

# Einsatz von numerischen Modellen in der Schweiz zwecks Nutzung der Grundwasserwärme

ROLAND TOUSSAINT

Schweiz, Klimawandel, geothermisches Potential, Grundwasser, numerische Modellierung

**K u r z f a s s u n g :** Die Schweiz ist als Alpenland von den Folgen des Klimawandels stärker betroffen als benachbarte Länder. Es sind nicht nur die für die Tourismusbranche und die Wasserwirtschaft bedeutsamen Gletscher, die dramatisch schmelzen, sondern auch die wegen der Erwärmung des Permafrostes beängstigend zunehmenden Naturkatastrophen wie u. a. Bergstürze und Murgänge, die die Infrastruktur schädigen und Menschenleben fordern. Daher ist die Schweiz mittlerweile weltweit Vorreiter, die dafür verantwortlichen klimaschädlichen, aus der Verbrennung fossiler Energieträger resultierenden Emissionen drastisch zu reduzieren. Um spätestens im Jahr 2050 das herausfordernde sog. Null-Netto-Ziel zu erreichen, werden geothermische Technologien gefördert. Gemeint ist die Gewinnung von Erdwärme als klimafreundliche Energiequelle und zusehends auch die Nutzung der Wärme des Grundwassers. Der Einsatz der sog. Wasser-Wasser-Wärmepumpen dient gleichzeitig auch dem Grundwasserschutz, da das in urbanen Gebieten vielfach zu warm gewordene Grundwasser auf Normaltemperatur gebracht wird.

Das geologisch definierte Baarer Becken im Kanton Zug ist wegen seiner hydrogeologisch günstigen Verhältnisse eines der Zentren für die energetische Nutzung des Grundwassers. Daher ist mittlerweile die Gefahr einer thermischen Übernutzung durch den Betrieb von vieler Wärmepumpen nicht auszuschließen, insbesondere eine gegenseitige hydraulische und thermische Beeinflussung dieser Anlagen, die somit nicht effektiv genug betrieben werden. Um dies und auch die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben zu überprüfen, bietet sich der Einsatz von numerischen Grundwassermodellen an. Der Verfasser, der als Hydrogeologe langjähriger Mitarbeiter eines renommierten Schweizer Geologiebüros ist, stellt in seinem Beitrag an einem typischen Beispiel aus seiner Berufspraxis das methodische Vorgehen beim Einsatz des auf Finiten Elementen beruhenden 3D-Modells FEFLOW vor und kommentiert die Rechenergebnisse.

## Use of numerical models in Switzerland for the purpose of utilizing groundwater heat

Switzerland, climate change, geothermal potential, groundwater, numerical modeling

**A b s t r a c t :** As an Alpine country, Switzerland is more severely affected by the consequences of climate change than its neighbors. It is not only the glaciers, which are important for the tourism industry and water management, that are melting dramatically, but also the alarming increase in natural disasters such as rockfalls and mudslides due to the warming of the permafrost, which damage infrastructure and claim human lives. Switzerland is therefore now a global pioneer in drastically reducing the climate-damaging emissions resulting from the burning of fossil fuels. Geothermal technologies are being promoted in order to achieve the challenging net-zero target by 2050 at the latest. This refers to the extraction of geothermal energy as a climate-friendly energy source and, increasingly, the use of groundwater heat. The use of the so-called water-to-water heat pumps also serves to protect groundwater, as the groundwater, which often becomes too warm in urban areas, is brought to normal temperature.

The geologically defined Baar Basin in the Canton of Zug is one of the centers for the energetic use of groundwater due to its favorable hydrogeological conditions. Therefore, the risk of undesirable developments due to the operation of too many heat pumps cannot be ruled out, in particular mutual hydraulic and thermal interference between these systems, which would prevent them from operating effectively. Numerical groundwater models are a suitable tool to verify this and also to ensure compliance with legal requirements. The author, a hydrogeologist who works since many years at a renowned Swiss geology firm, uses a typical example from his professional experience to present the methodological approach for using the FEFLOW 3D model based on finite elements and comments the calculation results.

## Inhaltsverzeichnis

1	Der Klimawandel in der Schweiz beschleunigt die Nutzung des geothermischen Potentials des Grundwassers .....	118
2	Energiequelle Grundwasser .....	121
3	Warum wird das Grundwasser speziell in Ballungsräumen immer wärmer? .....	124
4	Modellierung der Wärmeausbreitung in einem Porengrundwasserleiter, dargestellt an einem Fall aus der Praxis .....	126
4.1	Hydraulisches Grundwassermodell .....	129
4.2	Thermisches Grundwassermodell .....	136
4.2.1	Modellszenario 1: Nutzung mit konzessionierten Leistungen .....	139
4.2.2	Modellszenario 2: Nutzung basierend auf realistischen Leistungen .....	141
5	Diskussion .....	142
6	Dank .....	143
7	Literatur .....	144

## 1 Der Klimawandel in der Schweiz beschleunigt die Nutzung des geothermischen Potentials des Grundwassers

Die Schweiz ist als Alpenland vom Klimawandel besonders stark betroffen. Die durchschnittliche Jahrestemperatur ist seit Messbeginn bereits um 2,5 °C angestiegen, das ist doppelt so viel wie der globale Durchschnitt (Huss 2025). Und die Folgen sind bereits heute spürbar: der Niederschlag fällt häufiger als Regen (oftmals als Starkregen, die z. T. Hochwässer mit hohem Zerstörungspotential auslösen) statt als Schnee, Hitzewellen und Dürreperioden treten immer öfter auf.

Besonders betroffen und somit besonders ins Auge fallend ist die Gletscherschmelze. Betrug das Volumen des Gletschereises in der Schweiz im Jahr 2000 noch 74,9 km<sup>3</sup>, ging es bis 2024 auf 46,5 km<sup>3</sup> zurück, also ein Verlust von 38 %. Allein in den sonnenreichen Jahren 2022 und 2023 ging das Eisvolumen zusammengekommen um 10 % zurück (Huss 2025). Die Entwicklung der Gletscher in Zeit und Raum bestimmt das Landschaftsbild von Gebirgsregionen wie der Schweiz. Gletscher werden oft als Sinnbild für eine intakte Bergwelt wahrgenommen;

werden sie immer kümmerlicher, fallen sie ebenso wie Naturschnee als wichtige Ressource für die Tourismusbranche weitestgehend weg. Da die Gletscher den Wasserkreislauf regulieren („Wasserschloss Schweiz“), kann ihr Wegschmelzen wie in anderen Gebirgsländern auch in der Schweiz in absehbarer Zeit zu einer empfindlichen Wasserknappheit führen (LANZ 2021).

Auch der Permafrost, der in der Schweiz auf 3 bis 6 % der Landesfläche vorkommt, schmilzt sehr (NÖTZLI, PETER, NÄHLEN et al. 2025). Immerhin ist die Nullgradgrenze seit Beginn der Wetteraufzeichnungen vor über 150 Jahren um 200 bis 700 m angestiegen, speziell seit 1961 um 300 bis 400 m (MeteoSchweiz o. J.). Bei Messungen in den Europäischen Alpen im Zeitraum 2013–2022 wurde festgestellt, dass der Permafrost in 10 m Tiefe im Mittel um 0,6 °C wärmer geworden ist (NÖTZLI, PETER, NÄHLEN et al. 2025). Das hat Folgen, nämlich erhöhtes Risiko für Naturkatastrophen (u. a. Hangrutsche, Murgänge, Steinschläge und Bergstürze) und somit Schäden an der Infrastruktur wie Straßen, Bahnlinien oder Gebäuden bis hin zum Verlust von Menschenleben, Veränderung der Landschaft, Freisetzen von Treibhausgasen und Beeinträchtigung von Ökosystemen.

Die Schweiz hat somit ein ureigenes Interesse daran, sich stark für den Schutz des Klimas zu engagieren. Es erstaunt nicht, dass sie weltweit Vorreiter für die Reduzierung der Emissionen klimaschädlicher Gase wie insbesondere Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ist (Bundesrat 2025). Das Alpenland legte mit dem am 1. Januar 2025 in Kraft getretenen Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit, auch bekannt als Klimagesetz KIG, und der zeitgleich veröffentlichten entsprechenden Verordnung zu diesem Bundesgesetz (Schweizer Eidgenossenschaft 2022 b, 2024) die Klimaziele bis 2050 fest. Es soll den Übergang zu erneuerbaren Energien beschleunigen und die Energiesicherheit stärken. Dieses Gesetz bezweckt im Einklang mit dem Pariser Klimaübereinkommen vom 12. Dezember 2015 die Festlegung folgender Ziele:

- Verminderung der Treibhausgasemissionen und Anwendung von Negativemissionstechnologien,
- Anpassung an und Schutz vor den Auswirkungen des Klimawandels,
- Ausrichtung der Finanzmittelflüsse auf eine emissionsarme und gegenüber dem Klimawandel widerstandsfähige Entwicklung.

Die Ziele des Klimagesetzes sollen in erster Linie über das revidierte CO<sub>2</sub>-Gesetz umgesetzt werden, das ebenfalls am 1. Januar 2025 in Kraft trat und durch die am 2. April veröffentlichte CO<sub>2</sub>-Verordnung konkretisiert wird.

Den rechtlichen und administrativen Rahmen für diese Klimaziele gibt die Eidgenossenschaft vor, die praktische Umsetzung vor Ort wird kantonal geregelt.

Besonders herausfordernd ist das Ziel, die Schweiz bis zum Jahr 2050 im Hinblick auf das Klimagas CO<sub>2</sub> emissionsfrei zu machen. Um dieses sog. Netto-Null-Ziel zu erreichen, müssen insbesondere die im Gebäudebereich, im Verkehr und in der Industrie bei der Erzeugung von Wärme und Strom durch Verbrennung von Erdgas, Erdöl, Braun- und Steinkohle anfallenden Emissionen signifikant re-

duziert werden. Dafür stehen schon länger intelligente und erprobte Technologien zur Verfügung wie vor allem die Nutzung des geothermischen Potentials des Bodens („Erde“) und des Grundwassers mittels Wärmepumpen. Das geothermische Potential steht im Gegensatz zur Wind- oder Sonnenenergie permanent zur Verfügung. Dagegen ist der Aufwand für das Abfangen von klimaschädlichen Gasen direkt am Ort ihrer Entstehung (z. B. am Schornstein) sehr hoch und im Hinblick auf ihre Entfernung aus der Atmosphäre mit ggf. Speicherung im Untergrund liegen noch nicht ausreichend praxistaugliche Erfahrungen vor. Das Schweizer Klimagesetz sieht finanzielle Unterstützung für den Umstieg auf klimafreundliche Heizungen, energieeffiziente Gebäude und innovative Technologien für die Nutzung des geothermischen Potentials bis zum Jahr 2030 vor. Und kostensparend wirkt sich sicherlich aus, wenn die thermische Nutzung des Grundwassers (und auch der Erdwärme) möglichst frühzeitig in die kommunale Wärmeplanung integriert wird (BÖTTCHER, HALILOVIC, GÜNTHER et al. 2025).

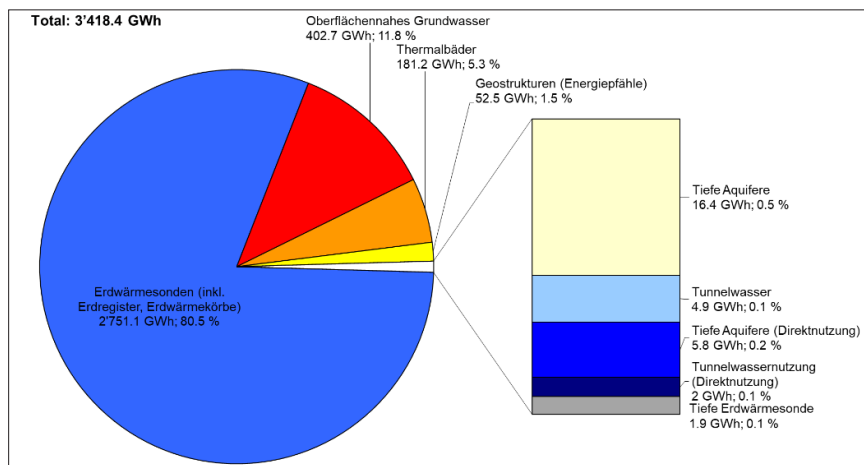


Abbildung 1: Diagramm mit Anteilen der geothermischen (erneuerbaren) Energie aller geothermischen Systeme in der Schweiz im Jahr 2023 (aus LINK 2024).

Figure 1: Diagram with shares of geothermal (renewable) energy of all geothermal systems in Switzerland in 2023 (from LINK 2024).

Die Gewinnung geothermischer Energie beträgt jetzt schon 3.418,4 GWh und basiert hauptsächlich auf dem Beitrag der Erd-Wärmesonden (2.751,6 GWh, 80,5 % aller geothermischen Systeme), an zweiter Stelle fungiert das oberflächennahe Grundwasser als Wärmequelle (402,7 GWh, 11,8 %), im Jahr 2023 waren 402 Wärmepumpen auf Grundwasserbasis (auch Wasser-Wasser-Wärmepumpe genannt) in Betrieb (LINK 2024). Auch das Wärmepotential tieferer Grundwasservorkommen wird genutzt (16,4 GWh, 0,5 %). Einen Überblick über die im Jahr 2023 genutzte geothermische Energie vermittelt das Diagramm in Abbildung 1.

Das an das Grundwasser gebundene Wärmepotential soll in Zukunft stärker genutzt werden, weil es einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Energiewende leistet. Ausgehend von einem mehr als 10 km<sup>3</sup> großen Grundwasservolumen in den wichtigsten Grundwasserleitern der Schweiz (Abb. 2), die SINREICH et al. (2012) errechnet haben, wurden im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie von der Firma Geotest AG in einer Studie das Wärmenutzungspotential speziell des Porengrundwassers auf 17 TWh geschätzt (BADOUX, HUBER & HÄNSLI 2024), allerdings unter der Voraussetzung, dass weder thermischer Ausgleich stattfindet, noch sich das Grundwasser regeneriert. Auf diesem Ergebnis beruht das politische Ziel, bis 2050 die Gewinnung geothermischer Energie von derzeit (2023) 4,7 TWh (5 %) auf diese Größenordnung, d. h. um 25 % zu steigern.

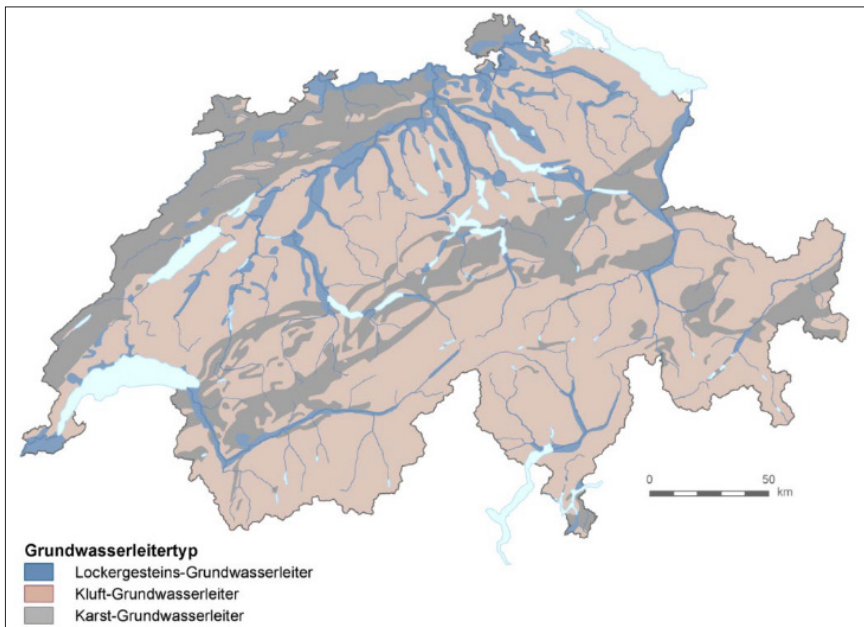


Abbildung 2: Grundwasserleitertypen in der Schweiz (nach BADOUX, HUBER & HÄNSLI 2024).  
Figure 2: Aquifer types in Switzerland (from BADOUX, HUBER & HÄNSLI 2024).

## 2 Energiequelle Grundwasser

Anders als die Gewinnung von Wärme aus der Luft oder aus dem Erdreich mittels Wärmepumpen ist der Einsatz einer auf dem gleichen technischen Prinzip funktionierenden Wärmepumpe auf Grundwasserbasis (Abb. 3; co2online 2023; GebäudeKlima Schweiz 2014) wegen der über das Jahr immer zur Verfügung stehenden

Temperatur des Grundwassers als Wärmequelle mit in der Regel mehr als 10 °C wesentlich effektiver. Der Grund ist, dass die Differenz zwischen der Grundwassertemperatur und angestrebten niedrigen Vorlauf-/Heiztemperaturen viel geringer ist als bei der Luft- oder Erd-Wärmepumpe. Allerdings ist diese Technologie, die die Heizung im Winter oder ggf. auch für die Kühlung im Sommer eingesetzt werden kann, wesentlich teurer, die Kantone federn durch finanzielle Beihilfen bis zu 70 % die im oberen vierstelligen bis unteren fünfstelligen Bereich liegenden Anschaffungskosten ab.

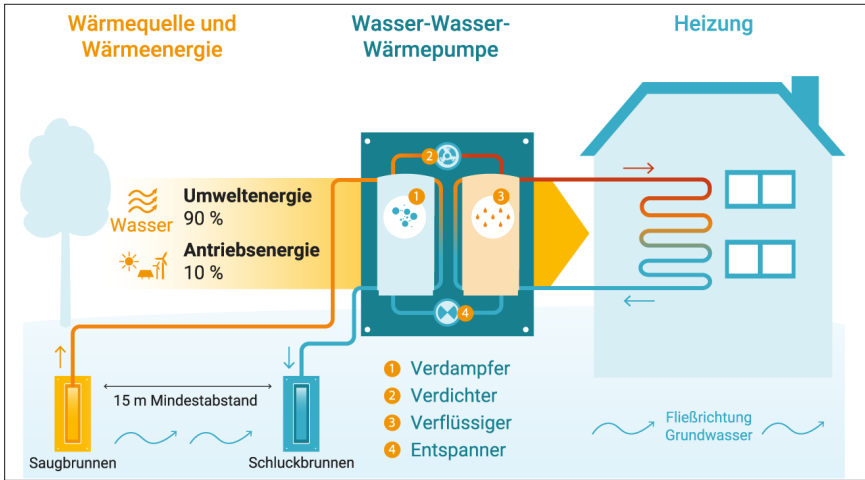


Abbildung 3: Prinzip einer Wärmepumpe mit geschlossenem Kreislauf auf Grundwasserbasis; Quelle: co2online.

Figure 3: Principle of a closed-loop heat pump based on groundwater; source: co2online.

Für die hohen Kosten verantwortlich ist der vorlaufende große Aufwand insbesondere für die Abteufung von zwei Bohrungen und deren Ausbau zu einem Förderbrunnen und einem Brunnen für die Rückleitung des genutzten Wassers in den Grundwasserleiter, hohe Stromkosten für den Pumpbetrieb sowie die Erstellung eines hydrogeologischen Gutachtens durch ein qualifiziertes Büro. Die Expertise des Geologen wird benötigt zur Beantwortung der Frage, ob der Einsatz einer Grundwasserwärmepumpe vor Ort möglich ist oder nicht. Das betrifft zunächst die Abschätzung der Ergiebigkeit des genutzten Grundwasservorkommens. Liegt beispielsweise die zu heizende Immobilie im Alpenvorland mit einer jährlichen Durchschnittstemperatur der Luft von 9–10 °C und handelt es sich um ein freistehendes Einfamilienhaus ohne Dach- und Wanddämmung, aber mit Iso-lierverglasung der Fenster, geht man bezogen auf 120 m<sup>2</sup> Wohnfläche von einer Heizlast von etwa 8 kW aus, eine Wasserpumpe benötigt dafür eine Wassermenge von etwa 2 m<sup>3</sup>/h. Im gebirgigen und somit kälteren Teil der Schweiz wird eher von

einer Heizlast von 9 oder sogar 10 kW ausgegangen, um die benötigte Temperatur in Innenräumen zu erreichen und zu halten, dafür ist eine Wassermenge von ca. 2,5 m<sup>3</sup>/h erforderlich (Solarwatt o. J.). Der Schweizerische Verband für Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik (GebäudeKlima Schweiz 2014) stellt über seine Spezialisten vor Ort Unterlagen zur Verfügung, die Architekten und Bauherren Hilfestellung geben. Mit weniger Grundwasser als Wärmequelle und somit auch geringeren Stromkosten für die Wärmepumpe selbst und die Pumpe im Förderbrunnen kommt man aus, wenn die Grundwassertemperatur möglichst hoch und die Vorlauftemperaturen möglichst gering sind. Geringe Vorlauftemperaturen von etwa 30 bis 40 °C sind typisch für moderne Flächenheizungen im Fußboden oder an der Wand in Kombination mit einer guten Dämmung des Gebäudes, welche die gesetzlichen Anforderungen erfüllt.

Was Positionierung der beiden Brunnen auf einem Grundwasserfließpfad und ihren Abstand voneinander angeht, benutzt der Geologe mittlerweile immer häufiger ein numerisches Wärmetransportmodell, um hydraulische oder thermische Kurzschlüsse mit größerer Sicherheit ausschließen zu können. Im Übrigen müssen Planung und Bau der betreffenden Anlage an einem konkreten Standort den Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA), beispielsweise der Norm SIA 384/7 (SIA 2015), sowie kantonalen Richtlinien (EnergieSchweiz (2017) entsprechen, z. B. des Kantons Zug (o. J.).

Darüber hinaus sind auch Behördengänge einzukalkulieren, da das Grundwasser, das in der Schweiz rund 80 % des Trinkwasserbedarfs deckt, flächendeckend geschützt und die Grundwasservorkommen in ihrer Gesamtheit zu erhalten sind (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft 2004; BiG 2025; Schweiz. Eidgenossenschaft 1955, 1991, 1998, 2021, 2022 a). Und jede Grundwasserentnahme ist in der Sprache der Juristen eine Nutzung, die konzessionspflichtig ist. Außerdem müssen Planer von Grundwasser-Wärmepumpen akzeptieren, dass deren Betrieb in Trinkwasserschutzgebieten sowie in Thermalwasserschutzgebieten nicht genehmigungsfähig ist. Darüber hinaus bestehen weitere Gründe, welche die Machbarkeit einer geplanten Nutzung einschränken, hierunter zählen Altlasten oder andere Schadstoffquellen im Nahbereich sowie die unzulässige Beeinflussung von schon bestehenden thermischen Grundwassernutzungen.

Die Nutzung des Grundwassers als Wärmequelle leistet aber nicht nur einen bedeutenden Beitrag zum Klimaschutz und zur Energiewende, weil auf fossile Brennstoffe mit ihren klimaschädlichen Emissionen verzichtet werden kann, sondern weil auch auf intelligente Weise Klima- und Grundwasserschutz miteinander kombiniert werden können. Durch die Rückleitung des nach dem Wärmeentzug kühler gewordenen Grundwassers wird nämlich das im Bereich von Städten und Gewerbe-/Industriegebieten anthropogen beeinflusste Grundwasser (s. Kap. 3 und Abb. 3) abgekühlt, was u. a. der Grundwasserfauna (BECHER, ENGLISCH, GRIEBLER et al. 2020) zugutekommt. Allerdings darf gemäß Eidg. Gewässerschutzverordnung GSchV vom 28.10.1998 (1998, Anhang 2, Ziffer 21)

die „Temperatur des Grundwassers durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem natürlichen Zustand um höchstens 3 °C verändert werden; vorbehalten sind örtlich eng begrenzte Temperaturveränderungen“. Die Wegleitung Grundwasserschutz des BAFU (2004) gibt vor, dass diese Bedingung der GSchV in 100 m Entfernung vom Rückleitebrunnen erfüllt sein muss, nicht aber in dessen unmittelbarer Umgebung.

### **3 Warum wird das Grundwasser speziell in Ballungsräumen immer wärmer?**

Von Natur aus bestimmt die mittlere Jahrestemperatur der Luft in etwa die mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche. MeteoSchweiz gibt die Schweizer Durchschnittstemperatur der Periode 1991–2020 mit 5,8 °C an, für das Mittelland mit 9–10 °C (Akademie der Naturwissenschaften Schweiz 2021). Die Temperaturen sind im Zuge des Klimawandels seit den späten 1980er-Jahren sprunghaft gestiegen, man geht von etwa 2 °C aus (FIGURA, LIVINGSTONE, HOEHN et al. 2013). Der Wärmeaustausch von der Erdoberfläche in den Grundwasserleiter und der Prozess der Temperaturausbreitung im ungesättigten Sickerraum und anschließend im gesättigten Grundwasserraum hängt von vielen Faktoren ab, die in diesem Beitrag nicht näher beleuchtet werden können. Pauschal kann gesagt werden, dass in einer Tiefe von etwa 10–15 m ein Jahrestemperaturgang in der Regel nicht mehr feststellbar ist. Ab dieser indifferenten Zone mit einer über eine längere Strecke konstanten Temperatur von 10 bis 12 °C selbst an sehr kalten Wintertagen steigt die Temperatur mit wachsender Tiefe um etwa 3 °C/100 m an, wobei dieser Richtwert in Abhängigkeit von der Dichte des aus dem Erdinnern kommenden geothermischen Wärmestroms (bei der Erdentstehung freigewordene Energie und Zerfall radioaktiver Isotope), der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins sowie durch Vertikalströmung und Dispersion örtlich deutlich über- oder unterschritten werden kann.

Es ist seit langem bekannt, dass es in Städten wärmer ist als auf dem Land. Seit Ende der 1970er-/Anfang der 1980er-Jahre ist von Wissenschaftlern festgestellt worden, dass das nicht nur an oder oberhalb der Erdoberfläche der Fall ist, sondern auch das Grundwasser unter den Städten betrifft (HÖTZL & MAKURAT 1981; MENBERG, K., BAYER, P., ZOSSEDER, K. et al. 2013; HENNING & LIMBERG 2012). Messungen ergaben, dass die Temperaturen im Bereich dieser „urbanen Wärmeinseln“ im Untergrund im Mittel etwa 5 °C höher sind als im land- oder forstwirtschaftlich genutzten Umland, unter Industrieflächen noch beträchtlich mehr. Unterirdische Wärmeinseln unter Städten können eine Gefahr für Gebäude sein (JOHNER 2023). In Berlin wurde festgestellt, dass sich höhere Grundwassertemperaturen bis in Tiefen bis 100 m unter Terrain nachweisen lassen (HENNING & LIMBERG 2012).

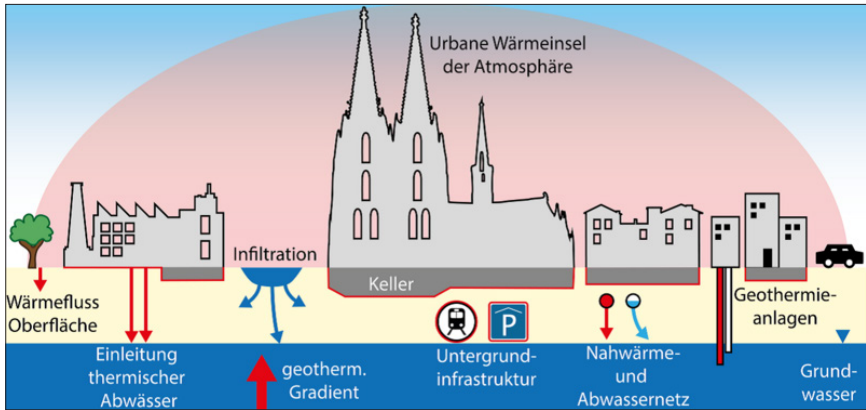


Abbildung 4: Potentielle natürliche und anthropogene Wärmequellen in urbanen Gebieten; Quelle: Uni Halle: [www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/waermeinsel-staedtische](http://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/waermeinsel-staedtische)  
 Figure 4: Potential natural and anthropogenic heat sources in urban areas; source: University of Halle: [www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/waermeinsel-staedtische](http://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/waermeinsel-staedtische).

Als Ursachen für die höheren Grundwassertemperaturen in urbanen Zentren sind insbesondere zu nennen die dichte Besiedlung und demzufolge die Versiegelung der Erdoberfläche durch Beton und Asphalt, die einen Wärmeaustausch mit der Atmosphäre behindert oder sogar unterbindet, der Fahrzeugverkehr, schlecht wärmedämmte Gebäude, großdimensionierte Heizungen speziell in tiefgegründeten Kellern und die in Stadtzentren meist ausgedünnte oder fehlende Vegetation, die ansonsten durch Transpiration die Umgebungstemperatur reguliert. Hohe Gebäude behindern zudem die natürliche Luftzirkulation und erschweren die Wärmeabfuhr. Weitere Wärmequellen sind Industriegebiete und Klimaanlagen, die zusätzlich Wärme an die Umgebung abgeben, Kühlwassereinleitungen in den Untergrund, Abwasserkanäle, unterirdisch verlegte Nah-/Fernwärmenetze und Hochspannungskabel, U-Bahn-Schächte, Tunnelröhren, Tiefgaragen und Geothermieanlagen, welche in den Sommermonaten zur Kühlung genutzt werden, und vieles mehr (Abb. 4).

Es liegt nahe, ganz gezielt die höheren Grundwassertemperaturen im Untergrund von Siedlungszentren oder Industriegebieten verstärkt zu nutzen, um den Einsatz fossiler Energieträger drastisch zu verringern. Dabei gilt die Geothermie als Kerntechnologie der Wärmewende, weil sie das Potential hat, ganze Großstädte mit ihren Industrieflächen mit erneuerbarer Energie zu versorgen, die im Gegensatz zu mittels Windrädern, Sonnenkollektoren, Wasserkraftwerken und Biomasse erzeugter Energie dauerhaft zur Verfügung steht. Gleichzeitig wird durch die Rückleitung des für die Wärmegewinnung genutzten und dadurch abgekühlten Grundwassers in den Untergrund auf intelligente Weise auch Grundwasserschutz betrieben.

## 4 Modellierung der Wärmeausbreitung in einem Porengrundwasserleiter, dargestellt an einem Fall aus der Praxis

Das oberflächennahe Grundwasservorkommen im glazial-geologisch definierten Baarer-Becken im Kanton Zug wird nicht nur zur Trinkwassergewinnung genutzt, sondern mittlerweile auch von zahlreichen Anlagen zur thermischen Nutzung. Die konzessionierte, das heißt von den zuständigen kantonalen Behörden genehmigte Wärmeentzugsleistung aus dem Grundwasser reicht von Kleinanlagen mit minimal ca. 10 kW bis zu Anlagen mittlerer Größe mit maximal etwa 600 kW Entzugsleistung. Die total installierte Leistung beträgt aktuell ca. 8,8 MW.

In den vergangenen Jahren hat die energetische Grundwassernutzung zugenommen und in naher Zukunft ist mit einer wachsenden Zahl an Konzessionsgesuchen für diese umweltfreundliche Art der Energiegewinnung zu rechnen. Mit der steigenden Nutzungsdichte nimmt die Gefahr von gegenseitigen Beeinflussungen sowie von lokalen thermischen Übernutzungen des vorhandenen Grundwasservorkommens zu. Es ist die Aufgabe der Bewilligungsbehörde resp. des Amtes für Umweltschutz (AfU) zu prüfen, ob die Vorgaben der GSchV zumindest bei neuen Konzessionen eingehalten werden. Diese gewässerschutzrechtliche Beurteilung wird wegen der hohen Anzahl an vorhandenen Nutzungen aber zunehmend schwieriger. Daher hat sich das Amt für Umwelt des Kantons Zug entschieden, als Grundlage für die weitere energetische Nutzung des oberflächennahen Grundwasservorkommens von Baar-Zug ein entsprechendes numerisches Modell erstellen zu lassen, der Auftrag dazu wurde 2013 an die Jäckli Geologie AG mit Filialen u. a. in Cham/Kanton Zug und Hauptfirmensitz in Zürich vergeben. Das Modell wurde seinerzeit angefordert, um abschätzen zu können, ob weitere Nutzungen noch zulässig sind und um zu überprüfen, ob eine gegenseitige Beeinflussung bestehender Nutzungen vorliegt. Zudem sollte die Einhaltung der Vorgaben der GSchV von 1998 geprüft werden, ob in 100 m Abstand vom Rückgabebrunnen die 3 °C-Beschränkung eingehalten wird. Das Modell wurde später auch zur Bilanzierung und Berechnung der Energiebilanz verwendet resp. wieviel Energie im Grundwasservorkommen des Baarer Beckens noch nutzbar ist. Zu Beginn des Projektes war dieses noch nicht die Fragestellung.

Das vom Amt für Umwelt des Kantons Zug gewünschte Grundwassermodell wurde 2013 vom Autor dieses Beitrages, langjähriger Mitarbeiter der Jäckli Geologie AG, selbst Hydrogeologe und Spezialist für numerische Grundwassermodelle, entwickelt, seither optimiert und jedes Jahr im Hinblick auf die dazugekommenen Nutzungen des Grundwassers als Wärmequelle aktualisiert. Am Beispiel des Baarer Beckens wird aufgezeigt, wie die gestellte Aufgabe mittels des 3D-Modells FEFLOW, das auf finiten Elementen beruht, bewältigt werden konnte.

Temperaturfahnen im Grundwasser können auch mit analytischen Modellen berechnet werden (OHMER, KLESTER, KISSINGER et al. 2022), mit Hilfe von gekoppelten numerischen Strömungs- und Wärmetransportmodellen lassen sich

die thermischen Auswirkungen von Grundwasser-Wärmenutzungen jedoch zuverlässiger abschätzen.

Nachfolgend wird allgemein über die hydrogeologischen Verhältnisse im Bearbeitungsgebiet und über die Nutzung des dortigen Grundwasservorkommens durch Trinkwasserbrunnen und Grundwasser-Wärmepumpen informiert. In den anschließenden Kapiteln 4.1 und 4.2 werden die Kriterien und hydrogeologischen Parameter, die für die Funktionalität des hydraulischen Grundwassermodells/Strömungsmodells bzw. des thermischen Grundwassermodells elementar wichtig sind, kurz erläutert.

### **Hydrogeologische Übersicht des Grundwasservorkommens von Baar–Zug**

Das oberflächennahe Grundwasservorkommen des Baarer Beckens erstreckt sich vom Nordosten von Baar bis zur Stadt Zug bzw. dem Zugersee im Südwesten. Als Grundwasserleiter wirken die spät- und postglazial abgelagerten Lorze-Schotter, welche im zentralen Teil des Grundwassergebietes eine Mächtigkeit von bis zu 25 m erreichen. Über dem Schotter liegen feinkörnige, gering durchlässige Überschwemmungssedimente, welche örtlich z. T. in rinnenförmigen Vorkommen von kiesigem und sandigem Bachschutt der Lorze überlagert werden.

Der Grundwasserleiter nimmt im Tal der Lorze östlich von Baar eine Breite von ca. 200 m ein und verbreitert sich im Baarer Becken auf rd. 1,5 km. Der südliche Teil des Grundwasserleiters bei Zug ist zunehmend sandig ausgebildet und besitzt darüber hinaus eine geringere Mächtigkeit. Das eigentlich nutzbare Grundwasservorkommen endet daher bereits südlich von Baar.

Die unter dem Grundwasser führenden Schotter liegenden eiszeitlichen Seesedimente und Moränen der letzten Vergletscherung wirken als Grundwasserstauer. Die Obergrenze des Stauers weist ein ausgeprägtes Relief auf. In den Mulden erreichen die Schotterablagerungen die größten Mächtigkeiten. Demgemäß sind hier auch die größten grundwassererfüllten Mächtigkeiten von mehr als 20 m zu beobachten. Im Bereich von Baar liegen die Grundwassermächtigkeiten zwischen 10 und 20 m, südlich davon nimmt die Mächtigkeit in Richtung Zugersee deutlich auf unter 2 m ab.

### **Lage und Schwankungen des Grundwasserspiegels**

Der Flurabstand des Grundwasserspiegels nimmt von über 10 m im Nordosten von Baar auf 1–3 m in Seenähe bei Zug ab. Das Spiegelgefälle der Grundwasseroberfläche beträgt im Bereich von Baar ca. 2,5 ‰ und versteilt sich im Bereich des zunehmend sandig ausgebildeten Grundwasserleiters zwischen Baar und Zug auf rund 10 ‰. Hier wird das Grundwasser infolge auseinanderfallender Kiesmächtigkeit zunehmend an die Oberfläche gedrängt und exfiltriert in die Lorze und die vorhandenen Bäche und Entwässerungsgräben.

Im Gebiet der Zuger Vorstadt wurde das oberflächennahe Grundwasser aufgrund der Gefahr von Seeuferrutschungen in Drainagen gefasst und in den Zu-

gersee abgeleitet. Als Folge dieser Maßnahme tritt heute nur noch sehr wenig Grundwasser direkt in den Zugersee über.

### **Randliche Hangwasserzuflüsse und Grundwasserneubildung**

Das Baarer Becken grenzt im Nordwesten und gebietsweise im Südosten an randlich gelegene Grundwasser führende See- und Deltaablagerungen, welche jedoch durch einen geringdurchlässigen Moränenwall vom genutzten Grundwasserleiter hydraulisch weitgehend getrennt sind. Eine geringe Wassermenge dürfte jedoch die Moräne durchsickern und als unterirdischer Hangzufluss in den Grundwasserstrom übertreten.

Die Speisung des Grundwassers erfolgt durch versickerndes Niederschlagswasser sowie durch die Infiltration von oberirdischen Gewässern. Einen nennenswerten Beitrag zur Grundwasserneubildung liefert die Lorze, welche nach ihrem Austritt in die Talebene von Baar eine starke Infiltrationstendenz aufweist.

Da im zentralen Beckenbereich durch die feinsandigen Überschwemmungsablagerungen gespannte Verhältnisse herrschen, breitet sich der Grundwasserspiegelaustieg schnell über den gesamten Grundwasserstrom aus.

### **Temperatur des Grundwassers**

Die Boden- und Grundwassertemperaturen werden im oberflächennahen Bereich maßgeblich durch den konduktiven atmosphärischen Wärmeeintrag bestimmt. Die Temperaturverteilung in der Tiefe lässt sich vereinfachend als harmonische Schwingung der Oberflächentemperatur beschreiben. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Temperaturamplitude exponentiell ab, bei gleichzeitig linearer Zunahme der Phasenverschiebung. Es wurde in Kapitel 2 bereits angesprochen, dass ab einer Tiefe von ca. 10–15 m der saisonale Einfluss kaum mehr spürbar ist. Langjährige Messungen haben ergeben, dass die Temperatur des Grundwassers im Untersuchungsgebiet in dieser Tiefe knapp 12 °C beträgt und mit zunehmender Tiefe entsprechend dem geothermischen Gradienten mit ca. 0,03 °C/m weiter zunimmt.

### **Trinkwassernutzungen**

Das Grundwasservorkommen wird in insgesamt sechs Grundwasserfassungen zur Trinkwassergewinnung genutzt. Die Brunnen verfügen über eine konzessionsierte Förderrate von insgesamt 17.100 l/min. Die durchschnittlich geförderte Wassermenge beträgt – trotz der großen installierten Pumpleistung – lediglich ca. 1.600 l/min.

### **Energetische Grundwassernutzungen**

Das oberflächennahe Grundwasservorkommen im Baarer Becken wird zurzeit bereits an 108 Standorten für thermische Zwecke mit anschließender Rückgabe in den Grundwasserleiter genutzt. In der „Konzession“ sind die maximale Ent-

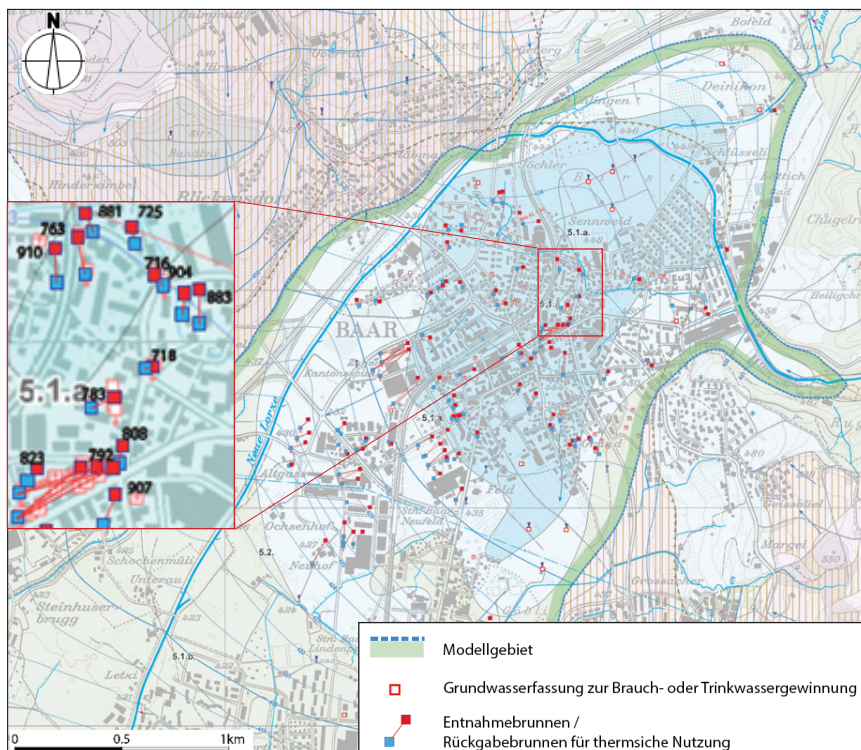


Abbildung 5: Karte mit Lage der Grundwasserfassungen für Brauch- und Trinkwassergewinnung sowie der Zwillingsbrunnen (Grundwasserentnahme und -rückgabe) für die thermische Nutzung des Grundwassers im Jahr 2013, im Ausschnitt Stand 2024; Quelle: Amt für Umwelt des Kantons Zug (o. J.)

Figure 5: Map showing the location of groundwater wells for industrial and drinking water uses and the twin wells (extraction and return wells) for thermal groundwater utilization in the year 2013, detail as of 2024; source: Office for the Environment of the Canton of Zug (no date).

nahme, die maximal zulässige Temperaturänderung sowie die daraus resultierende maximale Kälteleistung der Anlage festgeschrieben. Die gesamthaft konzessionierte Wärmeleistung betrug 2013 ca. 3,8 MW und ist bis 2024 um den Faktor 2,3 auf 8,8 MW gestiegen.

#### 4.1 Hydraulische Grundwassermodell

Nachfolgend werden zum besseren Verständnis die Kriterien und hydrogeologischen / geohydraulischen Parameter, die für die Funktionalität des hydraulischen Grundwassermodells (Strömungsmodell) elementar wichtig sind, kurz erläutert. Für weitergehende Informationen wird auf die spezielle Fachliteratur verwiesen, u. a. auf DIERSCH (2014).

## Modellwahl und Abmessungen

Als Rechenmodell wurde das Programm «FEFLOW» Version 6.1 der WASY GmbH gewählt (Näheres bei DIERSCH 2014). Bei diesem Grundwassermodell wird die Strömungsgleichung iterativ nach dem Finiten Elemente (FE)-Verfahren gelöst. FEFLOW erlaubt eine flexible Vernetzung, daher kann das Gitternetz an natürliche Strukturen wie Flüsse und Brunnen für die Entnahme und Rückgabe von Grundwasser optimal angepasst werden. Das numerische Fließmodell berücksichtigt das gesamte, rund 3,2 km lange und 1,5 km breite Grundwasservorkommen im Lorze-Schotter des Baarer Beckens. Das Modellgebiet wurde in Dreiecks-Elemente zerlegt und in den relevanten Bereichen lokal verfeinert. Insgesamt weist das FE-Modell rund 630.000 Zellen auf (Abb. 6). Im vorliegenden Fall wurde ein 3D-Grundwasserströmungsmodell mit instationärem Rechenansatz erstellt.

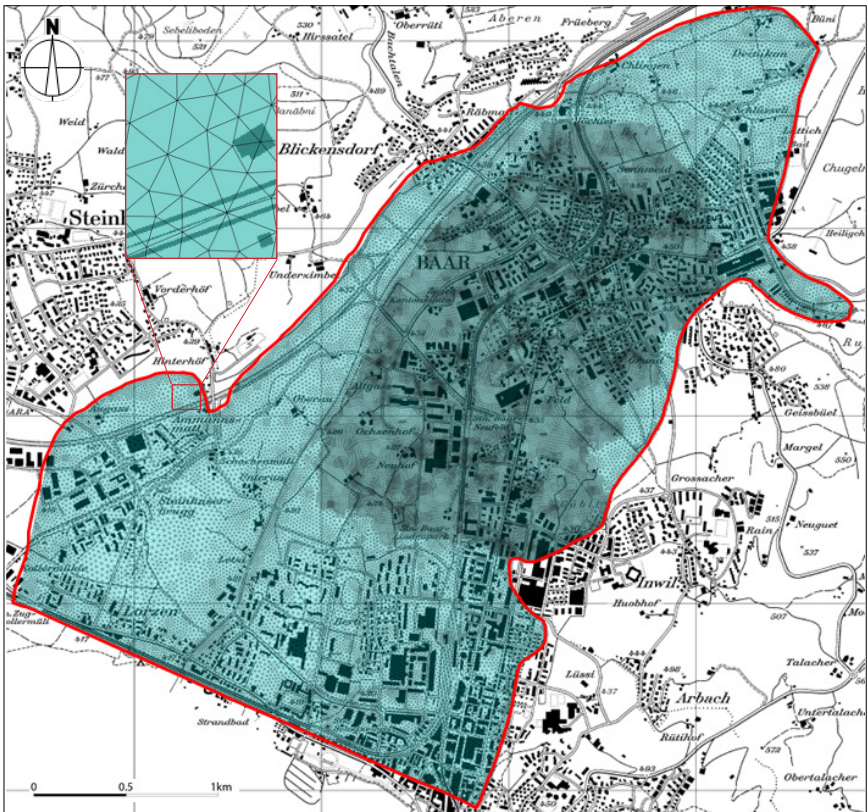


Abbildung 6: Modellgebiet mit Finite Elemente-Netz; vergrößerter Ausschnitt.

Figure 6: Model area with finite element mesh; magnified section.

## Geometrie

Um die Modellgeometrie hinreichend genau wiedergeben zu können, wurde das Modell 3-dimensional aufgebaut und vertikal in fünf Schichten unterteilt. In der obersten Modellschicht wurde die Oberflächenmorphologie durch Zuweisung der Daten aus dem vorliegenden digitalen Höhenmodell dargestellt.

Die Sohle des Grundwasserleiters fällt von 429 m ü. NN im Nordosten auf 412 m ü. NN im Südwesten ab. Auffällig ist die Beckenstruktur im nördlichen Bereich von Baar, wo durch die große Schichtdicke des Schotters auch die größte Grundwassermächtigkeit erreicht wird.

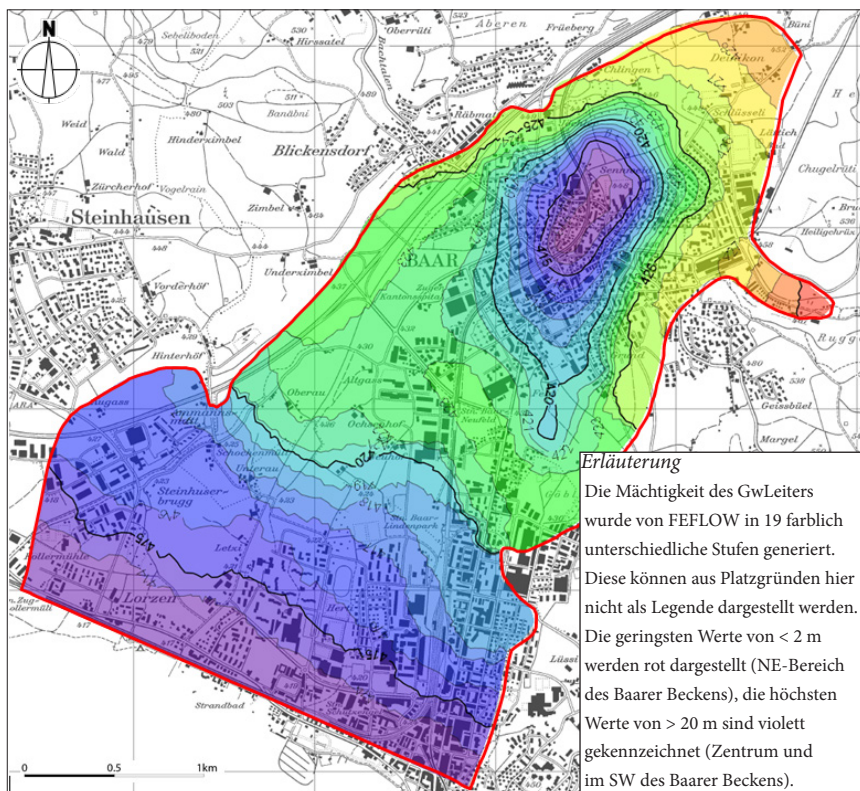


Abbildung 7: Basis Schotter-Grundwasserleiter (m ü. NN), gestützt auf Datenaufbereitung und Interpolation.

Figure 7: Basis of gravel aquifer (m a. s. l.), supported by data processing and interpolation.

## Hydraulische Durchlässigkeit

Der Lorze-Schotter des Baarer Beckens weist eine mäßig gute bis gute Durchlässigkeit auf. Aus Pumpversuchen wurden Durchlässigkeitsbeiwerte  $K$  zwischen  $8 \cdot 10^{-4}$  m/s und  $4 \cdot 10^{-3}$  m/s ermittelt. Für die Modellrechnung wurden dem Schot-

ter-Grundwasserleiter die vorstehend genannten hydraulischen Durchlässigkeiten als orientierende Varianzbreite vorgegeben (Abb. 8).

### Randbedingungen

Die Wahl bzw. die Vorgabe der hydraulischen Modell-Randbedingungen bestimmt ganz maßgeblich die Modellresultate. Um eine möglichst gute Übereinstimmung der Modellresultate mit den natürlichen Verhältnissen zu erzielen, müssen diese daher möglichst wirklichkeitsnah gewählt werden (siehe Abb. 9).

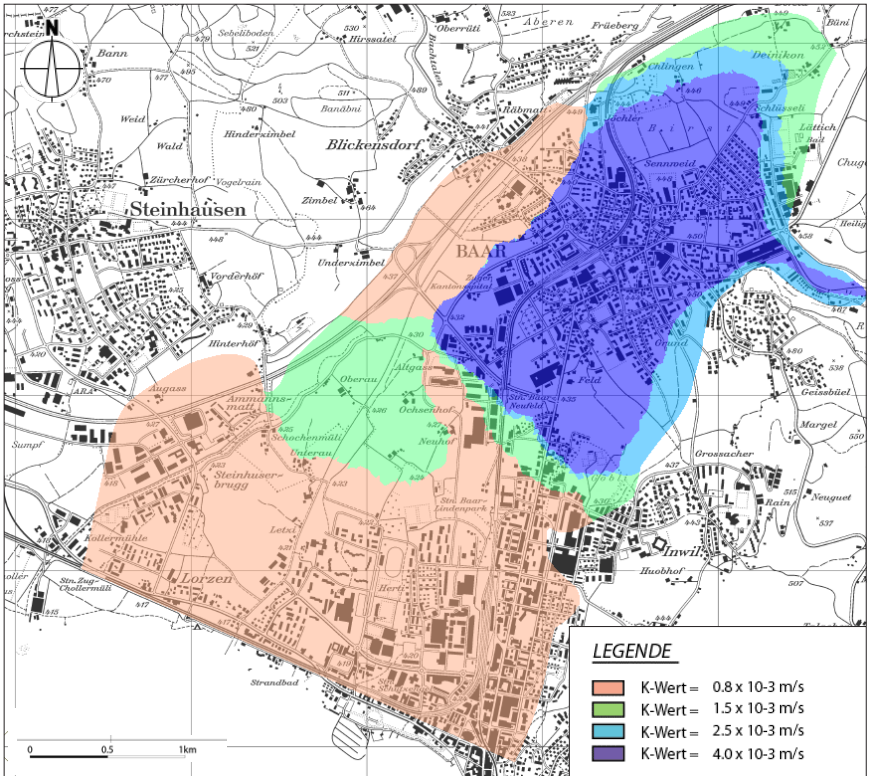


Abbildung 8: Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit (K-Werte) im Modell.

Figure 8: Distribution of hydraulic permeability (K-values) in the model.

### Festpotenzial

Der südlichen Modellrand wurde parallel der Isohypse von 415,5 m ü. NN als Festpotenzial festgelegt. Effektiv tritt das Grundwasser größtenteils in Drainagen über. Der nahe gelegene Zugersee wirkt nur untergeordnet als Vorfluter. Die Definition eines Festpotenzialrandes ist zulässig, da der südliche Teil des Grundwas-

servorkommens nicht mehr nutzbar und daher für die thermischen Modellrechnungen nicht von Bedeutung ist.

### **Randzuflüsse**

Randliche Hangwasserzuflüsse finden im Westen, Norden und Osten des Modellgebietes statt. Eine Abschätzung dieser Zuflüsse ist naturgemäß schwierig. In erster Näherung können diese über die Größe des randlichen Einzugsgebietes und eine Abschätzung des versickernden Niederschlagsanteils abgeschätzt werden.

Die entsprechenden Annahmen sind im Rahmen der Modellkalibrierung überprüft und angepasst worden. Die Kalibrierung führte schließlich zu einem Randzufluss zwischen minimal 0,3 und maximal 1,1 l/min pro laufendem Meter Modellrand (siehe Abb. 9). Der mengenmäßig relevanteste Grundwasserzufluss findet im Nordosten sowie im Norden in den Gebieten «Jöchler» und «Lättich» statt.

Mit dem gewählten, vergleichsweise eher hoch angesetzten unterirdischen Zufluss war eine ausreichende Speisung des Grundwasservorkommens im Modell möglich.

### **Flußrandbedingungen**

Für die Berücksichtigung der wechselseitigen Beziehung zwischen Lorze und Grundwasser wird eine Leakage-Randbedingung gewählt. Die Infiltration des Flusswassers erfolgt dabei über eine Kolmationsschicht mit verminderter Durchlässigkeit. Das Produkt aus der Potenzialdifferenz zwischen dem oberirdischen Gewässer und dem Grundwasser sowie dem Kolmationsfaktor liefert die In- bzw. Exfiltrationsrate (Flusstransferrate).

Für die Lorze bestehen Vermessungsdaten mit Längs- und Querprofilen. Diese beschreiben den Pegelstand dieses Gewässers bei mittlerem Abfluss und fließen direkt in das numerische Modell ein. Der Kolmationsfaktor wird dagegen im Laufe der Kalibrierung iterativ angepasst, hier gibt lediglich der Verlauf der Isohypsen gemäß Grundwasserkarte einen Hinweis auf die In-/ Exfiltrationsverhältnisse in den verschiedenen Flussabschnitten. Aus der Modellkalibrierung resultiert in den Abschnitten mit Flusswasserinfiltration (Sohle im Schotter) eine mittlere Versickerungsleistung von rd. 10 l/min pro laufendem Meter. Dies entspricht einer vergleichsweise hohen Infiltrationsrate.

Im Süden des Modellgebietes wird das Grundwasser durch kleinere Bäche sowie künstlich angelegte Vorflutgräben entwässert. Im numerischen Modell sind die Bäche und Vorflutgräben berücksichtigt (Abb. 9).

Das Grundwasser exfiltriert in die Bäche sowie in die Vorflutgräben und wird darin weggeführt. Durch Zuweisung der Flussrandbedingung in Kombination mit realistischen K-Werten konnte der Isohypsenverlauf auch im südlichen Teil des Baarer Beckens recht genau nachgebildet werden.

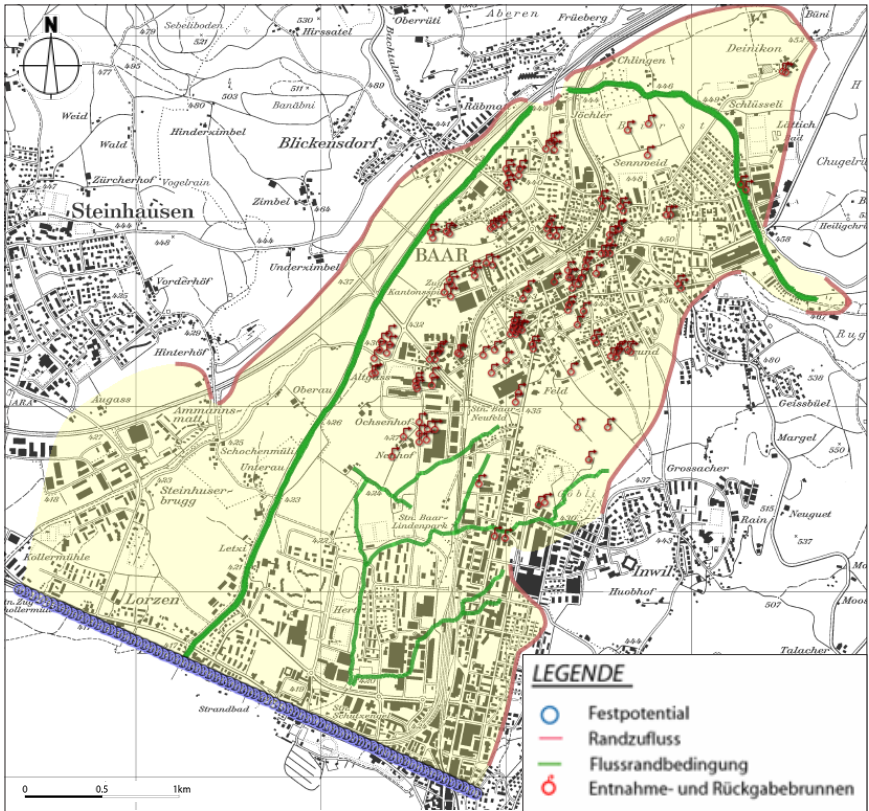


Abbildung 9: Modellrandbedingungen.  
 Figure 9: Model boundary conditions.

### Grundwasserneubildung

Neben der Speisung des Grundwasservorkommens über Randzuflüsse erfolgt die die Neubildung hauptsächlich durch die Versickerung des Niederschlagswassers. Ausgehend von einem mittleren Niederschlag von rd. 1100 mm/a dürften je nach Beschaffenheit der Geländeoberfläche im Mittel etwa 300–400 mm/a des Niederschlags versickern und zur Grundwasserneubildung beitragen.

In den überbauten Gebieten ist der Anteil des versickernden Niederschlags deutlich geringer. Im Siedlungsgebiet von Zug und Baar wird die niederschlagsbürtige Grundwasserneubildung im Modell daher lediglich mit 150 mm/a angesetzt.

### Numerisches Strömungsmodell

Zur Kalibrierung des stationären Strömungsmodells stellte der Kanton Zug eine Karte der Grundwasserisohypsen bei mittleren Verhältnissen zur Verfügung. Zur

Prüfung der Modellergebnisse lagen außerdem mehrjährige Aufzeichnungen des Grundwasserstandes von 24 kantonalen Messstellen vor.

Der stationäre Modellaufbau erfolgte unter der Annahme eines konstanten Pumpbetriebes in den vorhandenen Grundwasserfassungen mit der durchschnittlichen Entnahmemenge. Ziel der Kalibrierung war eine möglichst gute Übereinstimmung der berechneten Grundwasserstände mit dem Verlauf der Grundwasserisohypsen gemäß Grundwasserkarte als Grundlage für das Wärmetransportmodell.

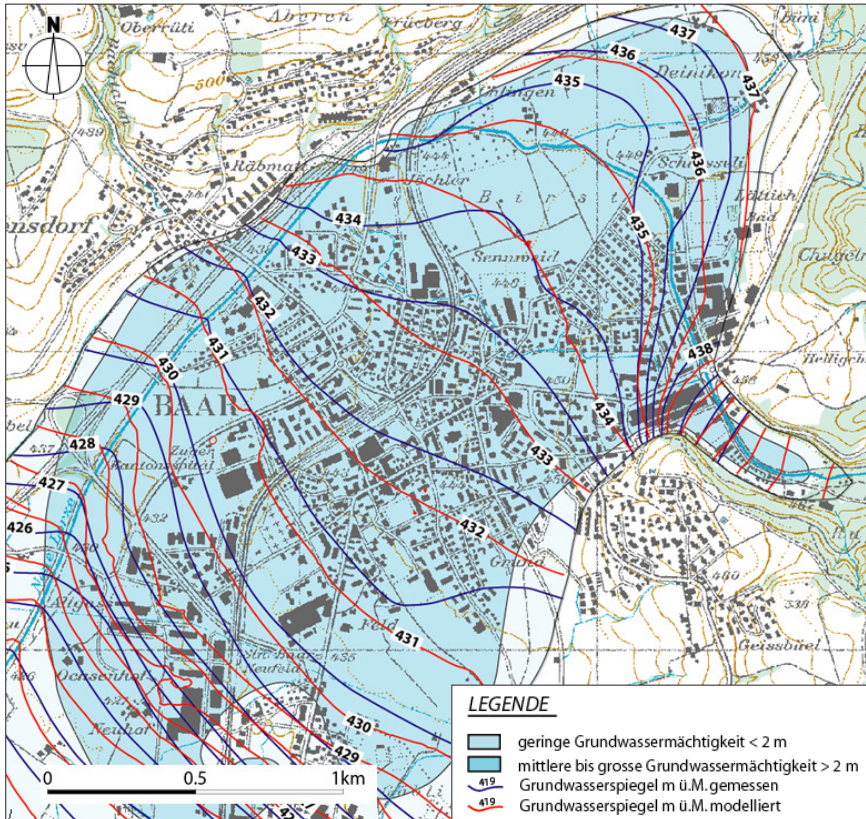


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen und der kalibrierten Isohypsen bei mittleren Grundwasserständen.

Figure 10: Comparison of the measured and modeled isohypses at mean water levels.

Der Kalibrierungsprozess erfolgte iterativ in mehreren Schritten:

- 1) Festlegung des Festrandpotenzials, der Neubildung durch Niederschlag und der Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten in einer ersten Annäherung,

- 2) In einem iterativen Prozess erfolgte die Feineinstellung der Randzuflüsse, der In- und Exfiltration der Lorze sowie der Drainagekanäle über die Leakage-Raten,
- 3) Durchführung einer Sensitivitätsanalyse,
- 4) Plausibilitätsprüfung der resultierenden Bilanzgrößen,
- 5) Nochmalige Anpassung sämtlicher Parameter.

Den aus dem Kalibrierungsprozess resultierenden Verlauf der Grundwasseroberfläche zeigt die Abbildung 10. Die im Modell berechneten Grundwasserspiegelhöhen und die generelle Fließrichtung nach Nordosten stimmen gut mit den Isohypsen auf der kantonalen Grundwasserkarte überein.

### **Bewertung der hydraulischen Modellkalibrierung**

Mit der Modellkalibrierung konnte generell eine recht gute Übereinstimmung der berechneten Wasserspiegelhöhen mit den Isohypsen der Grundwasserkarte erzielt werden.

Die gewählten Durchlässigkeiten entsprechen etwa den aus Pumpversuchen ermittelten Werten. Im Vergleich zu bisherigen Durchflussabschätzungen wurden dem Modell aber tendenziell etwas höhere K-Werte zugrunde gelegt. Entsprechend resultiert auch ein höherer Grundwasserdurchfluss.

Zu den In- und Exfiltrationsmengen (Leakage) aus der Lorze bzw. des Grundwassers liegen keine Feldmessungen vor. Die im Modell gewählte Infiltrationsrate entspricht mit rd. 10 l/ min pro laufendem Meter einem typischen Wert für wenig kolmatierte Fließgewässer des schweizerischen Mittellandes.

Insgesamt liegen die aus der Modellkalibrierung resultierenden Modell-Zu- und Wegflüsse in einer plausiblen GröÙe.

## **4.2 Thermisches Grundwassermodell**

Das für die Fragestellungen relevante Wärmetransportmodell basiert auf dem hydraulischen Modell und ermöglicht Aussagen zu den Auswirkungen der thermischen Grundwassernutzungen auf die Temperatur des oberflächennahen Grundwassers. Das Wärmetransportmodell kann darüber hinaus in Prognoseszenarien die Zulässigkeit von weiteren Nutzungen simulieren und damit als Planungsgrundlage genutzt werden.

### **Grundlagen zum Wärmetransport**

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

Generell gilt, bei der Bilanzierung der Wärme über ein Grundwasserkontrollvolumen die Transportvorgänge und die Wärmespeicherung zu beachten. Die gesamte eingetragene Wärme hängt sowohl von den Bodenkennwerten (Wärmeleitfähigkeit und Dicke der Überdeckung) als auch der Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche des Bodens und dem Grundwasser ab. Eine Temperaturniedrigung in einem Kontrollvolumen (Grundwasserleiter) bedeutet eine Abgabe von gespeicherter Wärmeenergie. Im Baarer Becken entstehen die Temperaturänderungen insbesondere durch die natürlichen Einträge aus der Neubildung, atmosphärischer Einstrahlung, Randzuflüsse und die Infiltration aus oberirdischen Gewässern. Zu den anthropogenen Einträgen gehören vor allem der Wärmefluss von beheizten Kellern, Wärmeeintrag aus der Kanalisation und Wärmeentnahme durch bestehende Wärmepumpen.

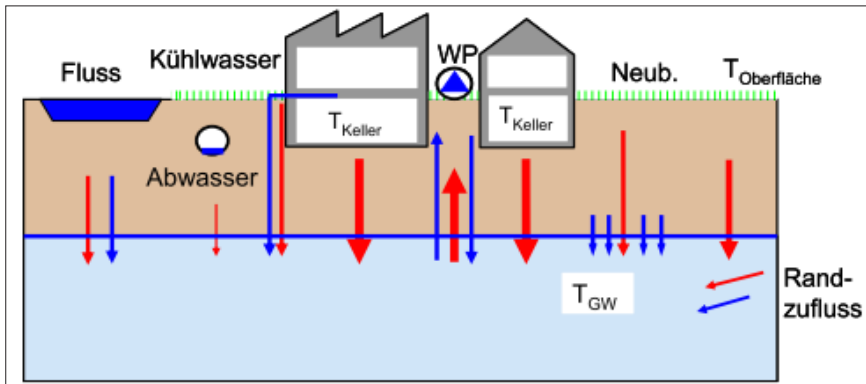


Abbildung 11: Schema einer Bilanz mit allen Energieflüssen (aus SUTER 2005).  
Figure 11: Diagram of a balance sheet with all energy flows (from SUTER 2005).

Die Abbildung 11 zeigt eine schematische Darstellung aller Bilanzgrößen. Blau eingezeichnet sind die Massenflüsse. Hier erfolgt der Wärmeeintrag durch Konvektion. Wo kein Massenfluss vorhanden ist, erfolgt eine Wärmeleitung als Advektion durch die Matrix. Rot eingezeichnet sind die Wärmeflüsse.

### Thermische Anfangs- und Randbedingungen

Den thermischen Modellrechnungen wurde eine Ausgangstemperatur des Grundwassers von  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  zugrundegelegt. Dieser Wert entspricht in etwa der mittleren Grundwassertemperatur in den vorhandenen Grundwassermessstellen.

Für die Berücksichtigung der atmosphärischen Wärmeeinstrahlung sowie des anthropogen bedingten Wärmeeintrags wurde der obersten Modellschicht flächendeckend eine konstante Jahresmitteltemperatur zugewiesen. Der Temperaturwert wurde ebenfalls mit  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  vorgegeben. Über die Modellränder sowie durch Infiltration aus der Lorze erfolgen weitere Wärmeeinträge. Diesen Wasser-

zufließen wurde die mittlere jährliche Bodentemperatur, d. h. eine konstante Temperatur von 12 °C, mitgegeben.

Da mit dem thermischen Modell primär die zu erwartenden relativen Temperaturänderungen gegenüber den vorhandenen, natürlichen Grundwassertemperaturen prognostiziert werden sollen, ist die Wahl von einheitlichen Ausgangstemperaturen für die Modellrandbedingungen zulässig.

Neben den genannten Wärmeeinträgen wurde im Modell auch der geothermische Wärmestrom vom tieferen Untergrund in den Modellkörper hinein berücksichtigt. Dieser vertikale Zustrom über die unterste Schicht wurde mit 65 W/m<sup>2</sup> vorgegeben.

## Thermische Materialparameter

### *Dispersivität*

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 wider. Dem Modell wurden eine longitudinale Dispersivität von 5 m und eine transversale Dispersivität von 0,5 m zugrundegelegt.

### *Wärmeleitfähigkeit und -kapazität*

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

Grundwasser	0,65	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Gesteinsmatrix	3,0	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

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

Grundwasser	4,2	kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Gesteinsmatrix	2,5	kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

## Thermische Nutzungen

Für die Modellrechnungen müssen die vorhandenen thermischen Grundwassernutzungen möglichst realitätsnah berücksichtigt werden. Dabei sind weniger die installierten Kälteleistungen gemäß wasserrechtlicher Konzession als vielmehr die effektiv genutzten Wärmemengen von Interesse.

Die entsprechenden Angaben liegen allerdings nur in seltenen Fällen vor, so dass diese für die thermische Modellierung abgeschätzt werden müssen. Da es sich bei den thermischen Nutzungen im vorliegenden Fall fast ausschließlich um monovalente, d. h. für die Bereitstellung von Heizenergie und Warmwasser betriebene Anlagen handeln dürfte und die Mehrzahl bei Wohnbauten installiert

ist, wurden Energiezahlen von vergleichbaren Objekten herangezogen. In Abbildung 12 sind entsprechende «typische» monatliche Wärmebedarfszahlen für Heizen und Warmwasser dargestellt. Die Angaben basieren auf einer angenommenen resp. installierten Wärmeentzugsleistung aus dem Grundwasser (Kälteleistung) von 100 kW.

Es zeigt sich, dass zur Deckung des Wärmebedarfs für Heizen und Brauchwarmwasser im kältesten Monat (Januar) rd. zwei Drittel der installierten Leistung in Anspruch genommen werden. Im Sommer wird nur Warmwasser aufbereitet und der Heizbedarf sinkt auf ca. 15 % der Leistung. Im Jahresverlauf beträgt bei Neubauten mit entsprechend guter Wärmedämmung die durchschnittliche Entnahme knapp einem Drittel der installierten Leistung.

Ausgehend von den geschätzten Wärmebedarfszahlen wurden für die vorhandenen thermischen Grundwassernutzungen die effektiv entnommenen Wärmemengen abgeschätzt.

#### 4.2.1 Modellszenario 1: Nutzung mit konzessionierten Leistungen

In einem ersten Schritt wurden mit Hilfe des numerischen Modells die thermischen Auswirkungen bei einem Dauerbetrieb der vorhandenen Anlagen mit der

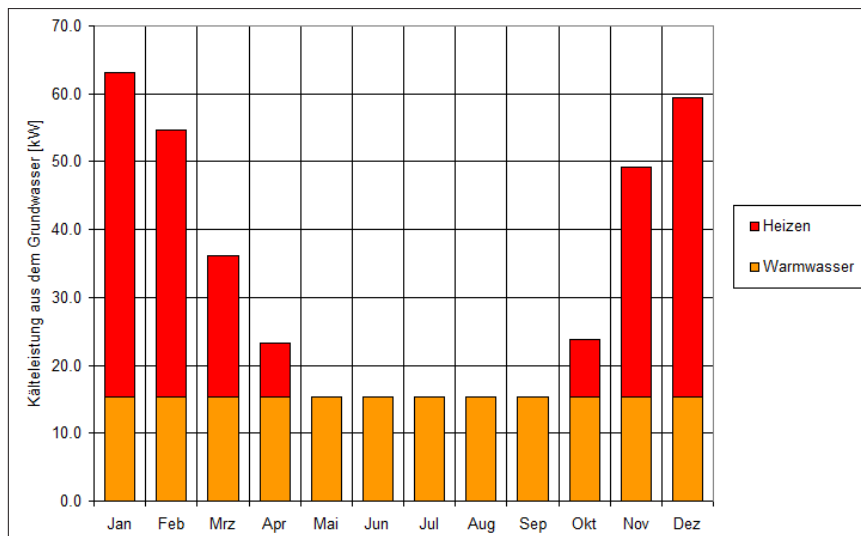


Abbildung 12: Typische monatliche Kälteleistungen für die Wärmeversorgung von Wohnbauten (basierend auf einer installierten maximalen Kälteleistung aus dem Grundwasser von 100 kW); Quelle: Kanton Zug, Amt für Umweltschutz 2013.

Figure 12: Typical monthly cooling capacities for the heat supply of residential buildings (based on a maximum installed cooling capacity from groundwater of 100 kW); source: Canton of Zug, Office for Environmental Protection 2013.

konzessionierten Leistung untersucht. Dieses Szenario entspricht einem „worst case“, welcher allerdings in Realität nie eintreten wird.

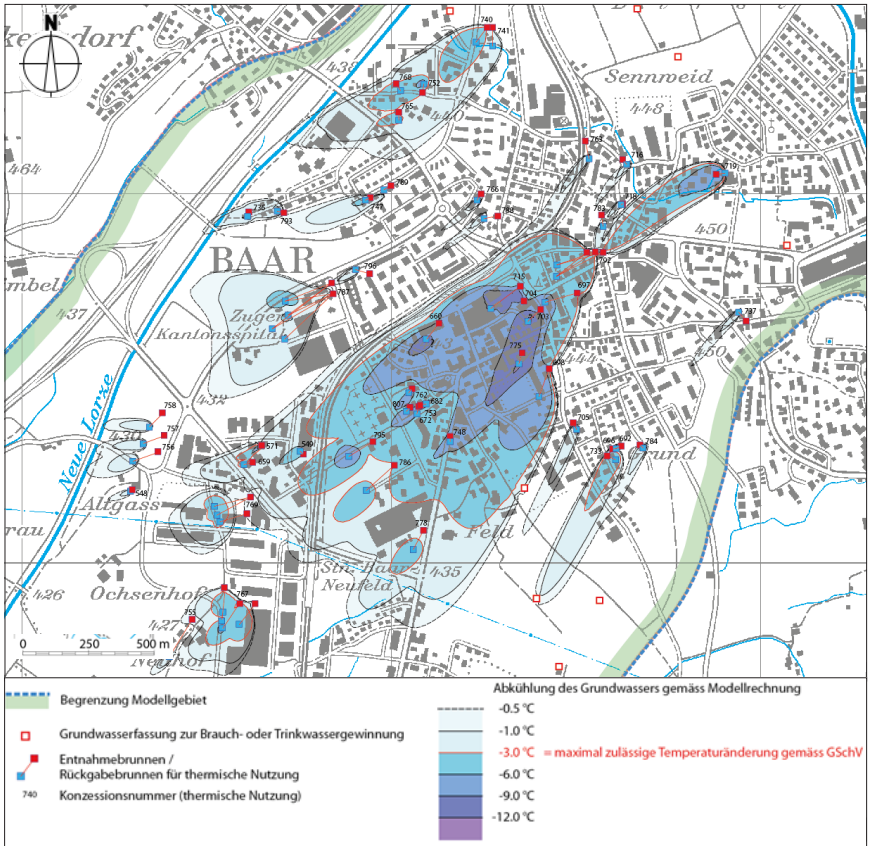


Abbildung 13: Resultierende Kälteanomalien bei Dauerbetrieb mit der konzessionierten Leistung im Gebiet Baar (Modellszenario 1).

Figure 13: Resulting cooling anomalies with continuous operation with the licensed capacity in the Baar area (model scenario 1).

Die Ergebnisse der Modellrechnungen für Szenario 1 sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Karte zeigt die resultierenden Kälteanomalien als Differenz gegenüber dem unbeeinflussten Ausgangszustand. Im Zentrum von Baar stellt sich gemäss Modell ein ausgedehnter Bereich mit einer Temperaturerniedrigung um mehr als 3 °C ein. Lokal resultieren hier Abkühlungen von > 6 °C, teils sogar von > 9 °C. Zwischen der Marktgasse/Rathausstraße im Nordosten und dem Quartier Unterdorf im Südwesten zeichnet sich bei diesem Szenario eine massive thermische Übernutzung des Grundwasservorkommens ab. Von dieser lokal starken Abkühlung, welche den Betrieb von Wärmepumpen-Anlagen beeinträchtigen würde,

wären verschiedene Nutzungen betroffen. Daneben sind auch bei verschiedenen Einzelanlagen gemäss Szenario 1 Abkühlungen von mehr als 3 °C festzustellen. Die entsprechenden Kälteanomalien sind aber örtlich begrenzt und liegen zu meist noch innerhalb des nach GSchV zulässigen 100 m-Korridors.

Andererseits lassen die Resultate der Modellrechnungen für Szenario 1 im Baugebiet noch Flächen erkennen, in denen die Auswirkungen der thermischen Nutzungen nur gering oder überhaupt nicht spürbar sind. Hier bestehen für die Zukunft mit Sicherheit noch Kapazitäten für weitere Wärmenutzungen.

#### 4.2.2 Modellszenario 2: Nutzung basierend auf realistischen Leistungen

Mit dem Szenario 2 sollten die Auswirkungen durch den Betrieb der heute vorhandenen Wärmenutzungen möglichst wirklichkeitsnah simuliert werden. Hierfür wurden bei den Modellierungen instationäre Verhältnisse bzw. die entspre-

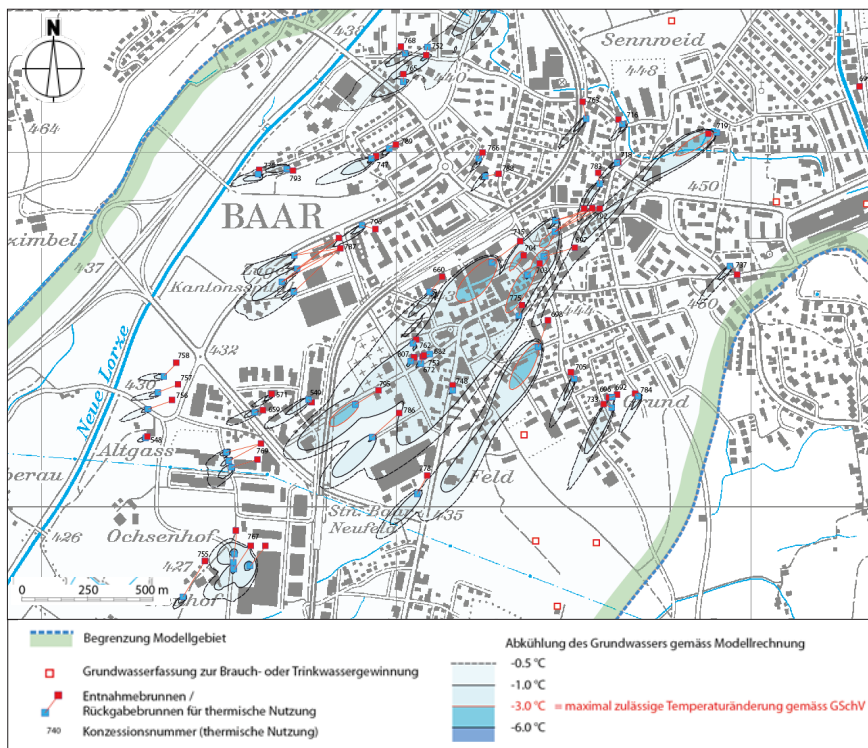


Abbildung 14: Resultierende Kälteanomalien unter «realistischen» Betriebsbedingungen im Gebiet Baar (Modellszenario 2).

Figure 14: Resulting cold anomalies under “realistic” operating conditions in the Baar area (model scenario 2).

chend dem Wärmebedarf jahreszeitlich variierenden Grundwasserentnahmeraten berücksichtigt. Die Annahmen hierzu wurden bereits in Abbildung 10 dargestellt. Die Eingaben basieren auf den geschätzten monatlichen Bedarfswerten der einzelnen Anlagen.

Die Karte zeigt die maximale Abkühlung des Grundwassers im Monat März gegen Ende der Heizperiode. Zu diesem Zeitpunkt erreichen die Kältefahnen jeweils ihre grösste Ausdehnung. Durch die geringere Wärmenutzung in den Sommermonaten baut sich die Wärmefahne in der warmen Jahreszeit teilweise wieder ab. Dieser zyklische Auf- und Abbau der Kälteanomalien führt auch dazu, dass in der Mehrzahl der Fälle keine sehr weit reichenden und ausgeprägten Kältefahnen entstehen. Dadurch kommt es auch nur zu vergleichsweise geringen thermischen Beeinflussungen zwischen den einzelnen Anlagen.

Im Modell sind viele kleine und räumlich mehr oder weniger getrennte Kältefahnen zu beobachten. Bei drei Anlagen im Zentrum von Baar führt die Nutzung zu einer Kältefahne, welche bei maximaler Ausdehnung am Ende der Heizperiode auch in etwas mehr als 100 m Entfernung noch eine Temperaturerniedrigung von mehr als 3°C zur Folge hat (Abb. 14). In diesem Bereich führt die heutige Nutzung somit bereits heute zu einer deutlichen Abkühlung, so dass weitere Anlagen genau geprüft resp. nur zurückhaltend bewilligt werden sollten.

## 5 Diskussion

Die Ergebnisse der numerischen Wärmemodellierung für das Grundwasservorkommen Baar–Zug sind in mehrfacher Hinsicht sehr interessant. Sie lassen einerseits eine Bewertung der derzeitigen Nutzung des geothermischen Potentials des oberflächennahen Grundwasser zu und erlauben andererseits eine Abschätzung, ob Spielraum besteht, auch zukünftig weiterhin die Wärme des Grundwassers als regenerative Energie speziell zur Heizung von Gebäuden nutzen zu können.

### **Heutige Grundwassernutzung zur Wärmegewinnung**

Zurzeit (2024) wird das Grundwasservorkommen von Baar–Zug (Kantonales Grundwassergebiet 5.1.a) in 50 Anlagen zur Gewinnung von umweltfreundlicher Wärme aus dem Grundwasser genutzt. Die konzessionierte Entnahmemenge beträgt gegenwärtig total rd. 34.000 l/min. Das Grundwasser dieser Anlagen wird nach der thermischen Nutzung wieder vollumfänglich zur Versickerung gebracht. Die maximal zulässige Entzugs- resp. Kälteleistung aus dem Grundwasser liegt bei 8,6 MW. Die installierte Leistung dürfte im Jahresverlauf jeweils zu rund einem Drittel genutzt werden, d.h. die effektive Entzugsleistung aus dem Grundwasser beträgt etwa 2,9 MW. Dies entsprach im Jahr 2024 einer Wärmemenge von rd. 11.200 MW/Jahr oder einer Substituierung von rd. 2.100 to Heizöl pro Jahr.

### **Verbleibendes Nutzungspotenzial, Erteilung weiterer Konzessionen**

Die numerischen Modellrechnungen haben gezeigt, dass im Zentrum von Baar heute bereits eine hohe Dichte an Grundwasserwärmenutzungen erreicht ist. Gemäß Modell dürfte im Quartier Dorf und teilweise auch im Quartier Unterdorf die Abkühlung des Grundwassers in weiten Bereichen 1–2 °C betragen, so dass das Potenzial für zusätzliche Wärmenutzungen deutlich eingeschränkt ist. In diesem Gebiet können noch kleinere bis allenfalls mittlere Anlagen bewilligt werden. Dabei sollten die Messungen der tatsächlichen Temperaturverhältnisse und ein sich allfällig abzeichnender Trend unbedingt mitberücksichtigt werden.

In den übrigen Bereichen sind nur lokal begrenzte Kältefahnen vorhanden, so dass dort in der Regel noch Nutzungspotenzial für größere energetische Grundwassernutzungen vorhanden ist. Eine unzulässige Beeinflussung bestehender Anlagen oder ein hydraulischer Kurzschluss bei größeren Anlagen sind aber unbedingt zu vermeiden. Dies gilt es im Einzelfall zu prüfen.

Das verbleibende Wärmenutzungspotenzial kann aufgrund der ausgeführten Modellrechnungen nicht exakt angegeben werden. Hierfür wären weitere Szenarien zu berechnen. Es darf aber davon ausgegangen werden, dass bei einer räumlich optimal verteilten Nutzung eine zusätzliche Entzugsleistung aus dem Grundwasser von noch ca. 1,0–1,5 MW realisierbar sein sollte (entspricht einer konzessionierten Entzugsleistung von rund 4,0–4,5 MW). Eine genauere Beurteilung des verbleibenden Potenzials sollte gestützt auf gezielte Beobachtungen der räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Grundwassertemperaturen möglich sein.

Grundsätzlich sind in Gebieten mit hoher Wärmenutzungsdichte die Nutzung des Grundwassers zu Kühlzwecken zu begrüßen. Damit lässt sich eine zu starke

## **6 Dank**

Mein ausdrücklicher Dank gilt meinem Arbeitsgeber Jäckli Geologie AG, namentlich Herrn Dr. Walter Labhart, sowie dem Amt für Umwelt des Kantons Zug (AfU Zug), speziell Herrn Dr. Volker Lützenkirchen. Beide stellten für die Erarbeitung des anspruchsvollen Themas umfangreiche Daten sowie Fachwissen zur Verfügung und ermöglichten so die Erstellung eines prognosefähigen Werkzeugs zur Planung und Bewertung von projektierten Grundwassernutzungen im Baarer Becken des Kantons Zug. Besonderer Dank auch dafür, dass ich das konkrete Beispiel aus meiner Projektstätigkeit für den Beitrag im Jahrbuch des Nassauischen Vereins für Naturkunde verwenden durfte. Nicht zuletzt danke ich auch dem Schriftleiter des Nassauischen Vereins für Naturkunde, Prof. Dr. Benedikt Toussaint, der auch mein Vater und selbst Hydrogeologe ist. Er hat mich dazu ermuntert, die Erfahrungen und Erkenntnisse aus meiner Modelliertätigkeit zu veröffentlichen und hat mich bei manchen Formulierungen unterstützt.

## 7 Literatur

- Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) (2021): Klima-Normwerte 1991-2020 für die Schweiz; [https://scnat.ch/de/uuid/i/d827445d-e844-5d84-ab92-4c4dcf6e639a9-Klima-Normwerte\\_1991-2020\\_f%C3%BCr\\_die\\_Schweiz](https://scnat.ch/de/uuid/i/d827445d-e844-5d84-ab92-4c4dcf6e639a9-Klima-Normwerte_1991-2020_f%C3%BCr_die_Schweiz) [Zugriff: 28.04.2025].
- BADOUX, V., HUBER, E. & HÄNSLI, F. (2024): Geodatensatz zum Wärmenutzungspotenzial in den Lockergesteins-Grundwasserleitern der Schweiz – Schlussbericht (26. April 2024), Auftraggeber Bundesamt für Energie, Bern. – 82 S.; Zollikofen (GEOtest AG).
- BECHER, J., ENGLISCH, C., GRIEBLER, C. & BAYER, P. (2022): Groundwater fauna downtown – drivers, impacts and implications for subsurface ecosystems in urban areas. – *Journal of Contaminant Hydrology*, **248** (4): [doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104021](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104021).
- BÖTTCHER, F., HALILOVIC, S., GÜNTHER, M., HAMACHER, TH. & ZOSSEDER, K. (2025): Integration der thermischen Grundwassernutzung in die kommunale Wärmeplanung. – *Grundwasser*, **30** (1): 19-35.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL (2004): Wegleitung Grundwasserschutz. – 137 S.; Bern.
- Bundesrat (2025): Verordnung über die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen (CO<sub>2</sub>-Verordnung). – Amtliche Sammlung 2024 705. – 81 S.; Bern.
- co2online (2023): Wasser-Wasser-Wärmepumpe: Funktion, Kosten, Vor- & Nachteile; <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/waermepumpe/wasser-wasser-waermepumpe> [Zugriff 22.06.2025].
- DIERSCH, H.-J.G. (2014): FEFLOW. Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. – 996 S.; Berlin, Heidelberg (Springer).
- EnergieSchweiz (2017): Übersicht über die Bewilligungsverfahren für Grundwasserwärmenutzungen in den Kantonen. – 27 S.; Bern.
- FIGURA, S., LIVINGSTONE, D.M., HOEHN, E. & KIPPER, R. (2013): Klima und Grundwasser. – *Aqua & Gas*, **7/8**: 28-33; Zürich.
- GebäudeKlima Schweiz (2014): Wärmequellennutzung. Unterlagen für Planer | März 2014. – 8 S.; Olten (Schweizerischer Verband für Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik).
- HENNING, A. & LIMBERG, A. (2012): Veränderung des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung. – *Brandenburgische geowiss. Beitr.*, **19**: 81-92.
- HÖTZL, H. & MAKURAT, A. (1981): Veränderung der Grundwassertemperatur unter dicht bebauten Flächen am Beispiel der Stadt Karlsruhe. – *Z. dt. geol. Ges.*, **132**: 767-77; Hannover.
- HUSS, M. (2025): Gletscherschmelze in der Schweiz. – *Akademie aktuell*, **2025** (1): 14-21; München (Bayer. Akademie der Wissenschaften)
- JOHNER, CHR. (2023): Gefahr für Gebäude: Unterirdische Wärmeinseln sind für Städte ein Problem; <https://www.geo.de/natur/nachhaltigkeit/unterirdische-waermeinseln-sind-fuer-staedte-ein-problem-33657016.html> [Zugriff: 01.05.2025].
- Kanton Zug – Amt für Umweltschutz (2013): Thermische 3D-Grundwassermodellierung von Baar/Zug. – *Umwelt Zug*, **2013** (2): 16 S.; Zug.
- Kanton Zug, Amt für Umwelt (o. J.): Energie aus Grundwasser; <https://zg.ch/de/planen-bauen/bauvorschriften/energienutzung-aus-untergrund-und-wasser/energie-aus-grundwasser> [Zugriff 22.06.2025].
- LANZ, K. (2021) (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz, Kapitel 4: Thermische Nutzung. – *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz*, **43**: 111 -143.
- LINK, F. (2024): Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz, Ausgabe 2023 (Schlussbericht 31. Juli 2024), Auftraggeber EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bern. – 50 S.; Pfyn (Geo-Future GmbH).

- MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (o. J.): Nullgradgrenze; <https://www.meteoschweiz.admin.ch/wetter/wetter-und-klima-von-a-bis-z/nullgradgrenze.html> (Zugriff 25.06.2025).
- Mitteilungen BiG (2025): Grundwasser: der verborgene Schatz der Schweiz. – 6 S.; Bern.
- MENBERG, K., BLUM, P., KURYLYK, B.L. & BAYE, P. (2014): Observed groundwater temperature response to recent climate change. – *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **18** (11): 4453-4466.
- MENBERG, K., BAYER, P., ZOSEDER, K., RUMOHR, S. & BLUM, P. (2013): Subsurface urban heat island in German cities. – *Science of the Total Environment*, **442**: 123-133.
- NÖTZLI, J., PETER, A., NÄHLEN, N. & PHILLIPS, M. (2025): Verborgenes Eis in den Schweizer Alpen: Der Permafrost taut immer schneller. – *WSL Berichte*, **164**: 35-47; Davos Dorf (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL).
- OHMER, M., KLESTER, A., KISSINGER, A., MIRBACH, ST., CLASS, H., SCHNEIDER, M., LINDENLAUB, M., BAUER, M., LIESCH, T., MENBERG, K. & BLUM, PH. (2022): Berechnung von Temperaturfahnen im Grundwasser mit analytischen und numerischen Modellen. – *Grundwasser*, **27**:113-129.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2015): Norm SIA 384/7 Grundwasserwärmenutzung. – 84 S.; Zürich.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (1955): Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer gegen Verunreinigung vom März 1955. – 552-557; Bern.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (1991): Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Bundesschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991, Stand 1. Februar 2012. – 34 S.; Bern.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (1998): Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998, Stand 1. Januar 2025. – 74 S.; Bern.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2021): Grundwasserschutz in der Schweiz. Bericht der Parlamentarischen Verwaltungskontrolle zuhanden der Geschäftsprüfungskommission des Nationalrates). – *Bundesblatt* 022 1772. – 60 S.; Bern.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2022a): Grundwasserschutz in der Schweiz. Bericht der Geschäftsprüfungskommission des Nationalrates vom 28. Juni 2022. – 30 S.; Bern.
- Eidgenossenschaft (2022b): Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (KlG). – *Bundesblatt* Nr. 196 vom 11. Oktober 2022, Stand 1. Januar 2025. – 8 S. und sechs Faktenblätter; Bern.
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2024): Verordnung zum Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (Klimaschutz-Verordnung, KlV) vom 27. November 2024, Stand 1. Januar 2025). – 30 S.; Bern.
- SINREICH M., KOZEL R., LÜTZENKIRCHEN V., MATOUSEK F., JEANNIN P.-Y., LÖW S. & STAUFFER F. (2012): Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. – *Aqua & Gas*, **9**: 16-28; Zürich.
- Solarwatt (o. J.): Wasser-Wasser-Wärmepumpen: Funktionsweise, Vor- und Nachteile. – <https://www.solarwatt.de/ratgeber/wasser-wasser-waermepumpe> [Zugriff 28.06.2025].
- SUTER, U. (2005): Thermische Nutzung des Grundwasserleiters Zürcher Limmatal. – Diplomarbeit, Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH Zürich; Zürich.

DR. ROLAND TOUSSAINT  
c/o Jäckli Geologie AG  
CH-5400 Baden  
Kronengasse 39  
Tel.: +41 44 344 5599  
E-Mail: [toussaint@jaeckli.ch](mailto:toussaint@jaeckli.ch)

Manuskriptingang: 12.August 2025