

Vergleichende Temperaturfahnenprognose anhand zweier industriell genutzter Grundwasserwärmepumpen: FEFLOW vs. ÖWAV-Modell

Cornelia Steiner¹ · Klaus Heimlich² · Sylke Hilberg¹

Eingegangen: 19. Oktober 2015 / Überarbeitet: 3. Februar 2016 / Online publiziert: 18. Mai 2016
© Die Autoren 2016. Dieser Artikel ist auf SpringerLink mit Open Access verfügbar

Zusammenfassung Um die Bewilligungsfähigkeit von Grundwasserwärmepumpen (GWP) zu beurteilen, müssen Prognosen über die resultierenden Temperaturfahnen erstellt werden. In Österreich wird ein analytisches Modell (Regelblatt 207-2 des ÖWAV) zur Berechnung von Temperaturfahnen kleiner GWP ($< 10 \text{ l s}^{-1}$) herangezogen. Für das ÖWAV-Modell erfolgte bisher keine systematische Überprüfung der Prognosen. Diese Studie beschreibt die Anwendungen eines analytischen (ÖWAV) und eines numerischen (FEFLOW) Prognosemodells auf zwei industrielle Kühlanlagen, die ergiebige Porengrundwasserleiter erschließen. Der Vergleich der beiden Modelle zeigt, dass eine detaillierte Kenntnis der Eingangsparameter, wie der Grundwasser-Isohypsenplan, die Entnahme- und Rückgabetemperaturen und die Konsensmenge, maßgebend für eine realitätsnahe Auswirkungsprognose ist. Bei einer guten Datengrundlage und einfachen hydrogeologischen Verhältnissen werden mit beiden Modellen gute Ergebnisse erzielt, die Abweichung zum tatsächlichen Wert liegt bei $< 1 \text{ K}$. Erweisen sich die hydrogeologischen Umstände komplexer, kann das ÖWAV-Modell mit einer durchschnittlichen Differenz von rund $1,3 \text{ K}$ zur tatsächlichen Grundwassertemperatur nicht mehr empfohlen werden.

Comparison of heat-plume predictions using two large-scale models of groundwater heatpump installations: FEFLOW vs. the ÖWAV-model

Abstract The geometry of heat-plumes created by groundwater heat-pumps (GHPs) must be determined in advance to confirm if they are acceptable according to local guidelines. In Austria, an analytical model (ÖWAV Regulation 207-2) is widely-used for determining plume geometries of small GHP installations ($< 10 \text{ l s}^{-1}$), however a systematic evaluation of the ÖWAV Model has been lacking. This study applies an analytical model (ÖWAV) and a numerical model (FEFLOW) to two large-scale industrial cooling-plants in Austria that exploit productive porous aquifers. The model comparison reveals that detailed knowledge of the input parameters, such as groundwater levels, as well as extraction and injection temperatures, is crucial for realistic heat-plume predictions. Both models provide good results for sufficiently complete data sets and simple hydrogeological settings, since the deviation of $< 1 \text{ K}$ is within acceptable limits. The ÖWAV model is not recommended for complex hydrogeological settings, due to an average deviation of 1.3 K from the measured groundwater temperature in this case.

Keywords Groundwater heat pump · Heat plume · Analytical model · Temperature prognosis · FEFLOW · ÖWAV

✉ Cornelia Steiner
cornsteiner@gmail.com

¹ Fachbereich Geographie und Geologie, Universität Salzburg, Hellbrunner Straße 34, 5020 Salzburg, Österreich
² Geoconsult Holding ZT GmbH, Hölzlstraße 5, 5071 Wals bei Salzburg, Österreich

Einleitung und Problemstellung

GWP zählen zu den nachhaltigen Energietechnologien, die in der heutigen Zeit, in der immer mehr Wert auf Klimaschutz gelegt wird und die fossilen Energieträger Öl und

Gas teurer werden, weltweit einen großen Aufschwung erleben. Hinsichtlich der steigenden Zahlen von GWP kommt auch der genauen Einschätzung ihrer Beeinflussung des Grundwassers (GW) mehr Bedeutung zu. Im Zuge der Heiznutzung durch GWP kommt es durch eine Kaltwassereinleitung zu einer lokalen Abkühlung des GW und des Untergrundes. Wird das GW für eine Kühlanlage genutzt, erfolgt eine Erwärmung durch Warmwassereinleitung.

Die Nutzungsart der Wärmepumpen bedingt Unterschiede in ihrer Einsatzfrequenz, die sich unterschiedlich auf die GW-Temperatur auswirken (Rauch 1992). Bei der Anwendung der Wärmepumpen für die Gebäudeheizung werden diese nur in der kalten Jahreszeit betrieben und es findet eine periodische Beschickung des Rückgabebrunnens statt (instationärer Betrieb). In den warmen Jahreszeiten wird in diesem Fall die Anlage nicht bzw. weniger intensiv genutzt und die Temperatur des GW-Körpers kann sich in dieser Phase erholen. Die Kühlwasseranlagen werden meist in der industriellen Produktion eingesetzt und sind daher regelmäßig das ganze Jahr im Betrieb (stationärer Betrieb). Genau genommen läuft selbst die ganzjährige industrielle Produktion im stündlichen Intervallbetrieb. Die dadurch entstehenden kurzzeitigen Temperaturschwankungen gleichen sich jedoch aufgrund des Speichervermögens des Aquifers bereits im näheren Umfeld des Rückgabebrunnens wieder aus. Der Aquifer wird daher in diesem Fall über das ganze Jahr gleichmäßig beansprucht und es gilt die Annahme, dass das Temperaturfeld eine endgültige Ausdehnung erreicht (UBW 2009). Die Unterschiede zwischen stationärem und instationärem Betrieb müssen dementsprechend in die Berechnungen der Temperaturfelder im GW miteinbezogen werden. Da für diese Untersuchung zwei industrielle Kühlanlagen als Beispiele dienen, die das ganze Jahr über in Betrieb sind, wird im Folgenden jeweils der theoretische Hintergrund für die stationären Berechnungen beschrieben. Der Arbeitsbehelf 43 beinhaltet jedoch auch eine vereinfachte Methode für instationäre Systeme (ÖWAV 2014).

Die Temperaturänderung und die Beeinflussung umliegender GW-Nutzungen sind wesentliche Punkte im Regelblatt 207-2 des ÖWAV. In diesem Regelblatt sind die genauen Vorgaben für die Errichtung und den Betrieb der Wärmepumpen in Österreich festgelegt. Zum Inhalt des Regelblatts zählen neben der Definition des Standes der Technik, der Bemessung, der Errichtung, des Betriebs und des Rückbaus von GWP auch die Definition der wasserwirtschaftlichen Randbedingungen und Grenzen der thermischen Nutzung von GW und Untergrund. Die Temperatur des genutzten Wassers soll 5 °C nicht unterschreiten und 20 °C nicht überschreiten. Im Falle einer jahreszeitlichen Absenkung der GW-Temperatur durch Oberflächengewässer kann die Temperatur von 5 °C jedoch unterschritten werden. Die Temperaturdifferenz zwischen eingeleitetem Wasser und der natürlichen GW-Temperatur am Anlagen-

standort darf maximal 6 K betragen. Die von der Einleitung ausgehende Temperaturdifferenz muss bei Erreichen einer stromabwärts gelegenen GW-Nutzung auf < 1 K gesunken sein.

Die Berechnung der Temperaturschweife ist jedoch sehr komplex, da viele Parameter einfließen müssen, die teilweise schwer bestimmbar bzw. mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Eine 1992 entwickelte Methode (Rauch 1992) bildet die Grundlage für das Regelblatt 207-2, mit der die Temperaturfahnen für Anträge zur Errichtung von kleinen GWP (< 10 l s⁻¹) in Österreich modelliert werden. Für größere Anlagen sind numerische Modelle vorgeschrieben. Die Modelle werden zwar in der Praxis angewandt, die Ergebnisse werden jedoch im Normalfall nicht überprüft. Für die gegenständliche Untersuchung wurden zwei Großanlagen gewählt, bei denen aufgrund langjähriger Messreihen im Abstrom die Beeinflussung des Aquifers quantifizierbar und somit ein Modellvergleich möglich ist.

Auch große GWP stellen eine expandierende Technologie dar, die mit einem steigenden Konfliktpotenzial konkurrierender GW-Nutzungen einhergeht. Die Auswertung der Anzahl und der räumlichen Verteilung großer (> 10 l s⁻¹) Anlagen im Vergleich zu kleinen Anlagen für die Bundesländer Salzburg, Vorarlberg und Steiermark soll die Relevanz dieser geschilderten Fragestellung verdeutlichen. Für diese Bundesländer wurden von den geographischen Informationssystemen Daten über die Standorte und Konsensmengen der GWP zur Verfügung gestellt. Die Daten aus Vorarlberg und der Steiermark repräsentieren den Stand der Kühl- und Heizanlagen aus dem Jahr 2014 und jene aus Salzburg aus dem Jahr 2015. Die Konsensmengen wurden in den unterschiedlichen Einheiten m³ d⁻¹ und l s⁻¹ angegeben. Um eine gute Vergleichbarkeit zu erzielen, wurden sie für die Auswertung in die Einheit l s⁻¹ umgerechnet. In dieser Umrechnung wurde, da die tatsächliche Betriebsdauer der Anlagen pro Tag unbekannt ist, stattdessen eine Dauer von 24 h pro Tag angenommen.

Eine GIS-basierte Auswertung aller GWP in den genannten Bundesländern zeigt eine zu erwartende hohe Dichte der Anlagen in den Siedlungsgebieten. Für den Alpenraum beschränken sich die Standorte der GWP daher auf die Talanlagen. Eine Anhäufung der Anlagen in den Siedlungsgebieten bedingt ein hohes Konfliktpotenzial konkurrierender Nutzungen, die eine genaue Prognoserechnung unabdingbar machen. Aus diesem Konfliktpotenzial kann jedoch unter Umständen auch ein Vorteil resultieren. Dies wäre unter der Voraussetzung möglich, dass sich in der Temperaturfahne einer Heizanlage eine Kühlanlage befindet oder umgekehrt. Der jeweiligen, im Abstrom gelegenen, GWP stünde in diesem Fall eine größere Temperaturspreizung und daher ein größeres Energiepotenzial zur Verfügung. Über 90 % der GWP werden zu Heizzwecken betrieben. Der Anteil der Anlagen mit einer Konsensmenge von > 10 l s⁻¹ liegt bei

den Kühlanlagen zwischen 17 % (Salzburg) und 40 % (Vorarlberg) und bei den Heizanlagen nur bei maximal 4 %. Der im Zuge dieser Studie durchgeführte Modellvergleich für Großanlagen ist daher besonders für Kühlanlagen relevant.

Ziel der Studie war es die Anwendbarkeit des analytischen ÖWAV-Modells für industrielle Großanlagen an den beiden Standorten zu überprüfen. Dafür werden die Ergebnisse sowohl mit gemessenen Temperaturdaten als auch mit den Ergebnissen einer numerischen Modellierung mit FEFLOW verglichen. Der Vergleich der Messwerte mit den Ergebnissen der numerischen Modellierung ergab wichtige Erkenntnisse hinsichtlich des Modellaufbaus, die ebenfalls besprochen werden.

Theoretischer Hintergrund

Analytische Modelle stellen im Vergleich zu numerischen Modellen eine einfache Methode mit einer kurzen Rechenzeit und wenigen benötigten Eingabeparametern dar, der jedoch starke Vereinfachungen der hydraulischen und thermischen Vorgänge zugrunde liegen. Folgende Randbedingungen der hydrogeologischen Parameter werden dabei für das ÖWAV-Modell angenommen (ÖWAV 2014):

- eine konstante, mit GW erfüllte Mächtigkeit,
- einheitliches GW-Gefälle,
- konstante Durchlässigkeit,
- konstanter transportwirksamer Hohlraumanteil.

Diese idealisierten Randbedingungen bedingen eine parallele GW-Strömung mit einer konstanten Fließgeschwindigkeit. Absenkungen und Erhöhungen des GW-Standes, sowie Änderungen der Strömungsrichtung und -geschwindigkeit, die durch Entnahme- und Rückgabeburgen verursacht werden, werden vernachlässigt. Diese Vernachlässigung ist zulässig, da sich diese Änderungen nur auf das nahe Umfeld der Brunnen auswirken. Sie hat jedoch zur Folge, dass die Rechenergebnisse nicht für den unmittelbaren Nahbereich der Infiltration gelten dürfen und dass sie für größere Entnahmemengen bisher als ungeeignet betrachtet werden.

Im Gegensatz dazu können in numerischen Modellen bekannte kleinräumige Unregelmäßigkeiten des Untergrunds berücksichtigt werden. Um numerische Modelle erfolgreich anzuwenden, müssen detaillierte Kenntnisse über die Eingangsparameter vorliegen. Diese fehlen jedoch oft und infolge liefert das Modell potenziell eine Scheingenauigkeit.

Konvektive Wärmezuflüsse, durch Infiltration oder GW-Zuflüsse, werden bei analytischen Modellen vernachlässigt und die unbeeinflussten GW-Temperaturen werden als konstant angenommen. Aufgrund dieser Voraussetzungen ergibt sich unter stationären Bedingungen ein ausgeglichenes System, in dem die Energieeinträge durch Wärmeleitung nur durch eine anthropogene Wärmenutzung verur-

sacht werden. Die vom ÖWAV-Modell berechnete Temperatur nach einer bestimmten Entfernung vom Rückgabeburgen und in der direkten Achse des Abstroms ist der Mittelwert über die gesamte Aquifermächtigkeit. Der in der Realität auftretende vertikale Temperaturverlauf im Untergrund wird im Modell nicht berücksichtigt.

Zusätzliche Energieeinträge können in numerische Modelle einfließen. Bei der Berechnung als 3D-Modell ist es dann auch möglich, den vertikalen Temperaturverlauf auszuwerten.

ÖWAV-Modell

Das Modell der Temperaturfahnenberechnung für den stationären Betrieb beruht auf den 1988 veröffentlichten Überlegungen und Gleichungen von Ingerle, die im Folgenden dargestellt werden. Auf die Berechnung für sehr geringe Fließgeschwindigkeiten, die von Ingerle ebenfalls behandelt werden, wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da das Augenmerk auf großindustriellen GWP liegt, die aufgrund der benötigten großen Fördermenge unter normalen Bedingungen nicht in Gebieten mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten errichtet werden, da es sonst zwischen Entnahme- und Rückgabeburgen zu hydraulischen und/oder thermischen Kurzschlüssen kommt.

In diesen Ansatz fließt die vertikale Wärmeleitung über die Oberfläche ein. Ingerle stellte fest, dass bei einer Kaltwassereinleitung die Wiedererwärmung des Wassers durch Wärmeaufnahme von der Oberfläche und durch Mischvorgänge an den Rändern des Einzugsbereichs erfolgt. Um die Wärmeaufnahme, die durch Dispersion, konduktive Wärmeübertragung und das Pendeln der GW-Strömungsrichtung erfolgt, beschreiben zu können, führte Ingerle den Ausbreitungswinkel (α) ein.

Um eine vereinfachte Berechnung der Temperaturfahne zu ermöglichen, wird der tatsächliche Einflussbereich der Temperaturanomalie näherungsweise durch das in Abb. 1 dargestellte vereinfachte System ersetzt, in dem man statt der punktförmigen Quelle (Brunnen), eine Linienquelle und einen Parallelströmungskörper annimmt.

In der Energiebilanz, des in Abb. 1 dargestellten Einheitsvolumens, wird dem Austrag über die Querschnittsfläche auf der rechten Seite, der Wärmeeintrag über die Oberfläche, über die beiden Längsseiten und über die linke Seite (durch Rückgabeburgen) gegenüber gestellt. Durch Umformen der Energiebilanz lässt sich die im ÖWAV-Regelblatt 207 genannte iterative Berechnungsformel der Temperaturfahne, ausgehend vom Infiltrationsbrunnen ($x = 0$ und $T_i =$ Einleittemperatur) und mit dem Hilfwert w_i aus Gl. 2, ableiten (ÖWAV 2014).

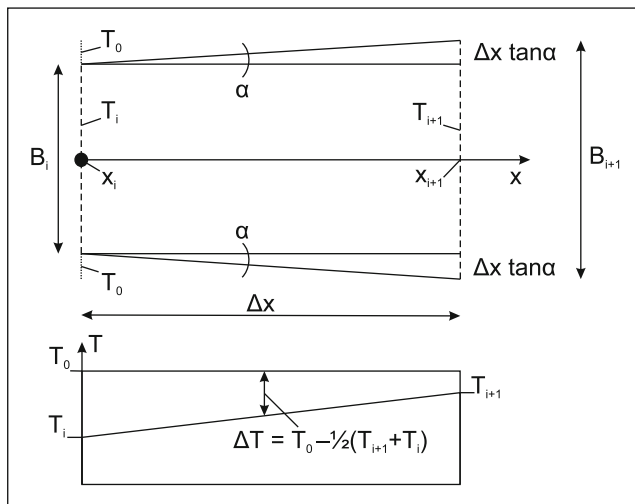


Abb. 1 Geometrische Beziehungen im Parallelströmungskörper (nach ÖWAV 2014)

$$T_{i+1} = \frac{T_i \cdot (B_i - \frac{w_i}{2}) + T_0 \cdot (2 \cdot \Delta x \cdot \tan \alpha + w_i)}{B_i + 2 \cdot \Delta x \cdot \tan \alpha + \frac{w_i}{2}} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{\lambda_D}{D + \frac{H}{4}} \cdot (B_i + \Delta x \cdot \tan \alpha) \cdot \Delta x \cdot \frac{1}{\frac{Q}{B} \cdot c_{vw}} \quad (2)$$

- B = hydraulische Breite des Brunnens, $B = Q/(k_f \cdot J \cdot H)$ [m]
 B_i = Breite des Parallelströmungskörpers an der Stelle x_i [m]
 c_{vw} = spezifische Wärmekapazität des Wassers [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]
 D = mittlere Mächtigkeit der Deckschicht [m]
 H = mittlere GW-Mächtigkeit [m]
 J = GW-Spiegelgefälle
 k_f = hydraulische Durchlässigkeit [$m \cdot s^{-1}$]
 Q = Nutzwassermenge [m]
 T_0 = unbeeinflusste GW-Temperatur [$^{\circ}C$]
 T_i = Temperatur an der Stelle x_i [$^{\circ}C$]
 α = Dispersion und Verschwenkungswinkel
 λ_D = Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

Es wird eine Einleitung des genutzten Wassers über einen vollkommenen Brunnen vorausgesetzt. Im Arbeitsbehelf ÖWAV (2014) wird darauf hingewiesen, dass vor allem in Situationen, in denen die effektive Länge des Filterrohrs (LF) signifikant kleiner als die GW-Mächtigkeit (H) ist, eine genauere Berücksichtigung der vertikalen Ausbreitung der Temperaturfahne unbedingt erforderlich ist.

Um die vertikale Ausbreitung zu beschreiben, wird der Parameter der thermischen Tiefe (ThT) eingeführt. Die thermische Tiefe wird, wie die Länge der Temperaturfahne, nach einem Temperaturabbruchkriterium von $\Delta T = 1 \text{ K}$ bestimmt und ist als vertikale Ausbreitung in der Entfer-

nung der halben Länge der Temperaturfahne definiert. Die vertikale thermische Ausbreitung wurde von Sitzenfrei und Rauch (2013) mittels 8640 Parametervariationen untersucht und aus den Ergebnissen die empirische Gl. 3 mit der Hilfsgröße Gl. 4 abgeleitet.

$$ThT = (2 + |\Delta T|) \cdot \sqrt{\frac{Q}{k_f^{0,5} \cdot \beta \cdot J \cdot \pi}} \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{k_{fH}}{k_{fV}}} \quad (4)$$

- k_{fH} = horizontale hydraulische Durchlässigkeit [$m \cdot s^{-1}$]
 k_{fV} = vertikale hydraulische Durchlässigkeit [$m \cdot s^{-1}$]

Weitere detaillierte numerische Untersuchungen von Sitzenfrei und Rauch (2013) zeigten bei Verwendung der thermischen Tiefe als für die Wärmeausbreitung maßgebende GW-Mächtigkeit eine Verbesserung der Genauigkeit bei der Bestimmung von Länge und Breite der Temperaturfahne nach der Berechnungsformel von Ingerle (1988). Aus diesem Grund wurde die thermische Tiefe als maßgebende GW-Mächtigkeit (mH) in Gl. 5 mit der unteren Grenze der Länge des Filterrohrs (LF) und mit der oberen Grenze der GW-Mächtigkeit (H) in das Modell ÖWAV implementiert.

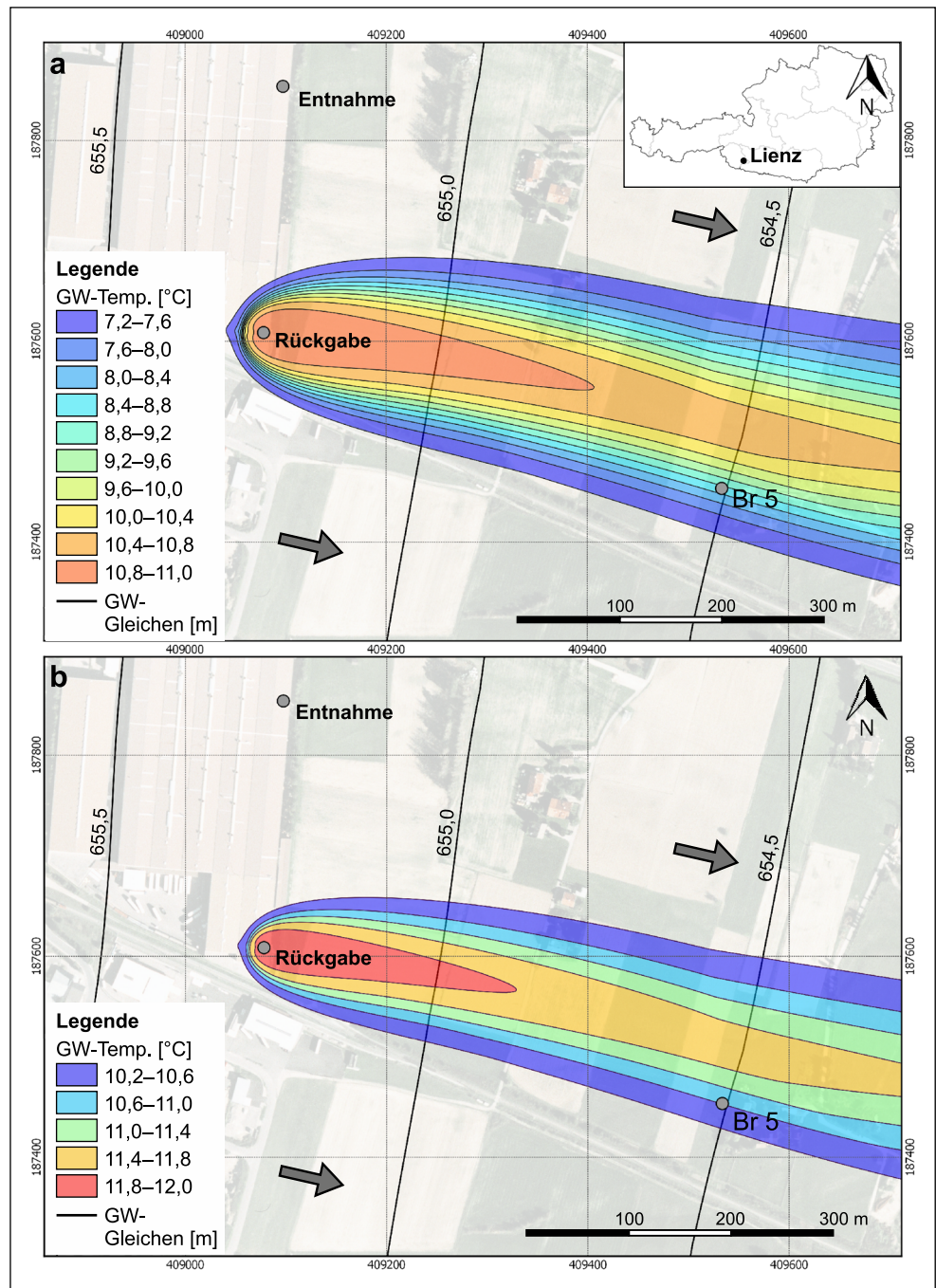
$$mH = ThT [LF, H] \quad (5)$$

Modellierungssoftware FEFLOW

FEFLOW ist eine weit verbreitete 2D- und 3D-Modellierungssoftware für GW-Strömungs- und Transportprozesse, die u. a. von Kupfersberger (2009) und Russo (2009) für die Simulation des Wärmetransports angewandt wird. FEFLOW setzt das numerische Verfahren zur Lösung partieller Differentialgleichungen nach der Finite-Elemente-Methode ein. Zunächst werden Differentialgleichungen in diskrete Gleichungen umgewandelt und anschließend konvergente Näherungslösungen abgeleitet. Die Gleichungen werden für jeden Knotenpunkt eines über das Untersuchungsgebiet gelegten Netzes gelöst, wofür Anfangs- und Randbedingungen der zu untersuchenden Variablen bekannt sein müssen.

Als Anfangsbedingungen werden die GW-Potenzialhöhen festgelegt, für die Randbedingungen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die auch die Abgrenzung des Untersuchungsgebiets beeinflussen (Diersch 2009a). Bei der Randbedingung 1. Art wird der hydraulischen Höhe ein fester Wert zugewiesen. Die Randbedingung 2. Art beschreibt

Abb. 2 Temperaturmodellierung der GWP in Lienz mit FEFLOW. Entnahme und Rückgabe kennzeichnen die GWP-Anlage, *Br 5* Beweissicherungsbrunnen. *Pfeile* symbolisieren die Grundwasserfließrichtung. **a** Temperaturfahne für Betriebszustand der GWP bei Einreichung. **b** Temperaturfahne im realen Betriebszustand der GWP



einen Fluss senkrecht zum Rand, entlang dessen sich die hydraulische Höhe entsprechend ändert. Die Randbedingung 3. Art beschreibt einen vorgeschriebenen Mengenverlust entlang des Randes und als Randbedingung 4. Art kann ein Einzelbrunnen eingebaut werden. Analog können in FEFLOW auch für zusätzliche Wärmetransportberechnungen die genannten Randbedingungen eingesetzt und somit z. B. Wärmequellen simuliert werden (Diersch 2009b).

Hydrogeologischer Rahmen

Teststandort Lienz

Bei der untersuchten GWP handelt es sich um eine industrielle Kühlanlage in Lienz (siehe Abb. 2), die sich in ebener Tallage am Lienzener Talboden auf einer Höhe von etwa 664 mNN befindet. Fluviale, nacheiszeitlich geschüttete Sedimente der Drau bauen den Untergrund auf. Die glaziale Übertiefung des Beckens beträgt in diesem Bereich

ca. 300–400 m (Joanneum Research 1990). Bei der Errichtung der Brunnen (Entnahme und Rückgabe in Abb. 2) wurden gerundete Kiese mit meist hohem Sandanteil angetroffen, in welche in unterschiedlichen Tiefen feinsandig-schluffige Linsen eingelagert sind (Herbst et al. 2008).

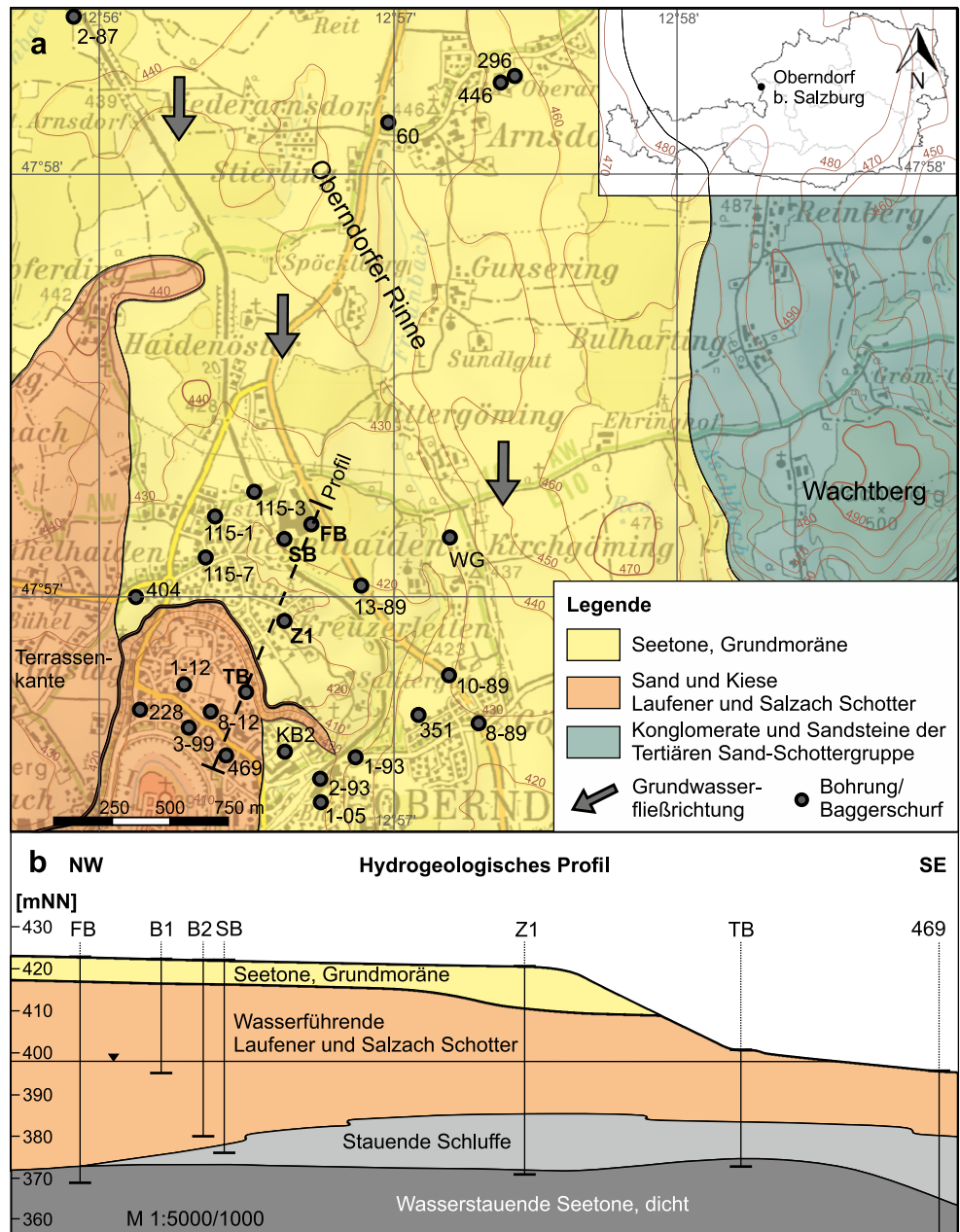
Im Zuge einer von Herbst et al. (2008) dokumentierten 65 m tiefen Probebohrung wurde nachgewiesen, dass sich die GW-Mächtigkeit jedenfalls über die Endteufe hinaus erstreckt. Ein nach der Fertigstellung der Bohrung durchgeführter Pumpversuch ergab einen k_f -Wert von $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. Die effektive Porosität wurde nach Marotz (1968) über den k_f -Wert berechnet und beträgt demnach 21 %. Der Flurabstand von 8 m wurde von Herbst et al. (2008) durch

Daten von Abstichsmessungen in umliegenden Hausbrunnen und des Pumpversuchs ermittelt. Aus GW-Isohyphenplänen wurde im Rahmen derselben Studie ermittelt, dass der GW-Strom in WE-Richtung verläuft (siehe Pfeile in Abb. 2), und aus Brunnenwerten in der näheren Umgebung wurde ein Durchschnittswert von 1,6 ‰ für das GW-Spiegelgefälle bestimmt.

Teststandort Oberndorf

Die GWP befindet sich in Oberndorf bei Salzburg (siehe Abb. 3) und wird ebenfalls zu Kühlzwecken betrieben. Der an diesem Standort befindliche Aquifer ist in der von Nor-

Abb. 3 Hydrogeologische Karte (a) und Profil (b) (verändert nach Jenisch 1996) von Oberndorf. *FB* Förderbrunnen der GWP, *SB* Rückgabeburgen der GWP, *Z1* und *TB* Messstellen, *Pfeile* symbolisieren Grundwasserfließrichtung



den nach Süden abfallenden „Oberndorfer Rinne“ ausgebildet, die sich in die Oberfläche tertiärer, diagenetisch verdichteter Ablagerungen einschneidet und mit unterschiedlichen quartären Sedimenten verfüllt ist (Forstinger 2004). Zu der quartären Verfüllung der Rinne zählen die, teilweise zu Konglomerat verkrusteten, Laufener Schotter, die die wasserführenden Schichten darstellen und über basale Seetonschichten geschüttet wurden. Die Seetonschichten bilden den GW-Stauer und steigen gegen Süden an, wodurch die GW-Mächtigkeit abnimmt, wie im Profil in Abb. 3. zu sehen ist. Die östliche Begrenzung der Rinne wird nach Forstinger (2004) und Nagl (1999) durch aufragende tertiäre Gesteine im Hügelzug des Wachtbergs gebildet. Die Geländeaufnahmen von Nagl (1999) zeigen, dass der Wachtbergrücken aus schottrigen bis schluffigen Abfolgen besteht. Durch Isotopenuntersuchungen wurden Anspeisungen in den GW-Strom aus östlicher Richtung aus diesen geringer mächtigen GW-Körpern, die in oberen Bereichen des Wachtbergrückens ausgebildet sind, nachgewiesen (Forstinger 2004–2005).

Der Flurabstand südlich der GWP bis zur 320 m entfernt gelegenen GW-Messstelle Z1 beträgt durchschnittlich 24 m. Eine Auswertung durch Nagl et al. (1998) von Messungen bei Z1 im Zeitraum von 1995 bis 1998 zeigt eine geringe Schwankung des GW-Spiegels von 0,48 m. Aus von Nagl et al. (1998) angefertigten GW-Isophytenplänen wurde das GW-Gefälle für den Raum Oberndorf mit rund 2–4 ‰ bestimmt. Im Förderbrunnen der GWP wurde von Nagl (1999) ein Leistungspumpversuch durchgeführt, der eine Transmissivität von $0,05 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ergab. Für die GW-Mächtigkeit von 20 m ergibt sich daraus eine Durchlässigkeit von $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. Da keine genauen Untersuchungen zur Porosität des Untergrunds vorliegen, wurde die effektive Porosität aus der Durchlässigkeit nach Marotz (1968) auf 20 % bestimmt.

Die Hauptfließrichtung des GW verläuft in NS-Richtung. Südlich der Geländekante der Ziegelhaiden-Terrasse kommt es durch den Anstieg des GW-Stauers und durch die Verengung des Flurabstandes zu einer Verengung des Abflussquerschnitts und einer damit einhergehenden Verteilung des GW-Gefälles. Das GW tritt am Fuße der Ziegelhaiden-Terrasse an mehreren Quellen zutage und fließt in Bächen zur Salzach ab (Nagl 1999). In diesem Bereich, in dem die Schotter der südlich gelegenen Salzach die Laufener Schotter ersetzen, liegt auch der Brunnen Kreuzerleiten. Der Flurabstand beträgt hier durchschnittlich 2 m und die GW-Mächtigkeit zwischen 10 und 15 m (Nagl 1999).

Modellanwendung

Die Modellanwendung erfolgte an beiden Teststandorten unter stationärer Betrachtung. Dies ist aufgrund der hydrogeologischen

Verhältnisse und der Betriebsweisen der Anlagen zulässig.

Am Standort Lienz liegt die GW-Temperatur des ursprünglichen, unbeeinflussten Zustands (gemessen an Hausbrunnen Br. 5 Mai 2009 bis Sept. 2012) bei ca. $10 \text{ }^\circ\text{C}$ und weist eine jahreszeitliche Schwankungsbreite von ca. 1 K auf. Im Betriebszustand der Kühlanlage resultiert an Br. 5 eine mittlere GW-Temperatur (gemessen Nov. 2012 bis Jan. 2015) von ca. $10,8 \text{ }^\circ\text{C}$, bei einer jahreszeitlichen Schwankungsbreite von ca. 1,6 K. Die Kühlanlage wird 17 h pro Tag bei einer 5-Tage-Woche ganzjährig betrieben.

Am Standort Oberndorf liegt die GW-Temperatur des ursprünglichen, unbeeinflussten Zustands (gemessen an GW-Messstelle Z1 Jan. 2003 bis Juli 2004) bei ca. $10 \text{ }^\circ\text{C}$ und weist eine jahreszeitliche Schwankung $< 0,1 \text{ K}$ auf. Im Betriebszustand der Kühlanlage resultiert an Z1 eine mittlere GW-Temperatur (gemessen Dez. 2003 bis Sept. 2004) von ca. $11,1 \text{ }^\circ\text{C}$, bei einer jahreszeitlichen Schwankungsbreite von nur ca. 0,5 K.

Die Ergebnisse der Modelle werden für beide Teststandorte an Messstellen überprüft, die sich mindestens 300 m im Abstrom befinden. Die Messdaten zeigen, dass auf dem Strömungsweg zwischen Kühlwasserrückgabe und Messstellen jeweils eine de facto vollständige Dämpfung der kurzzyklischen Temperatureinwirkung der Kühlanlagen stattfindet.

Die FEFLOW-Modelle wurden nach den vorhandenen und auch nach in die ÖWAV-Modelle eingehenden, geologischen Grundlagen aufgesetzt, und eine Detailkalibrierung der GW-Isophyten über die Durchlässigkeitsbeiwerte wurde durchgeführt. Es wurden jeweils 2D-Modelle mit stationärer Berechnung erstellt. Die Modellgebiete wurden mit ca. 5 bzw. 3 km^2 so dimensioniert, dass die Beeinflussung durch GW-Entnahme und -rückgabe ausreichend weit abseits der hydraulischen Randbedingungen (Hydraulic-head BC, No-Flow BC) stattfand.

Teststandort Lienz

Die Werte der Parameter des Teststandorts Lienz, die für die Modelle verwendet wurden, sind in Tab. 1 zusammen gestellt. Es sind hierbei zwei Szenarien zu betrachten, wovon das erste dem projektierten GWP-Betrieb bei Einreichung entspricht und das zweite den realen Betriebszustand abbildet. Dabei wurden hinsichtlich der GW-Temperatur, der Temperaturspreizung und der genutzten Wassermenge große Unterschiede festgestellt.

Für die Unterlagen zur wasserrechtlichen Bewilligung der GWP wurden die benötigten Werte durch die genannten Vorerhebungen bestimmt. Der für die FEFLOW-Modellierung verwendete GW-Isophytenplan entspricht dem 20-jährigen Mittel. Die Werte für das ÖWAV-Modell von 6° für den Ausbreitungswinkel und 3500 h für die Betriebs-

Tab. 1 Eingabeparameter für die Modelle ÖWAV und FEFLOW, Lienz

Parameter/Einheit ÖWAV	Prognosewerte Einreichung	Realer Betriebszustand
Durchschnittliche Entnahmetemperatur [°C]	7,0	10,0
Durchschnittliche Rückgabetemperatur [°C]	11,0	12,0
Maximale Bemessungswassermenge [l s ⁻¹]	100	100
Betriebsstunden pro Jahr [h]	3500	2600
Grundwassermächtigkeit [m]	65	65
Flurabstand [m]	8	8
Grundwasserspiegelgefälle [-]	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Durchlässigkeitsbeiwert [m s ⁻¹]	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Seitlicher Ausbreitungswinkel [°]	6	6
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht [W m ⁻¹ K ⁻¹]	1,5	1,5
Durchschnittliche Jahreswassermenge (berechnet) [l s ⁻¹]	39,95	29,68
<i>Zusätzliche Parameter/Einheit FEFLOW</i>	<i>Prognosewerte Einreichung</i>	<i>Realer Betriebszustand</i>
Durchlässigkeitsbeiwert [m s ⁻¹]	$3 \cdot 10^{-3}$ bis $5,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$ bis $5,5 \cdot 10^{-3}$
Effektive Porosität [-]	0,2	0,2
Longitudinale Dispersivität [m]	10	10
Transversale Dispersivität [m]	1	1

Tab. 2 Eingabeparameter für die Modelle ÖWAV und FEFLOW für zwei Beobachtungspunkte, Oberndorf

Parameter/Einheit ÖWAV	Z1	Br. Kreuzerleiten
Durchschnittliche Entnahmetemperatur [°C]	10,0	10,0
Durchschnittliche Rückgabetemperatur [°C]	14,4	14,4
Maximale Bemessungswassermenge [l s ⁻¹]	25	25
Betriebsstunden pro Jahr [h]	6800	6800
Grundwassermächtigkeit [m]	20	16
Flurabstand [m]	24	13
Grundwasserspiegelgefälle [-]	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Durchlässigkeitsbeiwert [m s ⁻¹]	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Seitlicher Ausbreitungswinkel [°]	6	6
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht [W m ⁻¹ K ⁻¹]	1,5	1,5
Durchschnittliche Jahreswassermenge (berechnet) [l s ⁻¹]	19,41	19,41
<i>Zusätzliche Parameter/Einheit FEFLOW</i>	<i>Z1</i>	<i>Br. Kreuzerleiten</i>
Durchlässigkeitsbeiwert [m s ⁻¹]	$8 \cdot 10^{-4}$ bis $3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$ bis $3 \cdot 10^{-3}$
Effektive Porosität [-]	0,2	0,2
Longitudinale Dispersivität [m]	10	10
Transversale Dispersivität [m]	1	1

stunden pro Jahr entsprechen den vom ÖWAV-Modell vorgeschlagenen Standardwerten. Die benötigte Temperaturspannung für die Anlage wurde bei Einreichung mit 4 K und die angestrebte Konsensmenge mit 100 l s⁻¹ festgelegt. Nach Angaben des Städtischen Wasserwerkes Lienz liegen im Bereich Lienz im Jahresgang die GW-Temperaturen bei 30 m ab GOK zwischen 5,5 und 8 °C. Aus diesem Grund wurde die Entnahmetemperatur für die Modelle bei Einreichung mit 7 °C und die Rückgabetemperatur entsprechend der benötigten Spreizung mit 11 °C festgelegt.

Die Beweissicherung während des Betriebs der Anlage stellt indes eine gesicherte Datenquelle dar, die für den realen Betriebszustand in Tab. 1 herangezogen wurde. Für

die durchschnittliche Entnahme- und Rückgabetemperatur wurden mit 10 und 12 °C die langzeitlichen Mittelwerte der Temperaturen im Förder- und Schluckbrunnen gewählt. Die tatsächliche durchschnittlich genutzte Wassermenge beträgt mit 29 l s⁻¹ deutlich weniger, als die beantragte Menge von 100 l s⁻¹. Die Betriebsstunden im ÖWAV-Modell wurden für die zweite Prognoserechnung auf 2600 h a⁻¹ festgelegt, um die tatsächliche durchschnittliche Jahreswassermenge von 29 l s⁻¹ zu erreichen, die maßgeblich als Jahreswassermenge in beide Modelle einfließt.

Für diesen Standort wurden in FEFLOW zusätzlich 3D-Modelle für die Werte bei realem Betriebszustand erstellt, um die Auswirkung einer Einspeisung des Kühlwassers in

unterschiedlichen Tiefen zu untersuchen. Die Filterstrecke des Rückgabebrunnens reicht von 6 bis 28 m ab GOK. In drei Szenarien wurde die Rückgabe des Kühlwassers je auf Höhe des GW-Spiegels, über die gesamte Filterstrecke und am unteren Ende der Filterstrecke simuliert. Darüber hinaus wurde jeweils eine Berechnung mit einer k_f -Anisotropie vorgenommen ($k_{fz} = k_{fxy}/10$).

Teststandort Oberndorf

Die Werte der Parameter, die für die Modelle verwendet wurden, sind in Tab. 2 zusammengestellt. Der vorliegende GW-Isohypsenplan, der in das FEFLOW-Modell eingebracht wurde, basiert auf einer Stichtagsmessung am 29.11.1998. Wie bereits geschildert und im Profil in Abb. 3 zu sehen, ergeben sich hinsichtlich der Hydrogeologie Unterschiede zwischen der Messstelle Z1 und dem Brunnen Kreuzerleiten. Es werden daher zwei Prognoserechnungen, entsprechend den Wertetabellen in Tab. 2, für die beiden Standorte durchgeführt.

Die Entnahme- und Rückgabetemperatur wurde entsprechend der langfristig gemittelten Temperaturen im Förder- und Schluckbrunnen angenommen. Die maximale Bemessungswassermenge entspricht mit 25 l s^{-1} der genehmigten Konsensmenge. Die für die Berechnung herangezogene durchschnittliche Jahreswassermenge berechnet sich aus der maximalen Bemessungswassermenge und den Betriebsstunden pro Jahr. Die Auswertung der Beweissicherungsdaten der GWP ergab eine durchschnittliche Einspeisung von

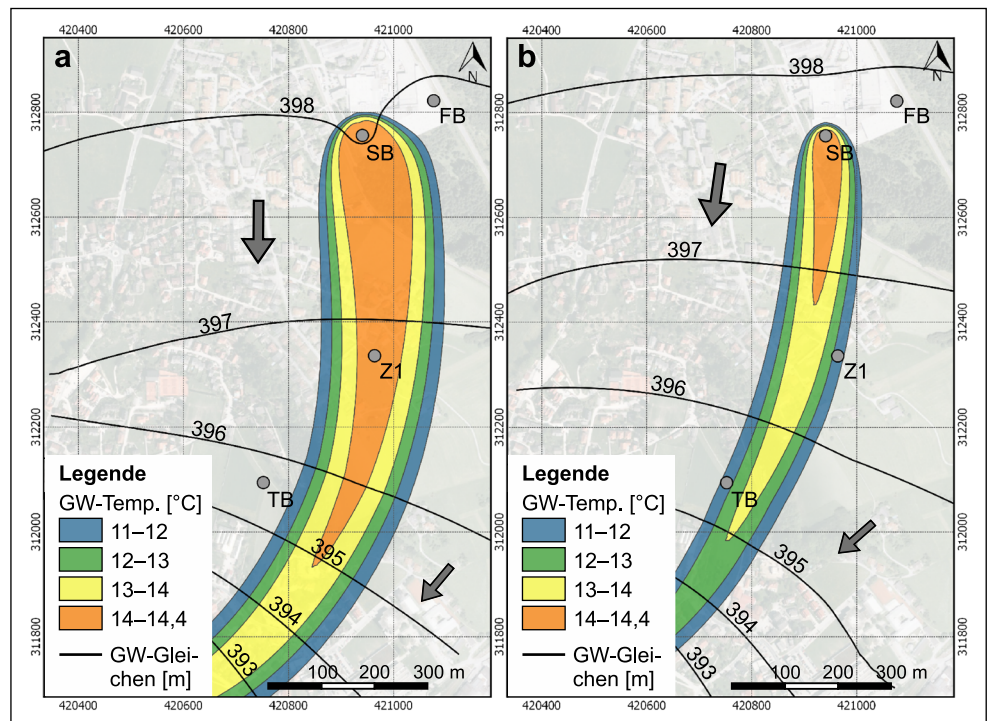
rund 19 l s^{-1} . Die Betriebsstunden pro Jahr wurden daher in beiden Modellen so gewählt, dass die durchschnittliche Jahreswassermenge diesen Wert aufweist.

Für die Prognoserechnung des ÖWAV-Modells bei Z1 wird, wie dem geologischen Profil in Abb. 3 zu entnehmen ist, mit 20 m die durchschnittliche GW-Mächtigkeit auf der Ziegelhaiden-Terrasse gewählt. Für die Durchlässigkeit wird der aus dem oben erwähnten Pumpversuch ermittelte Wert von $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ gewählt.

Die Werte für den Flurabstand, die GW-Mächtigkeit und die Durchlässigkeit wurden für die Prognoserechnung Br. Kreuzerleiten der geänderten hydrogeologischen Situation am Fuße der Ziegelhaiden-Terrasse, angepasst. Der für diese Berechnung gewählte Flurabstand von 13 m entspricht dem Mittelwert aus dem Flurabstand auf der Ziegelhaiden-Terrasse und jenem am Fuße der Terrasse. Die GW-Mächtigkeit von 16 m wurde ebenfalls aus dem Mittelwert auf und am Fuße der Terrasse bestimmt. Infolge der Änderung der GW-Mächtigkeit wird die Durchlässigkeit mit der im Pumpversuch bestimmten Transmissivität neu berechnet. Bei einer GW-Mächtigkeit von 16 m beträgt die Durchlässigkeit $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$.

Die Modellierung in FEFLOW exakt nach vorliegendem GW-Isohypsenplan ergab ein unrealistisches Ergebnis (Abb. 4a.), das im nächsten Abschnitt genauer erläutert wird. Im zweiten FEFLOW-Modell wurde durch kleinräumige, geringfügige Änderungen der hydraulischen Durchlässigkeit der GW-Isohypsenplan entsprechend den an Z1 und Br. Kreuzerleiten gemessenen Temperaturen adaptiert

Abb. 4 Temperaturmodellierung der GWP in Oberndorf mit FEFLOW. *FB* (Förderbrunnen) und *SB* (Rückgabebrunnen) kennzeichnen die GWP-Anlage. *Z1* und *TB* Messstellen. *Pfeile* symbolisieren die Grundwasserfließrichtung. **a** Temperaturfahne bei Grundwasserströmung nach Vorlage. **b** Temperaturfahne bei adaptiertem Grundwasserisohypsenplan



Tab. 3 Zusammenstellung der Prognoseergebnisse für die GWP in Lienz. Die Werte sind für den 450 m vom Schluckbrunnen entfernten Beweissicherungsbrunnen Br 5 mit einer durchschnittlichen Grundwassertemperatur von 10,8 °C gerechnet

Modell	Prognostizierte Temperatur [°C]	Differenz zur Beweissicherung [K]	Prognostizierte Breite [m]
ÖWAV – Einreichung	9,5	-1,3	280
FEFLOW – Einreichung	8,7	-2,1	230
ÖWAV – Ist-Werte	11,2	+0,4	260
FEFLOW – Ist-Werte	10,6	-0,2	180

Tab. 4 Zusammenstellung der Prognoseergebnisse für die GWP in Oberndorf. Die Werte sind für Entfernungen ab Rückgabebrunnen von 320 m für Z1 und 600 m für Br. Kreuzerleiten gerechnet, die durchschnittliche Grundwassertemperaturen von 11,1 °C (Z1) und 11,3 °C (Br. Kreuzerleiten) aufweisen

Modell/Standort	Prognostizierte Temperatur [°C]	Differenz zur Beweissicherung [K]	Prognostizierte Breite [m]
ÖWAV – Z1	12,8	+1,7	197
FEFLOW (nach Vorlage) – Z1	14,2	+3,1	220
FEFLOW (adaptiert) – Z1	11,5	+0,5	140
ÖWAV – Br. Kreuzerleiten	12,1	+0,8	261
FEFLOW (nach Vorlage – Br. Kreuzerleiten)	10,0	-1,3	220
FEFLOW (adaptiert) – Br. Kreuzerleiten	11,2	+0,1	120

(Abb. 4b.), um die Auswirkungen kleiner Änderungen der GW-Fließrichtung auf die Temperaturprognose zeigen zu können.

Modellergebnisse

Teststandort Lienz

Die Ergebnisse der Modellrechnungen werden mit der tatsächlichen gemessenen Durchschnittstemperatur von 10,8 °C im Beweissicherungsbrunnen Br. 5 nach Inbetriebnahme der GWP, deren Lage in Abb. 2 gezeigt ist, verglichen. Die Ergebnisse der Prognosen und die Differenzen zum Referenzwert sind in Tab. 3 zusammengestellt.

Das Ergebnis des ÖWAV-Modells für den Betriebszustand Einreichung liegt um 1,3 K niedriger als die Messung der Beweissicherung, während sich für den realen Betriebszustand eine Differenz von 0,4 K ergibt. Ein Vergleich der Ergebnisse der FEFLOW-Prognose für den Betriebszustand Einreichung mit der Messung der Beweissicherung zeigt eine Differenz von 2,1 K sowie eine Abweichung von 0,2 K für den realen Betriebszustand.

Eine genaue Kenntnis der Parameter des GWP-Betriebs und der natürlichen GW-Temperatur bewirkt in beiden Modellen somit, wie zu erwarten, deutlich bessere Prognosen.

Vergleicht man die Temperaturergebnisse beider Modelle für den realen Betriebszustand miteinander, zeigt sich, dass beide Modelle < 1 K an die gemessenen Werte heranreichen, wobei das ÖWAV-Modell die Temperatur überschätzt und das FEFLOW-Modell eine zu geringe Temperatur pro-

gnostiziert. Im numerischen Modell wird die Temperatur direkt für die Messstelle prognostiziert, während beim analytischen Ansatz die Berechnung nur entlang der Achse des Abstroms erfolgt. FEFLOW zufolge beträgt die Temperatur im direkten Abstrom 11,5 °C; dies stimmt mit der Prognose des ÖWAV-Modells von 11,2 °C sehr gut überein. Das analytische und das numerische Modell prognostizieren in diesem Fall annähernd gleiche Werte für die Temperaturen.

Die Ergebnisse der Modelle für die Breite der Temperaturfahne weichen stärker voneinander ab. Der Wert des ÖWAV-Modells liegt dabei um 80 m höher, als jener des FEFLOW-Modells. Welcher der beiden Werte näher an dem tatsächlichen Wert liegt, kann jedoch aufgrund fehlender Messstellen nicht verifiziert werden.

Die Ergebnisse der FEFLOW-3D-Modellierung für den Brunnen Br. 5 zeigen abhängig von der Tiefe der Rückgabe nur eine sehr geringe Schwankung von < 0,2 K. Ein vertikaler Temperaturgradient ist an dieser Stelle bei isotropen Durchlässigkeiten nicht feststellbar, bei anisotropen Verhältnissen mit einer kleineren vertikalen hydraulischen Durchlässigkeit ($k_{fz} = k_{fxy}/10$) liegt eine maximale vertikale Temperaturspreizung von 0,2 K auf 50 m vor. Auf eine detaillierte Besprechung der 3D-Modellierung wird hier verzichtet, da auch diese Werte aufgrund fehlender tiefengestufte Temperaturmessungen nicht verifiziert werden können.

Teststandort Oberndorf

Die Ergebnisse der Modellrechnungen werden mit der tatsächlichen gemessenen Durchschnittstemperatur von

11,1 °C bei Z1 und 11,3 °C im Br. Kreuzerleiten verglichen. Die Ergebnisse der Prognosen und die Differenzen zu den Referenzwerten sind in Tab. 4 zusammengestellt.

Das Ergebnis des ÖWAV-Modells für Z1 liegt um 1,7 K höher und im Br. Kreuzerleiten um 0,8 K höher als der Wert der Beweissicherung. Die durchschnittliche Abweichung der Prognose zur tatsächlichen GW-Temperatur beträgt somit 1,25 K. Eine Differenz von 1 K kann ausschlaggebend für die Bewilligungsfähigkeit einer Anlage sein. Das ÖWAV-Modell eignet sich in diesem Fall daher nicht mehr für die Prognoserechnung der Temperatur.

Die tatsächliche Breite der Temperaturfahne beträgt beim Br. Kreuzerleiten mindestens 106 m, entsprechend der Entfernung, die der Brunnen seitlich des GW-Stroms ausgehend vom Rückgabebrunnen situiert ist. Das ÖWAV-Modell prognostiziert eine Breite von 261 m an dieser Stelle. Aussagen darüber, ob das Modell die Breite richtig angibt oder sie überschätzt, können mit diesen Untersuchungen nicht getroffen werden.

Das FEFLOW-Modell, das genau nach Vorlage des gegebenen GW-Isohypsenplans aufgebaut wurde, prognostiziert eine unrealistische Temperaturfahne. Die Messstelle Z1 liegt in diesem Fall in der Mitte der Temperaturfahne mit einer Temperatur von 14,2 °C und überschätzt damit den tatsächlich gemessenen Durchschnittswert um 3,1 K. Dem Modell zufolge liegt dafür der Br. Kreuzerleiten außerhalb der Temperaturfahne, die Temperatur wird daher sehr stark unterschätzt. Die Temperaturaufzeichnungen an dieser Stelle zeigen jedoch durch einen Anstieg um durchschnittlich 1,1 K, dass der Br. Kreuzerleiten sehr wohl von der GWP beeinflusst wird.

Für das zweite FEFLOW-Modell wurden die GW-Isohypsen durch lokale Änderungen der hydraulischen Durchlässigkeit geringfügig adaptiert (siehe Abb. 4a und b). Dadurch konnte erreicht werden, dass sich nun beide Messpunkte innerhalb der Temperaturfahne befinden. Die Abweichungen zu den gemessenen Temperaturen liegen dann bei 0,5 K an der Messstelle Z1 und 0,1 K am Br. Kreuzerleiten (Tab. 4). Der Vergleich der beiden FEFLOW-Modelle veranschaulicht somit exemplarisch, dass sich eine geringfügige Änderung des zugrundeliegenden GW-Isohypsenplans stark auf die Temperaturprognose auswirkt.

Das adaptierte FEFLOW-Modell bildet die tatsächlichen Gegebenheiten nun sehr gut nach und bildet eine zweite Vergleichsmöglichkeit für die Ergebnisse der Temperaturprognose des ÖWAV-Modells, die wie besprochen nur entlang der direkten Achse des Abstroms berechnet werden. Im ÖWAV-Modell wird die in Abb. 4b dargestellte Biegung des GW-Abstroms von der Rückgabe zum Br. Kreuzerleiten nicht berücksichtigt und stattdessen ein linearer GW-Strom angenommen. Entlang dieser linearen Strömungslinie werden auf Höhe Z1 im FEFLOW-Modell 13,6 °C und auf Höhe Br. Kreuzerleiten 11,5 °C prognostiziert. Das ÖWAV-

Modell unterschätzt um 0,8 K an der Messstelle Z1 und um 0,6 K am Br. Kreuzerleiten die von FEFLOW berechneten Temperaturen. Damit stimmen an diesen Punkten die vom ÖWAV-Modell prognostizierten Temperaturen relativ gut mit den Werten des FEFLOW-Modells überein. Für die Prognoserechnung des ÖWAV-Modells in der Praxis bedeutet dies jedoch nicht zwangsläufig eine gute Anwendbarkeit, da die zu untersuchenden Punkte in der Abstromachse liegen müssen.

Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen dieser Studie konnte nachgewiesen werden, dass neben der bereits für industrielle Großanlagen geforderten Methodik der numerischen Modellierung auch das ÖWAV-Modell unter den im Folgenden beschriebenen Voraussetzungen für Einleitmengen von 20 bis 30 l s⁻¹ gute Ergebnisse für die Temperaturentwicklung im direkten Abstrom von GWP liefert.

Das ÖWAV-Modell tendiert dabei eher zu einer Überschätzung der GW-Temperaturen, da die Temperaturen nur für Standorte in der direkten Abstromlinie prognostiziert werden. Die Temperaturüberschätzung ist für die Einreichung von GWP grundsätzlich positiv zu werten, da es zu einer konservativen Prognose etwaiger negativer Auswirkungen führt. Allerdings kann es dadurch zur Verhinderung von Anlagen kommen, die auf Basis der Prognosen nicht umsetzbar sind, in der Praxis aber durchaus bewilligungsfähig wären.

Die Untersuchungen in Lienz zeigen aufgrund der Eingabe von genaueren Eingangsdaten der Entnahme- und Rückgabetemperaturen und der Konsensmenge eine deutlich bessere Bestimmung der Temperaturentwicklung. Eine langzeitliche Messung der unbeeinflussten GW-Temperatur vor Ort im Rahmen der Untersuchungen für eine realistische Temperaturfahnenprognose wird daher ebenso empfohlen wie eine zuverlässige Angabe der durchschnittlichen Jahreswassermenge und mittleren Rückgabetemperatur der GWP.

Bei einer guten Datengrundlage und einfachen hydrogeologischen Verhältnissen, wie sie in Lienz vorliegen, werden mit beiden vorgestellten Modellen gute Ergebnisse erzielt. Die Abweichung zum tatsächlichen Wert liegt bei < 1 K. Erweisen sich die hydrogeologischen Umstände etwas komplexer, wie am Teststandort Oberndorf, liefert das ÖWAV-Modell Werte, die mit einer durchschnittlichen Differenz von rund 1,3 K zur tatsächlichen GW-Temperatur nicht mehr als akzeptabel angesehen werden können. Außerdem muss sich für eine genaue Temperaturprognose der zu untersuchende Standort direkt im Abstrom befinden. Liegt der Standort abseits der Achse des Abstroms, ist keine zuverlässige Temperaturprognose möglich.

Bei der numerischen Modellierung hat sich die GW-Fließrichtung als höchst sensitiver Faktor herausgestellt. Eine geringe Schwankung der Fließrichtung von wenigen Grad verändert die Temperaturprognose im Abstrom beträchtlich. Aus diesem Grund ist eine detaillierte Bestimmung der Fließrichtung von großer Wichtigkeit, insbesondere bei leistungsfähigen Aquiferen, da die Temperaturfahne in diesem Fall eine schmale, stark gelängte Geometrie aufweist. Für Lienz lieferte der Plan des 20-jährigen Mittels eine Grundlage für sehr gute Prognosen, während in Oberndorf der Plan basierend auf einer Stichtagsmessung zur Modellierung einer unrealistischen Temperaturfahne führte. Daher werden mehrjährige Abstichmessungen für einen GW-Isophytenplan des mittleren GW empfohlen, um eine möglichst zuverlässige Temperaturprognose zu erreichen.

Als weitere sensitive Parameter werden aufgrund der von Sitzenfrei und Rauch (2013) für das ÖWAV-Modell und der von Russo et al. (2012), für FEFLOW, durchgeführten Sensitivitätsanalysen das GW-Gefälle, der Flurabstand und die hydraulische Leitfähigkeit gesehen. Die bekannten Standardwerte für den Ausbreitungswinkel und die Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht können empfohlen werden, da sie sich in beiden Analysen als wenig sensitiv für die Modellprognose herausstellten.

Eine genaue Bestimmung der oben genannten Eingangsparameter, sowie eine detaillierte Kenntnis über die hydrogeologischen Gegebenheiten erweisen sich als maßgebend für eine zuverlässige Bestimmung der Temperaturfahne bei großen GWP. Sind diese beiden Voraussetzungen erfüllt, sind einfache hydrogeologische Verhältnisse gegeben und liegt der zu untersuchende Standort in der Achse des Abstroms, liefert auch das ÖWAV-Modell gute Ergebnisse.

Das ÖWAV-Modell kann daher auf Basis der Untersuchungen auch bei großen GWP, auf die diese Voraussetzungen zutreffen, für die Prognose der Temperaturfahne empfohlen werden. Da nur in seltenen Fällen einfache hydrogeologische Verhältnisse gegeben sind und die zu untersuchenden Punkte genau in der Achse des Abstroms liegen, wird in der Praxis die numerische Modellierung das probate Mittel bleiben. Eine Aussage über die Genauigkeit der Modelle für die Breite der Temperaturfahne kann nicht getroffen werden. Dafür werden mehrere GW-Messstellen benötigt, die sich räumlich versetzt in der Temperaturfahne befinden. Eine einzelne Messstelle seitlich in der Temperaturfahne kann, wie im Fallbeispiel Oberndorf, nur einen Hinweis darauf geben, ob das Modell die Breite unterschätzt.

Für eine genauere Modellanalyse wird außerdem eine tiefengestufte Temperaturmessung empfohlen. Mit einem Vergleich dieser Messdaten und 3D-Modellen können Aufschlüsse über die vertikale Temperaturentstreuung im GW gewonnen werden. Als besonders sensibel für die vertikale als auch horizontale Temperaturentstreuung stellte sich

bei der 3D-Modellierung in Lienz die vertikale Anisotropie der hydraulischen Durchlässigkeit heraus. Ein gutes Verständnis der Zusammenhänge zwischen der tiefenabhängigen Rückgabe und der horizontalen Temperaturentstreuung ist vor allem für Standorte interessant, an denen sich die Tiefe der Einleitung stark von der Entnahmetiefe benachbarter Rechte unterscheidet.

Danksagung Daten und Informationen über die GWP und die jeweiligen hydrogeologischen Gegebenheiten erhielten wir dankenswerter Weise für Lienz von Dr. Paul Herbst (GWU GmbH) und Anton Bacher (Liebherr GmbH), und für Oberndorf von Stephan Kettl (Ingenieurbüro Kettl) und Manfred Nagl (HUS). Von den GIS-Abteilungen der Bundesländer wurden uns von Wilfried Natter (Vorarlberg), Heinrich Malina (Steiermark) und Johann Fersterer (Salzburg) die Daten der GWP zur Verfügung gestellt.

Open Access. This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

Literatur

- Diersch, H.J.G.: Treatment of free surfaces in 2D and 3D groundwater modelling. FEFLOW Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System. White Pap I, 67–100 (2009a)
- Diersch, H.J.G.: Discrete feature modeling of flow, mass and heat transport processes by using FEFLOW. FEFLOW Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System. White Pap I, 151–198 (2009b)
- Forstinger, G.: Hydrogeologische Beurteilung der bisherigen Einspeisung erwärmter Wässer in das Grundwasser in Bezug auf den Brunnen Kreuzerleiten in Oberndorf. forstinger + stadlmann ZT-OEG im Auftrag der Oberndorfer Druckerei. unveröff. Berichte (2004–2005)
- Herbst, P., Berger, S., Riepler, F.: Erweiterung Produktionsflächen und Errichtung eines Nutzwasserbrunnens und einer thermischen Grundwassernutzung. GWU im Auftrag von Liebherr Hausgeräte Lienz GmbH. unveröff. Berichte (2008–2013)
- Ingerle, K.: Beitrag zur Berechnung der Abkühlung des Grundwasserkörpers durch Wärmepumpen. Österreichische Wasserwirtschaft 40, 280–284 (1988)
- Kupfersberger, H.: Heat transfer modelling of the Leibnitzer Feld aquifer, Austria. Environ Earth Sci 59, 561–571 (2009)
- Nagl, M., Gadermayr, W., Wacht, U.: Wasserversorgungsanlage Brunnen Kreuzerleiten – Geohydrologische Untersuchungen 1998. Hydrologische Untersuchungsstelle Salzburg im Auftrag der Marktgemeinde Oberndorf. unveröff. Bericht (1998)
- Nagl, M.: Pumpversuch Brunnen B3, Geohydrologische Auswertungen und Grundwassermodell. Hydrologische Untersuchungsstelle Salzburg im Auftrag der Druckerei Oberndorf. unveröff. Bericht (1999)
- Jenisch, V.: Geologisches Profil durch die quartären Wasserträger. unveröff. (1996)
- JOANNEUM RESEARCH: Gravimetrische Messungen im Lienzer Becken. unveröff. Bericht (1990)
- Marotz, G.: Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. Wasser u. Boden, Hamburg, S. 228 (1968)
- ÖWAV: ÖWAV-Arbeitsbehelf 43 „Leitfaden zur Anwendung der Thermalformel des ÖWAV-Regelblattes 207“. Springer, Wien (2014)

- Rauch, W.: Ausbreitung von Temperaturanomalien im Grundwasser. Veröffentlichungen der Universität Innsbruck. Wagner, Innsbruck (1992)
- Russo, S.L., Civita, M.V.: Open-loop groundwater heat pumps development for large buildings: A case study. *Geothermics* **38**, 335–345 (2009)
- Russo, S.L., Taddia, G., Verda, V.: Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: A sensitivity analysis. *Geothermics* **43**, 66–74 (2012)
- Sitzenfrei, R., Rauch, W.: Anwendungsgrenzen einfacher analytischer Lösungen zur Bestimmung von Temperaturanomalien im Grundwasser. *GWF* **155**(3), 330–339 (2013)
- UBW: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart (2009)