

Geothermisches Informationssystem zur Auslegung, Bewertung und Genehmigung geothermischer Anlagen

Sebastian Weck-Ponten¹, Eric Fichter¹, Stephan Düber²

¹Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (E3D), RWTH Aachen University

²Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen (GiB), RWTH Aachen University

Keywords: Auslegung, Simulation, Datenaggregation, oberflächennahe Geothermie

Zusammenfassung

Für die Planung, Genehmigung und den Betrieb geothermischer Anlagen ergeben sich auf Grund ihrer Komplexität hohe Unsicherheiten. Entscheidungen beruhen häufig auf Informationen, die aus Literaturwerten abgeschätzt werden. Wechselwirkungen mit anderen geothermischen Anlagen oder der Grundwasserströmung werden teilweise nicht oder nur stark vereinfacht in einem Nachweis abgebildet, der die Realität unzureichend wiedergibt. Weiterhin fehlt eine Systematik, mit der energetische Wechselwirkungen zwischen Stadtquartier und geothermischen Anlagen ganzheitlich betrachtet werden können. Das Forschungsvorhaben GeTIS zielt deshalb auf die Aspekte einer Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit, der Planungs- und Genehmigungssicherheit geothermischer Systeme ab. Hierfür wird eine konsistente Datengrundlage geschaffen, die über ein räumliches Informationssystem gebündelt und zugänglich gemacht wird. Die automatisierte Datenaggregation und Steuerung der Prozesse sowie die Anbindung von analytischen und numerischen Berechnungswerkzeugen ermöglicht die ganzheitliche Planung und Auslegung von geothermischen Systemen gebündelt in einem Geoinformationssystem.

1. Einleitung

Zur Erreichung nationaler und europäischer Ziele zur Begrenzung anthropogener, energiebedingter Treibhausgasemissionen besteht Handlungsbedarf zur verstärkten Förderung neuer erneuerbarer Energieträger. Unter den erneuerbaren Energieträgern fällt dabei der Geothermie eine besondere Rolle zu. So sind geothermische Systeme in der Lage Gebäudeheiz- und Kühllasten monovalent zu decken und Energie saisonal im Erdboden zu speichern. Durch die Nutzung von oberflächennaher Geothermie kann Wärme in Tiefen von bis zu 400 m regenerativ bereitgestellt werden. Allein Nordrhein-Westfalen (NRW) verfügt über ein technisch nutzbares Potenzial an oberflächennaher Geothermie für einen Deckungsanteil von bis zu 57 % des Wärmebedarfs (Bracke et al., 2015). Um die Energiewende und die Sektorkopplung voranzubringen, den Wärmesektor verstärkt einzubinden sowie die europäischen und deutschen Klimaziele einzuhalten, braucht Deutschland umweltfreundliche Lösungsmöglichkeiten und eine Diversität im erneuerbaren Energieportfolio. Im Bereich der Wärmeversorgung kann das Ziel der Bundesregierung, ein Anteil von 14 % erneuerbarer Energien am Wärmeverbrauch bis 2020, voraussichtlich nicht erreicht werden. Durch oberflächennahe geothermische Systeme besteht die Möglichkeit die Gebäudeheiz- und Kühlbedarfe regenerativ und unter Einhaltung der staatlichen Vorgaben wie z. B. des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (15 % Wärme aus erneuerbaren Energien bei Neubauten) durch ein annähernd konstantes Temperaturniveau im Erdreich zu decken. Momentan gibt es in der Praxis Unsicherheiten bei der Planung, bei Genehmigungsverfahren und beim Betrieb geothermischer Anlagen. Außerdem werden gegenwärtig Wechselwirkungen geothermischer Anlagen untereinander und die Interaktion mit Stadtquartieren und Versorgungsnetzen kaum erfasst. Einzelne Aufschlüsse dienen als Grundlage für komplexe Entscheidungen, da eine sehr geringe Informationsdichte der Geologie aber auch des Gebäudesektors vorherrscht.

Das Forschungsprojekt „GeTIS - Geothermisches Informationssystem zur Bemessung, Modellierung, Bewertung und Genehmigung vernetzter geothermischer Energiesysteme auf Gebäude- und Stadtquartiersebene“ ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördertes Forschungsprojekt, welches an der RWTH Aachen University umgesetzt wird. Ziele des Vorhabens sind die Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit und Planungssicherheit bei der Auslegung oberflächennaher geothermischer Systeme durch Informations- und Datenbereitstellung und Anbindung von Berechnungs- und Simulationswerkzeugen an ein offenes Web-Geoportal. Dabei soll die Auslegung speziell von Erdwärmesonden und Sondenfeldern auf Basis von Simulationen und iterativen Optimierungsalgorithmen verbessert werden. Beispielsweise werden Effekte infolge von Grundwasserströmung und Beeinflussungen von Erdwärmesonden untereinander anhand von Temperaturfahnen visualisiert sowie die Schnittstelle zwischen Gebäude- und Untergrundsimulation durch ein Wärmepumpenmodell genauer abgebildet. Adressaten des Geoportals sind hauptsächlich Fachplaner und Privatpersonen. Die interne Datenstruktur ist konform mit der europäischen INSPIRE-Richtlinie („INfrastructure for SPatial InfoRmation in Europe“) und erlaubt die Übertragbarkeit des Konzepts bis auf europäische Ebene.

Ein wichtiges Element des Forschungsprojekts stellt dessen Verstetigungsstrategie dar. Um den Einsatz des neuen Informationssystems über das Projekt hinaus sicherzustellen, sind von Beginn an Akteure und Experten aus verschiedenen Verbänden, dem Genehmigungsprozess und zweier ausgewählter Modellregionen eingebunden. Das Projekt wird hierfür insbesondere durch aktive Mitarbeit eines GeTIS-Projektbeirates unterstützt. Mitglieder des Projektbeirates sind der Geologische Dienst NRW, das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV), der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW), die Kreisverwaltung Düren, das Sachverständigenbüro Dr. Mathews GmbH, der Erftverband, die RWE Power AG, die Bezirksregierung Arnsberg, STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG, tewag Technologie - Erdwärmeanlagen - Umweltschutz GmbH und der Projektträger Jülich.

2. Funktionen von GeTIS

GeTIS bildet den ganzheitlichen Auslegungsprozess von Erdwärmesonden durch verschiedene Simulationsprozesse ab, von der Dateneingabe, -aggregation und Darstellung in einem Web-basierten Geoportal über die Kopplung an die Simulationsprogramme bis hin zur Berechnung von Simulationsergebnissen. Ergebnisse sind beispielsweise:

- Die erforderliche Länge bzw. Anzahl an Erdwärmesonden
- Erzeugerlastkurven zur Deckung des Heizenergie- und Trinkwarmwasserbedarfs
- Temperaturen in unterschiedlichen Horizonten im Untergrund
- Die mittlere Untergrundtemperatur über den vom Benutzer gewählten Auslegungszeithorizont
- Die Gebäudeenergiebedarfsdeckung
- Die Jahresarbeitszahlen (JAZ) unter Nutzung verschiedener Bilanzen
- Die Jahresvolllaststunden der Wärmepumpe
- Trinkwarmwasser- und Pufferspeichertemperaturen
- An- und Abschaltzeitpunkte der Wärmepumpe

2.1 Geoportal

Ein Web-basiertes Geoportal dient als grafische Oberfläche, die dem Nutzer die Funktionen von GeTIS zur Verfügung stellt (siehe Abbildung 1). Geoinformationen können durch Karten visualisiert und über die Layer-Leiste ein- und ausgeblendet werden. Mithilfe von Zeichenwerkzeugen können

Gebäude ausgewählt sowie Erdwärmesonden positioniert werden. Die Größe des in den Berechnungsprogrammen verwendeten Gebietes ist manuell festlegbar. Sämtliche Eigenschaften von Gebäuden, Sonden und Wärmepumpen können über entsprechende Eingabefenster eingestellt werden. Eine Benutzerführung führt den Anwender durch die Funktionen von GeTIS.

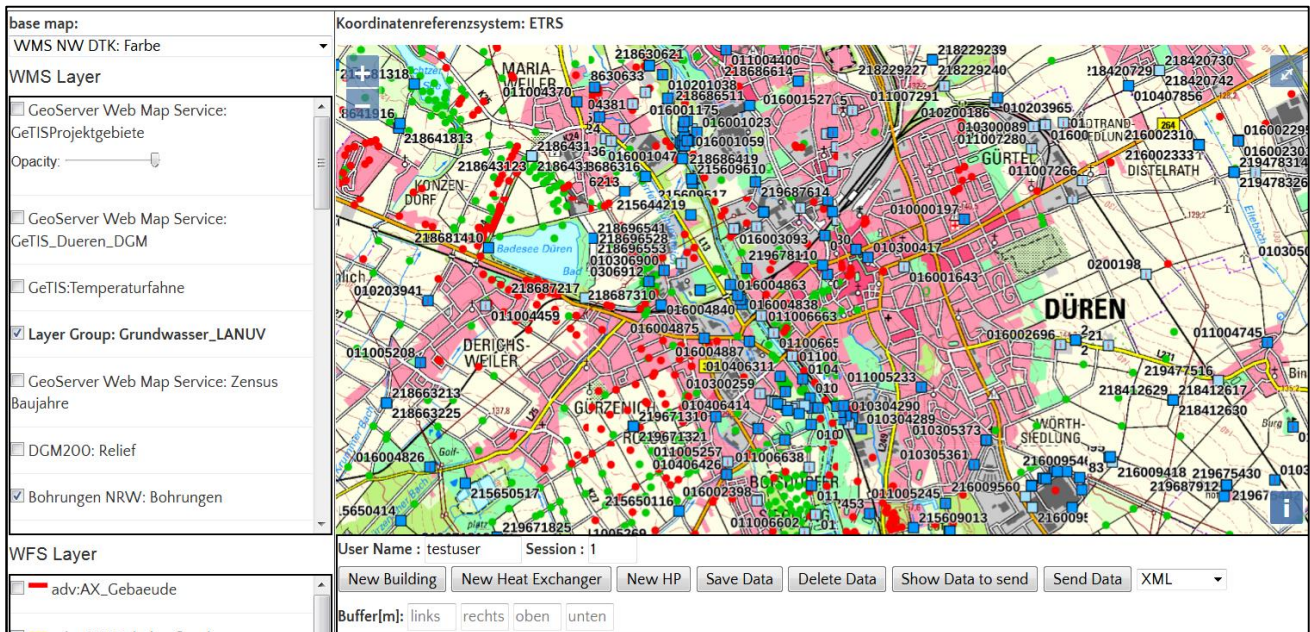


Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Geoportal (Arbeitsversion)

2.2 Datenbereitstellung

In GeTIS werden zeitlich veränderliche Daten zur Geologie, Hydrologie, Raumplanung, zu Grundstücksgrenzen und zu Gebäuden sowie Wärmepumpenherstellereigenschaften aggregiert, teilweise in einer eigenen Datenbank gespeichert und im Geoportal dargestellt. Die für die Simulationsprozesse notwendigen Informationen werden automatisiert aus den vorhandenen Daten berechnet oder über standardisierte Webdienste aggregiert und eingebunden. Die nicht automatisiert aggregierbaren Daten werden vom Nutzer eingegeben. Dies sind planungsrelevante Daten bezüglich der Gebäude und der geothermischen Systeme, wie z. B. die Auswahl des Wärmepumpentyps. Zum gegenwärtigen Stand werden dem Nutzer die folgenden Daten angeboten:

- Topographische und historische Karten
- Bebauungspläne
- Digitale Orthophotos
- ALKIS-Daten
- ZENSUS-Daten (insbesondere Gebäudebaujahre, LANUV)
- 3D-Gebäudemodelle (CityGML)
- Wärmepumpendaten (STIEBEL ELTRON)
- Randbedingungen aus Normen und Richtlinien (Wärmepumpen, TWW-Berechnung, ...)
- Geologische Karten z. B. geothermische Ergiebigkeit (Geologischer Dienst NRW)
- Geologischer Schichtenaufbau (3D)
- Digitale Geländemodelle (BKG)
- NRW-weite Grundwassergleichen und Flurabstände (LANUV)

- Grundwasserdaten (Erftverband)
- Bohrungen (Geologischer Dienst NRW)
- Wasserschutzgebiete (LANUV)
- TRY-Wetterdaten (DWD)

Zur Übermittlung der Daten aus dem Geoportal an die angebotenen Berechnungswerkzeuge wird der standardisierte Web Processing Service (WPS) des Open Geospatial Consortium (OGC) genutzt, der die Parameter in einem XML-Encoding an den Server übermittelt und die Simulationsprozesse auf dem Server startet.

Zusätzlich wird ein Plug-in bereitgestellt, das das Herunterladen geothermischer Daten und das Einbinden dieser in das Programm FEFLOW ermöglicht.

2.3 Planungsprozess in GeTIS

In Abbildung 2 ist der Planungsprozess einer geothermischen Anlage mit Erdwärmesonden in GeTIS dargestellt. Als ersten Schritt kann der Nutzer mit Hilfe der Kartenvisualisierung das Berechnungsgebiet und bestehende Gebäude oder die Grundstücke für geplante Gebäude auswählen. Zusätzlich können Informationen, wie beispielsweise das Vorhandensein eines Wasserschutzgebietes oder die geothermische Ergiebigkeit, über hinterlegte Layerinformationen als eine erste Abschätzung der Standorteignung für die Nutzung von oberflächennaher Geothermie angezeigt werden. Die für die Berechnungswerkzeuge notwendigen Daten werden mithilfe von automatisierten Berechnungen intern im Geoportal ermittelt. Im nächsten Schritt erfolgt die Gebäudeenergiebedarfsberechnung, aufgeteilt in den Heizwärmebedarf und den Bedarf an Trinkwarmwasser (TWW). Der Nutzer kann zwischen der Eingabe von Verbrauchswerten und anschließender Ermittlung einer Erzeugerlastkurve über ein physikalisches Modell (vgl. Abschnitt 2.4.2) und einer dynamischen Gebäudesimulation (vgl. Abschnitt 2.4.1) wählen. Um die aus der Gebäudesimulation berechneten Heizwärmelastkurven mit dem TWW-Bedarf zu erweitern, wird in der Nutzeroberfläche ein Algorithmus implementiert, der aus der Nettogrundfläche und anderen Gebäudeparametern den TWW-Bedarf berechnet. Die über ein physikalisches Modell berechneten Erzeugerlastkurven enthalten die umgerechneten TWW- und Heizwärmeverbräuche inklusive Übergabe-, Verteil-, Speicher- und Erzeugerverluste. In beiden Fällen werden die ermittelten Erzeugerlastkurven als Zwischenergebnis abgespeichert und an ein Wärmepumpenmodell weitergegeben. Daraufhin erfolgt die Auswahl und Eingabe der Parameter für Sonden und Wärmepumpen. Das Geoportal bietet Auswahllisten von Wärmepumpentypen mit in der Datenbank hinterlegten Herstellerdaten, wie z. B. Wärmepumpen-Lastkurven oder Solevolumenströme. Die spezifizierten Sonden- und Wärmepumpeneigenschaften sowie die berechneten Gebäudelastkurven werden in die XML-Struktur gespeichert und an die Berechnungswerkzeuge für die Untergrund- und Anlagentechniksimulation übergeben. Für die Untergrundsimulation stehen zwei verschiedene Ansätze zur Verfügung: eine analytische Erdwärmesondenberechnung inklusive iterativer Dimensionierung (vgl. Abschnitt 2.4.3) sowie eine numerische Simulation (vgl. Abschnitt 2.4.4) mit einem integrierten dynamischen Wärmepumpenmodell (vgl. Abschnitt 2.4.5). Nach Abschluss der Berechnung bekommt der Nutzer ein Ergebnisblatt zur Verfügung gestellt, welches alle Eingabewerte und Ergebnisse beinhaltet.

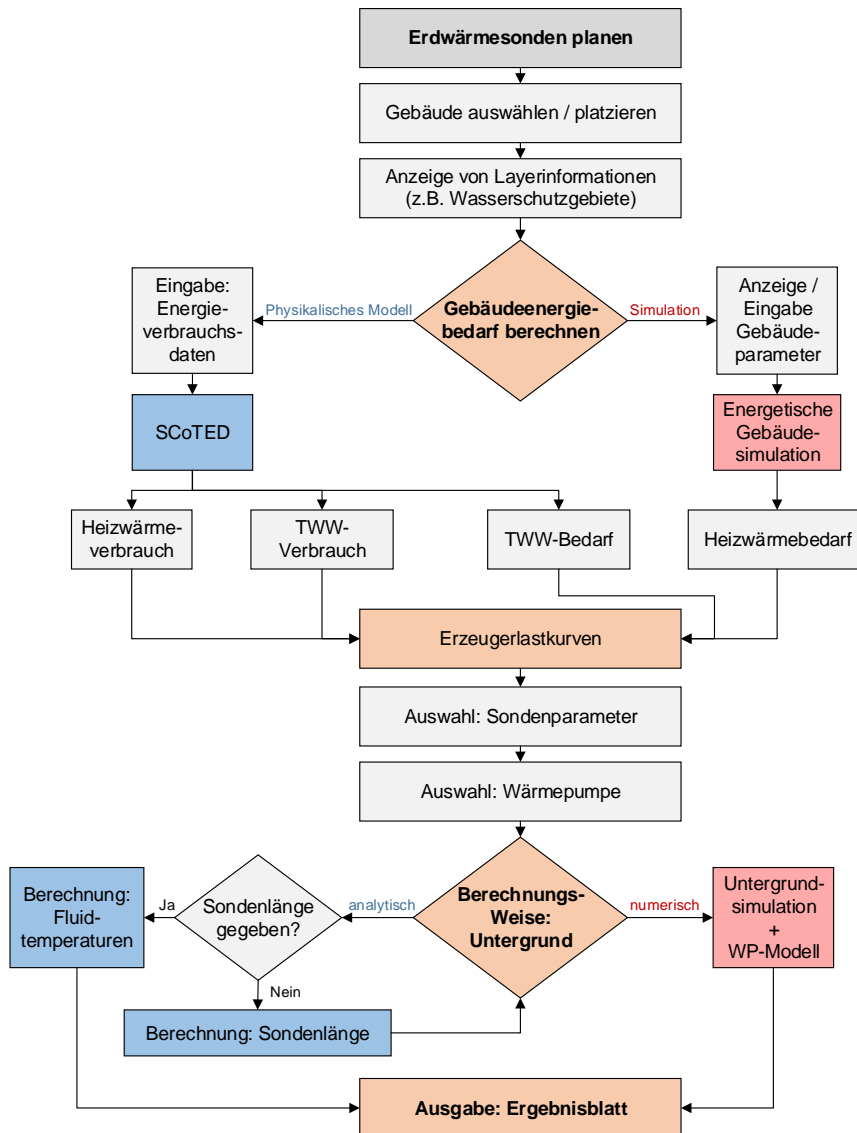


Abbildung 2: Planungsprozess mit GetIS

2.4 Berechnungswerkzeuge

Mit Ausnahme der Gebäudesimulation befinden sich die Berechnungswerkzeuge gegenwärtig im Validierungsprozess. Die verschiedenen Werkzeuge sind im Folgenden beschrieben.

2.4.1 Energetische Gebäudesimulation

Auf Stadtquartierebene liegt oft eine geringe Informationsdichte bezüglich Energieverbrauchswerten, Baujahresdaten oder anderen bauphysikalischen Eigenschaften vor. Deswegen wird ein Berechnungswerkzeug benötigt, was nur wenige Eingangsparameter benötigt. Die für das Projekt GetIS benötigten Heizwärmebedarfe der Gebäude werden mithilfe des quelloffenen Programms „Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit“ (TEASER) berechnet. TEASER eignet sich für die Datenanreicherung dynamischer Gebäudesimulationsmodelle mit einer geringen Informationsdichte auf Skalen von Einzelgebäuden bis hin zu Stadtquartieren. Dabei wird ein Gebäudemodell

geringer Ordnung anhand von wenigen Eingangsparametern (u. a. zum Gebäudetyp, Baujahr und zur Gebäudegeometrie) im Modelica-konformen Textformat erzeugt. Die generierten Modelica-Modelle werden in der grafischen Entwicklungsumgebung Dymola simuliert und konsolenbasiert gestartet. Die Zeitschrittweite beträgt in der Regel eine Stunde. Auf Grundlage von stündlich aufgelösten Wetterdaten und internen Lasten werden Heizwärmelastkurven von Gebäuden und Quartieren berechnet. Das Wärmepumpenmodell nutzt die errechneten Heizwärmelastkurven bei der bidirektionalen Kopplung mit dem numerischen Untergrundmodell als Eingangsdaten.

2.4.2 Analytische Erzeugerlastkurvenermittlung

Eine zweite Möglichkeit die Energiebedarfe der Gebäude zu bestimmen und Erzeugerlastkurven zu generieren ist die Nutzung eines vereinfachten physikalischen Modells. In GeTIS ist dafür das am Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen - E3D der RWTH Aachen University entwickelte Programm SCoTED eingebunden (Koschwitz et al., 2016). Sind die Energieverbrauchswerte der Gebäude bekannt, werden diese anhand von Wetterdaten und anderen Eingangsgrößen gewichtet und dadurch stündliche Erzeugerlastkurven inklusive aller gebäudeinternen Verluste bestimmt. Die Erzeugerlastkurven werden als Eingangsgrößen an das Wärmepumpenmodell übertragen.

2.4.3 Analytische Sondenberechnung

Die Auslegung eines geothermischen Systems mit einer oder mehrerer Erdwärmesonden stellt aufgrund der komplexen Wärmetransportvorgänge im Untergrund, der großen räumlichen Skalenunterschiede sowie der langen Betrachtungszeiträume eine Herausforderung an Planer und Ingenieure dar. Die numerische Modellierung von Erdwärmesonden ist zum einen aufgrund der skalenverteilten Geometrien und zum anderen aufgrund der instationären, dreidimensionalen Transportprozesse kompliziert und kann nur durch vollständig diskretisierte, numerische 3D Modelle exakt abgebildet werden. Selbst auf modernen, leistungsstarken Computern führt dies zu hohen Rechenzeiten. In Verbindung mit den üblichen Auslegungszeiträumen von 50 Jahren haben sich in der Praxis daher vor allem einfachere, leicht zu bedienende, analytische und semi-analytische Programme durchgesetzt. Aufgrund der weiten Verbreitung und großen Relevanz für die Praxis stellt GeTIS dem Nutzer über das Geoportal eine analytische Berechnungsfunktion zur Dimensionierung von Erdwärmesonden zur Verfügung. Die Berechnung beruht ähnlich wie das Programm „Earth Energy Designer“ (EED) auf dem Prinzip der g-Funktionen (Eskilson & Claesson, 1988). Auch der Funktionsumfang ist mit EED vergleichbar. Bei gegebener Gebäudelastkurve und Sonden(feld)geometrie können die mittleren Sondenfluidtemperaturen über lange Betrachtungszeiträume in Sekundenschnelle berechnet werden. Weiterhin kann in Verbindung mit einer Temperaturrandbedingung, beispielsweise die minimal erlaubte Sondenfluidtemperatur, eine iterative Ermittlung der erforderlichen Sondenlänge beziehungsweise -anzahl erfolgen.

2.4.4 Numerische Sonden- und Untergrundsimulation

Um den Einfluss der Grundwasserströmung und die Wechselwirkungen der Sonden untereinander zu untersuchen, wird neben der analytischen Sondenberechnung eine dreidimensionale numerische Untergrund-Simulation (CFD-Simulation) angeboten. In dieser werden der geologische Aufbau des Berechnungsgebietes sowie die vorhandenen Grundwasserpotentiale auf Basis der Eingangsdaten möglichst realistisch wiedergegeben.

Nachdem der Nutzer das Berechnungsszenario über das Geoportal angestoßen hat, erfolgt eine vollautomatisierte Vernetzung mittels der Finiten-Volumen-Methode und eine Berechnung über den Auslegungszeitraum. Die Erdwärmesonden werden dabei über eindimensionale Sondenmodelle in das Untergrundmodell integriert. Die Eingangsgrößen Solevolumenstrom und -temperatur werden

dem gekoppelten Wärmepumpenmodell in jedem Zeitschritt entnommen. Die Soleaustrittstemperatur wird anschließend übergeben. Als Simulationsergebnis werden dem Nutzer horizontale und vertikale Schnitte durch das Berechnungsgebiet mit Informationen zu Temperaturen und Grundwasserströmungen sowie Diagramme zum transienten Sondenverhalten angezeigt. Das Simulationsprogramm basiert auf der Programmiersprache C++ und ist durch seine Architektur auf paralleles Rechnen ausgelegt.

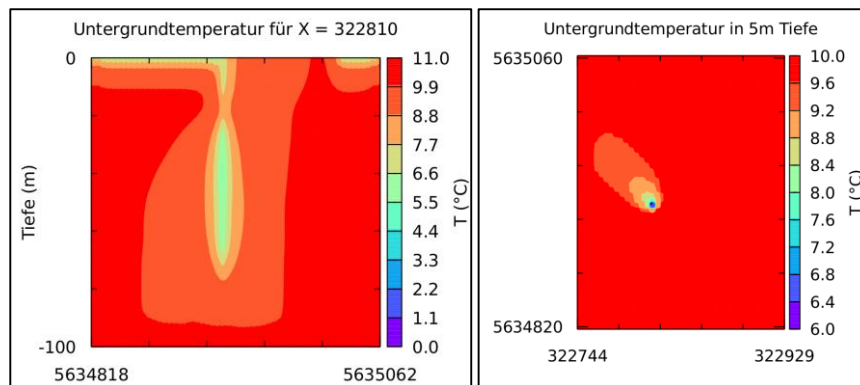


Abbildung 2: Schnitte durch das Berechnungsgebiet als Ergebnis der Simulation (Links vertikal, Rechts horizontal).

2.4.5 Wärmepumpenmodell

Als Schnittstelle zwischen der Gebäude- und Untergrundsimulation ist ein black-box Wärmepumpenmodell entwickelt und implementiert. Im Gegensatz zu der Auslegungspraxis von geothermischen Systemen, wo konstant angenommene Jahresarbeitszahlen (JAZ) und Jahresvolllaststunden die Wärmepumpe vereinfacht abbilden, wird mit diesem detaillierteren Ansatz die Wärmepumpe physikalisch korrekt modelliert, Wärmespeichereinflüsse berücksichtigt und eine bidirektionale Kopplung mit dem Untergrund ermöglicht. Das Modell kann zwischen Heizenergie- und Trinkwarmwasserbedarfsdeckung, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Temperaturniveaus und Leistungszahlen, umschalten. Darüber hinaus können verschiedene JAZ unter Nutzung von Energiebilanzen, die beispielsweise die Speicherverluste, Sole- und Umwälzpumpen oder andere Hilfsenergien berücksichtigen, berechnet werden.

Bei einer parallelen Simulation von einer Vielzahl an geothermischen Systemen ist ein auf die Rechenzeit optimierter Ansatz notwendig. Für die Kopplung an die numerische Untergrundsimulation und einen möglichst schnellen Datenaustausch ist der Programmcode des Black-Box-Modells in den Code der Untergrundsimulation zur Berechnung von Erdwärmesonden integriert. Beide Simulationsprogramme sind in der Programmiersprache C++ geschrieben und setzen auf starke Parallelisierung und eine schnelle Datenübertragung zwischen den Modellen.

Die notwendigen Eingangsparameter des Wärmepumpenmodells sind die auf Grundlage der Gebäudedaten erstellten Erzeugerlastkurven, die minimale Zelltemperatur des Untergrunds, die Solerücklauftemperatur (Solerücklauftemperatur, die aus dem Untergrund in den Verdampfer der Wärmepumpe einströmt), weitere systemtechnische Randbedingungen der Wärmepumpen sowie die Anzahl gekoppelter Erdwärmesonden und Gebäude. Die Erzeugerlast, Speicher-, Außenluft-, Solerücklauf- und minimale Bodenzelltemperatur dienen als Regelgrößen. Mithilfe der Solerücklauftemperatur wird die Heizleistung und die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe aus nach DIN EN 14511 genormten Herstellerleistungsdaten interpoliert. Anhand einer instationären Wärmebilanz um die im Modell integrierten ideal durchmischten Puffer- und Trinkwarmwasserspeicher (inklusive Verluste) wird ermittelt, ob genug Energie gespeichert ist, um den Heizenergiebedarf zu decken. In jedem

Zeitschritt werden abhängig von der aktuellen Heizleistung und der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe die Solevorlauftemperatur und der Solevolumenstrom durch das Wärmepumpenmodell berechnet und an die Untergrundsimulation übergeben. Anschließend wird die Solerücklauftemperatur und die minimale Bodenzelltemperatur vom Untergrundmodell an das Wärmepumpenmodell zurückgegeben.

2.5 Genehmigungen

Bundes- und auch NRW-weit unterscheiden sich die Genehmigungsanträge für Wärmepumpenanlagen in Art und Form deutlich. Dem Nutzer wird über GeTIS daher ein einheitliches Genehmigungsdokument für die Planung von Erdwärmesonden zur Verfügung gestellt, welches die meisten aller abgefragten Informationen der Behörden in NRW enthält. In diesem sind die zuvor eingegebenen und berechneten Daten integriert und vom Nutzer abänderbar.

3 Fazit

In diesem Artikel wurde das geothermische Informationssystem GeTIS und seine Funktionen vorgestellt. Zusammenfassend bietet GeTIS eine Hilfestellung für die Informationsbeschaffung und den Planungs- und Auslegungsprozess mit Berechnungswerkzeugen sowohl für den Geothermie-interessierten Hauseigentümer als auch für den Fachplaner und Ingenieur.

Quellenangaben

BRACKE R., ROCHOLL W., SCHMIDT B., BUSSMANN G., EICKER T., KELZ B.: Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 4 - Geothermie, LANUV-Fachbericht 40, (2015)

ESKILSON, P. & CLAEISSON, J.: Simulation model for thermally interacting heat extraction boreholes. Numerical heat transfer, 13(2), 149-165. (1988)

KOSCHWITZ D., BRÜNTJEN A., CHIVITE A., FRISCH J., VAN TREECK C.: Softwaregestützte Wärmebedarfsermittlung bei Informations- und Ressourcenknappheit, BauSIM 2016, (2016)

Mathieustraße 30, 52074 Aachen
weck@e3d.rwth-aachen.de