

Abschätzung des Potenzials des Ägerisees für die Wärme- und Kältenutzung

Martin Schmid
Kastanienbaum, 22.07.2014



Foto: Peter Keller

1. Hintergrund

In jüngster Vergangenheit sind zahlreiche neue Projekte zur thermischen Nutzung von Seewasser in Angriff genommen worden. Unter anderem soll auch der Zugersee im Rahmen des Energieverbunds Zug in deutlich grösserem Ausmass als bisher genutzt werden (Schmid und Drosner, 2014). Die Nutzung von Seewasser zu Heiz- und Kühlzwecken ist aus energiepolitischer Sicht erwünscht. Es ist deshalb damit zu rechnen, dass diese Entwicklung in Zukunft weiterhin anhalten wird. Vor allem eine Nutzung zu Heizzwecken im Winter kann auch aus ökologischer Sicht wünschbar sein, um die erwartete Erwärmung aufgrund des Klimawandels teilweise ausgleichen zu können (Fink et al., 2014), wohingegen eine Nutzung zu Kühlzwecken die Auswirkungen des Klimawandels verstärken kann.

Der Ägerisee wird bisher noch nicht als Wärme- oder Kältequelle genutzt. In Anbetracht der starken Siedlungsentwicklung in den Anrainergemeinden ist dies aber bereits für die nähere Zukunft zu erwarten. Aus diesem Grund hat das Amt für Umweltschutz des Kantons Zug (AfU) die Eawag beauftragt, das Potenzial des Ägerisees für die Wärmenutzung grob abzuschätzen. Dabei sollen die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie gross ist heute das Potenzial des Ägerisees für die Wärme- und Kältenutzung unter Berücksichtigung der gewässerschutzrechtlichen Anforderungen?
- Welche Rahmenbedingungen sind für Nutzungsanlagen zu formulieren, damit die gewässerschutzrechtlichen Anforderungen erfüllt sind?
- Hat die prognostizierte Klimaerwärmung einen Einfluss auf das Kältenutzungspotenzial des Ägerisees?

2. Methoden

Im Rahmen einer Untersuchung der Wärmenutzung des Zugersees (Schmid und Drosner, 2014) wurden mit einem für den Zugersee kalibrierten eindimensionalen Seemodell verschiedene Szenarien für die Wärme- und Kältenutzung des Zugersees berechnet. Der in der vorliegenden Studie zum Ägerisee zur Verfügung stehende Zeitrahmen erlaubte keine eigene Modellkalibration für den Ägerisee. Die Zugersee-Studie hat aber gezeigt, dass die Temperaturveränderungen im See aufgrund von Wärme- und Kältenutzung nicht stark von den genauen Rahmenbedingungen abhängen. So ergaben sich beispielsweise für ein künftiges Klimaszenario, in welchem die Lufttemperatur im Vergleich zu heute im Jahresmittel um mehr als 2 °C erwärmt war, nahezu die gleichen Temperaturveränderungen aufgrund der Wärmenutzung wie im Standardszenario mit der heutigen Lufttemperatur. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass eine leicht angepasste Version des Modells Zugersee in erster Näherung auch für den Ägerisee eine gute Abschätzung der Temperaturveränderungen in verschiedenen Nutzungsszenarien erlaubt.

Das Modell Zugersee wurde für den Ägerisee wie folgt angepasst:

- Es wurde die vom AfU zur Verfügung gestellte Fläche des Ägerisees als Funktion der Tiefe verwendet.
- Als Anfangsbedingung wurde das im Ägerisee am 12. März 2013 vom AfU gemessene Temperatur- und Leitfähigkeitsprofil verwendet.
- Im Modell Zugersee wurde die Ausfällung von Calcit in der Oberflächenschicht und die teilweise Rücklösung im Tiefenwasser während des Sommers mit berücksichtigt. Darauf wurde im Modell Ägerisee verzichtet.
- Es wurde angenommen, dass das Wasser im Ägerisee in 20 m Tiefe entnommen und wieder eingeleitet wird.

Ansonsten wurde das Modell Zugersee unverändert übernommen. Insbesondere wurden alle Simulationen über neun Jahre vom 1. April 2004 bis 31. März 2013 gerechnet und mit den gleichen meteorologischen Rahmenbedingungen wie für den Zugersee angetrieben.

Ein Vergleich zwischen beobachteten und simulierten Temperaturen zeigt, dass auch mit diesem nicht kalibrierten Modell die Temperaturen im Ägerisee in allen Tiefenbereichen gut vorhergesagt werden können (Abbildungen 1 bis 4). Möglicherweise werden die Oberflächentemperaturen im Sommer etwas überschätzt, dies kann aber aufgrund der Messdaten, welche in den wärmsten Monaten nur in geringer Anzahl vorliegen, nicht mit Sicherheit bestätigt werden. Etwas grössere Unterschiede ergeben sich in einzelnen Jahren in 15 m Tiefe. Dies wäre aber auch für ein kalibriertes Modell in dieser Tiefe im unteren Bereich der Sprungschicht nicht ungewöhnlich. Die Temperatur nimmt hier mit der Tiefe stark ab und relativ kleine Fehler bei der Berechnung der Tiefe der Sprungschicht können deshalb zu deutlichen Abweichungen in der Temperatur führen. Die Tiefenwassertemperaturen werden durch das Modell gut vorhergesagt. Dies deutet darauf hin, dass die Tiefenwassermischung durch das Modell angemessen reproduziert wird. Die berechneten Temperaturveränderungen aufgrund der Wärmenutzung hängen nur schwach von den genauen vorherrschenden Temperaturen im See ab (siehe auch Simulationen mit verändertem Klima im Abschnitt 3.4). Die fehlende Kalibration sollte deshalb keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse dieser Studie haben.

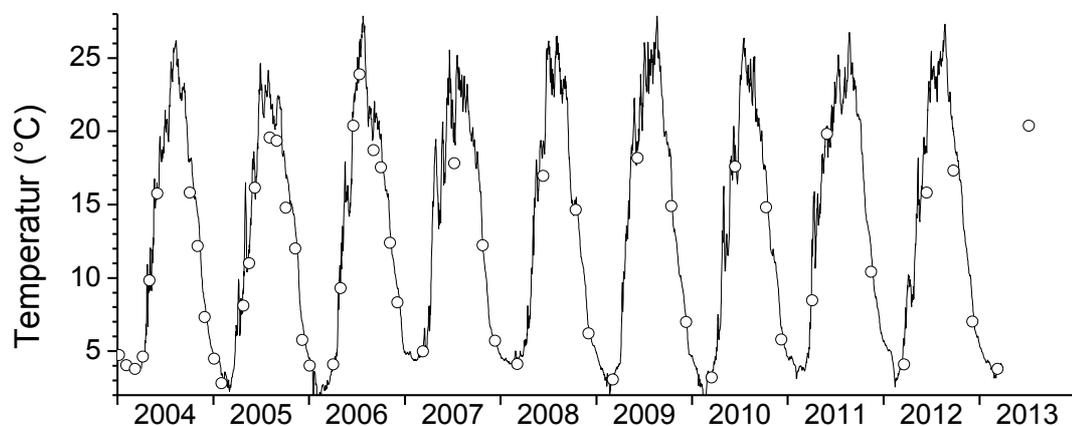


Abbildung 1: Beobachtete (Kreise) und simulierte Temperaturen im Ägerisee in 1 m Tiefe von 2004 bis 2013.

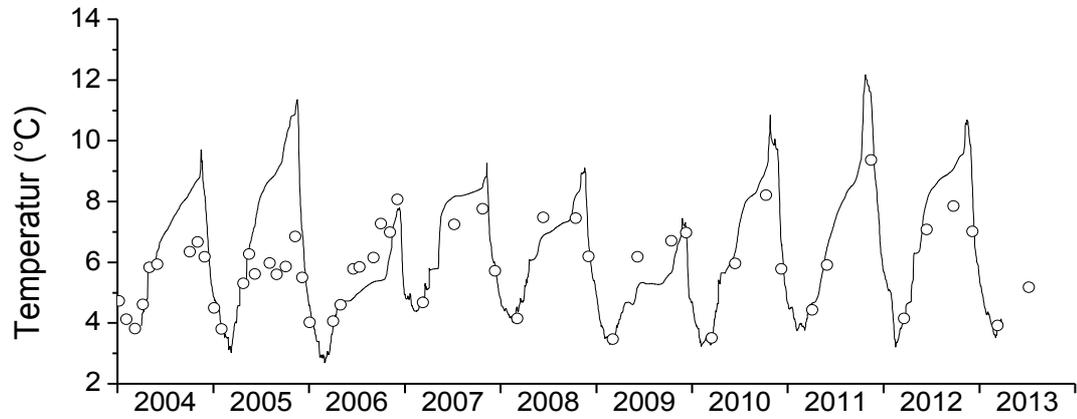


Abbildung 2: Beobachtete (Kreise) und simulierte Temperaturen im Ägerisee in 15 m Tiefe von 2004 bis 2013.

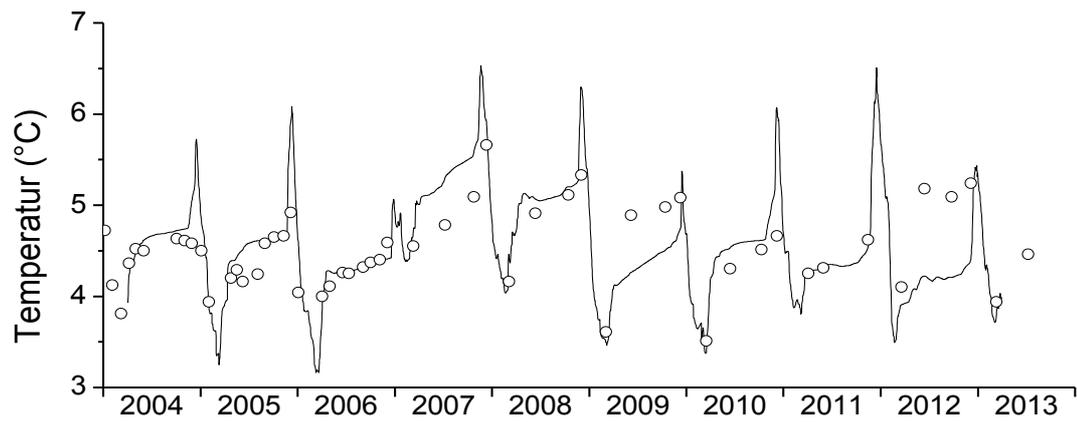


Abbildung 3: Beobachtete (Kreise) und simulierte Temperaturen im Ägerisee in 30 m Tiefe von 2004 bis 2013.

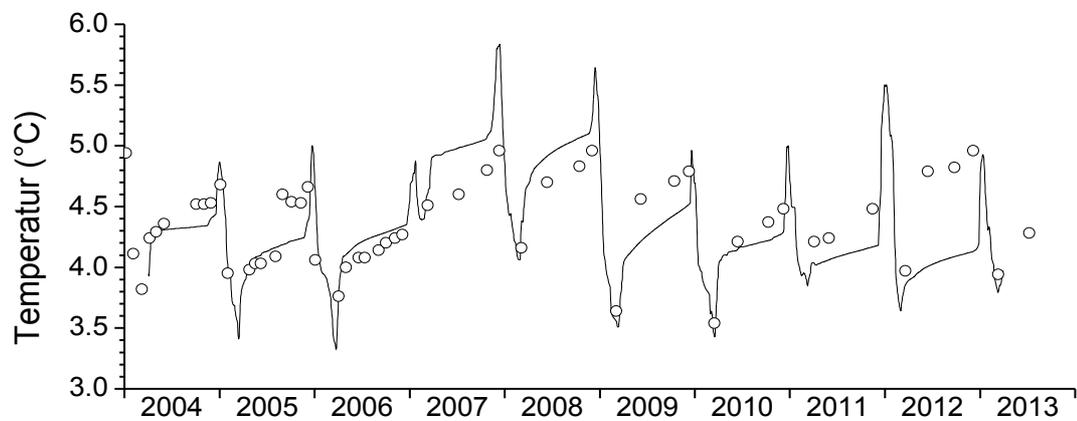


Abbildung 4: Beobachtete (Kreise) und simulierte Temperaturen im Ägerisee in 50 m Tiefe von 2004 bis 2013.

Mit diesem Modell wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Wärme- und Kältenutzungsszenarien gerechnet, wobei die gleiche saisonale Lastverteilung angenommen wurde, wie sie für die Nutzung im Energieverbund Zug durch die Hans Abicht AG abgeschätzt wurde (Abbildung 5). Dabei ist zu erwähnen, dass diese Lastverteilung spezifisch für die Verhältnisse in der Stadt Zug erarbeitet wurde, und dass sich je nach der geplanten Nutzung für den Ägerisee auch eine andere saisonale Verteilung ergeben könnte.

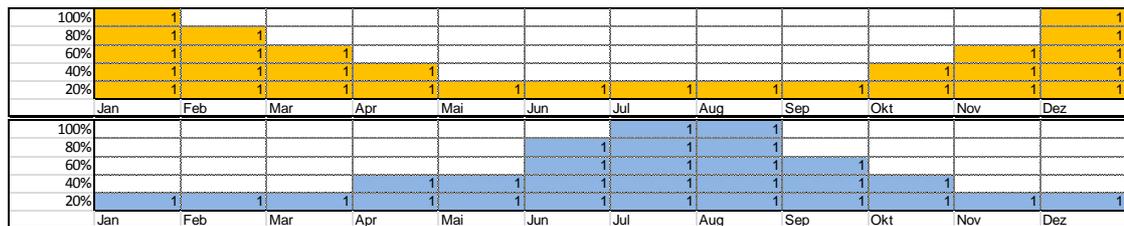


Abbildung 5: Monatliche Lastprofile für den Wärmebedarf (oben) und den Kühlbedarf (unten) für die Wärmenutzung im Rahmen des Energieverbunds Zug (Quelle: Hans Abicht AG).

Tabelle 1: Mit dem Seemodell berechnete Szenarien und entsprechende Wärmeeinträge und -entnahmen.

Szenario	Wärmeeintrag (GWh a ⁻¹)	Wärmeentnahme (GWh a ⁻¹)
Szenario ohne Nutzung (Basisszenario)		
B) keine Wärmenutzung	0	0
Szenarien mit Wärmeeintrag		
W1) geringer Eintrag	10	0
W2) mittlerer Eintrag	30	0
W3) grosser Eintrag	100	0
Szenarien mit Wärmeentnahme		
K1) geringe Entnahme	0	50
K2) mittlere Entnahme	0	200
K3) grosse Entnahme	0	500
Szenarien mit gemischter Wärmeeinleitung und -entnahme		
M1) mittlere Einleitung und Entnahme	100	300
M2) grosse Einleitung und Entnahme	200	500
Klimaszenarien		
C1) Klima 2060 ohne Wärmenutzung	0	0
C2) wie M2 aber mit Klima 2060	200	500
C3) grosse Entnahme mit Klima 2060	0	1000 (in 3 m Tiefe)

3. Ergebnisse

3.1. Wärmeeintrag (Szenarien W1 bis W3)

Es wurden drei Szenarien (W1, W2, W3) mit reiner Kältenutzung (Wärmeeintrag in den See) gerechnet. In diesen Szenarien ergibt sich eine Erwärmung einer Schicht von rund 10 m Dicke im Bereich der Sprungschicht. Die Wärme reichert sich in dieser Tiefe im Verlauf des Sommers an und erreicht gegen Ende der sommerlichen Schichtung im Herbst den Höchstwert. Die Szenarien zeigen maximale Erwärmungen im Bereich von gut 0.1 °C bei einem Wärmeeintrag von 10 GWh a⁻¹ (Abbildung 6) bis zu etwa 1.5 °C bei einem Wärmeeintrag von 100 GWh a⁻¹ (Abbildung 8). Die Temperaturen ausserhalb dieses Tiefenbereichs werden durch die Kältenutzung nur in geringem Mass beeinflusst.

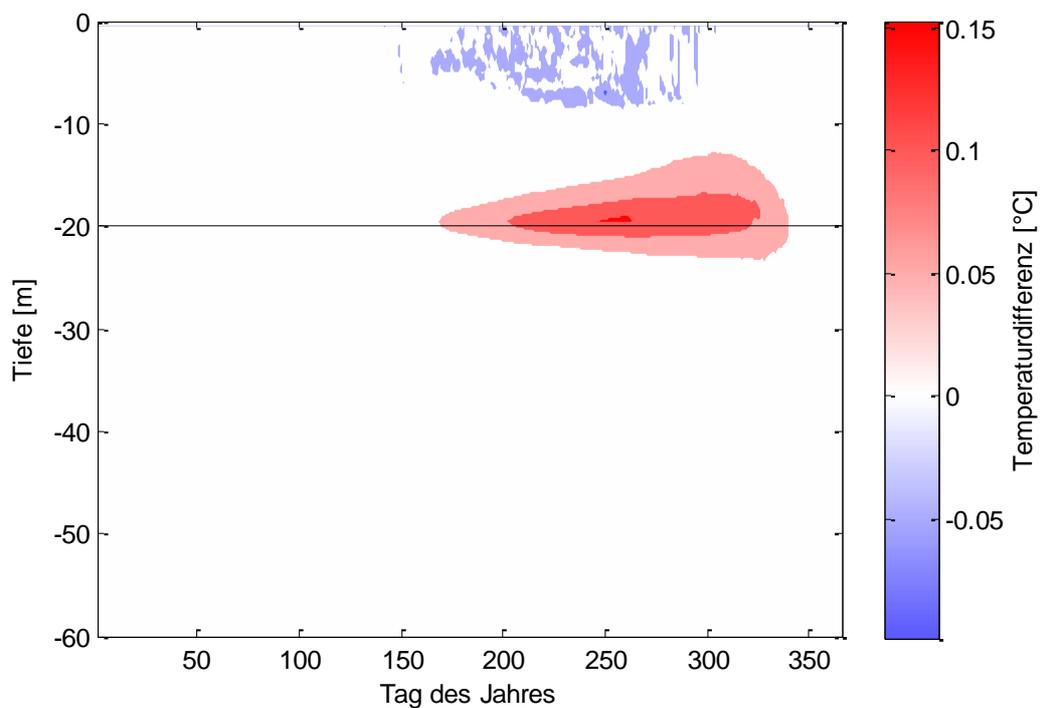


Abbildung 6: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien W1 (10 GWh a⁻¹ Wärmeeintrag) und dem Szenario B (ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

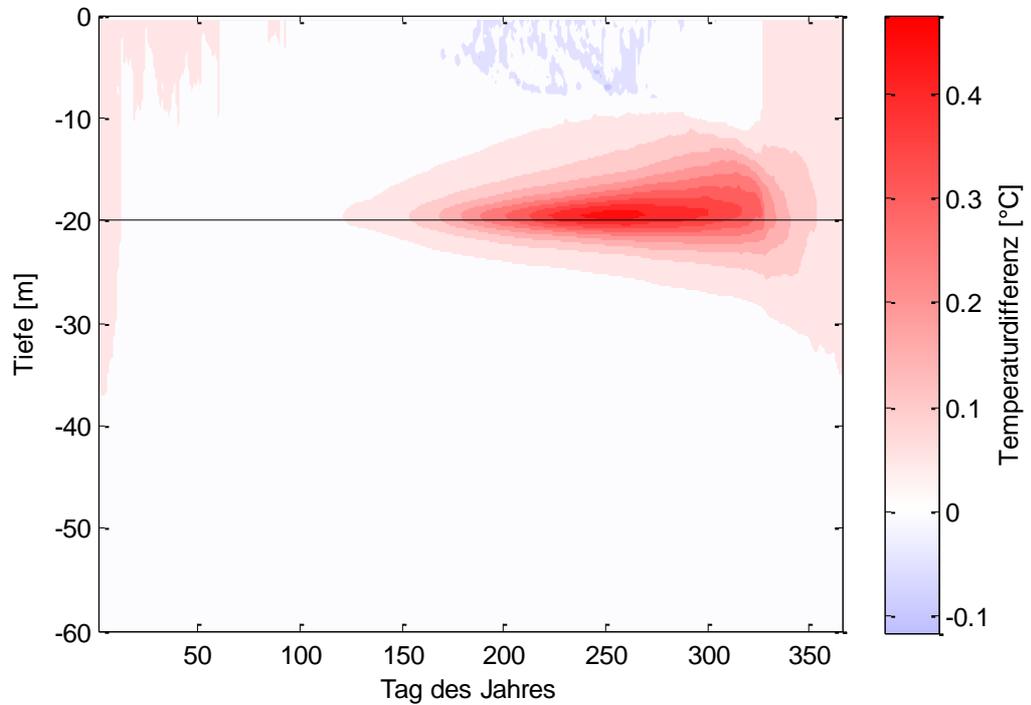


Abbildung 7: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien W2 (30 GWh a⁻¹ Wärmeeintrag) und B (ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

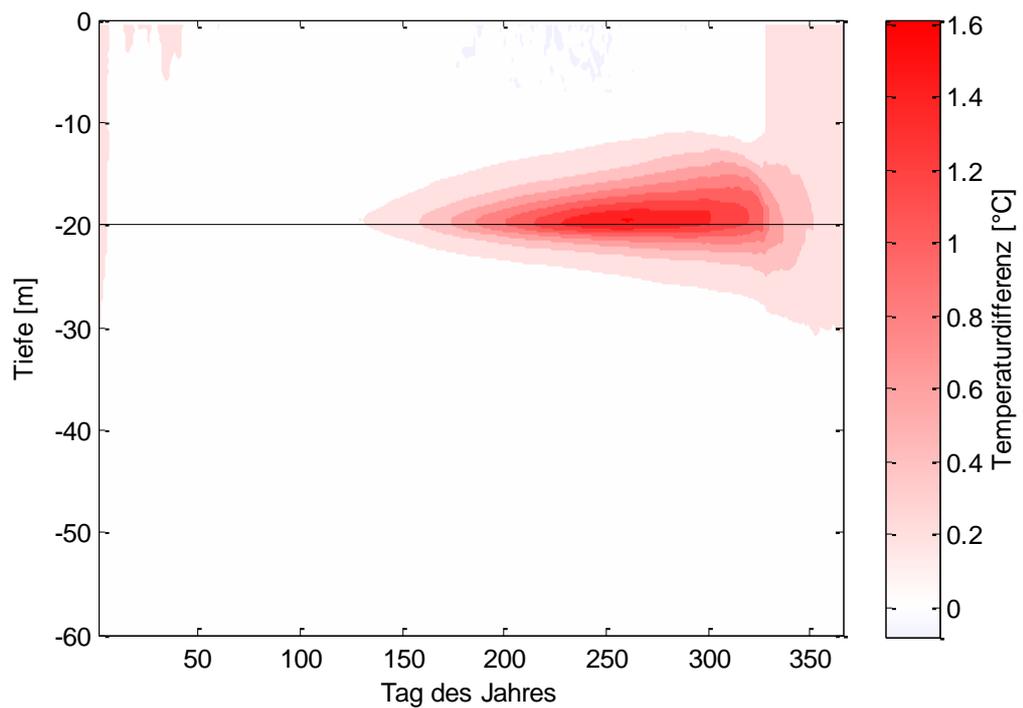


Abbildung 8: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien W3 (100 GWh a⁻¹ Wärmeeintrag) und B (ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

3.2. Wärmeentnahme (Szenarien K1 bis K3)

Für die reine Wärmenutzung (Wärmeentnahme aus dem See) wurden ebenfalls drei Szenarien (K1, K2, K3) gerechnet. Weil die Wärmenutzung zu einem grossen Teil im Winterhalbjahr stattfindet, wenn sich die Wärmeentnahme aufgrund der Mischung auf die ganze Seetiefe verteilt, sind die maximalen Temperaturunterschiede bei gleichen Wärmemengen deutlich geringer als bei der reinen Kältenutzung. Auch hier ergeben sich die grössten Temperaturunterschiede im unteren Bereich der Sprungschicht gegen Ende der geschichteten Periode. Die Szenarien zeigen eine maximale Abkühlung im Bereich von knapp 0.3 °C bei einer Wärmeentnahme von 50 GWh a^{-1} (Abbildung 9) bis etwa 1.8 °C bei einer Wärmeentnahme von 500 GWh a^{-1} (Abbildung 11). Wie gross die maximale Erwärmung Ende Herbst sein wird, wird allerdings davon abhängen, wie das saisonale Lastprofil für den Wärmebedarf effektiv aussehen wird. Während des Winters wird der See über die ganze Tiefe um ein bis mehrere Zehntel Grad abgekühlt.

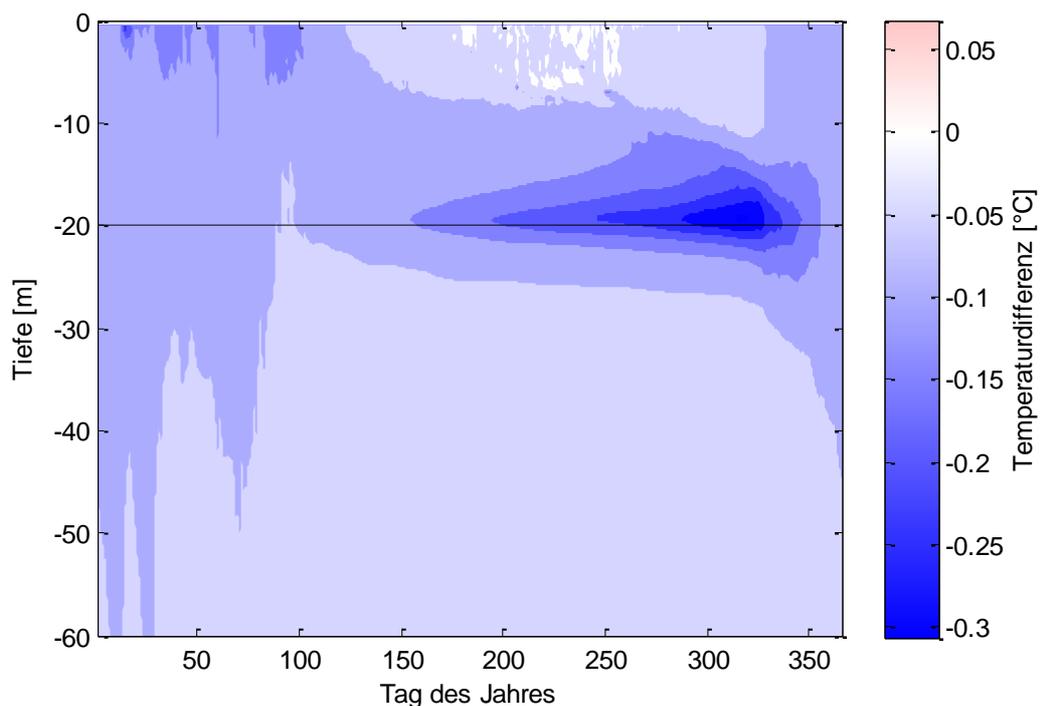


Abbildung 9: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien K1 (50 GWh a^{-1} Wärmeentnahme) und B (ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

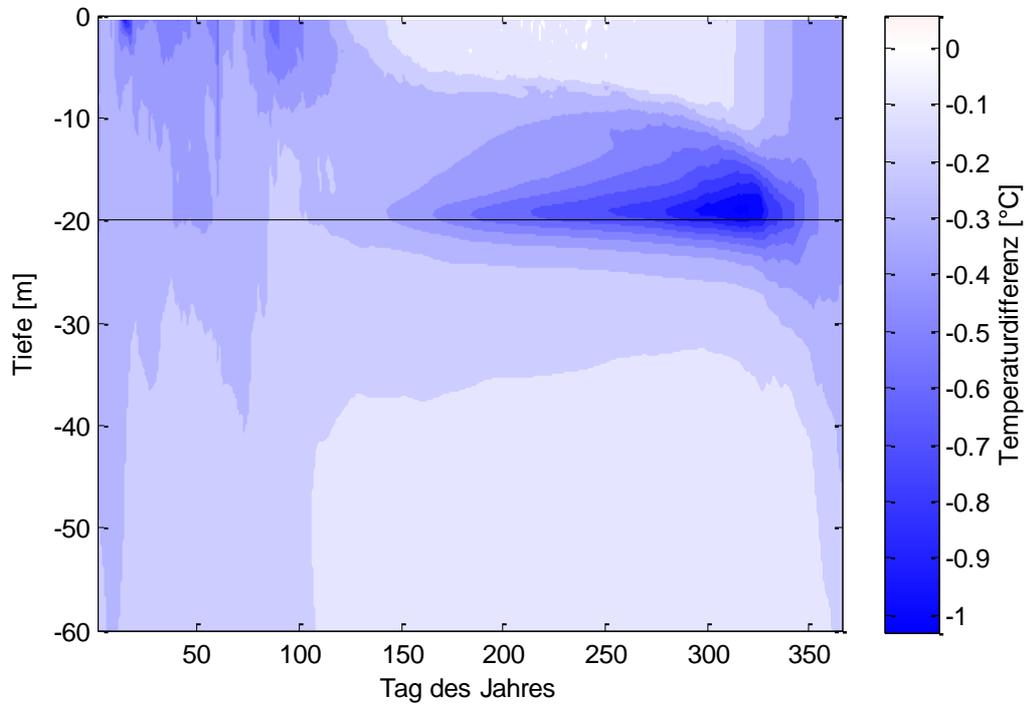


Abbildung 10: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien K2 (200 GWh a⁻¹ Wärmeentnahme) und B (ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

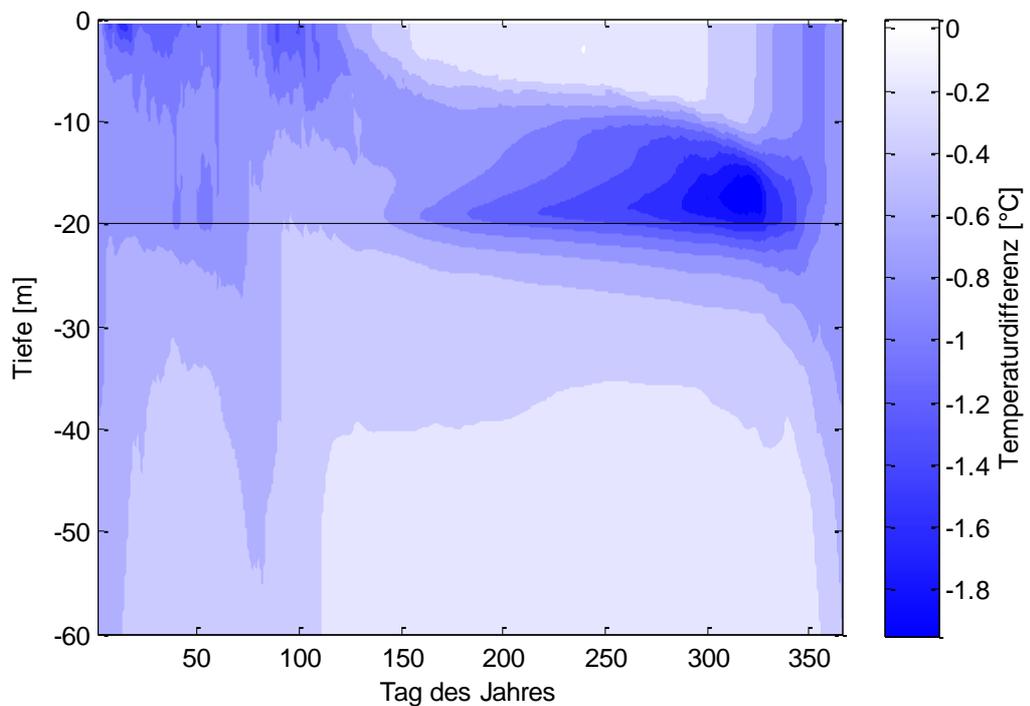


Abbildung 11: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien K3 (500 GWh a⁻¹ Wärmeentnahme) und B (ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

3.3. Gemischte Nutzung

Im Falle einer gemischten Wärme- und Kältenutzung können sich die Auswirkungen der beiden Nutzungen teilweise gegenseitig aufheben. Dies hängt allerdings stark von den Annahmen ab, welche für die saisonale Lastverteilung getroffen wurden. Abbildung 12 zeigt, dass sich die maximale Erwärmung bei einer gemischten Nutzung mit 100 GWh a^{-1} Wärmeeintrag und 300 GWh a^{-1} Wärmeentnahme bei der gegebenen Lastverteilung auf etwa 0.2 °C beschränkt, im Vergleich zu gut 1 °C bei reinem Wärmeeintrag. Entsprechend ist bei gemischter Nutzung ein Wärmeeintrag von bis zu 200 GWh a^{-1} möglich, ohne eine maximale Erwärmung von 1 °C zu überschreiten (Abbildung 13).

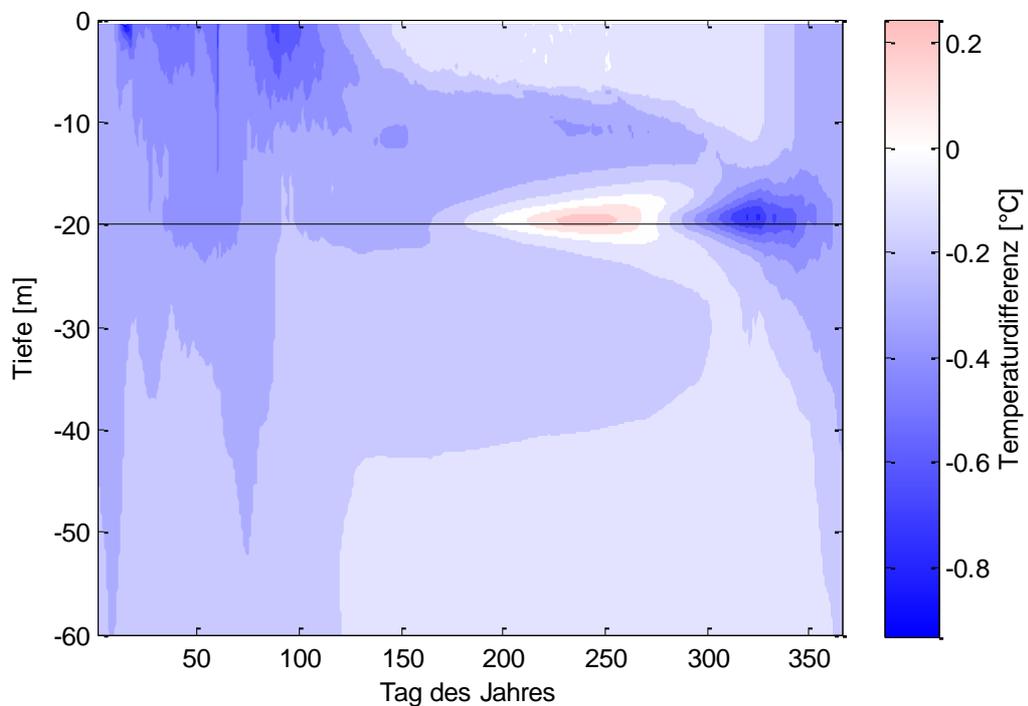


Abbildung 12: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien M1 (100 GWh a^{-1} Wärmeeintrag und 300 GWh a^{-1} Wärmeentnahme) und B (ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

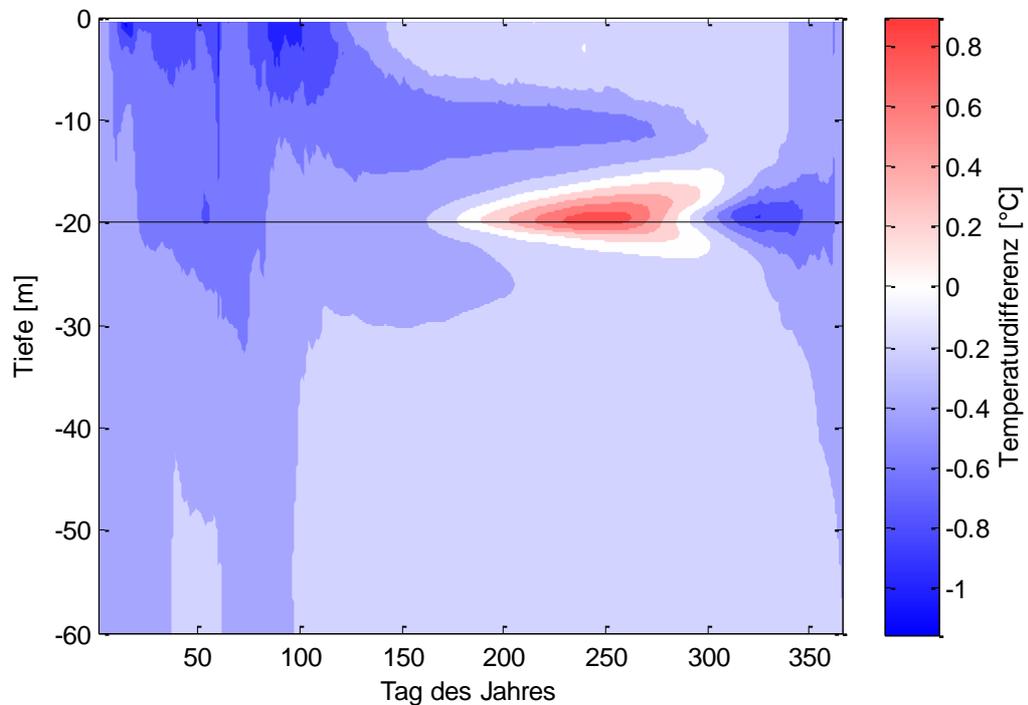


Abbildung 13: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien M2 (200 GWh a⁻¹ Wärmeeintrag und 500 GWh a⁻¹ Wärmeentnahme) und B (ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

3.4. Szenarien mit Klima von 2060

Für diese Szenarien wurde mit dem Klima von 2060 gerechnet, basierend auf dem mittleren Szenario A1B des Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC, 2007) nach den Klimaszenarien CH2011 [CH2011, 2011]. Im Vergleich zum Szenario B wurden lediglich die Lufttemperaturen verändert. Die übrigen Wetterdaten, welche das Modell antreiben (relative Luftfeuchtigkeit, Wind, Solarstrahlung und Bewölkung), wurden gleich belassen. Das Modell wurde zunächst über 9 Jahre laufen gelassen. Die Temperatur am Ende dieser Simulation wurde dann als Anfangsbedingung verwendet für die eigentliche Simulation über 9 Jahre. Die mittlere Erwärmung der Lufttemperatur beträgt 2.27 °C, mit einer leichten saisonalen Variabilität.

Im Klimaszenario wird der ganze See deutlich erwärmt. Die Erwärmung im Oberflächenwasser beträgt im Jahresmittel etwas mehr als 2 °C, im Tiefenwasser etwa 1 °C Abbildung 17. Die Auswirkungen der Wärmenutzung auf den See sind im Klimaszenario 2060 sehr ähnlich wie im Basisszenario mit dem heutigen Klima (Abbildung 15). Ein kleiner Unterschied zeigt sich darin, dass die Abkühlung im Winter sich besser über die ganze Seetiefe verteilt, weil sich im Klimaszenario auch in vergleichsweise kalten Wintern trotz der Wärmenutzung kaum mehr eine inverse Dichteschichtung mit Oberflächentemperaturen unterhalb 4 °C ausbildet.

Mit dem Szenario C3 schliesslich wurde untersucht, ob sich die Erwärmung des Sees durch die Klimaerwärmung mit Hilfe von Wärmenutzung kompensieren liesse. Zu diesem Zweck muss die Wärmeentnahme in der Oberflächenschicht stattfinden. Aufgrund der saisonalen Verteilung der Wärmenutzung ist eine Kompensation lediglich in den Wintermonaten möglich. Diese wird in etwa erreicht bei einer Wärmenutzung von 1000 GWh a^{-1} . Weil die Wintertemperaturen auch die Temperaturen des Tiefenwassers im Sommer bestimmen, könnten so auch die Tiefenwassertemperaturen auf dem heutigen Niveau gehalten werden. Allerdings würden zwei Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Temperaturen im See durch diese Wärmenutzung noch verstärkt: der Temperaturunterschied zwischen Sommer und Winter im Oberflächenwasser (Abbildung 17) und der Temperaturunterschied zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser und damit die Stärke der Dichteschichtung im Sommer.

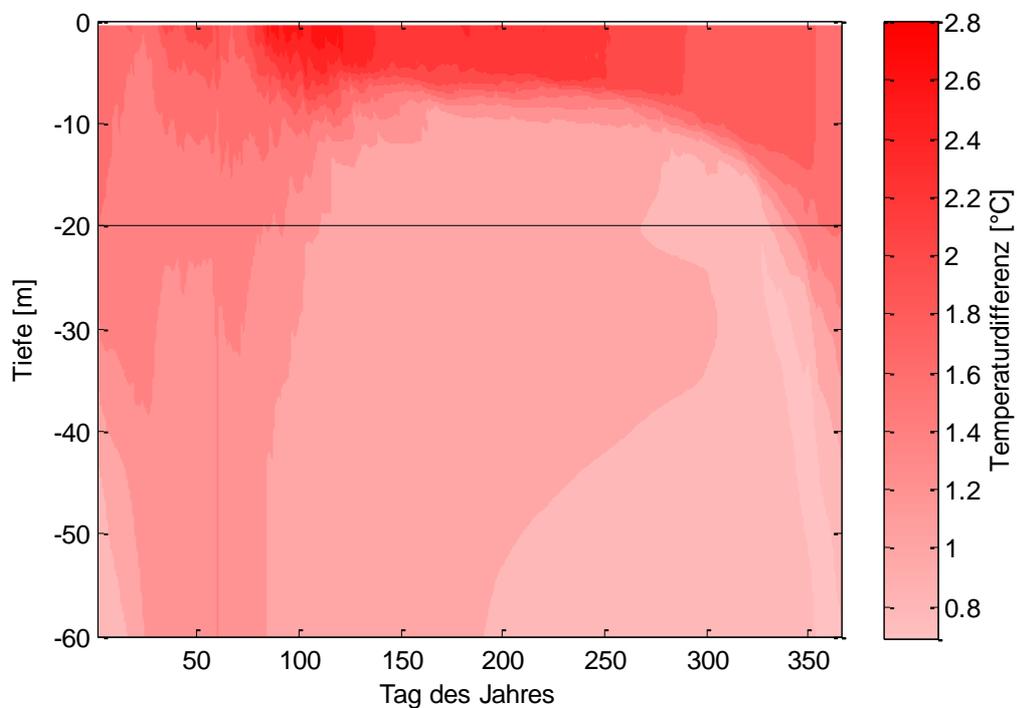


Abbildung 14: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien C1 (Klima 2060 ohne Nutzung) und B (heutiges Klima ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

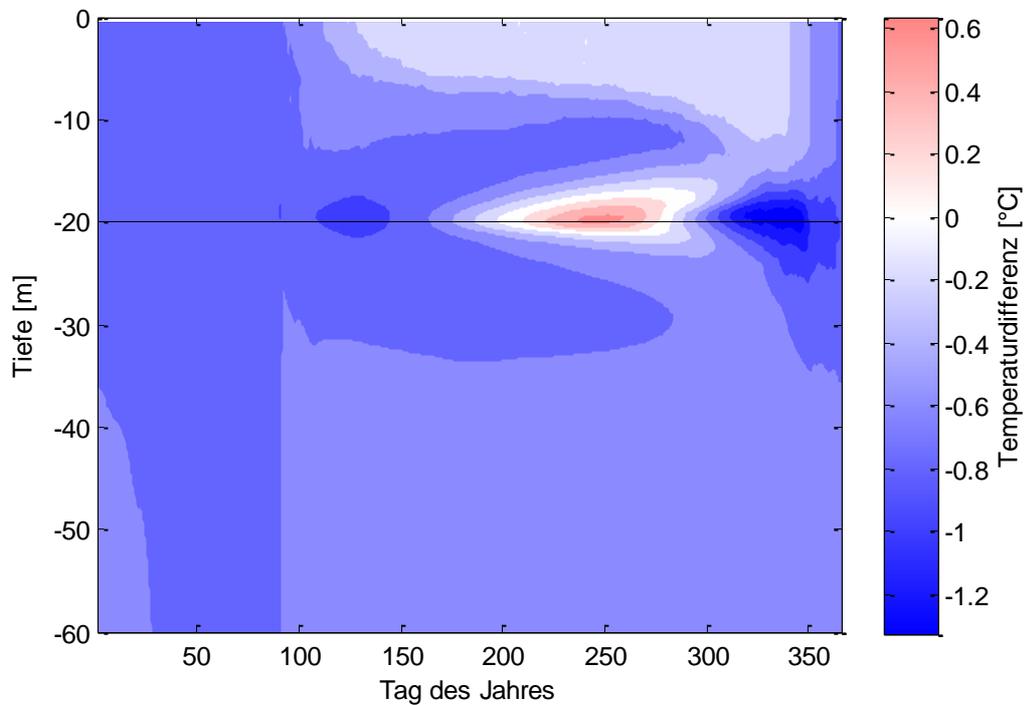


Abbildung 15: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien C2 (200 GWh a^{-1} Wärmeeintrag und 500 GWh a^{-1} Wärmeentnahme) und C1 (Klima 2060 ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

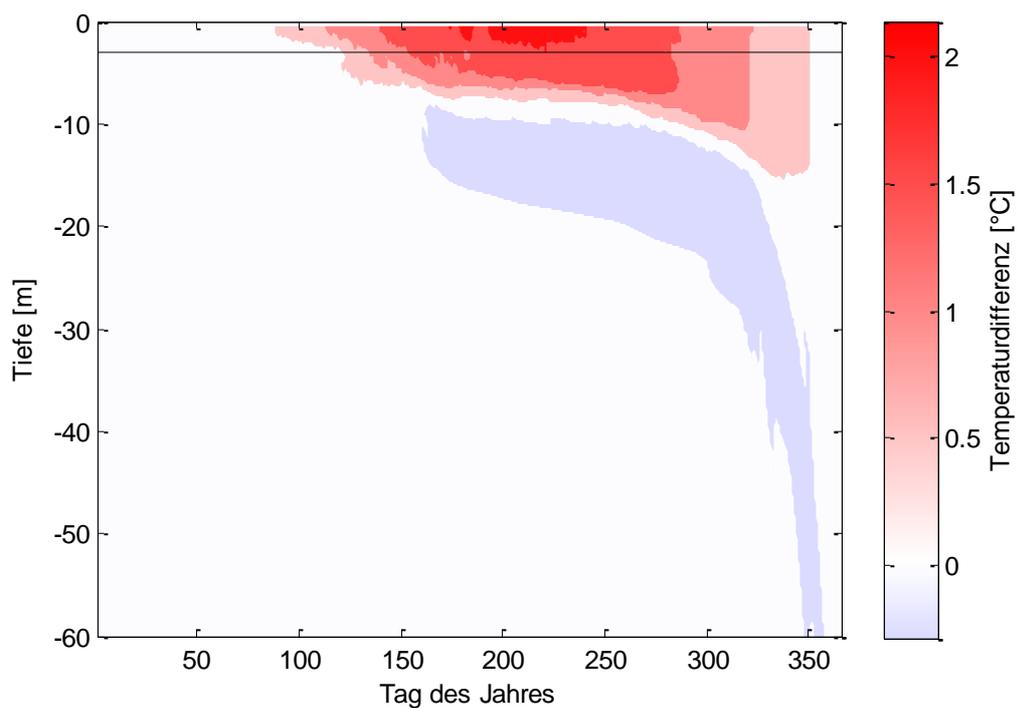


Abbildung 16: Differenz der simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Ägerisees zwischen den Szenarien C3 (1000 GWh a^{-1} Wärmeentnahme in 3 m Tiefe im Klima 2060) und B (heutiges Klima ohne Nutzung), Mittelwert über 9 Jahre.

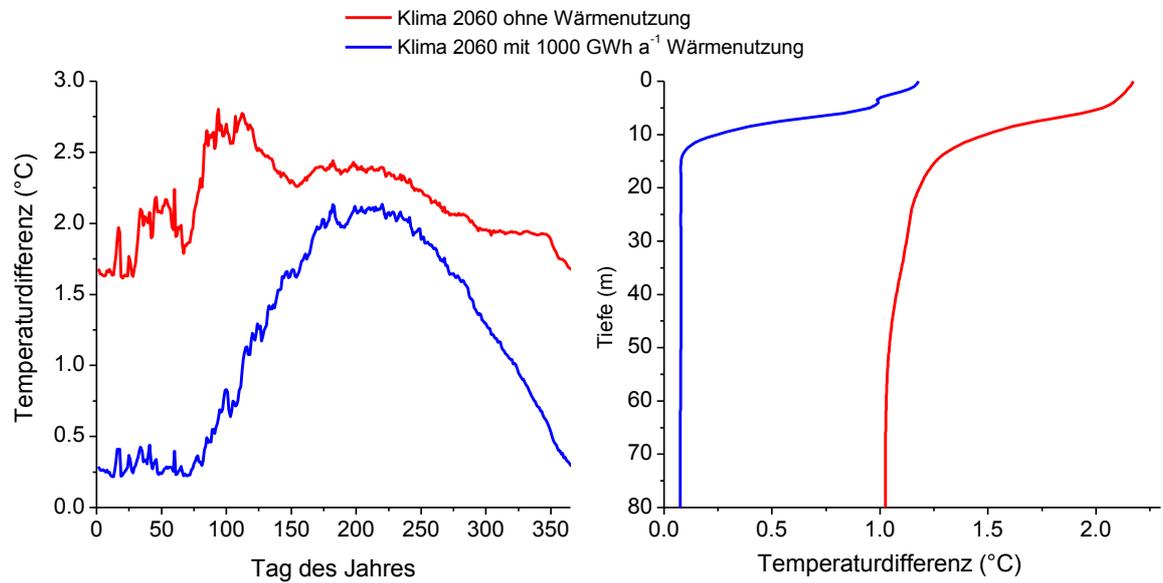


Abbildung 17: Temperaturdifferenz zwischen den Szenarien C1 (rot), beziehungsweise C3 (blau), und B (heutiges Klima) an der Oberfläche im Verlauf des Jahres (links) und als Funktion der Tiefe im Jahresmittel (rechts), Mittelwert über 9 Jahre.

4. Diskussion

4.1. Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Bedingungen für die Einleitung von Kühlwasser in Seen sind in der Gewässerschutzverordnung geregelt. Der relevante Artikel 13, Absatz 2, im Anhang 2, lautet:

Für Seen gilt ausserdem:

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

Im Gegensatz zum Grundwasser und zu den Fliessgewässern gibt es für Seen keine gesetzlich definierte maximal erlaubte Temperaturveränderung. In einem Bericht der Eawag (Eawag, 1981) wurde dies so interpretiert, dass die Temperaturen in Seen nie und nirgends um mehr als 1 °C verändert werden sollten. Für diesen Richtwert gibt es allerdings keine fundierte wissenschaftliche Grundlage. Diese müsste grundsätzlich von Fall zu Fall aufgrund der vorhandenen Lebensgemeinschaften und deren Temperaturpräferenzen bestimmt werden.

Im Vergleich zu Fliessgewässern sind die Auswirkungen von Temperaturänderungen in Seen deutlich schwieriger zu beurteilen. Einerseits können Temperaturänderungen in Seen neben der direkten Beeinflussung der Lebewesen auch die Mischungsprozesse beeinflussen und beispielsweise die Dauer der Schichtung oder die Intensität der Tiefenmischung verändern. Dadurch können sich sekundäre Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften ergeben. Andererseits bestehen in Seen während des Sommers starke vertikale Temperaturgradienten, so dass beispielsweise Fische einer Temperaturerhöhung in einer Schicht ausweichen können. Zudem ändern sich durch interne Schwingungen der Wasserschichten im Bereich der Sprungschicht die Temperaturen oft um mehrere °C über Zeiträume von Stunden und Tagen, sodass die Seefische natürlicherweise mit grossen Temperaturvariationen umgehen können.

4.2. Ökologische Auswirkungen der Temperaturveränderungen

Für die Beurteilung des gesamten Potenzials des Ägerisees für die Wärmenutzung bräuchte es zunächst eine Abschätzung, bei welchen Temperaturänderungen für die Lebensgemeinschaften im See negative Auswirkungen zu erwarten sind. Die vorhandenen Grundlagen sind aber nicht genügend, um in dieser Beziehung eine quantitativ exakte Aussage zu machen. Zumindest die Grössenordnung kann, analog zu den Erwägungen im Bericht zum Zugersee (Schmid und Drosner, 2014) aufgrund folgender Erwägungen abgeschätzt werden:

- a) Temperaturänderungen von bis zu etwa einem halben Grad in limitierten Tiefenbereichen zwischen der Oberfläche und der unteren Sprungschicht und bis zu etwa einem Zehntel Grad für den ganzen See haben mit grosser Wahrscheinlichkeit keinen wesentlichen negativen Einfluss auf

die Lebensgemeinschaften, da diese Änderungen deutlich kleiner sind als die natürlichen Temperaturvariationen im See.

- b) Temperaturänderungen von mehreren Grad in limitierten Tiefenbereichen haben ziemlich sicher negative Auswirkungen zumindest auf einen Teil der in den entsprechenden Tiefen lebenden Organismen.
- c) Bei Temperaturänderungen von mehr als etwa einem halben Grad über die ganze Seetiefe müssen signifikante Auswirkungen auf die Mischungsprozesse im See, insbesondere auf die Tiefenmischung im Winter und die Dauer der Schichtung im Sommer erwartet werden. Entsprechend sind auch Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften im See zu erwarten.
- d) Bei Temperaturänderungen, welche zwischen den Bereichen a) einerseits und b) oder c) andererseits liegen, sind die möglichen Folgen für die Lebensgemeinschaften einerseits schwierig abzuschätzen und andererseits wohl auch im Rahmen eines Monitoring-Programms schwierig von der natürlichen Variabilität oder den Auswirkungen des Klimawandels abzugrenzen.

4.3. Einfluss des Klimawandels

Die Temperaturänderungen aufgrund der Wärmenutzung werden zusätzlich überlagert von den Auswirkungen des Klimawandels, welcher ebenfalls durch die Menschheit verursacht ist. Aufgrund der gesetzlichen Grundlagen ist nicht eindeutig zu beurteilen, ob als Referenzzustand für die Auswirkungen der Wärmenutzung der Zustand des Sees im natürlichen Klima ohne die vom Menschen verursachte Klimaerwärmung oder der Zustand des Sees mit der Klimaerwärmung zu betrachten ist. In einem Expertenbericht zum Modul Temperatur im Rahmen des Modul-Stufen-Konzepts für Fließgewässer wird aber ein dynamischer Referenzzustand empfohlen, welcher die klimabedingte Erwärmung mit einschliesst, weil das Klima durch die lokalen Akteure nicht beeinflusst werden kann (Ernst Basler + Partner AG, 2011).

Dabei ist es allerdings wichtig, auch den zeitliche Verlauf der Veränderungen zu beachten. Nicht nur die Höhe der zukünftigen Erwärmung ist für Ökosysteme relevant, sondern auch die Geschwindigkeit, mit welcher diese erreicht wird, da die Ökosysteme eine gewisse Zeit benötigen, um sich an einen neuen Zustand anzupassen. Bei tiefen Seen führt die Klimaerwärmung zudem zu einer schnelleren Erwärmung in der Oberflächenschicht als im Tiefenwasser und entsprechend zu einer Veränderung der Dichteschichtung. So zeigten Matzinger et al. (2007) am Beispiel des Ohrid-Sees, dass es in erster Linie von der Geschwindigkeit der Klimaerwärmung abhängt, ob das Tiefenwasser des Sees in Zukunft noch genügend mit Sauerstoff versorgt werden kann. Eine Nutzung des Ägerisees als Kältequelle im Sommer würde die Geschwindigkeit der Erwärmung des Sees weiter erhöhen und damit dem Ökosystem die Anpassung an den Klimawandel erschweren. Entsprechend ist ein Wärmeeintrag in den See auf jeden Fall kritischer zu beurteilen als eine Wärmeentnahme.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass eine Abkühlung des Sees durch Wärmeentnahme in einem beschränkten Mass helfen könnte, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Temperaturen im See zu mildern. Allerdings könnten gewisse Auswirkungen der Klimaerwärmung, wie die Erhöhung

der saisonalen Temperaturunterschiede im Oberflächenwasser, durch die Wärmenutzung auch verstärkt werden.

4.4. Auswirkungen auf die Nährstoffflüsse

Im Gegensatz zum Zugersee nimmt im Ägerisee der Phosphorgehalt auch während der geschichteten Periode im Sommer mit der Tiefe nicht zu. Aus diesem Grund führt eine Rückleitung des Wassers oberhalb der Entnahmestelle auch nicht zu einem zusätzlichen Phosphorfluss in die Oberflächenschicht. Hingegen nimmt der Nitratgehalt in der Wassersäule während der geschichteten Periode im Sommer mit der Tiefe zu (**Abbildung 18**). Die beobachteten Konzentrationen in der Oberflächenschicht deuten darauf hin, dass Nitrat für das Algenwachstum im Ägerisee kaum limitierend ist. Allenfalls könnte ein zusätzlicher Eintrag von Nitrat aus dem Tiefenwasser in die Oberflächenschicht zu einer gewissen Verschiebung der Algenzusammensetzung führen, wenn sich das Verhältnis von verfügbarem Stickstoff zu Phosphor noch weiter erhöht.

Insgesamt ist aber eine Rückleitung von genutztem Seewasser in die Oberflächenschicht oder die Sprungschicht im Falle des Ägerisees deutlich weniger kritisch als beim Zugersee und könnte in geringem Ausmass durchaus in Betracht gezogen werden. Eine Umschichtung von grösseren Wassermengen ist aber auch hier nicht zu empfehlen, weil dadurch die Temperaturschichtung entsprechend verändert wurde.

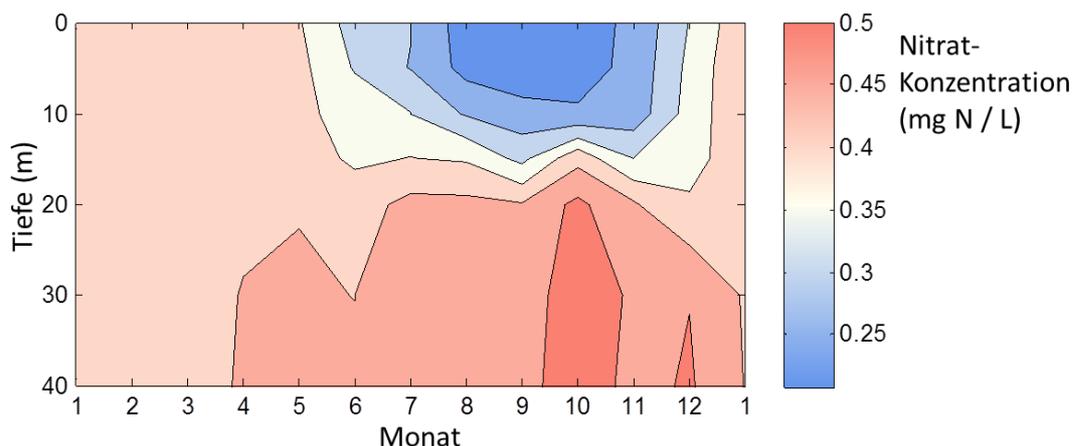


Abbildung 18: Saisonaler Verlauf der Nitrat-Konzentrationen in den obersten 40 m des Ägerisees, Mittelwert der vom Amt für Umweltschutz des Kantons Zug gemessenen Profile über die Jahre 1990 bis 2013.

4.5. Abschätzung des Potenzials für die Wärmenutzung

Aufgrund der oben genannten Erwägungen und der Resultate der Simulationen kann das Potenzial des Ägerisees für die Wärmenutzung grob abgeschätzt werden:

Bei einer Wasserentnahme und –einleitung unterhalb der Sprungschicht, wie dies bei Wärmenutzungen oft üblich ist, führt eine Wärmeentnahme bis etwa 100 GWh a^{-1} oder eine Wärmeeinleitung bis etwa 30 GWh a^{-1} zu Temperaturänderungen von maximal einigen Zehntel Grad in beschränkten Tiefenbereichen. Diese Temperaturveränderungen sind für die Lebensgemeinschaften im See unbedenklich. Wärmeentnahmen bis insgesamt 100 GWh a^{-1} und Wärmeeinleitungen bis insgesamt 30 GWh a^{-1} bedürfen deshalb, abgesehen von möglichen lokalen Einflüssen bei wertvollen Standorten im Bereich der Einleitung oder Entnahme, keiner weiteren gewässerökologischen Abklärung. Eine Wärmeentnahme im Bereich von 200 bis 500 GWh a^{-1} und eine Einleitung im Bereich von 100 bis 200 GWh a^{-1} ist wahrscheinlich möglich, insbesondere wenn die Wärmeentnahme auf einen grösseren Tiefenbereich verteilt wird, oder wenn die beiden Nutzungen sich teilweise zeitlich überschneiden und entsprechend gegensätzlich wirken. Idealerweise werden gleichzeitige Wärme- und Kältenutzung über die gleiche Seewasserefassung betrieben, um den Einfluss der Nutzung auf den See möglichst gering zu halten. Eine Nutzung in dieser Grössenordnung bedarf aber auf jeden Fall einer vertieften Abklärung.

Bezüglich der Auswirkungen der Klimaerwärmung auf das Wärmenutzungspotenzial ist eine klare Aussage nicht möglich, da keine eindeutige gesetzliche Grundlage besteht. Würde als natürlicher Referenzzustand der Zustand ohne Klimaerwärmung betrachtet, dann wäre jegliche Wärmeeinleitung ausgeschlossen, da voraussichtlich in wenigen Jahrzehnten die Klimaerwärmung alleine die natürlichen Temperaturverhältnisse zumindest für gewisse Organismen nachteilig verändert haben wird. Entsprechend wäre die erlaubte Erwärmung auch ohne Wärmenutzung bereits deutlich überschritten.

Langfristig erscheint es jedoch wenig sinnvoll, an einem vergangenen Klima als Referenzzustand festzuhalten. Es ist deshalb wahrscheinlich, dass ein dynamischer Referenzzustand verwendet werden, welcher die Klimaerwärmung mit einschliesst. So betrachtet hat die Klimaerwärmung nur geringe Auswirkungen auf das Wärmenutzungspotenzial, weil die Temperaturveränderungen durch die Wärmenutzung im heutigen und im künftigen Klima sehr ähnlich sind. Trotzdem ist auch in diesem Fall eine weitere zusätzliche Erwärmung des Sees kritischer zu beurteilen als eine Abkühlung, insbesondere in der aktuellen Übergangsphase zwischen dem heutigen und einem zukünftigen Klima. Denn die Ökosystem benötigen für die Anpassung an das neue Klima Zeit, und durch die zusätzliche Wärmenutzung würde die Geschwindigkeit der Veränderung erhöht und damit die verfügbare Zeit für die Anpassung kürzer.

Schliesslich stellt sich die Frage, ob die Auswirkungen der Klimaerwärmung durch eine Wärmeentnahme aus dem See gemildert werden könnte. Die Simulationen zeigen, dass dies aufgrund der saisonalen Lastverteilung wohl in den Wintermonaten mit einer Wärmeentnahme von etwa 1 TWh a^{-1} wohl möglich wäre. Die Auswirkungen einer derart hohen Wärmeentnahme sind allerdings saisonal unterschiedlich und führen im Sommer teilweise auch zu einer Verstärkung des Klimaeffekts. Es wären deshalb auf jeden Fall vertiefte Abklärungen nötig, um abzuschätzen, ob eine Wärmeentnahme als Massnahme gegen die Auswirkungen der Klimaerwärmung sinnvoll ist.

Referenzen

CH2011 (2011). Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7

Eawag (1981). Wärmepumpen an Oberflächengewässern, Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, 19.

Ernst Basler + Partner AG (2011). Expertenbericht zu einem Modul Temperatur im Rahmen des Modul-Stufen-Konzepts. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (Bafu).

Fink G, Schmid M, Wüest A (2014). Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat – capacities and limits, Water Resources Research, eingereicht.

IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp

Matzinger A, Schmid M, Veljanoska-Sarafiloska E, Patceva S, Guseska D, Wagner B, Müller B, Sturm M, Wüest A (2007). Eutrophication of ancient Lake Ohrid - global warming amplifies detrimental effects of increased nutrient inputs, Limnology and Oceanography 52: 338-353.

Schmid M. und Droser L. (2014). Energieverbund Zug Machbarkeitsstudie – Technischer Bericht Seewasser. Bericht im Auftrag der Stadt und des Kantons Zug, Eawag, Kastanienbaum.