
Energieverbund Zug Machbarkeitsstudie

Technischer Bericht Grundwasser

Auftraggeber:

Stadt Zug
Kanton Zug

Bearbeitung:

Georg Wyssling, Dr. Lorenz Wyssling AG
Walter Labhart, Dr. Heinrich Jäckli AG

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	6
2.4 Freigabe und Aktualisierung	7
3. Bedarfsdeckung	7
4. Gewässerschutz- und wasserrechtliche Randbedingungen	7
4.1 Gewässerschutz	7
4.2 Wasserrechtliche Konzession	7
5. Technische Machbarkeit	8
5.1 Voraussetzungen	8
5.2 Beurteilung aufgrund von Grundwasser-Modellrechnungen	8
5.2.1 Modellwahl und -abmessungen	8
5.2.2 Hydrogeologische und hydraulische Eingabeparameter	9
5.2.3 Anfangs- und Randbedingungen	11
5.2.4 Modellkalibrierung (Fließmodell)	11
5.2.5 Thermische Grundwasser-Modellierung «IST-Zustand»	13
5.2.6 Thermische Grundwasser-Modellierung «Anergienetz / Etappe 1»	19
5.3 Hinweise zum Bau der Grundwasserbrunnen	24
5.3.1 Konzept Brunnenbohrungen	24
5.3.2 Platzierung der Brunnen, minimale Brunnenabstände	25
5.3.3 Ergiebigkeit der Brunnen (Erwartungswert)	25
5.3.4 Kosten von Brunnenbohrungen	26
5.4 Risikobetrachtungen für Bau und Betrieb der Grundwasserbrunnen	26
5.4.1 Risiken beim Bau der Brunnen	26

5.4.2	Risiken im Betrieb der Brunnen	26
5.4.3	Massnahmen und Risikobewertung	27
5.5	Einhaltung der gewässerschutzrechtlichen Vorgaben	27
6.	Referenzdokumente	28

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Ausdehnung des Tiefengrundwassers (Modellgebiet) mit FE-Netz.	9
Abb. 2:	Modellgeometrie mit Darstellung des Tiefen-Aquifers.	10
Abb. 3:	Darstellung der im Modell berücksichtigten Zuströmbereiche und Abströmbereiche sowie der bestehenden Grundwassernutzungen im Tiefen-Aquifer (rote Kreise).	12
Abb. 4:	Vergleich der gemessenen (blau) und der modellierten Isohypsen (schwarz mit Farbbereichen) bei Mittelwasser.	13
Abb. 5:	Thermische Nutzungen des Tiefengrundwassers mit grafischer Darstellung des jährlichen Wärme- und Kälteeintrages.	16
Abb. 6:	Temperaturanomalien gemäss Modellrechnung für IST-Zustand 2013.	17
Abb. 7:	Temperaturanomalien gemäss Modellrechnung für IST-Zustand 2013 im Bereich VZ1 / VZ2 / KBZ (die rot gestrichelte Linie zeigt die Entfernung 100 m vom Rückgabebrunnen).	17
Abb. 8:	Temperaturanomalien gemäss Modellrechnung für IST-Zustand 2013 (Bild links) und Temperaturentwicklung im Förderbrunnen VZ1 seit Inbetriebnahme (Bild rechts).	18
Abb. 9:	Temperaturanomalien gemäss Modellrechnung für IST-Zustand 2013 (Bild links) und Temperaturentwicklung im Förderbrunnen VZ2 seit Inbetriebnahme (Bild rechts).	18
Abb. 10:	Übersicht Anergienetz Etappe 1 mit bestehenden Grundwasserbrunnen sowie mit möglichen Standorten für neue Grundwasserbrunnen [11].	19
Abb. 11:	Wärme- / Kältebedarf pro Grundwasserbrunnen Etappe 1 bei einer «ausgeglichenen Energiebilanz Grundwasser», Szenario 2 2050 [10].	21
Abb. 12:	Prognostizierte Ausdehnung der Temperaturfahnen nach 20 Jahren Laufzeit in Etappe 1 des Anergienetzes (ungünstiger Fall, ohne Optimierung Fokus/VZ2).	23
Abb. 13:	Prognostizierte Temperaturentwicklung in den Entnahmebrunnen der bestehenden und geplanten Nutzungen im Anergienetz (ungünstiger Fall, ohne Optimierung Fokus/VZ2).	23
Abb. 14:	Übersicht Anergienetz mit bestehenden und geplanten Grundwasserbrunnen [11].	25

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Abkürzungen	6
Tab. 2:	Angaben zu bestehenden thermischen Nutzungen des Tiefengrundwassers.	15
Tab. 3:	Wärme- / Kältebedarf je Grundwasserbrunnen Etappe 1, Szenario 2 CO ₂ -optimiert 2050 [10].	22
Tab. 4:	Referenzen	28

1. Zusammenfassung

Der technische Bericht zum Grundwasser untersucht, wie der Energieinhalt des Tiefengrundwassers mit konstanten Ausgangstemperaturen von 14-15°C für den Energieverbund der Stadt Zug genutzt werden kann. Das Tiefengrundwasser ist artesisch gespannt (Druckniveau über Terrain), liegt in einer Tiefe von 80-130 m und erstreckt sich über eine Fläche von über 10 km² von der Stadt Zug bis hinter Baar. Die natürliche Fliessbewegung des Tiefengrundwassers ist äusserst gering («Grundwassersee») und es finden nur sehr geringe Zu- und Abflüsse über die Ränder statt. Das tiefe Grundwasser wird bereits heute für die Beheizung und Kühlung verwendet. Aktuell wird netto 1.4 GWh/Jahr mehr thermische Energie eingetragen als wieder entzogen werden. Es überwiegen also die Kühlnutzungen.

Für die Untersuchung der Auswirkungen von thermischen Grundwassernutzungen auf das Tiefengrundwasser wurde ein Finite-Elemente-Modell aufgebaut, mit Annahmen hinterlegt und plausibilisiert. Es kann mit diesem Modell nachgewiesen werden, dass bei aktuell bestehenden Entnahme- und Rückgabeburgen keine unerlaubten Temperaturerhöhungen von $> \pm 3$ °C im Umkreis von 100 m um den Rückgabeburgen zu erwarten sind. Letztere Anforderung ist in der «Wegleitung Grundwasserschutz» des BUWAL (heute BAFU) definiert. Grund ist, dass sich die Temperaturanomalien nur sehr langsam aufbauen und einen annähernd stationären Zustand erreichen. Rasche Durchbrüche bis zu den Entnahmeburgen sind daher nicht zu befürchten.

Der Energieverbund Zug soll das Potential des Tiefengrundwassers aktiv nutzen können. Die Bearbeitung umfasst deshalb drei verschiedene Szenarien mit je vier Entnahme- und Rückgabeburgen im Zuger Stadtgebiet, wovon zwei Szenarien im Bericht beschrieben werden. Die Resultate zeigen, dass Temperaturveränderungen im Grundwasser selbst nach 20 Jahren Betriebszeit und einer angenommenen Abkühlung/Erwärmung von 5-7 °C auf einen kleinen Perimeter um die Rückgabeburgen beschränkt bleiben, solange der thermische Eintrag und Entzug (Energiebilanz) im Jahresverlauf ausgeglichen bleibt. Sollte aber beispielsweise ein Blockheizkraftwerk zur Heizunterstützung im Energieverbund eingesetzt werden, so reduziert sich die thermische Entnahme bei gleichbleibendem Eintrag. Als Resultat findet eine geringfügige Erwärmung statt. Letztere bleibt aber auch nach 20 Jahren Betriebszeit immer noch in dem aus gewässerschutzrechtlicher Sicht zulässigen Bereich. Ausnahme bildet die Wärmeanomalie um den Rückgabeburgen des VZ2, wo bei gleich bleibender Nutzung in etwa 10 Jahren eine Überschreitung der zulässigen Temperaturänderung in 100 m Distanz um den Rückgabeburgen zu erwarten ist. Für die bestehende Nutzung VZ2 ist daher im Rahmen des EV Zug eine teilweise Kühlung mit Seewasser anzustreben. Dadurch können die thermischen Auswirkungen auf das Tiefengrundwasser minimiert und die gesetzlichen Vorgaben eingehalten werden.

Für eine nachhaltige Grundwassernutzung ist eine mittel- bis langfristig annähernd ausgeglichene Wärmebilanz wichtig. Mit dem Energieverbund besteht die Möglichkeit diese Energiebilanzen zu kontrollieren und auszugleichen. Damit können die gewässerschutzrechtlichen Vorgaben jederzeit eingehalten werden. Die nutzungsbedingte Temperaturdifferenz ist hinsichtlich der Einhaltung der 3°C-Regel von untergeordneter Bedeutung. Grundsätzlich sind auch grössere Temperaturdifferenzen als im numerischen Modell vorgegeben möglich, solange diese nicht zu betrieblichen Problemen (z.B. chemische und bakteriologische Reaktionen) führen.

Aufgrund der Heterogenität des Untergrundes besteht bei Bohrungen zur Erschliessung des Tiefengrundwassers grundsätzlich stets auch ein gewisses Risiko von nicht ausreichend ergiebigen Brunnen. Daneben können bohrtechnische Schwierigkeiten auftreten. Diese lassen sich aber durch eine sorgfältige Planung und Ausführung der Bohrungen minimieren.

2. Einleitung

2.1 Ziel und Zweck

Der Energieverbund Stadt Zug sieht vor, zur Erzeugung von Kälte- und Wärmeenergie neben Seewasser auch das vorhandene Tiefengrundwasser zu nutzen. Das artesisch gespannte Tiefengrundwasser ist im Stadtgebiet von Zug in rund 80–130 m Tiefe anzutreffen und wird heute bereits an verschiedenen Stellen und teils seit mehr als 20 Jahren für thermische Zwecke genutzt.

Aufgrund der vergleichsweise hohen und konstanten Ausgangstemperatur des Tiefengrundwassers von ca. 14–15°C eignet sich das Grundwasser besser zur Wärmeengewinnung als das niedriger temperierte Seewasser. Aus diesem Grund wird angestrebt, den Wärmebedarf in erster Priorität mit Grundwasser zu decken. Um das thermische Gleichgewicht zu erhalten, muss dem Grundwasser etwa dieselbe Energiemenge in Form von Wärme (Kältebedarf) zugeführt werden. Die thermische Nutzung des Tiefengrundwassers setzt daher langfristig eine ausgeglichene Wärme- / Kältebilanz voraus.

Im Hinblick auf eine thermische Nutzung des Tiefengrundwassers waren im Rahmen der Machbarkeitsstudie folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Kälte- und Wärmemengen können unter Berücksichtigung der bestehenden Nutzungen maximal genutzt werden?
- Mit welchen Wassermengen kann je Grundwasserbrunnen (Entnahme/Rückgabe) gerechnet werden?
- Welches sind die optimalen Standorte von Grundwasserbrunnen?
- Können die gewässerschutzrechtlichen Auflagen betreffend der maximal zulässigen Temperaturänderungen im Grundwasser eingehalten werden bzw. sind die Nutzungen bewilligungsfähig?
- Welches sind die technischen Vorgaben für den Bau der Grundwasserbrunnen und mit welchen Kosten ist in etwa zu rechnen?
- Mit welchen Problemen ist beim Bau und im Betrieb der Anlagen zu rechnen und wie können diese bestmöglich vermieden werden?

2.2 Grundlagen

Die wichtigsten verwendeten Grundlagen und Dokumente sind in Kap. 6, Tabelle 4 aufgelistet.

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
GSchG	Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer. (Gewässerschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. Januar 2014)
GSchV	Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. Januar 2014)

Tab. 1: 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. Bedarfsdeckung

Angaben zur Deckung des geplanten Wärme- und Kältebedarfs durch Grundwasser sind im Projekthandbuch MBS EV Stadt Zug [1] sowie in der Datenzusammenstellung vom 26.11.2013 der Hans Abicht AG [10] enthalten.

4. Gewässerschutz- und wasserrechtliche Randbedingungen

4.1 Gewässerschutz

Die Wärmenutzung aus Boden und Untergrund ist auf Bundesebene über das Gewässerschutzgesetz GSchG und die Gewässerschutzverordnung GSchV geregelt. Gemäss GSchV darf die «Temperatur des Grundwassers durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem natürlichen Zustand um höchstens 3°C verändert werden; vorbehalten sind örtlich eng begrenzte Temperaturveränderungen». In der Wegleitung Grundwasser des BAFU wird diese Vorgabe praxistauglich definiert. Demnach muss die Einhaltung dieser Bedingung in 100 m Entfernung von der Rückgabestelle erfüllt sein.

Konkret bedeutet dies für die thermische Nutzung des Tiefen-Aquifers:

- Die Temperaturveränderung in 100 m Distanz um eine Rückgabestelle darf zu keinem Zeitpunkt grösser $\pm 3^{\circ}\text{C}$ sein, und
- die Temperaturveränderungen des Grundwasserträgers durch die Gesamtwirkung mehrerer Anlagen dürfen maximal $\pm 3^{\circ}\text{C}$ betragen.

4.2 Wasserrechtliche Konzession

Eine thermische Nutzung des Tiefengrundwassers benötigt eine kantonale Bewilligung resp. bei Entnahmen $> 300 \text{ l/min}$ eine *Konzession*.

Für das Bewilligungsverfahren ist ein zweistufiges Vorgehen vorgesehen. In einem ersten Schritt wird jeweils das Gesuch für die Sondierbohrung resp. den Bau des Versuchsbrunnens eingereicht. Gestützt auf die Resultate und Auswertungen dieser Vorabklärungen wird anschliessend das Konzessionsgesuch für den Wasserbezug resp. die thermische Nutzungen beim Amt für Umweltschutz des Kantons Zug gestellt.

5. Technische Machbarkeit

5.1 Voraussetzungen

Die technische Machbarkeit der im Rahmen der EV Zug geplanten thermischen Grundwassernutzung ist von folgenden Faktoren abhängig:

- a) *Temperatur des Förderwassers:*
Voraussetzung für den einwandfreien Betrieb einer thermischen Grundwassernutzung ist eine weitgehend konstante Ausgangstemperatur des Förderwassers. Bei den vorliegenden hydraulischen Verhältnissen führt der Doubletten-Betrieb zwangsläufig zu einer Rezirkulation des thermisch veränderten Rückgabewassers zu den Förderbrunnen. Der hydraulische Kurzschluss darf, auch langfristig betrachtet, nicht zu einer Temperaturänderung des Förderwassers führen, welche den Betrieb der Anlage beeinträchtigen könnte.
- b) *Ausreichende Kapazität der Förder- und Rückgabeburunen:*
Die Grundwasserbrunnen müssen es erlauben, die erforderliche Wassermenge entnehmen und anschliessend wieder in den Grundwasserleiter zurückgeben zu können. Dies setzt eine ausreichende Mächtigkeit und Durchlässigkeit der Grundwasser führenden Schichten voraus. Daneben müssen die Brunnen aber auch fachmännisch erstellt werden, so dass diese eine optimale Ergiebigkeit erzielen sowie eine hohe Lebensdauer erwarten lassen.
- c) *Keine betrieblichen Probleme:*
Eine wichtige Voraussetzung ist ferner, dass im Betrieb der Anlage keine Beeinträchtigungen auftreten, welche zu Betriebsstörungen oder zu einem Ausfall führen. In diesem Zusammenhang kommt der chemischen Beschaffenheit (reduzierende Verhältnisse, ein Sauerstoffeintrag in das Grundwasser ist daher unbedingt zu vermeiden) sowie auch der Feinstoffführung (Trübung, Sand) des Förderwassers grosse Bedeutung zu.

Neben der rein technischen Machbarkeit müssen aber auch die bewilligungstechnischen Voraussetzungen erfüllt sein. Dies bedingt die Einhaltung der gewässerschutzrechtlichen Auflagen, betreffend die maximal zulässigen Temperaturänderungen des Grundwassers (vgl. Kap. 4). Zudem dürfen durch den Betrieb der neuen Anlagen keine bestehenden Nutzungen bzw. keine Rechte Dritter in unzulässiger Weise tangiert werden.

5.2 Beurteilung aufgrund von Grundwasser-Modellrechnungen

Die thermischen Auswirkungen der bestehenden sowie auch von neu geplanten Anlagen lassen sich mit Hilfe von numerischen Modellrechnungen prognostizieren. Aus diesem Grund wurde in einem ersten Schritt ein 3D-FE-Grundwasserfliessmodell für den Tiefen-Aquifer erstellt. Basierend darauf sind für verschiedene Szenarien gekoppelte hydraulisch-thermische Modellierungen vorgenommen worden.

5.2.1 Modellwahl und -abmessungen

Um die hydraulischen und thermischen Auswirkungen von bestehenden Nutzungen sowie auch von neuen Anlagen genauer abschätzen zu können, wurde das Tiefengrundwasservorkommen mit Hilfe eines numerischen Grundwassermodells nachgebildet. Als Rechenmodell wurde das Programm «FEFLOW» Version 6.1 der WASY GmbH gewählt. Bei diesem Grundwassermodell wird die Strömungsgleichung iterativ nach dem Finiten Elemente (FE)-Verfahren gelöst. Dieses erlaubt eine flexible Vernetzung, daher kann das Gitternetz an Brunnen für die Entnahme und Rückgabe von Grundwasser optimal angepasst werden.

Das numerische Fliessmodell berücksichtigt das gesamte, rund 4–5 km lange und rund 2.5 km breite artesisch gespannte tiefe Grundwasservorkommen von Baar–Zug. Das Modellgebiet

wurde in Dreiecks-Elemente zerlegt und in den relevanten Bereichen lokal verfeinert. Insgesamt weist das FE-Modell rund 250'000 Zellen auf (Abb. 1).

Das 3D-Grundwasserströmungsmodell ist mit einem instationären Wärmetransportmodell gekoppelt. Da das Tiefengrundwasser unter artesischem Druck steht, wurden die Strömung und der Wärmetransport entsprechend für gespannte Verhältnisse modelliert.

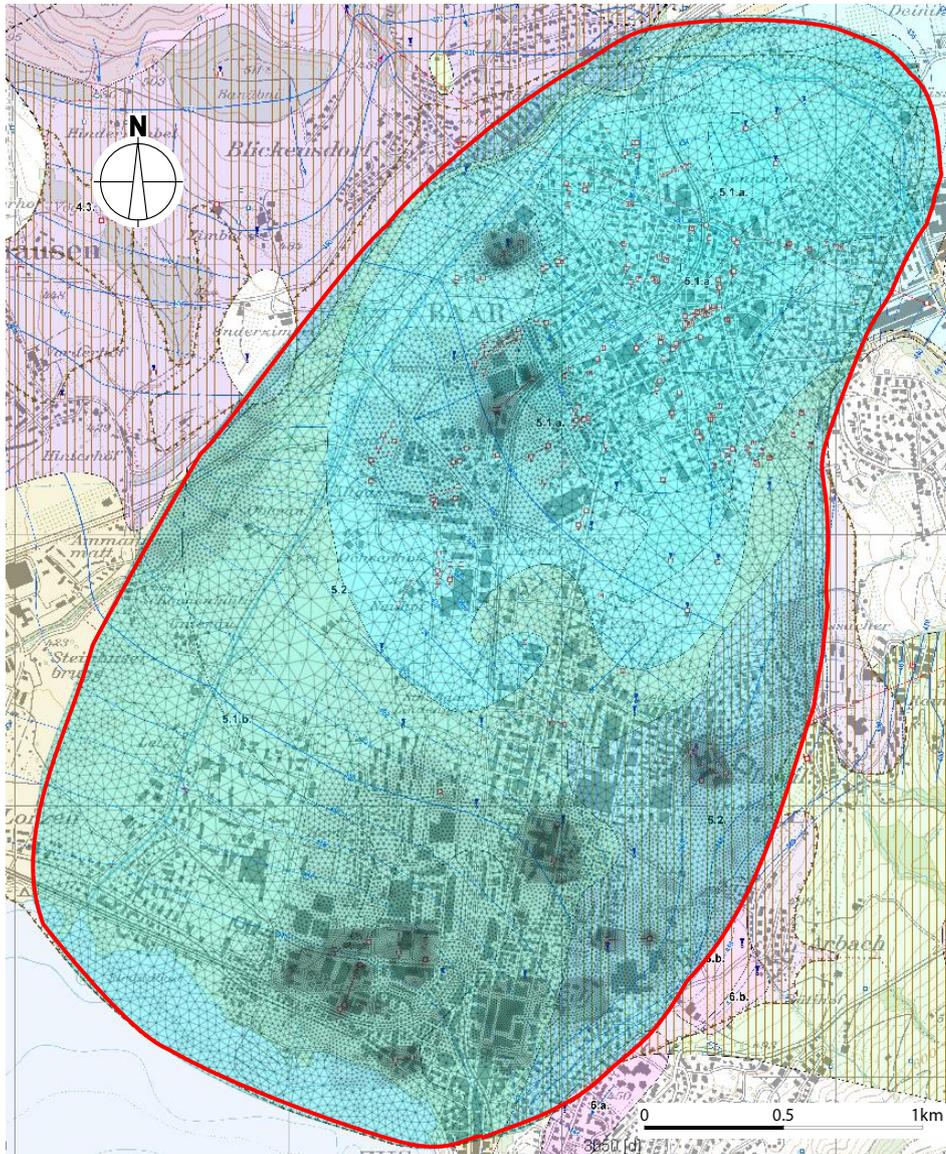


Abb. 1: Ausdehnung des Tiefengrundwassers (Modellgebiet) mit FE-Netz.

5.2.2 Hydrogeologische und hydraulische Eingabeparameter

Geometrie des Schotter-Grundwasserleiters

Um die Modellgeometrie hinreichend genau wiedergeben zu können wurde das Modell 3-dimensional aufgebaut und vertikal in 5 Schichten unterteilt (Abb. 2). Zur Ermittlung der Aquifer-Geometrie wurden die Angaben aus den vorliegenden Tiefenbohrungen sowie die Angaben auf der Geologischen Karte des Kantons Zug zur Tiefenlage und zum Verlauf der Felsoberfläche in einer Datenbank zusammengestellt. Die so aufbereiteten Daten wurden anschliessend nach dem Kriging-Verfahren interpoliert.

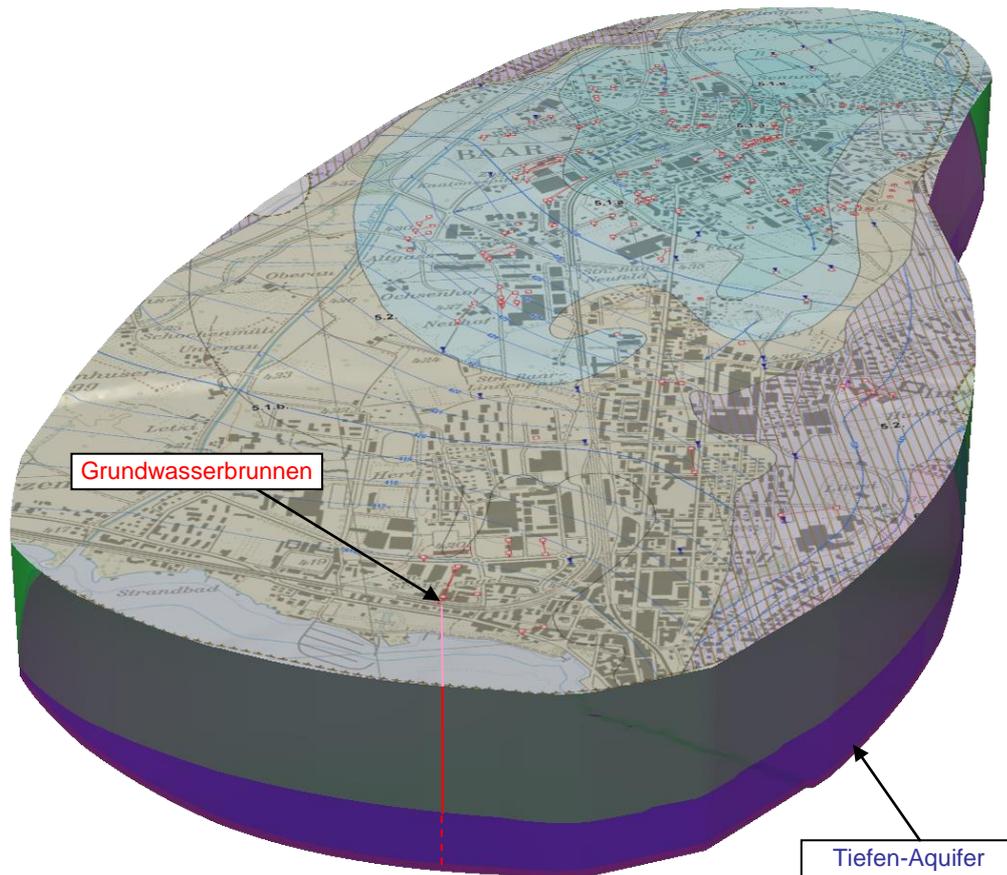


Abb. 2: Modellgeometrie mit Darstellung des Tiefen-Aquifers.

Die Sohle des tiefen Grundwasservorkommens liegt im Stadtgebiet von Zug bei rund 300–310 m ü.M. und fällt in Richtung Baar auf ca. 280–290 m ü.M. ab. Die Obergrenze des Tiefen-Aquifers wurde gestützt auf die vorhandenen Bohraufschlüsse sowie durch rechnerische Interpolationsverfahren ermittelt. Sie liegt im Modell zwischen 340 und 350 m ü.M. Dementsprechend beträgt die Mächtigkeit des im Modell erfassten Grundwasserkörpers rund 50–70 m in Baar und ca. 30–50 m im Stadtgebiet Zug.

Durchlässigkeit

Die als Tiefengrundwasserleiter wirkenden fluvioglazialen Sande und sandigen Kiese sind sehr heterogen aufgebaut. Die besser durchlässigen Schotter wechsellagern mit sehr gering durchlässigen Seeablagerungen und Moränen und sind z.T. mit diesen verfangert. Der Durchlässigkeitsbeiwert (k-Wert) variiert gemäss Pumpversuchsergebnissen zwischen 1×10^{-5} und 5×10^{-4} m/s. Der hydraulische Gradient ist mit 3 ‰ flach und nach Südsüdwesten in Richtung des Zugersees orientiert.

Für die Modellrechnungen wurde dem Schotter-Grundwasserleiter zunächst eine mittlere hydraulische Durchlässigkeit von $K = 1 \times 10^{-4}$ m/s vorgegeben. Dieser Wert wurde während der Kalibrierung im Rahmen der Plausibilität lokal modifiziert und zusätzlich mit den Druckspiegelmessungen während des im Sommer 1986 durchgeführten Langzeitpumpversuches validiert. Im kalibrierten hydraulischen Modell schwanken die k-Werte im Bereich von 1×10^{-5} und 5×10^{-4} m/s und entsprechen damit den gemessenen Feldwerten.

5.2.3 Anfangs- und Randbedingungen

Stationäre Modellrechnungen bedürfen nicht zwingend der Vorgabe von hydraulischen *Anfangsbedingungen*. Diese führen jedoch zu einer grösseren numerischen Stabilität, weshalb dem Modell als Ausgangswasserspiegel die natürlichen Grundwasserdruckpotentiale basierend auf den Angaben der Dr. Lorenz Wyssling AG [7] vorgegeben wurden.

Um eine möglichst gute Übereinstimmung der Modellresultate mit den natürlichen Verhältnissen zu erzielen, müssen die Modell-*Randbedingungen* die tatsächlichen Gegebenheiten möglichst genau abbilden. Der Wahl der Randbedingungen kommt daher eine recht grosse Bedeutung zu.

Randzuflüsse/ -abflüsse

Die randlichen Zuflüsse sind gering und finden vor allem im Norden und Osten, untergeordnet auch im Nordwesten des Modellgebietes statt. Eine Abschätzung dieser Zuflüsse ist naturgemäss schwierig. In erster Annäherung wurde der Randzufluss basierend auf dem k-Wert, dem hydraulischen Gradienten und der Grundwassermächtigkeit abgeschätzt.

Die entsprechenden Annahmen sind im Rahmen der Modellkalibrierung überprüft und angepasst worden. Die Kalibrierung führte schliesslich zu einem Randzufluss zwischen minimal 0.1 und maximal 0.5 l/min pro Laufmeter Modellrand (Abb. 3). Analog wurde auch der Abfluss nach Süden hin abgeschätzt. Aufgrund der ausschliesslich auf den Südrand begrenzten Abströmfläche resultieren hier Abflussmengen von 1 l/min pro Laufmeter.

5.2.4 Modellkalibrierung (Fließmodell)

Nachbildung der Grundwasserströmung unter natürlichen Verhältnissen

Zur Kalibrierung des stationären Strömungsmodells wurde die Darstellung der Grundwasserdruckpotentiale gemäss der Karte der Dr. Lorenz Wyssling verwendet [7].

Ziel der Kalibrierung war eine möglichst gute Übereinstimmung der berechneten Grundwasserstände mit dem Verlauf der Grundwasserisohypsen als Grundlage für das Wärmetransportmodell. Der Kalibrierungsprozess erfolgte iterativ in mehreren Schritten:

- 1) Festlegung der Zu- und Abflussmengen und der Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten in einer ersten Annäherung.
- 2) In einem iterativen Prozess erfolgte die Feineinstellung der Randzuflüsse.
- 3) Durchführung einer Sensitivitätsanalyse.
- 4) Plausibilitätsprüfung der resultierenden Bilanzgrössen.

Da die Eingangsdaten für das hydraulische Modell gering sind, wurde das kalibrierte Modell validiert und auf seine Reproduzierbarkeit für die abweichende hydraulische Situation beim Pumpversuch im Sommer 1986 überprüft. Hierbei konnte mit den Modellannahmen die Absenkung von über 20 m im Pumpversuchsbrunnen (Entnahmemenge 1'500 l/min über eine Zeitdauer von 45 Tagen) beim Verwaltungszentrum in Zug sowie die weiträumige Absenkung von mehr als 2.5 m über fast das gesamte Modellgebiet dargestellt werden, was auf eine gute Aussagekraft des Modells hinweist.

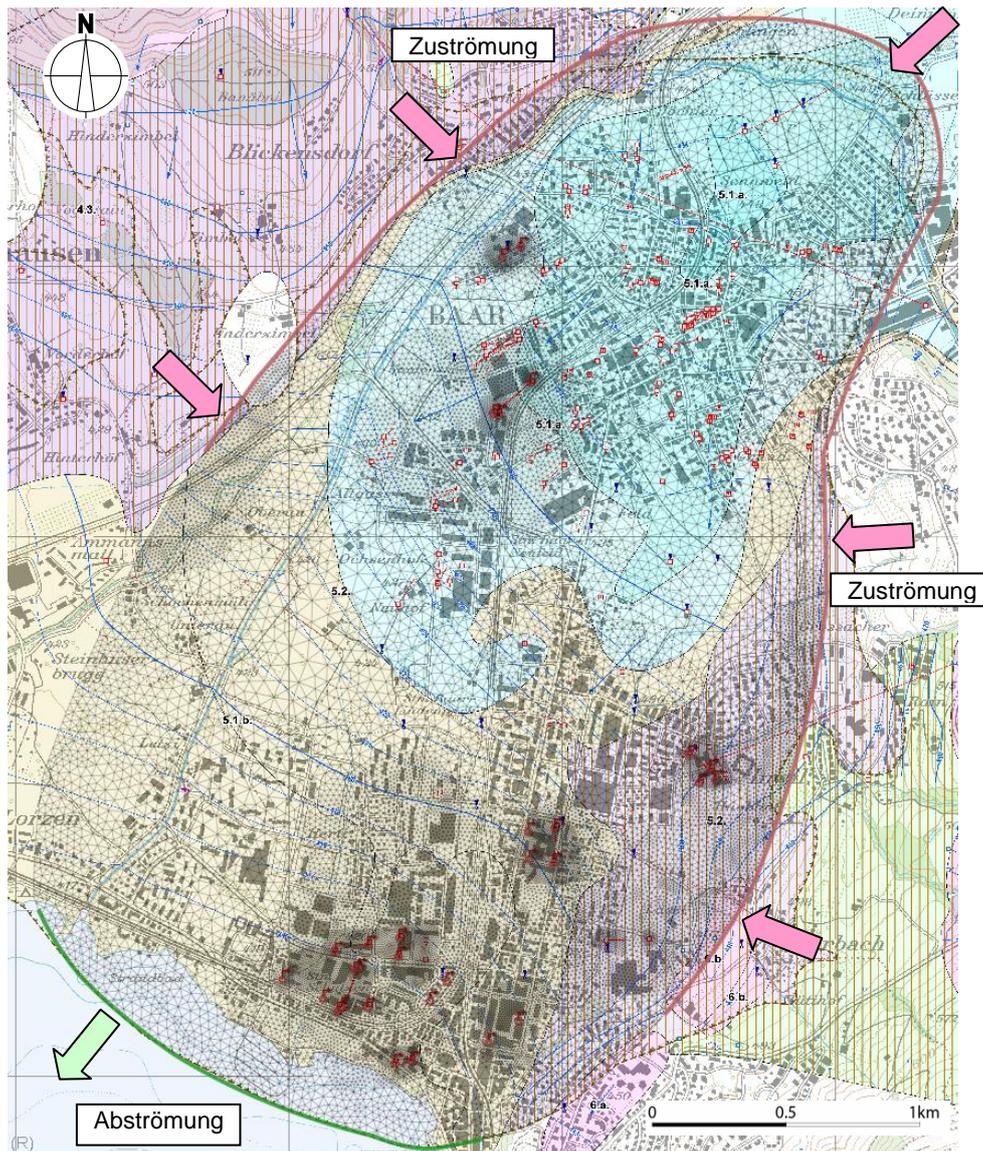


Abb. 3: Darstellung der im Modell berücksichtigten Zuströmbereiche und Abströmbereiche sowie der bestehenden Grundwassernutzungen im Tiefen-Aquifer (rote Kreise).

Stationäres Strömungsmodell

Den aus dem Kalibrierungsprozess resultierenden Verlauf der Grundwasseroberfläche zeigt die Abb. 4. Die im Modell berechneten Grundwasserspiegelhöhen stimmen für weite Bereiche gut mit den aus Messungen resp. den daraus abgeleiteten Isohypsen des Druckspiegels im Tiefen Grundwasserleiter überein [7]. Unterschiede zwischen den berechneten Grundwasserständen und den konstruierten Isohypsen sind im südwestlichen Modellgebiet vorhanden, wo allerdings auch keine Messungen vorliegen und die Interpolation der Isohypsen entsprechend unsicher ist.

Bewertung der hydraulischen Modellkalibrierung

Das kalibrierte Grundwasserströmungsmodell zeigt eine gute Übereinstimmung der berechneten Wasserspiegelhöhen mit den aus Messungen konstruierten Isohypsen der Grundwasserdruckfläche. Die gewählten Durchlässigkeiten entsprechen etwa den aus Pumpversuchen ermittelten Werten.

Der Zustrom von Grundwasser aus dem Norden in das Modellgebiet hinein und der Abstrom im Süden betragen je rund 820 l/min. Dieser vergleichsweise geringe Wasserdurchsatz stimmt mit

den Resultaten eines Grosspumpversuches überein, bei dem eine begrenzte Feldergiebigkeit nachgewiesen werden konnte.

Insgesamt liegen die aus der Modellkalibrierung resultierenden Modell Zu- und Abflüsse durchwegs in einer plausiblen Grössenordnung.

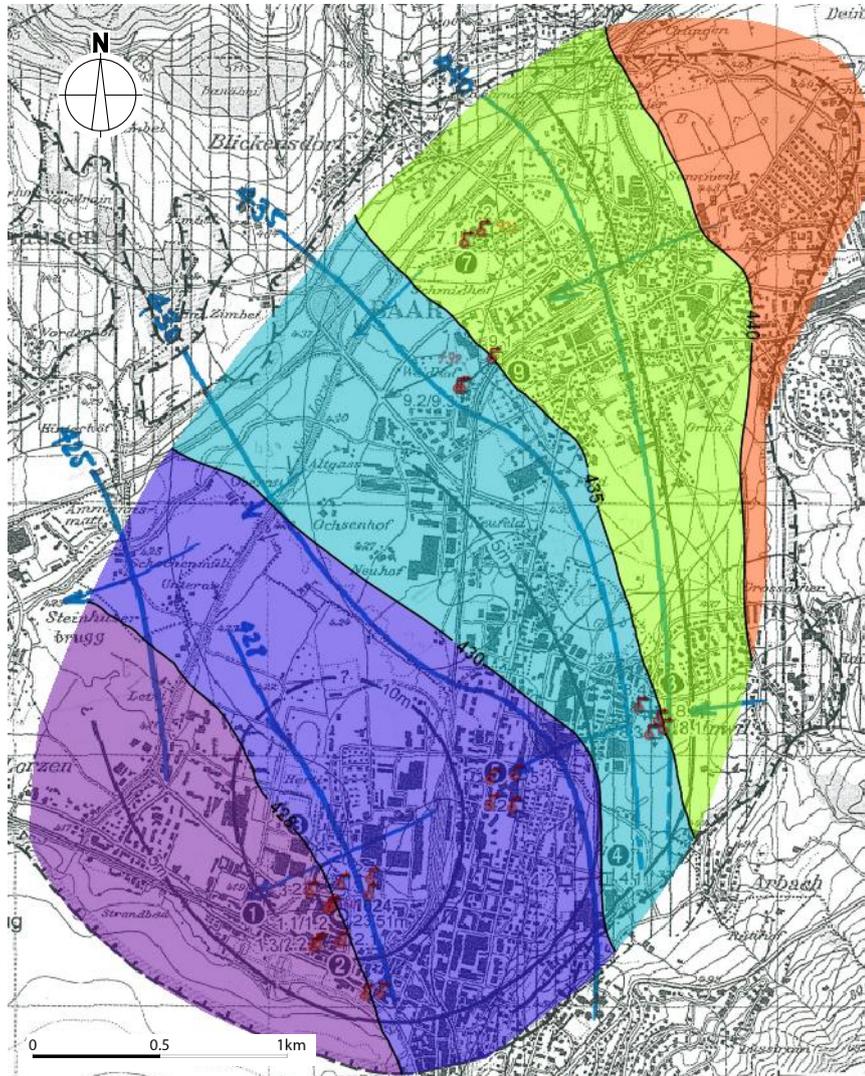


Abb. 4: Vergleich der gemessenen (blau) und der modellierten Isohypsen (schwarz mit Farbbereichen) bei Mittelwasser.

5.2.5 Thermische Grundwasser-Modellierung «IST-Zustand»

Zielsetzungen

Mit dem Wärmetransportmodell sollte die thermische Auswirkung der bestehenden Anlagen auf den Tiefen-Grundwasserleiter von Baar in einer Langzeitprognose geprüft werden. Dies vor dem Hintergrund, dass die Grundwassererneuerung nur sehr gering ist und bei einer thermisch nicht ausgeglichenen Nutzung eine kontinuierliche Temperaturveränderung zu befürchten ist, die eine Minderung des Wirkungsgrades bis hin zum nicht mehr wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen nach sich ziehen könnte.

In einem weiteren Schritt sollte das Modell durch Prognosesimulationen von zukünftigen energetischen Grundwassernutzungen unterstützend bei der Optimierung eines geplanten Energienetzes verwendet werden. Hierbei sollten Aussagen zur Standortoptimierung für potentielle Entnahme- und Rückgabeburgen sowie zur maximal möglichen Wärme-/ Kältenutzung geliefert werden.

Thermische Anfangs- und Randbedingungen

Der Wärmetransport im Untergrund wird durch Konvektion und Advektion dargestellt. Berücksichtigt werden die spezifische Wärmekapazität c und die Wärmeleitfähigkeit λ des Grundwassers und der Gesteinsschichten im Untergrund sowie die thermische Dispersion. Analog zum Strömungsmodell wurden für das instationäre Wärmetransportmodell geeignete Anfangs- und Randbedingungen definiert.

Den thermischen Modellrechnungen wurde als Anfangsbedingung generell eine Ausgangstemperatur des Tiefengrundwassers von 14 °C zu Grunde gelegt. Dieser Wert entspricht in etwa der mittleren Grundwassertemperatur in den vorhandenen Grundwasserbrunnen. Über die seitlichen Modellränder erfolgen weitere Wärmeeinträge. Diesen Wasserzuflüssen wurde dieselbe Temperatur mitgegeben.

Für die Berücksichtigung der atmosphärischen Wärmeeinstrahlung sowie des anthropogen bedingten Wärmeeintrags wurde der obersten Modellschicht flächendeckend eine konstante Jahresmitteltemperatur zugewiesen. Der Temperaturwert wurde vereinfachend ebenfalls mit 14 °C vorgegeben.

Neben den genannten Wärmeeinträgen wurde im Modell auch der geothermische Wärmestrom von unten resp. aus dem Erdinnern berücksichtigt. Dieser vertikale Zustrom über die unterste Modellschicht beträgt 65 W/m².

Bestehende Nutzungen

Zur Modellierung des thermischen Ist-Zustandes des Tiefen-Grundwassers wurden die bestehenden Grundwassernutzungen mit dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme sowie mit den Angaben zu den Wärme-/ Kälteentzugleistungen berücksichtigt [3, 4, 5, 6, 7].

In der folgenden *Tab. 2* sind die wichtigsten Daten zu den energetischen Grundwassernutzungen zusammengestellt. Die *Abb. 5* zeigt die Nutzungsstandorte und die Wärmebilanz der bisherigen Nutzungen auf. Insgesamt resultiert für die installierten Anlagen ein Netto-Wärmeeintrag von ca. 1.4 GWh/Jahr, d.h. aktuell überwiegen die Kühlnutzungen.

Anlage	Zeitraum	Heiz- / Kühlleistung ca. MWh/a		Temperaturänderung ΔT	
		Winter	Sommer	Winter	Sommer
VZ1	1991-2003	-175	96	-5.7	2.8
	2003-2013	-115	77	-4.5	1.5
VZ2	1998-2007	-353	577	-5.7	3.3
	2007-2013	165	980	2.5	5.5
KBZ	2001-2008	-222	250	-5.0	3.0
	2008-2013	-216	431	-4.1	7.3
GIBZ	1998-2013	-97	262	-5.5	2.5
Foyer	2011-2013	-354	269	-3.0	1.5
Kirchengemeinde	2011-2013	-124	92	-4.0	4.0
Zuger Kantonsspital	2006-2013	-428	1'585	-8.0	10.0
Waldmannshalle	1998-2013	-264	270	-4.0	4.0
Glencore	2000-2013	-1'147	1'832	-5.0	6.0

Tab. 2: Angaben zu bestehenden thermischen Nutzungen des Tiefengrundwassers.

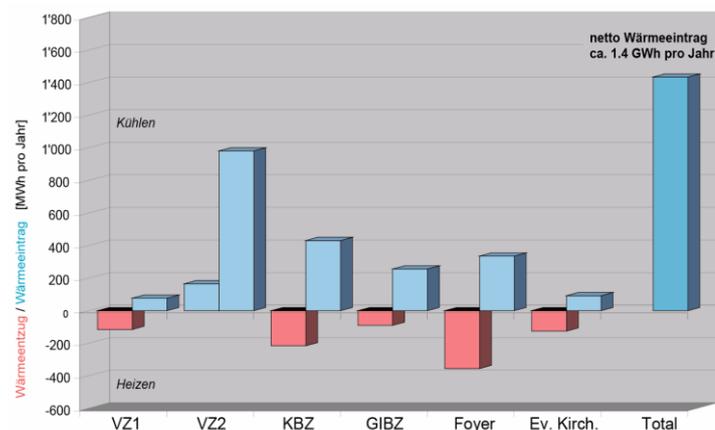


Abb. 5: Thermische Nutzungen des Tiefengrundwassers mit grafischer Darstellung des jährlichen Wärme- und Kälteeintrages.

Thermische Materialparameter

Durch Vermischungsvorgänge und Geschwindigkeitsunterschiede kommt es zur Aufweitung der Kältefahnen im Abstrombereich. Dieser Vorgang wird als *Dispersion* bezeichnet. Dabei ist die Dispersion in Strömungsrichtung (longitudinal) immer grösser als senkrecht (transversal) dazu. Die Dispersivität oder Vermischungslänge spiegelt dabei die Inhomogenitäten des Grundwasserleiters wieder. Dem Modell wurden eine longitudinale Dispersivität von 5 m und eine transversale Dispersivität von 0.5 m zu Grunde gelegt.

Für die *spezifische Wärmeleitfähigkeit* λ wurden folgende Werte im Modell verwendet, wie sie für Grundwasser bzw. für die sandig-kiesige Lockergesteinsmatrix im schweizerischen Mittelland charakteristisch sind:

- Grundwasser 0.65 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Gesteinsmatrix 3.0 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Die *spezifische Wärmekapazität* c wurde mit den nachstehend aufgeführten Werten im Modell berücksichtigt:

- Grundwasser 4.2 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Gesteinsmatrix 2.5 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Kalibrierung des thermischen Modells

Eine Kalibrierung des Wärmetransportmodells ist im vorliegenden Fall nur bedingt möglich, da sich die Temperaturanomalien im Abstrom der Rückgabeburgen nur sehr langsam aufbauen und erst nach relativ langer Zeit einen quasi-stationären Zustand erreichen. Selbst die bereits seit mehr als 20 Jahren betriebene Nutzung beim VZ1 zeigt in den Entnahmebrunnen noch keine deutliche Temperaturänderung resp. einen Trend, welche für eine Kalibrierung genutzt werden könnten. Lediglich im Förderbrunnen der Nutzung VZ2 ist im Jahr 2013 erstmals eine messbare Zunahme der Grundwassertemperatur um ca. 0.4 °C festgestellt worden.

In *Abb. 6* sind Temperaturanomalien um die Rückgabeburgen, wie sie sich gemäss Modellrechnung unter Berücksichtigung der bisherigen Betriebszeit per Ende 2013 einstellen, dargestellt. Der mit dem Modell berechnete thermische «Ist-Zustand» wurde als Grundlage zur Simulation der zukünftigen Entwicklung der Wärmefahnen berücksichtigt.

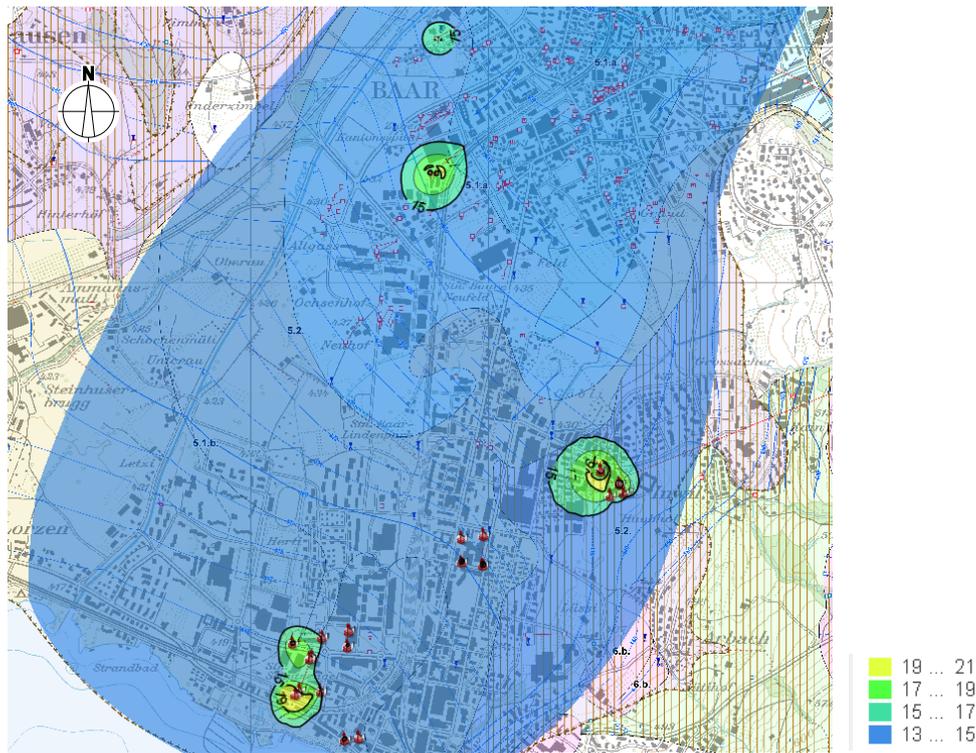


Abb. 6: Temperaturanomalien gemäss Modellrechnung für IST-Zustand 2013.

Das Gebiet mit den Nutzungen VZ1, VZ2 und KBZ zeigt wegen der hohen Nutzungsdichte sowie der stark einseitigen Wärmebilanz einzelner Anlagen die stärkste thermische Veränderung des Tiefengrundwassers (Abb. 7) an. Das 3°C Kriteriums in 100 m Entfernung von der Einleitstelle wird gemäss numerischer Modellierung bis zum jetzigen Zeitpunkt allerdings einzig im gemeinsamen Abstrombereich um die Rückgabebrunnen VZ1 und VZ2 knapp überschritten.

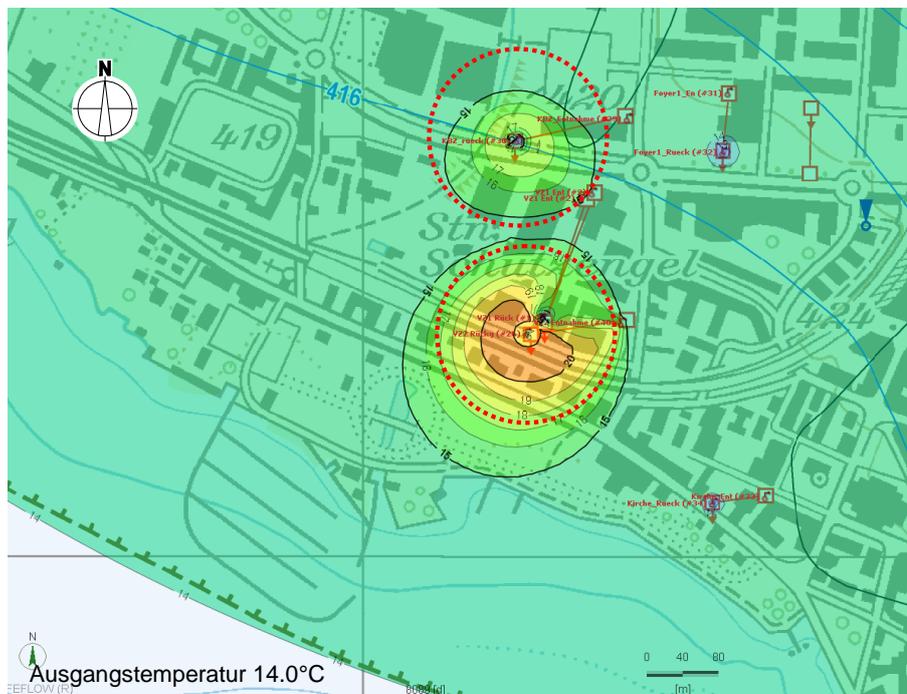


Abb. 7: Temperaturanomalien gemäss Modellrechnung für IST-Zustand 2013 im Bereich VZ1 / VZ2 / KBZ (die rot gestrichelte Linie zeigt die Entfernung 100 m vom Rückgabebrunnen).

Die Abb. 8 veranschaulicht die zeitliche Temperaturentwicklung in den beiden Entnahme- und dem Rückgabebrunnen der Brunnen der Nutzung VZ1. Der Temperaturanstieg in den Entnahmebrunnen ist mit $+0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ momentan noch gering. Diese leichte Erwärmung wird durch die zunehmende Beeinflussung des Förderbrunnens VZ1 durch die Wärmefahne um den Rückgabebrunnen des KBZ verursacht.

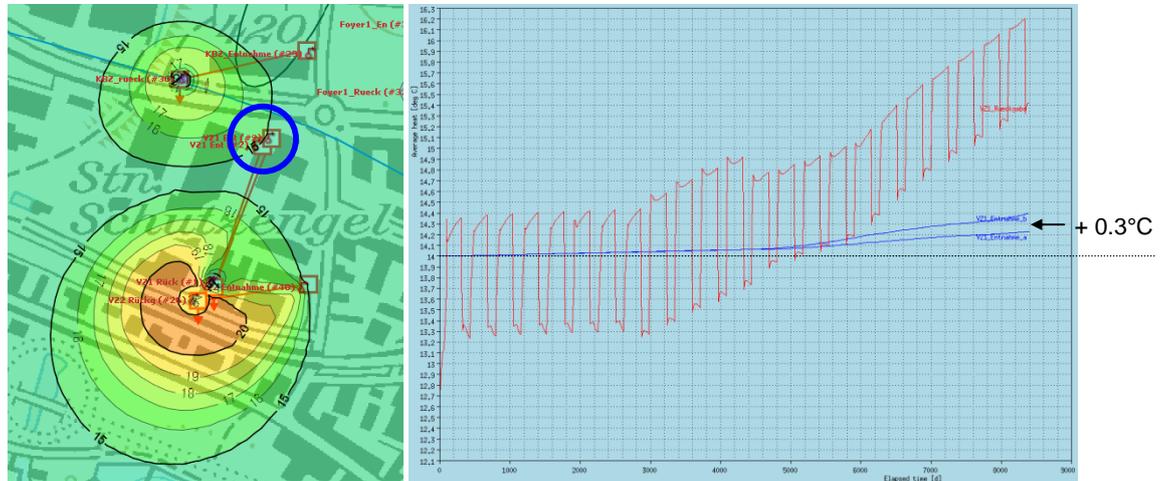


Abb. 8: Temperaturanomalien gemäss Modellrechnung für IST-Zustand 2013 (Bild links) und Temperaturentwicklung in den Förderbrunnen sowie im Nahbereich des Rückgabebrunnens VZ1 seit Inbetriebnahme (Bild rechts).

Im Bereich der Nutzung VZ2 steigt die Temperatur im Entnahmebrunnen sowohl gemäss den vorliegenden Messdaten als auch in der Modellsimulation bis zum heutigen Zeitpunkt um $+0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ an (Abb. 9). Die im Vergleich zu den anderen Nutzungen spürbare Erwärmung resultiert aus der einseitigen Wärmebilanz mit hoher Kühlnutzung sowie zusätzlich durch den thermischen Kurzschluss mit Heranziehen der Wärmefahne des eigenen Rückgabebrunnens. Die seit 2007 gesteigerte Kühlnutzung macht sich zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht mit einem verstärkten Temperaturanstieg bemerkbar.

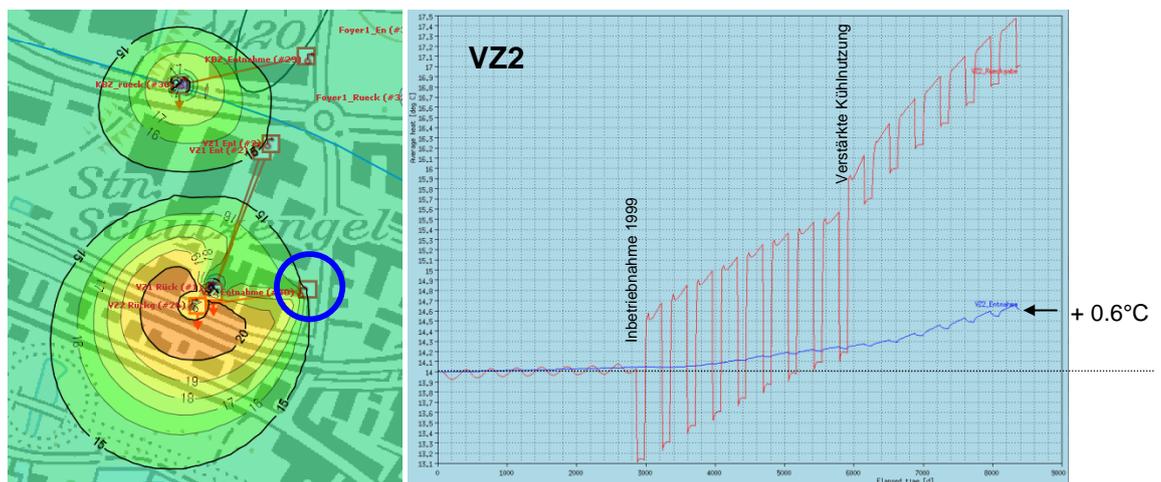


Abb. 9: Temperaturanomalien gemäss Modellrechnung für IST-Zustand 2013 (Bild links) und Temperaturentwicklung im Förderbrunnen sowie im Nahbereich des Rückgabebrunnens VZ2 seit Inbetriebnahme (Bild rechts).

Fazit

Gemäss Wärmetransportmodell bauen sich die Temperaturanomalien um die Rückgabebrunnen nur sehr langsam auf. Rasche thermische Durchbrüche zu den Entnahmebrunnen sind gemäss Modell nicht zu befürchten. Dieses Ergebnis deckt sich mit den bisherigen Beobach-

tungen der Grundwassertemperaturen in den Förderbrunnen, welche weder kurzzeitige Beeinflussungen noch langfristige spürbare Temperaturänderungen erkennen lassen.

Unausgeglichene Energiebilanzen führen hingegen gemäss Modell zu einer allmählichen Erwärmung (Kühlen) resp. Abkühlung (Heizen) und zur Ausbildung von entsprechenden Temperaturanomalien. Dies hat zur Folge, dass nach weiteren 10 Jahren Betrieb der Nutzung VZ2 der Bereich mit Temperaturänderung $>3^{\circ}\text{C}$ in südliche Richtung bis etwas mehr als 100 m Distanz um den Rückgabebrunnen reichen wird (Vorgabe GSchV knapp nicht eingehalten). Im Entnahmebrunnen der Nutzung VZ2 wird die Temperaturzunahme bei Aufrechterhaltung der aktuellen «kältelastigen» Nutzung im selben Zeitraum um $+0.6^{\circ}\text{C}$ prognostiziert. Alle anderen bestehenden Nutzungen erfahren eine nur sehr langsame, für den Betrieb der Anlage nicht relevante Veränderung der Temperatur im Förderbrunnen.

5.2.6 Thermische Grundwasser-Modellierung «Anergienetz / Etappe 1»

Übersicht

In einer ersten Etappe soll mit dem Anergienetz EV Stadt Zug Heiz- und Kühlenergie im südlichen Stadtteil von Zug zur Verfügung gestellt werden. Als Ankerprojekte resp. als wichtige Energiebezüger sind die Liegenschaften auf den Arealen «Fokus» und «Metalli» vorgesehen. Im Perimeter der Etappe 1 sind bereits verschiedene thermische Nutzungen des Tiefengrundwassers vorhanden (vgl. Kap. 4.2.5).

Mit Hilfe des Wärmetransportmodells wurde die generelle Machbarkeit der geplanten energetischen Grundwassernutzung geprüft. Hierfür wurden ausgehend vom prognostizierten Kälte- und Wärmebedarf sowie basierend auf der maximal zu erwartenden Ergiebigkeit von Grundwasserbrunnen vier mögliche Doubletten-Standorte festgelegt und genauer untersucht (Abb. 10).

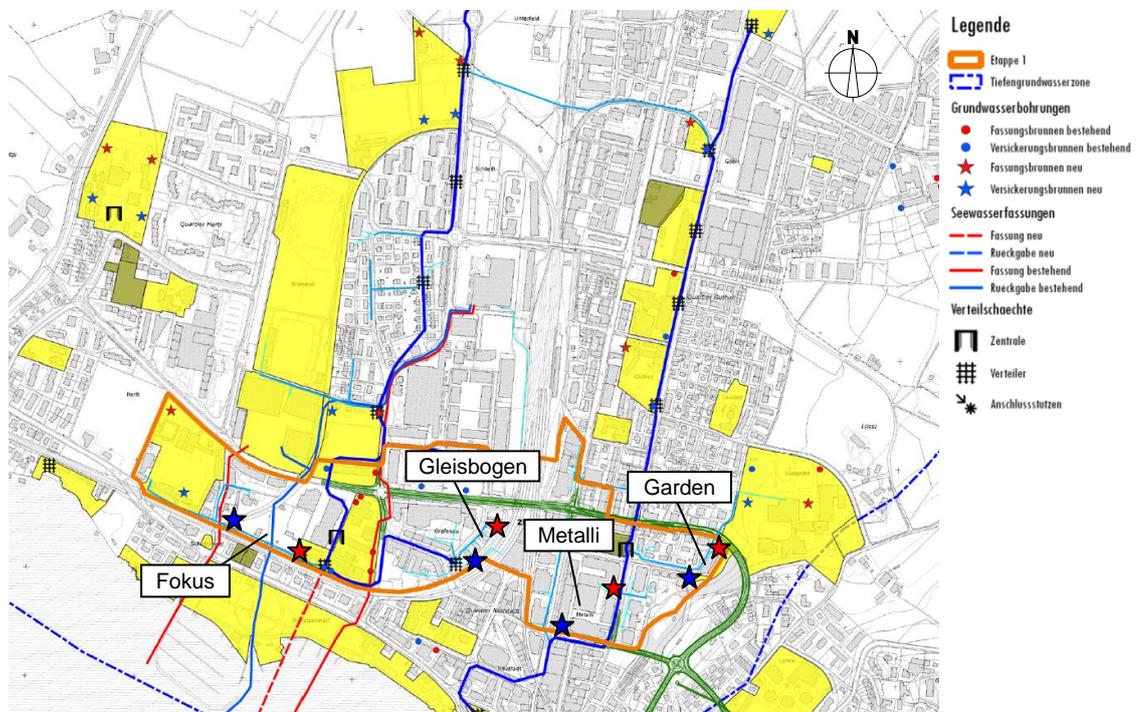


Abb. 10: Übersicht Anergienetz Etappe 1 mit bestehenden Grundwasserbrunnen sowie mit möglichen Standorten für neue Grundwasserbrunnen [11].

Annahmen für die thermische Grundwassernutzung

Der Planung für die thermische Grundwassernutzung im Rahmen der Machbarkeitsstudie EV Zug wurden folgende Annahmen zu Grunde gelegt:

- Wärmenutzung, maximales ΔT -7K
- Kältenutzung, maximales ΔT +5K
- Förderrate je Brunnen* 1'300 l/min
* realistischer Wert, günstige hydro-geologische Verhältnisse vorausgesetzt
- Nennleistung Wärme je Brunnen ca. 520 kW
- Nennleistung Kälte je Brunnen ca. -450 kW

Obige Vorgaben für die nutzungsbedingte Abkühlung und Erwärmung des Grundwassers stellen nicht die maximal mögliche und zulässige Temperaturdifferenz dar. Die Erfahrungen bei bestehenden Anlagen führen zum Ergebnis, dass grössere Temperaturänderungen im Einzelfall ohne betriebliche Probleme realisierbar sind (z.B. Zuger Kantonsspital). Die Modellrechnungen zeigen zudem, dass auch in bewilligungstechnischer Hinsicht, eine weitgehend ausgeglichene Energiebilanz vorausgesetzt, grössere Temperaturdifferenzen durchaus möglich sind.

Gleichwohl empfiehlt es sich, bei der Planung im Rahmen des EV Zug von obigen Vorgabewerten auszugehen. Diese erlauben es, bei nicht ganz ausreichender Ergiebigkeit von Förder- und Rückgabeburgen gegebenenfalls die Temperaturdifferenz noch zu erhöhen, so dass die erforderliche Leistung trotzdem zur Verfügung gestellt werden kann.

Lastprofile und Nutzenergiebedarf

Ausgehend von obigen Vorgaben und unter Berücksichtigung der weiteren verfügbaren Energiequellen sind für den künftigen Wärme- und Kältebedarf drei Lastprofile erstellt worden. Das Lastprofil «Grundwasser» berücksichtigt dabei eine Versorgung des Energienetzes mit gleichzeitiger Nutzung von Grundwasser und Seewasser. Der Fokus liegt aufgrund der beschränkten thermischen Erneuerung des Tiefengrundwassers in einer *möglichst ausgeglichenen Energiebilanz* betreffend Wärmeentzug und Wärmeeintrag.

Der Nutzenergiebedarf im Energienetz nimmt gemäss Ausbauszenarien sukzessive zu und erreicht im Jahr 2050 den Endzustand. Es liegen Betrachtungen für 3 Prognose-Szenarien vor, welche eine minimale, mittlere und maximale Nutzung abbilden.

Grundwassermodellierung für Etappe 1: Endausbau 2050, Szenario 2

Grundsätzlich kann der Energiebedarf mittel- bis langfristig so gesteuert werden, dass die Bilanz von Wärmeentzug und Wärmeeintrag in das Tiefengrundwasser gleich "0" wird. Die Grafik in Abb. 11 zeigt die entsprechenden Kälte- und Wärmemengen aus See- und Grundwasser. In diesem Fall werden sich die thermischen Auswirkungen im Tiefengrundwasser auf den Nahbereich der Rückgabeburgen beschränken. Der saisonale Energiebedarf wird zu einem zyklischen Auf- und Abbau einer Kälte- und Wärmeeintrag führen, welche sich im Normalfall auf einen Bereich von wenigen Zehnermetern um die Rückgabeburgen beschränkt.

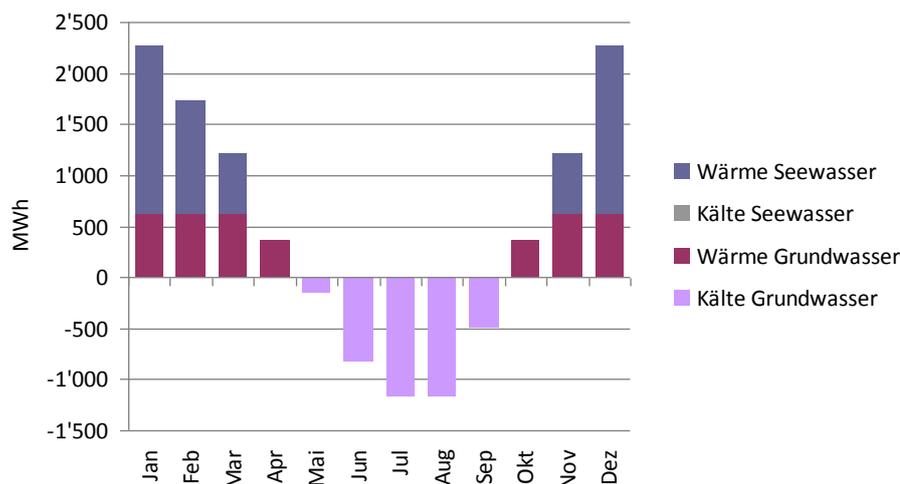


Abb. 11: Wärme- / Kältebedarf pro Grundwasserbrunnen Etappe 1 bei einer «ausgeglichenen Energiebilanz Grundwasser», Szenario 2 2050 [10].

Zur Deckung des Energiebedarfs in Etappe 1 werden – bei eher optimistischen Vorgabewerten betreffend Brunnenenergiebigkeit – *insgesamt 4 Brunnenpaare* (Doubletten) erforderlich sein.

Beim CO₂-optimierten Szenario 2 (mit BHKW) ist die Energiebilanz Grundwasser nicht gleich "0". Dieses Szenario mit dem Energiebedarf im Endausbau resp. für das Jahr 2050 wurde verwendet, um die thermischen Auswirkungen einer nicht vollständig ausgeglichenen Energiebilanz auf die Grundwassertemperaturen mit Hilfe des numerischen Grundwassermodells abzuschätzen. Die jährliche Wärmeenergie aus dem Grundwasser für Heizzwecke beträgt bei diesem Szenario 7'280 MWh. Die Kältemenge zum Kühlen liegt bei 8'440 MWh. In Tab. 3 sind die monatlichen Bedarfszahlen je Brunnenpaar zusammengestellt.

Heizbedarf				Kühlbedarf					
	MWh	ø kW	ø l/min	%	MWh	ø kW	ø l/min		
Jan	60%	-390	-524	-1070	Jan	20%	84	113	320
Feb	40%	-260	-387	-790	Feb	20%	84	126	360
Mär	40%	-260	-349	-710	Mär	20%	84	113	320
Apr	40%	-260	-361	-740	Apr	40%	169	234	670
Mai	0%	0	0	0	Mai	40%	169	227	650
Jun	0%	0	0	0	Jun	60%	253	352	1000
Jul	0%	0	0	0	Jul	80%	338	454	1300
Aug	0%	0	0	0	Aug	80%	338	454	1300
Sep	0%	0	0	0	Sep	60%	253	352	1000
Okt	20%	-130	-175	-360	Okt	40%	169	227	650
Nov	40%	-260	-361	-740	Nov	20%	84	117	330
Dez	40%	-260	-349	-710	Dez	20%	84	113	320
			-1820 MWh	-427				2110 MWh	685

Tab. 3: Wärme- / Kältebedarf je Grundwasserbrunnen Etappe 1, Szenario 2 CO₂-optimiert 2050 [10].

Die maximale Wärmeentzugmenge wird im Januar bei einem ΔT von 7K und einer Grundwasserförderate von 1'070 l/min benötigt. Die maximale Kälteentzugmenge ist im Juli/ August bei einem ΔT von 5K und einer Förderrate von 1'300 l/min erforderlich.

Gemäss den Resultaten der thermischen Modellrechnungen ist bei einem Weiterbetrieb der bestehenden Nutzungen im Stadtgebiet Zug und einer gleichzeitigen Nutzung der zusätzlichen Anlagen im Anergienetz (Standorte gemäss Abb. 10 bzw. 12) *nach einer Betriebszeit von weiteren 20 Jahren* mit folgenden Auswirkungen zu rechnen:

- Die Nutzungen im Bereich im zentralen und östlichen Stadtgebiet (Anlagen «Gleisbogen», «Metalli» und «Garden») führen zu einer auf den Nahbereich um die Rückgabeburgen beschränkten Wärmeanomalie. Auch nach 20-jährigen Betriebsdauer liegen die Temperaturänderungen im Umkreis von 100 m die Rückgabeburgen weit unter dem gemäss Wegleitung Grundwasser maximal zulässigen Wert von $\pm 3^{\circ}\text{C}$.
- Der aktuell stark kältelastige Betrieb der Anlage VZ2 führt gemäss Modellrechnung zu einer deutlichen Erwärmung im Bereich der Rückgabeburgen. Da der gewählte Standort für den Förderbrunnen «Fokus» unweit des Rückgabeburgen VZ2 liegt, ist im Entnahmehurgen «Fokus» bereits mit einer um bis zu 2.5°C erhöhten Ausgangstemperatur zu rechnen. Während sich die Ausdehnung der Wärmeanomalie um den Rückgabeburgen VZ2 durch eine künftige Wasserentnahme im Förderbrunnen «Fokus» verkleinern wird, führt die erhöhte Ausgangstemperatur zusammen mit dem zusätzlichen Wärmeeintrag bei der Anlage «Fokus» zur Ausbildung einer stärker ausgeprägten Wärmeanomalie um den Rückgabeburgen (Abb. 12 und 13). Nach einer Betriebszeit von 20 Jahren beträgt die Erwärmung in 100 m Distanz rund 4°C, d.h. die Vorgaben der GSchV können knapp nicht mehr eingehalten werden. Grund hierfür ist aber nicht der Betrieb der Anlage «Fokus», sondern die prognostizierte Beeinflussung durch die Anlage VZ2.

Es empfiehlt sich daher, die Lage der neuen Förderbrunnen «Fokus» zu optimieren, so dass die thermische Beeinflussung durch die Rückgabeburgen VZ2 minimiert werden kann. Zudem ist im Rahmen des EV Zug anzustreben, für das VZ2 zusätzlich einen Anteil des Kühlbedarfs mit Seewasser zu decken. Mit diesen Massnahmen sollten unzulässige thermische Auswirkungen im Grundwasser vermieden und die gewässerschutzrechtlichen Bestimmungen eingehalten werden können.

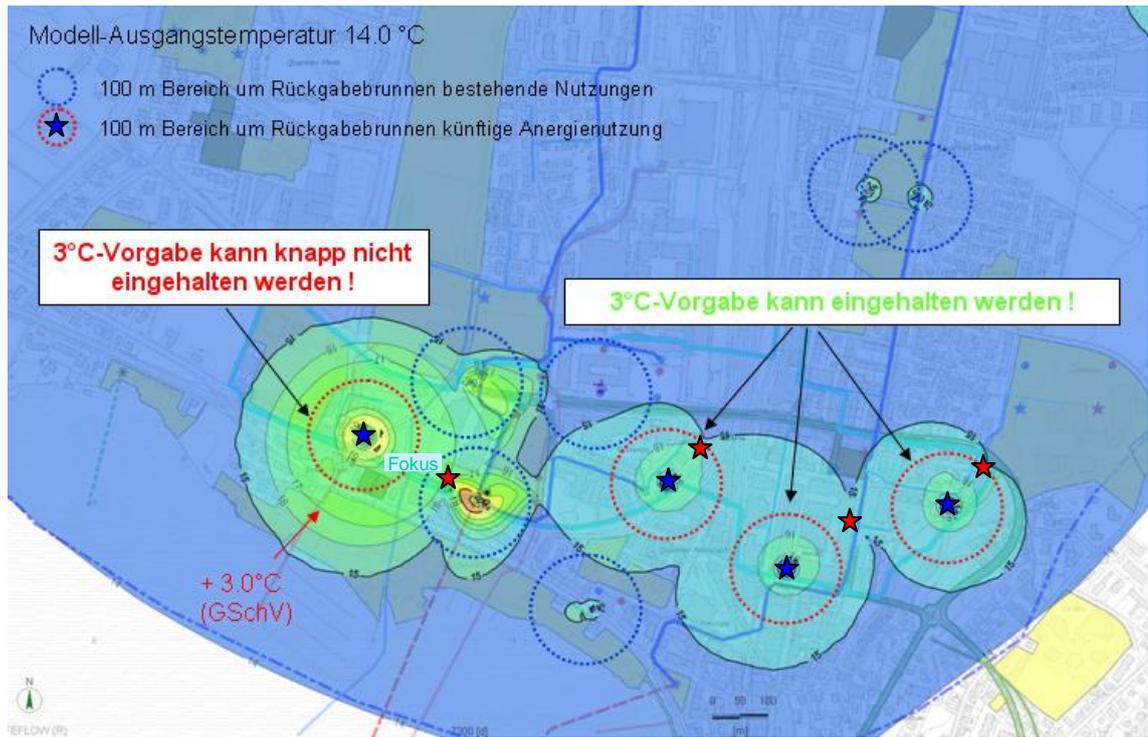


Abb. 12: Prognostizierte Ausdehnung der Temperaturfahnen nach 20 Jahren Laufzeit in Etappe 1 des Anergienetzes (ungünstiger Fall, ohne Optimierung Fokus/VZ2).

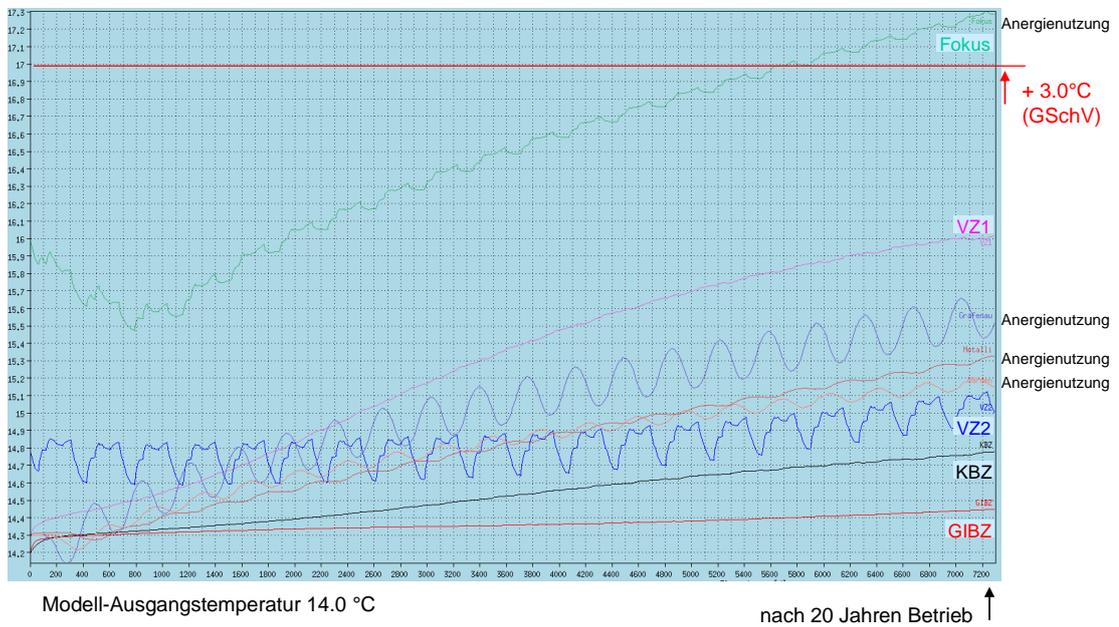


Abb. 13: Prognostizierte Temperaturentwicklung in den Entnahmekbrunnen der bestehenden und geplanten Nutzungen im Anergienetz (ungünstiger Fall, ohne Optimierung Fokus/VZ2).

5.3 Hinweise zum Bau der Grundwasserbrunnen

5.3.1 Konzept Brunnenbohrungen

Wegen der vergleichsweise kleinen Feldergiebigkeit muss das geförderte Grundwasser bei Betrieb eines Grundwasserförderbrunnens in einem zweiten Brunnen wieder in den tiefliegenden Grundwasserleiter mit artesisch gespanntem Druckspiegel zurückgegeben werden. Aufgrund der hydrogeologischen Befunde in den bestehenden Brunnenbohrungen sind die Grundwasser führenden, gut durchlässigen kiesigen Schotterebenen in sehr unterschiedlichen Tiefenlagen anzutreffen. Eine Korrelation zwischen den einzelnen gut durchlässigen Schotterebenen ist nicht möglich. Generell treten aber im unteren Teil des Baarerbeckens – über dem Molassefels – vermehrt gut durchlässige, grobblockige, sandig-kiesige Schotterebenen auf.

Für jeden Brunnen muss der Filterausbau den tatsächlichen Untergrundverhältnissen angepasst werden. Deshalb muss bei jeder Brunnenbohrung für den Filtereinbau die Tiefenlage der gut durchlässigen kiesigen Schichten bekannt sein. Dies ist nur möglich mit der Ausführung von Kernbohrungen. Bei der Erstellung der Brunnenbohrungen ist deshalb das nachfolgend aufgeführte schrittweise Vorgehen erforderlich.

1. Schritt: Erstellen des Förderbrunnens (Tiefe: 120 m – 170 m)

Spülbohrung bis ca. 50m Tiefe, Bohr- \varnothing > 300mm;
Setzen resp. Einzementierten eines Standrohres aus Stahl in den undurchlässigen Seeablagerungen.

Ausführen einer *Rotationskernbohrung* bis Endtiefe zwecks Erkundung der Tiefenlage der grundwasserführenden kiesigen Schichten sowie der gering durchlässigen siltigen Sandschichten und zur Bestimmung der Einbautiefen der Filterrohre. Während der Bohrarbeiten in verschiedenen Tiefen Durchführung von Auslaufversuchen.

Aufbohren der Kernbohrstrecke mittels *unverrohrter Spülbohrung mit Bentonit-Spülung* (um Arteser zu unterdrücken) für Einbau eines 6" Filterrohres (z.B. Edelstahl-Wickeldraht-Filterrohr), oben mit Brunnenkopf und Schieber Verfüllen der Filterstrecke mit Glaskugeln, restliche Bohrstrecke mit Zement-Bentonit-Gemisch verfüllen.

Spülen und Entsand des Brunnens; Durchführung Kurzpumpversuch.

Bei positivem Befund, d.h. wenn die erforderliche Grundwassermenge (mindestens 500 l/min) gefördert werden kann, werden die nachfolgenden Schritte 2 und 3 ausgeführt.

Bei negativem Befund, d.h. die erforderliche Grundwassermenge ist nicht verfügbar, wird die zweite Bohrung nicht mehr ausgeführt und ein neuer Standort für die Brunnenbohrungen evaluiert.

2. Schritt: Erstellen des Rückgabebrunnens

Ausführung analog obigen Vorgaben für Förderbrunnen (siehe Schritt 1).

3. Schritt: Durchführung Leistungspumpversuch aus Förderbrunnen

Die Kapazität von Entnahme- und Rückgabebrunnen wird nach deren Fertigstellung während eines rund *30-tägigen Pump-/Einspeiseversuches* getestet werden. Während des Versuches sind die Fördermenge, die Grundwasserdruckspiegel sowie die Wassertemperatur laufend zu messen. Zusätzlich sind chemische Analysen am Förderwasser vorzusehen.

Die Ergebnisse der Bohrungen und hydraulischen Tests werden anschliessend ausgewertet und dokumentiert.

5.3.2 Platzierung der Brunnen, minimale Brunnenabstände

Aufgrund der Erfahrungen bei realisierten Anlagen sowie auch gestützt auf die Modellrechnungen wird ein Abstand zwischen Entnahme- und Rückgabeburgen von ca. 100 m in der Regel als ausreichend erachtet. Geringere Abstände erhöhen das Risiko eines thermischen Kurzschlusses, eine Erhöhung der Brunnenabstände bringt diesbezüglich mehr Sicherheit.

Die möglichen Standorte für Brunnenpaare in Etappe 1 sind in Kap. 4.2.6 beschrieben worden. Im Übersichtsplan der nachfolgenden *Abb. 14* sind die erforderlichen Brunnen über alle Zonen (Endausbau) aufgrund erster Abklärungen provisorisch eingetragen.

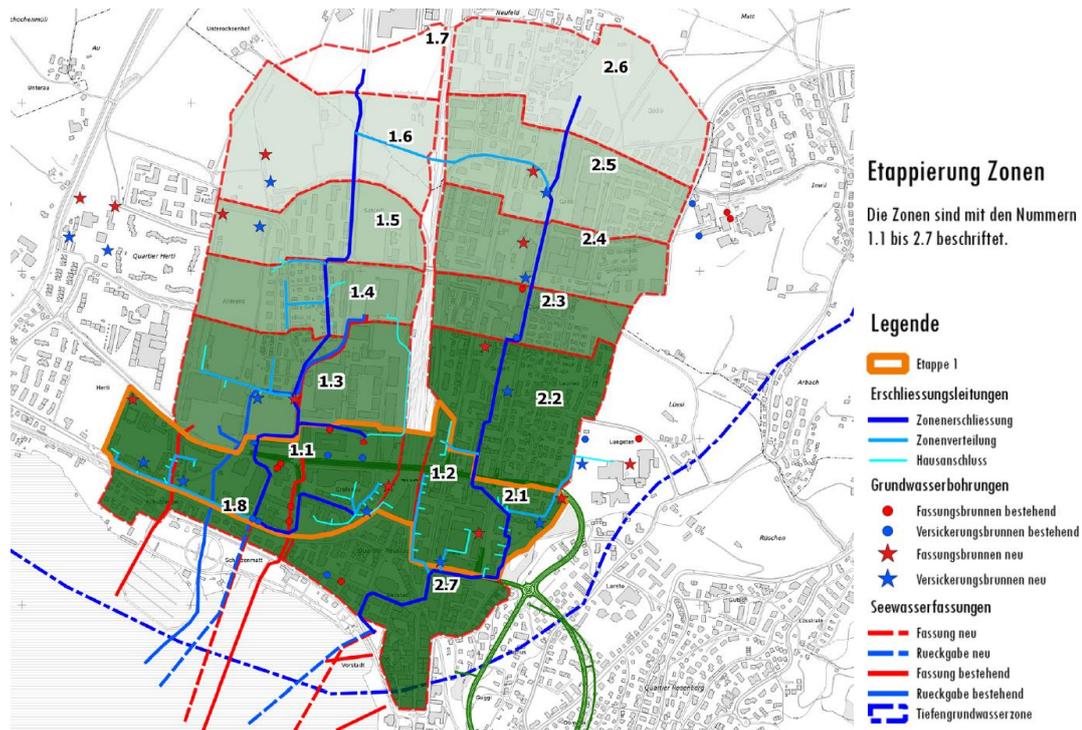


Abb. 14: Übersicht Anergienetz mit bestehenden und geplanten Grundwasserbrunnen [11].

Im nördlichen Teil des EV Zug sind Schotter des oberflächennahen Grundwasservorkommens von Baar-Zug anzutreffen. Aus Gründen des qualitativen und quantitativen Grundwasserschutzes sind in diesem Bereich keine Grundwasserbrunnen zulässig, welche durch das obere bis in das tiefere Grundwasserstockwerk reichen.

5.3.3 Ergiebigkeit der Brunnen (Erwartungswert)

Die erzielbare Ergiebigkeit der Grundwasserbrunnen hängt einerseits von der Durchlässigkeit und Mächtigkeit der mit den Brunnen erschlossenen Grundwasser führenden Schichten ab. Daneben wird die Leistung der Brunnen aber auch durch die Bohrausführung, die Wahl der Filterrohre (offene Eintrittsfläche, Strömungsgeschwindigkeit) und die Entsandung bestimmt. Nur mit einem fachmännisch erstellten und einwandfrei entsandeten Filterbrunnen können die Filtereintrittsverluste resp. die Druckspiegelabsenkung bei maximal möglicher Förderung klein gehalten werden kann.

Aufgrund der Erfahrungen bei in optimierter Bauweise erstellten Filterbrunnen (Siemens-Areal) darf – vergleichbar günstige hydrogeologische Verhältnisse vorausgesetzt – mit einer Ergiebigkeit je Brunnen von 1'000 bis höchstens 1'500 l/min gerechnet werden.

5.3.4 Kosten von Brunnenbohrungen

Die Kosten für die Ausführung von zwei Brunnenbohrungen (Bohrtiefe je 150 m, Einbau 6“ Filterrohr, inkl. Pumpversuch) für die Entnahme und Rückgabe können grössenordnungsmässig mit ca. CHF 750'000.– beziffert werden.

Hinzu kommen noch die Kosten für die geologische und technische Baubegleitung von rund CHF 80'000–100'000.– (Annahme 10–15% der Bohrkosten).

5.4 Risikobetrachtungen für Bau und Betrieb der Grundwasserbrunnen

5.4.1 Risiken beim Bau der Brunnen

Hydrogeologische Risiken

Im ungünstigen Fall können aufgrund der örtlichen Untergrundverhältnisse die für den Betrieb der Wärmenutzungsanlagen benötigten Wassermengen nicht gefördert werden («Fündigkeitsrisiko»). Das Untergrundrisiko ist an den peripheren Standorten grösser, während unweit von bestehenden, bereits erfolgreich realisierten Anlagen das diesbezügliche Risiko deutlich geringer ist.

Bohrtechnische Risiken

Während dem Abteufen der Brunnenbohrung oder beim Einbau der Filterrohre können Schwierigkeiten auftreten, welche im ungünstigsten Fall dazu führen können, dass die Bohrung aufgrund bohrtechnischer Probleme aufgegeben werden muss.

Hohe Anforderungen an die Ausführung der Bohrungen ergeben sich auch aufgrund des artesisch gespannten Wasserdruckes. Falls die Bohrung mit dem vorgesehenen Standrohr wider Erwarten nicht einwandfrei abgedichtet werden kann, so hätte dies im ungünstigen Fall ein Ausinjizieren und die Aufgabe der Bohrung zur Folge.

5.4.2 Risiken im Betrieb der Brunnen

Sandführung

Aufgrund der Heterogenität der Grundwasser führenden Schichten besteht eine erhöhte Gefahr, dass im Betrieb der Brunnen eine verstärkte Sandförderung auftreten kann. Dies kann aufwändige und häufige Reinigungsarbeiten (Brunnen, Sandfilter) zur Folge haben. Bei nicht nachlassender Sandführung kann dies, nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Gründen, zur Aufgabe des Brunnens und zum Bau eines Ersatzbrunnens führen.

Verockerungen

Beim Tiefengrundwasser handelt es sich um ein sauerstoffreies Grundwasser mit erhöhten Gehalten an gelöstem Eisen und Mangan. Falls bei der Wasserrückgabe ein Sauerstoffeintrag erfolgt, so führt dies zu Ausfällungen von Eisen, Mangan und Sulfiden. Es ist daher zweckmässig, die Grundwasserförderpumpen im Bohrloch (Unterwasserpumpen) anzuordnen, womit das Risiko eines Sauerstoffeintrages in das System minimiert werden kann.

Durch eine Verockerung des Brunnens nimmt die Leistung rasch ab, was im Betrieb zu Problemen führt. Mit Hilfe einer Brunnenregenerierung kann die ursprüngliche Kapazität in der Regel wieder hergestellt werden. Dies bedingt aber aufwändige Reinigungsarbeiten und einen längeren Betriebsunterbruch.

Thermische Beeinträchtigungen

Aufgrund des geringen natürlichen Gefälles der Druckspiegeloberfläche ist ein hydraulischer Kurzschluss zwischen Förder- und Rückgabebrunnen praktisch unvermeidbar. Im ungünstigen Fall kann, bei zu geringer Distanz zwischen den Brunnen, bei Vorhandensein präferentieller

Flieswege oder bei einem einseitigen kälte- oder wärmelastigen Betrieb der Anlage damit zusätzlich auch ein thermischer Kurzschluss verbunden sein. Dieser hätte eine Temperaturenniedrigung resp. -erhöhung des Förderwassers zur Folge und die Anlage kann unter Umständen nicht mehr optimal betrieben werden.

5.4.3 Massnahmen und Risikobewertung

Die *bohrtechnischen Risiken* können durch eine sorgfältige Planung und Begleitung der Bohrarbeiten sowie durch die Beauftragung einer ausgewiesenen Bohrfirma minimiert werden. Dies gilt auch für die *betrieblichen Risiken*, welche durch Wahl von hochwertigen Systemkomponenten und eine laufende Überwachung der Anlage möglichst klein gehalten werden können. Um einen allfälligen Feinstoff- und Sandaustrag zu minimieren, sollte zudem ein möglichst konstanter Förderbetrieb angestrebt werden. Häufige Ein- und Ausschaltzyklen sind zu vermeiden (keine Einbindung in eine allfällige Smart-Grid-Lösung). Auch bei einer sorgfältigen Planung und Ausführung und einem schonenden Betrieb der Anlagen lassen sich Beeinträchtigungen betreffend die Funktionstüchtigkeit, v.a. auch im Langzeitbetrieb, nicht vollständig ausschliessen.

Als nicht vernachlässigbar ist das Risiko von nicht ausreichend leistungsfähigen Brunnen zu beurteilen. Das vorhandene *Untergrundrisiko* könnte nur durch umfangreiche Vorabklärungen mit Probebohrungen reduziert werden. Dieser Aufwand lohnt sich allerdings kaum, da die Kosten für solche Untersuchungen ebenfalls sehr gross sind und nur dann gerechtfertigt wären, falls die Brunnenbohrungen mehrheitlich nicht fündig sind.

5.5 Einhaltung der gewässerschutzrechtlichen Vorgaben

Die Erfahrungen bei bestehenden Anlagen zeigen, dass die gewässerschutzrechtlichen Kriterien, wonach die Temperatur des Grundwassers durch Wärmeintrag oder -entzug gegenüber dem natürlichen Zustand in 100 m Distanz von den Rückgabeburten um höchstens 3°C verändert werden darf, selbst bei vergleichsweise grosser Erwärmung resp. Abkühlung des Pumpwassers auch nach mehrjährigem Betrieb noch eingehalten sind.

Die Ergebnisse der numerischen Modellrechnungen zeigen ausserdem, dass auch bei einer um 20% unterschiedlichen Kälte- und Wärmebilanz die Anlage während mehreren Jahrzehnten betrieben werden kann, ohne dass es zu einer Überschreitung der nach GSchV maximal zulässigen Temperaturänderung kommt.

Bei einer Realisierung des EV Zug wird mittel- bis langfristig eine ausgeglichene Bilanz von Wärmenutzung und -eintrag angestrebt, so dass die Einhaltung der gewässerschutzrechtlichen Vorgaben problemlos möglich sein sollte. Auch bei *höheren Temperaturdifferenzen* als sie der Machbarkeitsstudie zugrunde gelegt wurden, ist keine Überschreitung der zulässigen Temperaturänderung in 100 m Distanz von den Rückgabeburten zu befürchten, da sich die Kälte- und Wärmeanomalie im Nahbereich um die Rückgabeburten bereits weitgehend egalisieren. Eine stärkere Erwärmung ist aber vor dem Hintergrund unerwünschter chemischer und bakteriologischer Reaktionen (erhöhte Gefahr von Verockerungen) genau zu prüfen.

6. Referenzdokumente

[Nr.]	Dokumentenbezeichnung
[1]	Energieverbund Zug Projekthandbuch (Machbarkeitsstudie), Version 1.0 / 12. August 2013
[2]	Übergeordneter Bericht, 17.04.2014
[3]	Dr. Lorenz Wyssling AG (1.3.2004): Das tiefliegende Grundwasservorkommen im Baarerbecken. Zusammenstellung der bestehenden geothermischen Grundwassernutzungen.
[4]	Baudirektion des Kantons Zug, Amt für Umweltschutz Kanton Zug (2007): Geologie und Grundwasservorkommen im Kanton Zug – Erläuterungen zur Grundwasserkarte 1:25'000
[5]	Comsys Bärtsch AG (2007): Energiemessungen Kälte Grundwasser – Zuger Kantonsspital
[6]	Amt für Umweltschutz Kanton Zug (21.01.2011): Erneuerbare Energien im Kanton Zug: Stand heute und Perspektiven 2030
[7]	Dr. Lorenz Wyssling AG (Email vom 12.08.2013): Tiefengrundwasser Baarer Becken – Situation 1:20'000 Isohypsen Druckniveau des tiefen Grundwasserleiters (Handeintragung)
[8]	Dr. von Moos AG (02.09.2013): Bürogebäude Suva, Baufeld 5, Baarer matt, 6340 Baar – Grundwasserwärmenutzung April 2012 bis Mai 2013
[9]	Hans Abicht AG (Email vom 05.09.2013): Datenreihen Grundwassernutzungen Foyer und Kirchengemeindezentrum Zug
[10]	Hans Abicht AG Ingenieure für Gebäudetechnik (26.11.2013): Definition Energie und Leistung Anergienetz
[11]	Hans Abicht AG Ingenieure für Gebäudetechnik (10.12.2013): Lageplan Grundwasserbohrungen, Plan Nr. 1325-15
[12]	Grundwasserkarte – Kanton Zug, (Stand Januar 2014) www.zugmap.ch
[13]	Gewässerschutzkarte – Kanton Zug, (Stand Januar 2014), www.zugmap.ch

Tab. 4: Referenzen