

Projekt Nr. 102'886  
Vertrag Nr. 153'704

Im Auftrag des  
**Bundesamtes für Energie (BFE)**

**Abschlussbericht** Dezember 2009

Grundlagendatenüberprüfung und daraus resultierende  
Anpassungen des *Groundwater Energy Designer*  
Programms mittels realisierter Anlagen  
(Teilprojekt Programmoptimierung)

Erstellt durch  
Joachim Poppei, Gerhard Mayer & Rainer Schwarz

AF-Colenco AG  
Täferstrasse 26, 5405 Baden

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
2	Erweiterung des Programms.....	3
2.1	Überblick.....	3
2.2	What's New .....	4
2.2.1	Programmstart .....	4
2.2.2	Grafische Oberfläche.....	4
2.2.3	Berücksichtigung von Anlagen mit unterschiedlichen Brunnennutzungen .....	6
2.2.4	Grafische Positionierung von Brunnen .....	7
2.2.5	Einflussnahme auf die Diskretisierung.....	8
2.2.6	Einbeziehung des Wärmeaustausches mit der Deckschicht und dem Liegenden9	
2.2.7	Visualisierung von Temperatur- und Grundwasserspiegeländerungen.....	10
2.2.8	Export der Ergebnisse in das Adobe PDF-Format und das ESRI Shape-Format	
	11	
3	Zusammenfassung und Ausblick .....	12

# 1 Einleitung

Das Ziel des Projektes ist die Erarbeitung und Umsetzung von Vorschlägen zur Erweiterung und Verbesserung des Programms „Groundwater Energy Designer“ (GED) (BfE Projektnummer 101'144, Colenco AG, 2006) mittels der Überprüfung von ausgewählten, schon bestehenden kleinen und mittleren Grundwasser-Wärmepumpenanlagen.

In der hier beschriebenen ersten Phase des Projektes wurde ein messtechnisches Konzept erstellt und die softwareseitigen Vorbereitungen getroffen. Die Erarbeitung des messtechnischen Konzeptes erfolgt durch die EBERHARD & Partner AG. Das hier beschriebene Teilprojekt beschränkt sich auf die softwareseitige Vorbereitung.

## 2 Erweiterung des Programms

### 2.1 Überblick

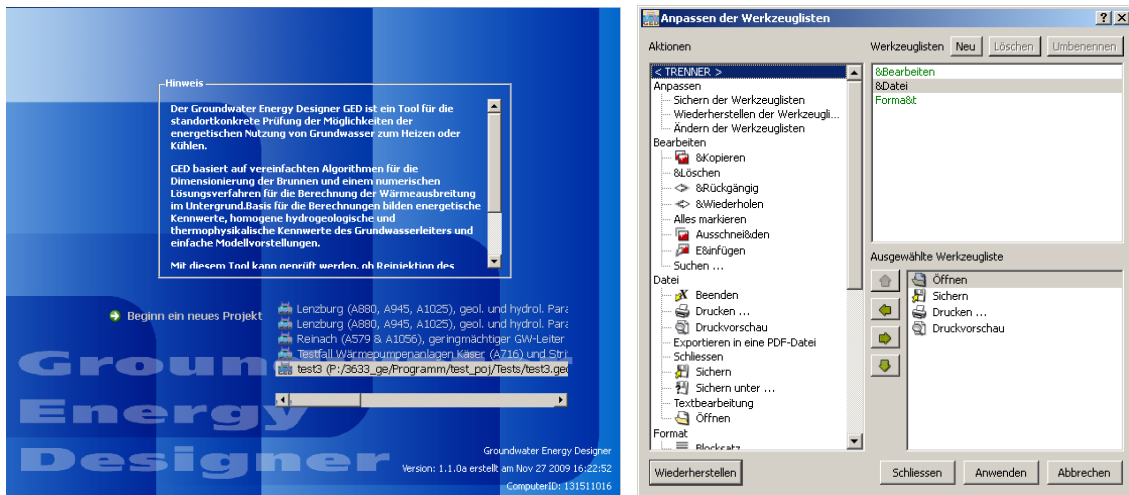
Der Groundwater Energy Designer (GED), Version 1.0, basierte auf der Programmbibliothek Qt in der Version 3.x. Für diese Programmbibliothek wurde durch den Hersteller (ehemals Trolltech, jetzt Nokia) der Support der Version 3.x eingestellt. Dies bedeutet für das Programm, dass ein Support neuer Betriebssysteme, wie z.B. Vista, Mac OSX oder Windows 7, nicht mehr gewährleistet war.

Das Programm wurde daher im Rahmen des Projektes auf die Version 4.x der Programmbibliothek Qt migriert. Aus dieser Migration ergeben sich für das Programm neue Möglichkeiten in der Anwendung in verschiedenen Betriebssystemen.

Das im Folgenden in seinen Änderungen beschriebene Programm wird mit einer neuen Programmversion 1.1 dem derzeitigen Benutzerkreis für eine Testphase zur Verfügung gestellt. Nach dem Test und erforderlichenfalls einer Behebung von Programmfehlern wird es die Version 1.0 ersetzen und im Internet zur Verfügung gestellt werden. Zu einem späteren Zeitpunkt sind auch Programmversionen für die Betriebssysteme Mac OSX und Linux vorgesehen.

Die meisten Dialoge im Programm wurden überarbeitet. Die wesentliche Änderung in der Programmhandhabung ist, dass der Nutzer in der neuen Version nicht mehr einem vorgeschriebenen Ablauf der Parametereingabe (Energiebedarf ↷ Hydraulische Charakterisierung ↷ Simulation) folgen muss. Die Abfolge der Parametereingabe kann an jeder Stelle unterbrochen werden und an einer beliebigen Stelle in die Eingabe eingestiegen werden. Dadurch ist es nunmehr beispielsweise möglich, bei Kenntnis der hydraulischen Kennwerte ausschliesslich den Simulatoreil des Programms zu benutzen. In diesem Fall wird der Dialog der Simulation direkt aufgerufen und dieser bei fehlenden Daten der hydraulischen Parameter automatisch erweitert. Die Anzahl der Brunnen und deren Nutzung ist nunmehr frei wählbar.

Die Signalisierung des aktuellen Bearbeitungsstandes erfolgt wie gewohnt in der seitlich angeordneten Übersichtsdarstellung des Projektes. Die wichtigsten Änderungen im Vergleich zur Version 1.0 werden nachfolgend beschrieben.



**Abbildung 1: Neues Startmenu des Groundwater Energy Designers (links) und Menu zur Bearbeitung der Werkzeuglisten (rechts)**

## 2.2 What's New

### 2.2.1 Programmstart

Bei der Migration des Programms erfolgte auch eine Überarbeitung der Startseite. Diese ermöglicht neu den schnelleren Zugriff auf die zuletzt geöffneten Projekte: Es werden jeweils die letzten fünf Projekte als Liste dargestellt. Diese können durch einen Doppelklick geladen werden (Abbildung 1, links). Durch die Migration ist ebenfalls eine benutzerspezifische Anpassung eines Teils der Werkzeuglisten möglich geworden (Abbildung 1, rechts).

### 2.2.2 Grafische Oberfläche

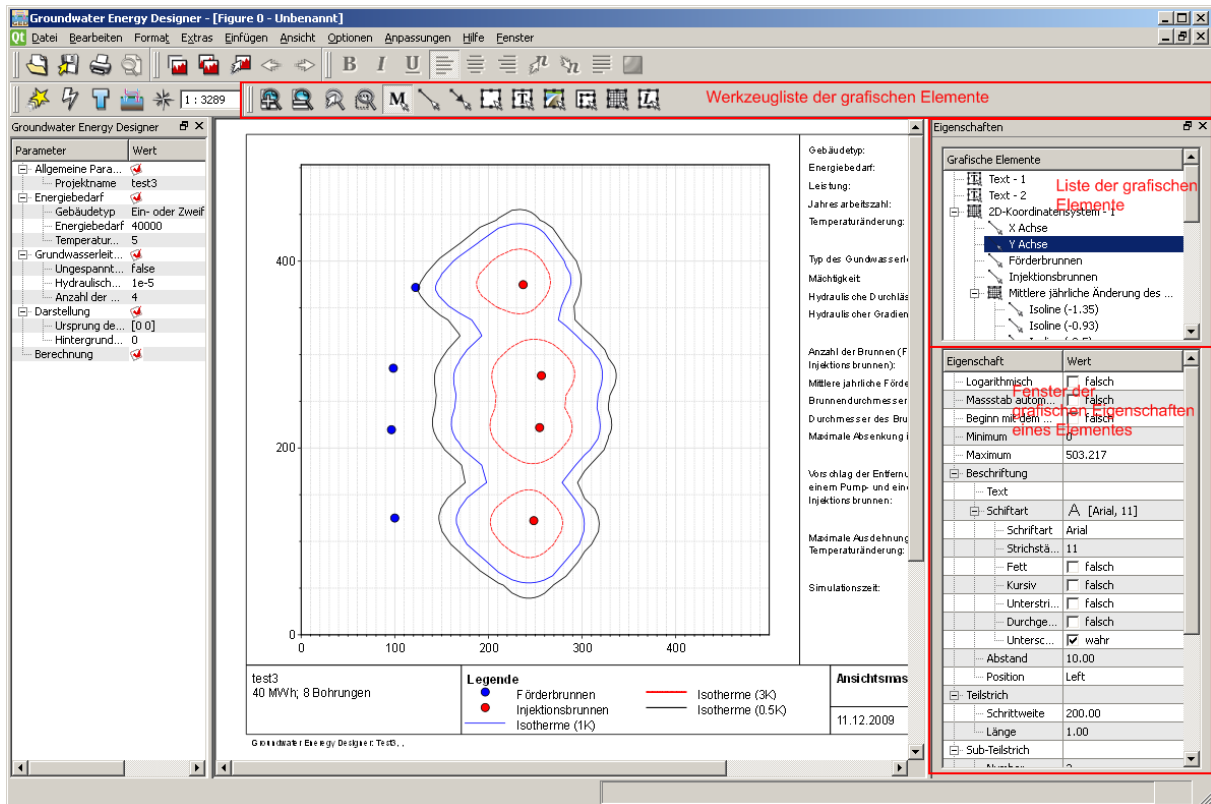
Die Programmbibliothek zur grafischen Darstellung der Ergebnisse wurde vollständig überarbeitet. Da nunmehr das Programm bei der Positionierung der Brunnen und in der Visualisierung der Ergebnisse direkter mit den Möglichkeiten dieser Bibliothek arbeitet, soll im Folgenden ein kurzer Überblick zu den wichtigsten Funktionen gegeben werden.

Die grafische Oberfläche besteht aus drei Fenstern zur Bearbeitung (siehe Abbildung 2): der Werkzeugliste, der Liste der grafischen Elemente und dem Fenster der grafischen Eigenschaften eines Elementes. Mit der Werkzeugliste ist der Wechsel zwischen verschiedenen Bearbeitungswerkzeugen in der gewohnten Art und Weise möglich. Diese sind von links nach rechts:

- Vergößerung der Blattansicht
- Verkleinerung der Blattansicht
- Automatische Skalierung des selektierten Elementes
- Vergössern durch eine Ausschnittswahl mit der Maus
- Selektion von grafischen Elementen
- Zeichnen einer Linie
- Zeichnen eines Pfeils
- Zeichnen eines Rechtecks
- Einfügen eines Textfeldes
- Einfügen einer Abbildung aus einer Datei



Einfügen eines untergeordneten Zeichensystems  
Einfügen einer XY-Darstellung  
Einfügen einer Legende



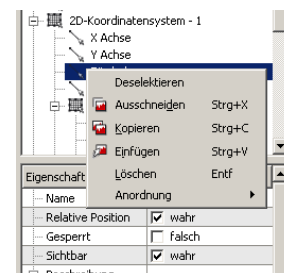
**Abbildung 2: Überblick über die Elemente der grafischen Darstellung (Werkzeugliste, Liste der grafischen Elemente und Fenster der grafischen Eigenschaften)**

In der Liste der Elemente (in Abbildung 2, Fenster rechts oben) oder nach der Auswahl des Werkzeuges zur Selektion von grafischen Elementen (M) können einzelne Elemente selektiert werden, wonach im Fenster der grafischen Eigenschaften die Eigenschaften des selektierten Elementes zur Bearbeitung angezeigt werden (in Abbildung 2, Fenster rechts unten). Die Selektion in der Liste erfolgt durch einen Klick auf das Element. Bei einem Klick mit der rechten Maustaste wird ein Menü geöffnet, das es ermöglicht, die Reihenfolge des Zeichnens der Elemente zu verändern oder dieses zu löschen (siehe Abbildung 3).

Die grafischen Elemente werden von oben nach unten gezeichnet. Das heisst, ein Element, das weiter oben in der Liste der Elemente steht, liegt eine Ebene hinter einem Element, das weiter unten in der Liste folgt.

Die Einblendung einer Karte erfolgt standardmässig als erstes Element nach dem Zeichnen der Achsen. Soll die Karte hinter die Gitternetzlinien gelegt werden, so ist das Element der Karte mit Hilfe dieses Menüs an den Beginn der Liste zu verschieben.

**Abbildung 3: Menü der Liste der Operationen**



Im Fenster der Eigenschaften eines Elementes werden die Eigenschaften des selektierten Elementes dargestellt. Für jede grafische Eigenschaft gibt es ein spezielles Bearbeitungs-

werkzeug. Die wichtigsten Eigenschaften für die Arbeit mit dem GED werden im Folgenden genannt:

Name	Name des grafischen Elementes, mit dem es in der Liste der Elemente erscheint
Fixiert	Das Element kann in der Grösse und Position nicht verändert werden.
Sichtbar	Das Element ist auf der Fläche der grafischen Darstellung der Ergebnisse sichtbar.
Sichtbar in der Legende	Das Element ist in der Legende sichtbar.
Isolinienwert	Wert, bei dem eine Isolinie dargestellt werden soll.
Linienbeschriftung	Text, mit dem die Linie auf der Grafik beschrift werden soll.
Intervall der Linienbeschriftung	Intervall, an denen eine Beschriftung der Linie erfolgen soll. Bei der Eingabe von Null erfolgt keine Beschriftung der Linie.
Schriftart der Linienbeschriftung	Schriftart für die Beschriftung der Linie auf der Grafik.
Beschreibung	Die Beschreibung wird in einer Legende benutzt, um das Element zu benennen. Der Text kann sich auch vom gewählten Namen des Objektes unterscheiden.

Die Bearbeitung einer Eigenschaft erfolgt durch einen Klick in das Wertefeld der Eigenschaft.

## **2.2.3 Berücksichtigung von Anlagen mit unterschiedlichen Brunnen- nutzungen**

### **2.2.3.1 Grundlagen**

Mit zunehmender Anlagenzahl steigt das Erfordernis der Bewertung gegenseitiger Beeinflussung benachbarter Anlagen. Bisher war die Berücksichtigung unterschiedlicher Anlagen (mit unterschiedlicher Last und Betriebsweise) in GED nicht möglich. Ebenso war die ungleichmässige Aufteilung des Bedarfs einer Anlage auf verschiedene Brunnen nicht möglich. Für solche Fälle wurde der Dialog zur Bestimmung der Brunnenpositionen um die Möglichkeiten einer Variation der jeweiligen mittleren jährlichen Förder- bzw. Injektionsrate und der Injektionstemperatur der einzelnen Brunnen erweitert. Diese Erweiterung kommt auch dem beabsichtigten Abgleich mit realisierten Anlagen zugute.

### **2.2.3.2 Handhabung**

Im Simulationsdialog ist die Tabelle zur Positionierung der Brunnen, sowohl um die mittlere jährliche Förder- bzw. Injektionsrate der einzelnen Brunnen als auch um die injizierte Temperaturänderung, erweitert worden. Zum Editieren ist die entsprechende Zelle anzuklicken und erforderlichenfalls der vom Programm vorgeschlagene Eintrag zu ändern (Abbildung 4).

The screenshot shows a software dialog box titled 'Berechnungsparameter'. It contains a section for 'Brunnenpositionen' with a 'Brunnen' label and a dropdown menu set to '4'. Below this is a table with the following data:

Brunnen	X Koordinate	Y Koordinate	Mittlere jährliche Rate	Temperaturänderung
Förderbrunnen 3	96.4844	219.549	2.337 l/min	
Förderbrunnen 4	122.266	371.805	2.337 l/min	
Injektionsbrunnen 1	248.438	122.18	2.337 l/min	5 K
Injektionsbrunnen 2	254.688	221.805	2.337 l/min	5 K
Injektionsbrunnen 3	256.641	277.444	2.337 l/min	5 K

Below the table, there is a section for 'Empfohlene Abstände (auf der Grundlage einer analytischen Abschätzung)':

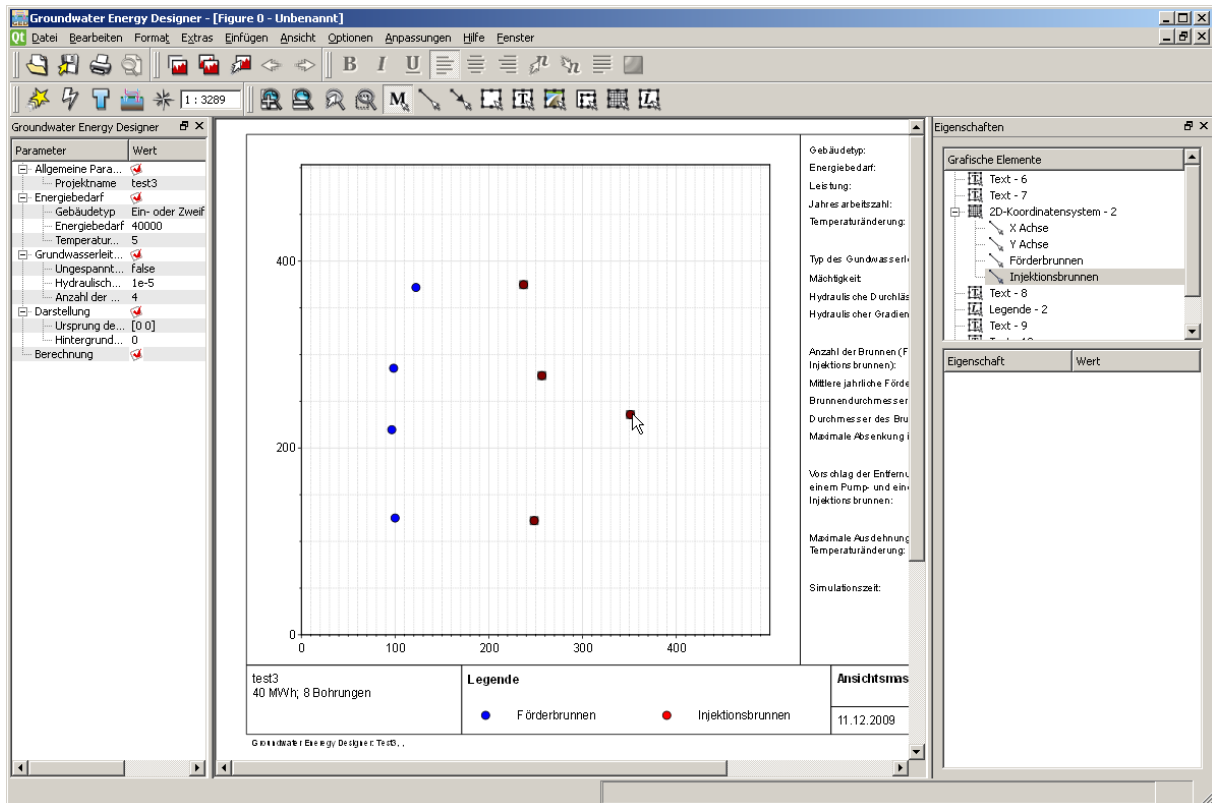
- Abstand zwischen zwei Injektions- bzw. Pumpbrunnen: 20 m
- Abstand zwischen einem Injektions- und einem Pumpbrunnen: 177 m

At the bottom of the dialog, there are three buttons: '< Zurück', 'Weiter >', and 'Abbrechen'.

**Abbildung 4: Erweiterter Dialog zur Charakterisierung der Brunnen**

## 2.2.4 Grafische Positionierung von Brunnen

Die interaktive Positionierung der Brunnen auf der Grafik wurde mit Hilfe der neuen Grafikbibliothek angepasst: Die Position eines Brunnens auf der Grafik kann nunmehr verändert werden, indem zuerst das Element der Brunnen in der Liste der grafischen Elemente auf der rechten Seite selektiert wird und nachfolgend einer der jetzt markierten Brunnen mit der linken Maustaste angeklickt und bei gedrückter Maustaste mit der Maus verschoben wird (Abbildung 5).



**Abbildung 5: Grafische Manipulation von Brunnenpositionen (mit der linken Maustaste selektierte Brunnen können bei gedrückter Maustaste verschoben werden).**

## 2.2.5 Einflussnahme auf die Diskretisierung

### 2.2.5.1 Grundlagen

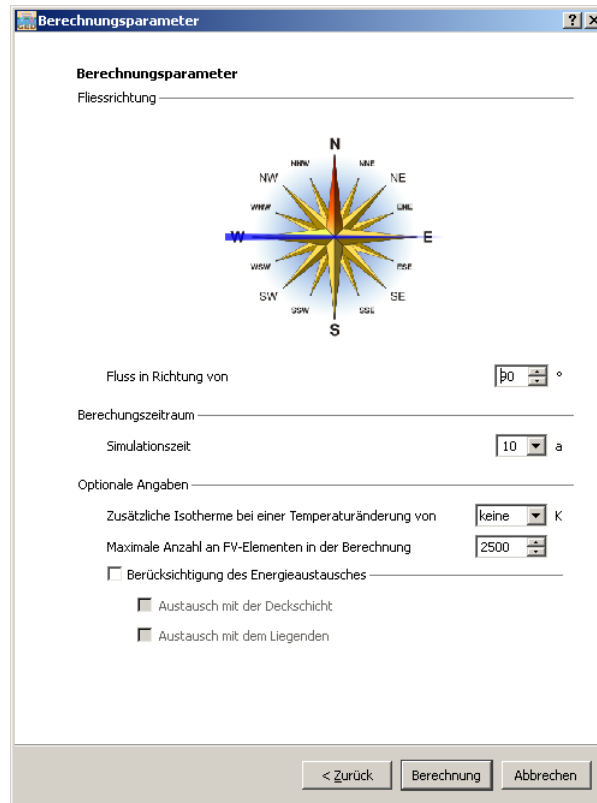
Die Anzahl der Elemente, die innerhalb einer Finite-Volumen-Simulation benutzt wird, war in der Version 1.0 des Programms intern vorgegeben. Diese Zahl kann nunmehr vom Benutzer in der neuen Version beeinflusst werden. Grund dafür, diese Wahl dem Benutzer zugänglich zu machen, ist, dass die ursprünglich gewählte Limitierung auf 2'500 Elemente bei komplexeren Anlagensituationen oder sehr hohen Grundwasserfließgeschwindigkeiten nicht immer adäquat war. Durch die Erhöhung der Elementzahl können in diesen Fällen deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden. Dies geht jedoch zu Lasten der Rechengeschwindigkeit.

### 2.2.5.2 Handhabung

Der Dialog zur Definition der Simulationsparameter wurde um die Möglichkeit zur Eingabe der maximalen Anzahl von Elementen in der Finite-Volumen-Simulation erweitert (Abbildung 6).<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Die Festlegung der Fließrichtung wurde ebenfalls verändert und erfolgt neu entweder durch einen Klick auf den Kompass oder, wie in der bisherigen Version, durch eine Zahlenangabe. Die bisherige grafische Unterstützung der Fließrichtungsdefinition wurde nicht übernommen.





**Abbildung 6: Erweiterter Dialog zur Definition der Simulationsparameter**

## 2.2.6 Einbeziehung des Wärmeaustausches mit der Deckschicht und dem Liegenden

### 2.2.6.1 Grundlagen

Der konduktive Wärmeaustausch mit der ungesättigten Deckschicht bzw. dem Stauer im Liegenden des Grundwasserleiters wurde in der alten Programmversion nicht berücksichtigt. Diese kann jedoch, je nach Verhältnis der Grösse der „Wärme- oder Kälteblase“ zur Aquifermächtigkeit, einen massgeblichen Einfluss auf die Ausbreitung der thermischen Front im Aquifer haben. Aus diesem Grunde wurde das zugrundeliegende Rechenmodell erweitert. Anstelle einer vollständig dreidimensionalen Abbildung des Aquifers und der Deckschichten wurde von einem halbanalytischen Ansatz zur Beschreibung des Wärmetransports in einen halbunendlichen Raum Gebrauch gemacht (s. Winsome / Westerveld, 1980).

### 2.2.6.2 Handhabung

Der Wärmeaustausch wird berücksichtigt, wenn die Option angeklickt wird (Abbildung 6), wahlweise - je nach Charakterisierung der vorliegenden Situation - für die Berücksichtigung der Deckschichten im Hangenden und/oder im Liegenden. Der Nutzer sollte von dieser Option nur Gebrauch machen, wenn die Standortverhältnisse diesen Ansatz legitimieren.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Wir weisen an dieser Stelle nochmals auf die Modellgrundlagen und Verifikation von GED (BfE 2006) hin. Der zweidimensionale, homogene Ansatz vernachlässigt generell präferentielle Fliesswege und unvollständig ausgebaute Brunnen. Diese Vernachlässigungen sind im Sinne der Aufgabenstellung des Programms nicht konservativ. Mit der Option, von einem weiteren, nicht-konservativen Prozess Kredit zu nehmen, sollte daher verantwortlich umgegangen werden!

### **2.2.6.3 Stand der Implementierung und Verifikation**

Der Algorithmus von Winsome und Westerveld ist in ähnlicher Weise wie in TOUGH2 implementiert. Die numerischen Umsetzungen weichen jedoch aus programm-internen Gründen voneinander ab. Verifikation der Implementierung durch Vergleichsrechnungen mit TOUGH2 und ggf. FEFLOW ist z.Z. noch nicht abgeschlossen.

## **2.2.7 Visualisierung von Temperatur- und Grundwasserspiegeländerungen**

### **2.2.7.1 Grundlagen**

Für den Vergleich mit Betriebsdaten realisierter Anlagen ist es sinnvoll, auch die Beeinflussung der hydraulischen Verhältnisse darzustellen. Die Absenkung und Aufhöhung des Wasserspiegels, die sich aufgrund der Förderung und Injektion ergeben, stabilisieren sich im Vergleich mit der thermischen Beeinflussung des Grundwasserleiters relativ schnell (werden quasi-stationär). Bei der Analyse von Grundwasserspiegeländerungen ist dieser Umstand zu berücksichtigen. Die von GED ausgewiesenen Grundwasserspiegeländerungen ergeben sich aus der simulierten mittleren hydraulischen Situation (d.h. auf das Jahr bezogene Volumenströme) und sind nicht Ergebnis der Maximallast, die von GED zur Bestimmung der Anzahl und Dimensionierung der Brunnen benutzt wird.

### **2.2.7.2 Handhabung**

Die Ergebnisse der Temperaturberechnung werden in der gewohnten Form als Isothermen der Änderung des Temperaturfeldes dargestellt. Neu ist die Auswahl und Darstellung von Isothermen ohne vorherige Wiederholung der Berechnung. Die Auswahl erfolgt im Fenster der Elementeigenschaften, welches standardmässig auf der rechten Seite der Grafik angeordnet ist<sup>3</sup>, durch die Selektion einer Isolinie in der Liste der grafischen Elemente und Auswahl des Isolinienwertes im Fenster der Eigenschaften des Elementes.

Die Darstellung der Isothermen kann auch vollständig unterbunden werden, indem jede einzelne Isolinie oder das gesamte Feld der Temperaturänderungen ausgeblendet wird. Dies erfolgt, indem man auf der rechten Seite der Grafik im Fenster der Objekteigenschaften die Eigenschaft der Sichtbarkeit ändert.

Hinzugekommen ist die Möglichkeit, das Feld der mittleren Wasserspiegeländerungen sichtbar zu machen. Nach jeder Berechnung werden intern bis zu 10 Isohypsen (Linien gleicher Spiegeländerungen) vordefiniert. Diese Isohypsen werden jedoch standardmässig nicht dargestellt. Durch die Festlegung der Eigenschaft (im Fenster der Elementeigenschaften) des Feldes der Wasserspiegeländerungen können diese sichtbar gemacht werden. Ihre Beschriftung erfolgt standardmässig an der Isohypse und nicht – wie bei der Temperatur – in der Legende. Das Intervall der Beschriftung kann als Eigenschaft jeder einzelnen Isolinie ebenfalls verändert werden. (Abbildung 7).

---

<sup>3</sup> Das Fenster kann vom Nutzer aus der eingestellten grafischen Oberfläche herausgenommen werden.

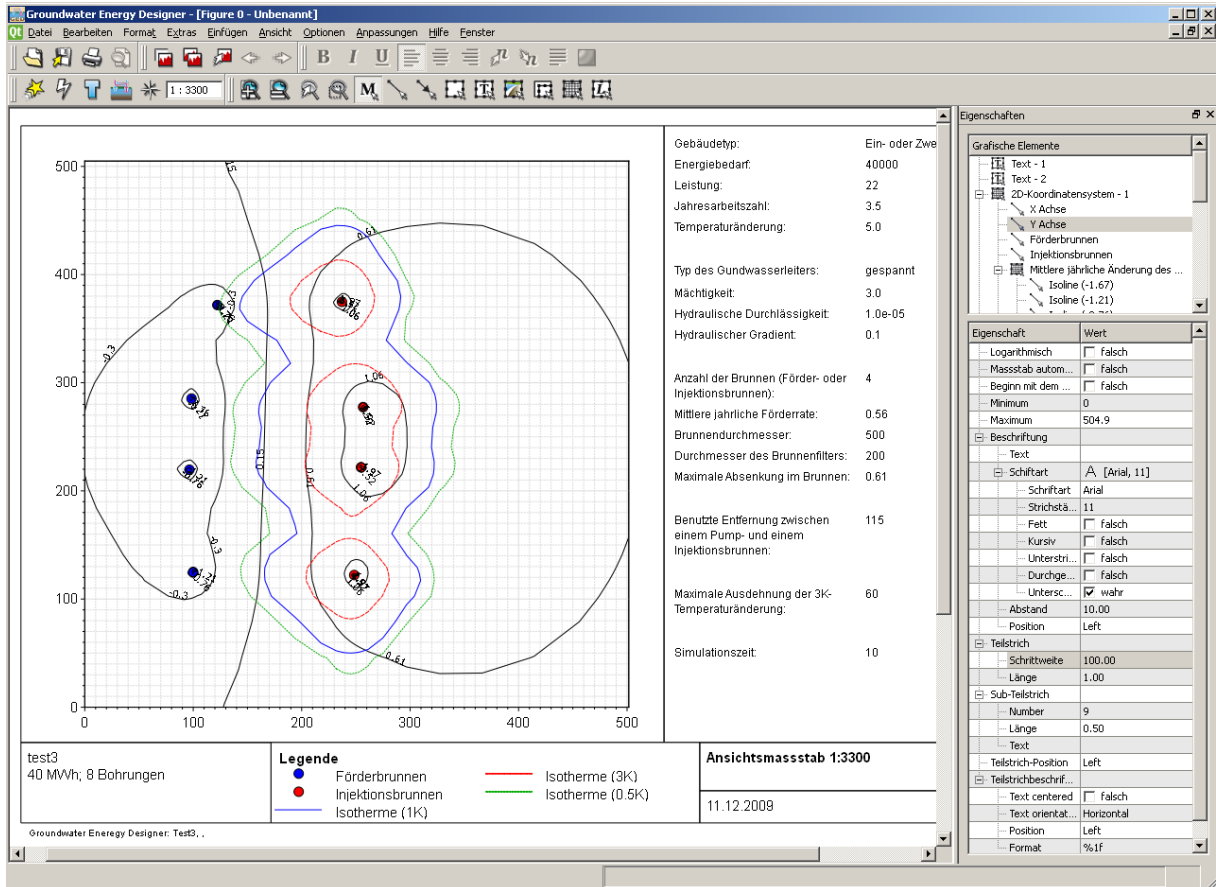


Abbildung 7: Ergebnisansicht mit der Darstellung der Isothermen der Temperaturfeldänderungen (rot 3K, blau 1K) und den Isohypsen der Grundwasserspiegeländerungen (schwarz).

## 2.2.8 Export der Ergebnisse in das Adobe PDF-Format und das ESRI Shape-Format

### 2.2.8.1 Grundlagen

Basierend auf der Migration zur Version 4.x der Programmbibliothek Qt ist ein direkter Export der Ergebnisse in das Adobe PDF-Format möglich. Zusätzlich wurde ein Export der Isohypsen und Isothermen in das ESRI-Shape-Format ermöglicht.

### 2.2.8.2 Handhabung

Die Export-Funktionalität in das Adobe PDF-Format ist im Dateimenü oder über das Tastenkürzel Ctrl+D erreichbar. Die Liste der Grafikformate zum Import und Export wurde erweitert, sowie ein Export der Isohypsen und Isothermen in das ESRI-Shape-Format hinzugefügt. Beide Funktionen stehen dem Benutzer ebenfalls im Dateimenü zur Verfügung.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Abschluss des Teilprojektes wird den derzeitigen Nutzern des Programms (z. Z. ca. 80 Lizenznehmer) eine Testversion angeboten. Diese Version basiert auf der aktuellen Qt-Programm-bibliothek und weist gegenüber ihrer Vorgängerin die folgenden wesentlichen Verbesserungen auf:

1. Möglichkeit der Nutzung des Programms bei Anlagen mit unterschiedlicher Ratenaufteilungen zwischen den Brunnen (z.B. zur Berücksichtigung benachbarter Anlagen)
2. Möglichkeit zur Einflussnahme auf die Diskretisierung, speziell auf die maximale Anzahl an verwendeten Elementen in der Finite-Volumen-Simulation
3. Möglichkeit der Einbeziehung des Wärmeaustausches mit der Deckschicht bzw. dem Liegenden des Grundwasserleiters
4. Visualisierung der Grundwasserspiegeländerungen
5. Export der Ergebnisse in das Adobe PDF-Format und das ESRI-Shape-Format

Nach Test und erforderlichenfalls Behebung von Mängeln, die innerhalb der Testperiode gefunden werden, wird die neue Version des Programms der Allgemeinheit zugänglich gemacht und die Palette der unterstützten Betriebssysteme erweitert werden.

Mit der Aktualisierung und Erweiterung des Programms wurden einerseits Anforderungen an die weitere erfolgreiche Nutzung umgesetzt (Migration der QT Programm-bibliothek), andererseits wesentliche Prozesse und Aspekte der Nutzung und Visualisierung integriert, die gute Voraussetzungen liefern, dass das Programm für die konzipierte Testphase mit realisierten Anlagen eingesetzt werden kann.

#### Literatur:

Vinsome, P.K.W., Westerveld, J.(1980): A simple method for predicting cap and base rock heat losses in thermal reservoir simulators; J. Canadian Pet. Tech., Vol. 19, No. 3, 1980, S. 87-90

BfE (2006): Groundwater Energy Designer (GED); Computergestütztes Auslegungstool zur Wärme- und Kältenutzung von Grundwasser; Schlussbericht 2006; Poppei, J., Schwarz, R. und Mayer, G.; DIS-Projekt Nr. 101'144 (der Bericht ist mit der Projektnummer online verfügbar auf der Datenbank des BfE:

<http://www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/index.html?lang=de&project=101144>)