
Energieverbund Zug Machbarkeitsstudie

Technischer Bericht Seewasser

Auftraggeber:

Stadt Zug
Kanton Zug

Bearbeitung:

Berichtverfassung: Martin Schmid, Eawag
Simulationen: Martin Schmid und Luca Drosner, Eawag

Erstelldatum:

17.04.2014

Revidiert:

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Tabellenverzeichnis | 4 |
| 1. Zusammenfassung | 5 |
| 2. Einleitung | 6 |
| 2.1 Ziel und Zweck | 6 |
| 2.2 Grundlagen | 6 |
| 2.3 Abkürzungen | 7 |
| 2.4 Freigabe und Aktualisierung | 7 |
| 3. Auswirkungen der Wärmenutzung auf den Zugersee | 8 |
| 3.1 Ausgangslage | 8 |
| 3.1.1 Fragestellung | 8 |
| 3.1.2 Saisonale Schichtung im Zugersee | 8 |
| 3.1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen | 9 |
| 3.1.4 Frühere Arbeiten | 10 |
| 3.2 Methoden | 10 |
| 3.2.1 Modellbeschreibung | 10 |
| 3.2.2 Modellkalibration | 11 |
| 3.2.3 Szenarien | 15 |
| 3.3 Ergebnisse Seemodell | 17 |
| 3.3.1 Basisszenarien | 17 |
| 3.3.2 Geplante Nutzungsszenarien | 19 |
| 3.3.3 Szenarien einschliesslich Grundwassernutzung | 24 |
| 3.3.4 Sensitivitätsanalysen | 26 |
| 3.3.5 Szenarien zur Abschätzung des gesamten Potenzials | 31 |
| 3.4 Abschätzung der Temperaturveränderungen in der Zugerbucht | 35 |
| 3.5 Diskussion und Schlussfolgerungen | 36 |
| 3.5.1 Auswirkungen auf die Temperaturen im ganzen Zugersee | 36 |
| 3.5.2 Auswirkungen auf die Temperaturen in der Zugerbucht | 36 |
| 3.5.3 Auswirkungen auf die Nährstoffe im Zugersee | 36 |
| 3.5.4 Potenzial des Zugersees für die Wärmenutzung | 37 |
| 3.5.5 Auswirkungen auf die mögliche Wärmenutzung in anderen Gemeinden | 38 |
| 4. Referenzdokumente | 39 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Saisonale Schichtung in den obersten 40 Metern des Zugersees. Die blaue Linie zeigt jeweils die durchschnittliche Wassertemperatur für jeden Monat, der hellblaue Bereich umfasst die ganze in den Jahren 2003 bis 2013 beobachtete Spannbreite. Die orangen Balken markieren die Lage der Sprungschicht. Als Datengrundlage wurden die vom Amt für Umweltschutz des Kantons Zug von November 2003 bis August 2013 monatlich gemessenen Temperaturprofile verwendet..... | 8 |
| Abbildung 2: Saisonaler Verlauf der Phosphat-Konzentrationen in den obersten 40 m des Zugersees, Mittelwert der vom Amt für Umweltschutz des Kantons Zug gemessenen Profile über die Jahre 1995 bis 2013. | 9 |
| Abbildung 1: Simulierte (Linie) und beobachtete (Kreise) Temperatur in 1 m Tiefe..... | 12 |
| Abbildung 2: Simulierte (Linie) und beobachtete (Kreise) Temperatur in 15 m Tiefe..... | 12 |
| Abbildung 3: Simulierte (Linie) und beobachtete (Kreise) Temperatur in 30 m Tiefe..... | 13 |
| Abbildung 4: Simulierte (Linie) und beobachtete (Kreise) Temperatur in 80 m Tiefe..... | 13 |
| Abbildung 5: Simulierte (Linie) und beobachtete (Kreise) Temperatur in 180 m Tiefe..... | 13 |
| Abbildung 6: Simulierter (Linie) und beobachteter (Kreise) Salzgehalt in 1 m Tiefe. | 13 |
| Abbildung 7: Simulierter (Linie) und beobachteter (Kreise) Salzgehalt in 15 m Tiefe. | 14 |
| Abbildung 8: Simulierter (Linie) und beobachteter (Kreise) Salzgehalt in 30 m Tiefe. | 14 |
| Abbildung 9: Simulierter (Linie) und beobachteter (Kreise) Salzgehalt in 80 m Tiefe. | 14 |
| Abbildung 10: Simulierter (Linie) und beobachteter (Kreise) Salzgehalt in 180 m Tiefe. | 14 |
| Abbildung 11: Simulierte Temperatur im Jahresverlauf in den obersten 60 m des Zugersees, Mittelwert über 9 Jahre. | 17 |
| Abbildung 12: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien B2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre..... | 18 |
| Abbildung 13: Differenzen der Lufttemperatur und der Temperatur der Wasseroberfläche des Zugersees zwischen den Szenarien B2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre..... | 19 |
| Abbildung 14: Monatliche Lastprofile für die Wärmeentnahme (oben) und die Wärmeeinleitung (unten) in den Zugersee in den Szenarien N1 bis N4 nach Angaben der Hans Abicht AG. | 19 |
| Abbildung 15: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien N1 und B1, Mittelwert über 9 Jahre. Die horizontale Linie markiert die Tiefe der Wassereinleitung in 22 m Tiefe. | 20 |
| Abbildung 16: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien N2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre. | 21 |
| Abbildung 17: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien N3 und B1, Mittelwert über 9 Jahre. | 22 |
| Abbildung 18: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien N4 und B1, Mittelwert über 9 Jahre. | 23 |
| Abbildung 19: Monatliche Lastprofile für die Wärmeentnahme (oben) und die Wärmeeinleitung (unten) in den Zugersee in den Szenarien G1 und G2 nach Angaben der Hans Abicht AG..... | 24 |
| Abbildung 20: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien G1 und B1, Mittelwert über 9 Jahre. | 24 |
| Abbildung 21: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien G2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre. | 25 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 22: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien S1 und B1, Mittelwert über 9 Jahre..... | 26 |
| Abbildung 23: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien S2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre..... | 27 |
| Abbildung 24: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Nordbeckens des Zugersees zwischen den Szenarien S3 und B1, Mittelwert über 9 Jahre. | 28 |
| Abbildung 25: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien S4 und B1, Mittelwert über 9 Jahre. Die horizontalen Linien zeigen hier die Tiefen der Wärmeeinleitung (17 m) und der Wärmeentnahme (22 m). | 29 |
| Abbildung 26: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien S5 und B2, Mittelwert über 9 Jahre..... | 30 |
| Abbildung 27: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien P1 und B1, Mittelwert über 9 Jahre..... | 31 |
| Abbildung 28: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien P2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre..... | 32 |
| Abbildung 29: Simulierte Temperatur in 150 m Tiefe über 9 Jahre im Zugersee für die Szenarien B1 und P2. | 32 |
| Abbildung 30: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien S5 und B1, Mittelwert über 9 Jahre..... | 33 |
| Abbildung 31: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien P4 und B1, Mittelwert über 9 Jahre..... | 34 |
| Abbildung 32: Simulierte Temperatur in 150 m Tiefe über 9 Jahre im Zugersee für die Szenarien B1 und P4. | 35 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Zusätzliche Grundlagen | 6 |
| Tabelle 2: Abkürzungen..... | 7 |
| Tabelle 3: Mit dem Seemodell berechnete Szenarien und entsprechende Wärmeinträge und Wärmeentnahmen..... | 16 |
| Tabelle 4: Referenzen | 39 |

1. Zusammenfassung

In diesem Bericht werden die Auswirkungen der vom Energieverbund Zug geplanten Wärmenutzung auf die Temperaturen und die Schichtung im Zugersee abgeschätzt und im Kontext der Richtlinien der Gewässerschutzverordnung beurteilt. Diese verlangt insbesondere, dass die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen für die Organismen im See nicht nachteilig beeinflusst werden dürfen. Zudem wird das gesamte Potenzial des Sees für die Wärmenutzung abgeschätzt.

Die Auswirkungen auf den ganzen See wurden zu diesem Zweck mit einem eindimensionalen physikalischen Seemodell für verschiedene Nutzungsszenarien berechnet. Die lokalen Auswirkungen auf die Zugerbucht wurden mit einer Wärmebilanzrechnung abgeschätzt.

Die Berechnungen zeigen, dass das Potenzial der Wärmenutzung um ein Mehrfaches über der im Rahmen des Energieverbundes Zug geplanten Nutzung liegt. Die berechnete Abkühlung beträgt für das maximale Szenario der Wärmenutzung in einem beschränkten Tiefenbereich von wenigen Metern einige Hundertstel Grad. Entsprechend ist mit keinen negativen Auswirkungen zu rechnen. Eine zusätzliche Wärmenutzung in der gleichen Grössenordnung in anderen Gemeinden wäre problemlos möglich. Aufgrund der erwarteten deutlichen Erwärmung des ganzen Sees kann die aktuell geplante Wärmenutzung, bei welcher der See insgesamt leicht abgekühlt wird, als positiver Beitrag zur Dämpfung der Auswirkungen des Klimawandels auf den See betrachtet werden.

Für die Abschätzung der lokalen Auswirkungen in der Zugerbucht ist in erster Linie die maximale Wärmelast an einzelnen heissen Sommertagen entscheidend. Über längere Zeiträume wird das Wasser in der Bucht mit dem offenen See ausgetauscht. Nach den Abschätzungen in diesem Bericht sollte eine Wärmelast von rund 50 MW zu einer mittleren Erwärmung in einer 2 m dicken Schicht von rund 0.17 °C führen, vermutlich allerdings mit starken lokalen Unterschieden. Sollte in Zukunft eine Nutzung des Sees zu Kühlzwecken in dieser Grössenordnung in Betracht gezogen werden, dann ist zu empfehlen, die lokalen Auswirkungen zunächst bei geringerer Wärmelast auszumessen, oder falls dies nicht möglich ist, die Ausbreitung einer lokalen Einleitung in die Bucht mittels Tracerversuchen vorgängig zu untersuchen.

Für die geplanten Nutzungsszenarien ist kein signifikanter Einfluss auf die Phosphorflüsse und damit auf die Produktivität im See zu erwarten. Sollte aber eine Nutzung in Betracht gezogen werden, bei welcher der Eintrag von erwärmtem Wasser die aktuell geplanten Mengen deutlich überschreitet, dann wäre eine Tieferlegung der Rückleitung in Betracht zu ziehen, um eine Zunahme der Primärproduktion im unteren Bereich der Sprungschicht zu verhindern.

2. Einleitung

2.1 Ziel und Zweck

Dieses Dokument beschreibt die erwarteten Auswirkungen der vom Energieverbund Zug geplanten Wärmeinleitungen und Wärmeentnahmen auf die Temperaturen und die Schichtung im Zugersee.

2.2 Grundlagen

Die verwendeten Grundlagen sind im Projekthandbuch [1] und im Übergeordneten Bericht [2] beschrieben. Zusätzlich verwendete Grundlagen sind:

| Dokument | Version |
|--|------------|
| Monitoringdaten des Amtes für Umwelt des Kantons Zug (Temperaturen, Leitfähigkeit, Phosphorkonzentrationen und Secchi-Tiefen im Zugersee) | |
| Bathymetrie des Nordbeckens des Zugersees vom Amt für Umwelt des Kantons Zug | 06.01.2014 |
| Ribi B, Bühler H, Ambühl H. Hypsographische Daten von Seen Bathymetrie des Zugersees, Flächen aus der Landeskarte, Planimetrie: Beck | Stand 2005 |
| Wetterbeobachtungen von MeteoSchweiz vom 01.4.2004 bis 31.03.2013 Station Cham: Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit und Windrichtung (Stundenmittel) Stationen Luzern und Wädenswil: Globalstrahlung (Stundenmittel) Station Zürich Fluntern: Gesamtbewölkung (Tagesmittel) | 05.11.2013 |
| Energie- und Leistungsdefinition | 10.12.2013 |
| Lastprofile Seewasser monatlich | 13.01.2014 |

Tabelle 1: Zusätzliche Grundlagen

2.3 Abkürzungen

Die verwendeten Abkürzungen sind im Projekthandbuch [1] beschrieben. Zusätzliche in diesem Dokument verwendete Abkürzungen sind in der folgenden Tabelle beschrieben.

| Abkürzung | Bedeutung |
|---------------|---|
| A_B | Fläche der Zugerbucht (3'000'000 m ²) |
| c_P | Wärmekapazität von Wasser (4'200 J/kg/°C) |
| d | Schichtdicke [m] |
| Q_H | Wärmeeintrag [W] |
| S | Salzgehalt [g/kg] |
| ST | Secchi-Tiefe [m] |
| t_A | Austauschzeit [s] |
| κ_{25} | Leitfähigkeit bei 25 °C [μ S/cm] |
| λ | Lichtattenuation [m^{-1}] |
| ρ | Dichte von Wasser (1000 kg/m ³) |

Tabelle 2: Abkürzungen

2.4 Freigabe und Aktualisierung

Für den Inhalt und die Aktualisierung ist die Arbeitsgruppe verantwortlich. Die Freigabe von Aktualisierungen erfolgt durch die Gesamtleitung.

3. Auswirkungen der Wärmenutzung auf den Zugersee

3.1 Ausgangslage

3.1.1 Fragestellung

In diesem Bericht werden folgende Fragestellungen bearbeitet:

- Wie wirkt sich die vom Energieverbund Zug geplante Wärmenutzung auf die Temperaturverhältnisse im Zugersee aus?
- Sind aufgrund dieser Veränderungen negative Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften im Zugersee zu erwarten?
- Wie gross ist in etwa das Potenzial des ganzen Zugersees für Wärmenutzungen?

3.1.2 Saisonale Schichtung im Zugersee

Die Dichteschichtung in den obersten 50 Metern des Zugersees ist zum grössten Teil durch die Temperatur bestimmt. Abbildung 1 zeigt die im Zugersee beobachteten Temperaturen für jeden Monat des Jahres.

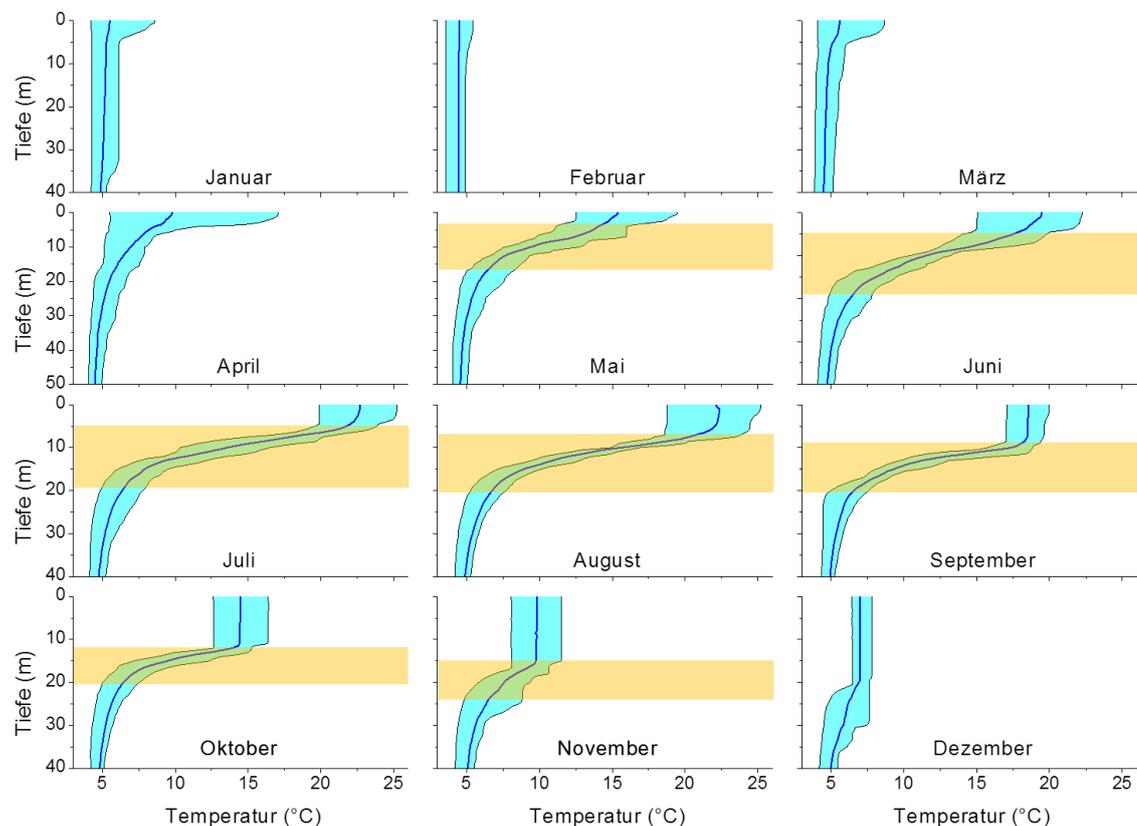


Abbildung 1: Saisonale Schichtung in den obersten 40 Metern des Zugersees. Die blaue Linie zeigt jeweils die durchschnittliche Wassertemperatur für jeden Monat, der hellblaue Bereich umfasst die ganze in den Jahren 2003 bis 2013 beobachtete Spannweite. Die orangenen Balken markieren die Lage der Sprungschicht. Als Datengrundlage wurden die vom Amt für Umweltschutz des Kantons Zug von November 2003 bis August 2013 monatlich gemessenen Temperaturprofile verwendet.

In den Monaten Januar bis März wird der See bis in grössere Tiefen durchmischt, wobei die Mischung im Zugersee nicht ganz vollständig ist. Im April beginnt sich allmählich die sommerliche Dichteschichtung auszubilden. Diese ist gekennzeichnet dadurch, dass sich drei Schichten ausbilden:

- Die Oberflächenschicht (Epilimnion) wird üblicherweise in jeder Nacht aufgrund der Abkühlung weitgehend durchmischt. Sie hat im Sommer eine Dicke von etwa 5 Metern und weitet sich im Herbst zunehmend nach unten aus. Tagsüber bildet sich innerhalb der Oberflächenschicht meist eine eigene Temperaturschichtung aus.
- Die Sprungschicht (Metalimnion) zeichnet sich dadurch aus, dass die Temperatur mit der Tiefe stark abnimmt, und die Dichte entsprechend zunimmt. Aufgrund der Dichteschichtung ist der Austausch, zum Beispiel von Nährstoffen, durch die Sprungschicht stark eingeschränkt. Die Sprungschicht liegt im Hochsommer etwa zwischen 5 und 15 m Tiefe und verschiebt sich im Herbst etwas nach unten.
- Das Tiefenwasser (Hypolimnion) unterhalb der Sprungschicht bleibt während des ganzen Jahres kalt mit Temperaturen unter 7 °C.

Das Algenwachstum (Primärproduktion) findet hauptsächlich im Oberflächenwasser und in der Sprungschicht statt und ist durch die Verfügbarkeit von gelöstem Phosphor (Phosphat) begrenzt. Der Phosphat-Gehalt im Oberflächenwasser nimmt entsprechend während des Sommers stark ab (Abbildung 2). Ein zusätzlicher Eintrag von Nährstoffen ins Oberflächenwasser oder in die Sprungschicht würde zu einem verstärkten Algenwachstum führen, und in der Folge zu einer erhöhten Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser. Aus diesem Grund ist es nicht erwünscht, dass durch die Wärme- oder Kältenutzung während des Sommers nährstoffreiches Tiefenwasser in die Sprungschicht oder das Oberflächenwasser eingetragen wird.

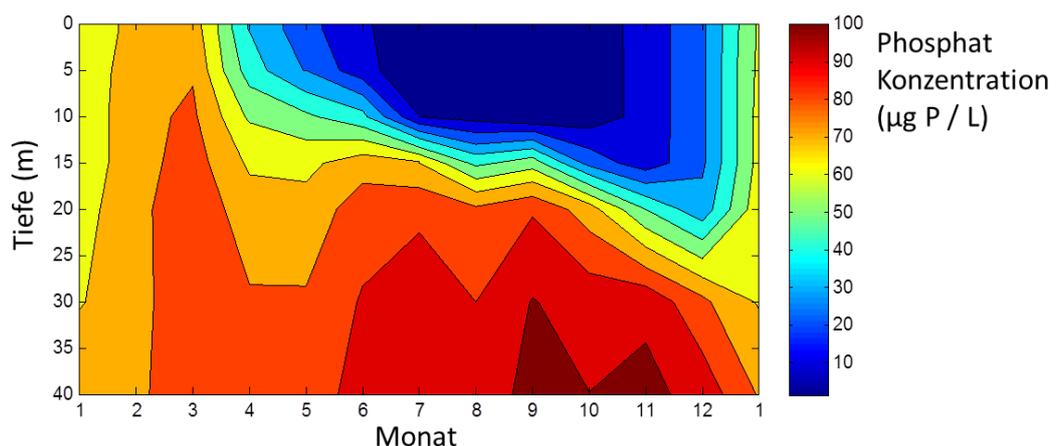


Abbildung 2: Saisonaler Verlauf der Phosphat-Konzentrationen in den obersten 40 m des Zugersees, Mittelwert der vom Amt für Umweltschutz des Kantons Zug gemessenen Profile über die Jahre 1995 bis 2013.

3.1.3 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 von 1981 [3] 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 wissenschaftli-

che 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 im oberen Hypolimnion die Temperaturen oft um mehrere Grade über Zeiträume von Stunden und Tagen, sodass die Seefische natürlicherweise mit grossen Temperaturvariationen umgehen können.

3.1.4 Frühere Arbeiten

Die Eawag hat im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Kantons Zug bereits in zwei früheren Arbeiten die Auswirkungen von Wärmenutzung auf den Zugersee untersucht.

In einem Kurzgutachten wurden im Jahr 2005 die Auswirkungen einer geplanten Wärmenutzung abgeschätzt [4]. Dabei wurde von einem Wärmeentzug von rund 0.6 GWh und einem Wärmeeintrag während der Sommermonate von rund 0.2 GWh ausgegangen. Mit einfachen Wärmebilanzrechnungen konnte festgestellt werden, dass die Folgen dieser Nutzung sowohl für den Zugersee als Ganzes wie auch lokal in der Zugerbucht vernachlässigbar sind.

In einer weiteren Studie wurden im Jahr 2006 die gesamten Auswirkungen der bestehenden Wärmenutzungen im Zugersee evaluiert. Dabei handelte es sich hauptsächlich um Kühlwassernutzungen mit Wärmeeinträgen in den See von rund 7 GWh im Sommer wie auch im Winter, kombiniert mit einer Wärmeentnahme von 1 GWh im Winterhalbjahr. Das Wasser für diese Nutzungen wurde im See in verschiedenen Tiefen zwischen 15 und 33 m entnommen und der grösste Teil des Wassers wurde nach der Nutzung oberflächlich über den Siehbach wieder in den See eingeleitet.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen des Berichtes waren die folgenden:

- Die Temperatur im Siehbach kann unter ungünstigen Bedingungen um mehr als die gesetzlich erlaubten 3 °C verändert werden.
- Die Temperaturänderungen im Zugersee sind vernachlässigbar klein. Da ein Teil des Wassers aus 33 m Tiefe entnommen und in 13 m Tiefe wieder eingeleitet wird, kann es lokal im Uferbereich zu Temperaturänderungen im Bereich von -0.2 bis 0.5 °C kommen.
- Durch den Transfer von Wasser aus dem Hypolimnion in die Oberflächenschicht wird der Eintrag von Phosphor während der produktiven Periode von April bis Oktober um 2 bis 5% erhöht. Für grössere Wärmenutzungen ist es deshalb wichtig, dass sowohl die Wasserentnahme wie auch die Rückleitung unterhalb der Sprungschicht in mindestens 15 m Tiefe stattfinden.
- Das Potenzial des ganzen Zugersees für Wärme- oder Kältenutzung wurde auf ungefähr 100 MW Leistung geschätzt. Dabei ist der Wärmeentzug im Winter weniger kritisch als ein Wärmeeintrag im Sommer.

3.2 Methoden

3.2.1 Modellbeschreibung

Die Temperaturen und die Schichtungsverhältnisse im Zugersee wurden für verschiedene Szenarien mit Hilfe des eindimensionalen Seemodells Simstrat [6] durchgeführt. Das Modell berechnet die vertikale Struktur der Temperatur und der Dichteschichtung im See im Zeitverlauf. Es geht davon aus, dass der See horizontal durchmischt ist. Die horizontale Mischung ist in den meisten Seen aufgrund der vorhandenen Scherströmungen vergleichsweise schnell [7]. So verteilte sich beispielsweise eine Tracerwolke in 60 m Tiefe im Überlingersee innerhalb eines Monats nahezu gleichmässig über die ganze Seefläche [8]. Es kann davon ausgegangen werden, dass die horizontale Durchmischung im Zugersee in etwa in der gleichen Zeitskala abläuft. Fraglich ist lediglich, wie gut die Wassermassen zwischen dem Nord- und dem Südbecken des

Zugersees ausgetauscht werden. Aus diesem Grund wurde in der Sensitivitätsanalyse eine zusätzliche Simulation durchgeführt, bei welcher die Wärmeentnahme lediglich auf die Seefläche des Nordbeckens verteilt wurde, entsprechend der unrealistischen Worst-Case Annahme, dass in Zeitskalen von einigen Monaten gar kein Austausch zwischen den beiden Becken stattfindet. Nach Aquaplan (2004) [9] beträgt die Austauschzeit zwischen den beiden Becken weniger als 30 Tage, und auch aus hydrodynamischer Sicht sollte die Verengung beim Chiemen kein wesentliches Hindernis für den Austausch zwischen den Becken darstellen.

Als Anfangsbedingung für die Simulationen wurde ein vertikales Profil der Temperatur und der Salinität für den 1. April verwendet. Dieses wurde aus den beobachteten Profilen des Amtes für Umweltschutz des Kantons Zug vom 17. März 2004 und vom 27. April 2004 interpoliert. Der Salzgehalt S [g/kg] wurde dabei aus der Leitfähigkeit bei 25 °C, κ_{25} [$\mu\text{S}/\text{cm}$] mit folgender Annäherung berechnet: $S = 0.81 \cdot 10^{-3} \kappa_{25}$. Die Simulationen wurden dann für verschiedene Szenarien der Wärmenutzung (siehe Abschnitt 3.2.3) für den Zeitraum von 9 Jahren vom 1. April 2004 bis zum 31. März 2013 durchgeführt, mit einem Zeitschritt von 300 Sekunden und einer vertikalen Auflösung von 0.5 m. Das Modell wurde mit folgenden Wetterdaten angetrieben:

- Stundenmittel der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung von der Station Cham von MeteoSchweiz.
- Durchschnitt der Stundenmittel der Globalstrahlung der Stationen Luzern und Wädenswil von MeteoSchweiz
- Tagesmittel der Bewölkung der Station Zürich-Fluntern von MeteoSchweiz

Das Modell benötigt zudem eine Angabe zur Lichtabsorption λ [m^{-1}] im Oberflächenwasser. Diese kann aus gemessenen Secchi-Tiefen ST [m] mit der Gleichung $\lambda = 1.7/ST$ abgeschätzt werden. ST ist die Tiefe, in welcher eine weisse Secchi-Scheibe von der Seeoberfläche aus gerade noch sichtbar ist.

Die in den verschiedenen Nutzungsszenarien umgesetzten Wärmemengen sind im Vergleich zur Grösse des Zugersees gering. Wenn das Wasser bei der Nutzung um 3 °C aufgewärmt bzw. abgekühlt wird, dann entspricht eine Wärmeentnahme, bzw. ein Wärmeeintrag von 1 GWh einer Wassermenge von knapp 300'000 m^3 . Verteilt auf die Gesamtfläche des Sees in der Einleitungstiefe von gut 30 km^2 entspricht dies einer Schichtdicke von weniger als 1 cm. Bei den realistischerweise geplanten Nutzungsszenarien sind also die umgesetzten Wassermengen vergleichsweise gering. Zudem sind die Temperaturdifferenzen zwischen der geplanten Entnahmetiefe in 26 m und der Einleitungstiefe in 22 m üblicherweise sehr gering. Es wurde aus diesem Grund zur Vereinfachung der Simulationen darauf verzichtet, bei den Berechnungen explizit den Wasseraustausch zwischen der Entnahme- und der Einleitungstiefe zu simulieren. Stattdessen wurde die der Wärmenutzung entsprechende Wärmemenge in der Einleitungstiefe eingeleitet oder entnommen. Für die realistischen Nutzungsszenarien hat diese Vereinfachung keinen wesentlichen Einfluss, bei den Szenarien für die Abschätzung des Gesamtpotenzial des Sees wird dadurch aber die eingetragene bzw. entnommene Wärme auf ein zu geringes Wasservolumen verteilt und entsprechend die maximale Temperaturänderungen etwas überschätzt (siehe auch Abschnitt 3.3.5.4).

3.2.2 Modellkalibration

Das Modell wurde mit Hilfe der beobachteten Daten der Temperatur und der Leitfähigkeit für die Jahre 2004 bis 2013 des Amtes für Umweltschutz des Kantons Zug kalibriert. In einem ersten Schritt wurde das Modell mit den Standardwerten für alle Parameter und ohne Berücksichtigung des Salzgehaltes im See laufen gelassen. Dies ergab bereits eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den beobachteten Oberflächentemperaturen. Die Dichteschichtung im Zugersee wird allerdings auch durch den Salzgehalt beeinflusst. Während des Sommers fällt in der Oberflächenschicht Calcit aus, welches im Tiefenwasser teilweise wieder aufgelöst wird. Dieser Prozess musste im Modell qualitativ hinzugefügt werden, damit die Tiefenmischung korrekt reproduziert werden konnte. Eine gute Übereinstimmung zwischen beobachtetem und simuliertem Salzgehalt konnte erzielt werden, indem in den Monaten März bis August insgesamt 15 kt Salz aus der Oberflächenschicht entfernt wurden und davon 10 kt im gleichen Zeitraum und die übrigen 5 kt während dem Rest des Jahres im Tiefenwasser unterhalb von 40 m Tiefe wieder zugeführt wurden.

Anschliessend wurden fünf Modellparameter kalibriert, um die beobachteten Temperaturen möglichst gut mit dem Modell vorhersagen zu können. Bei der Kalibrierung wurden die quadra-

tischen Abweichungen zwischen den beobachteten und den simulierten Temperaturen über die ganze Tiefe minimiert. Die besten Parameter wurden mit der „Pattern Fitting“ Methode von Matlab bestimmt. Die kalibrierten Parameter sind (siehe [6] für eine detaillierte Beschreibung des Modells und der Parameter):

- $p_1 = 1.15$. Dieser Parameter skaliert den Wärmeeintrag über langwellige Strahlung in den See.
- $p_2 = 1.10$. Dieser Parameter skaliert den Wärmeverlust durch Verdunstung und über den fühlbaren Wärmefluss aus dem See.
- $C_{10} = 0.00216$. Dieser Parameter bestimmt, wie viel Energie aus dem Wind in die Strömungen eingebracht wird.
- $\alpha = 0.00782$. Dieser Parameter bestimmt, wie viel Energie aus dem Wind in die internen Wellen im See eingetragen wird.
- $q_{NN} = 1.124$. Dieser Parameter bestimmt, wie sich die Energie aus den internen Wellen über die Tiefe verteilt.

Die Werte dieser Parameter sind im üblichen Bereich, wie sie auch bei der Kalibration für andere Seen erzielt wurden.

Die Übereinstimmung zwischen den beobachteten und den simulierten Temperaturen ist grundsätzlich sehr gut, insbesondere in dem Bereich, welcher durch die Wärmenutzung beeinflusst wird. Unterhalb von 100 m überschätzt das Modell die Dynamik der Temperatur. Weil das Modell durch das Wetter an der Oberfläche angetrieben wird und weil die saisonalen Temperaturunterschiede im Tiefenwasser sehr gering sind und von den Wetterbedingungen zur Zeit der Mischung abhängen, ist die Dynamik im Tiefenwasser besonders schwierig zu reproduzieren. Auf die Schlussfolgerungen dieser Studie haben diese Abweichungen aber keinen Einfluss.

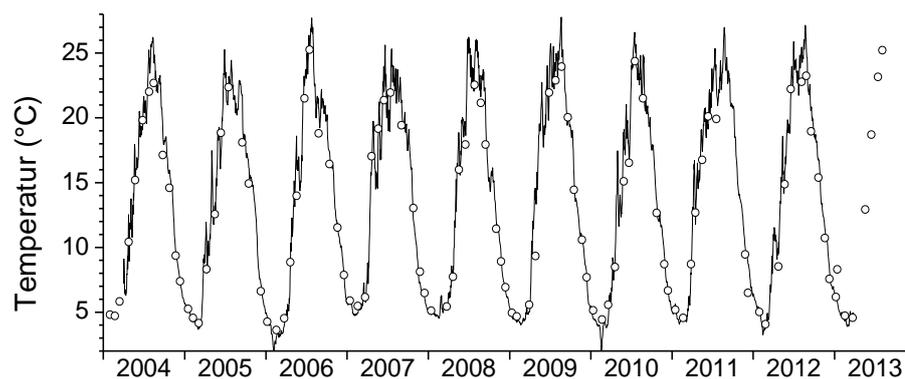


Abbildung 3: Simulierte (Linie) und beobachtete (Kreise) Temperatur in 1 m Tiefe.

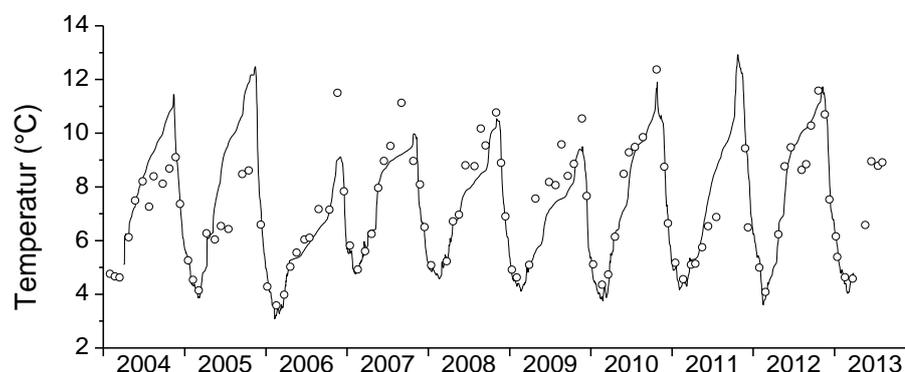


Abbildung 4: Simulierte (Linie) und beobachtete (Kreise) Temperatur in 15 m Tiefe.

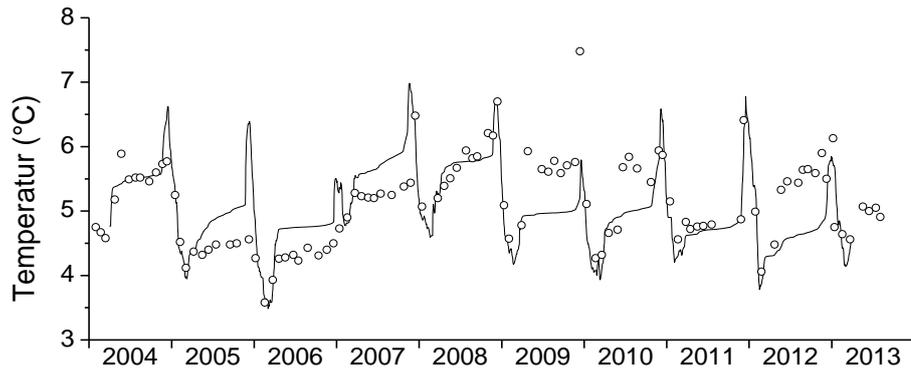


Abbildung 5: Simulierte (Linie) und beobachtete (Kreise) Temperatur in 30 m Tiefe.



Abbildung 6: Simulierte (Linie) und beobachtete (Kreise) Temperatur in 80 m Tiefe.

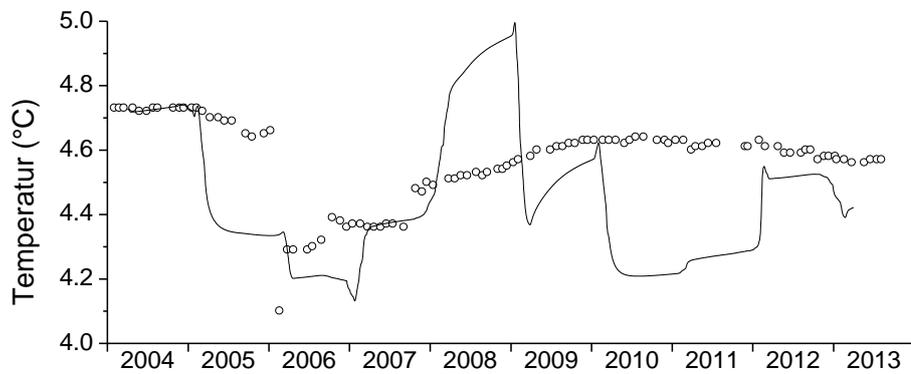


Abbildung 7: Simulierte (Linie) und beobachtete (Kreise) Temperatur in 180 m Tiefe.

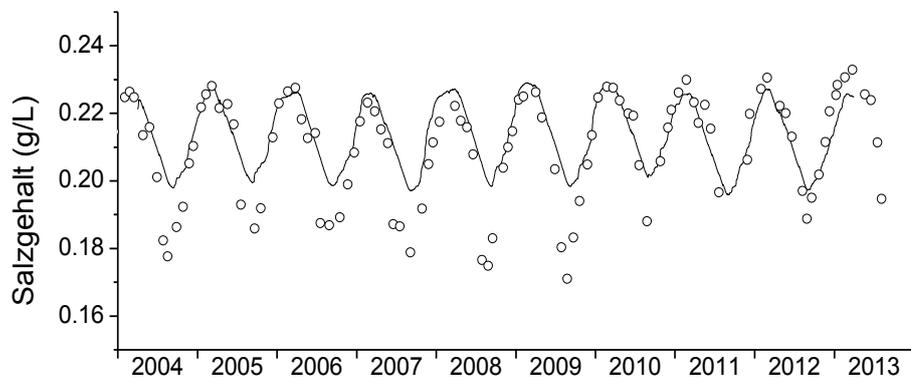


Abbildung 8: Simulierter (Linie) und beobachteter (Kreise) Salzgehalt in 1 m Tiefe.

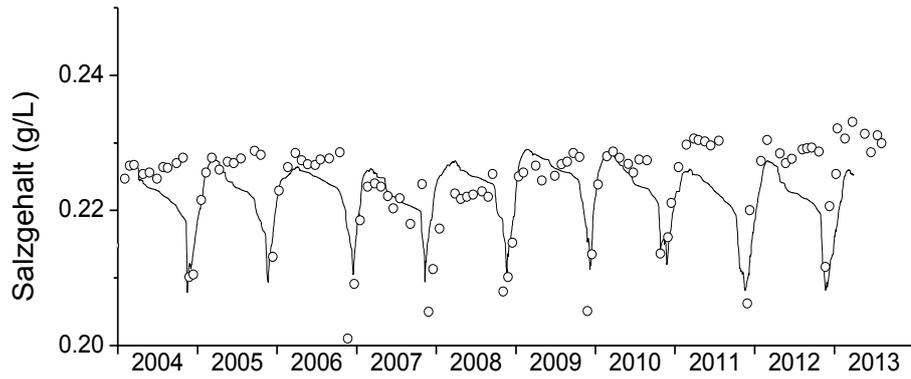


Abbildung 9: Simulierter (Linie) und beobachteter (Kreise) Salzgehalt in 15 m Tiefe.

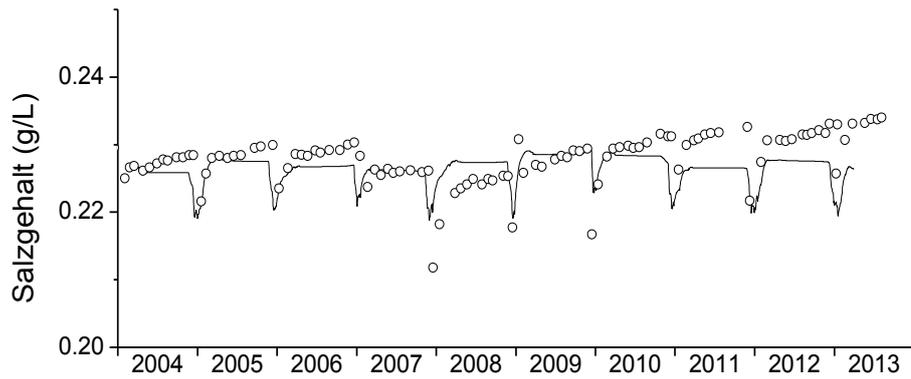


Abbildung 10: Simulierter (Linie) und beobachteter (Kreise) Salzgehalt in 30 m Tiefe.

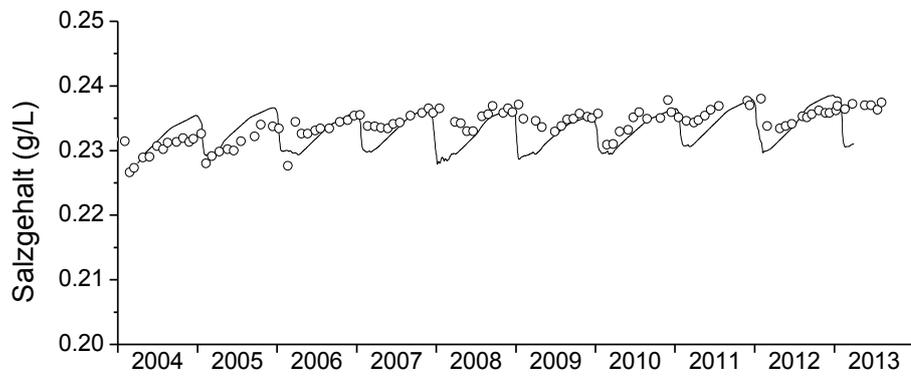


Abbildung 11: Simulierter (Linie) und beobachteter (Kreise) Salzgehalt in 80 m Tiefe.

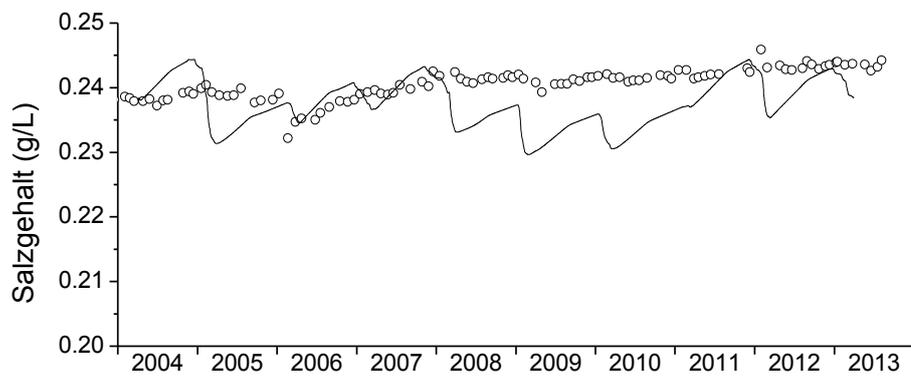


Abbildung 12: Simulierter (Linie) und beobachteter (Kreise) Salzgehalt in 180 m Tiefe.

3.2.3 Szenarien

Die Berechnungen mit dem eindimensionalen Seemodell wurden für die in Tabelle 3 aufgeführten Szenarien durchgeführt. Dabei ist festzuhalten, dass für alle Nutzungsszenarien jeweils das höchste der drei Szenarien verwendet wurde, die von der Hans Abicht AG errechnet und zur Verfügung gestellt wurden. In den folgenden Abschnitten wird für die einzelnen Szenarien jeweils die Differenz der berechneten Temperaturen zwischen den Nutzungsszenarien und dem Szenario B1 ohne Wärmenutzung dargestellt. Dabei bedeuten blaue Farben eine Abkühlung und rote Farben eine Erwärmung im Vergleich zum Referenzzustand. Die Farbskala wurde für die unterschiedlichen Szenarien jeweils auf die Spanne der vorhergesagten Temperaturdifferenzen angepasst, damit die räumliche Struktur der Veränderungen gut sichtbar gemacht werden konnte. Aus diesem Grund entsprechen gleiche Farbtöne jeweils unterschiedlichen Werten.

| Szenario | Wärmeeintrag (GWh) | Wärmeentnahme (GWh) |
|---|--------------------|---------------------|
| Szenarien ohne Nutzung (Basisszenarien) | | |
| B1) keine Wärmenutzung | 0 | 0 |
| B2) Szenario Klima 2060 | 0 | 0 |
| Geplante Nutzungsszenarien | | |
| N1) Etappe 1, 2020, Szenario max. | 0.49 | 9.4 |
| N2) Etappe 1, 2035, Szenario max. | 0.86 | 11.9 |
| N3) Etappe 1, 2050, Szenario max. | 1.45 | 14.2 |
| N4) Alle Etappen, 2050, Szenario max. | 3.47 | 78.3 |
| Szenarien mit vollständiger Nutzung nur aus Seewasser (keine Grundwassernutzung) | | |
| G1) Etappe 1, 2050, Szenario max., nur Seewassernutzung | 13.5 | 25.8 |
| G2) Alle Etappen, 2050, Szenario max., nur Seewassernutzung | 32.4 | 113.6 |
| Sensitivitätsanalysen | | |
| S1) wie N4, nur Wärmeeintrag | 3.47 | 0 |
| S2) wie N4, nur Wärmeentnahme | 0 | 78.3 |
| S3) wie N4, lediglich auf die Fläche des Nordbeckens bezogen | 3.47 | 78.3 |
| S4) wie N4, mit Wärmeeintrag in 17 m Tiefe und Wärmeentnahme in 27 m Tiefe | 3.47 | 78.3 |
| S5) wie N4, mit dem Klima für das Jahr 2060 | 3.47 | 78.3 |
| Szenarien zur Abschätzung des gesamten Potenzials des Zugersees | | |
| P1) grosser Wärmeeintrag | 100 | 0 |
| P2) sehr grosser Wärmeeintrag | 500 | 0 |
| P3) grosse Wärmeentnahme | 0 | 200 |
| P4) sehr grosse Wärmeentnahme | 0 | 1000 |

Tabelle 3: Mit dem Seemodell berechnete Szenarien und entsprechende Wärmeeinträge und Wärmeentnahmen.

3.3 Ergebnisse Seemodell

3.3.1 Basisszenarien

3.3.1.1 Szenario B1

Das Szenario B1 entspricht dem Zugersee ohne Wärmenutzung. Abbildung 13 zeigt die simulierte Temperatur im Jahresverlauf in den obersten 60 Metern des Sees, gemittelt über 9 Jahre.

Die Berechnung ergibt einen typischen Jahresverlauf der Temperatur mit einer Durchmischung im Winter zwischen Dezember und März und einer geschichteten Wassersäule von April bis November. An der Seeoberfläche erreichen die Temperaturen im Sommer Maximalwerte um 24 °C. Zwischen 5 und 15 m Tiefe bildet sich im Sommer eine Sprungschicht aus, in welcher die Temperatur innerhalb von wenigen Metern Tiefe um 15 °C abnehmen kann. Durch die Mittelung über 9 Jahre wird der Temperaturgradient in der Sprungschicht in Abbildung 13 etwas abgeschwächt. Während der Abkühlung im Herbst nimmt die Tiefe der durchmischten Oberflächenschicht kontinuierlich zu. In der geplanten Entnahmetiefe von 26 m bewegt sich die Wassertemperatur sowohl in den Simulationen wie auch in den Messungen meist im Bereich von 5 bis 6 °C, wobei in kalten Wintern gelegentlich Temperaturen unter 4 °C erreicht werden können, und im November gelegentlich Höchsttemperaturen von 7 bis 8 °C beobachtet wurden.

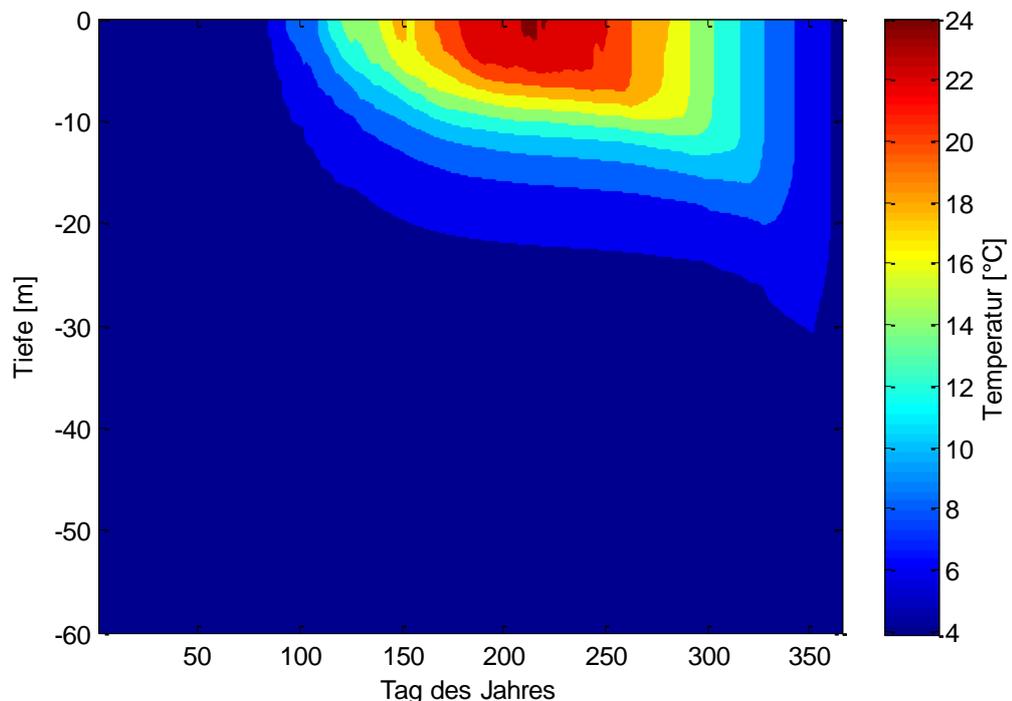


Abbildung 13: Simulierte Temperatur im Jahresverlauf in den obersten 60 m des Zugersees, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.1.2 Szenario B2

Das Szenario B2 entspricht einer Simulation der Temperatur im Zugersee unter den erwarteten klimatischen Bedingungen für die Nordostschweiz im Jahr 2060 für das mittlere Klimaszenario A1B des Intergovernmental Panel of Climate Change [10] nach den Klimaszenarien CH2011 [11]. Im Vergleich zum Szenario B1 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 $2.27\text{ }^{\circ}\text{C}$, mit einer leichten saisonalen Variabilität.

Die Oberflächentemperatur des Sees erwärmt sich im Mittel um $2.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, entsprechend 93% der Erwärmung der Lufttemperatur. Weil sich die oberflächenschicht deutlich stärker erwärmt als das Tiefenwasser, erhöht sich der Temperaturunterschied und damit auch der Dichteunterschied zwischen diesen beiden Schichten. Die Schichtung des Sees im Sommer ist deshalb stabiler. Sie bildet sich zudem im Frühling früher aus und dauert im Herbst länger an. Weil sich die Schichtung im Frühjahr früher ausbildet, ist zu diesem Zeitpunkt auch die Erwärmung des Wassers höher als diejenige der Luft.

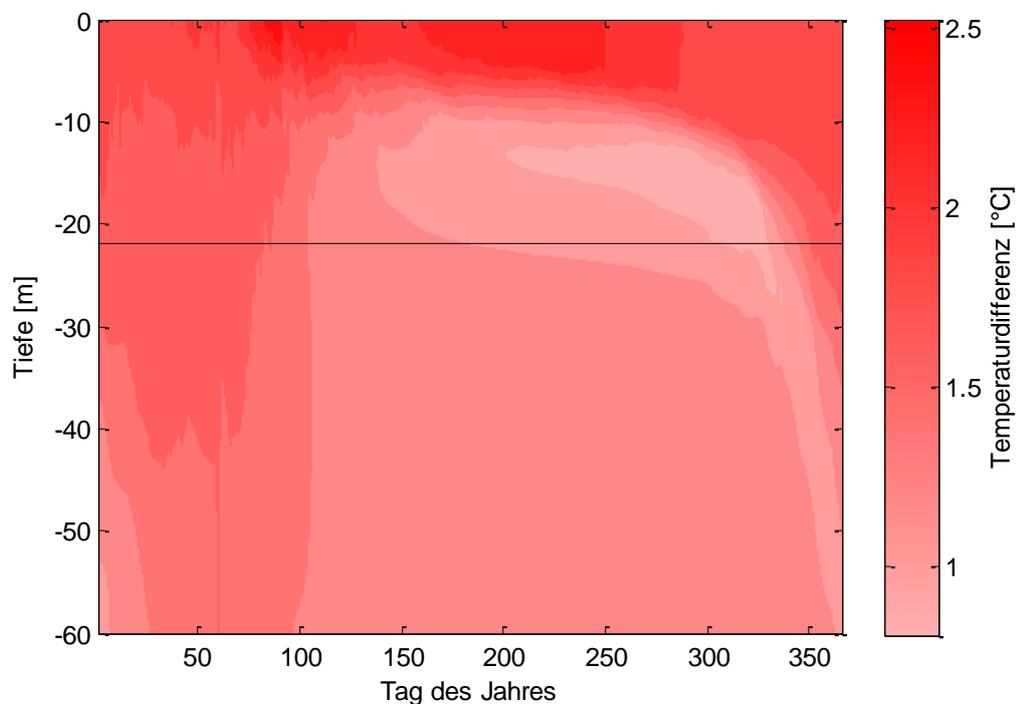


Abbildung 14: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien B2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

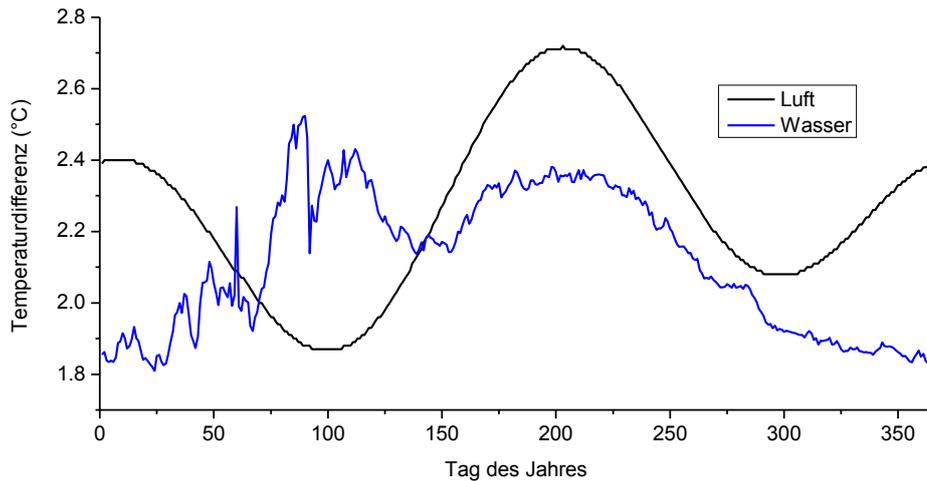


Abbildung 15: Differenzen der Lufttemperatur und der Temperatur der Wasseroberfläche des Zugersees zwischen den Szenarien B2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.2 Geplante Nutzungsszenarien

3.3.2.1 Szenario N1

Dieses Szenario entspricht der erwarteten Wärmenutzung im Jahr 2020 für die Etappe 1 des Energieverbunds Zug, wobei das höchste der drei berechneten Nutzungsszenarien verwendet wurde. Dies entspricht einer jährlichen Wärmeentnahme aus dem See von 9.4 GWh, mit einem Schwergewicht in den Wintermonaten, aber auch einer Nutzung im Sommer (Abbildung 16), und einem Wärmeeintrag von 0.5 GWh während der Monate Juni bis August. Aufgrund der geplanten Lastprofile ergibt sich auch in den Sommermonaten netto eine Wärmeentnahme aus dem See.

Der See als Ganzes wird durch die Netto-Wärmeentnahme um einige Tausendstel Grad abgekühlt (Abbildung 17). Im Bereich der Sprungschicht ergeben sich im Modell kleine, zeitlich beschränkte Änderungen von einigen Hundertstel Grad in einer Schicht von wenigen Metern Dicke. In diesem Tiefenbereich nimmt die Temperatur während des Sommers mit der Tiefe um mehrere Grad pro Meter ab. Temperaturänderungen in der Größenordnung von wenigen Hundertstel Grad können also durch Änderungen in der Mischungstiefe um wenige Zentimeter verursacht werden. Diese kleinen Änderungen sind entsprechend weitgehend zufällig und nicht signifikant.

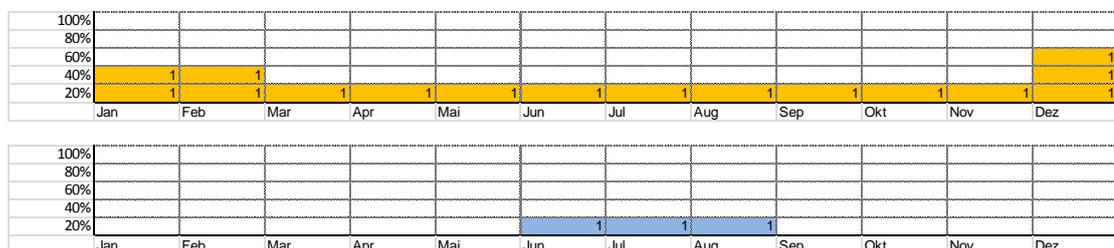


Abbildung 16: Monatliche Lastprofile für die Wärmeentnahme (oben) und die Wärmeeinleitung (unten) in den Zugersee in den Szenarien N1 bis N4 nach Angaben der Hans Abicht AG.

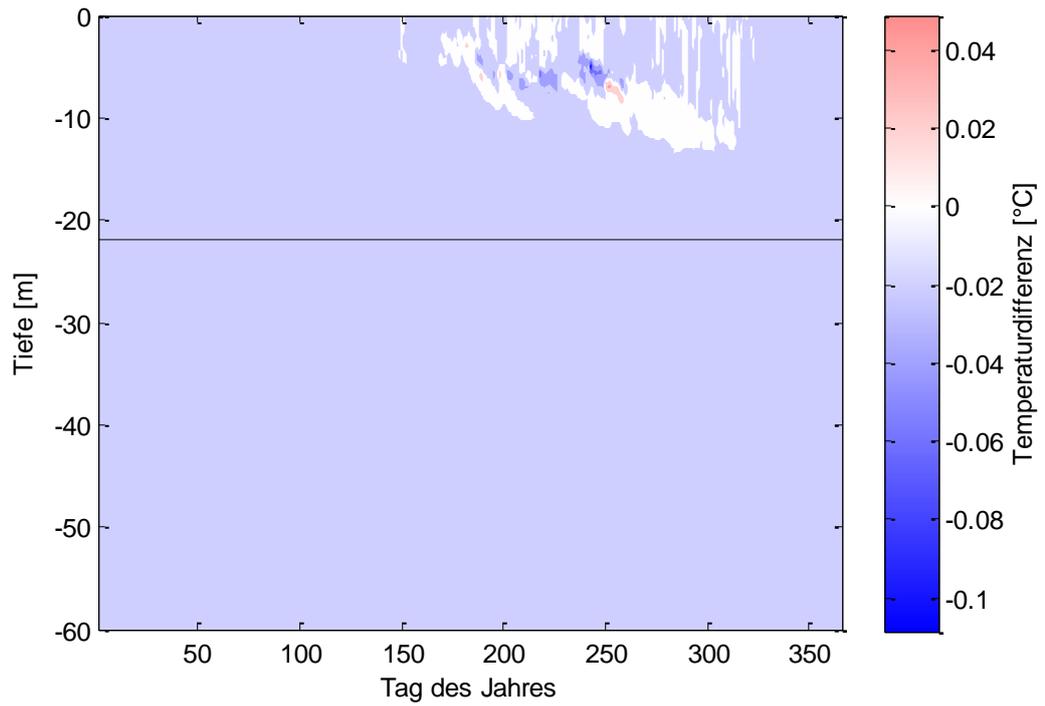


Abbildung 17: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien N1 und B1, Mittelwert über 9 Jahre. Die horizontale Linie markiert die Tiefe der Wassereinleitung in 22 m Tiefe.

3.3.2.2 Szenario N2

Dieses Szenario ist identisch mit dem Szenario N1, aber für das Jahr 2035, mit einer jährlichen Wärmeentnahme von 11.9 GWh und einem Wärmeeintrag von 0.9 GWh.

Wie für das Szenario N1 ergeben sich auch hier keine wesentlichen Temperaturveränderungen. Aufgrund der etwas höheren Netto-Wärmeentnahme ist die Abkühlung des Sees als Ganzes etwas grösser, aber immer noch in einem vernachlässigbaren Bereich.

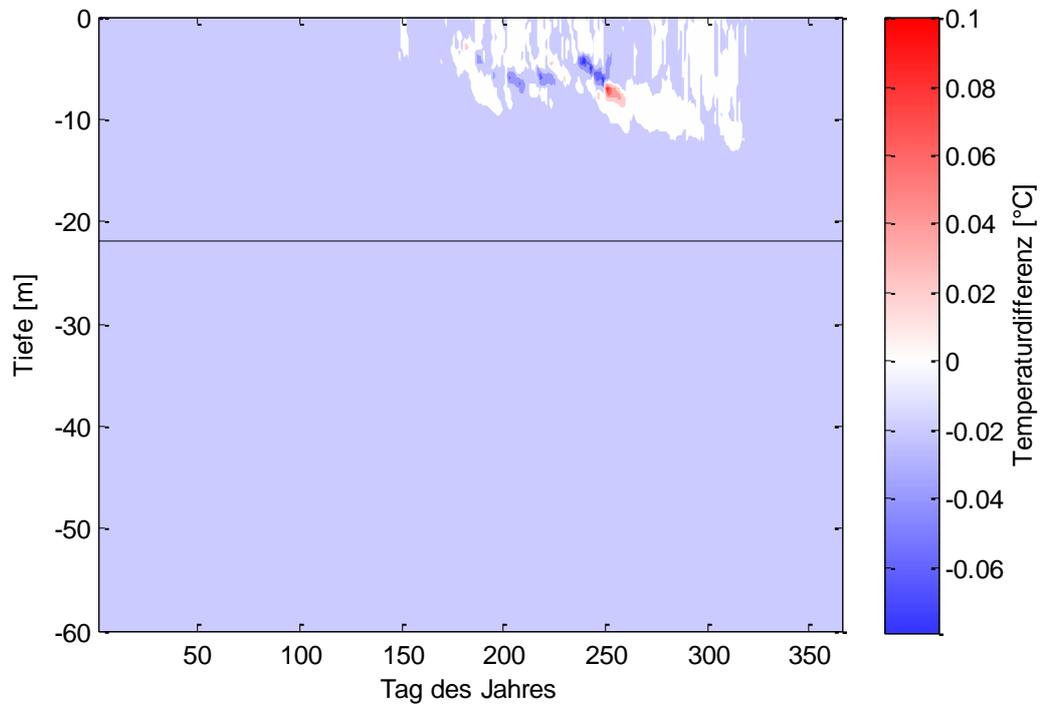


Abbildung 18: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien N2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.2.3 Szenario N3

Dieses Szenario ist identisch mit dem Szenario N1, aber für das Jahr 2050, mit einer jährlichen Wärmeentnahme von 14.2 GWh und einem Wärmeeintrag von 1.4 GWh.

Der ganze See wird in diesem Szenario im Mittel um etwa 2 Tausendstel Grad abgekühlt. Die Temperaturdifferenzen sind auch hier in allen Tiefen und zu allen Zeiten nicht relevant.

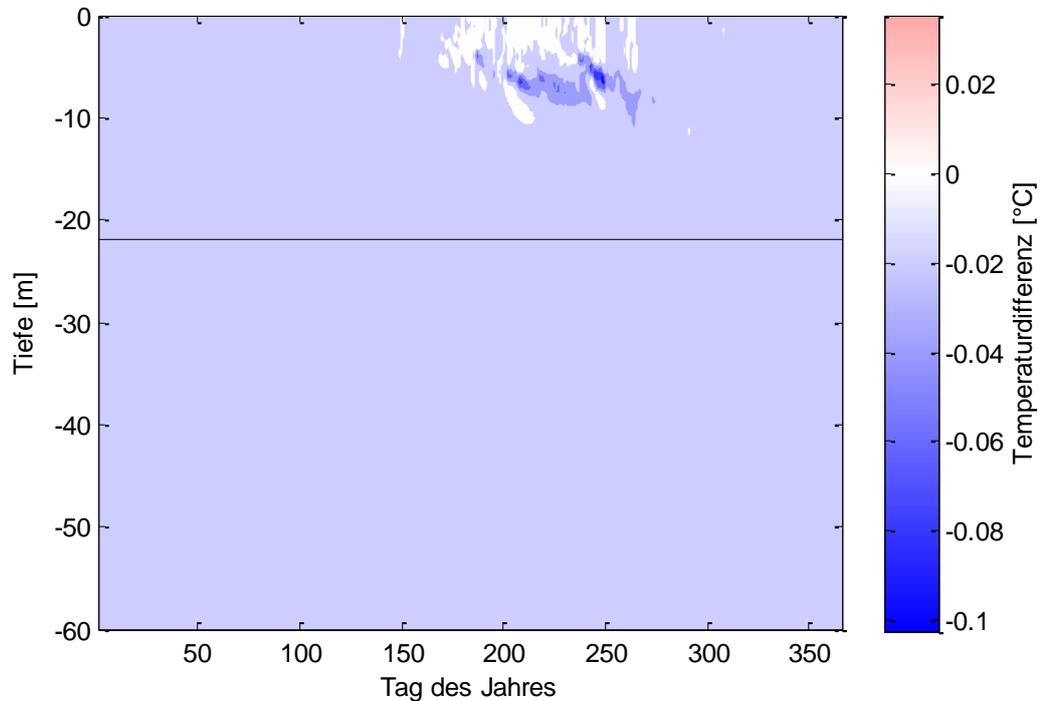


Abbildung 19: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien N3 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.2.4 Szenario N4

Dieses Szenario entspricht der erwarteten Wärmenutzung im Jahr 2050 für alle Etappen des Energieverbunds Zug, wobei wiederum das höchste der drei berechneten Szenarien verwendet wurde, mit einer Wärmeentnahme von 78 GWh und einem Wärmeeintrag von 3.5 GWh.

In diesem Szenario ergibt sich erstmals eine signifikante Veränderung der Temperatur in der Einleitungstiefe. Da in diesem Szenario der See vor allem als Wärmequelle verwendet wird, kühlt sich der See ab. Die Abkühlung erreicht gegen Ende der geschichteten Periode maximal etwa 0.07 °C. Während der Mischung im Winter sind die obersten 50 m des Sees um 0.02 bis 0.03 °C kühler als im Referenzzustand.

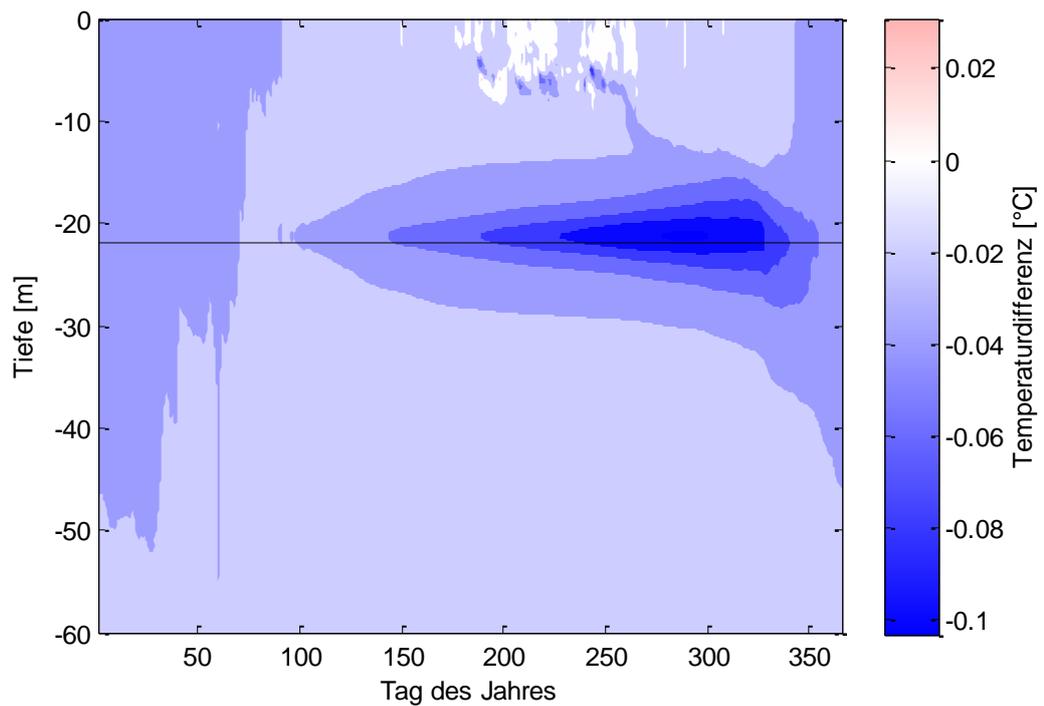


Abbildung 20: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien N4 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.3 Szenarien einschliesslich Grundwassernutzung

Diese Szenarien entsprechen der Annahme, dass auf die Grundwassernutzung verzichtet wird und die gesamte Wärme- und Kältenutzung über das Seewasser stattfindet. Die Lastprofile und damit die saisonale Verteilung des Wärmeintrags und der Wärmeentnahme unterscheiden sich entsprechend von denjenigen für die Szenarien N1 bis N4 (Abbildung 21).

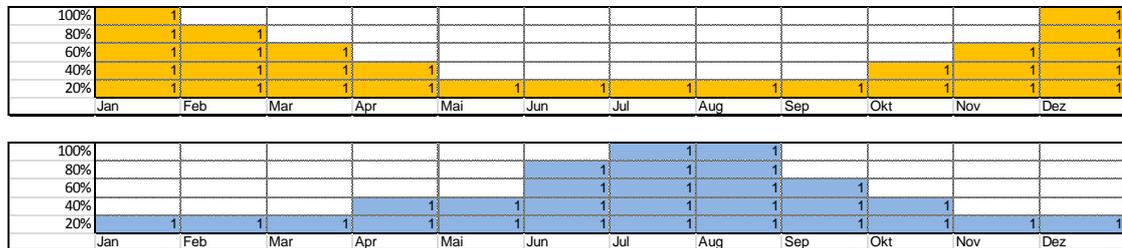


Abbildung 21: Monatliche Lastprofile für die Wärmeentnahme (oben) und die Wärmeeinleitung (unten) in den Zugersee in den Szenarien G1 und G2 nach Angaben der Hans Abicht AG.

3.3.3.1 Szenario G1

Dieses Szenario entspricht der gesamten Wärmenutzung in der Etappe 1 des Energieverbunds Zug im Jahr 2050, einschliesslich der geplanten Grundwassernutzung. Die jährliche Wärmeentnahme beträgt 25.8 GWh, der Wärmeeintrag 13.5 GWh.

Da im Szenario G1 der Wärmeeintrag in den Sommermonaten höher ist als die Wärmeentnahme, ergibt sich hier erstmals eine konsistente Temperaturerhöhung im Bereich der Einleitungstiefe. Die während des Sommers eingeleitete Wärme reichert sich bis zum Herbst in einer Schicht von einigen Metern Dicke im Bereich der Einleitung an. Die Erwärmung dieser Schicht liegt allerdings immer unter 0.02 °C. Die Nettowärmeentnahme ist in diesem Szenario in etwa gleich gross wie im Szenario N3, entsprechend ergibt sich auch eine ähnlich grosse Abkühlung des ganzen Sees von zwei Tausendstel Grad.

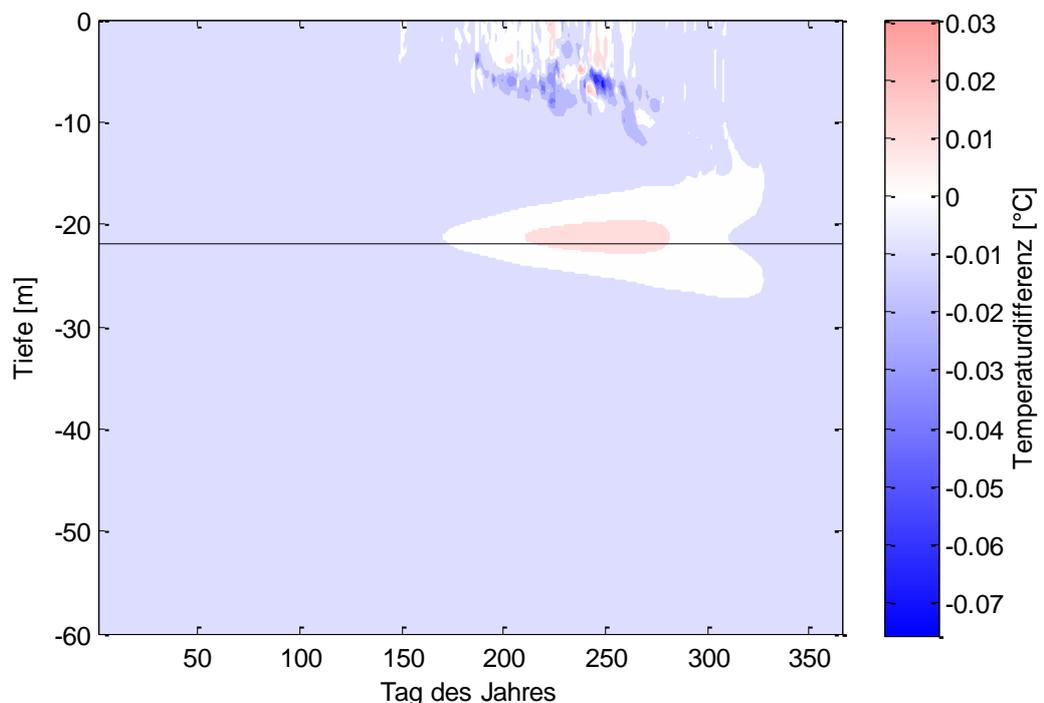


Abbildung 22: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien G1 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.3.2 Szenario G2

Dieses Szenario ist dasselbe wie Szenario G1, aber für alle Etappen des Energieverbunds Zug, mit einer jährlichen Wärmeentnahme von 114 GWh und einem Wärmeeintrag von 32 GWh.

In diesem Szenario ist das Verhältnis von Wärmeentnahme zu Wärmeeintrag deutlich grösser als im Szenario G1. Im Bereich der Einleitungstiefe wird der See deshalb im Frühjahr zunächst noch abgekühlt, dann in den Sommermonaten wieder leicht aufgewärmt und schliesslich im Herbst vor der Durchmischung wieder abgekühlt. Die maximale Abkühlung wird im November erreicht und beträgt etwa 0.07 °C. In diesem Szenario wird der ganze See im Mittel um rund 0.015 °C abgekühlt.

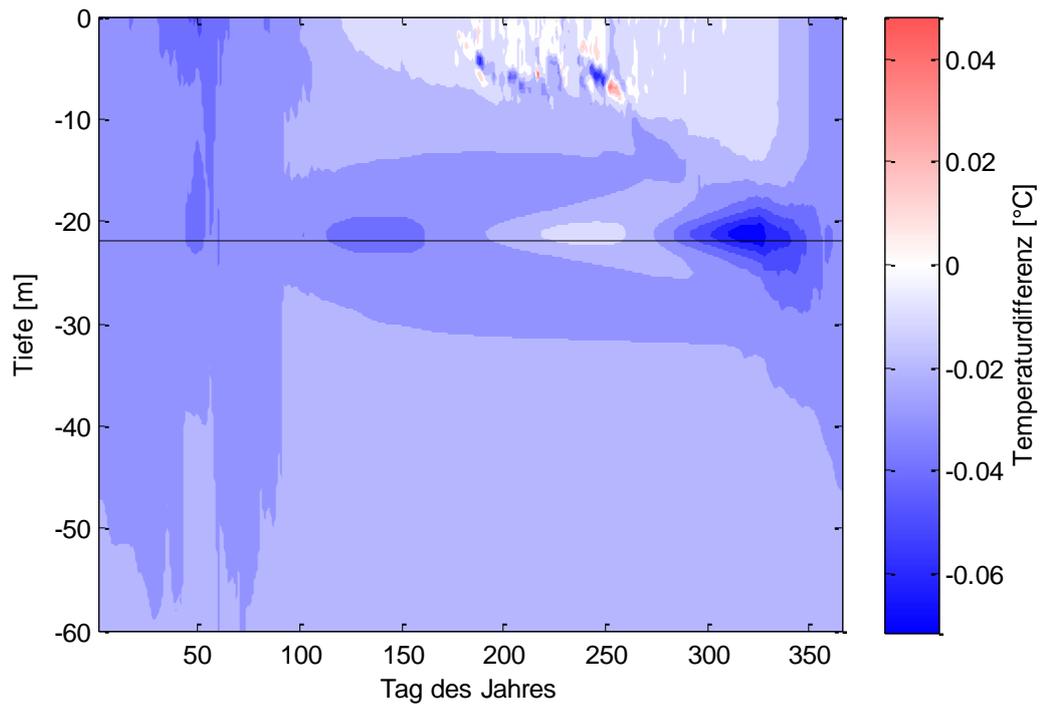


Abbildung 23: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien G2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.4 Sensitivitätsanalysen

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Szenarien dienen dazu, die Sensitivität der Simulationsergebnisse auf verschiedene Annahmen zu testen. Als Grundlage dazu wird das Szenario N4 verwendet, also die erwartete Nutzung des Sees als Wärme- und Kältequelle im Endausbau aller Etappen im Jahr 2050. Im Vergleich zum Szenario N4 werden dann jeweils bestimmte Annahmen geändert.

3.3.4.1 Szenario S1

In diesem Szenario wird lediglich der Wärmeeintrag aus Szenario N4 verwendet. Auf die Nutzung des Sees als Wärmequelle wird verzichtet. Der jährliche Wärmeeintrag beträgt 3.5 GWh.

Aufgrund des geringen Wärmeeintrags ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die Szenarien N1 bis N3. Die geringen Temperaturveränderungen im Bereich der Sprungschicht sind nicht signifikant. Die mittlere Erwärmung des ganzen Sees beträgt deutlich weniger als ein Tausendstel Grad.

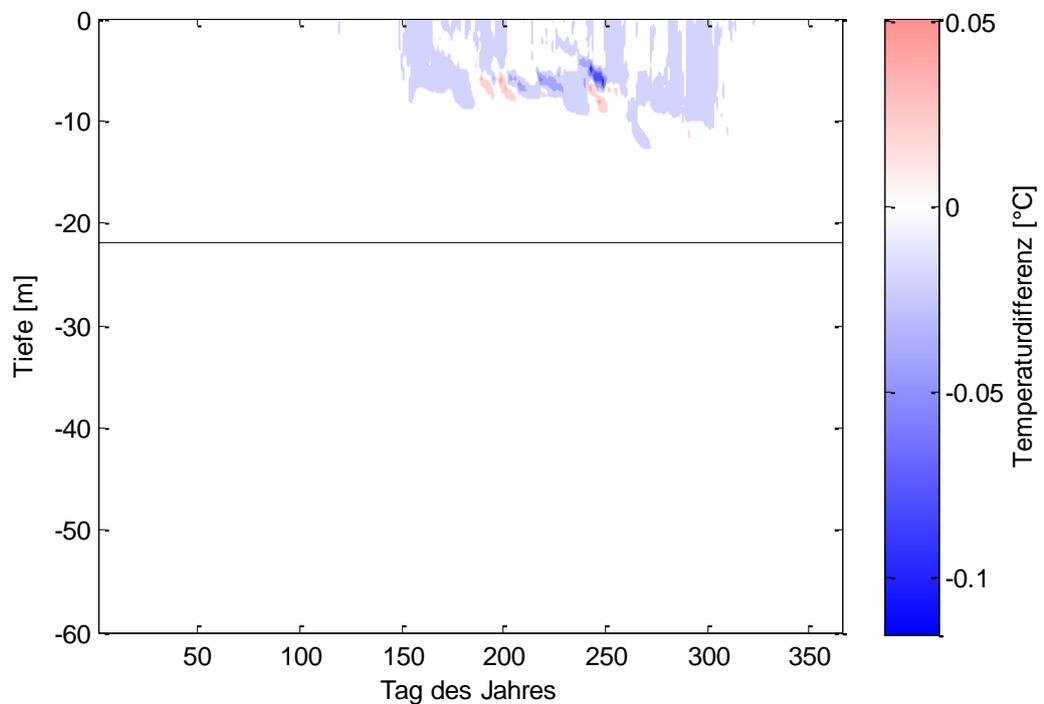


Abbildung 24: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien S1 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.4.2 Szenario S2

In diesem Szenario wird lediglich die Wärmeentnahme aus Szenario N4 verwendet. Auf die Nutzung des Sees als Wärmesenke wird verzichtet. Die jährliche Wärmenahme beträgt 78 GWh.

Da im Szenario N4 die Wärmeentnahme klar dominiert, ergibt sich für dieses Szenario etwa das gleiche Bild wie im Szenario N4. Die Unterschiede zwischen den beiden Szenarien sind vernachlässigbar.

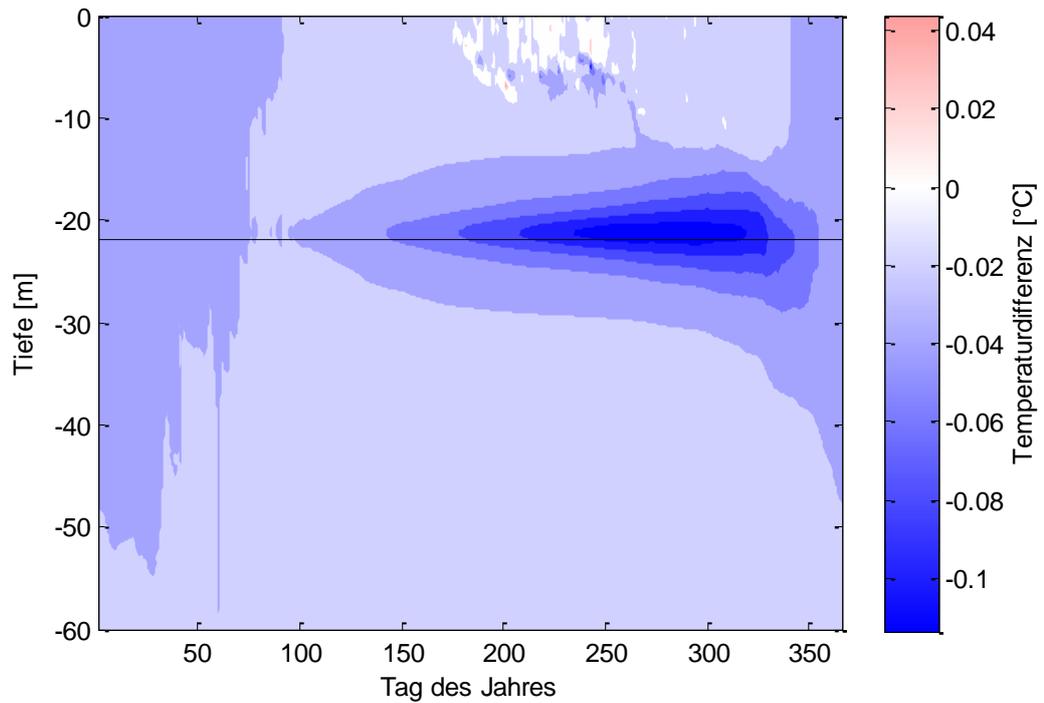


Abbildung 25: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien S2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.4.3 Szenario S3

In diesem Szenario wird angenommen, dass der Wärmeaustausch zwischen dem Nord- und dem Südbecken des Zugersees stark limitiert ist. Anstelle der Bathymetrie des ganzen Zugersees wird deshalb lediglich diejenige des Nordbeckens verwendet. Wärmeeintrag und Wärmehabnahme werden entsprechend über eine kleinere Fläche verteilt.

Der Anteil des Nordbeckens an der Gesamtfläche des Zugersees beträgt an der Oberfläche rund 60% und nimmt mit der Tiefe ab. In 50 m Tiefe sind es noch rund 40%. Es war deshalb zu erwarten, dass eine Beschränkung auf das Nordbecken im Vergleich zur Simulation mit dem ganzen See zu nicht ganz doppelt so hohen Temperaturveränderungen führen würde. Dies wird durch die Simulationsergebnisse bestätigt. Die Abkühlung ist in der Einleitungstiefe im Mittel 1.7 mal so gross wie im Szenario N4. Es ist davon auszugehen, dass eine Beschränkung auf das Nordbecken die Temperaturveränderungen bei anderen Szenarien etwa um den gleichen Faktor erhöhen würde.

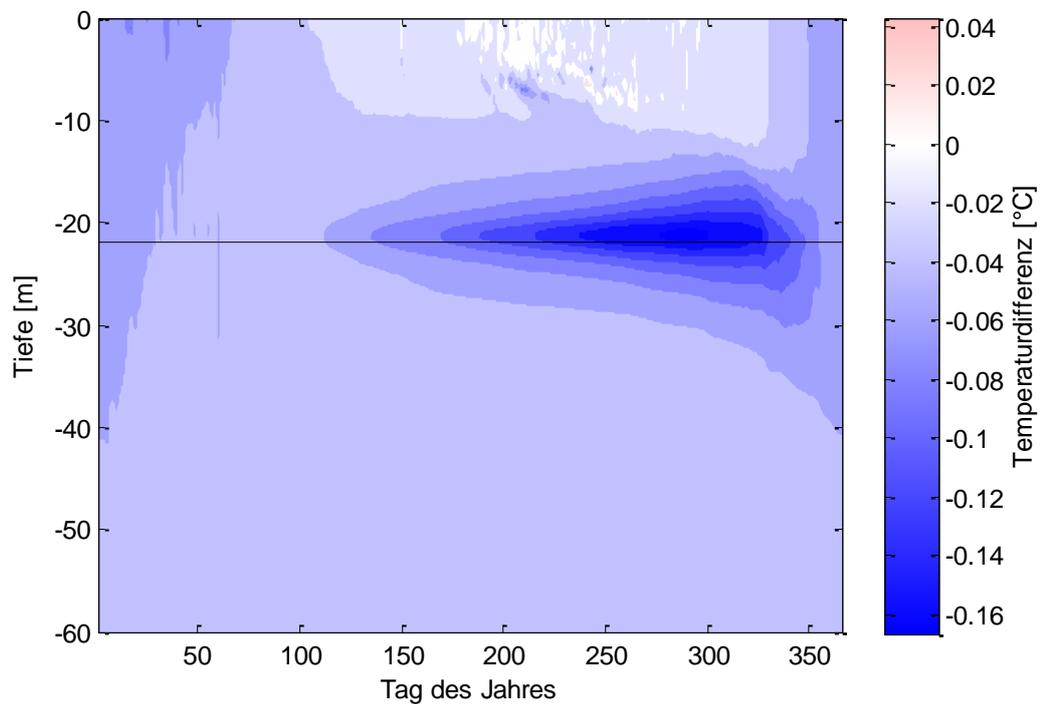


Abbildung 26: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Nordbeckens des Zugersees zwischen den Szenarien S3 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.4.4 Szenario S4

Dieses Szenario entspricht der Annahme, dass das Wasser entsprechend seiner Temperatur nach der Einleitung um einige Meter aufsteigt (wenn es erwärmt wurde) beziehungsweise um einige Meter absinkt (wenn es abgekühlt wurde), bevor es sich einschichtet. Das abgekühlte Wasser ist direkt bei der Einleitungsstelle bei einer Temperatur von zum Beispiel 2 bis 3 °C zwar nicht unbedingt dichter als das Umgebungswasser, welches im Sommer meist um 5 bis 6 °C warm ist. Durch die Vermischung mit dem Umgebungswasser ergibt sich dann aber eine höhere Dichte. Entsprechend wurden der Wärmeeintrag in 17 m Tiefe und die Wärmeentnahme in 27 m Tiefe eingefügt.

Die abgekühlte Schicht wird in diesem Szenario entsprechend der Einleitungstiefe ebenfalls um 5 m nach unten verschoben. Ansonsten ergeben sich keine wesentlichen Änderungen im Vergleich zum Szenario N4.

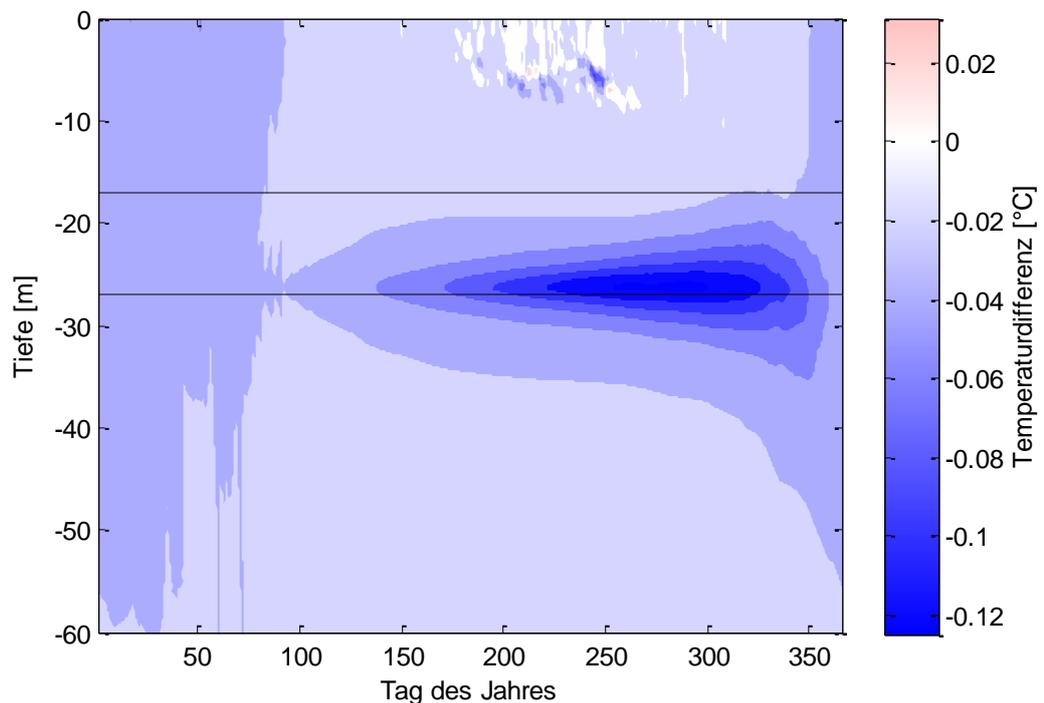


Abbildung 27: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien S4 und B1, Mittelwert über 9 Jahre. Die horizontalen Linien zeigen hier die Tiefen der Wärmeeinleitung (17 m) und der Wärmeentnahme (22 m).

3.3.4.5 Szenario S5

Mit diesem Szenario wird untersucht, ob die Auswirkungen der Wärmenutzung durch die erwarteten zukünftigen klimatischen Veränderungen beeinflusst werden.

Abbildung 28 zeigt den Unterschied zwischen dem Nutzungsszenario mit Klimaerwärmung (N4) und dem Basisszenario mit Klimaerwärmung (B2). Es zeigt sich, dass die Abkühlung des Sees sehr ähnlich ist wie im Szenario N4 (Abbildung 20). Es sind also unter zukünftigen klimatischen Bedingungen in etwa die gleichen Temperaturänderungen aufgrund der Wärmenutzung zu erwarten wie unter heutigen Bedingungen.

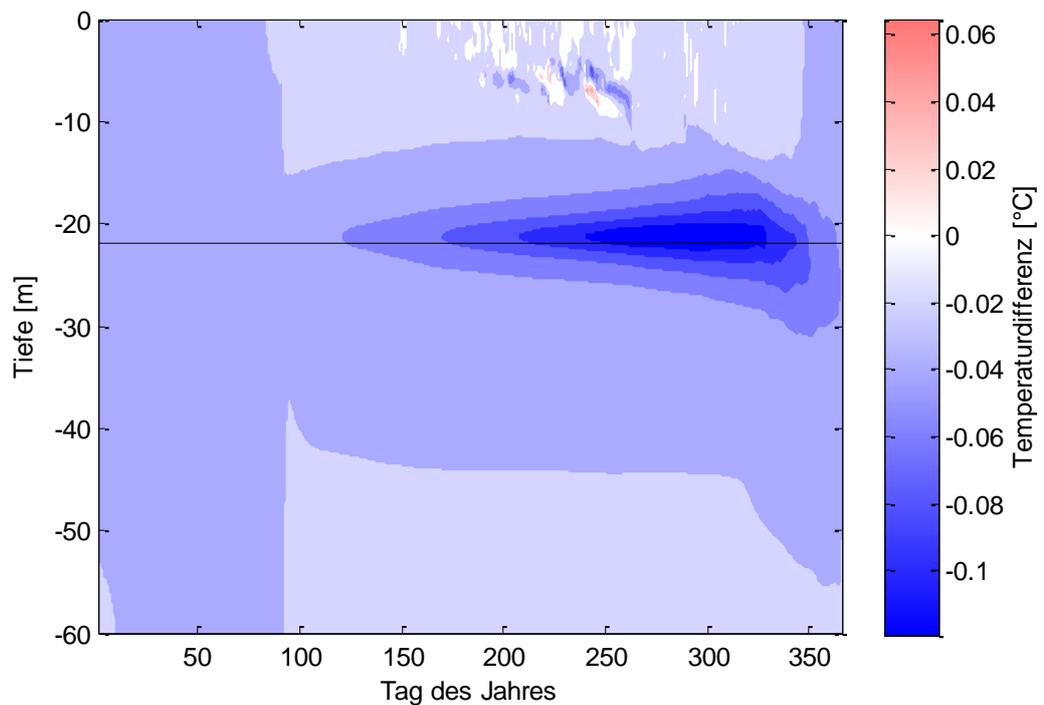


Abbildung 28: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien S5 und B2, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.5 Szenarien zur Abschätzung des gesamten Potenzials

Diese Szenarien wurden durchgeführt, um einen Anhaltspunkt zu bekommen, bei welcher Grössenordnung der Wärmenutzung im Zugersee Temperaturveränderungen erreicht würden, welche eine vertiefte Analyse der möglichen Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften im See erfordern würden (siehe auch Diskussion der Ergebnisse im Abschnitt 3.5.4).

3.3.5.1 Szenario P1

In diesem Szenario wird ausschliesslich Wärme in den Zugersee eingeleitet, auf die Nutzung des Sees als Wärmequelle wird verzichtet. Die saisonale Verteilung des Wärmeeintrags entspricht dabei dem Lastprofil für den gesamten erwarteten Wärmeeintrag einschliesslich Grundwassernutzung (Abbildung 21). Der jährliche Wärmeeintrag beträgt hier 100 GWh. Die entsprechende Wärmelast ist maximal in den Monaten Juli und August mit 24 MW und minimal in den Monaten November bis März mit 5 MW.

Die Wärme reichert sich während des Sommers in einer Schicht von etwa 10 m Dicke im Bereich der Einleitungstiefe an. Die maximale Erwärmung von etwa 0.3°C ergibt sich Mitte September in 21 m Tiefe.

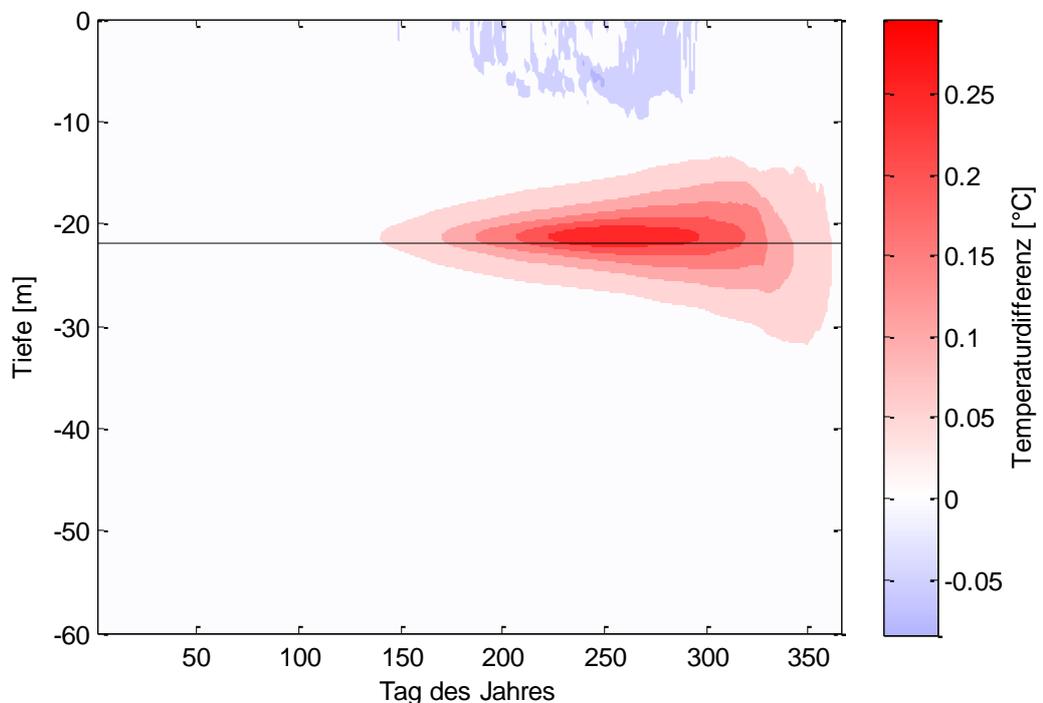


Abbildung 29: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien P1 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.5.2 Szenario P2

Dieses Szenario entspricht dem Szenario P1, aber mit einem jährlichen Wärmeeintrag von 500 GWh, entsprechend einer maximalen Wärmelast von 120 MW in den Monaten Juli und August.

Es ergibt sich hier eine maximale Erwärmung von knapp 1.4 °C, wiederum Mitte September in 21.5 m Tiefe. Die Hintergrundtemperatur in den obersten 100 m des Sees wird im Mittel etwa um 0.07 °C erwärmt. Die Erwärmung hat allerdings keinen relevanten Einfluss auf die Mischung des Sees. Abbildung 31 zeigt, dass das Modell beispielsweise in 150 m Tiefe jeweils zum gleichen Zeitpunkt Mischungsereignisse mit der gleichen Intensität (Abkühlung) voraussagt wie im Basisszenario.

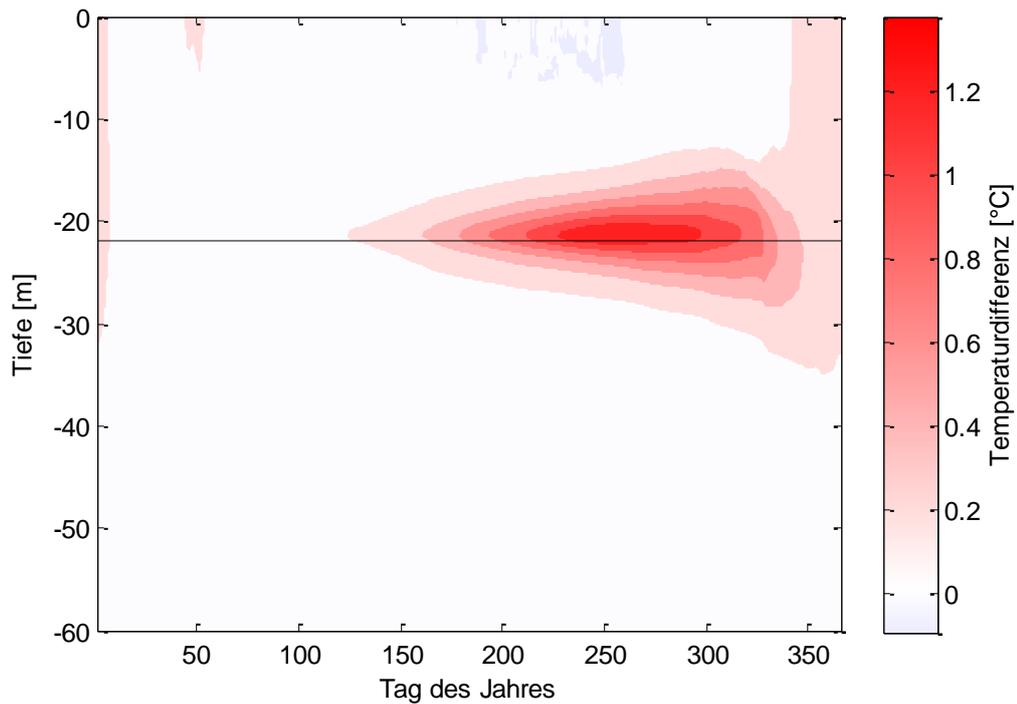


Abbildung 30: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien P2 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

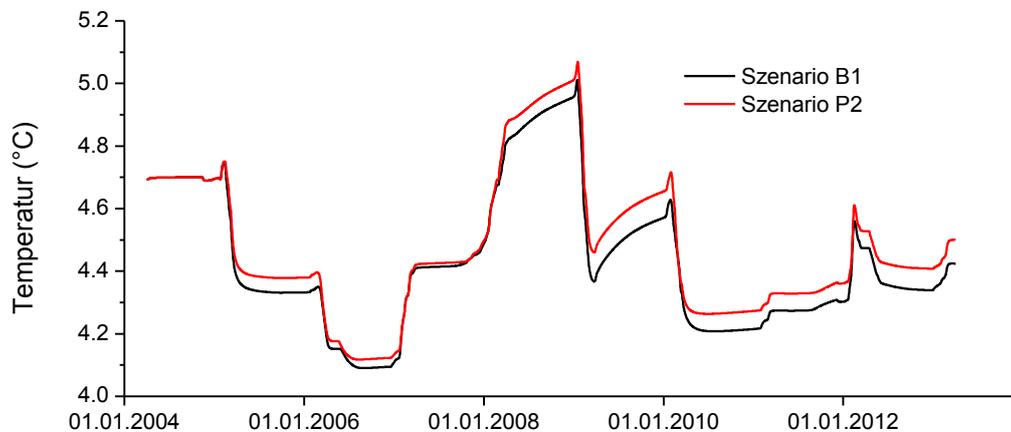


Abbildung 31: Simulierte Temperatur in 150 m Tiefe über 9 Jahre im Zugersee für die Szenarien B1 und P2.

3.3.5.3 Szenario P3

In diesem Szenario wird ausschliesslich Wärme aus dem Zugersee entnommen, auf die Nutzung des Sees als Wärmesenke wird verzichtet. Die saisonale Verteilung der Wärmeentnahme entspricht dabei dem Lastprofil für die gesamte erwartete Wärmenutzung einschliesslich Grundwassernutzung (Abbildung 21). Die jährliche Wärmeentnahme beträgt hier 200 GWh. Die Kältelast ist am grössten mit 46 MW im Dezember und Januar, und am geringsten mit gut 9 MW von Mai bis August.

Die grösste Abkühlung ergibt sich hier Mitte November in 21.5 m Tiefe mit einem Wert von etwas über 0.2 °C.

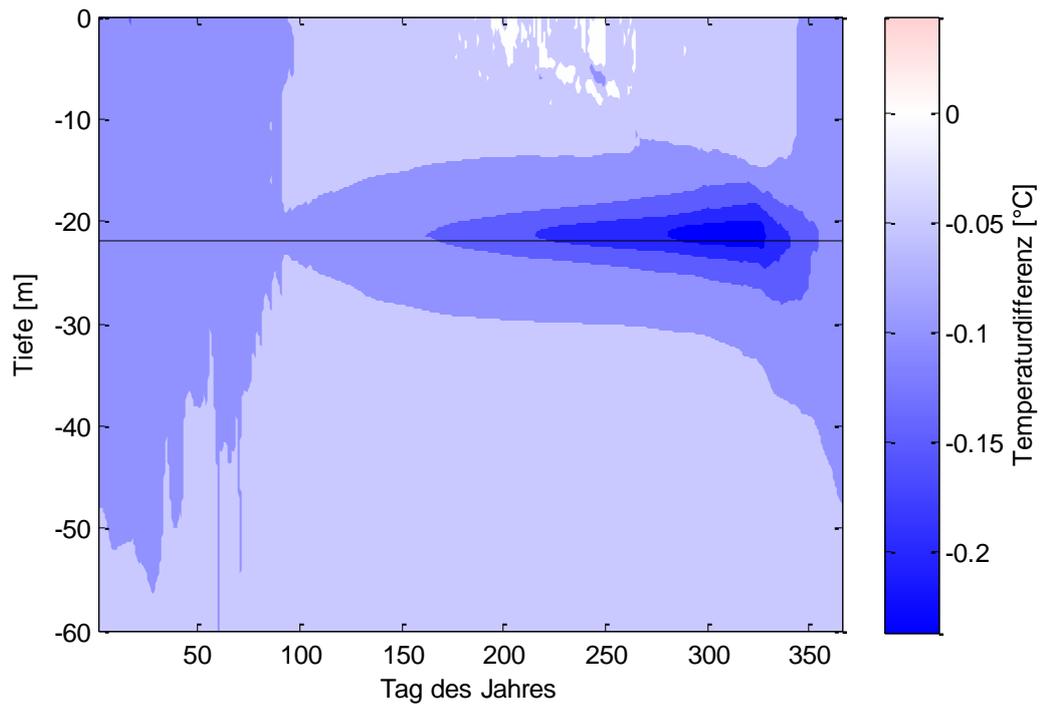


Abbildung 32: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien S5 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

3.3.5.4 Szenario P4

Dieses Szenario entspricht dem Szenario P3, aber mit einer jährlichen Wärmeentnahme von 1000 GWh, entsprechend einer maximalen Kältelast von 230 MW in den Monaten Dezember und Januar und einer durchschnittlichen Kältelast von 115 MW.

Die maximal vorhergesagte Abkühlung beträgt knapp 1.1 °C, ebenfalls Mitte November in 21.5 m Tiefe. Die Oberflächentemperatur zur Zeit der winterlichen Mischung kühlt sich um nahezu 0.4 Grad ab. Auch hier sehen wir interessanterweise im Modell keinen grossen Einfluss auf die Intensität der Mischung in 150 m Tiefe (Abbildung 34).

In diesem Szenario entspricht die insgesamt umgesetzte Wassermenge einer Schichtdicke im See von fast 10 m. Die Vernachlässigung der Wasserumlagerungen im Modell ist hier (und in einem geringeren Mass auch in den Szenarien P2 und P3) deshalb eigentlich nicht mehr berechtigt. In Realität würde durch die Wasserentnahme in 26 m Tiefe und die Rückleitung in 22 m Tiefe während der geschichteten Periode die gesamte Wassersäule langsam nach unten gezogen. Entsprechend würde die Abkühlung wohl auf eine etwas grössere Schichtdicke verteilt und die maximale Abkühlung wäre etwas kleiner. An den Grössenordnungen der Temperaturänderungen würde sich aber nichts ändern. Zudem ist ohnehin anzunehmen, dass bei einer Wärmenutzung in dieser Grössenordnung die Entnahmen und Rückleitung des Wassers auf mehrere Standorte und unterschiedliche Tiefen verteilt würden.

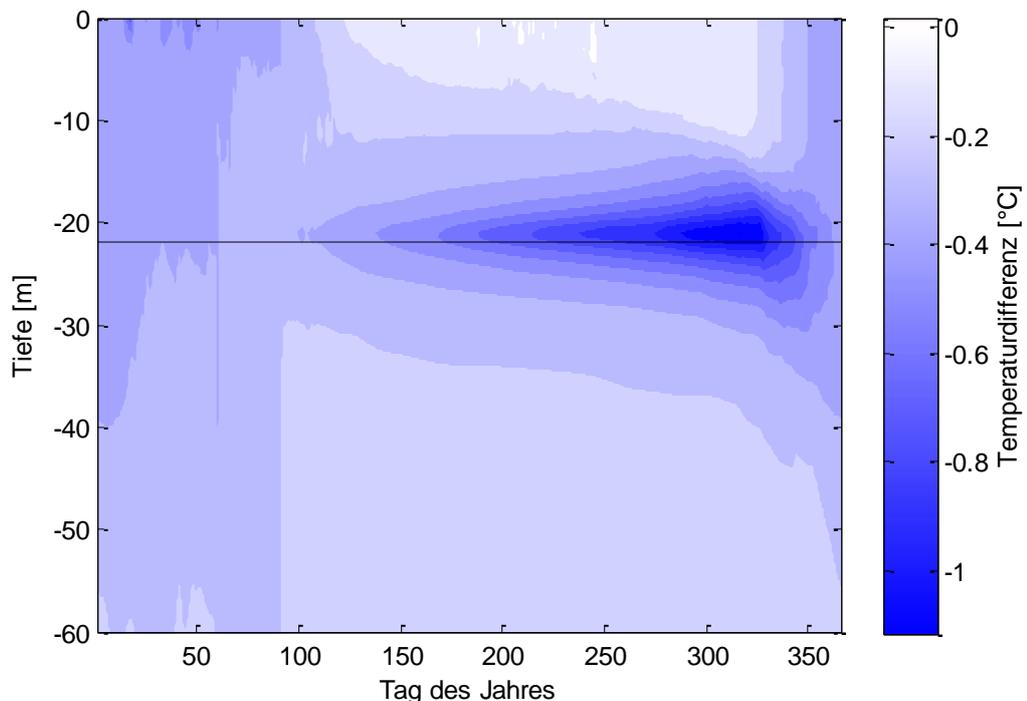


Abbildung 33: Differenz zwischen den simulierten Temperaturen in den obersten 60 m des Zugersees zwischen den Szenarien P4 und B1, Mittelwert über 9 Jahre.

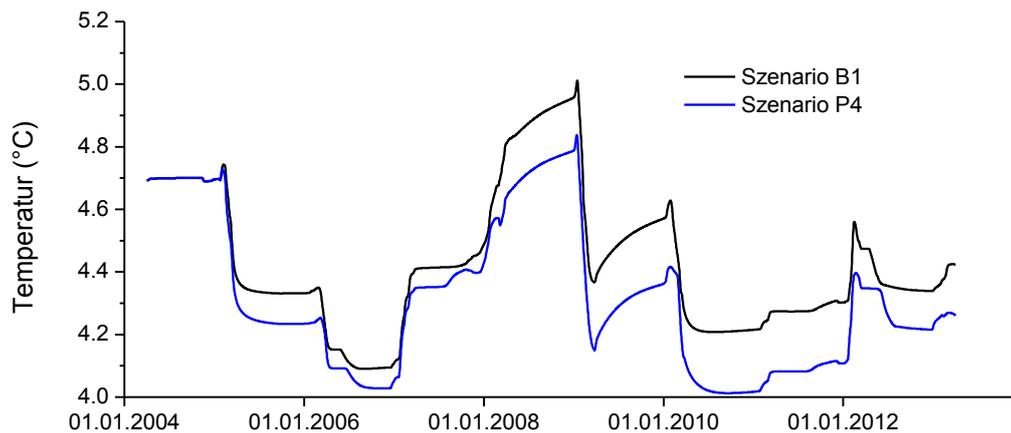


Abbildung 34: Simulierte Temperatur in 150 m Tiefe über 9 Jahre im Zugersee für die Szenarien B1 und P4.

3.4 Abschätzung der Temperaturveränderungen in der Zugerbucht

Die zu erwartenden Temperaturänderungen in der Zugerbucht werden grundsätzlich mit der gleichen Methode abgeschätzt, welche bereits im Bericht der Eawag von 2006 [5] verwendet wurde. Da geplant ist, das Wasser in einer Tiefe von 22 m und entsprechend in einem Abstand von rund 400 m vom Seeufer einzuleiten, kann auf eine Abschätzung der Auswirkungen im nahen Uferbereich verzichtet werden.

Verschiedene Prozesse begünstigen den Austausch zwischen der Zugerbucht und dem offenen Wasser des Sees. In Seen in der Grössenordnung des Zugersees erzeugt der Wind üblicherweise gross-skalige Strömungen, welche über längere Zeit anhalten und das ganze Becken umfassen. Im Nordbecken des Zugersees würde man aufgrund der Form des Beckens eine Kreisströmung entweder im Uhrzeiger- oder im Gegenuhrzeigersinn erwarten, welche das in den See rückgeleitete Wasser aus der Zugerbucht wegführt. Es liegen uns keine Messungen von Strömungsgeschwindigkeiten im Zugersee vor. Üblicherweise liegen die Strömungsgeschwindigkeiten im Tiefenbereich der Einleitung aber in der Grössenordnung von wenigen cm/s. So wurden beispielsweise im Bodensee in 19 m Tiefe konsistent Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 2 und 4 cm/s gemessen. Eine Strömungsgeschwindigkeit von 3 cm/s entspricht einer Fließstrecke von rund 2.5 km pro Tag und würde gut genügen, um das eingeleitete Wasser innerhalb eines Tages aus der Zugerbucht zu entfernen. Zudem ergeben sich bei bestehenden Temperaturdifferenzen zwischen flacheren und tieferen Wasserzonen Dichteunterschiede, die zu Ausgleichsströmungen führen und ebenfalls mithelfen, das Wasser zwischen der Bucht und dem offenen See auszutauschen. Diese Strömungen werden umso stärker, je grösser die Dichteunterschiede sind und sind entsprechend bei grösseren Temperaturdifferenzen im Sommer am stärksten.

Kritisch für die Abschätzung der Auswirkungen auf die Zugerbucht ist eine Wärmeeinleitung während der geschichteten Periode im Sommer, da sich zu dieser Zeit die eingeleitete Wärme auf eine geringe Tiefe verteilt und deshalb eine grössere Temperaturänderung verursachen kann als im Winter.

Für die Abschätzung der Temperaturänderungen in der Zugerbucht haben wir folgende Annahmen getroffen:

- Die Zugerbucht hat eine Fläche A von rund 3 km^2 ($=3'000'000 \text{ m}^2$) [5].
- Die Erwärmung des Wassers verteilt sich auf einen Tiefenbereich von d von 2 m Dicke.
- Das Wasser in der Zugerbucht wird innerhalb eines Tages ausgetauscht (Aufenthaltszeit $t_A=86'400 \text{ s}$).
- Es findet ein kontinuierlicher Wärmeeintrag Q_H [W] statt.

Für diese Voraussetzungen wurde die mittlere Erwärmung ΔT in der 2 m dicken Schicht innerhalb der Bucht mit folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta T = \frac{Q_H t_A}{c_p \rho A_B d}$$

Dabei ist c_p die Wärmekapazität (4'200 J/kg/K) und ρ die Dichte von Wasser (1000 kg/m³). Aus dieser Abschätzung ergibt sich eine mittlere Erwärmung einer 2 m dicken Schicht in der Zugerbucht von rund 0.34 °C pro 100 MW kontinuierlichem Wärmeeintrag, wobei die Erwärmung linear mit dem Wärmeeintrag zunimmt. Bei diesem Ergebnis ist allerdings noch zu berücksichtigen, dass sich die Erwärmung nicht homogen auf dieses berechnete Volumen verteilen wird und lokal entsprechend höher sein kann.

3.5 Diskussion und Schlussfolgerungen

3.5.1 Auswirkungen auf die Temperaturen im ganzen Zugersee

Die Auswirkungen der im Rahmen des Energieverbundes Zug geplanten Wärmenutzung (Szenarien N1 bis N4) auf die Temperaturen und die Schichtung im Zugersee sind sehr gering. Im Tiefenbereich der Einleitung ergeben sich Temperaturänderungen, welche 0.1 °C kaum überschreiten dürften. Der See als Ganzes wird maximal im Bereich von wenigen Hundertstel Grad abgekühlt. Diese Temperaturänderungen sind rund eine Grössenordnung kleiner als die natürliche Variabilität der Temperaturen in den selben Bereichen. Es ist deshalb nicht damit zu rechnen, dass diese Temperaturänderungen einen negativen Einfluss auf die Lebensgemeinschaften im See haben werden. Diese Schlussfolgerung ist unabhängig von den exakten Annahmen, welche bei der Modellierung getroffen wurden.

3.5.2 Auswirkungen auf die Temperaturen in der Zugerbucht

Da wir davon ausgehen, dass das Wasser zwischen der Zugerbucht und dem offenen See typischerweise innerhalb eines Tages ausgetauscht wird, ist für die Beurteilung der lokalen Auswirkungen nicht wie bei den Auswirkungen für den ganzen See die mittlere Nutzung über mehrere Monate sondern vor allem die maximale Nutzung während eines Tages ausschlaggebend.

Entscheidend ist in erster Linie die maximale Wärmelast an einzelnen heissen Sommertagen. Für den Vollausbau des Energieverbundes Zug mit allen Etappen im maximalen Szenario wird aktuell von einer Wärmelast von rund 25 MW an Spitzentagen ausgegangen. Nach den Abschätzungen im Abschnitt 3.4 sollte eine solche Wärmelast zu einer mittleren Erwärmung in einer 2 m dicken Schicht von weniger als 0.1 °C führen, vermutlich allerdings mit starken lokalen Unterschieden. Sollte in Zukunft eine Nutzung des Sees zur Kühlzwecken mit Spitzenlasten im Bereich von 50 MW oder mehr in Betracht gezogen werden, dann ist zu empfehlen, die lokalen Auswirkungen zunächst bei geringerer Wärmelast auszumessen, oder falls dies nicht möglich ist, die Ausbreitung einer lokalen Einleitung in die Bucht mittels Tracerversuchen vorgängig zu untersuchen.

3.5.3 Auswirkungen auf die Nährstoffe im Zugersee

Grundsätzlich sind lediglich geringe Auswirkungen der geplanten Wärmenutzung im Zugersee auf den Nährstofftransport zu erwarten, da sowohl die Entnahme wie auch die Rückleitung des Wassers unterhalb der Sprungschicht stattfinden. Es findet somit kein wesentlicher zusätzlicher Transport von Nährstoffen aus dem Tiefenwasser in das Oberflächenwasser des Sees statt. Kritisch für die Beurteilung ist hier die Nutzung des Sees als Wärmesenke im Sommer während der geschichteten Periode und die damit verbundenen Phosphorflüsse. In dieser Zeit wird das eingeleitete Wasser, da es wärmer ist als das Umgebungswasser, vom Punkt der Einleitung in 22 m Tiefe noch einige Meter aufsteigen und sich am unteren Rand der Sprungschicht einschichten. In 15 m Tiefe wird nach den Beobachtungen des Amtes für Umweltschutz des Kantons Zug der Phosphor bis im Oktober jeweils weitgehend aufgebraucht. Im Bereich der Wasserentnahme in 26 m Tiefe betragen die beobachteten Konzentrationen von gelöstem Phosphat rund 70 mgP/m³.

Bei einer Temperaturdifferenz von 3 °C entspricht eine Wärmeeintrag von 1 GWh einer Wassermenge von knapp 300'000 m³, entsprechend einer gelösten Phosphormenge von 20 kg. Für die aktuellen Nutzungsszenarien N1 bis N4 mit Kälteeinträgen von maximal 3.5 GWh ergibt sich damit ein Phosphatfluss von rund 70 kg P in Richtung des unteren Bereichs der Sprungschicht. Würde die gesamte geplante Wärmenutzung einschliesslich der geplanten Grundwassernutzung auf den See übertragen (Szenario G2) dann würde der Wärmeeintrag während der geschichteten Periode rund 25 GWh betragen, entsprechend einer gelösten Phosphormenge von rund 500 kg. Diese Werte können verglichen werden mit der Menge Phosphat, die im Bereich der Sprungschicht zu Beginn der Schichtung zur Verfügung stehen. Diese beträgt über die gesamte Seefläche etwa 2000 kg P pro Tiefenmeter.

Basierend auf diesen Abschätzungen ist davon auszugehen, dass die durch geplante Nutzung im Rahmen der Szenarien N1 bis N4 verursachten Phosphorflüsse keine signifikante Veränderung der Nährstoffverfügbarkeit im unteren Bereich der Sprungschicht verursachen werden. Sollten aber langfristig Kältenutzungen im Rahmen des Szenarios G2 als mögliche Option geplant werden, dann wäre eine Tieferlegung der Rückleitung um einige Meter sowie eine abwärts gerichtete Rückleitung zu überprüfen. So könnte sichergestellt werden, dass sich das eingeleitete Wasser unterhalb einer Tiefe von 20 m einschichtet. Zudem kann mit möglichst hohen Temperaturdifferenzen im Wärmetauscher die umgeschichtete Wassermenge und damit der Phosphorfluss vermindert werden.

3.5.4 Potenzial des Zugersees für die Wärmenutzung

Für die Beurteilung des gesamten Potenzials des Zugersees für die Wärmenutzung bräuchte es grundsätzlich 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 aber basierend auf den folgenden Erwägungen abgeschätzt werden:

- a) Temperaturänderungen im Bereich von bis zu etwa einem halben Grad in limitierten Tiefenbereichen im Bereich zwischen der Oberfläche und der unteren Sprungschicht und bis zu etwa einem Zehntel Grad für den ganzen See haben mit grosser Wahrscheinlichkeit keinen signifikanten 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 mit grosser Wahrscheinlichkeit negative Auswirkungen, zumindest auf einen Teil der in diesen Tiefen lebenden Organismen, während andere Organismen davon profitieren könnten.
- 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, dürften die möglichen Folgen für die Lebensgemeinschaften einerseits schwierig abzuschätzen und andererseits wohl auch im Rahmen eines Monitoring-Programms schwierig zu beobachten und kaum von den Auswirkungen anderer Effekte, wie natürlicher Variabilität, Klimawandel und Reoligotrophierung abzugrenzen sein.
- e) 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. Es gibt sicher Argumente, welche für beide möglichen Interpretationen sprechen würden. Trotzdem ist festzuhalten, dass eine Abkühlung des Sees durch Wärmeentnahme helfen kann, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Lebensgemeinschaften im See etwas zu mildern, während ein Wärmeeintrag diese Auswirkungen noch verschärfen würde. Entsprechend ist ein Wärmeeintrag in den See langfristig kritischer zu beurteilen als eine Wärmeentnahme.

Basierend auf diesen Erwägungen und den Ergebnissen der Simulationsrechnungen können wir das Potenzial des Zugersees für die Wärmenutzung wie folgt abschätzen:

Eine Wärmeentnahme aus dem Zugersee in der Grössenordnung von 500 GWh pro Jahr, entsprechend einer durchschnittlichen Wärmenutzung von gut 50 MW während des ganzen Jahres und 100 MW während der Spitzenmonate im Winter ist für den Zugersee sicher unproblematisch. Wenn die Wärmeentnahme auf einen etwas grösseren Tiefenbereich verteilt wird, ist auch eine höhere Nutzung denkbar. Wenn die Erwärmung des Klimas in der Schweiz wie erwartet eintritt, wäre selbst eine deutlich grössere Wärmenutzung sogar wünschbar, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Temperaturen im See zu dämpfen.

Für den Wärmeeintrag in den Zugersee sind in erster Linie diejenigen Monate kritisch, während denen der See stabil geschichtet ist. Dies ist gleichzeitig aber auch die Zeit, in welcher der Bedarf für die Kühlung von Gebäuden am grössten ist. Ein Wärmeeintrag in der Grössenordnung von etwa 200 GWh während des Jahres mit maximalen Leistungen um 50 MW in den Monaten Juli und August (das Doppelte des Szenarios P1) dürfte keine negativen Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften haben.

Bei Nutzungen, welche die genannten Werte deutlich überschreiten, ist eine vertiefte Analyse der möglichen Auswirkungen angezeigt, insbesondere für den Fall eines starken Wärmeeintrags in Kombination mit der Klimaerwärmung. Sollten langfristig Wärmenutzungen in diesen Grössenordnungen geplant werden, ist es angezeigt, die Auswirkungen der bis zu diesem Zeitpunkt bestehenden Wärmenutzungen zu überwachen und zu analysieren.

Diese Schlussfolgerungen stimmen in etwa mit denjenigen überein, die in einer aktuellen Studie für den Bodensee abgeschätzt wurden, bei der eine Nutzung von bis zu 2 W/m^2 als unproblematisch betrachtet wurde [14]. Umgerechnet auf die Oberfläche des Zugersees würde dies einer Wärme- oder Kältelast von 76 MW entsprechen.

3.5.5 Auswirkungen auf die mögliche Wärmenutzung in anderen Gemeinden

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass das Potenzial des Zugersees für die Wärmenutzung rund eine Grössenordnung grösser ist, als die Nutzung, welche im Rahmen des Energieverbundes Zug im Endausbau aktuell geplant ist. Diese Nutzung würde entsprechend die Möglichkeiten anderer Anstössergemeinden nicht einschränken, den See in ähnlicher Masse als Wärmequelle oder –senke zu nutzen.

4. Referenzendokumente

| [Nr.] | Dokumentenbezeichnung | Version |
|-------|--|---------------------|
| [1] | Energieverbund Zug Projekthandbuch (Machbarkeitsstudie) | 1.0/12. August 2013 |
| [2] | Übergeordneter Bericht | 17.04.2014 |
| [3] | Eawag (1981). Wärmepumpen an Oberflächengewässern, Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, 19. | |
| [4] | Schmid M (2005). Kurzgutachten zur Wärmeenergienutzung im Zugersee, Bericht im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Kantons Zug, Eawag, Kastanienbaum | |
| [5] | Jaun L, Schmid M (2006). Temperaturveränderungen und Phosphat-Eintrag durch Kühlwassernutzung und Wärmeentnahme am Zugersee, Bericht im Auftrag des Amtes für Umweltschutz des Kantons Zug, Eawag, Kastanienbaum | |
| [6] | Goudsmit G-H, Burchard H, Peeters F, Wüest A (2003). Application of k-ε turbulence models to enclosed basins: The role of internal seiches. Journal of Geophysical Research, 107: 3230. | |
| [7] | Peeters F (1994). Horizontale Mischung in Seen | |
| [8] | Maiss M, Ilmberger J, Zenger A, Münnich K O (1994). A SF ₆ tracer study of horizontal mixing in Lake Constance. Aquatic Sciences 56: 307-328 | |
| [9] | AquaPlus (2004). Untersuchung der Fließgewässer und Seen im Kanton Zug und im Einzugsgebiet des Zugersees, Amt für Umweltschutz des Kantons Zug, Zug | |
| [10] | Peeters F, Wolf T (2011). Messung großskaliger Transportpfade im Bodensee als Basis für ein Modellsystem zur Schadstoffausbreitung: Drifterexperimente und Modellvergleich, Forschungsbericht BWPLUS, Förderkennzeichen: BWK 27009 | |
| [11] | 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 | |
| [12] | 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 | |
| [13] | Wüest A, Müller B (2010). Abnahme des Phosphorgehalts im Zugersee - Stand 2010, Eawag, Kastanienbaum | |
| [14] | Fink G, Schmid M, Wüest A (2014). Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat – capacities and limits, in Vorbereitung | |

Tabelle 4: Referenzen