



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 30. November 2006

Groundwater Energy Designer (GED)

Computergestütztes Auslegungstool zur Wärme- und Kältenutzung von Grundwasser

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Geothermie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Colenco Power Engineering AG
Täferstrasse 26
5405 Baden
www.colenco.ch

Autoren:

Joachim Poppei, joachim.poppei@afconsult.com, Colenco Power Engineering AG
Gerhard Mayer, Colenco Power Engineering AG
Rainer Schwarz, Colenco Power Engineering AG

BFE-Bereichsleiter: Gunter Siddiqi

BFE-Programmleiter: Rudolf Minder

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 151'997 / 101'144

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Der Groundwater Energy Designer (GED) wurde für die Dimensionierung von Grundwassergewinnungs- und -reinjektionsanlagen zur thermischen Nutzung entwickelt. Das Programm richtet sich an Planer und Errichter kleinerer und mittlerer Anlagen, sowie Genehmigungsbehörden. GED berücksichtigt standortspezifisch den Energiebedarf und die hydrogeologischen Verhältnisse.

Ausgehend von einer Wärme- oder Kältebedarfsanalyse werden interaktiv die Möglichkeiten der direkten Nutzung des Grundwassers geprüft. Anhand vereinfachter hydrogeologischer Charakteristiken werden die Brunnen zur Grundwasserförderung dimensioniert und unter Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse (verfügbare Grundfläche und Grundwasserströmung) die Möglichkeit zur Reinjektion des genutzten Wassers am Standort geprüft.

Die Bewertung der Situation erfolgt hinsichtlich

- der technischen Realisierbarkeit am Standort (Absenkung im Brunnen, Abstandsdimensionierung zwischen Förder- und Reinjektionsbrunnen) und
- der potenziellen thermischen Beeinträchtigung des Grundwassers („Wärmefahne“ zur Beurteilung der Genehmigungsfähigkeit).

GED kombiniert interaktive Masken zur Darstellung und Charakterisierung der lokalen Situation, eine Datenbank für verfahrenstechnische und hydrogeologische Kennwerte und einen Strömungs- und Wärmetransportsimulator auf der Basis eines Finite-Volumen-Verfahrens mit einem automatischen Netzgenerator.

Das Programm ist beim Entwickler (Colenco Power Engineering AG, Abteilung: Grundwasserschutz und Entsorgung) gegen eine Schutzgebühr erhältlich.

Abstract

We have developed the graphic-based tool Groundwater Energy Designer for the dimensioning of groundwater withdrawal and reinjection facilities for the purpose of thermal energy exploitation. The tool is designed to support persons planning and constructing small and medium sized installations as well as licensing authorities. GED takes into account the site-specific energy demand and hydrogeological situation.

Starting from the analysis of heating or cooling demand, the possibilities of a direct utilization of the groundwater are tested interactively. The wellbores for groundwater withdrawal are dimensioned based on a simplified hydrogeological characterisation. The options for the reinjection of used water are investigated considering the local situation (available area and natural groundwater flow).

The situation is assessed with consideration of

- the technical feasibility at the site (drawdown in the well, distance between production and reinjection wells)
- the potential thermal impact on the groundwater (delineation of the heat propagation front for an evaluation of licensing feasibility).

GED combines interactive user interfaces for the input of data and characterisation of the local situation, a database with technical and hydrogeological parameters and a flow and heat transfer simulator based on a finite volume code with an automatic mesh generator.

The program is available for purchase from the developer (Colenco Power Engineering, Ltd, department groundwater protection and waste disposal).

Résumé

Le logiciel *Groundwater Energy Designer* (GED) a été conçu pour le dimensionnement de pompes à chaleur sur eau de nappe, par pompage et réinjection. Il s'adresse aux concepteurs et constructeurs d'installations de taille faible à moyenne, ainsi qu'aux autorités. GED prend en compte les besoins énergétiques et les conditions hydrogéologiques spécifiques au site d'implantation considéré.

Les possibilités d'utilisation de l'énergie géothermique d'une nappe sont évaluées de manière interactive, sur la base d'une analyse des besoins en chauffage ou rafraîchissement. Les puits de pompage d'eau de nappe sont dimensionnés par prise en compte des caractéristiques hydrogéologiques. De plus, la possibilité de réinjecter l'eau sur le site, après son exploitation thermique, est évaluée sur la base des conditions spécifiques du site (surface au sol disponible et vitesse d'écoulement de la nappe).

L'évaluation spécifique du site porte sur :

- la faisabilité technique (rabattement au puits, dimensionnement de la distance entre puits de pompage et d'injection) et
- l'impact thermique potentiel sur la nappe (détermination du panache thermique pour évaluation de la perspective de l'obtention d'autorisation).

GED est constitué par de boîtes de dialogue interactives sur les caractéristiques du site d'implantation potentiel, une base de données des paramètres/indices des procédés techniques et des paramètres hydrogéologiques caractéristiques, ainsi qu'un simulateur numérique de l'écoulement et du transfert de chaleur en nappe sur la base d'une méthode aux volumes finis et d'un outil de maillage automatique.

Le logiciel est délivré, contre une redevance, par la société qui l'a développé (Colenco Power Engineering AG: Département Eaux souterraines et entreposage).

Inhaltsverzeichnis

Ziel des Programms	5
Abgrenzung des Projektes	7
Beschreibung des Programms GED (Manual).....	8
Öffnen des Programms.....	8
Hauptfenster	8
Dialog der allgemeinen Parameter.....	11
Dialog zur Bestimmung des Energiebedarfs	12
Dialog zur Dimensionierung der Brunnen	15
Dialog der Grafik.....	16
Dialog der Berechnung	18
Modifikationen im Grafikfenster	22
Modellgrundlagen und Verifikation des Programms	24
Grundlagen zur Ermittlung des Grundwasserbedarfs und der Grundwassergewinnung.....	24
Berechnung des Grundwasserbedarfs.....	24
Dimensionierung der Brunnen	28
Hydrodynamisch-thermische Simulation.....	30
Modellgrundlagen der numerischen Simulation.....	30
Internes Preprocessing.....	31
Numerisches Lösungsverfahren	32
Postprocessing	35
Verifikation.....	35
Definition von Testrechnungen	36
Ergebnis von Test 1	37
Ergebnis von Test 2	39
Ergebnis von Test 3	42
Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	45
Literatur.....	46
ANHANG A: Manuel de l'utilisateur	47
Objectifs du logiciel	47
Délimitation du périmètre fonctionnel du logiciel.....	49
Description du logiciel	49
Démarrage de l'application	49
Fenêtre principale.....	50
Boîte de dialogue « paramètres principaux »	53
Boîtes de dialogue pour la détermination du besoin d'énergie	54
Boîte de dialogue pour le dimensionnement des puits	56
Boîte de dialogue graphique	58
Boîte de dialogue du calcul.....	60
ANHANG B: GLOSSAIRE	64
ANHANG C: GLOSSAR	67

Ziel des Programms

Die direkte Grundwassernutzung zur Wärmeengewinnung mittels Wärmepumpen oder zur Kühlung bietet gegenüber der konduktiven Erdwärmenutzung durch Erdwärmesonden energetische und finanzielle Vorteile. Voraussetzung zur Direktnutzung ist neben der Verfügbarkeit des Grundwassers auch die für eine Genehmigung nachzuweisende Begrenzung der thermischen Beeinflussung des Grundwassers.

Die Reinjektion oder Wiederversickerung des energetisch genutzten Grundwassers sichert die Bilanzierung und schont die Ressource Grundwasser. Zur Anordnung der Reinjektions- oder Wiederversickerungsanlagen sind zwei Aspekte zu beachten:

- Sicherung eines ausreichenden Abstandes zwischen Förder- und Versickerungsbrunnen zur Vermeidung von Zirkulation des genutzten Wassers (thermischer Kurzschluss)
- Vermeidung einer weit reichenden thermischen Beeinflussung des Grundwassers.

Für den letztgenannten Aspekt existiert vom BUWAL (Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft; jetzt Bundesamt für Umwelt, BAFU) eine Empfehlung dahingehend, dass durch Wiederversickerung die Temperatur des Grundwassers nur in einem Umkreis der Anlagen von maximal 100 m um mehr als 3K verändert werden darf (BUWAL, 2004). Dieser Aspekt gewinnt insbesondere in den hochdurchlässigen Talaquiferen mit teilweise sehr hohen Abstandsgeschwindigkeiten an Bedeutung.

GED wurde für eine optimale Anordnung der Grundwassergewinnungs- und Versickerungsanlagen unter standortkonkreten Bedingungen entwickelt. Das Programm soll Planer (Heizungstechniker, Energieberater, Bohrtechniker, Behörden u.a.) in die Lage versetzen, standortkonkrete Entscheidungen zum Einsatz der Reinjektion energetisch genutzter Wässer abzuleiten. Dabei werden im Sinne einer Vorplanung vereinfachte Annahmen getroffen. So werden beispielsweise die instationäre Grundwasserströmung und die Wärmeausbreitung in einem zweidimensionalen Grundwasserleiter mit homogenen Parametern berechnet. Saisonale Änderungen bleiben ebenso wie 3D-Effekte unberücksichtigt. GED soll erste Aussagen zur Machbarkeit und ggf. zur Genehmigungsfähigkeit ermöglichen bzw. durch Variation der Standorte von Gewinnungs- und Versickerungsanlagen optimierte Konfigurationen am Standort gewinnen lassen.

GED vereinigt dazu interaktive Masken zur Grundwasserbedarfsermittlung und zur Dimensionierung der Gewinnungsanlagen mit einem Simulationsprogramm auf der Basis eines Finite-Volumen-Verfahrens, für dessen Pre- und Postprocessing eine grafische Oberfläche zur Verfügung steht. Eine vereinfachte Übersicht der Struktur des Programms gibt Abbildung 1. Die Führung durch das Programm erfolgt Menü-gesteuert.

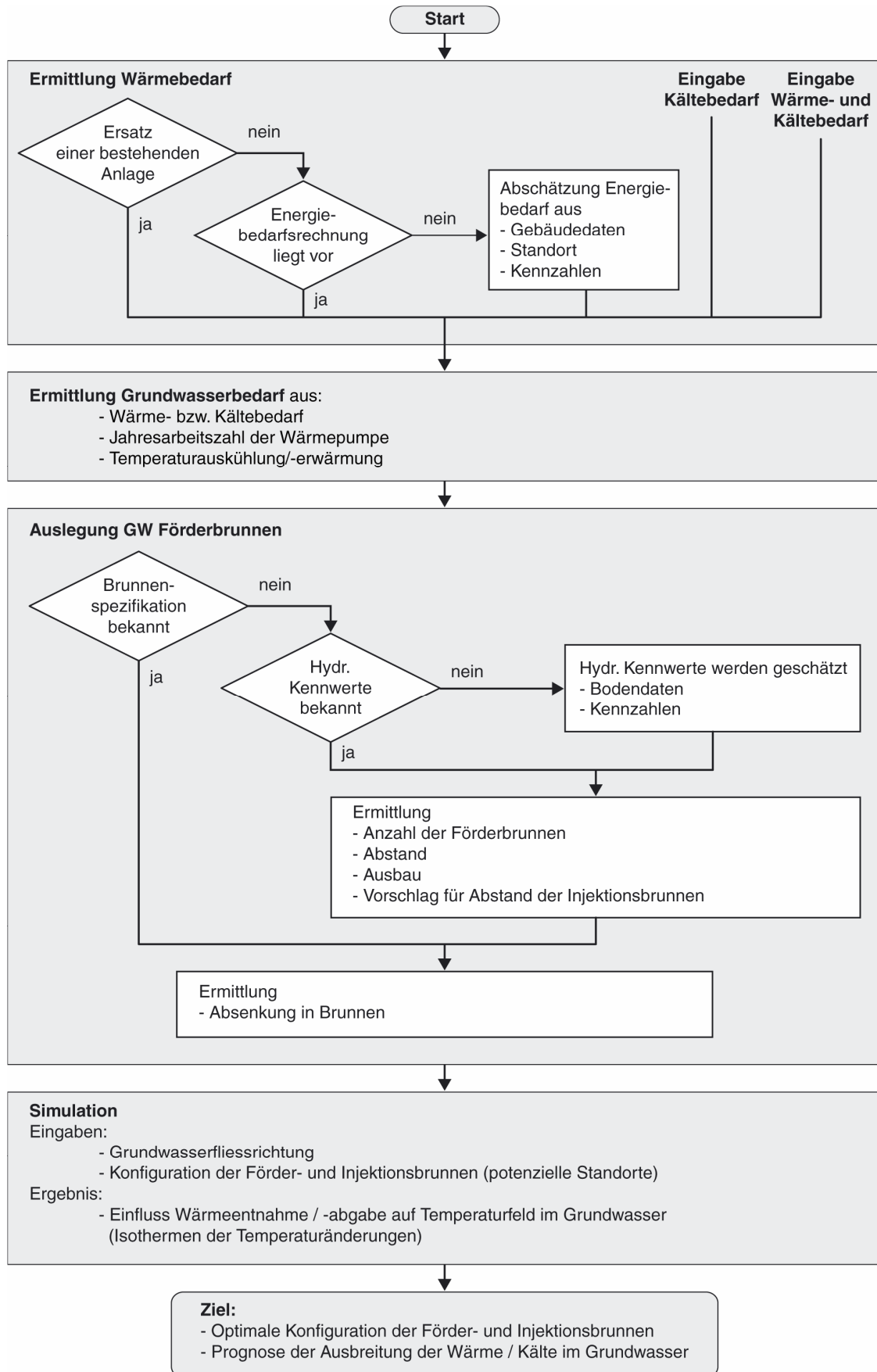


Abbildung 1: Vereinfachte Struktur des Programms GED

Abgrenzung des Projektes

Für die Simulation des Wärme- und Stofftransportes gibt es jahrzehntelange Erfahrungen im Geothermal Reservoir Engineering (jährliche Workshops des Stanford Geothermal Programs in Stanford, Cal.). Modelle und Berechnungscodes decken eine umfassende Palette zu berücksichtigender Prozesse ab und reichen von analytischen Lösungen zu komplexen numerischen Programmen.

In der Schweiz wurden Modellrechnungen zur Wärmenutzung oberflächennaher Grundwasservorkommen in den 80er und 90er Jahren vorgenommen. Beispielhaft seien die analytischen Lösungen für die eindimensionale Temperatursausbreitung von Stauffer (1983), die analytische Abschätzung von Zu- und Abströmbereichen von Mehlhorn und Nemecek (aus SGG 1985) und die Berechnungen im Rahmen des Projektes „Wärmeentzug aus öffentlichen Gewässern“ unter Leitung des WEA Bern 1989 und 1992 genannt.

Die in GED integrierte Simulation des Wärmetransports im Untergrund berücksichtigt z.T. stark vereinfacht die lokalen hydrogeologischen Verhältnisse. Dies ist im Sinne einer Vorplanung und bei kleineren und mittleren Anlagen gerechtfertigt. Dadurch sollen auch Nicht-Fachleute mit wenigen Angaben zu den hydrogeologischen Verhältnissen in die Lage versetzt werden, dieses Tool zu bedienen. Bei grösseren Anlagen sind Grundwassermodelle unabdingbar, die die ggf. komplizierten hydrogeologischen Lagerungs- und Strömungsverhältnisse genauer abbilden (Dreidimensionalität, heterogene Parameterverhältnisse, saisonale instationäre Effekte etc.).

Auf die verfahrenstechnischen Aspekte der obertägigen Anlage (Wärmetauscher und Wärmepumpen), sowie auf den detaillierten Wärme- oder Kältebedarf des Abnehmers wird im Auslegungstool nicht eingegangen. Es werden lediglich mittlere Wärme- und/oder Kältebedarfswerte des Abnehmers zugrunde gelegt.

Ähnliche Programme existieren bereits für geschlossene Systeme, wie Erdwärmesondenanlagen (EED, EWS u.a.) und Energiepfähle (PILESIM); für Systeme mit direkter Grundwassernutzung sind solche Tools nicht bekannt.

Beschreibung des Programms GED (Manual)

Die Programmoberfläche ist wahlweise in Deutsch, Französisch und Englisch verfügbar. Der folgende Abschnitt zeigt sowohl die deutschen, wie auch die französischen Dialoge. Er entspricht ansonsten der deutschsprachigen Dokumentation des Programms. Die Dokumentation in der französischen Sprache ist im Anhang A enthalten. Die Anhänge B und C enthalten ein Glossar der benutzten Begriffe in der französischen und deutschen Sprache.

Öffnen des Programms

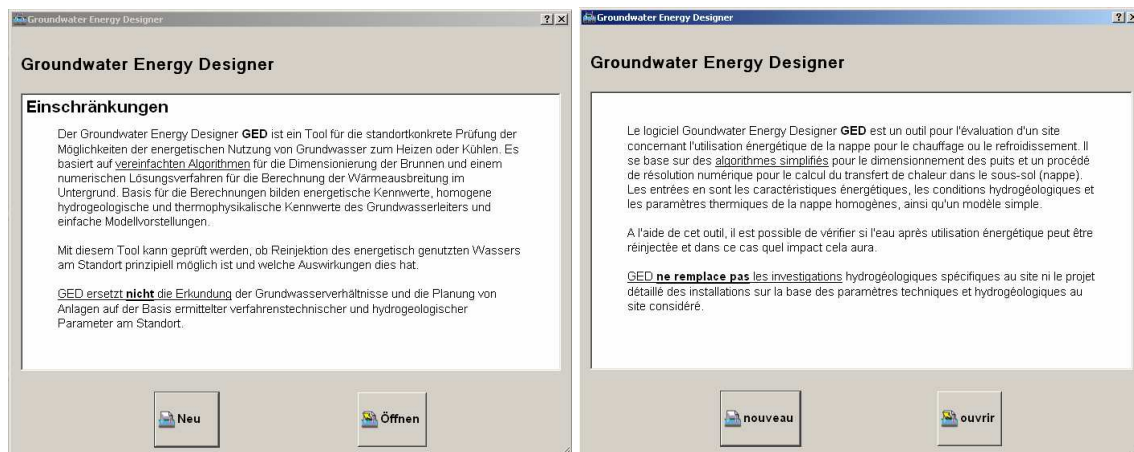


Abbildung 2: Programmstart-Dialog (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Bei jedem Programmstart erscheint in der Mitte des Bildschirms ein Hinweis auf die Funktionalitäten und Einschränkungen des Programms, siehe Abbildung 2. Durch die Schaltflächen Neu und Öffnen können Sie direkt mit einem neuen Projekt beginnen oder ein vorher gespeichertes Projekt durch das Öffnen fortsetzen.

Hauptfenster

Das Hauptfenster bietet die Möglichkeiten ein Projekt zu öffnen, zu sichern und zu bearbeiten. Für die Navigation stehen, wie in Windows-Applikationen vielfach üblich, alternative Möglichkeiten (waagerechte und senkrechte Symbolleisten; Tastenkombinationen usw.) zur Verfügung. Mit der waagerechten Symbolleiste am oberen Rand wird im Programm manövriert.

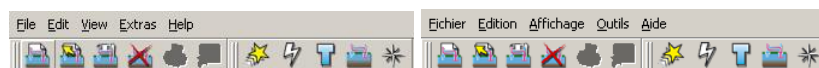









Abbildung 3: Symbolleiste (links: Deutsch, rechts: Französisch)

In der Reihenfolge von links nach rechts bietet die Symbolleiste folgende Funktionen:

- Öffnen eines neuen Projektes ,
- Öffnen eines gespeicherten Projektes ,
- Speichern eines Projektes ,
- Schliessen des Programms ,
- Drucken der grafischen Programmausgabe ,
- Sichern der grafischen Programmausgabe in eine Abbildungsdatei ,
- Öffnen der generellen Projekteinstellungen ,

- Öffnen des Energiebedarfsdialogs ⚡,
- Öffnen des Brunnendialogs T,
- Öffnen des Grafikdialogs 🖨️ und
- Öffnen des Berechnungsdialogs ✳️.

Verbleiben Sie mit der Maus etwas länger auf einem Symbol der Symbolleiste, so wird in der unteren linken Ecke des Hauptfensters ein Hilfetext eingeblendet.



Abbildung 4: Datei-Menü (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Das Datei-Menü (Abbildung 4) erlaubt die folgenden Operationen:

- Neuerstellen eines Projektes (Neu),
- Öffnen eines vorher gesicherten Projektes (Öffnen),
- Speichern eines Projektes (Speichern),
- Schliessen des gesamten Programms (Beenden),
- Einrichten der Seite zum Drucken (Seite einrichten),
- Seitenansicht des Drucks (Seitenansicht),
- Drucken (Drucken) und
- Exportieren in eine Abbildungsdatei (Exportieren).

Für einige der Funktionen stehen auch Tastenkombinationen für den schnelleren Zugriff zur Verfügung. Dies sind:

- Neu Strg+N,
- Öffnen Strg+O,
- Speichern Strg+S,
- Beenden Strg+Q,
- Drucken Strg+P und
- Exportieren Strg+Alt+I.

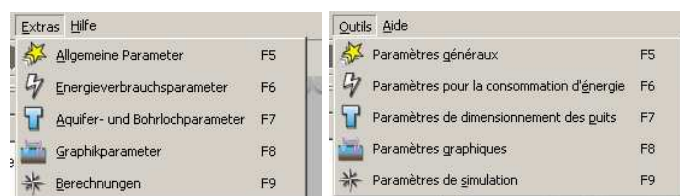


Abbildung 5: Extras-Menü (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Das Extra-Menü (Abbildung 5) beinhaltet den Zugriff auf alle Dialoge des Programms:

- Dialog der allgemeinen Parameter,
- Dialog der Parameter des Energieverbrauchs,
- Dialog der Parameter des Grundwasserleiters und der Bohrlochdimensionierung,
- Dialog der Grafikeinstellungen und
- Dialog der Berechnungen.

Für alle Dialoge sind als Alternative in der Anwendung auch Tasten für den schnelleren Zugriff definiert. Dies sind:

- F5 für den Dialog der allgemeinen Parameter,
- F6 für den Dialog des Energieverbrauchs,
- F7 für den Dialog des Grundwasserleiters und der Bohrlochdimensionierung,
- F8 für den Dialog der Grafikeinstellungen und
- F9 für den Dialog der Berechnungen.

Im Hilfe-Menü ist es möglich, auf dieses Manuell sowie weitere Dokumente zuzugreifen und generelle Informationen zum Programm abzurufen. Die Hilfe kann auch immer mit der Taste F1 erreicht werden.

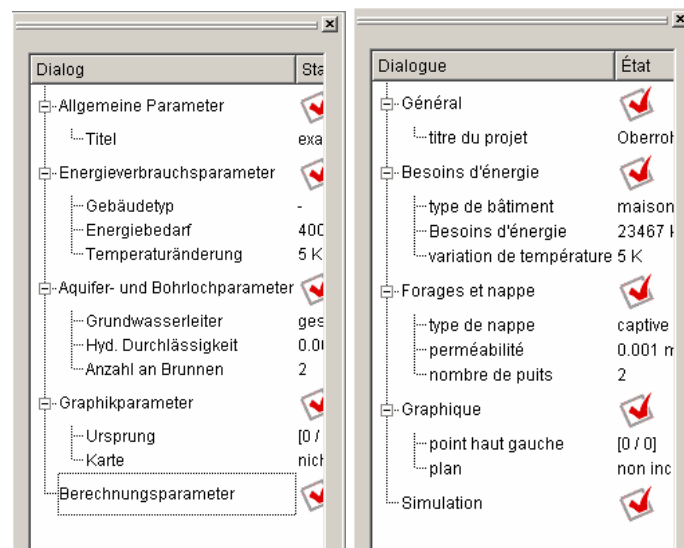




Abbildung 6: Eigenschaftsfenster (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Auf der linken Seite des Hauptfensters erscheint eine Zusammenfassung des aktuellen Projektes (Abbildung 6). Mit Hilfe dieser Übersicht können Sie leicht ersehen, in welchem Projekt Sie sich befinden und welche Eingaben schon erfolgt sind. Der Status der Eingabe wird mit zwei Symbolen dargestellt:

- Ist eine Eingabe noch nicht erfolgt, so ist dies durch das Symbol  signalisiert.
- Ist eine Eingabe hingegen erfolgreich abgeschlossen worden, erscheint das Symbol .

Durch einen Doppelklick auf die Einträge gelangen Sie ebenfalls direkt in die Dialoge. Machen Sie z.B. einen Doppelklick auf den Brunneneintrag, wird der Dialog des Grundwasserleiters und der Brunnendimensionierung geöffnet. Durch einen Klick auf das Plus bzw. Minus zu Beginn eines Haupteintrages können die Angaben ein- bzw. ausgeblendet werden.

Das Eigenschaftsfenster können Sie jederzeit schliessen. Um es wieder zu öffnen, benutzen Sie die rechte Maustaste im Bereich des Menüs bzw. der Symbolleiste des Hauptfensters und selektieren Sie das Eigenschaftsfenster im sich öffnenden Dialog.

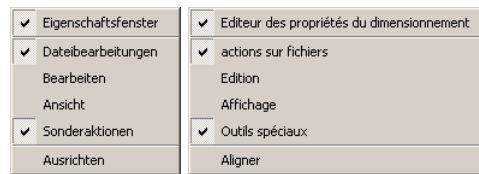


Abbildung 7: Menü der rechten Maustaste im Hauptfenster: Sichtbare Elemente sind gekennzeichnet (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Die rechte Seite des Hauptfensters ist zunächst frei. Im späteren Programmablauf wird an dieser Stelle ein Fenster zur grafischen Präsentation der Ergebnisse aufgebaut.

Dialog der allgemeinen Parameter

Der Dialog der allgemeinen Parameter unterteilt sich in zwei Abschnitte. Der erste Abschnitt beinhaltet Informationen zum Programmbenutzer, der zweite Abschnitt beinhaltet Angaben zum Projekt.

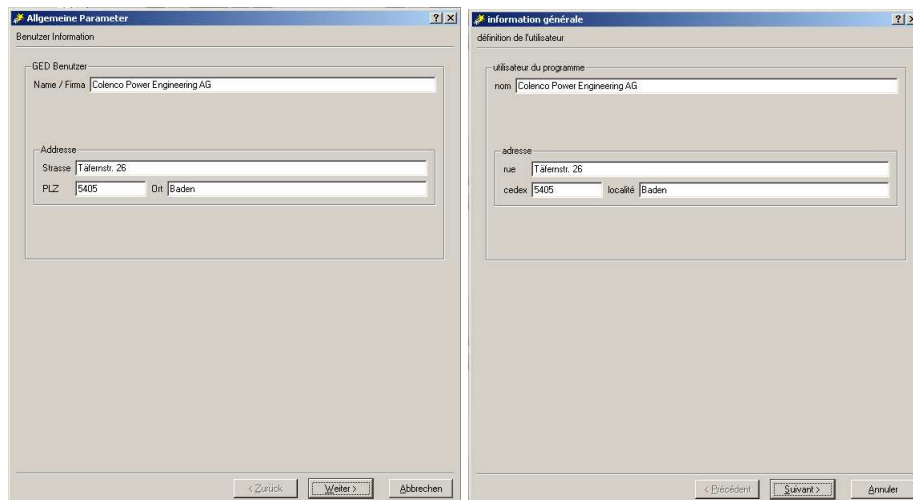


Abbildung 8: Angaben zum Benutzer (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Innerhalb des ersten Abschnitts (Abbildung 8) wird der Benutzer und dessen Anschrift erfragt. Diese wird in der späteren grafischen Präsentation der Ergebnisse benutzt, um auf der Ausgabe auf den Benutzer des Programms hinzuweisen.

Abbildung 9: Angaben zum Projekt (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Der zweite Abschnitt (Abbildung 9) beinhaltet Informationen zum Projekt, die für Sie zur Verwaltung gedacht sind. Dies ist ein Titel des Projektes, der später auch als Dateiname zum Speichern vorgeschlagen wird, die Anschrift des Standortes und ein Textfeld für eine kurze Beschreibung des Projektes.

Die Anschrift des Standortes erscheint ebenfalls in der grafischen Präsentation der Ergebnisse in der linken unteren Ecke des A4 Blattes. Sie kann dort auch innerhalb der Grafik editiert werden, jedoch werden spätere Änderungen nicht in die Einstellungen des Projektes übernommen.

Dialog zur Bestimmung des Energiebedarfs

Als erster Schritt zur Dimensionierung wird der Wärmebedarf bzw. Kältebedarf des Objektes erfasst. Dabei wird unterschieden zwischen dem Ersetzen eines bestehenden Heizsystems, für das Verbrauchsdaten vorliegen, der Neukonzeption eines Heizsystems und der Konzeption einer direkten Kühlung (bzw. einer kombinierten Anlage aus Kühlung und Heizung). Bei einer Neukonzeption bzw. beim Ersatz eines bestehenden Heizungssystems erfolgt an dieser Stelle ebenfalls die Festlegung der Gebäudekategorie aus einer Menüliste.

The image shows two side-by-side software windows. The left window, titled 'Anlagenbeschreibung', is in German. It has a section 'Charakteristik' with two radio buttons: 'die zu konzipierende Anlage ersetzt ein bestehendes Heizsystem (z.B. Öl- / Gasheizung)' (selected) and 'Neukonzeption eines Heizsystems'. Below is a dropdown menu 'Gebäudekategorie' with 'Ein- oder Zweifamilienhaus' selected. The right window, titled 'besoins d'énergie', is in French. It has a section 'caractéristiques de l'installation' with three radio buttons: 'remplacement de l'installation de chauffage existante (par exemple chauffage à fuel/ au gaz)' (selected), 'installation de chauffage nouvelle', and 'installation de chauffage et de refroidissement'. Below is a dropdown menu 'type de bâtiment' with 'maison particulière 1-2 familles' selected. Both windows have navigation buttons at the bottom: '< Zurück' and 'Weiter >' on the left, and '< Précédent', 'Suivant >', and 'Annuler' on the right.

Abbildung 10: Anlagenbeschreibung (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Wird ein bestehendes Heizsystem ersetzt, sind die bisherigen Heizenergieverbräuche i.A. bekannt. Diese Angabe kann in Form des Heizöl-, Erdgas- bzw. elektrischen Stromverbrauches für ein Jahr erfolgen.

Bei der Neukonzeption kann, wenn keine Bedarfsrechnung durch den Architekten oder Heizungsplaner vorliegt, auch eine Schätzung auf der Basis von Energiekennzahlen (SIA – Empfehlung 380/1¹) für verschiedene Gebäudenutzungen und der Energiebezugsfläche² vorgenommen werden. Hierzu werden Sie aufgefordert, die Energiebezugsfläche und einen Standort in Ihrer Nähe zu benennen. Die Energiebedarfsschätzung berücksichtigt die Kennzahlen zur Warmwasserbereitung, wenn Sie den entsprechenden Schalter aktivieren.

Der geschätzte Wärmebedarf wird programm-intern zur Berücksichtigung der Standort-spezifität mittels langjähriger Mittelwerte von Heizgradtagen für 58 verschiedene Standorte der Schweiz skaliert. Dazu wählen Sie bitte den Ort, der Ihrem Standort am nächsten liegt.

¹ Die vom Programm verwendeten Energiekennzahlen basieren auf der Empfehlung zur SIA 380/1 von 1988. Diese berücksichtigen nicht das gebäudespezifische Verhältnis von thermisch gewichteter Gebäudehülle und Energiebezugsfläche (A/EBF), da dessen Berechnung uns hier zu aufwendig und der Problemstellung nicht angemessen erschien. Der Nutzer dieser Option sollte sich jedoch bewusst sein, dass ohne diese Berücksichtigung und aktueller Grenzwerte der SIA der Wärmebedarf eines Neubaus von heute überschätzt wird und damit auch der erforderliche Volumenstrom des Grundwassers.

² Nutzer aus Deutschland werden stattdessen die „zu beheizende Grundfläche“ kennen, die etwas anders definiert ist. Die Abweichungen sind aber im Rahmen dieser Schätzung tolerierbar.

Die Abbildung zeigt zwei nebeneinander angeordnete Fenster. Das linke Fenster ist mit 'energiebedarf' überschrieben und enthält die Eingabefelder 'Jahresarbeitszahl' (Wert: 3,5) und 'mittlere Temperaturänderung' (Wert: 5). Das rechte Fenster ist mit 'besoins d'énergie' überschrieben und enthält die Eingabefelder 'coefficient de performance' (Wert: 3,5) und 'variation de température moyenne' (Wert: 5). Beide Fenster haben Navigationsbuttons am unteren Rand.

Abbildung 11: Angaben zur Wärmepumpe (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Als letzten Punkt werden bei Heizsystemen Angaben zur Wärmepumpe benötigt: die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe (als Standardwert wird 3.5 angeboten) und die über das Jahr gemittelte Temperaturänderung des Grundwassers, die bei der Nutzung erwartet wird. Wir schlagen hier einen Wert zwischen 3 und 5 Kelvin vor.

Auf der Basis des bekannten oder ermittelten Nutzenergiebedarfs für Heizzwecke, der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und der gewählten Temperaturänderung des geförderten Grundwassers werden der über das Jahr gemittelte Grundwasserbedarf und unter Zugrundelegung der Vollbetriebsstundenzahl, die programm-intern entsprechend der Gebäudekategorie gewählt wird, der maximale Grundwasserbedarf bei Spitzenlast berechnet. Diese Volumenströme werden in m^3/h und l/min ausgegeben.

Die Abbildung zeigt zwei nebeneinander angeordnete Fenster. Das linke Fenster ist mit 'energiebedarf' überschrieben und enthält die Eingabefelder 'Kühlbedarf pro Jahr' (Wert: 13.0372222222222), 'Vollbetriebsstundenzahl' (Wert: 13.0372222222222) und 'mittlere Temperaturänderung' (Wert: 5). Das rechte Fenster ist mit 'besoins d'énergie' überschrieben und enthält die Eingabefelder 'besoin en rafraîchissement par année' (Wert: 13.0372222222222), 'heures de pleine charge' (Wert: 13.0372222222222) und 'puissance de rafraîchissement' (Wert: 13.0372222222222). Beide Fenster haben Navigationsbuttons am unteren Rand.

Abbildung 12: Direktkühlung / kombinierte Anlage (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Bei Anlagen zur Direktkühlung oder bei kombinierten Anlagen zum Kühlen und Heizen erfolgt die Berechnung der erforderlichen Volumenströme anhand verfahrenstechnischer Kennwerte.

Die erforderlichen Programmeingaben sind bei Direktkühlung:

- der Kühlbedarf pro Jahr,
- die Vollbetriebsstundenzahl oder die erforderliche Kühlleistung und
- die beabsichtigte mittlere Temperaturänderung des Grundwassers bei der Kühlung.

Die Kombination der Anlage mit einer Heizung bedarf der folgenden zusätzlichen Programmeingaben für den Heizbedarf:

- den Heizbedarf pro Jahr,
- die Vollbetriebsstundenzahl oder die Heizleistung,
- die beabsichtigte mittlere Temperaturänderung des Grundwassers beim Heizen und
- der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe.

Bei kombinierten Anlagen erfolgt die energetische Bilanzierung der Grundwasserbeeinflussung innerhalb eines Jahres programm-intern. Für die Berechnung der Absenkungen und die Auslegung der Brunnen wird der grössere Lastfall zugrunde gelegt.

Dialog zur Dimensionierung der Brunnen

Zur Dimensionierung der Förderbrunnen werden hydrogeologische Kennwerte benötigt. Neben der hydraulischen Durchlässigkeit und der Lage des Grundwasserspiegels unter Terrainoberfläche sind dies die Aquifermächtigkeit bei gespannten Verhältnissen bzw. die Basis des Grundwasserleiters bei ungespannten Verhältnissen (in m unter Terrainoberfläche bzw. Geländeoberkante).

Für die nachfolgende Simulation sind im weiteren Angaben zur Porosität und zum Gradienten der Grundwasseroberfläche (in m/100m) erforderlich. Letztere Angaben können i.d.R. aus regionalen Grundwassergleichneplänen entnommen werden, die zumeist bei den Umweltämtern vorliegen.

Abbildung 13: Grundwasserleiter (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Für die hydraulische Durchlässigkeit und Porosität stehen, wenn keine Standortdaten vorliegen, auch Kennwerte für Bodenklassen zur Verfügung. Es muss jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass mit diesen Daten nur sehr überschlägige Aussagen zur Dimensionierung der benötigten Brunnen möglich sind, da die Werte hohen Unsicherheiten unterliegen.

Die Berechnung der Anzahl und des Ausbaus der Brunnen erfolgt durch analytische Lösungen zur Ergiebigkeit eines Brunnens und zur Absenkung im Brunnen. Basis der Berechnungen sind neben den hydrogeologischen Kennwerten der maximal erforderliche Volumenstrom bei Spitzenlast und ein Datensatz für Filterdurchmesser zwischen 35 und 200 mm, die im Lockergestein mit 1 mm Schlitzweite branchenübliche sind. Der berechnete Filterdurchmesser berücksichtigt lediglich die hydraulischen Erfordernisse und keine

technischen Aspekte, wie z.B. die Möglichkeiten oder Erfordernisse zum Einbau von Unterwassermotorpumpen.

Bei mehreren Brunnen – für alle werden die gleichen Leistungsdaten zugrunde gelegt – werden Abstände zwischen den Brunnen ermittelt, bei denen eine hydraulische Beeinflussung ausgeschlossen werden kann. Alternativ können die Anzahl von Brunnen und deren Ausbau vorgegeben und vom Programm überprüft werden. Diese Option bietet sich auch zur Variation der Brunnendaten bei der Simulation an. Sind die Daten für den Bedarf nicht ausreichend, erfolgt ein Vorschlag für die erforderliche Anzahl und den Ausbau der Brunnen.

Im Ergebnis der Berechnungen werden für den zugrunde gelegten Bedarf und die hydrogeologischen Kennwerte die folgenden Angaben zur Dimensionierung ausgegeben:

- die erforderliche Anzahl von Förderbrunnen,
- der zur Vermeidung hydraulischer Beeinflussung zu sichernde minimale Abstand zwischen den Förderbrunnen (wenn die Anzahl > 1),
- die minimale Filterlänge,
- der minimale Durchmesser des/der Filter und des/der Brunnen und
- die bei diesem Ausbau zu erwartende maximale Absenkung.

Dialog der Grafik

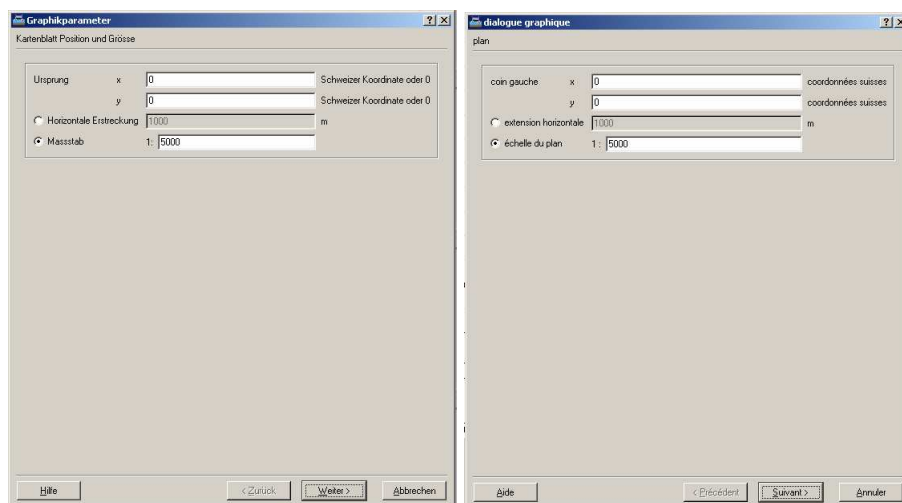


Abbildung 14: Einrichten des Kartenblattes (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Dieser Dialog dient zur Einrichtung des Kartenblattes für die grafische Interaktion und Präsentation der Ergebnisse. Es werden zunächst Koordinaten für den Ursprung des Kartenblattes eingegeben: entweder in Schweizer Koordinaten oder durch die Eingabe des Koordinatenpaares 0,0. Die Festlegung der Ausdehnung des Kartenblatts erfolgt wahlweise entweder durch die Angabe der horizontalen Erstreckung (in Richtung der X-Koordinate) oder durch die Angabe eines Massstabs.

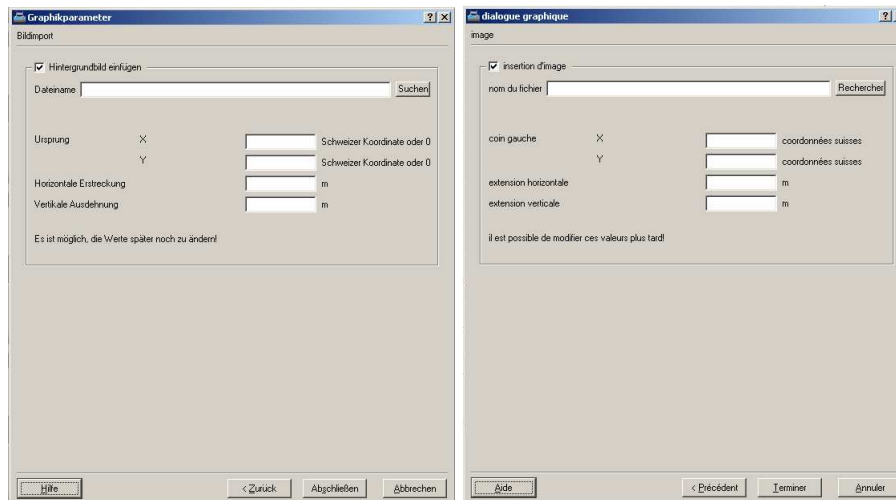


Abbildung 15: Einfügen eines Kartenbildes (links: Deutsch, rechts: Französisch)

In einem zweiten Dialogfenster ist es möglich, dem Kartenblatt das Bild einer Karte zu hinterlegen. Hierzu ist es nötig, die entsprechende Datei der Abbildung zu benennen, sowie die Abbildung zu positionieren. Bei der Angabe des Dateinamens ist es möglich, durch die Schaltfläche [Suchen] eine Dateiselektion auf dem Rechner vorzunehmen.



Abbildung 16: Dateisuche

Das Programm unterstützt Sie bei der Suche mit einer Vorschau auf den Inhalt der Datei. Unterstützte Bildformate sind das Bitmap-Format (*.bmp), das Portable Network Graphic Format (*.png), das JPEG Format (*.jpg) und das TIFF Format (*.tif). Dabei sollte bei der Auswahl der Grafik darauf geachtet werden, dass der Bildausschnitt der Datei nicht zu gross ist und dieser lediglich den benötigten Ausschnitt von einigen 100 bis 1000 Metern beinhaltet. Sehr grosse Abbildungsdateien führen zu einem langsamen Programmablauf, da das Anzeigen der Bilddatei sehr rechenzeitintensiv ist. Sollte der benötigte Ausschnitt im Kartenblatt im Vergleich zur hinterlegten Abbildung sehr klein werden, wird letztere ausgeblendet. Die Positionierung der Hintergrund-Abbildung erfolgt durch die Angabe der Koordinate des Ursprungs der Abbildung und der horizontalen (in X-Richtung) und vertikalen (in Y-Richtung) Erstreckung der Abbildung.

Eine genaue Positionierung der Abbildung ist im späteren Programmablauf noch möglich. Die dadurch geänderten Positionsangaben und Erstreckungen werden in die Projekteinstellungen übernommen.

Dialog der Berechnung















Nachdem alle Parameter zur Verfügung stehen, kann die Strömung und der Wärmetransport im Grundwasser simuliert werden. Dazu werden die ermittelten **Jahresmittelwerte** des Grundwasserbedarfs herangezogen.

Die Positionierung der Brunnen, die Bestimmung der Grundwasserfließrichtung und die Darstellung der Ergebnisse erfolgt interaktiv auf einer speziellen grafischen Oberfläche (Grafikfenster). Dazu wird im Hauptfenster eine grafische Ergebnispräsentation aufgebaut, die einen Dialog für die noch notwendigen Eingaben eröffnet. In diesem Dialog erfolgen die Platzierung der Brunnen und die Festlegung der Strömungsrichtung.



Abbildung 17: Erweiterung der Symbolleiste des Hauptfensters

Die Symbolleiste des Hauptfensters wird hierfür um die folgenden Funktionen erweitert:

- freier Zoom von grafischen Objekten ,
- automatische Wahl des Zoomfaktors von grafischen Objekten ,
- Vergrößern  und Verkleinern  der Ansicht des Blattes,
- manuelle Angabe des Zoomfaktors des Blattes ,
- Liste der grafischen Elemente und Editor der Eigenschaften der grafischen Elemente ,
- manuelle Angabe des Massstabes des Kartenbereiches ,
- Einfügen einer Kartenabbildung im Hintergrund ,
- freihändige Bestimmung der Positionierung der Kartenabbildung im Hintergrund ,
- Selektion von grafischen Objekten ,
- Zeichnen einer Linie ,
- Zeichnen eines Pfeils ,
- Einfügen eines Textfeldes , und
- Einfügen einer Grafik aus einer Datei .

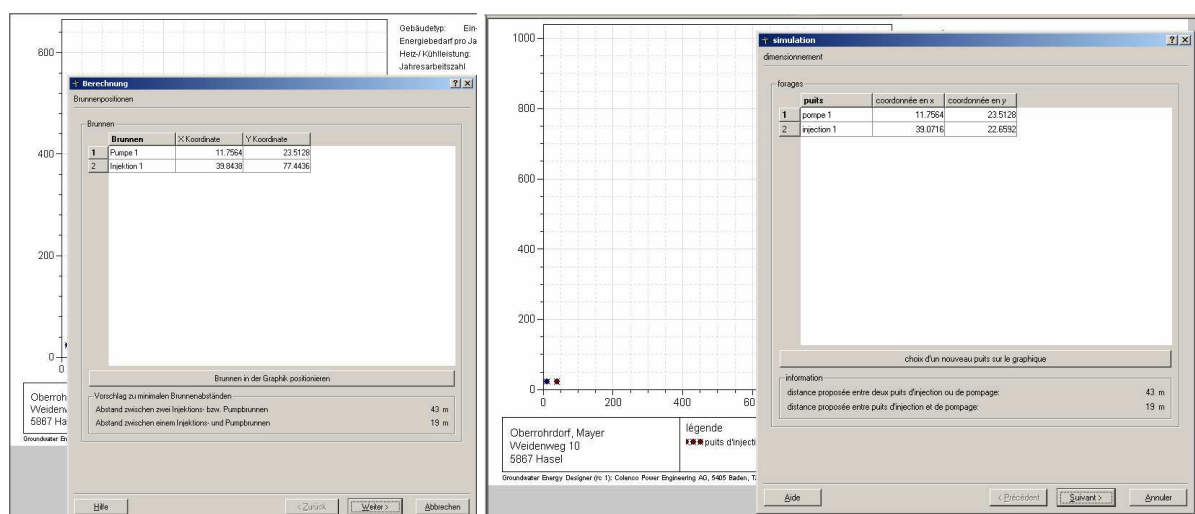


Abbildung 18: Brunnenpositionierung (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Die Auswahl der Standorte der Brunnen kann auf zwei Arten erfolgen:

- einerseits durch den direkten Eintrag der Koordinaten in die Tabelle der Brunnenpositionen und
- andererseits grafisch unterstützt mit Hilfe des Kartenblattes.

Um die Eingabe einer Brunnenposition auf dem Kartenblatt vorzunehmen, selektieren Sie bitte den Brunnen durch einen Klick auf den linken Rand der Tabelle (Abbildung 19)

Brunnen			
	Brunnen	X Koordinate	Y Koordinate
1	Pumpe 1	11.7564	23.5128
2	Injektion 1	39.8438	77.4436

forages			
	puits	coordonnée en x	coordonnée en y
1	pompe 1	11.7564	23.5128
2	injection 1	39.0716	22.6592

Abbildung 19: Selektion eines Brunnen (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Ist der Brunnen selektiert, klicken Sie die Schaltfläche „Brunnen auf der Grafik positionieren“ unterhalb der Tabelle. Der Dialog wird ausgeblendet und das Hauptfenster mit dem Kartenblatt wird sichtbar. Bewegen Sie jetzt den Mauszeiger an die gewünschte Position für den Brunnen und klicken Sie auf die Grafik. Der Dialog wird wieder sichtbar, und die Koordinaten des selektierten Brunnens werden der Position des Klicks im Kartenblatt angepasst.

Das Programm unterstützt Sie durch Empfehlungen zu den minimalen internen Abständen zwischen den Förder- bzw. Injektionsbrunnen und zu den minimalen Abständen zwischen Förder- und Injektionsbrunnen (letztere auf Basis einer analytischen Berechnung des thermischen Durchbruchs in 30 Jahren Betriebszeit). Diese Empfehlungen können für die nachfolgenden Berechnungen auch verletzt werden, allerdings sind dann die oben abgeleiteten Ausgaben zu den hydraulischen Brunnendaten (erforderliche Anzahl, Absenkung usw.) ggf. nicht mehr zulässig. Sollte eine der Empfehlungen für den Abstand der Brunnen nicht eingehalten sein, so erscheint auf dem Dialogfeld eine gelbe Fläche mit einem Hinweis auf das Unterschreiten der Empfehlung (Abbildung 20).

Vorschlag zu minimalen Brunnenabständen	
Abstand zwischen zwei Injektions- bzw. Pumpbrunnen	43 m
Abstand zwischen einem Injektions- und Pumpbrunnen	19 m
Der Abstand zwischen den Brunnen unterschreitet die vorgeschlagenen Entfernungen.	

information	
distance proposée entre deux puits d'injection ou de pompage:	43 m
distance proposée entre puits d'injection et de pompage:	19 m
La distance entre puits n'est pas conforme à celle de la géométrie minimale proposée	

Abbildung 20: Signalisation eines ggf. zu geringen Brunnenabstandes (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Der letzte Arbeitsschritt vor dem Start einer Simulation ist die Festlegung der Fliessrichtung. Hierzu gibt es wiederum zwei Möglichkeiten:

- einerseits die direkte Eingabe der Fliessrichtung, entsprechend der Gradzahl auf der Windrose (Abbildung 21) und
- andererseits durch eine grafisch unterstützte Wahl der Fliessrichtung.

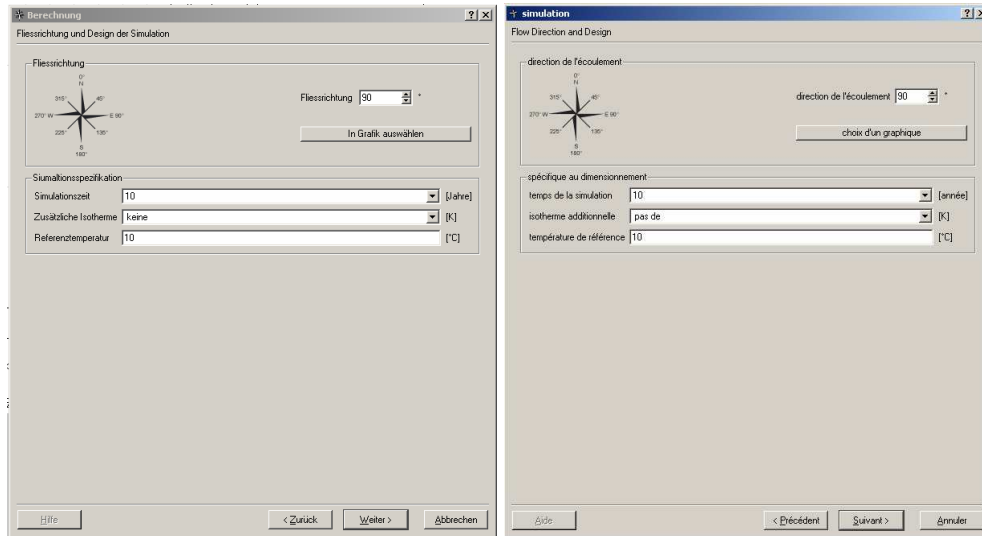


Abbildung 21: Fließrichtung des Grundwassers und Simulationsparameter (links: Deutsch, rechts: Französisch)

Um die Fließrichtungsfestlegung grafisch auszuführen, klicken Sie auf die Schaltfläche „In der Grafik auswählen“. Nachfolgend wird der Dialog ausgeblendet, und es wird der Ablauf durch ein Informationsfenster beschrieben.



Abbildung 22: Fließrichtungsbestimmung

Bestätigen Sie die Information und selektieren Sie nachfolgend durch zweimaliges Klicken im Koordinatensystem des Hauptfensters zwei Punkte: Der erste Punkt definiert den angenommenen Zufluss des Grundwassers, der zweite Punkt den angenommenen Abfluss des Grundwassers. Der Dialog der Fließrichtungsfestlegung wird wieder eingeblendet und die Gradzahl entsprechend der grafischen Eingabe geändert.

Die noch notwendigen simulationsspezifischen Angaben sind:

- die Simulationszeit (zur Auswahl stehen 10 bzw. 30 Jahre, die Angabe kann aber auch durch überschreiben der Zeitangabe beliebig verändert werden),
- ggf. die Temperaturdifferenz einer zusätzlich zu zeichnenden Isotherme (generell werden die 1K- und 3K-Isotherme gezeichnet) und
- die Referenztemperatur des Grundwassers.

Wählen Sie einen der Zeiträume bzw. markieren Sie die Zeitangabe und verändern Sie die Angabe auf die gewünschte Simulationszeit. Unabhängig von Ihren Eingaben werden standardmässig die Isothermen bei 1K- und 3K-Temperaturänderung gezeichnet. Sollten Sie eine weitere Ausgabe wünschen, so wählen Sie die Differenztemperatur für die zusätzlich zu zeichnende Isotherme aus. Die Referenztemperatur – das ist der Jahresmittelwert der Grundwassertemperatur – beträgt in oberflächennahen Grundwasserleiter in Mitteleuropa ca. 10 °C.

Die nachfolgende Berechnung erfolgt intern auf der Basis eines Finite-Volumen-Verfahrens mit optimierter Diskretisierung. Die Grösse des Modellgebietes und die Diskretisierung werden intern berechnet und sind vom Nutzer nicht beeinflussbar. Das instationäre und

nicht-gekoppelte Strömungs- und Transportproblem wird in zwei Schritten (zuerst Berechnung des Strömungs-, nachfolgend Berechnung des Temperaturfeldes) gelöst. Im Ergebnis der Simulation, die maximal 1 bis 2 Minuten dauert, werden die Isothermen nach der gewählten Simulationszeit ausgegeben.

Als Ergebnis werden neben der Darstellung der Isothermen alle wesentlichen Kennwerte angegeben. Dazu gehört auch die Ausgabe des ermittelten maximalen Abstandes der Isotherme der 3K-Änderung von einem Versickerungsbauwerk. Nachträgliche Änderungen der Grafik sind mittels der Liste der grafischen Elemente und des Editors der Eigenschaften der grafischen Elemente, sowie interaktiv auf der Oberfläche möglich.

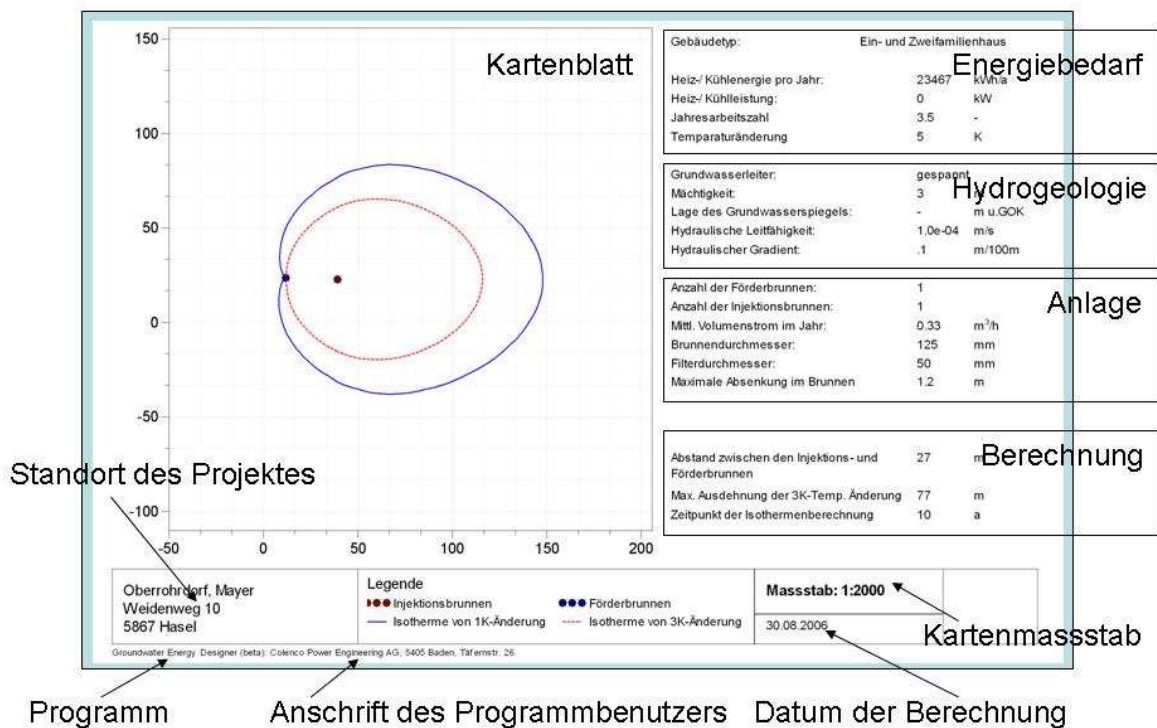


Abbildung 23: Aufbau der grafischen Präsentation der Ergebnisse

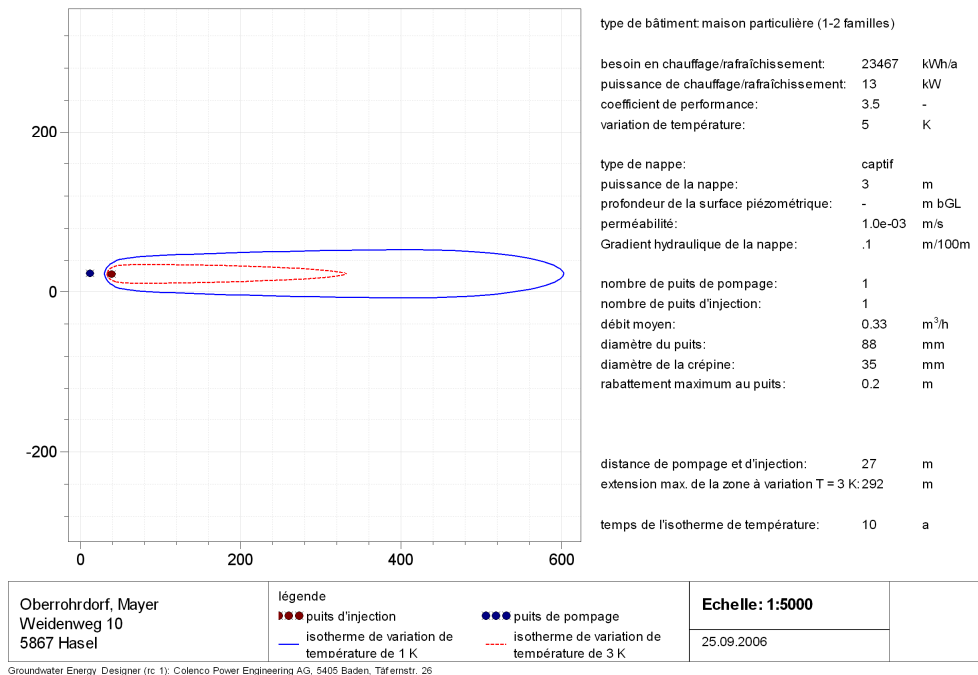



Abbildung 24: Aufbau der grafischen Präsentation der Ergebnisse in Französisch

Durch Veränderung der gewählten Auskühlung bzw. Erwärmung, der Anzahl oder Anordnung der Bohrungen lassen sich nunmehr durch vergleichende Simulationen optimale Konfigurationen berechnen, deren Ergebnisse ausgedruckt und die Eingabeparameter der Variationen gespeichert werden können.

Modifikationen im Grafikfenster

Das Grafikfenster verfügt über eine Vielzahl von Möglichkeiten, um die Ausgabe des Programms an Ihre Wünsche anzupassen.

Mit dem Symbol  können Sie die Liste der grafischen Elemente und den Editor der grafischen Elemente öffnen. Selektieren Sie das zu verändernde Element auf der Zeichenfläche durch das Selection-Tool oder in der Liste der grafischen Elemente. Nachfolgend können Sie die Eigenschaften des selektierten Elements im Editor der grafischen Eigenschaften bearbeiten.

Folgende Elemente können zusätzlich in die grafische Ausgabe eingefügt und editiert werden:

- Linien 
- Pfeile 
- Texte 
- Bilder 

Zum Einfügen eines Elements selektieren Sie das entsprechende Tool in der Symbolleiste und positionieren Sie die Maus an der entsprechenden Stelle auf der Zeichenfläche. Linien und Pfeile werden zwischen zwei Punkten gezeichnet. Dazu drücken Sie die Maus an dem Punkt über der Zeichenfläche, wo das Element beginnen soll. Nachfolgend halten Sie die Maustaste gedrückt und bewegen sie die Maus bis zum Endpunkt des Elements. Beim Loslassen der Maustaste wird das Element zwischen dem Anfangs- und dem Endpunkt eingefügt.

In gleicher Weise werden Texte und Bilder in ein Rechteck eingefügt: Nachdem Sie das entsprechende Tool selektiert haben, positionieren Sie die Maus an einer Ecke des gewünschten Rechtecks auf der Zeichenfläche und drücken Sie die linke Maustaste. Halten Sie die Maustaste gedrückt und ziehen sie mit der Maus ein Rechteck auf. Nach dem Loslassen der Maustaste wird ein Rechteck eingefügt, in das Sie einen Text bzw. eine Abbildung einfügen können.

Elemente können entfernt werden, indem Sie das Element selektieren und durch die Taste „Löschen“ von der Zeichenfläche entfernen.

Modellgrundlagen und Verifikation des Programms

In diesem Kapitel werden die verwendeten physikalisch-mathematischen Grundlagen des Programms und die Verifikation des Programms dargestellt.

Die Beschreibung der Modellgrundlagen stellt die wesentlichen Gleichungen und verwendeten Daten zur

- Ermittlung bzw. Bereitstellung des Nutzenergiebedarfs,
- daraus resultierend, des Grundwasserbedarfs und
- der Dimensionierung der Gewinnungsanlagen (Brunnen) sowie
- der Berechnung der Wärmeausbreitung im Grundwasser bei dessen energetischer Nutzung und anschliessender Wiederversickerung (bzw. Reinjektion) zusammen.

Abschliessend wird anhand von Vergleichsrechnungen mit anerkannten Codes die Verifikation des Programms gezeigt.

Grundlagen zur Ermittlung des Grundwasserbedarfs und der Grundwassergewinnung

Berechnung des Grundwasserbedarfs

Für die Auslegung der Untertage Teile sind zwei Kennwerte massgebend:

- das jährliche Maximum des Grundwasserbedarfs – zur Auslegung der Brunnen (Anzahl und Ausbau) und
- der (über das Jahr) gemittelte Grundwasserbedarf und dessen thermische Veränderung – zur Bewertung der thermischen Beeinflussung (Optimierung von Anordnung und Abständen).

Bei der energetischen Nutzung wird unterschieden in

- Nutzung des Grundwassers zu Heizzwecken (Auskühlung des geförderten Wassers mittels Wärmepumpe),
- Nutzung des Grundwassers zu Kühlzwecken (Direktnutzung des geförderten Grundwassers bei Erwärmung dessen) und
- kombinierte Nutzung für Heizung und Kühlung.

Heizung mit grundwassergekoppelter Wärmepumpe

Bei der Ermittlung des Nutzenergiebedarfs wird unterschieden in

- das Ersatz bestehender Anlagen, bei denen der bisherige Heizenergiebedarf bekannt ist,
- das Erstellen neuer Anlagen, für die der Nutzenergiebedarf (extern) berechnet worden ist und
- das Erstellen von Neuanlagen, bei denen der Nutzenergiebedarf nicht bekannt ist und dieser im Programm anhand von Kennwerten geschätzt wird.

Im Falle (a) wird aus den mittleren bisherigen Verbräuchen konventioneller Energieträger (☞ Eingabe) der mittlere Nutzenergiebedarf \overline{Q}_H unter Zugrundelegung nachfolgender Heizwerte berechnet:

1 l HEL - 10.7 kWh_{th}
 1 m³ Gas - 9.6 kWh_{th}
 1 kWh Strom - 1 kWh_{th}

und zusätzlich im Falle von Gas oder Heizöl einem mittleren Wirkungsgrad des zu ersetzenden Kessels von 85%.

Im Falle (b) wird der mittlere Nutzenergiebedarf \bar{Q}_H direkt eingegeben (☞ Eingabe).

Im Falle (c) wird der mittlere Nutzenergiebedarf \bar{Q}_H anhand von Grenzwerten (Mindestwerten für Neubauten (Tabelle 1, Q_h) gemäss Entwurf der SIA 380/1, Ausgabe 1988) für verschiedene Gebäudetypen (nach ☞ Eingabe) mit oder ohne Warmwasser (Q_{WW}) und Energiebezugsflächen (☞ Eingabe) geschätzt³.

Kategorie Gebäudenutzung	Q_h [MJ/m ² a]	Q_{WW} [MJ/m ² a]
Ein- und Zweifamilienhäuser	330	60
Mehrfamilienhäuser	300	100
Verwaltungsbauten	270	0
Schulen und Kindergärten	270	25
Lager und Werkstätten	240	0
Krankenhäuser	320	100
Hallenbäder	650	0

Tabelle 1: ausgewählte Energiekennzahlen: Grenzwerte (Mindestwerte für Neubauten) aus SIA Empfehlung 380/1 (mittlerer jährlicher Nutzenergiebedarf bezogen auf die Energiebezugsfläche)

Die Standortspezifität des geschätzten Bedarfs wird (nur im Falle der Schätzung (c)) anhand einer Skalierung entsprechend den langjährigen Heizgradtagen verschiedener Standorte der Schweiz berücksichtigt (Tabelle 2), wobei als Mittelwert die Heizgradtage im Mittelland (Station Olten) zugrunde gelegt werden.

Der Wärmeleistungsbedarf P_H , der bei Heizung dem maximalen Grundwasserbedarf zugrunde gelegt wird, wird unabhängig von der Art der Bestimmung des Nutzenergiebedarfs nach (a), (b) oder (c) aus dem mittleren Nutzenergiebedarf \bar{Q}_H und der Vollbetriebsstundenzahl (VLZ_H) berechnet, die intern durch die Gebäudenutzungskategorie (☞ Eingabe) nach Tabelle 3 bestimmt ist:

$$P_H = \frac{\bar{Q}_H}{VLZ_H} \quad (1)$$

mit

$[\bar{Q}_H] = \text{kWh}$

$[P_H] = \text{kW}$.

³ Diese Schätzung nach dem Entwurf der SIA 380/1 stellt gegenüber modernen Gebäuden eine konservative Überschätzung des Bedarfs dar. Das Verfahren der aktuellen Ausgabe der SIA 380/1 stellt jedoch Ansprüche an die Ermittlung des Energiebedarfs in Abhängigkeit von der Kubatur des Gebäudes, die über die Zielstellung des Programms hinausgehen würden.

Station	Heizgradtage [Kd]
Airolo	4614
Altdorf	3441
Arosa	6317
Bad Ragaz	3579
Basel (-Binningen)	3346
Beatenberg	4404
Bern	3666
Bever	6687
Beznau	3508
Biel	3670
Château-d'Œx	4671
La Chaux-de-Fonds	4184
Chippis	3380
Chur	3528
Comprovasco	3303
Davos	5886
Delémont	3683
Disentis	4440
Einsiedeln	4538
Engelberg	4784
Fey-Nendaz	3779
Fribourg	3873
Genève	3072
Glarus	3877
Göschenen	4850
Heiden	4332
Interlaken	3798
Kreuzlingen	3667
Langenbruck	4132
Langnau i.E.	3959
Lausanne	3375
Leysin	4720
Locarno (-Monti)	2629
Lugano	2643
Luzern	3651
Marsens	3933
Meiringen	3728
Montana	4778
Montreux	3135
Neuchâtel	3413
Oeschberg	3877
Olten	3587
Robbis	4370
Schaffhausen	3692
Schuls	5118
Sion	3236
St. Gallen	4044
St. Moritz	6407
Zermatt	5835
Zürich (-SMA)	3718

Tabelle 2: Langjährige Mittelwerte der Heizgradtage $HQT_{20/12}$ der Periode 1961-1970 (SIA 380)

Kategorie Gebäudenutzung	Vollbetriebsstundenzahl VLZ _H [h]
Ein- oder Zweifamilienhäuser	1800
Mehrfamilienhäuser	1800
Verwaltungsbauten	1300
Schulen und Kindergärten	1700
Lager und Werkstätten	1000
Krankenhäuser	2200
Hallenbäder	4000

Tabelle 3: verwendete jährliche Vollbetriebsstunden der Gebäudekategorien

Die zu Heizzwecken zu verwendende Wärmepumpe hat eine – über das Jahr gemittelte – Jahresarbeitszahl (JAZ ☞ Eingabe) und kühlt – ebenfalls über das Jahr gemittelt – das Grundwasser um die mittlere Temperaturdifferenz (ΔT_H ☞ Eingabe) ab. Der über das Jahr gemittelte Grundwasserbedarf bei Heizzwecken berechnet sich demnach zu

$$\bar{V} = \left(1 - \frac{1}{JAZ}\right) \frac{\bar{Q}_H / 8760h}{\rho c \cdot \Delta T_H}, \quad (2)$$

und der maximale Volumenstrom zu

$$\dot{V}_{\max} = \left(1 - \frac{1}{JAZ}\right) \frac{P_H}{\rho c \cdot \Delta T_H} .^4 \quad (3)$$

ρ ... Dichte von Wasser (intern 1'000 kg/m³)
 c ... spezifische Wärmekapazität von Wasser (intern 4'186 Ws/kg·K)

(Die Temperaturabhängigkeit dieser Grössen wird vernachlässigt. In Gleichung (2) ist in der Dimension von $[\bar{Q}_H] = \text{Wh}$, in Gleichung (3) von $[P_H] = \text{W}$, in beiden Gleichungen dann die der Rate $[\dot{V}] = \text{m}^3/\text{s}$. Die Ausgabe der Raten erfolgt in den technisch „üblichen“ Einheiten m³/h und l/min.)

Direktkühlung

Im Falle der Direktkühlung mit Grundwasser werden die energetischen Bedarfswerte

- Kühlbedarf pro Jahr \bar{Q}_K (☞ Eingabe)
- Vollbetriebsstundenzahl der Kühlung VLZ_K (☞ Eingabe) sowie
- die über das Jahr gemittelte Temperaturdifferenz (ΔT_K ☞ Eingabe), die dem Grundwasser zugeführt wird,

direkt abgefragt.

Daraus ergeben sich der mittlere Volumenstrom

$$\bar{V} = \frac{\bar{Q}_K / 8760h}{\rho c \cdot \Delta T_K}, \quad (4)$$

⁴ Bei Gleichung (3) wird vereinfacht und im Sinne der Auslegung konservativ vernachlässigt, dass den Maximallastbedingungen i.d.R. eine kleinere Arbeitszahl und Temperaturdifferenz zugrunde liegen.

und der maximale Volumenstrom

$$\dot{V}_{\max} = \frac{\overline{Q}_K / VLZ_K}{\rho c \cdot \Delta T_K}. \quad (5)$$

kombinierte Nutzung

Im Falle einer (alternierenden) Nutzung zu Heiz- und Kühlzwecken wird dem mittleren Volumenstrom der effektive Energieentzug im Jahr \overline{Q}_{eff} :

$$\overline{V} = \frac{\overline{Q}_{eff} / 8760h}{\rho c \cdot \Delta T} \quad (6)$$

mit

$$\overline{Q}_{eff} = \left| \overline{Q}_K - \left(1 - \frac{1}{JAZ} \right) \overline{Q}_H \right| \quad (7)$$

und der Temperaturdifferenz

$$\Delta T = \begin{cases} \Delta T_K & \text{wenn } \overline{Q}_K > \left(1 - \frac{1}{JAZ} \right) \overline{Q}_H \\ \Delta T_H & \text{sonst} \end{cases} \quad (8)$$

zugrunde gelegt und der maximale Volumenstrom aus dem Maximum der beiden Volumenströme nach Gleichung (3) und (5) bestimmt

$$\dot{V}_{\max} = \max(\dot{V}_{\max,K}, \dot{V}_{\max,H}). \quad (9)$$

Dimensionierung der Brunnen

Die Dimensionierung der Brunnen erfolgt anhand der maximalen Volumenströme, hydrogeologischer Kennwerte des Grundwasserleiters (Aquifers) und analytischer Lösungen zur Berechnung der Absenkung des Grundwasserspiegels in einem Brunnen (es wird unterstellt, dass die Brunnen sich nicht beeinflussen).

Kriterien und hydrogeologische Grundlagen

Die Brunnendimensionierung erfolgt (vereinfacht gleichermassen für gespannte und ungespannte Verhältnisse) anhand der Gleichung zur Fassbarkeit eines Brunnens Q_f ⁵

$$Q_f = \frac{2}{15} \cdot \pi \cdot r_b \cdot h \cdot \sqrt{k_f} \quad (10)$$

⁵ Diese Gleichung gilt eigentlich nur für einen Brunnen in ungespannten Verhältnissen. Sie wird hier – konservativ – formal auch für gespannte Grundwasserleiter angesetzt.

mit

r_b ... Radius des Brunnens (wird berechnet)
 h ... (benetzte) Filterstrecke des Brunnens (wird berechnet) und
 k_f ... hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert (☞ Eingabe⁶).

Des Weiteren wird die Absenkung in einem Brunnen s , die sich nach Theiss berechnen lässt,

$$s = -\frac{\dot{V}_{\max}}{2\pi \cdot k_f H} \ln \frac{r_b}{R} \quad (11)$$

mit der Korrektur bei ungespannten Verhältnissen

$$s_u = H \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2s}{H}} \right) \quad (12)$$

auf maximal 85% der Aquifermächtigkeit (bei gespannten Verhältnissen) bzw. 50% der wassergesättigten Mächtigkeit (bei ungespannten Verhältnissen) beschränkt.

H ... Aquifermächtigkeit bei gespannten Verhältnissen, wassergesättigte Mächtigkeit bei ungespannten Verhältnissen. Ersterer als ☞ Eingabe; im zweiten Fall aus Grundwasserspiegel (☞ Eingabe bei Niedrigwasserverhältnissen) und Aquiferbasis unter Terrain (☞ Eingabe) berechnet.

Für die Reichweite der hydraulischen Beeinflussung R in Gleichung (11) wird der Ansatz von Sichardt

$$R = 3000 \cdot s_{(u)} \cdot \sqrt{k_f} \quad (13)$$

(hier formal auch für gespannte Verhältnisse) verwendet.

Der Brunnendurchmesser (daraus ergibt sich der Radius des Brunnens r_b) sollte aus Installationsgründen ca. 2.5mal so gross wie der Filterdurchmesser (NW) sein

$$r_b = \frac{2.5 \cdot NW}{2} \quad (14)$$

Bei mehreren Brunnen wird der Abstand so berechnet, dass dieser grösser als die Reichweite R nach Gleichung (13) ist (bei der Prüfung vorhandener Brunnen werden die vorgegebenen Abstände zur Superposition der berechneten Absenkung genutzt).

⁶ Für die hydraulische Durchlässigkeit und Porosität stehen, wenn keine Standortdaten vorliegen, auch Kennwerte für Bodenklassen zur Verfügung (geometrischer Mittelwert der Durchlässigkeitsbereiche nach Hölting, 1995). Mit diesen Daten sind jedoch nur sehr überschlägige Aussagen zur Brunnendimensionierung möglich sind.

Brunnenauswahl

Anhand der o.g. Kriterien (Gleichungen (10) bis (14)) werden ausgehend vom maximalen Grundwasserbedarf \dot{V}_{\max} mit den Parametern k_f und H (aus den Eingaben) Anzahl, Abstand, Bohrdurchmesser, erforderliche Filterlänge und -durchmesser iterativ bestimmt. Dabei wird anhand der Fassbarkeit eines Brunnens nach Gleichung (9) die erforderliche Anzahl n von Brunnen ermittelt ($n \cdot Q_{f,\max} > \dot{V}_{\max}$) und der minimal zulässige Filterdurchmesser des/der Brunnen(s) bestimmt. Dabei wird vereinfacht unterstellt, dass unter Maximallast alle Brunnen den gleichen Anteil zu fördern haben. Die möglichen Nennweite des Filters werden aus einer internen Datenbank ausgelesen (Tabelle 4). Diese stellt typische Nennweite von PVC-Filterrohren (DN) dar (mit 1mm Schlitzweiten zwischen DN35 und DN200 aus www.der-brunnen.de/bohrbrunnen/filterrohre/filterrohre.htm). Sie decken das Spektrum von Brunnenausbauten in Lockergesteinsaquiferen weitgehend ab⁷.

Nennweite DN (mm)
35
40
50
80
100
115
125
150
175
200

Tabelle 4: Im Programm verwendete Nennweiten für PVC-Filterrohre (zwischen DN35 und DN200)

Hinsichtlich der sich anschliessenden Simulationen, denen die Jahresmittelwerte der Grundwassernutzungen zugrunde liegen, sind mit den o.g. Auslegungen die Brunnen hinreichend sicher dimensioniert. Zur Simulation der Strömung und Wärmeausbreitung (nachfolgend) wird nur die Anzahl der Brunnen übernommen, die Abstände sind dann zur Simulation frei wählbar⁸.

Hydrodynamisch-thermische Simulation

Modellgrundlagen der numerischen Simulation

Ziel der numerischen Simulation ist die Berechnung der Temperaturänderung im Grundwasser bei Reinjektion des energetisch genutzten Wassers. Dies soll

- (a) die Reichweite einer thermischen Beeinflussung (die genehmigungsrechtlich relevant ist) und

⁷ Brunnenspezifische Anforderungen, wie z.B. Schlitzweite und Filterkies, sind nicht Gegenstand der Auswahl und in einem späteren Planungsstadium durch Spezialisten vorzunehmen.

⁸ Der Nutzer sollte sich bewusst sein, dass im Zuge der hydraulisch-thermischen Simulation die o.g. Kriterien nicht erneut geprüft werden. Beim Unterschreiten der hier empfohlenen Abstände kann die Fassbarkeit der Brunnen ggf. nicht mehr gewährleistet sein!

(b) ggf. einen thermischen Durchbruch (Rückförderung bereits thermisch genutzten Wassers im Förderbrunnen) illustrieren, um durch gezielte Anordnung der Brunnen ggf. ersteres zu minimieren und letzteres zu vermeiden.

Grundlagen der Simulation sind die aus dem Energiebedarf ermittelten mittleren Grundwasserförderraten und die zugrunde gelegten mittleren Temperaturänderungen, die ermittelte Anzahl der Brunnen (es wird vereinfacht die gleiche Anzahl von Reinjektionsbrunnen [Schluckbrunnen] mit jeweils gleichen Raten unterstellt) und die lokalen Grundwasserverhältnisse (beschrieben durch Fliessrichtung und Gradient der Grundwasseroberfläche, wassergesättigter Mächtigkeit und hydraulischer Durchlässigkeit).

Zur Simulation müssen einerseits die Strömungsverhältnisse (zusätzlich zur natürlichen Grundströmung erzeugte Absenkung und Aufhöhung im Grundwasser) und andererseits die thermischen Verhältnisse (Wärmeaustausch im Grundwasser und zwischen Grundwasser und Gesteinsmatrix) berechnet werden. Diese Prozesse sind in der Realität über die Temperaturabhängigkeit von Dichte und Viskosität des Wassers gekoppelt. Für die hier angewendete Simulation wird diese Kopplung vernachlässigt. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen ist dies gerechtfertigt.

Zur Lösung des Gleichungssystems für Strömung und Wärmetransport wird (im Programm intern) ein Modellgebiet festgelegt und dieses (gleichfalls intern) in finite Volumina diskretisiert. Die für diese Volumina berechneten Grundwassertemperaturen (nach Ablauf einer festzulegenden Simulationszeit Δt_s (☞ Eingabe)) werden anschliessend durch geeignete Isoliniendarstellungen (Isothermen) visualisiert.

Neben der Porosität (Φ ☞ Eingabewert) ist der Energieinhalt des Grundwassers (jedoch nur gering sensitiv) von der Dichte ρ_G und der spezifischen Wärmekapazität c_G der Gesteinsmatrix abhängig. Für den konduktiven Wärmeaustausch wird die (ebenfalls nur gering sensitive) Wärmeleitfähigkeit λ_G verwendet. Dazu werden folgende Annahmen getroffen:

$$\begin{aligned}\rho_G &= 2'200 \text{ kg/m}^3 \\ c_G &= 800 \text{ Ws/kg}\cdot\text{K} \\ \lambda_G &= 2 \text{ W/m}\cdot\text{K}.\end{aligned}$$

Internes Preprocessing

Das Modellgebiet wird durch ein Rechteck beschrieben, dessen Kanten von den Brunnen so weit entfernt sind, dass sie nicht durch diese hydraulisch oder thermisch beeinflusst werden. Diese Festlegung geschieht (intern) durch geeignete analytische Lösungen für die Reichweite von Druck- bzw. Temperaturänderung. Für das Modellgebiet werden die Koordinaten der Brunnen zunächst so transformiert, dass die natürliche Grundwasserströmung vom linken zum rechten Modellrand gerichtet ist (Abbildung 25).

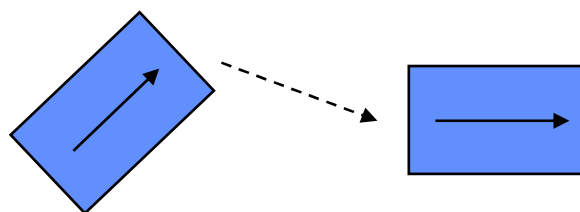


Abbildung 25: interne Transformation des Modellgebietes (Pfeil = Grundwasserfliessrichtung)

Diese beiden als Festpotenzial definierten Modellränder ergeben sich aus den erforderlichen Abständen zu den Brunnen und in ihrer Höhe aus dem hydraulischen Gradienten des Grundwassers. Die beiden Modellränder senkrecht dazu (oben und unten) sind hydraulisch und thermisch undurchlässig.

Das rechteckige Modellgebiet wird intern in (aktuell) 2'500 Rechtecke diskretisiert, mit der kleinsten Kantenlänge (1 m) in Bohrungsnähe und mit logarithmischer Zunahme zum Modellrand. Ein Beispiel der Diskretisierung für 4 Förder- und 4 Injektionsbrunnen gibt Abbildung 26).

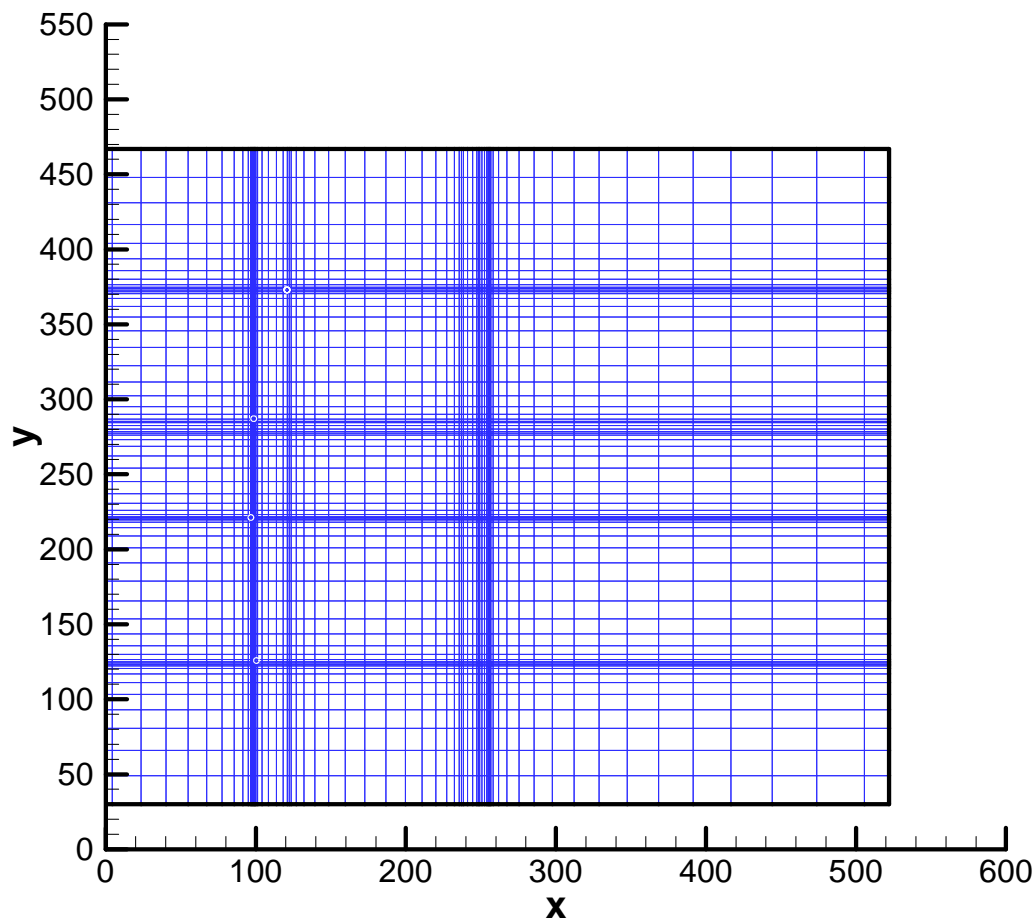


Abbildung 26: Beispiel der (internen) Diskretisierung

Numerisches Lösungsverfahren

Im Anschluss an die räumliche Diskretisierung, bei welcher der Modellbereich in finite Volumina unterteilt wird (siehe Abbildung 26), werden zwei Gleichungssysteme gelöst. Zunächst werden die Wasserflüsse zwischen den Finiten Volumina im stationären Gleichgewicht bestimmt, und darauf aufbauend die Temperaturen der finiten Volumina als Funktion der Zeit.

Im stationären Zustand lautet die Bilanzgleichung der Wasserströmung für ein finites Volumen i:

$$0 = \sum_j Q_{F,ij} + W_i \quad (15)$$

mit:

$Q_{F,ij}$... Wasserfluss vom finiten Volumen i nach j [m^3/s]
 W_i ... Wasserquellterm im finiten Volumen i [m^3/s]

In einem finiten Volumen, das einen Brunnen repräsentiert, entspricht der Betrag des Wasserquellterms W der Pumprate des Brunnens. W hat ein positives Vorzeichen bei einem Injektionsbrunnen, ein negatives bei einem Förderbrunnen.

Ausgehend von der Darcy-Gleichung wird der Wasserfluss zwischen zwei finiten Volumina i und j wie folgt angenähert:

$$Q_{F,ij} = -A_{ij} \frac{k}{\eta_F} \left(\frac{p_{F,i} - p_{F,j}}{d_i + d_j} \right) \quad (16)$$

mit:

A_{ij} ... Austauschfläche zwischen Element i und j [m^2]
 k ... Permeabilität im Modellgebiet [m^2]
 η_F ... dynamische Viskosität des Wassers [Pa s] (intern festgelegt bei 10°C)
 $p_{F,i(j)}$... Wasserdruck im Zentrum des Elements i (j) [Pa]
 $d_{i(j)}$... Abstand des Zentrums von Element i (j) zur Austauschfläche [m]

Die Permeabilität k des Grundwasserleiters ergibt sich aus der hydraulischen Leitfähigkeit der Dichte und der Viskosität des Wassers:

$$k = k_f \frac{\eta_F}{g \cdot \rho_F} \quad (17)$$

mit:

k_f ... Hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters [m/s]
 g ... Erdbeschleunigung [m^2/s]

Nach Festlegung der Drücke am Rand des Modellgebiets entsprechend dem vorgegebenen Druckgradienten, erhält man ein System gekoppelter algebraischer Gleichungen, die numerisch gelöst werden. Als Ergebnis erhält man die Drücke für jedes finite Volumen sowie die Wasserflüsse dazwischen. Letztere werden für die Berechnung des advektiven Wärmetransports benötigt.

Die Bilanzgleichung für den Wärmetransport eines finiten Volumens i lautet:

$$C_{V,i} V_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_j F_{ij} + S_i \quad (18)$$

mit

$C_{V,i}$... Wärmekapazität des finiten Volumens i [$\text{J}/(\text{K m}^3)$]
 V_i ... Volumen des finiten Volumens i [m^3]
 T_i ... mittlere Temperatur im finiten Volumen i [K]
 F_{ij} ... Wärmefluss vom finiten Volumen i nach j [J/s]
 S_i ... Wärmequellterm [J/s]

In einem finiten Volumen, das einen Förderbrunnen repräsentiert ist der Wärmequellterm (die Wärmesenke) gegeben durch:

$$S_i = W_i \cdot c_F \cdot T_i \quad (19)$$

Für einen Injektionsbrunnen gilt:

$$S_i = W_i \cdot c_F \cdot T_{F, \text{inj}, i} \quad (20)$$

mit:

$T_{F, \text{inj}, i}$... Temperatur des injizierten Wassers [K]

im porösen Medium setzt sich der Wärmeinhalt pro Volumeneinheit aus dem des Festkörpergerüsts und dem des Wassers im Porenraum zusammen. Damit ergibt sich die Wärmekapazität aus:

$$C_V = (1 - \phi) \rho_G C_G + \phi \cdot \rho_F C_F \quad (21)$$

mit:

C_V ... Wärmekapazität des porösen Mediums [J/(m³ K)]

ϕ ... Porosität des porösen Mediums [-]

ρ_G ... Reindichte des Feststoffs [kg/m³]

ρ_F ... Dichte von Wasser [kg/m³]

C_G ... Spezifische Wärmekapazität des Feststoffs [J/(kg K)]

C_F ... Spezifische Wärmekapazität von Wasser [J/(kg K)]

Der Wärmefluss zwischen zwei finiten Volumina setzt sich aus Advektion und Wärmeleitung zusammen.

$$F_{ij} = F_{\text{adv}, ij} + F_{\text{kond}, ij} \quad (22)$$

mit

F_{ij} ... Gesamter Wärmefluss zwischen den finiten Volumina i und j [J/s]

$F_{\text{adv}, ij}$... Wärmefluss durch Advektion zwischen den finiten Volumina i und j [J/s]

$F_{\text{kond}, ij}$... Wärmefluss durch Wärmeleitung zwischen den finiten Volumina i und j [J/s]

Für den advektiven Wärmefluss gilt:

$$F_{\text{adv}, ij} = \begin{cases} Q_{F, ij} \cdot u_{F, i} & \text{falls } Q_{F, ij} > 0 \\ Q_{F, ij} \cdot u_{F, j} & \text{falls } Q_{F, ij} < 0 \end{cases} \quad (23)$$

Die Wärme pro Einheitsvolumen Wasser ist gegeben durch:

$$u_{F, i} = \rho_F \cdot c_F \cdot T_i \quad (24)$$

mit

u_F ... Wärme pro Einheitsvolumen Wasser [J/m³]

Der Wärmetransport durch Konvektion wird berechnet durch:

$$F_{\text{kond}, ij} = -\lambda \cdot A_{ij} \left(\frac{T_i - T_j}{d_i + d_j} \right) \quad (25)$$

mit:

λ ... Wärmeleitfähigkeit des Wassergesättigten porösen Mediums [J/(m s K)]

Zur numerischen Lösung des Gleichungssystems (18) bis (25) wird (intern) ein Solver für gewöhnliche Differentialgleichungen (CVODE) verwendet, der als Ergebnis die Temperatur der finiten Volumina als Funktion der Zeit liefert.

Postprocessing

Zum Postprocessing werden (intern) die berechneten Temperaturen nach Rücktransformation des Modellgebietes auf die ursprünglichen Koordinaten als Isothermen dargestellt.

Jedes Volumen besitzt im Ergebnis der Berechnung zum Zeitpunkt t eine Temperatur, die dem Schwerpunkt des Volumens zugeordnet wird. Es entsteht somit ein Raster von Temperaturwerten. Jeder Rasterpunkt hat genau vier direkte Nachbarn, sofern er nicht am Rand liegt. Zwischen zwei benachbarten Rasterpunkten, d.h. auf einer Raster- oder Gitterkante, wird davon ausgegangen, dass sich der Wert des Parameters linear verhält. Zwischenwerte auf einer Gitterkante können durch lineare Interpolation berechnet werden, wie Abbildung 27 darstellt.

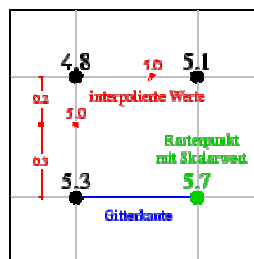


Abbildung 27: Lineare Interpolation auf Gitterkanten

Die Aufgabe des Algorithmus ist es nun, anhand vorgegebener Temperaturwerte die entsprechenden Isolinien (Isothermen) in diesem Raster zu finden. Isolinien sind Linienzüge, auf denen die Temperatur einen konstanten Wert besitzt. Man erhält sie, indem benachbarte Punkte mit gleichem Wert - Rasterpunkte oder linear interpolierte Punkte auf Gitterkanten - miteinander verbunden werden. Isolinien kreuzen sich niemals, wie man sie zum Beispiel von Höhenlinien auf Landkarten kennt. Sie werden eventuell komplett von anderen Isolinien umrundet, schneiden diese jedoch nicht. Ansätze für diese Algorithmen finden sich z.B. im Internet: Bourke, Paul: CONREC, A Contouring Subroutine
<http://www.swin.edu.au/astronomy/pbourke/projection/conrec>

Verifikation

Zur Überprüfung des Modellcodes wurden umfangreiche Vergleichsrechnungen durchgeführt. Die Überprüfung des analytischen Teils des Codes ist nicht Gegenstand der Dokumentation der Verifikation; die dort genannten Gleichungen lassen sich leicht überprüfen. Nachfolgend wird der Schwerpunkt auf die Verifikation der numerischen thermisch-hydraulischen Berechnungen gelegt. Dazu werden zwei Programmcodes herangezogen, die international für derartige Aufgabenstellungen eine breite Verwendung finden und die ihrerseits einem umfangreichen Verifikationsprozess unterzogen wurden:

TOUGH2: Transport of Unsaturated Groundwater and Heat; Lawrence Berkeley Laboratory; K. Pruess, 1987

FEFLOW: Finite Element Flow; WASY GmbH, H.-J. Diersch, 1994.

Der Leistungsumfang der beiden Programmcodes geht weit über die hier zu betrachtende Aufgabenstellung hinaus. Es lassen sich jedoch in diesen Codes bestimmte Prozesse eliminieren, die eine Vergleichbarkeit erschweren würden und gleichartige Problemstellungen berechnen. TOUGH2 basiert wie GED auf einem numerischen Finite-Volumen-

Verfahren, FEFLOW ist ein Finite-Element-Code. Für Details zu den Programmen sei auf die entsprechenden Dokumentationen verwiesen [TOUGH2, 1999], [FEFLOW, 1994].

Mit den genannten Programmen wird lediglich die Untertagesimulation verglichen. Dazu werden die gleichen Materialeigenschaften des Aquifers, Volumenströme der Förder- und Injektionsbrunnen und Injektionstemperaturen verwendet. Auf eine Darstellung der Vergleiche der hydraulischen Ergebnisse wird hier verzichtet: Eine ausreichend gute Übereinstimmung der thermischen Berechnung setzt diese implizit voraus. Da der TOUGH2-Code auf vergleichbaren numerischen Grundlagen basiert, können Vergleichsrechnungen mit der gleichen Diskretisierung durchgeführt werden. Das Finite-Element-Programm FEFLOW wird zusätzlich zum Einfluss von Diskretisierung und Dispersion herangezogen.

Definition von Testrechnungen

Nachfolgend werden drei Beispiele illustriert und interpretiert:

- 1) eine Dublette (ein Förder- und ein Injektionsbrunnen) bei hoher Grundströmung,
- 2) eine Dublette bei sehr geringer Grundströmung und
- 3) eine komplexe, irreguläre Anordnung aus je 4 Förder- und 4 Injektionsbrunnen.

energetischen Annahmen:

Die energetischen Annahmen sind hier ohne Belang und werden nur zur Vergleichbarkeit zunächst zusammengefasst:

Test 1 und Test 2:

Ein- oder Zweifamilienhaus;

Nutzenergiebedarf 23'467 kWh/a (entspräche etwa 1'860 l leichtes Heizöl pro Jahr);

Wärmeleistungsbedarf 13 kW

Wärmenutzung mit Wärmepumpe: Jahresarbeitszahl = 3.5;

mittlere Temperatursenkung: 5K;

über ein Jahr gemittelter Volumenstrom für die Grundwasserzirkulation: 0.33 m³/h bzw. 5.5 l/min

Test 3:

Gleiche Gebäudekategorie;

Nutzenenergiebedarf 40'000 kWh/a; 22 kW

Gleiche Annahme zur Wärmepumpe und Temperaturänderung wie Test1 und Test2 (gemittelter Volumenstrom für die Grundwasserzirkulation: 0.56 m³/h oder 9.4 l/min)

Hydrogeologische Verhältnisse:

gespannter Aquifer,

3m mächtig;

Porosität 30%;

Gradient der Grundwasseroberfläche 0.1m/100m

Durchlässigkeitsbeiwert k_f :

Test1: $1 \cdot 10^{-2}$ m/s

Test2: $1 \cdot 10^{-4}$ m/s

Test3: $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Diese hydraulischen Durchlässigkeiten decken das Spektrum nutzbarer Aquifere weitgehend ab und charakterisieren zusammen mit den hydraulischen Gradienten ein umfangreiches Spektrum natürlicher Fließgeschwindigkeiten.

Für die Visualisierung der Ergebnisse von GED und TOUGH2 wird zum Postprocessing zur besseren Vergleichbarkeit Tecplot Version 10.0 verwendet.

Ergebnis von Test 1

Die hohe hydraulische Durchlässigkeit ($1 \cdot 10^{-2}$ m/s) führt mit dem Gradienten von 0.1m/100m zu einer hohen Abstandsgeschwindigkeit (Darcy-Geschwindigkeit von 315 m/a). Dies macht ein extrem grosses Modellgebiet in Abstromrichtung erforderlich, um durch die Randbedingung nicht beeinflusst zu werden. GED ermittelt eine Modellgebietsgrösse von 23'600 m (in Abstromrichtung) und 250 m senkrecht dazu. Diese Konfiguration führt zusammen mit der (in dieser Version) implementierten Anzahl finiter Volumina von 2'500 auf relativ grosse Volumina in grosser Entfernung von den Brunnen.

Andererseits erlaubt die hohe natürliche Grundströmung geringe Abstände der Reinjektion vom Standort des Förderbrunnens ohne Gefahr eines thermischen Durchbruchs. GED empfiehlt einen Mindestabstand von 2 m, für die Berechnungen hier wurde ein Abstand von 5 m gewählt. Abbildung 28 zeigt einen Ausschnitt des Modellgebietes mit den Ergebnissen von GED und TOUGH2 (Temperaturverteilung nach 10 und 30 Jahren).

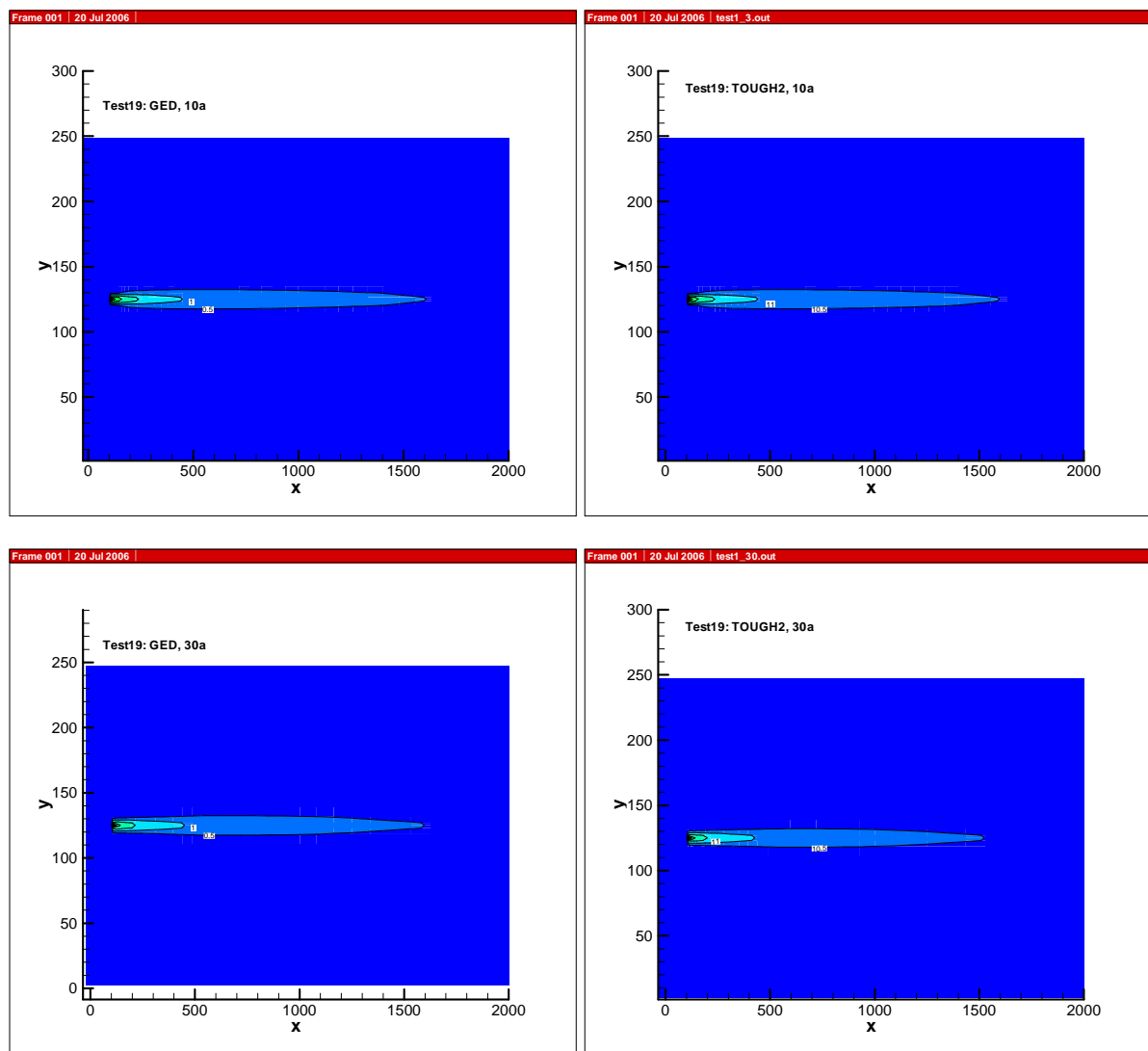


Abbildung 28: Ausschnitt der Berechnungsergebnisse, links GED, rechts TOUGH2, oben nach 10 Jahren, unten nach 30 Jahren

Die hohe Fliessgeschwindigkeit führt zu einer ausgeprägt schmalen und langen „Fahne“ in Abstromrichtung, hervorgehoben sind die 0.5K- und 1K-Isothermen⁹. Die 1K-Isotherme erreicht Abstände von ca. 300 ... 320 m vom Injektionsstandort und unterscheidet sich nur geringfügig zwischen 10 und 30 Jahren Betriebszeit.

Die genehmigungsrechtlich relevante Ausdehnung der 3K-Isotherme erreicht jedoch nur einen Abstand von 13 ... 15m vom Injektionsstandort. Die Ergebnisse der Berechnungen mit GED und TOUGH2 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung.

⁹ Die Referenztemperatur der TOUGH2-Berechnungen ist 10°C. Hier sind die 10.5°C- und 11°C-Isothermen bei einer Erwärmung um 5K hervorgehoben. Anstelle einer Auskühlung, wie sie bei der Nutzung von Heizzwecken mittels Wärmepumpe zu erwarten ist, wurde hier im Modell erwärmtes Wasser injiziert. Für die Interpretation und den Vergleich der Ergebnisse ist dies aber ohne Belang. GED berechnet die Temperaturdifferenz (daher 0.5K und 1K-Isothermen).

Ergebnis von Test 2

Test 2 betrachtet die gleiche Konfiguration und die gleichen hydrogeologischen Verhältnisse, jedoch eine 100fach geringere hydraulische Durchlässigkeit ($1 \cdot 10^{-4}$ m/s). Unter diesen Umständen ist die natürliche Grundströmung gering (Darcy-Geschwindigkeit 3 m/a). GED ermittelt (für eine 30jährige Betriebszeit) eine erforderliche Modellgrösse¹⁰ von ca. 570 m * 260 m (Vorschlag zu Abstand zwischen Förder- und Injektionsbohrung von 136 m¹¹).

Einen direkten Vergleich der Ergebnisse mit GED und TOUGH2 für zwei Simulationszeiträume (und entsprechend unterschiedlichen Modellgrössen) zeigt Abbildung 29. Im Falle einer 30jährigen Betriebszeit ist der hier gewählte Abstand von 100 m zwischen Förder- und Injektionsbohrung knapp bemessen (vgl. Vorschlag GED: 136m).

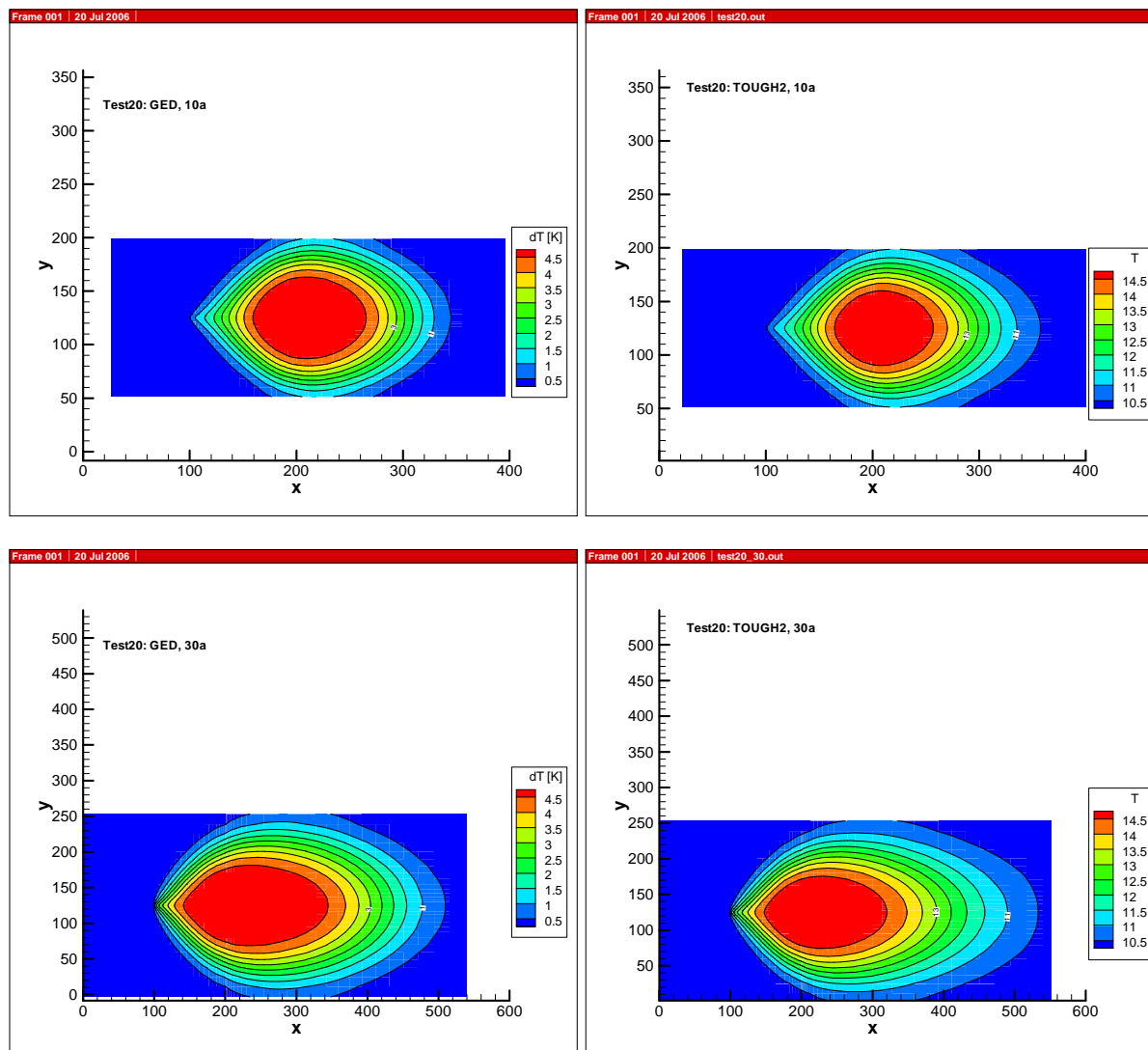


Abbildung 29: Vergleich der Berechnungsergebnisse von GED (links) und TOUGH2 (rechts) für 10 (oben) und 30 Jahre Betriebszeit (unten)

¹⁰ Die erforderliche Modellgrösse kann (bei Überwiegen der thermischen Kriterien) von der Simulationszeit abhängen. Dies ist bei diesem Beispiel der Fall.

¹¹ Dieser Vorschlag wird – unabhängig von der gewählten Simulationszeit – intern für eine 30jährige Betriebszeit berechnet.

Ein Beispiel für ein Simulationsergebnis mit FEFLOW nach 30 Jahren Betriebszeit zeigt Abbildung 30. Der FEFLOW-Simulation liegt das gleiche Modellgebiet (für 30 Jahre Betriebszeit), jedoch eine abweichende Diskretisierung und die Berücksichtigung von Dispersion zugrunde. In diesem Fall wird das Modell durch 11'684 Dreieckselemente diskretisiert. Die Dispersionslängen sind 5 m horizontal und 0.5 m vertikal.

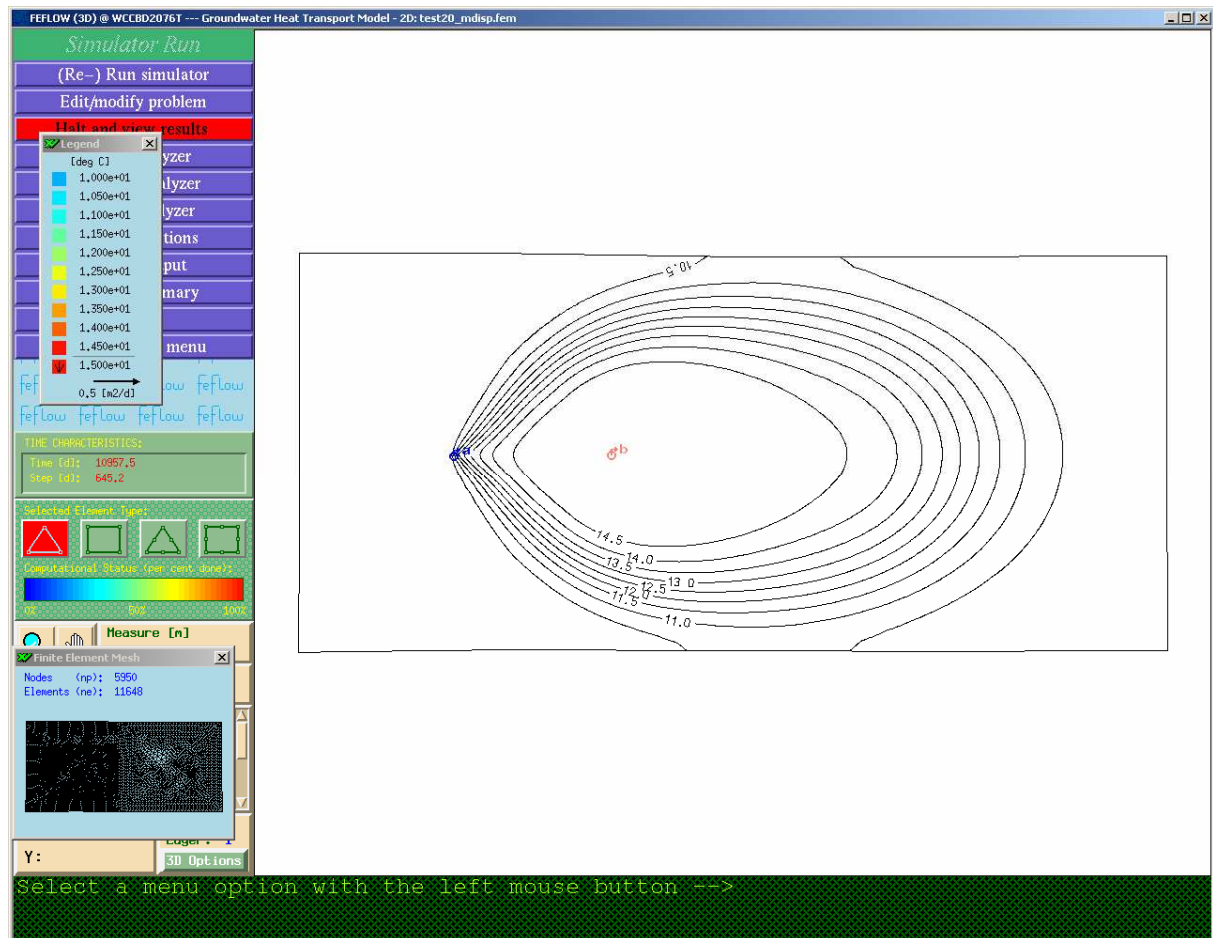


Abbildung 30: Ergebnis einer FEFLOW-Berechnung von Test 2

Entlang zweier Schnittpuren (in y-Richtung senkrecht vom Injektionsbrunnen weg und in x-Richtung horizontal entlang einer Linie durch die beiden Brunnen) zeigen sich gewisse Unterschiede in den Berechnungsergebnissen: Abbildung 31. Während die Ausbreitung der Wärme in dem Modell mit TOUGH2 generell etwas geringer ist, stimmen die Berechnungen mit FEFLOW recht gut überein. In einiger Entfernung wirken sich jedoch die Dispersion (in FEFLOW) bzw. die Nähe von Modellrändern auf die berechnete Wärmeverteilung aus. Wenn man die Dispersion in FEFLOW verringert (im Beispiel longitudinal von 5 m auf 1 m), werden die FEFLOW-Berechnungen numerisch instabil. Insgesamt sind die Abweichungen jedoch tolerierbar: in horizontaler (Abstrom-)Richtung bei einer Entfernung der 3K-Isotherme von ca. 200 m mit ca. 10 m und senkrecht dazu bei einer Entfernung von 70 m mit ca. 5 m deutlich weniger als 10 %. Bei einer derart starken thermischen Beeinflussung ist das genehmigungsrechtliche Versagensrisiko entsprechend hoch, Abweichungen im Detail somit im Sinne der Zielstellung des Programms – schnelle und prinzipielle Aussagen zu gewinnen - nur von sekundärem Interesse.

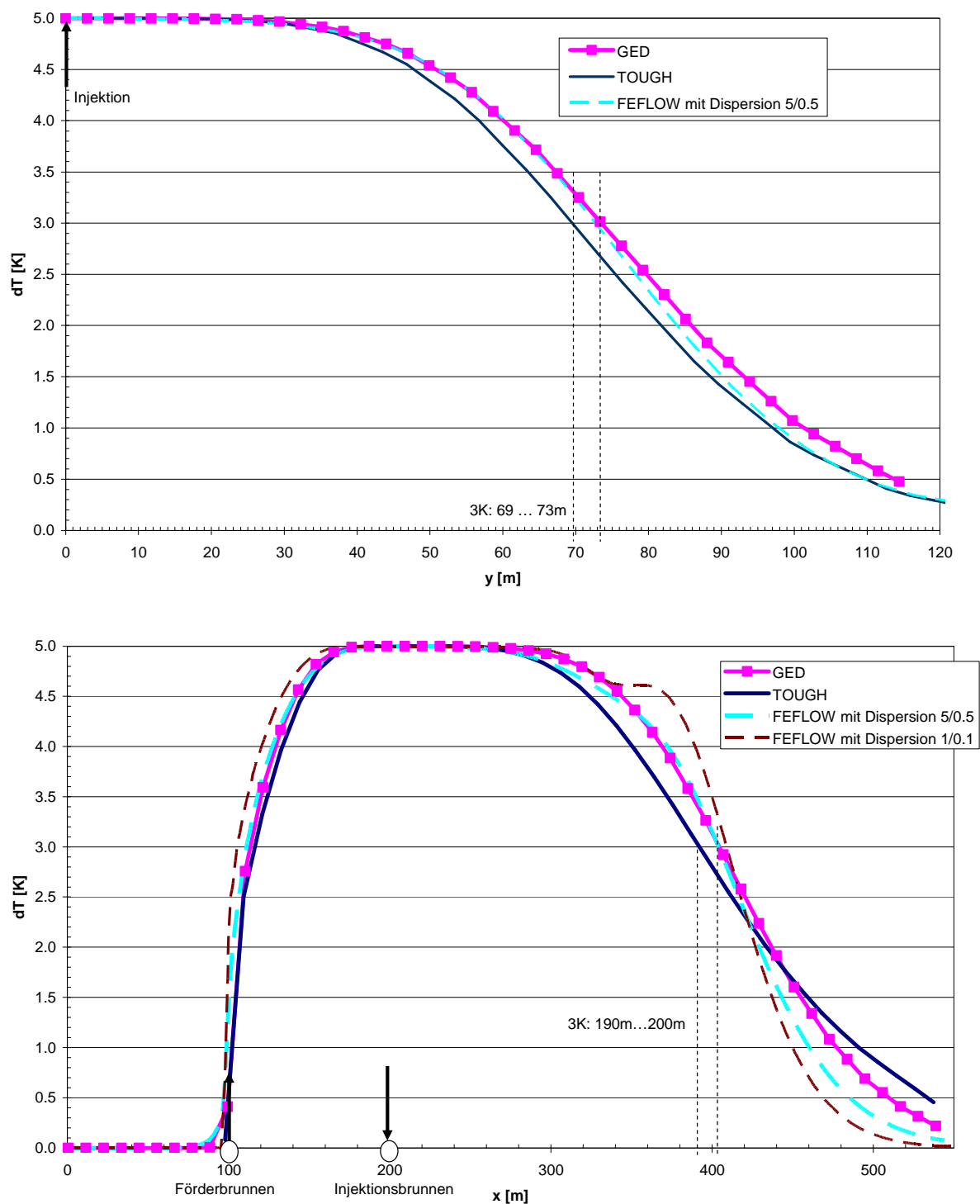


Abbildung 31: Vergleich der Berechnungsergebnisse von Test 2: GED, TOUGH und FEFLOW

Ergebnis von Test 3

Bei einer noch geringeren hydraulischen Durchlässigkeit und etwas höheren Bedarfskennzahlen sind entsprechend mehr Brunnen erforderlich, im Beispiel von Test 3 werden je 4 Förder- und Injektionsbrunnen zum Ansatz gebracht¹², die mehr oder weniger willkürlich angeordnet wurden. Das prinzipielle Layout und das Modellgebiet mit der Diskretisierung sind bereits in Abbildung 26 gezeigt worden. Jeder der 8 Brunnen fördert bzw. reinjiziert über das Jahr gemittelt $0.14 \text{ m}^3/\text{h}$ (Gesamtdurchsatz im Mittel $0.56 \text{ m}^3/\text{h}$). Den Berechnungen liegt, wie in den obigen Beispielen, eine mittlere Temperaturänderung von 5 K zugrunde. Das Ergebnis der GED-Berechnung und einer TOUGH-Berechnung nach 10 Jahren Betriebszeit (mit gleicher Diskretisierung) zeigt Abbildung 32, Abbildung 33 ein Ergebnis der FEFLOW-Modellierung mit ca. 13'000 Elementen.

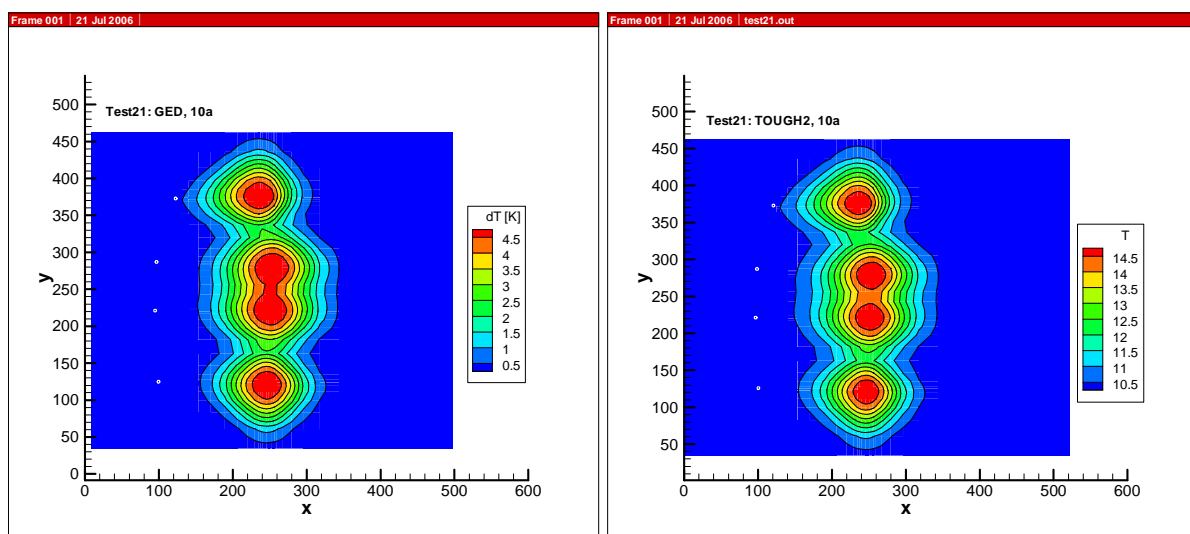


Abbildung 32: Vergleich der GED- und der TOUGH2-Berechnungsergebnisse von Test 3

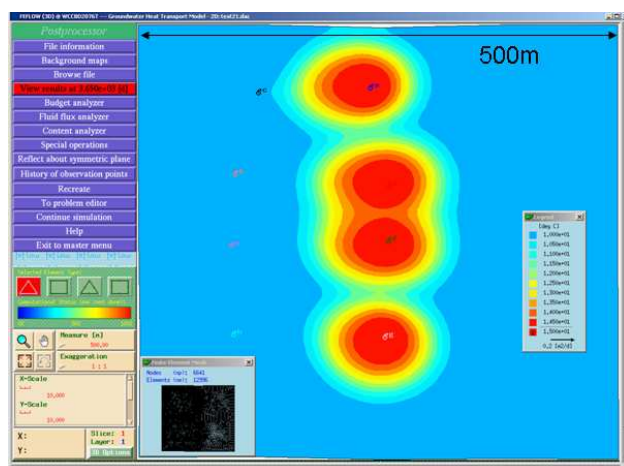


Abbildung 33: Ergebnis der FEFLOW-Berechnung (13'000 Elemente)

¹² GED würde für dieses Beispiel 5 Förderbrunnen empfehlen. Dies ist jedoch für die nachfolgenden Vergleiche ohne Belang.

Eine Erhöhung der Elementzahl in GED auf 4'485 Elemente – bei näherungsweise Verdopplung der Rechenzeit - zeigt gegenüber dem Standardbeispiel kaum Änderungen (Abbildung 34).

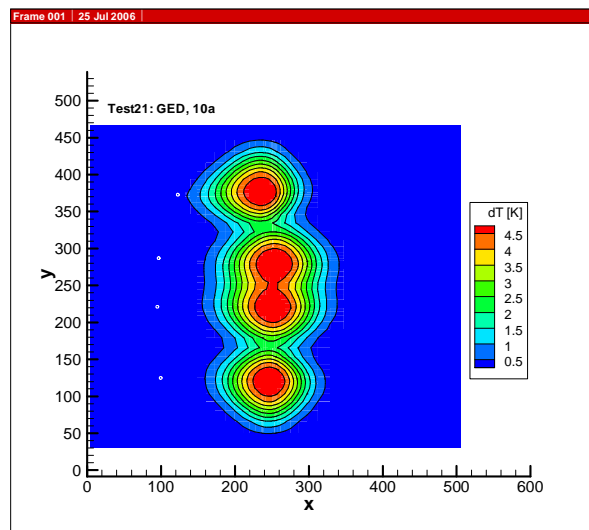


Abbildung 34: Ergebnis der GED-Berechnung bei näherungsweise Verdopplung der Elementanzahl

Der Einfluss von Dispersion (bei FEFLOW berücksichtigt, bei GED und bei TOUGH2 vernachlässigt) und Diskretisierung soll beispielhaft an einer Temperaturverteilung entlang einer horizontalen Schnittpur durch die untersten Injektions- und Förderbrunnen diskutiert werden (Abbildung 35).

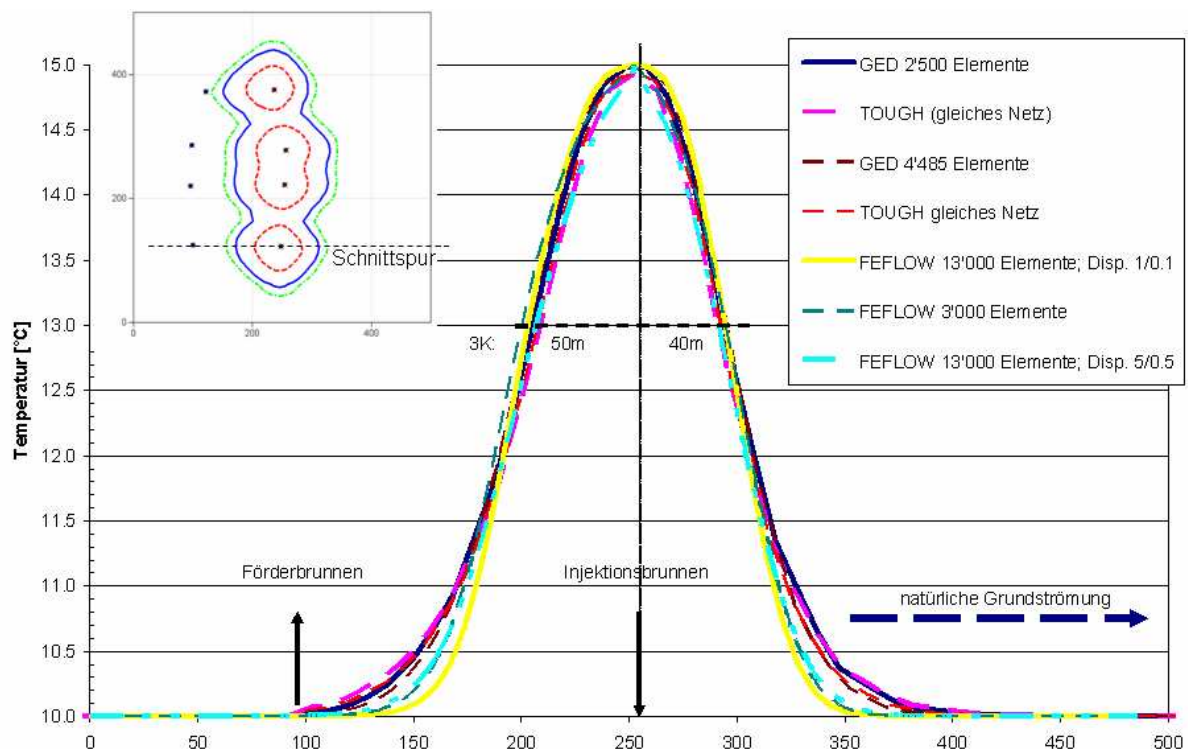


Abbildung 35: Temperaturprofil entlang der Schnittpur durch die untere Dublette

Die TOUGH2- und GED-Berechnungen ergeben bei gleicher Diskretisierung nahezu gleiche Temperaturprofile. Eine Erhöhung der Anzahl der Elemente (feinere Diskretisierung) hat in beiden Fällen nur geringe und vergleichbare Auswirkungen an der Front der „Wärmeblase“. Die FEFLOW-Berechnungen ergeben trotz Dispersion eine etwas geringere Ausdehnung der Wärmeblase, insbesondere im Frontbereich. Höhe der Dispersion (hier sind beispielhaft zwei verschiedene longitudinale Dispersionslängen von 1 m und 5 m betrachtet) haben, wie auch die im FEFLOW-Modell verwendete Diskretisierung einen relativ geringen Einfluss. Eine gröbere Diskretisierung (vergleichbar zu der im GED verwendeten) bringt in der Tendenz vergleichbare Ausdehnungen der Wärmeblase.

Bezüglich der relevanten Aussagen, Entfernung der 3K-Isotherme und „Durchbruch“ im Förderbrunnen sind auch in diesem Beispiel die Abweichungen zwischen den Modellrechnungen nicht massgebend.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

GED ist ein Auslegungstool für grundwassergekoppelte Wärmepumpen- oder Kühlanlagen mit numerischer Simulation. Entsprechend den Ansprüchen des Tools an Nutzerfreundlichkeit, Schnelligkeit und Robustheit sind Lösungsverfahren implementiert, die einerseits keine Vorkenntnisse an die Modellierung voraussetzen, andererseits auf relativ einfachen Annahmen beruhen. Diese sind im Zuge einer Vorplanung (Prüfung der prinzipiellen Machbarkeit und generellen Genehmigungsfähigkeit) gerechtfertigt und i.d.R. ausreichend.

Das Simulationstool GED ersetzt nicht Grundwassermodelle hoher Komplexität, wie sie bei grösseren Anlagen und / oder bei genehmigungsrechtlich sensiblen Problemstellungen erforderlich sind. Es erlaubt jedoch dem Planer solcher Anlagen, ohne tief greifende Kenntnisse der Modellierung von Strömung und Wärmetransport in Aquiferen schnell Aussagen zur Machbarkeit und ggf. zur Optimierung von Anlagen zu treffen. Dabei stellt die Integration eines – für den Nutzer „automatischen“ – numerischen Simulators ein Novum dar.

Die Berechnungsgrundlagen und die im Programm intern verwendeten Daten und Datensätze sind nachvollziehbar aufgezeigt und erlauben dem Benutzer des Programms, Voraussetzungen und Grenzen des Programms einschätzen zu können. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für eine transparente und nachvollziehbare Wertung der mit diesem Programm gewonnenen Berechnungsergebnisse und Empfehlungen hinsichtlich der Planung von Anlagen mit energetischer Nutzung von Grundwässern.

Die Programmentwicklung wurde abgeschlossen. Der numerische Teil des Programms (interner Simulator) stellt keinerlei Voraussetzungen an die Kenntnisse der Modellierung durch den Nutzer und ist an international anerkannten Programmen verifiziert worden. Vergleichsrechnungen mit dem Grundwassersimulationsprogramm FEFLOW und TOUGH2 zeigten für die Druck- und Temperaturberechnungen im Aquifer Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse, die für den Zweck und das Anliegen des Tools durchaus angemessen und ausreichend sind.

Das Finite-Volumen-Verfahren selbst ist ohne grössere Eingriffe auch auf instationäre Lastfälle (Jahresganglinien) oder quasi-3D-Verhältnisse, zur Berücksichtigung des Wärmeaustauschs mit den Deckschichten des Grundwasserleiters, erweiterbar.

Literatur

- BUWAL, 2004: Wegleitung Grundwasserschutz, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- CVODE Solver, 2004: Nonlinear Solver and Differential Equations Project, Center for Applied Scientific Computing, Lawrence Livermore National Laboratory
- FEFLOW FEFOLW, Finit4e Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, Reference Manual, 1994
- Hölting, B., 1995: Hydrogeologie, 5edn, Spektrum Akademischer Verlag, Stuttgart
- SIA Empfehlung 380/1: Norm SIA 380/1 „Thermische Energie im Hochbau“, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2001
- Sichardt, W., 1928: Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für grössere Absenkungstiefen. Springer-Verlag, Berlin
- Stauffer., F., 1983): Thermische Ausbreitung im Grundwasserleiter, Schweizer Ingenieur und Architekt 23(1983) 633-638
- TOUGH User's Guide, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-20700, 1987
- TOUGH2 TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-43134, 1999
- Wärmeentzug aus öffentlichen Gewässern, Kurzbericht: Wärmebilanz Grundwasser Hasle – Burgdorf, Leitung: Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern (WEA), 1989
- Wärmeentzug aus öffentlichen Gewässern, Bericht: Thermoprogramm Grundwasser, Leitung: Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern (WEA), 1992
- Wärmenutzung von oberflächennahen Grundwasservorkommen, Aspekte der Auswirkungen von Kaltwasserversickerungen, Schweizerische Geologische Gesellschaft, 1985

ANHANG A: Manuel de l'utilisateur

Objectifs du logiciel

L'exploitation thermique directe de l'eau de nappe au moyen de pompes à chaleur, que ce soit pour le chauffage ou pour le rafraîchissement, présente des avantages énergétiques et économiques par rapport au captage de l'énergie du sol par conduction thermique au moyen de sondes géothermiques. La condition préalable à l'exploitation directe est, en complément de la condition de disponibilité d'eau de la nappe, celle d'un impact thermique limité sur l'aquifère, nécessaire à l'obtention d'une autorisation.

La réinjection de l'eau exploitée thermiquement permet de conserver le bilan hydrique global et de ce fait ménager la ressource aquifère. Pour ce qui est de l'agencement des installations de réinjection, deux aspects sont à prendre en considération:

- Garantie d'une distance suffisante entre puits de pompage et d'injection afin d'éviter une recirculation de l'eau exploitée (court-circuit thermique) et
- Éviter un impact thermique d'envergure sur la nappe.

En ce qui concerne le deuxième aspect, l'OFEV (Office fédéral de l'environnement, Suisse) a émis une recommandation qui spécifie que la variation de température de la nappe due à la réinfiltration ne doit pas différer de plus de 3°K de celle de la nappe, dans un périmètre maximal de 100 m autour de l'installation (OFEV, 2004). Cet aspect est important en particulier dans les nappes des vallées à fortes perméabilités et aux vitesses de transfert qui peuvent être très élevées.

Le logiciel de simulation (GED) a été développé pour agencer de façon optimale des puits de pompage et de réinjection dans les conditions spécifiques de sites. Cet outil procure une aide à la décision pour les concepteurs (entre autres: techniciens chauffagistes, conseillers en énergie, techniciens de forage, administrations) en ce qui concerne la réinjection d'eaux exploitée thermiquement. Dans l'esprit d'un avant-projet, des hypothèses simplificatrices sont retenues. En particulier, l'écoulement et le transfert de chaleur transitoires en nappe sont calculés sur la base de paramètres homogènes. Les variations saisonales et les effets tridimensionnels sont négligés. Cet outil doit permettre d'évaluer la faisabilité d'une exploitation de l'aquifère et les chances d'obtenir l'autorisation d'un pompage/réinjection d'eau exploitée thermiquement ou encore, par variation de l'agencement entre puits de pompes et d'injection, d'optimiser la configuration sur le site d'implantation considéré.

A cette fin, le logiciel GED réunit des boîtes de dialogues interactives qui permettent la détermination des besoins en eau de nappe ainsi que le dimensionnement des pompes, et un logiciel de simulation d'écoulement et du transfert de chaleur sur la base des volumes finis. Pour ce dernier, les pré- et posttraitements sont incorporés dans une interface graphique. La structure simplifiée du logiciel est présentée en Figure 1. Le pilotage au travers du programme se fait par menus en cascades.

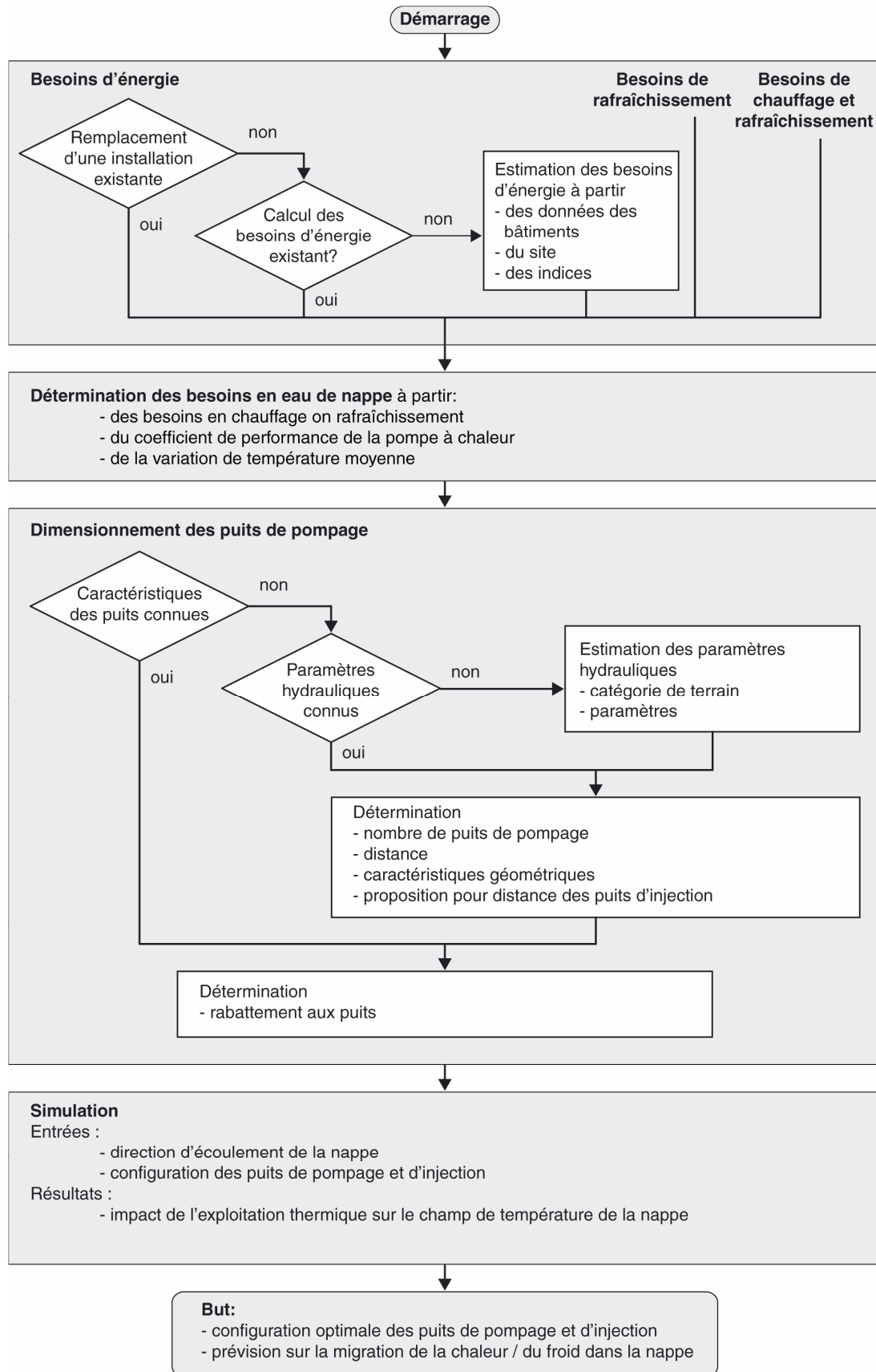


Figure 1: Structure simplifiée du logiciel GED

Délimitation du périmètre fonctionnel du logiciel

Le thème de la simulation du transfert de masse et de chaleur a été traité de longue date dans le domaine de l'ingénierie de l'exploitation de réservoirs géothermaux (cf. Workshops annuels du programme géothermie à Stanford, Californie). Les modèles et logiciels couvrent une large palette de processus physiques à considérer et s'étendent depuis les solutions analytiques jusqu'aux programmes numériques complexes.

En Suisse, des simulations de l'exploitation thermique des nappes superficielles ont été effectuées dans les années 80 et 90. Citons pour mémoire, les solutions analytiques pour le transfert unidimensionnel de Stauffer (1983), les estimations analytiques des zones d'emprise hydraulique des pompages et injections de Mehlhorn et Nemecek (SGG 1985) et les calculs effectués dans le cadre du projet « captage de chaleur des cours d'eau publics » sous la direction du WEA Bern 1989 et 1992.

La simulation du transfert de chaleur dans la nappe telle qu'elle est mise en œuvre dans le logiciel GED, prend en compte de manière très simplifiée les conditions hydrogéologiques spécifiques. Ceci se justifie dans l'optique d'un avant-projet et pour des installations de pompes à chaleur sur eau de nappe de faible à moyenne taille. Le logiciel est également destiné aux non-spécialistes qui peuvent faire fonctionner l'application à partir d'un minimum de données hydrogéologiques. Pour des installations de taille supérieure, des modèles hydrodynamiques plus sophistiqués, prenant en compte l'hydrogéologie de façon plus détaillée (tridimensionalité, paramètres hétérogènes, effets transitoires saisonniers, etc.), sont nécessaires.

L'outil de dimensionnement présenté ici ne prend en considération ni les caractéristiques techniques des installations de surface (échangeur de chaleur et pompe à chaleur) ni les besoins détaillés en chauffage et rafraîchissement de l'utilisateur. Seules des valeurs moyennes des besoins en énergie (chauffage/rafraîchissement) de l'utilisateur sont prises en compte.

Des outils semblables à GED existent pour des systèmes fermés, tels que les sondes géothermiques (entre autres les logiciels Earth Energy Designer et Erdwärmesonde) ainsi que les pieux échangeurs (PILESIM); Nous n'avons pas connaissance d'outils semblables pour des systèmes ouverts (utilisation directe de l'eau de nappe).

Description du logiciel

Démarrage de l'application

L'exécutable du logiciel se trouve dans le sous-répertoire « bin » du répertoire que vous avez choisi pour stocker les fichiers du logiciel. Le logiciel se démarre par double-clic sur l'exécutable (*ged.exe*).

Lors du premier démarrage du logiciel, le numéro d'identification de votre ordinateur sera automatiquement déterminé par GED. C'est sur la base de ce numéro que la licence d'utilisateur vous sera attribuée. Si vous envoyez ce numéro d'identification, vous recevrez en retour une clé chiffrée vous permettant d'utiliser le logiciel. Veuillez svp. adresser votre Mail

à:
ge-dev@colenco.ch

Lors du second démarrage du logiciel et après que vous ayez obtenus la clé, nous vous prions de l'entrer dans le champ réservé à cet effet, situé sous celle du numéro d'identification. Pour ce faire, vous pouvez copier la clé chiffrée du mail que vous recevrez (en général en la sélectionnant et appuyant sur *Crtl-C*) et ensuite en amenant la souris sur la fenêtre GED, insérer la clé en appuyant sur *Crtl-V* dans le champ réservé à cet effet.



Figure 2: Fenêtre de démarrage du logiciel

A chaque démarrage ultérieur du logiciel, une fenêtre qui rappelle les fonctionnalités et les limites du logiciel apparaît au centre de l'écran, cf. Abbildung 2. En appuyant sur le bouton « nouveau » (gauche) ou « ouvrir » (droite) vous accéderez directement soit à un nouveau projet soit à un projet précédemment sauvegardé que vous désirez éditer.

Fenêtre principale

La fenêtre principale du programme offre la possibilité d'ouvrir le projet, de le sauvegarder et de l'éditer. En ce qui concerne la navigation, il existe, comme c'est le cas fréquemment dans les applications Windows, différentes alternatives (utilisation de barre de menu horizontale ou verticale; raccourcis par combinaison de touches du clavier, etc.). Une navigation aisée à travers le logiciel se fait par utilisation de la barre horizontale du menu situé en haut de la fenêtre.

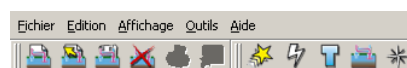













Figure 3: Barre Menu

La barre menu comprend de gauche à droite les rubriques suivantes:

- ouverture d'un nouveau projet ,
- ouverture d'un projet préalablement sauvegardé ,
- sauvegarde d'un projet , fermeture d'un projet ,
- impression des sorties graphiques du logiciel ,
- sauvegarde de la sortie graphique du logiciel dans un fichier image ,
- ouverture de la rubrique « paramètres généraux du projet » ,
- Ouverture de la boîte de dialogue « besoins d'énergie » ,
- Ouverture de la boîte de dialogue « puits » ,

- ouverture de la boîte de dialogue « graphique »  et
- ouverture de la boîte de dialogue « calculs » .

Si vous maintenez la souris sur l'un des icônes de la barre menu, un texte d'aide apparaîtra dans une bulle du coin en bas à gauche de l'icône.

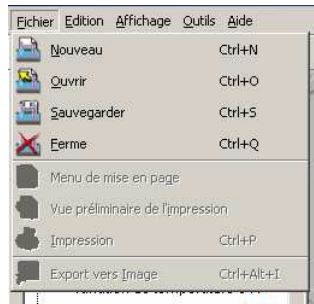


Figure 4: Rubrique – Fichier

La rubrique-Fichier (Abbildung 4) permet d'accéder aux opérations suivantes :

- Création d'un nouveau projet (Nouveau),
- Ouverture d'un projet précédemment sauvegardé (Ouvrir),
- Sauvegarde d'un projet (Sauvegarder),
- Fermeture de l'ensemble du logiciel (Fermer),
- Mise en page de la page à imprimer (Menu de mise en page),
- Vue préliminaire à l'impression,
- Impression et export d'un fichier image (Export vers Image).

L'accès à certaines fonctions peut également se faire par des raccourcis en utilisant une combinaison de touches, à savoir :

- Nouveau Ctrl+N,
- Ouvrir Ctrl+O,
- Sauvegarder Ctrl+S,
- Fermer Ctrl+Q,
- Imprimer Ctrl+P et
- exporter Ctrl+Alt+I.

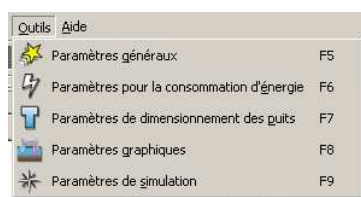


Figure 5: Rubrique - Outils

La rubrique Outils (Abbildung 5) permet l'accès à toutes les boîtes de dialogue du projet:

- paramètres généraux
- paramètres de consommation d'énergie
- paramètres de dimensionnement des puits
- paramètres graphiques
- paramètres de simulation

L'accès rapide aux boîtes de dialogue peut également se faire par utilisation de raccourcis, à savoir:

- F5 paramètres généraux,
- F6 paramètres de consommation d'énergie,
- F7 paramètres de dimensionnement des puits,
- F8 paramètres graphiques et
- F9 paramètres de simulation.

La rubrique Aide permet d'accéder à l'aide en ligne et aux informations générales sur le logiciel. On peut également accéder à la rubrique Aide par la touche F1.

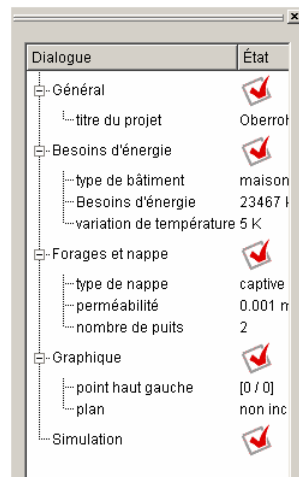




Figure 6: Fenêtre propriétés

Dans la partie gauche de la fenêtre principale, il apparaît un résumé du projet (Abbildung 6). A l'aide de cette vue d'ensemble, l'utilisateur voit facilement dans quel projet il se situe et quelles entrées sont déjà enregistrées. L'état des entrées est représenté par deux symboles :

- Lorsque les paramètres n'ont pas tous été saisis, le symbole  est affiché.
- Lorsque tous les paramètres ont été saisis et enregistrés/validés, le symbole  est affiché.

Par double-clic sur les termes de la colonne de gauche, vous accéderez directement à la boîte de dialogue associée. Exemple : un double-clic sur « Forages et nappe » vous fait accéder à la boîte de dialogue du dimensionnement des puits, etc. Un simple clic sur le signe + ou – vous permet de faire apparaître ou disparaître les entrées. La fenêtre « propriétés » peut être fermée à tout moment. Afin de la rouvrir, cliquez sur le bouton droit de la souris lorsque le curseur de la souris se trouve sur la barre menu de la fenêtre principale et sélectionnez la fenêtre propriété dans le menu à disposition cf. Figure 7.

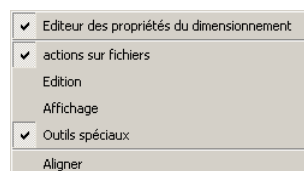


Figure 7: Fenêtre propriétés

La partie droite de la fenêtre principale est tout d'abord vide. Dans la suite des opérations, cette partie de la fenêtre est utilisée pour une représentation graphique des résultats.

Boîte de dialogue « paramètres principaux »

La boîte de dialogue « paramètres principaux » comprend deux pages successives. La première page comprend les informations sur l'utilisateur et la deuxième celles sur le projet.

The screenshot shows a Windows-style dialog box titled 'information générale' with a standard icon and window controls. The main title bar is blue. Below the title bar, the text 'définition de l'utilisateur' is displayed. The form contains two main sections: 'utilisateur du programme' and 'adresse'. The 'utilisateur du programme' section has a 'nom' field with the text 'Colenco Power Engineering AG'. The 'adresse' section has three fields: 'rue' with 'Tafelstr. 26', 'cedex' with '5405', and 'localité' with 'Baden'. At the bottom of the dialog, there are three buttons: '< Précédent', 'Suivant >', and 'Annuler'.

Figure 8: informations sur l'utilisateur

La première page (Abbildung 8) doit être renseignée par le nom de l'utilisateur et son adresse. Cette dernière est utilisée dans la présentation graphique des résultats, pour indiquer l'utilisateur du logiciel sur la sortie graphique.

The screenshot shows the same 'information générale' dialog box, but the main title bar is now grey and the text is 'définition du projet'. The form contains three sections: 'projet', 'adresse', and 'description'. The 'projet' section has a 'nom' field with the text 'Oberrohrdorf, Mayer'. The 'adresse' section has three fields: 'rue' with 'Weidenweg 10', 'cedex' with '5867', and 'localité' with 'Hasel'. The 'description' section has a text area with the text 'mal sehen, was kommt'. At the bottom of the dialog, there are three buttons: '< Précédent', 'Terminer', and 'Annuler'.

Figure 9: Informations sur le projet

La deuxième page (Abbildung 9) comporte les informations relatives au projet qui sont conçues pour votre gestion personnelle. Dénomination du projet, ce dernier est le nom de fichier proposé par défaut lors de la sauvegarde du projet, l'adresse du site d'implantation à l'étude et un champ « description » permettant une brève description du projet.

L'adresse du site apparaît dans la représentation graphique des résultats dans le coin gauche du cartouche du dessin technique des résultats au format A4. Une édition postérieure dans le graphique lui-même est possible, mais ces modifications ultérieures ne seront pas sauvegardées dans le projet.

Boîtes de dialogue pour la détermination du besoin d'énergie

La première étape du dimensionnement est constituée par la saisie des besoins en chauffage ou en rafraîchissement de l'immeuble considéré. Il est fait la distinction entre :

- le remplacement d'un système de chauffage préalablement existant - et pour lequel des données de consommation existent-,
- la conception d'une nouvelle l'installation de chauffage
- la conception d'une installation de rafraîchissement direct ou d'une installation combinée de rafraîchissement et de chauffage.

Que ce soit dans le cas d'une nouvelle conception ou d'un remplacement d'un système existant, le type de catégorie de bâtiment est fixée à cette étape par l'intermédiaire d'une liste à choix.

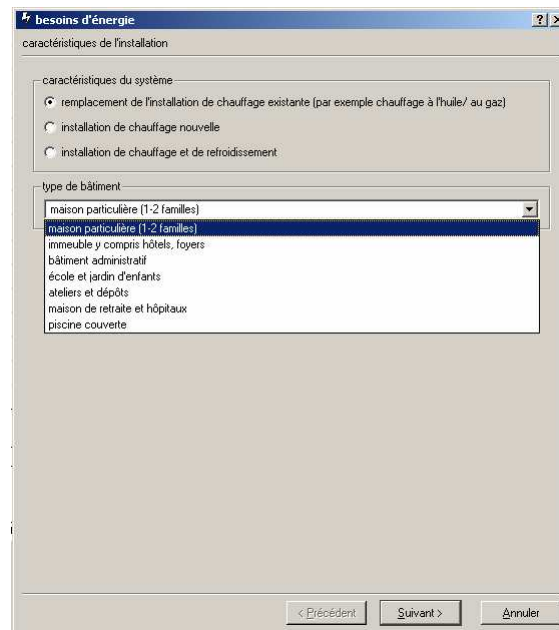


Figure 10: Descriptif de l'installation

Dans le cas du remplacement d'un système de chauffage existant, la consommation d'énergie de chauffage est en général connue. L'utilisateur entre la consommation annuelle en fioul, gaz naturel ou électricité.

Dans le cas d'une nouvelle installation, et en l'absence de calcul des besoins par l'architecte ou le technicien chauffagiste, une estimation peut être effectuée sur la base d'indices de dépense d'énergie (SIA –Recommandation 380/1¹³) pour différents types d'utilisation des

¹³ Le logiciel utilise les indices de la recommandation SIA 380/1 de 1988. Ces derniers ne prennent pas en compte le rapport, spécifique au bâtiment, de la surface pondérée thermiquement de l'enveloppe et de la surface de référence énergétique (A/EBF) dont le calcul nous apparaît trop compliqué dans ce cadre et donc non-adapté à la finalité. L'utilisateur de cette option doit être conscient du fait que lorsque cette hypothèse simplificatrice est faite –sans l'utilisation de valeurs seuils actuelles de la SIA- le besoin de chaleur d'une construction neuve sera surestimé, et ce faisant également le débit d'eau de pompage de la nappe nécessaire.

bâtiments et de surfaces de référence énergétique. Le logiciel requiert de l'utilisateur la surface de référence énergétique ainsi qu'une localité suisse proche. L'estimation des besoins en énergie prend en compte les paramètres pour la mise à disposition d'eau chaude, si la case correspondante est cochée.

Le besoin de chaleur estimé est pris en compte de manière interne au logiciel en considération des caractéristiques propres au site d'implantation. Ceci est réalisé sur la base de moyennes pluriannuelles de degré-jours de chauffage pour 58 localités en Suisse. Pour ce faire, l'utilisateur choisira le lieu le plus proche du site d'implantation considéré.

Figure 11: Entrées sur la pompe à chaleur

Les dernières entrées sur les systèmes de chauffage portent sur les pompes à chaleur:

- le coefficient de performance de la pompe à chaleur (valeur standard proposée par défaut: 3.5) et
- la variation de température de la nappe considérée, moyennée sur l'année. Valeur proposée par défaut : 3 à 5 K.

Le besoin moyen annuel en eau de nappe est calculé sur la base: du besoin d'énergie pour chauffage connu ou estimé, du coefficient de performance de la pompe à chaleur et de la variation de température de l'eau pompée de la nappe. Le besoin en eau de nappe maximum en pointe est calculé sur la base du nombre d'heures à pleine charge, qui correspond à la catégorie de bâtiment retenu (calcul interne au logiciel). Ces débits sont calculés et exprimés en m³/h et l/min.

Figure 12:Rafraîchissement / installations combinées

Le calcul des débits nécessaires, en ce qui concerne les installations à rafraîchissement direct ou les installations combinées chauffage/rafraîchissement, se fait sur la base de paramètres/indices du domaine des procédés thermiques.

Les entrées requises pour le rafraîchissement direct sont:

- le besoin en rafraîchissement par an,
- le nombre d'heures pleine charge ou la puissance de rafraîchissement exigée,
- et l'augmentation moyenne cible de température de l'eau de la nappe due au rafraîchissement.

Pour des installations combinées avec chauffage, le logiciel requiert les entrées supplémentaires suivantes :

- le besoin en chauffage par an,
- le nombre d'heures pleine charge ou la puissance de chauffage exigée,
- le coefficient de performance de la pompe à chaleur
- et la diminution moyenne cible de température de l'eau de la nappe due au chauffage.

Le bilan énergétique annuel de l'impact sur la nappe est calculé pour les installations combinées de façon interne au logiciel. Le calcul des rabattements et du dimensionnement des puits est fait sur la base du cas de charge le plus important.

Boîte de dialogue pour le dimensionnement des puits

Le dimensionnement des puits de pompage nécessite l'entrée de données hydrogéologiques. En plus de la perméabilité (conductivité hydraulique) et de la cote sous sol de la surface piézométrique, il faut entrer la puissance (épaisseur) de la nappe, dans le cas d'une nappe captive ou le mur de la nappe pour une nappe phréatique (en m sous surface du sol).

Les calculs d'écoulement et de transfert nécessitent l'entrée des données de porosité et du gradient de charge hydraulique (en m/100m). Cette dernière peut en général être obtenue sur les cartes d'isopièzes, disponibles aux offices de l'environnement.

Figure 13: Nappe

En l'absence de données spécifiques au site, la perméabilité et la porosité sont choisies de manière interne au logiciel, par catégorie de terrains (gravier, sables...). Il faut cependant souligner que ces données ne permettent qu'une détermination très grossière des dimensions des puits, car elles ne sont que très peu précises.

Le calcul du nombre de puits ainsi que de leur dimension repose sur des solutions analytiques de débit/rabattement d'un puits. Il repose sur les paramètres hydrogéologiques, le débit moyen nécessaire en pleine charge et les données spécifiques de crépines à fentes de 1 mm, pour des diamètres usuels dans les sédiments meubles compris entre 35 et 200 mm.

Le calcul du diamètre de la crépine ne prend en compte que les exigences hydrauliques sans autres aspects techniques, comme par exemple les possibilités/exigences en matière de la mise en place de pompes submergées.

Dans le cas de plusieurs puits – pris avec les mêmes caractéristiques de pompage –, les distances entre puits sont calculées de telle sorte qu'il n'y ait pas d'influence hydraulique entre eux. Le nombre de puits et ses caractéristiques géométriques peuvent également être entrés puis vérifiés par le logiciel. Cette option peut également être utilisée pour faire une étude de sensibilité des paramètres des puits pour la simulation numérique. Si les données entrées ne suffisent pas pour remplir les besoins spécifiés, le logiciel propose un nombre de puits nécessaires ainsi que les dimensions géométriques.

En résultat des calculs obtenus à partir des paramètres hydrogéologiques et du besoin en eau spécifié, les éléments de dimensionnement suivants sont fournis:

- Nombre de puits de pompage requis
- Distance minimale garantissant leur non-interaction hydraulique (cas où le nombre de puits de pompage est supérieur à 1)

- Longueur minimale de la crépine
- Diamètre minimal de la/ des crépines et du puits et
- Rabattement maximum attendu pour cette configuration.

Boîte de dialogue graphique

The screenshot shows a window titled "dialogue graphique" with a sub-header "plan". It contains several input fields and radio buttons for configuring a plan. The "coin gauche" (top left corner) is defined by x and y coordinates, both set to 0, with a label "coordonnées suisses" to the right. Below this, there are two options: "extension horizontale" (radio button) set to 1000 m, and "échelle du plan" (radio button, selected) set to 1 : 5000. At the bottom, there are four buttons: "Aide", "< Précédent", "Suivant >", and "Annuler".

Figure 14: Mise en page du plan

Cette boîte de dialogue sert à la mise en page du plan pour les interactions graphiques et la présentation des résultats. Tout d'abord, les coordonnées pour le coin bas gauche du plan est saisi, soit en entrant les coordonnées suisse ou par l'entrée de 0,0. L'extension du plan est fixée soit en la fournissant suivant l'axe des abscisses soit en fournissant une échelle.

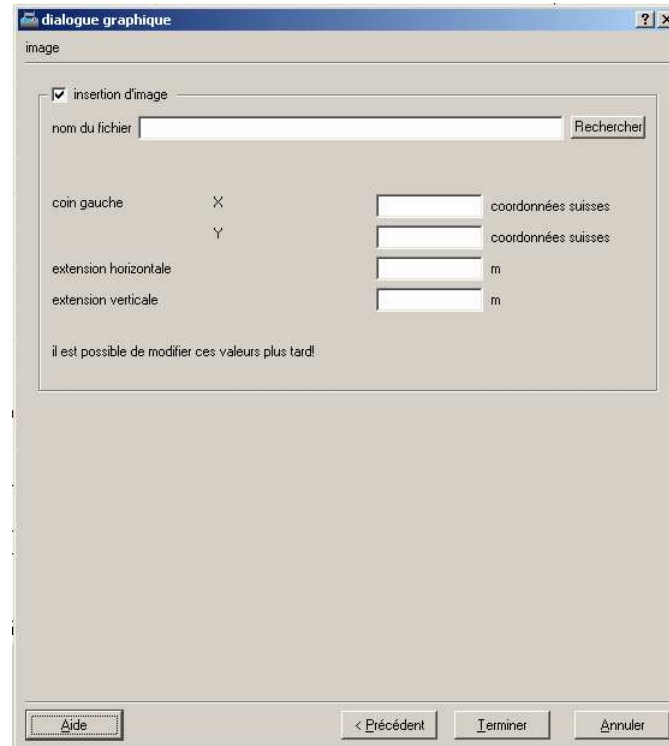


Figure 15: Insertion d'une image de carte

Dans la fenêtre suivante de la boîte de dialogue, il est possible d'insérer une image comme fond de carte. Pour cela, il est nécessaire de nommer le fichier correspondant à l'image et de positionner l'image. L'entrée du nom de fichier se fait par sélection dans un répertoire (cf. Figure 16).

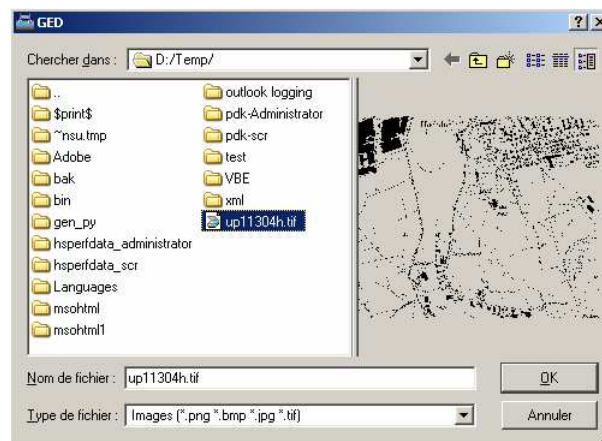


Figure 16: recherche du fichier

Pour la recherche du fichier, le contenu du fichier est pré-visionné à l'écran. Les formats image qui peuvent être insérés sont Bitmap (*.bmp), Portable Network Graphic (*.png), JPEG (*.jpg) et TIFF (*.tif). En ce qui concerne l'image importée, il faudra s'assurer du fait que le fragment d'image de fond de carte ne contienne que la partie nécessaire (quelques 100 à 1000 mètres) car les fichiers images trop volumineux ralentissent fortement l'exécution du programme, l'affichage nécessitant une forte puissance de calcul. Au cas où le plan de détail de l'installation ne correspond qu'à une partie trop faible de l'image de fond de carte, cette dernière est ignorée et n'est pas affichée. Le positionnement de l'image de fond se fait par l'entrée des coordonnées du coin bas gauche de l'image et de l'extension en X (largeur) et en Y (hauteur).

Un positionnement précis de l'image est encore possible à un point ultérieur du logiciel, dans l'édition du projet. Les corrections de positionnement et d'extension sont alors enregistrées et sauvegardées dans les paramètres spécifiques du projet.

Boîte de dialogue du calcul

Une fois tous les paramètres à disposition, le calcul de l'écoulement et du transfert de chaleur dans la nappe peut être effectué. Ceci se fait sur la base des valeurs moyennes annuelles des besoins en eau de nappe.

Le positionnement des forages sur le plan de situation, la détermination de la direction d'écoulement de la nappe et la représentation graphique des résultats sont effectués de manière interactive sur une interface spécifique (fenêtre « graphique »). Cette dernière est ouverte dans la fenêtre principale, et une barre de menu supplémentaire est ouverte pour les entrées supplémentaires. C'est dans cette fenêtre que sont positionnés les puits et la direction d'écoulement.

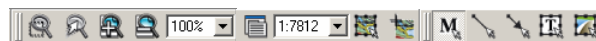
















Figure 17: Extension de la barre de menu de la fenêtre principale

La barre de menu de la fenêtre principale est étendue aux fonctionnalités suivantes:

- Zoom des objets graphiques ,
- choix automatique du facteur de zoom d'objets graphiques ,
- Agrandissement ou rapetissement de la vue de la feuille  ,
- entrée manuelle du facteur de zoom de la feuille ,
- Liste des éléments graphiques et un éditeur des propriétés des éléments graphiques ,
- entrée manuelle de l'échelle de la carte ,
- insertion de l'image de fond de plan ,
- positionnement de l'image de fond de carte par curseur ,
- sélection des objets graphiques ,
- tracé d'une ligne ,
- tracé d'une flèche ,
- insertion d'un texte  et
- insertion d'un graphique d'un fichier .

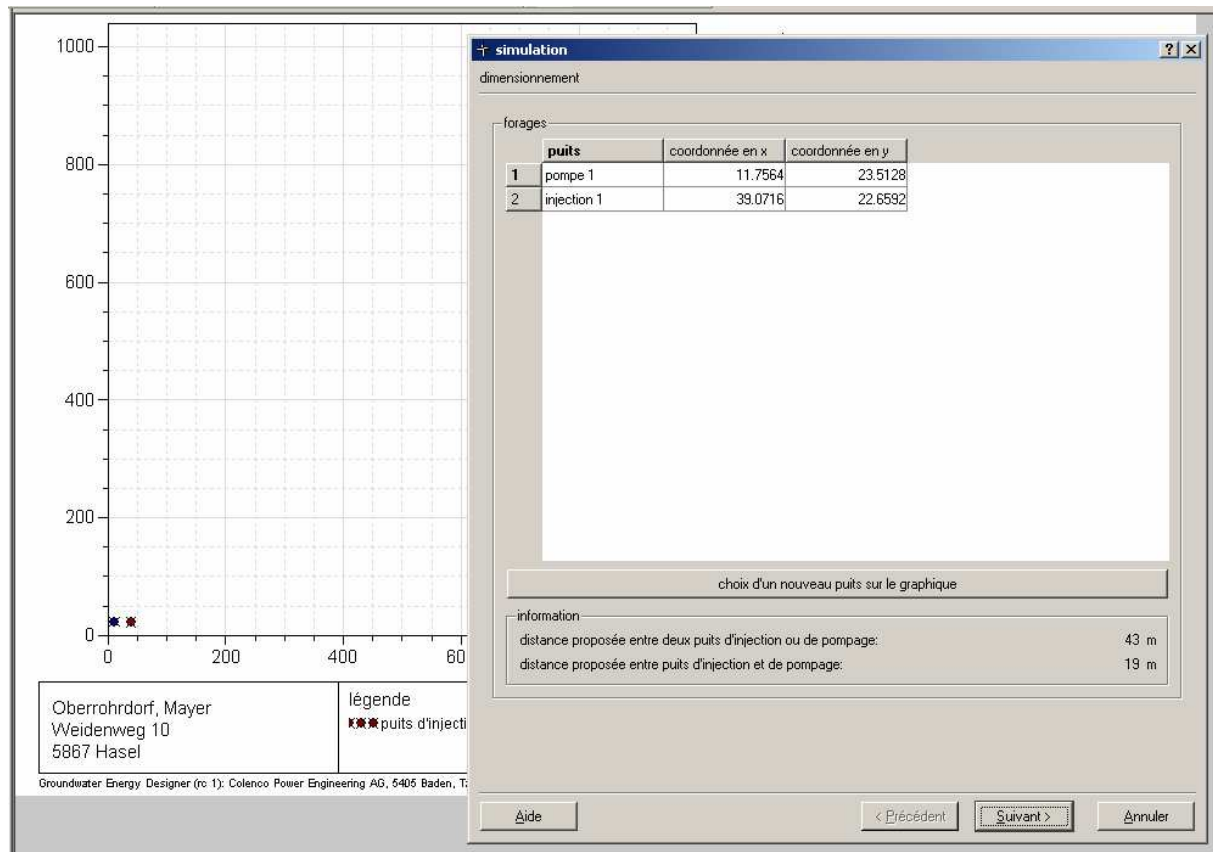


Figure 18: Positionnement des puits

La sélection de la position des puits peut être réalisée par 2 façons différentes: d'une part par entrée directe des coordonnées dans le tableau des positions des puits ou d'autre part par simple clic de la souris sur le graphique.

Afin de sélectionner la position du puits sur le graphique, il vous faudra au préalable sélectionner le puits par un simple clic sur le bord gauche du tableau (Abbildung 19)

forages			
	puits	coordonnée en x	coordonnée en y
1	pompe 1	11.7564	23.5128
2	injection 1	39.0716	22.6592

Figure 19: Sélection d'un puits

Une fois le puits sélectionné, cliquez sur le bouton placé sous le tableau: « choix d'un nouveau puits sur le graphique ». La boîte de dialogue s'efface et la fenêtre principale est visible. Avancez le curseur de la souris à la position du puits souhaitée et cliquez sur le graphique. La boîte de dialogue s'affichera à nouveau et les coordonnées du puits sélectionné seront transformées en celles de la position du curseur au moment du clic.

Le logiciel émet une recommandation quant à la distance minimale entre puits de pompage et d'injection (sur la base d'un calcul analytique du transfert thermique pendant 30 ans d'exploitation). L'utilisateur peut passer outre de ces recommandations pour les calculs suivants, cependant les paramètres hydrauliques des puits (nombre de puits nécessaires, rabattement, etc.), dérivés plus haut, peuvent ne plus être valides. Dans le cas où la recommandation de distance entre puits n'est pas retenue par l'utilisateur, un message d'avertissement est affiché sur fond jaune sur la fenêtre de dialogue. Il indique que la distance minimale est inférieure à celle recommandée (cf. Figure 20).

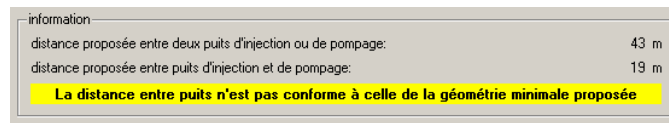


Figure 20: Message d'avertissement en cas de choix d'une distance entre puits trop faible

La dernière étape avant le démarrage d'une simulation est de fixer une direction d'écoulement. Là aussi, il existe deux possibilités: Soit par entrée directe des degrés suivant la rose des vents (Abbildung 21), soit par un choix graphique.

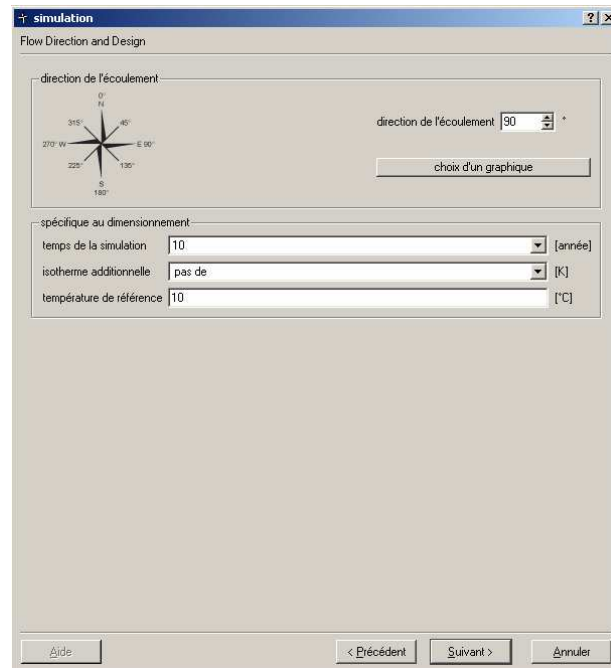


Figure 21: Direction d'écoulement de la nappe / paramètres de simulation

Afin de choisir la direction d'écoulement sur le graphique, cliquez tout d'abord sur le bouton « sélection sur le graphique ». La boîte de dialogue s'effacera alors et une fenêtre d'information apparaît qui contient le descriptif de la procédure à suivre.



Figure 22: Choix de la direction d'écoulement

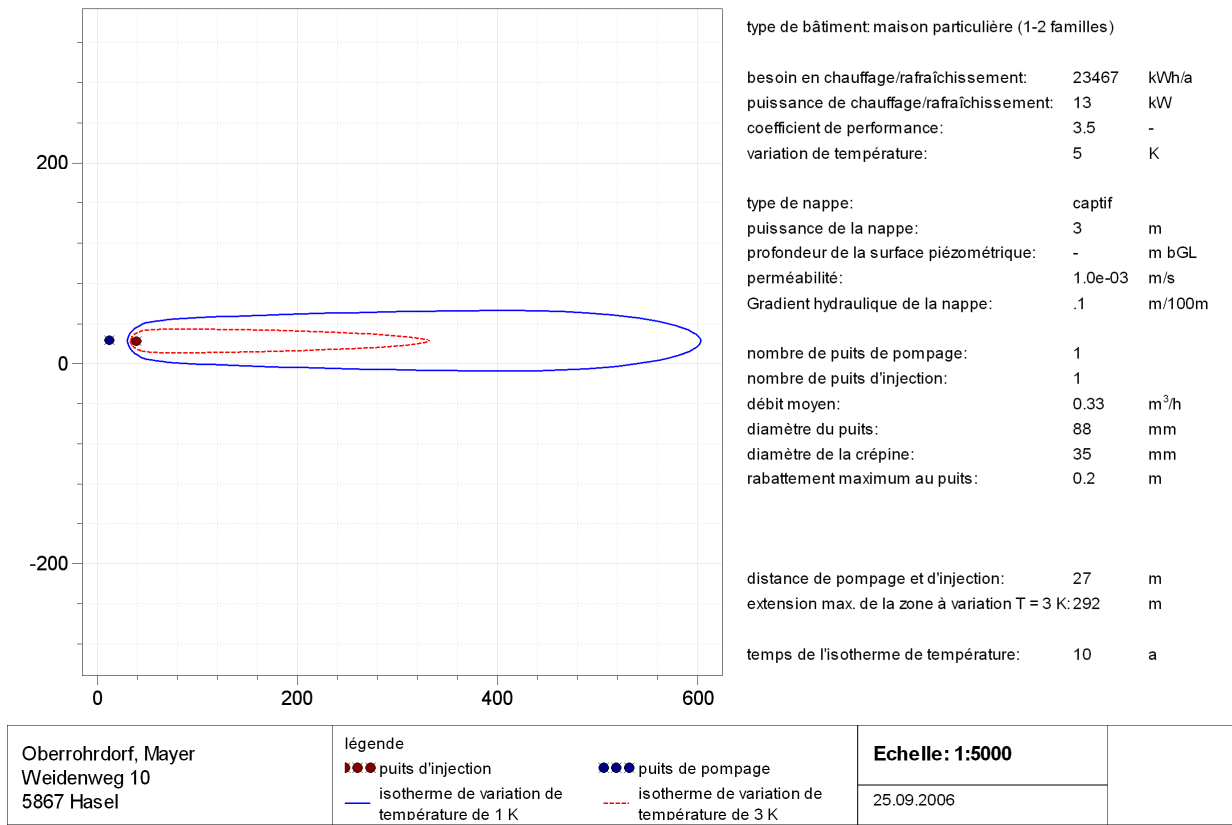
En cliquant sur OK vous accédez à la sélection des deux points par double-clic pour chacun d'entre eux, dans le système de coordonnées de la fenêtre principale: Le premier point correspond au point amont, le second au point aval. La boîte de dialogue sur la direction d'écoulement réapparaît alors et l'angle en degré est modifié en concordance avec les points du graphique.

Les entrées nécessaires aux simulations sont : la période de simulation et, si désiré pour une isotherme additionnelle, la différence de température entre celle dont le tracé est souhaité et la température de référence de la nappe. Il y deux périodes de simulation proposées au choix: 10 ou 30 ans. Choisissez l'une des périodes proposées ou sélectionnez le temps et

inscrivez-y la période de simulation désirée. De manière indépendante à vos entrées, les isothermes correspondant à 1K et 3K de variation de température seront dessinées. Si vous désirez une autre sortie, inscrivez la différence de température que vous désirez représenter dans la fenêtre correspondante. La température de référence – moyenne annuelle de celle de la nappe – est d'environ 10 °C dans les nappes superficielles de nos régions.

Le calcul qui fait suite, est réalisé de manière interne au logiciel sur la base d'une discrétisation spatiale optimisée et de type volumes finis. La taille du domaine de modélisation et le maillage sont calculés automatiquement et ne peuvent être influencés par l'utilisateur. Le problème d'écoulement transitoire et de transfert de chaleur est résolu par utilisation d'un solveur numérique adapté, en deux étapes : d'abord le calcul d'écoulement ensuite celui du champ de température. A l'issue de la simulation, qui peut durer de 1 à 2 minutes maximum, les isothermes sont dessinées pour le temps de simulation qui a été entré.

La feuille de résultats comprend la représentation graphique des isothermes et tous les paramètres principaux. Ceci comprend également la distance maximale de l'isotherme de variation de température 3K d'un puits de réinjection. Il est possible de réaliser des modifications de manière interactive sur le graphique par utilisation de la liste d'éléments graphiques et de l'éditeur des propriétés graphiques.



Groundwater Energy Designer (rc 1): Colenco Power Engineering AG, 5405 Baden, Täfelnstr. 26

Figure 23: Synoptique de la présentation graphique des résultats

Il est alors possible d'obtenir des configurations optimales de l'installation de pompes/réinjection par simulations comparatives sur la base de données modifiées.

ANHANG B: GLOSSAIRE

(terminologie/normes suisses)

Besoin/consommation en énergie de chauffage (kWh/a)

Quantité d'énergie à livrer pour la mise à disposition d'énergie utile

Besoin en rafraîchissement (annuel) (kWh/a)

Besoin moyen en froid ou rafraîchissement, il concerne ici le rafraîchissement direct; à savoir la quantité d'énergie qui est complètement transmise à la nappe lors du rafraîchissement

besoin en puissance (nominale) pour le chauffage (kW)

Est défini ici comme le rapport entre le besoin d'énergie utile annuel et le nombre d'heures pleine charge de l'utilisation du chauffage

Catégorie d'ouvrages/Type de bâtiment (-)

Est défini ici par son utilisation prédominante et/ou ses caractéristiques de chauffage. Elle est utilisée pour choisir dans la base de données le nombre d'heures pleine charge du bâtiment permettant de déterminer le besoin en puissance pour le chauffage issu du besoin d'énergie utile

besoin d'énergie utile (annuel) / besoin en chauffage/ chaleur (kWh/a)

Besoin moyen en puissance pour le chauffage d'un bâtiment (Q_h), résulte des pertes par transmission et ventilation (ici sans prise en compte des sources internes), le cas échéant incluant le besoin d'énergie pour l'eau chaude (Q_{ww}); tous sans prise en compte des rendements des installations.

Coefficient de performance (de la pompe à chaleur) (-)

Rapport de la chaleur utile fournie pendant une année sur l'énergie électrique totale utilisée par la pompe à chaleur (pour les pompes à chaleur sur eau de nappe environ 3.5 à 4)

Durée de simulation (a)

On comprend ici la durée pour laquelle la distribution spatiale de température (isothermes) de la nappe est représentée graphiquement; La base des calculs est formée par les bilans moyennés sur un an de l'extraction/injection de chaleur à partir des variations de température moyennes et des débits moyens; Les valeurs standard proposées par défaut sont celles de 10 ou de 30 ans.

Débit moyen (m^3/h ou l/min)

Il s'agit ici du débit bilan de l'extraction ou injection de chaleur (moyennée sur un an) et de la différence de température moyenne; il est calculé de manière interne sur la base des valeurs de besoin d'énergie et représente une entrée pour la simulation

Estimation du besoin en chauffage

Il s'agit ici d'une estimation interne au logiciel du besoin en chaleur annuel (besoin d'énergie utile) d'un bâtiment, sur la base de la catégorie d'ouvrage (type de bâtiment), de la norme SIA 380/1 des indices énergétiques (valeurs limites: valeurs minimales pour constructions nouvelles Q_h et Q_{ww} ; recommandations SIA 380/1, 1988) et des surfaces de référence énergétiques du bâtiment; normées par rapport au nombre de degré-jour pour différents sites en Suisse.

Nombre de degré-jour annuel (Kj)

Somme des différences entre la température extérieure journalière et la température intérieure de référence pour tous les jours chauffés de l'année; Ce nombre décrit l'impact du climat sur la consommation en énergie de chauffage d'un bâtiment. Dans le logiciel, il est

issu d'une base de données (dépendant du site d'implantation) et il est utilisé pour
l'estimation du besoin en chauffage

nombre d'heures pleine charge (h/a)

Durée d'exploitation équivalente en pleine charge; Ceci indique pour une installation produisant de l'énergie, la durée équivalente par année en fonctionnement à pleine charge, qui correspond à la production d'énergie cumulée et annuelle.

Puissance pour le rafraîchissement (kW)

Ici: Rapport entre le besoin en rafraîchissement annuel et le nombre d'heures pleine charge de l'utilisation du rafraîchissement

Surface de référence énergétique / surface au sol chauffée (m²)

(selon la norme SIA 380/1) Somme de toutes les surfaces au sol des étages chauffés, déterminés à l'aide des dimensions extérieures du bâtiment, sans prise en compte des garages, greniers, cave non chauffées, réduit de chauffage, buanderie.

Variation de température moyenne (de la nappe) (K)

On comprend ici le refroidissement moyenné sur l'ensemble de l'année (pour les chauffages à pompes à chaleur) ou le réchauffement (pour le rafraîchissement en mode direct) de la nappe; c.à.d. la diminution ou l'augmentation de la température de la nappe exploitée thermiquement;

La variation de température moyenne se calcule en effectuant un bilan sur le besoin annuel, prenant en compte des bilans mensuels du besoin d'énergie et des différences de température existant (valeurs cibles 3 à 5K)

Isotherme

Représentation graphique d'une ligne correspondant aux points de la nappe possédant la même variation de température (K) due à l'injection ou l'extraction de chaleur à l'issue de la durée de simulation

Température de référence (°C)

Il s'agit ici de la température moyenne sur l'année de la nappe non-perturbée. Cette température se situe dans les nappes peu profondes en Suisse entre 8 et 12°C; la valeur standard se situe à 10°C

Crépine du forage

Partie du tubage comportant des fentes et un gravier drainant; sa fonction est de permettre l'écoulement de la nappe vers les puits; le logiciel utilise dans la base de données des tailles nominales de fentes de 1.0 mm (voir aussi www.der-brunnen.de); (Indication: Le diamètre de forage est déterminé sur la base d'un dimensionnement hydraulique, il est un facteur 2.5 plus élevé que la valeur nominale de la crépine du puits.

Gradient hydraulique (m/100m)

Dans ce contexte: pente naturelle de la surface piézométrique de la nappe

Nappe aquifère

Formation géologique à roches consolidées ou non-consolidées qui est saturée en eau présente une bonne perméabilité.

Nappe captive

Il s'agit d'une nappe comprise entre des épontes (roches sus-jacentes et sous-jacentes) faiblement perméables; L'écoulement suit le gradient de pression piézométrique.

Nappe libre (phréatique)

La nappe n'a pas d'éponte supérieure imperméable. L'éponte supérieure est perméable; L'écoulement suit le gradient de pression indiqué par la position de la surface libre

Perméabilité (conductivité hydraulique) (m/s)

Capacité de la roche à permettre l'écoulement de l'eau, Une mesure en est le coefficient de perméabilité (k_f)

Porosité (-)

Rapport entre le volume de l'espace des vides (remplis d'eau interstitielle) et le volume du de roche (y compris ses vides) considéré

Position du mur de la nappe (m sous terrain naturel)

Profondeur de la base (éponte inférieure) peu perméable de la nappe.

Puissance/Epaisseur de la nappe (m)

Ici: En ce qui concerne les nappes captives: distance moyenne entre les épontes (roches formant le toit et le mur de la nappe) faiblement perméables de la nappe.

Surface de la nappe libre (m sous terrain naturel)

Surface supérieure du domaine saturé en eau d'une nappe phréatique ou à surface libre déterminée par la profondeur sous terrain; dans le logiciel, la valeur « basses-eaux » de ce paramètre est retenu pour le dimensionnement des puits

ANHANG C: GLOSSAR

(teilweise abweichende Definitionen in schweizerischen und deutschen Regelwerken; nach Möglichkeit beide angegeben)

Energiebezugsfläche / beheizte Grundfläche (m²)

(nach SIA 380/1, CH) Summe aller ober- und unterirdischen Geschossflächen, bestimmt aus den äusseren Abmessungen des Gebäudes; nicht berücksichtigt werden Garagen, Estrich, unbeheizte Keller, Heizraum, Waschraum

(nach Energieeinsparverordnung, D) beheizte Nettowohnfläche (die Unterschiede zwischen den Definitionen sind im Rahmen der Energiebedarfsschätzung tolerierbar)

Gebäudekategorie (-)

(hier) Kategorie der Gebäudenutzung nach vornehmlicher Nutzungsart und/oder Heizwärmecharakteristik; wird zur Auswahl in einer Datenbank für die

Vollbetriebsstundenzahl des Gebäudes zur Ermittlung des Wärmeleistungsbedarfes aus dem Nutzenergiebedarf herangezogen

(Heiz-)energiebedarf / -verbrauch (kWh/a)

Anzuliefernde Endenergiemenge zur Bereitstellung der Nutzenergie

Heizgradtage (Kd)

Summe der Differenzen zwischen mittlerer Aussenlufttemperatur eines Tages und angestrebter Innenlufttemperatur für alle Heiztage des Jahres; beschreibt den Einfluss des Klimas auf den Heizenergieverbrauch eines Gebäudes und wird im Programm aus einer Datenbank bei der Wärmebedarfsschätzung verwendet (entsprechend des Standortes)

Jahresarbeitszahl (der Wärmepumpe) (-)

Verhältnis der während eines ganzen Jahres abgegebenen Nutzwärme zu der von der Wärmepumpe total benötigten elektrischen Energie (bei Grundwasser-Wärmepumpen ca. 3.5 ... 4)

(Jährlicher) Kühlbedarf (kWh/a)

Gemittelter Kälte-(oder Kühl-)bedarf, hier zur Direktkühlung; entspricht hier dem Energieinhalt, der bei der Kühlung vollständig auf das Grundwasser übertragen wird

Kühlleistung (kW)

Hier: Verhältnis aus jährlichem Kühlbedarf und Vollbetriebsstundenzahl der Kältenutzung

Mittlere Temperaturänderung (des Grundwassers) (K)

Hier: über den gesamten Jahresverlauf gemittelte Auskühlung (bei Heizung mittels Wärmepumpen) oder Erwärmung (bei Direktkühlung) des Grundwassers; d.h.

Temperaturabnahme bzw. -zunahme des zu nutzenden Grundwassers;

Bei vorliegenden Monatsbilanzen von Energiebedarf und Temperaturdifferenzen ist die mittlere Temperaturänderung für die Berechnungen auf den Jahresbedarf zu bilanzieren; (Richtwert 3 ... 5K)

Mittlerer Volumenstrom (m³/h oder l/min)

Hier: aus dem (über das Jahr gemittelten) Wärmeentzug oder –eintrag und der mittleren Temperaturdifferenz bilanzierter Volumenstrom; wird intern aus den Energiebedarfswerten ermittelt und liegt der Simulation zugrunde

(jährlicher) Nutzenergiebedarf / (Heiz-)Wärmebedarf (kWh/a)

Gemittelter Heizwärmebedarf eines Gebäudes (Q_h), resultierend aus Transmissions- und Lüftungsverlusten (hier ohne Berücksichtigung interner Quellen), ggf. inklusive dem Energiebedarf zur Warmwasserbereitung (Q_{ww}); jeweils ohne Berücksichtigung von Anlagenwirkungsgraden

Simulationszeit (a)

Hier: Dauer, nach der die berechnete Temperaturverteilung im Grundwasserleiter (Isothermen) dargestellt wird; Grundlage sind die über ein Jahr gemittelten Bilanzen des Wärmeentzugs oder –eintrags aus mittlerer Temperaturänderung und mittleren Volumenstrom; als Standardwerte werden 10 bzw. 30 Jahre vorgeschlagen

Vollbetriebsstundenzahl / Volllaststundenzahl (h/a)

Laufzeitäquivalent unter Volllast; Angabe, wie lange eine Anlage, die Energie erzeugt, pro Jahr mit Volllast laufen müsste, um die Jahresenergieproduktion zu erreichen

Wärmebedarfsschätzung

Hier: Interne Schätzung des jährlichen Wärmebedarfs (Nutzenergiebedarf) eines Objektes, basierend auf Gebäudekategorie, den SIA 380/1 Energiekennzahlen (Grenzwerte: Mindestwerte für Neubauten Q_h und Q_{ww} , hier aus: Empfehlung SIA 380/1, Ausgabe 1988) und der Energiebezugsfläche des Objektes; skaliert nach Heizgradtagen für verschiedene Standorte in der Schweiz

Wärmeleistungsbedarf, (Nenn-)Wärmeleistung (kW)

Hier: Verhältnis aus jährlichem Nutzenergiebedarf und Vollbetriebsstundenzahl der Wärmenutzung

Isotherme

Darstellung von Linien gleicher Temperaturänderung (K) des Grundwassers durch den Wärmeeintrag oder –entzug nach Ablauf der Simulationszeit

Referenztemperatur (°C)

Hier: über das Jahr gemittelte (ungestörte) Grundwassertemperatur; in oberflächennahen Grundwasserleitern in Mitteleuropa 8 ... 12°C; Standardwert 10°C

Aquifer

Boden, Locker- oder Festgestein, welches eine gute Wasserdurchlässigkeit aufweist und damit als Grundwasserleiter wirken kann

Brunnenfilter

Brunnenrohr mit speziellen Filterschlitzten und Kiesschüttung; hat die Aufgabe, den Wassereintritt aus dem Grundwasserleiter in den Brunnen zu ermöglichen; im Programm interner Datensatz für übliche Nennweiten mit 1.0mm Filterschlitzweite verwendet (s.a. www.der-brunnen.de);

(Hinweis: der aus hydraulischen Gründen dimensionierte Brunnendurchmesser ist im Programm um einen Faktor 2.5 grösser als die gewählte Nennweite des Brunnenfilters)

(hydraulische) Durchlässigkeit (m/s)

Fähigkeit des Bodens, Locker- oder Festgesteins, Wasser durchtreten zu lassen; Mass ist der Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert)

Gespanntes Grundwasser

Grundwasser in einem nach oben durch geringer durchlässige Serien abgeschlossenen Grundwasserleiter (Aquifer); das Wasser bewegt sich in Richtung von Druckunterschieden zwischen Einzugs- und Abflussgebieten

(Freie) Grundwasseroberfläche (m unter Terrain / u. GOK)

Obere Begrenzung des wassererfüllten (gesättigten) Bereiches in einem ungespannten Grundwasserleiter (Aquifer); vertikaler Abstand von der Geländeoberfläche; im Programm wird dieser zur Dimensionierung der Brunnen als Wert für **Niedrigwasserverhältnisse** verwendet

Hydraulischer Gradient (m/100m)

Hier: natürliches Gefälle der Grundwasseroberfläche (bei ungespanntem Grundwasser) oder der Druckspiegellage (bei gespanntem Grundwasser)

Lage der Basis des Grundwasserleiters (m unter Terrain / m u. GOK)

Tiefe der im Liegenden an den Grundwasserleiter angrenzenden gering-durchlässigen Sohle unter Terrain

Mächtigkeit des Grundwasserleiters (m)

Hier: bei gespannten Grundwasserleitern mittlerer Abstand zwischen den im Liegenden und im Hangenden angrenzenden gering-durchlässigen Deckschichten des Grundwasserleiters

Porosität (-)

Verhältnis des Volumens aller Hohlräume im Gestein zum Volumen des Gesamtgesteins

Ungespanntes Grundwasser

Grundwasser in der gesättigten Zone mit freier Verbindung zur Oberfläche durch durchlässige Schichten; das Wasser bewegt sich unter Einfluss der Schwerkraft in Richtung des Gefälles (Gradienten) der Grundwasseroberfläche

Weitere Begriffe s.a.:

Glossar geologischer Begriffe für Wärmeenergie-Anwendungen im Erdreich; B. Sanner, K. Knoblich: www.iea-eces/annexes/annex_home/annex12/DEUGLOS.pdf

Regelwerke:

CH:

SIA 380/1; Thermische Energie im Hochbau; 1. Auflage 2001

SIA D 0179; Energie aus dem Untergrund – Erdreichspeicher für moderne Gebäudetechnik, 2003

BUWAL 2004: Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

http://www.zug.ch/afu/download/gewaesser/wl_buwal_grundwasserschutz.pdf#search=%22buwal%20wegleitung%20grundwasserschutz%22

D/EU:

VDI 4630; Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 1: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, 2000

EnEV: Energieeinsparverordnung 2004 (voraussichtlich ab 2007: EnEV 2006)

DIN EN 832: Wärmetechnisches Bauverhalten von Wohngebäuden

DIN 4108: Wärmeschutz im Hochbau

Europäische Wasserrahmenrichtlinie, 2000, Wasserhaushaltsgesetz (WHG)
<http://bundesrecht.juris.de/whg/index.html> , Novelle 2002, Landeswassergesetze