturen von 12 °C gelegentlich in Tiefen bis zu 20 m und Temperaturen von 10 °C in Tiefen bis zu 30 m auftreten können. Auf einen Wärmeeintrag in das Oberflächenwasser während des Sommers sollte möglichst verzichtet werden, weil die Oberflächentemperaturen durch die Klimaerwärmung bereits deutlich erhöht sind und künftig weiter ansteigen werden (Gaudard et al., 2019b). Zudem führt eine Erwärmung der Oberflächentemperatur tendenziell auch zu einer Verlängerung der Dauer der Sommerschichtung, und entsprechend vermehrtem Auftreten von Sauerstoffmangel im Tiefenwasser.

Für die Abschätzung des Potenzials verwenden wir deshalb hier das Volumen unterhalb von 20 m Tiefe. Dabei wird das Potenzial auf die beiden Seebecken separat aufgeteilt, weil sie unterhalb einer Tiefe von 20 m nicht miteinander verbunden sind und deshalb die zugeführte Wärme während der sommerlichen Schichtung nicht zwischen den beiden Becken ausgetauscht werden kann. Die Zuflüsse schichten sich im See während des Sommers üblicherweise in der Sprungschicht ein. Das erwärmte Tiefenwasser bleibt deshalb mit Ausnahme von Hochwasserereignissen während der Sommerschichtung liegen und wird nicht ausgetauscht.

Analog zur Abschätzung des Potenzials für die Kältenutzung verwenden wir zwei verschiedene erlaubte Temperaturveränderungen von 0.5 und 0.2 °C. Von der Abschätzung des Potenzials bei einer Erwärmung um bis zu 1.0 °C wird abgesehen, weil eine Erwärmung des Sees im Zuge des Klimawandels kritischer zu beurteilen ist als eine Abkühlung (Kapitel 6).

Aufgrund des geringeren Volumens, welches für den Wärmeeintrag zur Verfügung steht, und der geringeren erlaubten Temperaturdifferenz sind die geschätzten Potenziale für die Kältenutzung (Tabelle 5) und die entsprechende Kühlleistung (Tabelle 6) im Zürich-Obersee rund eine Grössenordnung kleiner als die entsprechenden Potenziale für die Wärmenutzung.

Tabelle 5: Potenzial für die Wärmeeinleitung in die beiden Becken des Zürich-Obersees bei verschiedenen Annahmen für die maximal erlaubte Abkühlung des Seevolumens.

	Potenzial bei max. Erwärmung um 0.5 °C	Potenzial bei max. Erwärmung um 0.2 °C
Bollinger Becken	171 TJ	68 TJ
Lachner Becken	89 TJ	35 TJ
gesamter See	259 TJ	104 TJ

Tabelle 6: Potenzial für die mittlere Kühlleistung mit Wasser aus den beiden Becken des Zürich-Obersees basierend auf dem Potenzial für die Wärmeeinleitung, und einem kontinuierlichen Betrieb von 6 Monaten von Mai bis Oktober (4'416 Stunden).

	Potenzial bei max. Erwärmung um 0.5 °C	Potenzial bei max. Erwärmung um 0.2 °C
Bollinger Becken	11 MW	4 MW
Lachner Becken	5 MW	2 MW
gesamter See	16 MW	6 MW

Auch für die Wärmeeinleitung wurden die Auswirkungen auf Temperaturen mit dem eindimensionalen Modell Simstrat für ein Beispiel berechnet. Dabei wurden während 6 Monaten von Mai bis Oktober in 20 bis 30 m Tiefe 16 MW Wärmeleistung zugeführt, entsprechend dem geschätzten Potenzial für eine maximale Erwärmung um 0.5 °C. Die daraus folgende mittlere Erwärmung des Zürich-Obersees ist in Abbildung 15 dargestellt. Die zugeführte Wärme reichert sich während des Sommerhalbjahrs unterhalb der Sprungschicht an, und der Temperaturunterschied erreicht gegen Ende der Sommerschichtung einen Höchstwert von gut 0.4 °C. Die Anreicherung von Wärme unterhalb der Sprungschicht wird durch die aktuellen Wetterbedingungen nur wenig beeinflusst. Entsprechend ist der Unterschied zwischen dem Jahr mit maximaler Erwärmung (Abbildung 16) und dem Durchschnittsjahr (Abbildung 15) hier vergleichsweise klein.

Die Auswirkungen von Wärmeeinträgen wurden hier für das Sommerhalbjahr berechnet, weil der Bedarf für Kühlungen im Sommer am grössten ist. Industrielle Kühlungen werden aber oft auch ganzjährig betrieben. Aus diesem Grund wurde eine zusätzliche Simulationsrechnung durchgeführt, in welcher die gleiche Wärmeleistung von 16 MW während des ganzen Jahres konstant in 20 bis 30 m Tiefe zugeführt wird. Die simulierten mittleren Temperaturänderungen für dieses Szenario sind in Abbildung 17 dargestellt. Im Vergleich zur Simulation mit Einleitung nur im Sommer (Abbildung 15) ergeben sich nur geringfügige zusätzliche Erwärmungen, die ganzjährig in allen Tiefen unter 0.1 °C liegen. Eine Kühlungsanlage, welche während des Sommers die angegebenen Potenziale nicht überschreitet, kann entsprechend bei Bedarf auch im Winter betrieben werden, insbesondere dann, wenn dem See im Winter gleichzeitig für Heizzwecke auch Wärme entnommen wird.

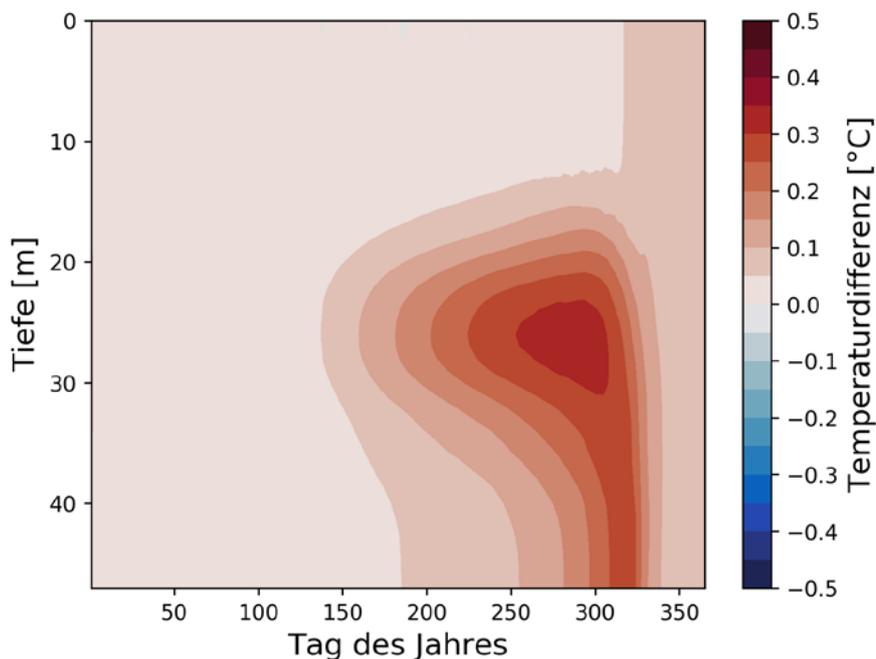


Abbildung 15: Simulierte mittlere Veränderung der Wassertemperaturen im Jahresverlauf im Zürich-Obersee für ein Szenario mit konstantem Wärmeeintrag von 16 MW in 20 bis 30 m Tiefe in den Monaten Mai bis Oktober für die Jahre 1982 bis 2018, berechnet mit dem eindimensionalen physikalischen Seemodell Simstrat.

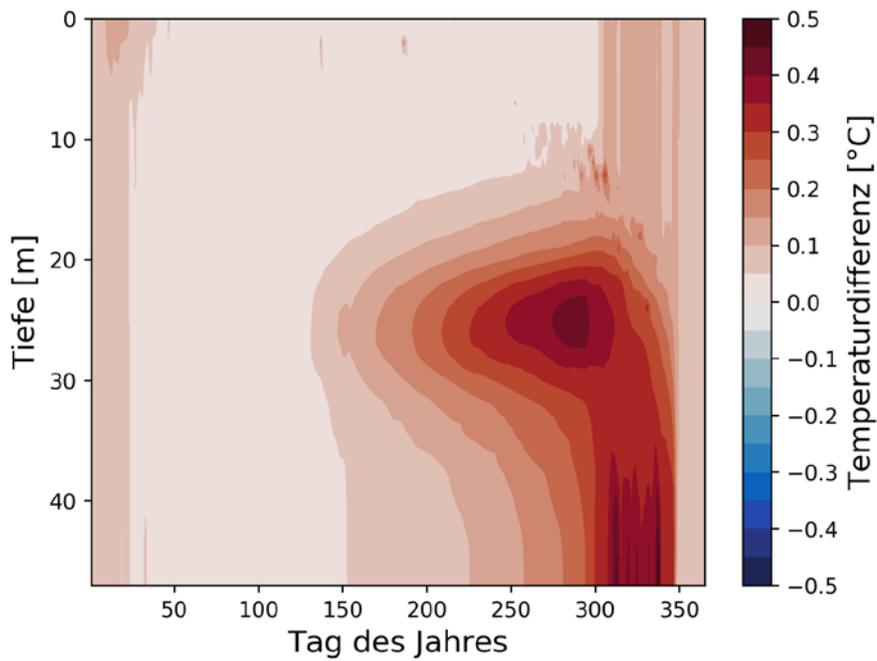


Abbildung 16: Simulierte maximale Veränderung der Wassertemperaturen im Jahresverlauf im Zürich-Obersee für ein Szenario mit konstantem Wärmeeintrag von 16 MW in 20 bis 30 m Tiefe in den Monaten Mai bis Oktober für die Jahre 1982 bis 2018, berechnet mit dem eindimensionalen physikalischen Seemodell Simstrat.

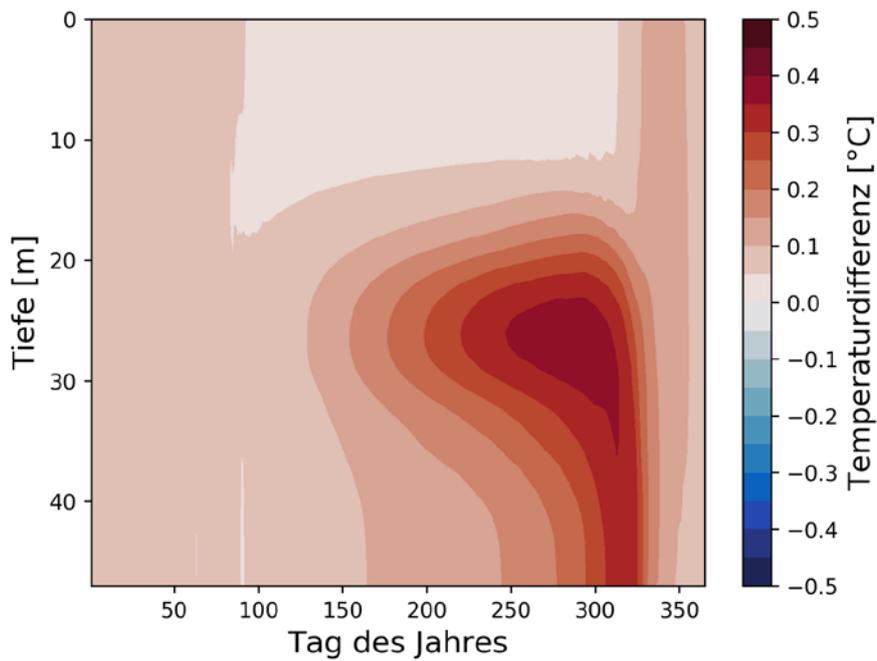


Abbildung 17: Simulierte mittlere Veränderung der Wassertemperaturen im Jahresverlauf im Zürich-Obersee für ein Szenario mit konstantem Wärmeeintrag von 16 MW in 20 bis 30 m Tiefe während des ganzen Jahres für die Jahre 1982 bis 2018, berechnet mit dem eindimensionalen physikalischen Seemodell Simstrat.

Potenzial des Zürich-Obersees für Wärme- und Kältenutzung

Grundsätzlich kann das Potenzial von Seen für Wärmeeinleitungen weiter erhöht werden, indem das erwärmte Wasser nach der Nutzung in den Abfluss abgegeben wird (Gaudard et al., 2019b). Wenn dabei Tiefenwasser aus dem See zum Kühlen verwendet wird, ist das Wasser nach dem Wärmeintrag im Sommer immer noch kühler als das Wasser im Abfluss, und die Kältenutzung kann entsprechend sogar zu einer leichten Abkühlung des Abflusses führen.

Eine solche Nutzung ist aber für den Zürich-Obersee nicht in grösserem Umfang zu empfehlen. Durch die Wasserentnahme im Tiefenwasser und die Rückleitung in den Abfluss, hier in den Zürichsee, würde die Sprungschicht im Zürich-Obersee abgesenkt. Gegen Ende der Sommerschichtung erreichen die Sauerstoffkonzentrationen im Zürich-Obersee gelegentlich bereits in Tiefen von weniger als 15 m Werte im Bereich von 4 mg/L (Kapitel 5.1). Gleichzeitig können im Oberflächenwasser noch Temperaturen deutlich über 20 °C vorherrschen. Es ist zu erwarten, dass aufgrund des Klimawandels in Zukunft sowohl die Oberflächentemperaturen noch weiter ansteigen, als auch die Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser beschleunigt wird. Dadurch wird das Habitat für kälteliebende Fische gegen Ende des Sommers auf einen kleinen Bereich eingeschränkt (Magee et al., 2017). Durch eine künstliche Absenkung der Sprungschicht würde dieser Bereich allenfalls noch weiter verkleinert.

8 SCHLUSSFOLGERUNGEN

8.1 POTENZIALE FÜR DIE WÄRME- UND KÄLTENUTZUNG

Die in Kapitel 7 geschätzten Potenziale für die Wärme- und Kältenutzung des Zürich-Obersees sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Dabei sind diejenigen Wärmeeinträge und –entnahmen, welche mit grosser Wahrscheinlichkeit keine negativen Folgen für das Ökosystem haben werden, grün eingefärbt. Diese entsprechen maximalen Temperaturänderungen von +0.2 °C für Wärmeeinleitungen und -0.5 °C für Wärmeentnahmen. Wenn Nutzungen im Bereich oder über den orange eingefärbten Potenzialen (+0.5 °C für Wärmeeinleitungen und -1.0 °C für Wärmeentnahmen) in Betracht gezogen werden, oder wenn bei einer grösseren Anlage allenfalls lokal starke Effekte erwartet werden, ist eine vertiefte Analyse zu empfehlen für die erwarteten Auswirkungen der konkret geplanten Nutzung, unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs und der geplanten Tiefen und Stellen für die Wasserentnahmen und –Rückleitungen.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Potenziale für die Wärme- und Kältenutzung des Zürich-Obersees. Die grün hinterlegten Werte bezeichnen die Nutzungen, welche mit grosser Wahrscheinlichkeit keine negativen Auswirkungen auf die Ökosysteme haben würden, die orange hinterlegten Werte den Bereich, dessen Nutzung einer vertieften Analyse bedürfte. Die angegebenen Wärmemengen können jährlich während des Sommers eingetragen (Kühlen), bzw. im Winter entnommen werden (Heizen).

	Potenzial für Wärmeentnahmen (Heizen)	Potenzial für Wärmeeinleitungen (Kühlen)
Bollinger Becken		68 TJ
		171 TJ
Lachner Becken		35 TJ
		89 TJ
gesamter See	1'169 TJ	104 TJ
	2'338 TJ	259 TJ

Die angegebenen Potenziale entsprechen den Wärmemengen, die jedes Jahr während des Sommers für Kühlzwecke in den See eingeleitet, beziehungsweise während des Winters für Heizzwecke aus dem See entnommen werden können. Für Kühlzwecke ist nur der Sommer limitierend. Wenn eine gleich grosse Anlage ganzjährig betrieben wird, ergeben sich nur geringfügige zusätzliche Erwärmungen.

Die Potenziale beziehen sich auf die gesamte Nutzung des Sees durch alle Anlagen. Eine Nutzung an einem Ort beeinflusst immer die Temperaturen im ganzen See. Entsprechend sollte die gesamte Nutzung des Sees durch beide Anrainerkantone koordiniert werden.

8.2 ENTNAHME- UND RÜCKLEITUNGSTIEFEN

Um möglichst ganzjährig geeignete Temperaturen für die Nutzung bei der Entnahmestelle zu gewährleisten, wird empfohlen, das Wasser **aus mindestens 20 m Tiefe zu entnehmen**. Vor allem im Lachner Becken können die Temperaturen gelegentlich aber auch in dieser Tiefe im Winter 3.5 °C unterschreiten. Im Sommer sollten ab dieser Tiefe Temperaturen von 12 °C nur sehr selten überschritten werden. Eine Wasserentnahme aus dem Tiefenwasser hat auch den Vorteil, dass aufgrund der tieferen Temperaturen und der geringeren biologischen Aktivität in dieser Schicht in der Anlage weniger

Schwierigkeiten mit Aufwuchs von beispielsweise Algen oder Muscheln auftreten. Die invasiven Zebra­muscheln (*Dreissena polymorpha*), welche harte Oberflächen kolonisieren, treten bevorzugt oberhalb von 15 bis 20 m Tiefe auf (Ginn et al., 2018; Wacker und von Elert, 2003). Die aktuell ebenfalls einwandernde Quaggamuschel (*Dreissena rostriformis bugensis*) besiedelt auch tiefere Schichten in hohen Dichten.

Die **Rückleitung** des erwärmten oder abgekühlten Wassers sollte ebenfalls unterhalb der Sprungschicht **in mindestens 20 m Tiefe erfolgen**. Oberflächennahe Rückleitungen sind nicht zu empfehlen, um ein Absenken der Sprungschicht zu vermeiden.

Der Bau einer Wasserentnahme oder –Rückleitung ist ein Eingriff in die ufernahe Zone des Sees. Entsprechend sind bei deren Planung ökologische Aspekte, wie der Schutz von Laichgebieten oder Naturschutzgebieten, sowie mögliche Konflikte mit anderen Nutzungen (z.B., Fischerei, andere Einleitungen oder Wasserentnahmen) zu berücksichtigen. Um die Anzahl Leitungen im See möglichst gering zu halten, empfiehlt sich auch, den Bau zahlreicher kleiner Anlagen zu vermeiden.

8.3 WEITERE EMPFEHLUNGEN

Wenn gleichzeitig Bedarf für die Nutzung von Kälte und Wärme besteht, kann es vorteilhaft sein, die beiden Nutzungen miteinander zu kombinieren. Solche kombinierten Netze haben mehrere Vorteile. Die Effizienz der Wärmepumpen steigt, weil die Wassertemperaturen im Kreislauf durch die Kühlnutzungen erhöht werden. Der Wasserfluss im Kreislauf wird reduziert, weil das Wasser mehrfach genutzt werden kann, und es werden weniger Fassungen im See und Leitungen benötigt. Bei einer kombinierten Nutzung für Kühlung und Heizung können sich auch die Auswirkungen auf die Temperaturen im See teilweise kompensieren.

Das Wasser wird durch die Wärme- oder Kältenutzung um mehrere °C abgekühlt oder aufgewärmt. Entsprechend ergeben sich in der nahen Umgebung einer Rückleitung Temperaturunterschiede, die oft grösser sind als 1 °C. Diese sollten auf einen kleinen Raum beschränkt sein. Die Bodenseerichtlinie der Internationalen Gewässerschutzkommission des Bodensees (IGKB) erlaubt beispielsweise Temperaturänderungen von mehr als 1 °C nur innerhalb einer Mischungszone von 10 m vertikaler und 20 mal 20 m horizontaler Ausbreitung (IGKB, 2018). Werkzeuge zur Abschätzung der Ausbreitung der Abwasserfahnen von thermischen Nutzungen stehen auf der Webseite der IGKB (http://www.h2o-online.com/igkb_therm/igkb_therm_jet.php) und auf der Projektwebseite der Eawag zur Wärmenutzung von Seen (thermdis.eawag.ch) zur Verfügung.

Bei der Planung von Filtern und Wärmetauschern ist das Vorhandensein von Phyto- und Zooplankton sowie von Muscheln zu berücksichtigen. Der Betrieb sollte durch deren Anwesenheit möglichst nicht gestört werden. Idealerweise zirkuliert das Seewasser in einer separaten Schleife, die vom Wärmenetz getrennt bleibt. Dieser primäre Seewasserkreislauf sollte durch geeignete Filter vor Aufwuchs geschützt werden.

Wasserentnahmen aus Seen sollten so gestaltet sein, dass kleine Fische nicht in die Anlagen gelangen. Zu diesem Zweck sollen Seiher oder ähnliche Vorkehrungen installiert werden, und die Ansauggeschwindigkeit sollte 10 cm/s nicht überschreiten (Boys et al., 2013).

DANKSAGUNGEN

Herzlichen Dank an die Wasserversorgung der Stadt Zürich (WVZ) und das Amt für Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich für die Bereitstellung der Messdaten vom Zürich-Obersee, und an Alfred Wüest für die Durchsicht des Berichtes.

LITERATUR

- Boys, C.A., Robinson, W., Baumgartner, L.J., Rampano, B., Lowry, M., 2013. Influence of Approach Velocity and Mesh Size on the Entrainment and Contact of a Lowland River Fish Assemblage at a Screened Irrigation Pump. *Plos One*, 8(6): e67026.
- Bruce, L.C. et al., 2017. A multi-lake comparative analysis of the General Lake Model (GLM): Stress-testing across a global observatory network. *Environmental Modelling & Software*, 102: 274-291.
- BUWAL, 1994. Der Zustand der Seen in der Schweiz, Bern.
- CH2011, 2011. Swiss Climate Change Scenarios CH2011, C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland.
- Eawag, 1981. Wärmepumpen an Oberflächengewässern. Schriftenreihe BEW, 19, Bern.
- Fink, G., Schmid, M., Wüest, A., 2014. Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: capacities and limits. *Water Resources Research*, 50: 7285–7301.
- Gammeter, S., Forster, R., 2002. Langzeituntersuchungen im Zürichobersee 1972 – 2000, Wasserversorgung Zürich.
- Gaudard, A., 2016a. Wärme- und Kältenutzung aus Briener-, Thuner- und Bielersee, Eawag, Kastanienbaum.
- Gaudard, A., 2016b. Wärme- und Kältenutzung aus Sempacher- und Baldeggersee, Eawag, Kastanienbaum.
- Gaudard, A., Schmid, M., Wüest, A., 2017. Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. Mögliche physikalische und ökologische Auswirkungen der Wärme- und Kältenutzung. *Aqua & Gas*, 97(5): 40-45.
- Gaudard, A., Råman Vinnå, L., Bärenbold, F., Schmid, M., Bouffard, D., 2019a. Toward an open-access of high-frequency lake modelling and statistics data for scientists and practitioners. The case of Swiss Lakes using Simstrat v2.1. *Geoscientific Model Development Discussions*, doi: 10.5194/gmd-2018-336
- Gaudard, A., Weber, C., Alexander, T.J., Hunziker, S., Schmid, M., 2018. Impacts of using lakes and rivers for extraction and disposal of heat. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5: e1295.
- Gaudard, A., Wüest, A., Schmid, M., 2019b. Using lakes and rivers for extraction and disposal of heat: estimate of regional potentials. *Renewable Energy*, 134: 330-342.
- Ginn, B.K., Bolton, R., Coulombe, D., Fleischaker, T., Yerex, G., 2018. Quantifying a shift in benthic dominance from zebra (*Dreissena polymorpha*) to quagga (*Dreissena rostriformis bugensis*) mussels in a large, inland lake. *Journal of Great Lakes Research*, 44(2): 271-282.
- Horn, W., Mortimer, C.H., Schwab, D.J., 1986. Wind-induced internal seiches in Lake Zurich observed and modeled. *Limnology and Oceanography*, 31(6): 1232-1254.
- IGKB, 2018. Bodensee-Richtlinien 2005., 2. überarbeitete Auflage, Mai 2018, Internationale Gewässerschutz-Kommission für den Bodensee (IGKB).
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change., IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC, 2013. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, 151 pp.
- Kobler, U.G., Schmid, M., 2017. Projekt Neues Etzelwerk – Auswirkungen der bestehenden Pumpspeicherung auf Temperatur, Schichtung und Wasserqualität im Sihlsee und im Zürichobersee, Eawag, Kastanienbaum.
- Kobler, U.G., Wüest, A., Schmid, M., 2018. Effects of lake – reservoir pumped-storage operations on temperature and water quality. *Sustainability*, 10(6): 1968.
- Kobler, U.G., Wüest, A., Schmid, M., 2019. Combined effects of pumped-storage operation and climate change on thermal structure and water quality. *Climatic Change*, 152: 413-429.

- Magee, M.R., McIntyre, P.B., Wu, C.H., 2017. Modeling oxythermal stress for cool-water fishes in lakes using a cumulative dosage approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 75: 1303-1312.
- NCCS, 2018. CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich.
- North, R.P., North, R.L., Livingstone, D.M., Köster, O., Kipfer, R., 2014. Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Global Change Biology*, 20: 811-823.
- Örn, C.G., 1983. Zürich-Obersee von 1946 bis 1981: Vergleich der Wärme- und Sauerstoffverhältnisse in den Becken von Bollingen und Altendorf. *Gas, Wasser, Abwasser*, 63(11): 693-701.
- Posch, T., Köster, O., Salcher, M.M., Pernthaler, J., 2012. Harmful filamentous cyanobacteria favoured by reduced water turnover with lake warming. *Nature Climate Change*, 2: 809-813.
- Schildknecht, A., Köster, O., Koss, M., Forster, R., Leemann, M., 2013. Gewässerzustand von Zürichsee, Zürichobersee und Walensee bis 2010, Zürich.
- Schmid, M., 2014. Energieverbund Zug Machbarkeitsstudie - Technischer Bericht Seewasser, Zug.
- Schmid, M., Köster, O., 2016. Excess warming of a Central European lake driven by solar brightening. *Water Resources Research*, 52: 8103-8116.
- Schwefel, R., Müller, B., Boisgontier, H., Wüest, A., 2019. Global warming affects nutrient upwelling in deep lakes. *Aquatic Sciences*, 81(3): 50.
- Wacker, A., von Elert, E., 2003. Settlement pattern of the zebra mussel, *Dreissena polymorpha*, as a function of depth in Lake Constance. *Archiv für Hydrobiologie*, 158(3): 289-301.
- Wanner, O., 2009. Wärmerückgewinnung aus Abwasser, Dübendorf.
- Woolway, R.I. et al., 2017. Warming of Central European lakes and their response to the 1980s climate regime shift. *Climatic Change*, 142: 505-520.
- Yankova, Y., Neuenschwander, S., Köster, O., Posch, T., 2017. Abrupt stop of deep water turnover with lake warming: Drastic consequences for algal primary producers. *Scientific Reports*, 7: 13770.
- Zogg, M., 2009. Wärmepumpen. Zogg Engineering, Oberburg.