

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Buddenbohm, Christine**

## **Planung und Genehmigung von Anlagen zur geothermischen Nutzung des Untergrundes mittels Grundwasserwärmepumpen unter besonderer Berücksichtigung der softwarebasierten Berechnung von Temperaturfahnen**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101814>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Buddenbohm, Christine (2011): Planung und Genehmigung von Anlagen zur geothermischen Nutzung des Untergrundes mittels Grundwasserwärmepumpen unter besonderer Berücksichtigung der softwarebasierten Berechnung von Temperaturfahnen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Baugrundaufschlüsse: Planung, Ausschreibung, Durchführung, Überwachung und Interpretation. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





## Planung und Genehmigung von Anlagen zur geothermischen Nutzung des Untergrundes mittels Grundwasserwärmepumpen unter besonderer Berücksichtigung der softwarebasierten Berechnung von Temperaturfahnen

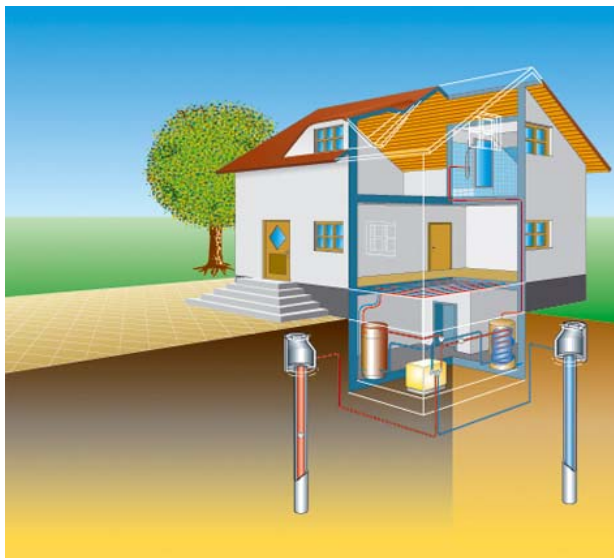
Dipl.-Geol. Christine Buddenbohm  
Zertifizierung Bau e.V., 10117 Berlin, Kronenstraße 55-58  
Tel.: 030 20314134, buddenbohm@zert-bau.de

### Zusammenfassung

In Gebieten mit günstigen hydrogeologischen Voraussetzungen stellt eine geothermische Brunnenanlage eine effiziente Alternative zu Erdwärmesonden dar. Der Prüfung der Standorteignung im Vorfeld der Planung kommt hier eine weitaus größere Bedeutung zu als bei Erdwärmesondenanlagen. Es müssen neben den Anforderungen an Heiztechnik und Anlagenbetrieb insbesondere Aspekte des Grundwasserchemismus, der Grundwasserhydraulik und der Temperaturentstehung im Grundwasserleiter berücksichtigt werden. Darüber hinaus spielen die genehmigungsrechtlichen Belange zum Grundwasserschutz und die Interessen von Grundstücksnachbarn, deren Anlagen thermisch oder hydraulisch beeinflusst werden könnten, eine wesentliche Rolle. Zur Beurteilung der Auswirkungen einer geothermischen Brunnenanlage stehen Simulationsprogramme auf der Grundlage komplexer numerischer Modelle zur Verfügung, die jedoch für kleine Wärmepumpenanlagen z.B. im Bereich von Einfamilienhäusern nicht wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar sind. Hier können Berechnungen, die von vereinfachten Modellen ausgehen und für die Abschätzung von Temperaturfahnen bei kleinen bis mittleren Anlagen geeignet sind.

### 1 Grundlagen

Bei der thermischen Nutzung des Untergrundes wird zwischen geschlossenen und offenen Systemen unterschieden. Erdwärmesonden werden den geschlossenen Systemen zugeordnet, da die hier die dem Untergrund entzogene Energie indirekt über das in PE-Rohren zirkulierende Wärmeträgermedium (z.B. Sole) an den Wärmetauscher abgegeben wird. Bei offenen Systemen, wie geothermischen Brunnenanlagen, wird über einen Brunnen Grundwasser gefördert und dessen Energie direkt von der Wärmepumpe genutzt, bevor eine Rückgabe des thermisch veränderten Grundwassers über Versickerungsbrunnen erfolgt (Prinzip einer geothermischen Brunnenanlage in Bild 1).



**Bild 1:** Funktionsprinzip einer Wasser-Wasser-Wärmepumpenanlage.  
Quelle: Bundesverband Wärmepumpe e.V.

Dadurch haben die offenen Systeme einen deutlich höheren Wirkungsgrad gegenüber den geschlossenen und können damit auch höhere Jahresarbeitszahlen erreichen.

Nach Ergebnissen der im März 2010 veröffentlichten Marktstudie des Geothermiezentrums Bochum beträgt jedoch der Anteil geothermischer Brunnenanlagen (Wasser-Wasser-Wärmepumpen) mit 4.450 Stück nur ca. 10 % aller in Deutschland installierten Wärmepumpen. Dieser relativ geringe Anteil lässt sich in erster Linie mit dem erhöhten Erkundungsaufwand für eine solche Anlage und den hohen Ansprüchen an einen geeigneten Standort unter hydrogeologischen und genehmigungsrechtlichen Aspekten begründen.

### 2 Voraussetzungen für Errichtung und Betrieb von geothermischen Brunnenanlagen

#### 2.1 Geeignete hydrogeologische Standortbedingungen

Zum effizienten Betrieb einer geothermischen Brunnenanlage müssen geeignete hydrogeologische Bedingungen vorhanden sein wie

- eine ausreichende Ergiebigkeit des Grundwasserleiters, die die Brunnenleistung für den Fall einer Dauerentnahme (gemessen am Nenn-durchfluss der Wärmepumpe) gewährleistet – etwa 0,25 m<sup>3</sup>/h je Kilowatt Verdampferleistung der Wärmepumpe (VDI 4640, Blatt 2),
- oberflächennah anstehendes Grundwasser (10 – 20 m unter GOK), welches keinen starken



Grundwasserspiegelschwankungen unterworfen ist und

- ein ausreichendes Aufnahmevermögen des Versickerungsbrunnens.

Darüber hinaus ist die Kenntnis der Grundwasserfließrichtung und der hydraulischen Parameter des Grundwasserleiters von wesentlicher Bedeutung für die Dimensionierung und Positionierung der Brunnen. Diese werden in der Regel über Pumpversuche und ggf. Reinfiltrationsversuche gewonnen.

Um einen langfristigen und wartungsarmen Betrieb einer geothermischen Brunnenanlage gewährleisten zu können, muss aber auch insbesondere der Grundwasserchemismus bestimmten Anforderungen genügen. Die Grundwasserqualität spielt eine Rolle bei der Wiederversickerung und bei der Auswahl des Wärmetauschers. Hier geben die VDI-Richtlinie 4640, Blatt 2 sowie die Wärmepumpenhersteller Anhaltspunkte für den erforderlichen Untersuchungsumfang. Auf jeden Fall sind die Parameter pH-Wert, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt, Eisen und Mangan zu bestimmen. So können zu hohe Eisen und/oder Mangankonzentrationen (das sind i.d.R. Werte für Eisen > 0,2 mg/l und für Mangan > 0,1 mg/l) zu einer Verockerung des Schluckbrunnens führen.

## 2.2 Genehmigungsrechtliche Aspekte

Aus genehmigungsrechtlicher Sicht sind für die Errichtung und den Betrieb einer geothermischen Brunnenanlage die Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG), des jeweiligen Landeswassergesetzes, des Bundesberggesetzes (BBergG) und des Lagerstättengesetzes zu berücksichtigen.

Während das BBergG nur Anwendung findet, wenn eine grundstücksübergreifende Nutzung der Erdwärme (oder eine Nutzung in > 100 m Teufe) vorgesehen ist (dann sind Gestattungen und Betriebspläne nach Bergrecht erforderlich), sind Brunnenbohrungen nach § 4 Lagerstättengesetz in jedem Fall rechtzeitig vor Bohrbeginn beim regional zuständigen Geologischen Landesamt und nach § 49 Abs. 1 WHG bei der zuständigen Unteren Wasserbehörde anzuzeigen. Da das Entnehmen von Grundwasser und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser Benutzungen i.S. des § 9 Abs. 1 bzw. 2 WHG darstellen, bedürfen sie i.d.R. einer wasserrechtlichen Erlaubnis nach § 8 Abs. 1 WHG. Länderregelungen können davon insofern abweichen, als dass eine Anzeige ggf. ausreicht.

Bei der Prüfung durch die Untere Wasserbehörde können folgende Voraussetzungen zur Ablehnung einer angezeigten Maßnahme führen:

- das Vorhaben liegt in einer Trinkwasserschutzzone I, II oder IIIA,

- es ist mit dem Einfluss durch eine Altlast zu rechnen,
- durch die thermische Beanspruchung des Grundwassers entstehen Nachteile für einen Dritten (beispielsweise bei einer im unmittelbaren Grundwasserabstrom liegenden geothermischen Anlage, für die eine Erlaubnis bereits vorliegt),
- sonstige Besonderheiten (artesisch gespanntes Grundwasser, Grundwasserversalzung usw.),
- durch die Absenkung des Grundwasserspiegels bei der Entnahme können Setzungsschäden entstehen,
- bei der Wiedereinleitung des Grundwassers sind bauwerksrelevante Grundwasseranstiege oder Vernässungen zu erwarten.

Bei der Entscheidung einer Unteren Wasserbehörde werden immer der Schutz des Grundwassers als maßgebliches Gemeinwohlinteresses i.S. des WHG und die (auch hypothetischen) Interessen von Nachbarn, die nicht mehr als vertretbar beeinträchtigt werden dürfen, entscheidend sein. Diesbezüglich ist auf die öffentlich rechtliche Benutzungsordnung im Umgang mit dem Grundwasser zu verweisen. Obwohl das Grundwasser kein Bestandteil des Grundeigentums ist und damit ein Grundstückseigentümer keinen rechtlichen Anspruch auf Zufluss von Grundwasser in einer bestimmten Menge und Beschaffenheit besitzt (siehe auch § 10 Abs. 2 WHG), kann die Behörde bei konkurrierenden Benutzungen im Rahmen ihres Ermessensspielraums eine Erlaubnis in Verbindung mit Auflagen erteilen oder diese versagen. In der Genehmigungspraxis werden daher in einigen Bundesländern Untersuchungen zu den grundstücksübergreifenden Auswirkungen von geothermischen Brunnenanlagen gefordert.

So fordern die Unteren Wasserbehörden im Land Baden-Württemberg gemäß Leitfäden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen vom April 2009, dass in allen Fällen der Wasserrechtsantrag neben einer Beschreibung des Vorhabens konkrete Aussagen über die Auswirkungen der Benutzungen, insbesondere über das sich durch die Wiedereinleitung ergebende Temperaturfeld, enthalten muss.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle auch auf Folgen thermischer Nutzung des Grundwassers für das Gewässerökosystem hingewiesen. Wissenschaftler des Helmholtz Zentrums München haben im Rahmen einer Studie Auswirkungen der Verwendung von Grundwasser zu Heiz- oder Kühlzwecken auf Ökosysteme untersucht. Nahmen Mikroorganismen mit der Temperatur in ihrer Biodiversität zu, war für die Grundwasserfauna eine Abnahme der Artenvielfalt festzustellen. Bei der untersuchten Anlage mit einer Temperaturdifferenz von 10°C bis 20°C waren diese Auswirkungen jedoch eher gering. Aus den beobachteten Veränderungen war keine Gefährdung des Ökosystems und der Grundwasserquali-



tät bzw. eine Beeinträchtigung einer möglichen Trinkwassernutzung abzuleiten. Untersucht wurde „sauberes“ Grundwasser. Weitere Studien sollten mit „belastetem“ Grundwasser folgen (H. Brielmann et al., 2009).

Gemäß den Forderungen der VDI-Richtlinie 4640, Blatt 2 ist das thermisch genutzte Grundwasser in Grundwasserfließrichtung in ausreichendem Abstand zum Förderbrunnen und mit einer maximalen Temperaturänderung von  $\pm 6$  Kelvin wiedereinzuleiten.

### 2.3 Erkundungsumfang für kleine geothermische Brunnenanlagen

Wie bereits erwähnt, sind grundsätzlich Standorte zu wählen, bei denen ein geeigneter Grundwasserflurabstand als gegeben vorausgesetzt werden kann. Grundwasserflurabstände können aus hydrogeologischen Karten (auch über mapserver der Geologischen Landesämter recherchierbar) ermittelt werden. Anhand dieser Quelle ist z.B. auch die Grundwasserfließrichtung ableitbar.

Ungeachtet dessen werden i.d.R. für den Betrieb von geothermischen Brunnenanlagen Felduntersuchungen zur Ermittlung von hydraulischen und hydrochemischen Parametern erforderlich. Der hier skizzierte Erkundungsaufwand kann auf kleine Anlagen für Wärmepumpen im Bereich von Ein- bis Zweifamilienhäusern angewendet werden.

Dafür ist in jedem Fall ein Pumpversuch an einem Probebrunnen (der bei ausreichender Dimensionierung für den späteren Betrieb der Anlage genutzt werden kann) durchzuführen.

Mittels des Pumpversuchs (hier Brunnentest) kann die Ergiebigkeit des Brunnens bestimmt werden. Ausgehend von einer maximalen Fördermenge, die etwa das 1,5-fache der späteren Entnahmemenge im Betrieb betragen sollte, wird ein mindestens dreistufiger Pumpversuch gefahren. Die erfassten Messdaten für die Fördermenge  $Q$  und die Absenkung  $s$  werden in einem  $Q$ - $s$ -Diagramm zusammen mit dem Wideranstieg grafisch dargestellt.

In Auswertung des Pumpversuchs lassen sich durch orientierende Methoden die hydraulische Leitfähigkeit ( $k_f$ -Wert) und die Reichweite der Absenkung  $R$  bestimmen. Diese sind zur Bemessung eines ausreichenden Abstandes zwischen Förder- und Versickerungsbrunnen zur Vermeidung eines hydraulischen Kurzschlusses erforderlich.

Während des Pumpversuchs ist mindestens eine Grundwasserprobe zu entnehmen, für die neben den Vor-Ort-Parametern pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Temperatur und Leitfähigkeit durch Laboranalysen mindestens

noch die Parameter Eisen, Mangan und Gesamthärte zu ermitteln sind. Die Wasserqualität muss dabei aber in jedem Einzelfall den Anforderungen des Wärmepumpenherstellers im Hinblick auf die Materialaggressivität genügen.

## 3. Temperaturfahnen im Grundwasser

### 3.1 Prozesse des Wärmetransports im Untergrund

Die Temperatursausbreitung in Grundwasserleitern wird im Wesentlichen von Konvektion, Konduktion, Dispersion, Wärmespeicherung und Wärmeaustausch mit der Atmosphäre bestimmt.

**Konvektion** ist die Ausbreitung des Wärmeinhalts mit dem durch die Abstandsgeschwindigkeit charakterisierten Geschwindigkeitsfeld. Sind die Temperaturdifferenzen groß, wird das Geschwindigkeitsfeld durch Dichteeffekte oder die Änderung der Viskosität beeinflusst. Diese spielen bei den Temperaturänderungen im Bereich geothermischer Brunnenanlagen von ca. 4 K keine nennenswerte Rolle.

Die hydrodynamische **Dispersion** beschreibt nach KEIM und LANG (2008) Vermischungsvorgänge, die durch Geschwindigkeitsunterschiede in den Porenräumen des Untergrunds, durch kleinräumige Inhomogenitäten des Korngerüsts und durch makroskopische Inhomogenitäten des Untergrunds entstehen. Beim Wärmetransport ist die Dispersion nur bei größeren Filtergeschwindigkeiten relevant, die in Grundwasserleitern regelmäßig gegeben sind.

Die Fähigkeit des Untergrundes, Wärme zu speichern wird durch die spezifische **Volumenwärmekapazität** (dem Produkt aus spezifischer Wärme und Dichte) eines Gesteins beschrieben. Sie beträgt für Wasser 4,2 [J/(cm<sup>3</sup>·K)] bei 5°C und für Gesteine 1 – 2,5 [J/(cm<sup>3</sup>·K)].

Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt das Vermögen, thermische Energie mittels **Wärmeleitung** (Konduktion) zu transportieren. Konduktion findet nur in Festkörpern (Gesteinsmatrix) oder in ruhenden Fluiden infolge eines Temperaturunterschiedes statt. Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik erfolgt der Wärmefluss immer nur in Richtung der geringeren Temperatur. Die Wärmeleitfähigkeit beträgt für 5°C warmes Wasser 0,57 [W/mK] und schwankt bei Gesteinen zwischen ca. 0,4 und 4 [W/mK].

Welche Relevanz die einzelnen Prozesse besitzen, wird von der hydrogeologischen Situation und in Abhängigkeit von der räumlichen und zeitlichen Betrachtung bestimmt.





### 3.2 Berechnung von Temperaturfahnen im Grundwasser für kleine Anlagen

Für die Berechnung des Wärme- und Stofftransportes liegen ausreichende Erkenntnisse und Erfahrungen vor, die sich in einfachen analytischen Lösungen bis zu komplexen numerischen Programmen widerspiegeln.

Die bei größeren Anlagen unabdingbaren komplexen Grundwassermodelle können die komplizierten hydrogeologische Strömungsverhältnisse und Inhomogenitäten (Dreidimensionalität, heterogene Parameterverhältnisse, saisonale instationäre Effekte usw.) des Grundwasserleiters relativ genau abbilden. Hier stehen für die Modellierung erprobte Programme zur numerischen Simulation wie z.B. FEFLOW (Diskretisierung nach dem Finite-Elemente-Verfahren) oder MODFLOW (Diskretisierung nach der Finite-Differenzen-Methode) zur Verfügung. Die Berechnung mittels numerischer Verfahren ist zeit- und kostenaufwendig und daher für die Anwendung bei kleinen geothermischen Brunnenanlagen vor dem Hintergrund der Verhältnismäßigkeit ungeeignet.

Speziell für Anwendungsfälle von kleineren und mittleren geothermischen Anlagen wurden Programme zur Temperaturfahnenberechnung entwickelt, die von einem Modell ausgehen, für das stark vereinfachte hydraulische und thermische Vorgänge angenommen werden. Beispiele sind hier das Programm „Grundwasserwärmepumpen“ (GWP-SF\_09.05) der Ingenieurgesellschaft Kobus & Partner, welches im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg 2009 erarbeitet wurde oder das Programm Groundwater Energy Designer, im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) der Schweiz durch die Colenco Power Engineering AG (Joachim Poppei, 2006) entwickelt.

Die Anwendung dieser vereinfachten Modelle ist im Sinne einer Vorplanung und bei kleineren bis mittleren Anlagen gerechtfertigt und gehört zum Beispiel im Land Baden-Württemberg zur Genehmigungspraxis.

## 4 Groundwater Energy Designer (GED)

Das Programm Groundwater Energy Designer (Joachim Poppei et al, 2006) wurde speziell für die Dimensionierung von Grundwassergewinnungs- und -reinjektionsanlagen kleiner bis mittlerer Größe zur thermischen Nutzung entwickelt. Mit GED kann die Anordnung des/der Grundwasserbrunnen(s) und der Versickerungsanlage(n) unter standortkonkreten Bedingungen geplant und optimiert werden. Über interaktive Masken werden Grundwasserbedarfs-ermittlung und Dimensionierung der/des Brunnen(s) mit einem Simulationsprogramm auf der Basis eines Finite-Volumen-Verfahrens, für dessen Pre- und Postprocessing eine grafische Oberfläche zur Verfügung steht, kombiniert.

Ausgegangen wird von vereinfachten Annahmen wie der Wärmeausbreitung in einem zweidimensionalen vollgesättigten Grundwasserleiter mit homogenen Parametern. Saisonale Änderungen und 3D-Effekte bleiben unberücksichtigt.

In einem ersten Schritt zur Dimensionierung wird der Wärme- bzw. Kältebedarf des konkreten Objektes erfasst. Hier besteht die Möglichkeit Verbrauchsdaten eines bestehenden Heizsystems heranzuziehen oder Werte aus einer Bedarfsrechnung des Planers für ein Heizsystem, ein Kühlsystem bzw. ein kombiniertes Kühl- und Heizsystem einzugeben.

Darüber hinaus sind Eingaben zur Wärmepumpe (Jahresarbeitszahl, Vollbetriebsstundenzahl) sowie die geplante Grundwassertemperaturänderung (im Jahresdurchschnitt). Aus diesen Werten errechnet das Programm einerseits den über das Jahr gemittelten als auch den (bei Spitzenlast) erforderlichen maximalen Grundwasservolumenstrom.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Dimensionierung der Brunnenanlage. Dabei sind die folgenden hydrogeologischen Parameter einzugeben:

- hydraulischen Durchlässigkeit (kf-Wert)
- Lage des Grundwasserspiegels unter GOK
- Mächtigkeit des Grundwasserleiters (bei gespannten Grundwasserverhältnissen) bzw. Unterkante des Grundwasserleiters bei ungespannten Grundwasserverhältnissen
- Porosität des Grundwasserleiters
- Grundwassergefälle.

Werden die Werte nicht durch einen Pumpversuch am Standort ermittelt, so können hydrogeologische Karten, Werte aus nahe gelegenen Brunnen oder Erfahrungswerte herangezogen werden. Damit sind die Ergebnisse der Berechnungen jedoch mit weitaus höheren Unsicherheiten behaftet.

GED berechnet anhand der bisherigen Eingaben die Anzahl und die Größe der Brunnen mittels analytischer Lösungen zur Ergiebigkeit eines Brunnens und zur Absenkung im Brunnen. Bei mehreren Förderbrunnen werden unter Berücksichtigung der hydraulischen Beeinflussung die Abstände zwischen den Fördereinrichtungen berechnet. Zur Berechnung von Alternativen können die Anzahl und Ausbau der Brunnen variiert werden.

Für die grafische Präsentation der Ergebnisse besteht dann u.a. die Möglichkeit das Bild (\*.jpg, \*.bmp, \*.png, \*.tif) einer Karte zu hinterlegen.

Anschließend können die Strömung und der Wärmetransport im Grundwasser simuliert werden. Die Lage der Brunnen, die Grundwasserfließrichtung und die Darstellung der Ergebnisse erfolgt interaktiv auf einer



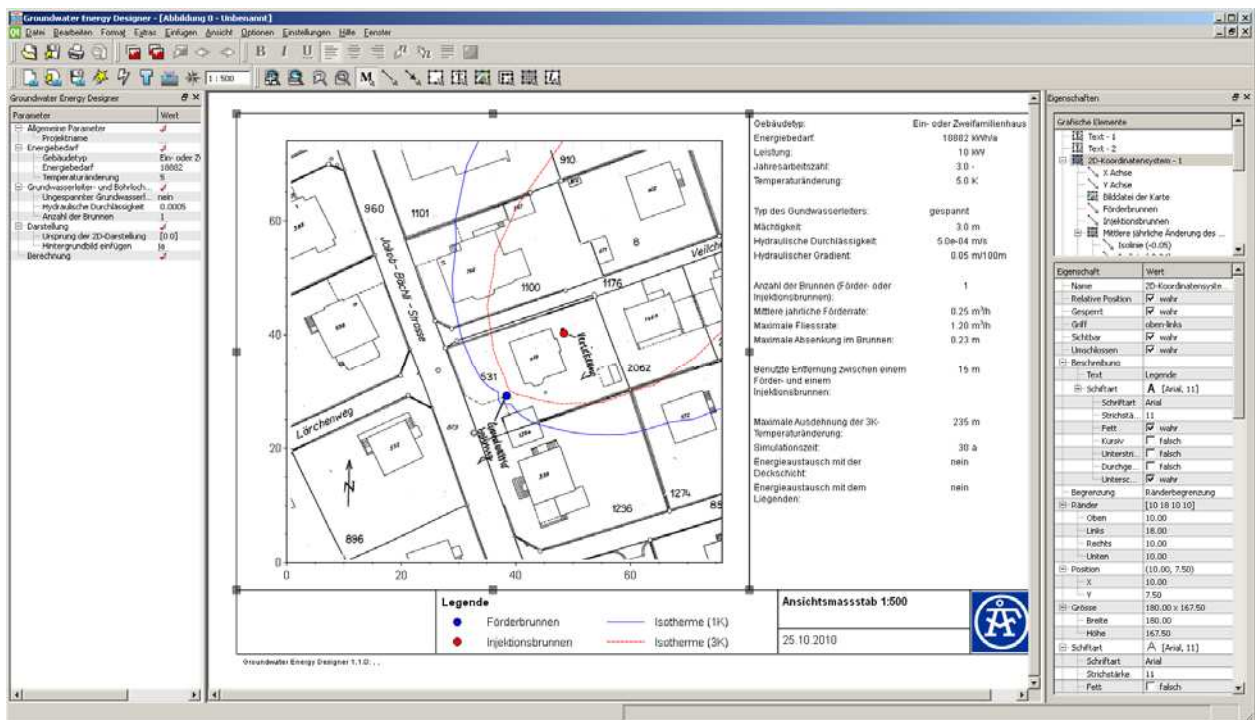
speziellen grafischen Oberfläche. Einzugeben sind noch die gewünschte Simulationszeit (zur Auswahl stehen 10

bzw. 30 Jahre, die Möglichkeit individueller Eingaben existiert ebenfalls), die Abstände der Isothermen (vorgesehen sind die 1K- und 3K-Isotherme, zusätzliche Eingaben sind aber möglich) und die Referenztemperatur des Grundwassers.

Die folgende interne Berechnung erfolgt auf der Basis eines Finite-Volumen-Verfahrens mit optimierter Diskretisierung, wobei Grösse des Modellgebietes und die Diskretisierung nicht vom Nutzer beeinflussbar sind. Strömungs- und Temperaturfeld werden instationär und voneinander entkoppelt nacheinander berechnet. Im Ergebnis werden die Isothermen sowie alle wesentlichen Kennwerte wie z.B. auch die der maximale Abstand der 3K-Isotherme von einem Versickerungsbrunnen ausgegeben. Nachträgliche sind Änderung der Grafik z.B. mittels grafischer Elemente oder interaktiv auf der Oberfläche möglich.

Zur Verifizierung des numerischen Teils von GED wurden die Programme TOUGH2 und FEFLOW herangezogen.

Dabei haben sich Übereinstimmungen der Berechnungsergebnisse ergeben, die für den Zweck und das Anliegen des Programms GED als angemessen und ausreichend anzusehen sind.



**Bild 2:** Bedieneroberfläche des GED mit berechneten Isothermen.  
 Quelle: GED, Colenco Power Engineering AG

Anschließend besteht die Möglichkeit der Optimierung durch vergleichende Simulation bei Änderung der Eingaben zur Erwärmung oder Abkühlung und zur Anzahl / Anordnung der Brunnen. Die Eingabeparameter der Variationen können dabei gespeichert werden.



## Literatur

- H. BRIELMANN et al. (2009): Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. FEMS Microbiol Ecol. 68(3):273-86.
- H.-J. Diersch (WASY GmbH) (1994): FEFLOW® (Finite Element Subsurface FLOW System), Reference Manual
- JOACHIM POPPEI et al., Colenco Power Engineering AG (2006): Schlussbericht zum Programm Groundwater Energy Designer (GED), Bundesamt für Energie BFE, Bern
- KEIM, B. & U. LANG (2008): Thermische Nutzung von Grundwasser durch Wärmepumpen Prinzipstudie zur Berechnung von Temperaturfeldern für kleine Anlagen mit Energieentzug kleiner 45.000 kWh/Jahr für charakteristische Situationen in Baden-Württemberg. Bericht für das Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, Mai 2008
- K. PRUESS (Lawrence Berkeley Laboratory) (1987): TOUGH2 (Transport of Unsaturated Groundwater and Heat) User's Guide, Version 2.0
- Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts - Wasserhaushaltsgesetz - WHG - vom 31. Juli 2009 (BGBl. I, Nr. 51, S. 2585) zuletzt geändert durch Artikel 12 des Gesetzes vom 11. August 2010 (BGBl. I, Nr. 43, S. 1163) in Kraft getreten am 18. August 2010
- UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2009): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen für Ein- und Zweifamilienhäuser oder Anlagen mit Energieentzug bis zirka 45.000 kWh pro Jahr vom April 2009
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Juni 2010): VDI-Richtlinie 4640 - Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 1: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (September 2001): VDI-Richtlinie 4640 - Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen