Hans Hofinger
Roman Markiewicz
Dietmar Adam
Wolfgang Unterberger

DOI: 10.1002/geot.201000038

Geothermal energy systems for major projects – design and construction

Geothermieanlagen bei Großprojekten – Planung und Umsetzung

The application of geothermal energy has increased in the last couple of years in order to provide the heating or cooling demands of major projects. Open systems using groundwater directly can be used for geothermal energy extraction as well as closed systems with absorber pipes installed in underground structures. An accurate design, which considers the requirements of the energy consumer in particular but also the subsoil- and groundwater conditions, the foundation concept and the building structure, as well as project-specific technical, legal and economic conditions, is required for economically efficient application. Diligent supervision is necessary during the construction stage to avoid any damage to absorber pipes, which could result in loss of performance.

1 Introduction

Due to the uncertainties of the energy market as well as environmental considerations, the exploitation of geothermal energy in Austria has become increasingly popular in recent years. For major projects, which have large areas in contact with the ground or deep foundations as well as by a high requirement for heating or cooling energy, this source of energy can be particularly efficient – providing that design and construction are carefully carried out. The experience gained during the design and implementation of several geothermal systems carried out in the last couple of years or currently under construction is summarised in this article.

2 Basics

Geothermal energy systems are based on the physical principle of heat exchange between an energy consumer (buildings, facilities) and an energy supply system (absorber system, groundwater, subsoil). In the design, the energy exploitation system is adapted to the needs of the user and can be determined according to current standards using input data such as building type and size, usage, heat distribution system, meteorological and location-based conditions. The energy supply system should be able to meet the requirements of the energy distribution system at the defined place and time (Figure 1). Here the essential difference between geothermal energy systems and conventional energy sources such as fossil fuels and biomass has to be taken into account: With conventional systems, the entire deployable quantity of energy during a

Zur Deckung des Heiz- oder Kühlbedarfs bei Großprojekten wird in den letzten Jahren vermehrt auf eine Erdwärmenutzung gesetzt. Dabei kommen sowohl offene Systeme wie eine direkte Grundwassernutzung als auch geschlossene Systeme mit Absorberleitungen in erdberührten Bauteilen zur Anwendung. Für eine wirtschaftliche Umsetzung bedarf es zunächst einer sorgfältigen Planung, wobei insbesondere die Anforderungen des Nutzers, die Untergrund- und Grundwasserverhältnisse, das Gründungskonzept einschließlich der Gebäudestruktur sowie projektspezifische technische, rechtliche und wirtschaftliche Randbedingungen zu berücksichtigen sind. In der Bauphase ist für eine plangemäße Umsetzung mit besonderer Sorgfalt vorzugehen, um Beschädigungen der Absorberleitungen und somit Leistungsminderungen zu vermeiden.

1 Einleitung

Die Nutzung von Geothermie in Österreich erfreut sich in den letzten Jahren durch die Unsicherheiten an den Energiemärkten und aus Umweltschutzgründen stark steigender Beliebtheit. Bei Großprojekten, die durch große erdberührte Flächen oder tiefreichende, statisch erforderliche Bauteile sowie einen hohen Eigenbedarf an Heiz- oder Kühlenergie charakterisiert sind, kann diese Energieform besonders wirtschaftlich genutzt werden – wenn die Grundsätze einer sorgfältigen Planung und Ausführung angewendet werden. In diesem Beitrag werden die Erfahrungen bei der Planung und Umsetzung von mehreren in den letzten Jahren realisierten bzw. sich in Ausführung befindlichen Geothermieanlagen zusammengefasst.

2 Grundlagen

Die Funktion von Geothermieanlagen basiert auf dem physikalischen Prinzip des Wärmetauschs zwischen einem Energienutzungssystem (Gebäude, Anlagen) und einem Energiebereitstellungssystem (Absorbersystem, Grundwasser, Untergrund). Das Energienutzungssystem wird in der Anlagenplanung an die Anforderungen des Nutzers angepasst und kann mit den Eingangsdaten wie Gebäudeart und -größe, Nutzungsart, Wärmeverteilsystem, meteorologische und standortbezogene Gegebenheiten nach der geltenden Normung festgelegt werden. Das Energiebereitstellungssystem soll die zeitlich und räumlich definierten Anforderungen des Energienutzungssys-

 © 2010 Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin

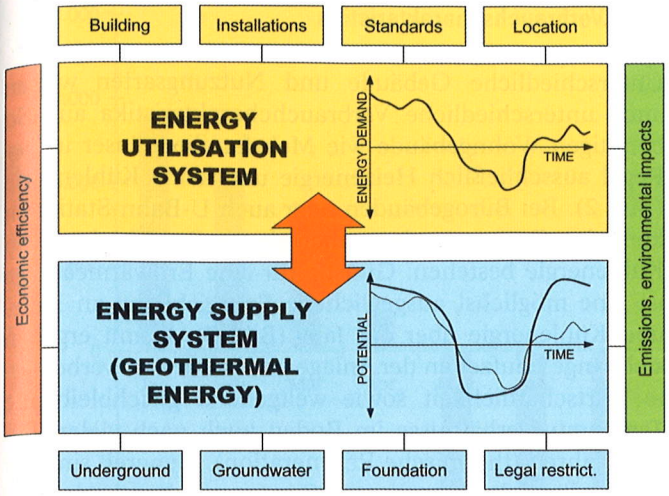


Fig. 1. Overview of the most important influence factors for energy utilisation and absorber system
Bild 1. Übersicht der wichtigsten Einflussfaktoren für Energienutzungs- und -bereitstellungssystem

supply period depends only on the quantity of fuel consumed (at a defined and constant peak output). Geothermal energy systems, however, show more or less dynamic system behaviour, as the temperature of the source of heat in the soil, and therefore the performance of the plant, generally varies depending on the above-mentioned heat exchange cycle. If, however, the essential parameters of the absorber configuration are known, then reliable and low maintenance energy supply systems can be constructed just as with conventional energy sources, and also have the distinguishing benefits of zero emissions and cheaper operating costs.

2.1 User requirements

The use of geothermal energy should be taken into account and investigated as early as possible at the building design stage since the heat distribution system has to be designed to operate constantly at a relatively low feed temperature. This is important so that the necessary heat pumps or chillers can operate in a reasonable range of efficiency.

tems erfüllen können (Bild 1). Dabei muss der wesentliche Unterschied von Geothermieanlagen zu konventionellen Energieträgern wie fossilen Brennstoffen oder Biomasse berücksichtigt werden: Bei konventionellen Systemen hängt die gesamte bereitstellbare Energiemenge über eine Versorgungsperiode lediglich von der Menge der Brennstoffzufuhr ab (bei definierter und gleichbleibender Spitzenleistung). Geothermieanlagen haben dagegen ein mehr oder weniger dynamisches Systemverhalten, da sich die Wärmequellentemperatur im Boden und damit die Anlagenleistung in Abhängigkeit des bereits vorangegangenen Wärmetauschs in der Regel verändern. Durch genaue Kenntnis der wesentlichen Parameter der Absorberauslegung können jedoch wie bei herkömmlichen Energieträgern verlässliche und wartungsarme Energiebereitstellungsanlagen errichtet werden, die sich aber durch die Vorteile der Emissionsfreiheit und günstiger Betriebskosten auszeichnen.

2.1 Anforderungen des Nutzers

Die Nutzung von Erdwärme sollte bereits bei der Gebäudeplanung in einem möglichst frühen Stadium untersucht bzw. berücksichtigt werden, da das Wärmeverteilsystem für eine wirtschaftliche Anwendung dieser Energiequelle konsequent auf Niedertemperatur auszulegen ist. Dies ist erforderlich, damit die erforderlichen Wärmepumpen oder Kältemaschinen in einem günstigen Effizienzbereich arbeiten können.

2.1.1 Nutzungsarten

Erdwärme kann sowohl für die Bereitstellung von Heiz- als auch Kühlenergie herangezogen werden. In der Regel ist für eine Heizanwendung die Installation einer Wärmepumpe erforderlich, welche die Temperatur der Primärenergie (Erdwärme) auf ein nutzbares Niveau für das Sekundärsystem (Heizmedium) anhebt. Im Fall von Kühlanwendungen wird oft auf das System des „Free-Cooling" zurückgegriffen, da hier nur die Pumpenergie für die Nutzung des erdkalten Wärmeträgers benötigt wird. Reicht diese Erdtemperatur nicht (mehr) aus, kann in weiterer Folge eine Kältemaschine zwischengeschaltet werden.

2.1.1 Types of usage

Geothermal energy can be used for the provision of both heating and cooling energy. For heating purposes, the installation of a heat pump is generally required, which raises the temperature of the primary energy (geothermal heat) to a usable level for the secondary system (heating medium). For refrigeration purposes, a „free cooling" is often used, as this only requires the energy for pumping the heat distribution medium cooled by the subsoil. If the subsoil temperature is not sufficient (anymore), a chiller can be interposed.

2.1.2 Consumption characteristics

Different buildings and types of usages also have different consumption characteristics. Generally, residential buildings such as apartment blocks need only heating and no cooling energy (Figure 2). In office buildings or underground stations, on the other hand, there may be a large demand for cooling energy. For a geothermal energy plant, it is beneficial if the heating and cooling energy are balanced over the course of a year (Figure 3). This leads to longer operational periods for the plant and consequently to improved economic efficiency as well as to largely unchanged temperature conditions in the subsoil, even after many years of operation (thermal regeneration). For the reliable prediction of system behaviour, exact data are generally necessary about the energy requirements of the consumer (at least average monthly values of energy demand as well as peak heating and cooling capacities).

To increase the efficiency of a geothermal energy plant, it is sometimes useful to cover only the base load of the energy requirement with geothermal energy and to install additional conventional energy sources (if available) for the peak demand, the bivalent system concept. This results in a higher utilisation efficiency of the geothermal energy plant, since the base loads occur over longer periods.

2.1.2 Verbrauchscharakteristika

Unterschiedliche Gebäude und Nutzungsarten weisen auch unterschiedliche Verbrauchcharakteristika auf. So benötigen Wohngebäude wie Mehrfamilienhäuser in der Regel ausschließlich Heizenergie und keine Kühlenergie (Bild 2). Bei Bürogebäuden oder auch U-Bahn-Stationen kann im Gegensatz dazu aber ein großer Überhang an Kühlenergie bestehen. Günstig für eine Erdwärmeanlage ist eine möglichst ausgeglichene Energiebilanz an Heiz- und Kühlenergie über das Jahr (Bild 3). Damit ergeben sich lange Laufzeiten der Anlage und somit eine verbesserte Wirtschaftlichkeit sowie weitgehend gleichbleibende Temperaturverhältnisse im Boden auch nach vielen Betriebsjahren (thermische Regeneration). Generell sind für eine verlässliche Aussage zum Systemverhalten auch möglichst exakte Angaben zum Energiebedarf des Nutzers erforderlich (zumindest Monatsmittelwerte des Energiebedarfs sowie Spitzenheiz- und Kühlleistungen).

Um die Wirtschaftlichkeit einer Erdwärmeanlage zu steigern, kann es sinnvoll sein, lediglich die Grundlasten des Energiebedarfs über Erdwärme zu decken und die Spitzenlasten – falls verfügbar – mit konventionellen Energieträgern vorzuhalten (bivalentes Anlagenkonzept). Somit ergeben sich noch höhere Nutzungsgrade der Erdwärmeanlage, da die Grundlasten über längere Zeiträume auftreten.

2.2 Untergrund- und Grundwasserverhältnisse

Die Untergrund- und Grundwasserverhältnisse haben einen entscheidenden Einfluss auf die Auswahl der Nutzungsmethode und die Leistungsfähigkeit einer Absorberanlage. Grundsätzlich kann zwischen offenen und geschlossenen Erdwärmesystemen unterschieden werden (Bild 4). Die oft kostengünstigeren Anlagen sind offene Anlagen, wo der Energieinhalt des Grundwassers ohne Zwischenschaltung eines Wärmeträgers direkt genutzt werden kann. Hierfür müssen im Untergrund jedoch aus-

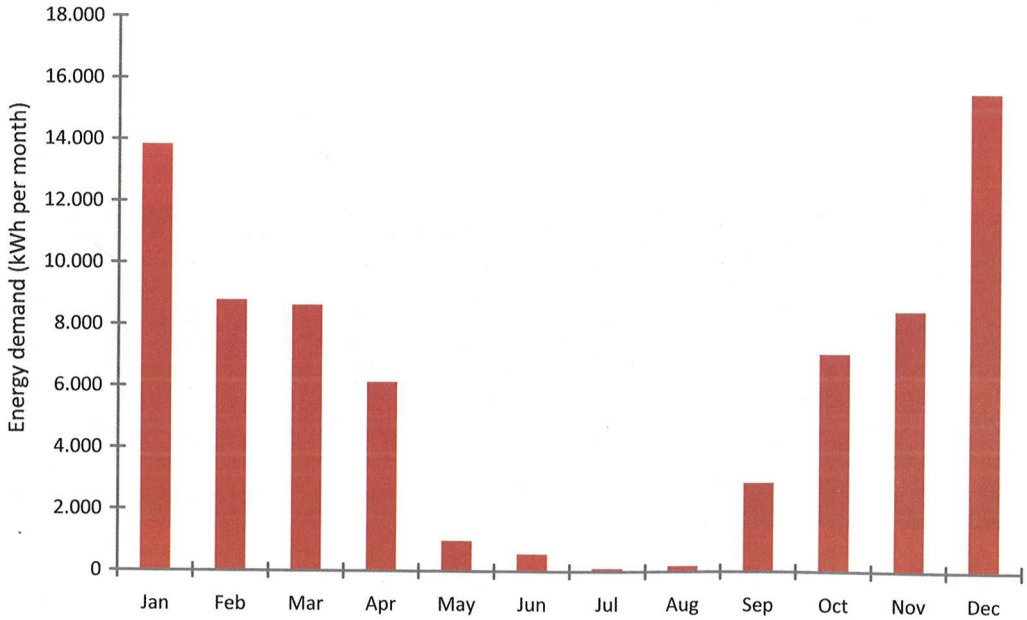


Fig. 2. Monthly energy demand for heating purposes (no energy balance over a year)
Bild 2. Monatlicher Energiebedarf bei reinem Heizbetrieb (unausgewogene Energiebilanz)

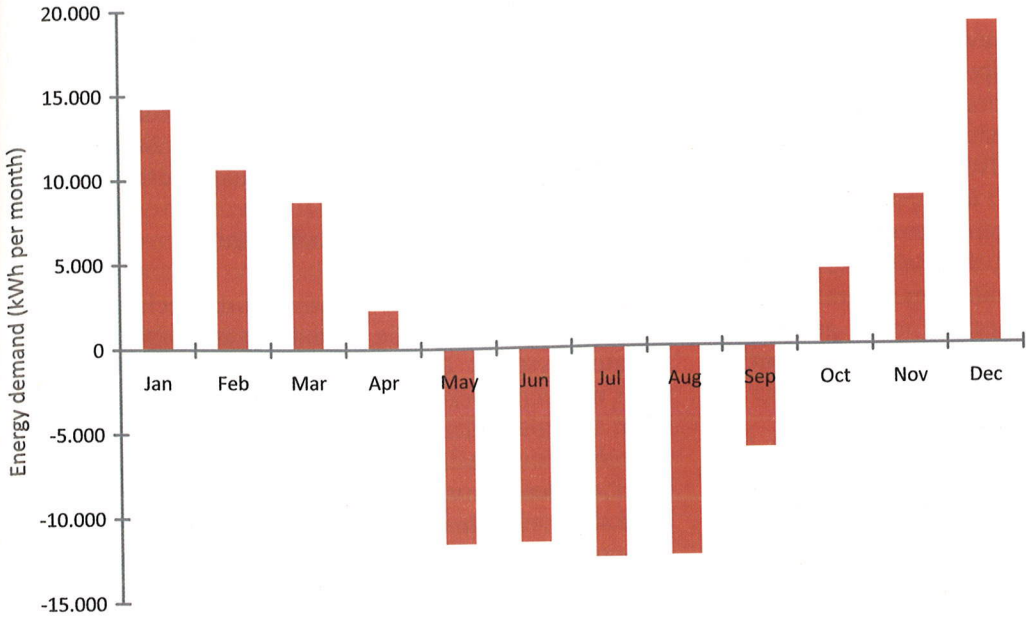


Fig. 3. Monthly energy demand for combined heating and cooling purposes (energy balance over a year)
Bild 3. Monatlicher Energiebedarf bei Heiz- und Kühlbetrieb (ausgeglichene Energiebilanz)

2.2 Subsoil and ground water conditions

The subsoil and ground water conditions have a decisive influence on the choice of distribution system and the performance of an absorber system. Basically, there is a distinction between open and closed geothermal systems (Figure 4). Open systems, where the energy content of the ground water can be used directly without interposing a heat transfer medium, are usually less expensive. This, however, requires suitable aquifers in the subsoil. If these are not available or insufficient, or if there are other obstacles to direct usage (e.g. water law restrictions, chemical composition of the ground water), then closed systems (geothermal probes, massive absorber systems) can be used. The presence of ground water in the subsoil always results in increased performance of geothermal energy systems in comparison to drier soils. However, ground water flow can also have a negative effect if subsoil thermal energy storage is intended during system operation, as the stored heat is then carried away.

reichend grundwasserführende Schichten vorhanden sein. Sind diese nicht oder nicht ausreichend vorhanden oder liegen anderweitige Hindernisse für eine direkte Nutzung vor (z.B. wasserrechtliche Beschränkungen, chemische Zusammensetzung des Grundwassers), können geschlossene Nutzungssysteme (Erdwärmesonden, Massivabsorbersysteme) eingesetzt werden. Im Untergrund vorhandenes Grundwasser führt stets zu höheren spezifischen Anlagenleistungen als bei relativ trockenen Böden. Ist im Anlagenbetrieb auch eine Wärmespeicherung im Untergrund erwünscht, kann ein Grundwasserstrom jedoch auch negative Auswirkungen haben, da die eingespeicherte Wärme wieder abtransportiert wird.

Zu den weiteren Untergrundeigenschaften, welche für die Anlagenauslegung benötigt werden, zählen die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Bodens, seine Dichte und die spezifische Wärmekapazität. Diese Parameter werden bei kleineren Anlagen mit den oft bekannten Bodenklassifizierungen am Standort aus Literaturdaten ermittelt, z.B. aus VDI 4640 [1] oder ÖWAV-Regelblatt 207 [2]. Bei grö-

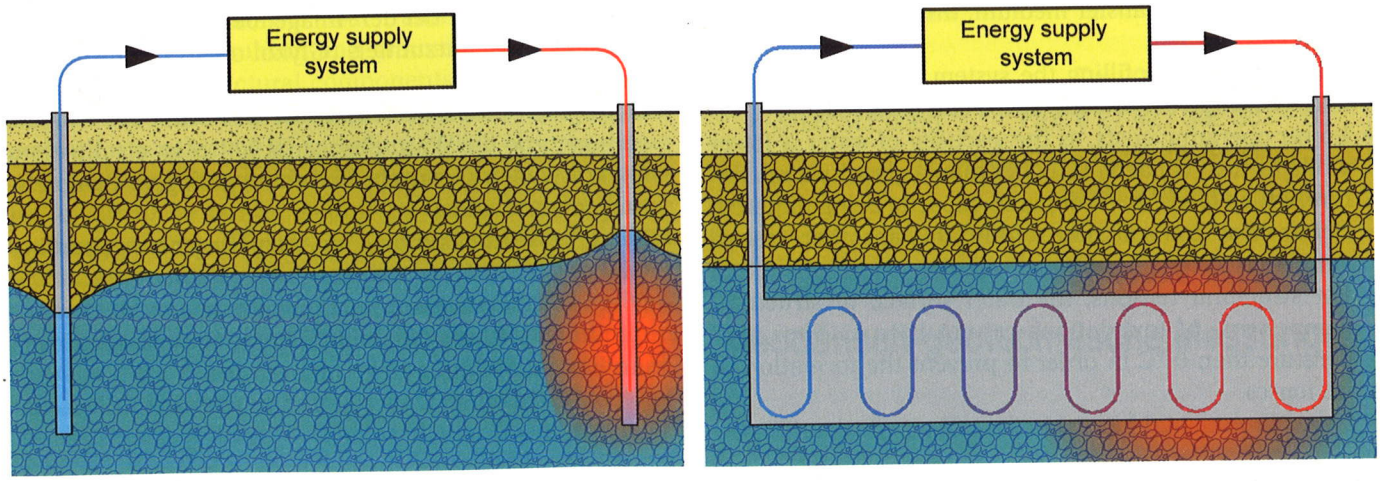


Fig. 4. Functional scheme of an open (left) and closed (right) geothermal energy system
Bild 4. Funktionsschema eines offenen (links) und geschlossenen (rechts) Geothermiesystems

Other subsoil characteristics, which must be known for the plant design, include the average thermal conductivity of the soil, its density and specific heat capacity. For smaller systems, these parameters are often determined by using established soil classifications from the available literature (e.g. VDI 4640 [1] or ÖWAV Regelblatt 207 [2]). For larger systems from about 50 kW upwards, the use of thermal-response tests has become conventional. These tests can determine the average thermal conductivity of the soil as well as the average soil temperature at the location of the plant by using specially made geothermal probes, which can later also be used during operation.

2.3 Foundation concept and building structure

When using the massive absorber technology, the type of foundation primarily determines the choice of system. If the building has a deep foundation, the use of energy piles or energy diaphragm walls is possible whereas an energy slab can be used for buildings with shallow foundations. The size of the building and the plot area determine the arrangement of absorber elements for closed systems and the arrangement of extraction and recharging wells for open systems. The insertion of the building into the subsoil also has to be taken into account as this could change the natural flow of the groundwater. Finally, especially with massive absorber systems, possible thermal short circuit effects have to be considered between the inner side of a structural component and the massive absorber system.

2.4 Technical, legal and economical requirements

The design and implementation of geothermal energy systems are by nature subject to technical limitations. These are mainly defined by maximal temperatures within the absorber system (structural effects on the absorber building elements) or by the minimum temperatures required at structural elements (avoidance of ice lenses).

Additional problems, which may limit the application, are loss of heat due to the main collection lines being too long or loss of pressure due to absorber circuits being too long. The selection of the heat transfer medium is also crucial. A frost-resisting heat transfer medium (glycol-water mixture) is mostly used. If, however, the system is designed in such a way that water without anti-freeze can be used for the heat transfer medium, this has the following advantages:

- Minimal costs for filling the system, as the cost of the anti-freeze (glycol or equivalent) can be saved,
- Lower operating costs, as the viscosity of water is lower while its heat capacity is higher than a glycol-water mixture, which leads to lower pump capacity being required,
- Better heat transmission within the absorber system compared to the glycol-water mixture,
- For structural reasons, the outer surface of structural components of foundations cannot have a lower temperature than 0 °C in order to prevent the formation of ice lenses,
- No environmental hazard in case of pipe leakages.

The legal framework imposed by the authorities is primarily defined by maximum drilling depths for geothermal

ßeren Anlagen ab etwa 50 kW hat sich die Ausführung von Thermal-Response-Tests als Standard etabliert. Bei diesen Tests werden an eigens hergestellten Erdwärmesonden, die aber dann im Betrieb weiterverwendet werden können, die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Bodens sowie die mittlere Bodentemperatur am Standort ermittelt.

2.3 Gründungskonzept und Gebäudestruktur

Bei der Anwendung der Massivabsorbertechnologie bestimmt in erster Linie die Gründungsart die Auswahl des Nutzungssystems. Bei einer Tiefgründung des Gebäudes steht möglicherweise die Anwendung von Energiepfählen oder Energieschlitzwänden zur Verfügung, wohingegen bei einer Flachfundierung eine Energiebodenplatte ausgeführt werden kann. Die Gebäudegröße und die Grundstücksfläche bestimmen die Anordnung der einzelnen Absorberelemente bei geschlossenen Systemen bzw. die Anordnung von Entnahme- und Schluckbrunnen bei offenen Systemen. Weiters ist auch die Einbindung des Bauwerks in den Untergrund zu beachten, da dadurch der natürliche Grundwasserstrom verändert werden kann. Nicht zuletzt sind insbesondere bei Massivabsorbersystemen mögliche thermische Kurzschlusseffekte zwischen dem Bauteilinneren und dem Massivabsorbersystem zu berücksichtigen.

2.4 Technische, rechtliche und wirtschaftliche Anforderungen

Die Planung und Umsetzung von Erdwärmeanlagen unterliegen naturgemäß technischen Anwendungsgrenzen. Diese sind vor allem durch Maximaltemperaturen im Absorbersystem (Auswirkungen auf die Statik der Absorberbauteile) oder durch Minimaltemperaturen bei statisch wirksamen Bauteilen (Eislinsenbildung) gegeben. Auch Wärmeverluste durch zu lange Sammelleitungen oder zu hohe Druckverluste bei langen Absorberkreisen können die Anwendung beschränken. Wesentlich ist auch die Wahl des Wärmeträgers. Üblicherweise kommt in Absorbersystemen ein frostgeschützter Wärmeträger (Glykol-Wasser-Gemisch) zum Einsatz. Wird jedoch die Anlagenauslegung und -planung derart durchgeführt, dass als Wärmeträger Wasser ohne Beimischung von Frostschutz zur Anwendung kommen kann, bieten sich folgende Vorteile gegenüber einem frostgeschützten Wärmeträger:

- Minimale Kosten bei der Anlagenbefüllung, da die Kosten des Frostschutzmittels (Glykol oder Gleichwertiges) entfallen,
- Geringere Betriebskosten, da die Viskosität des Wassers geringer und die Wärmekapazität höher ist als die eines Glykol-Wasser-Gemischs und somit geringere Pumpleistungen ausreichen,
- Besserer Wärmeübergang im Absorbersystem gegenüber Glykol-Wasser-Gemisch,
- Die Außenflächen von Fundamentbauteilen dürfen aus statischen Gründen ohnehin nicht unter 0 °C abkühlen, um Eislinsenbildung zu verhindern,
- Keine schädlichen Umweltauswirkungen bei Rohrleckagen.

Rechtliche Rahmenbedingungen werden vor allem durch die gesetzlich geregelte Bohrtiefe von Erdwärmesonden

probes and by predetermined temperature limits. The limits of cost-effectiveness compared to other forms of energy supply are the amortisation period and annuity. These boundary conditions are usually defined by the client for a specific project, so an economic efficiency calculation (e.g. DIN 2067 [3]) should be an integral part of the design. Geothermal energy systems are usually characterised by higher investment costs but often very low operational costs compared to conventional energy sources.

3 Design of absorber systems
3.1 Power engineering

The performance of the energy supply system has to be verified with the requirements of the energy distribution system, and the components have to be designed and planned accordingly. The main difference is between open and closed systems.

3.1.1 Open systems

With open systems, the ground water is used directly as a heat transfer medium. It is extracted from the ground water using extraction wells, heated in a refrigerating machine or cooled in a heat pump and then fed back to the aquifer using recharge wells. It is necessary to verify the thermal efficiency of the plant components and also the hydraulic capacity.

No closed analytical calculation methods exist for the calculation of the extent of temperature changes caused by the discharge of heated or cooled water into the ground water, which are able to consider all thermal and hydraulic processes. For smaller systems, the method according to *Ingerle* [2] for example, can be used to estimate the extent of the thermal front (temperature change with a difference to the unaffected groundwater of > 1 K). For more complex systems with several wells, large extraction quantities or difficult geological conditions, one has to revert to three-dimensional modelling with special numerical simulation programs (e.g. Comsol Multiphysics [4]), which enable a coupled calculation of thermal and hydraulic problems (Figure 5).

3.1.2 Closed Systems

With closed systems, the heat transfer medium is kept separate from the subsoil and groundwater. The advantage is that the structural components themselves can be activated to store heat in a massive absorber system. This activation is achieved by installing plastic absorber pipes with a nominal diameter of 25 mm or 32 mm and a spacing of 20 to 40 cm in diaphragm walls, bored piles or foundation slabs (Figure 6). The heat transfer medium will be pumped through these pipes to conduct heat to or extract it from the structural components. With a temperature difference of about 3 to 5 K between feed and return flows in the absorber system, the heating capacity can be calculated using the mass flow and the heat capacity of the heat transfer medium. The particular design task now is to acquire the required heating capacity and energy quantities from the structural absorber components according to the specifications of the energy distribution

und durch behördlich vorgegebene Temperaturgrenzen definiert. Zu den wirtschaftlichen Grenzen zählt die Amortisationszeit bzw. die Annuität im Vergleich zu anderen Formen der Energieversorgung. Diese Grenzen werden meist projektspezifisch vom Bauherrn definiert, sodass eine Wirtschaftlichkeitsberechnung (z.B. nach DIN 2067 [3]) fixer Bestandteil der Planung sein sollte. Erdwärmeanlagen zeichnen sich meist durch höhere Investitionskosten bei oft sehr niedrigen Betriebskosten gegenüber konventionellen Energieträgern aus.

3 Planung von Absorberanlagen
3.1 Energietechnik

Mit den Anforderungen des Energienutzungssystems müssen die Leistungsfähigkeit des Energiebereitstellungssystems überprüft und die Anlagenteile entsprechend ausgelegt und geplant werden. Dabei muss vom Prinzip her zwischen offenen und geschlossenen Systemen unterschieden werden.

3.1.1 Offene Systeme

Bei offenen Systemen wird das Grundwasser direkt als Wärmeträger genutzt. Es wird an Entnahmebrunnen dem Grundwasserkörper entzogen, in einer Kältemaschine erwärmt bzw. in einer Wärmepumpe abgekühlt und über Schluckbrunnen dem Grundwasserkörper wieder zugeführt. Dabei muss einerseits die thermische Leistungsfähigkeit der Anlagenteile als auch die hydraulische Kapazität überprüft werden.

ZT

Ingenieurkonsulent für Vermessungswesen

Dipl.-Ing. Dr. Karl Strobl

Heßstraße 14
A-3100 St.Pölten

Tel.: 0 27 42 / 352 987
Fax: 0 27 42 / 352 987 – 35
sanktpoelten@geometer-strobl.at
www.geometer-strobl.at

Geodätisch-geotechnische Messungen

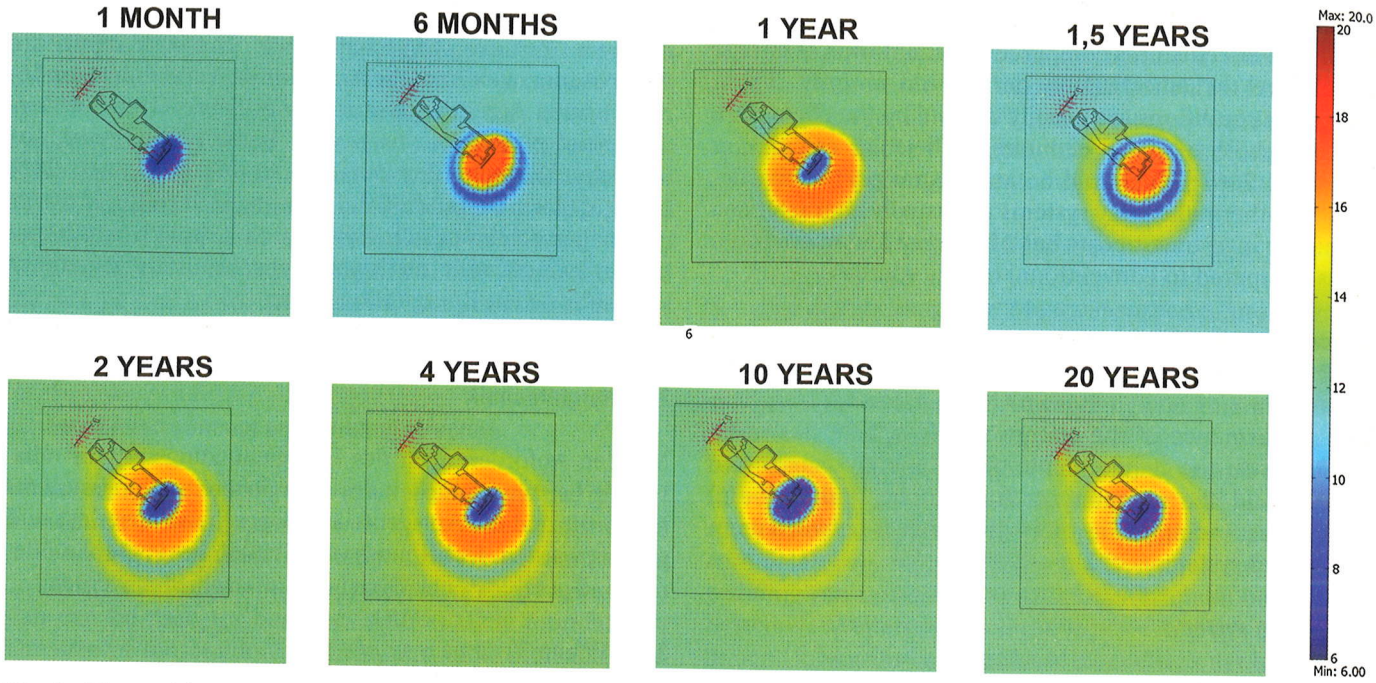


Fig. 5. Thermal front for direct groundwater usage (plan view) considering a coupled thermal-hydraulic simulation: during a heating period, cold water (8 °C) will be recharged and during cooling period warmer water (16 °C) will be recharged
Bild 5. Reichweite der Temperaturfront bei einer direkten Grundwassernutzung (Grundrissdarstellung) durch eine gekoppelte hydraulisch-thermische Simulationsberechnung: An der Versickerungsstelle wird während der Heizperiode 8 °C kaltes Wasser und während der Kühlperiode 16 °C warmes Wasser rückgeführt

system while also keeping track of the construction sequence and the cost.

Software packages are available for the design of smaller absorber systems or systems with regular shapes, including for example the software EED [5] for systems with geothermal probes and the PILESIM software package [6] for systems with bored piles. For more complex boundary conditions and combinations of structural absorber components, with shaft structures for example, the designer has to resort to numerical calculations in order to achieve more precise results (Figure 7). These methods can also display the effects on the groundwater flow. In addition to verifying the thermal capacity, the hydraulic capacities of the absorber pipes also have to be investigated, as the pressure loss in the main collector pipes, manifolds and absorber circuits directly affects the operational costs. As a general rule, the required pump power should only account for a couple of percent of the thermal capacity.

3.2 Construction

The technical concept of an absorber system should be adapted as well as possible to the planned civil engineering construction schedule in order to avoid additional working steps, expensive structures and consequently to reduce the costs to a minimum. It is essential, however, to clearly define the system components in the design as well as to inspect and document the construction through continuous site supervision. The incorporation of the geothermal system into the structural and civil works of the building contract has proved to be beneficial, as the contractor is then liable for the quality of the works as well as the manufacturer of the geothermal energy plant.

Für die Berechnung der Temperaturanomalien (Temperaturfahnen), die durch die Einleitung von erwärmtem oder abgekühltem Grundwasser entstehen, existieren keine geschlossenen analytischen Rechenverfahren, die alle thermischen und hydraulischen Prozesse beschreiben. Zur Abschätzung der Ausbreitung der Thermalfront (Temperaturfahne mit einer Temperaturdifferenz zum unbeeinflussten Grundwasser von > 1 K) kann bei kleineren Anlagen aber beispielsweise mit dem Verfahren nach *Ingerle* [2] gearbeitet werden. Bei komplexeren Anlagen mit mehreren Brunnen, großen Entnahmemengen oder schwierigeren geologischen Verhältnissen muss jedoch auf die dreidimensionale Modellierung mit speziellen numerischen Simulationsprogrammen (z.B. Comsol Multiphysics [4]) zurückgegriffen werden, die eine gekoppelte Berechnung von thermischen und hydraulischen Aufgabestellungen erlauben (Bild 5).

3.1.2 Geschlossene Systeme

Geschlossene Systeme besitzen einen vom Grundwasser und dem Untergrund getrennten Wärmeträger. Bei Massivabsorbersystemen bietet sich hier der Vorteil, dass auch die massigen Bauteile selbst als Wärmespeicher aktiviert werden können. Diese thermische Aktivierung wird durch den Einbau von Kunststoff-Absorberleitungen mit Querschnitten von DN 25 mm oder DN 32 mm und Abständen zwischen 20 und 40 cm in Schlitzwände, Bohrpfähle oder Bodenplatten erreicht (Bild 6). Durch diese Rohrleitungen wird später der Wärmeträger gepumpt und den Bauteilen Wärme zu- oder abgeführt. Mit der Temperaturdifferenz von etwa 3 bis 5 K zwischen Vor- und Rücklauf des Absorbersystems kann mit dem Massenstrom und der Wärmekapazität des Wärmeträgers die Wärmeleistung errechnet

Fig. 6. A – Mounting of absorber pipes in a reinforcement cage of an energy pile; B – Absorber pipes in a reinforcement cage of an energy diaphragm wall; C – Absorber pipes on an energy slab; D – Absorber pipes on a tunnel invert
Bild 6. A – Verlegung von Absorberleitungen im Bewehrungskorb eines Energiepfahls; B –Absorberleitungen am Bewehrungskorb einer Energieschlitzwand; C – Absorberleitungen für eine Energiebodenplatte; D Absorberleitungen in einer Tunnelsohle

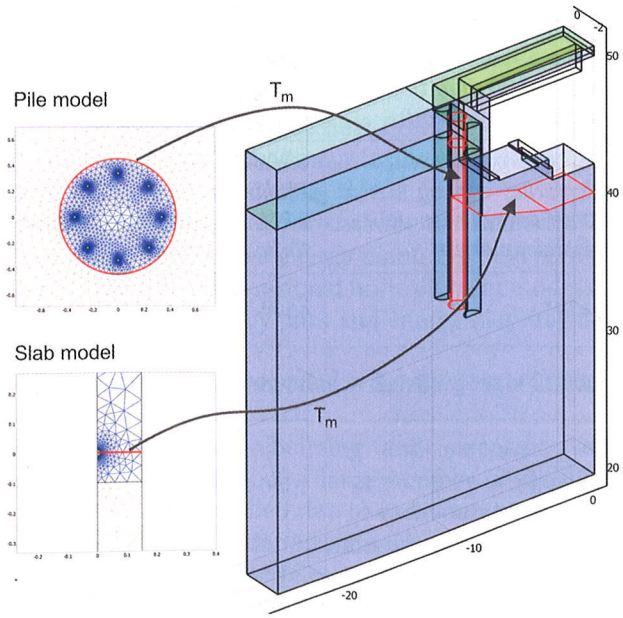


Fig. 7. Building model and detailed member models for a coupled simulation
Bild 7. Gesamt- und Detailmodelle für eine gekoppelte Simulation

werden. Die besonderen planerischen Aufgaben bestehen nun darin, entsprechend den Vorgaben des Energienutzungssystems, einerseits die erforderlichen Wärmeleistungen und Energiemengen aus den möglichen Absorberbauteilen zu beziehen, und andererseits den Bauablauf und die Kosten der Herstellung im Auge zu behalten.

Bei der Dimensionierung der Absorberanlagen kann bei kleineren Anlagen bzw. solchen mit regelmäßigen Geometrien auf fertige Softwarepakete zurückgegriffen werden. Beispielsweise existiert für Erdwärmesondenanlagen die Software EED [5] bzw. für Pfahlanlagen das Paket PILESIM [6]. Bei komplexeren Randbedingungen und Kombinationen von Absorberbauteilen, wie sie beispielsweise bei Schachtbauwerken vorherrschen, muss aber für exaktere Berechnungen wieder auf numerische Simulationspakete zurückgegriffen werden (Bild 7). Mit diesen Methoden lassen sich auch die Einflüsse von Grundwasserströmungen abbilden.

Zusätzlich zur Überprüfung der thermischen Leistungsfähigkeit müssen auch die hydraulischen Kapazitäten der Absorberleitungen überprüft werden, da die Druckverluste von Sammelleitungen, Verteilern und Ab-

4 Implementation – examples of projects

Geothermal energy has now been exploited for the heating and air conditioning of buildings for several decades. As a result of the experience gained mostly from smaller projects, as well as the development of suitable design and simulation tools, this concept is now increasingly being used on major projects, especially in the last ten years. In 2001 construction started of the pilot geothermal energy plant on Lainzer Tunnel contract LT24, where massive absorber technology was used for the first time in a tunnel structure. The knowledge gained with this plant subsequently led to further major applications on infrastructure projects, like for example the four new stations in the Vienna Underground U2/1 to U2/4, which went operational in July 2008. Further major applications are the Lainzer Tunnel contract LT44, which features a solid absorber system and also the newly constructed building for the University for Economics in Vienna, which uses an open system with direct use of groundwater. Geothermal energy is also being used at new stations for Austrian Federal Railways and the geothermal energy systems at the new stations in Salzburg and Vienna are described below. The main parameters of the systems are summarised in Table 1.

4.1 Major application at Vienna Main Station

On the Vienna Main Station project, massive absorber technology is implemented using energy piles and energy foundation slabs to exploit geothermal energy. For the tender design, it was necessary to simulate the projected geothermal energy plant to verify the functional capability

sorberkreisen direkt in die Betriebskosten solcher Anlagen eingehen. In der Regel sollten die erforderlichen Pumpleistungen nur wenige Prozent der thermischen Leistungen ausmachen.

3.2 Bautechnik

Die technische Konzeption der Absorberanlagen sollte möglichst gut an den vorgesehenen Ablauf von Tiefbauvorhaben angepasst sein, um vermeidbare zusätzliche Arbeitsschritte, aufwändige Konstruktionen und damit Kosten zu minimieren. Dennoch ist es unerlässlich, die Anlagenteile mittels einer detaillierten Planung klar zu definieren und die Ausführung durch eine durchgängige Bauüberwachung zu kontrollieren und zu dokumentieren. Die Eingliederung der Erdwärmeanlagen in die Bauverträge der Roh- bzw. Tiefbauarbeiten hat sich hier als sehr günstig erwiesen, da sowohl das Bauunternehmen als auch der Hersteller der Erdwärmeanlage für die Qualität der Ausführung verantwortlich sind.

4 Umsetzung – Projektbeispiele

Die Nutzung der Erdwärme zur Gebäudeklimatisierung wird mittlerweile bereits seit mehreren Jahrzehnten eingesetzt. Durch die Erfahrungen, die vorwiegend bei kleineren Projekten gemacht wurden, sowie die Entwicklung von geeigneten Planungs- und Simulationsprogrammen kam es insbesondere in den letzten rund zehn Jahren zu einem verstärkten Einsatz bei Großprojekten. Im Jahr 2001 wurde mit dem Bau der Erdwärme-Pilotanlage am Lainzer Tunnel Baulos LT24 begonnen, bei dem erstmalig

Table 1. Parameters of the geothermal energy systems at Vienna Main Station and Salzburg Main Station
Tabelle 1. Kenngrößen der Absorberanlagen am Hauptbahnhof Wien und Hauptbahnhof Salzburg

Parameter *Kenngrößen*	Main station Vienna *Hauptbahnhof Wien*	*Main station Salzburg* *Hauptbahnhof Salzburg*
Absorber building elements *Absorberbauteile*	Energy piles (bored) Energy base slab *Energiepfähle (gebohrt)* *Energiepfähle (gerammt)*	Energy piles (driven) geothermal probes *Energiebodenplatten* *Erdwärmesonden*
Absorber areas or lengths *Absorberflächen bzw. -längen*	8,510 m^2 energy piles/ *Energiepfähle* 24,200 m^2 energy base slab/ *Energiebodenplatten*	6,600 m pile probes/ *Pfahlsonden* 2,835 m geothermal probes/ *Erdwärmesonden*
Peak heating capacity *Spitzenleistung Heizen*	1,000 kW*	450 kW
Peak cooling capacity *Spitzenleistung Kühlen*	570 kW*	650 kW
Annual geothermal energy production for heating purposes (incl. energy for heat pumps) *Jährlicher Energiebezug aus Geothermie für Heizzwecke (inkl. Energie für Wärmepumpen*	2,000 MWh*	1,110 MWh
Annual geothermal energy production for cooling purposes (usable cooling capacity) *Jährlicher Energiebezug aus Geothermie für Kühlzwecke (Nutzkälte)*	800 MWh*	810 MWh

* State of design May 2010
* *Planungsstand Mai 2010*

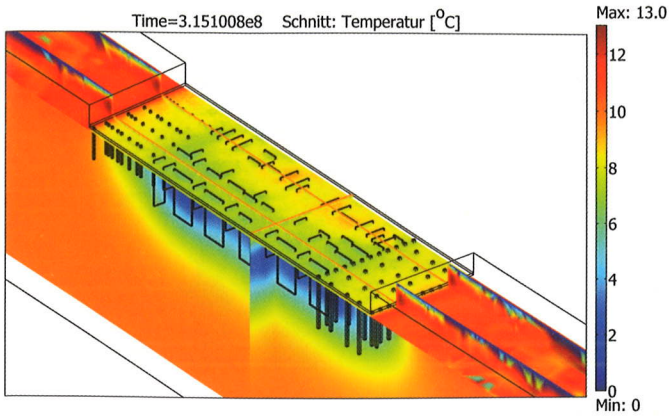


Fig. 8. Results of the temperature distribution (section) on a 3D-model for Vienna Main Station
Bild 8. Ergebnis (Schnittdarstellung) der dreidimensionalen thermischen Simulationsberechnung für den Hauptbahnhof Wien

and also to enable optimisation of the plant. In order to consider the complex shapes of the main station including its foundation elements, a three-dimensional simulation model was generated in which all massive absorber components were modelled, including the basement floors.

The thermal characteristics of the subsoil (undisturbed soil temperature, thermal conductivity) had previously been determined with thermal response tests on two thermal probes and had been included in the calculation model. The heating and cooling requirements, which basically constitute the thermal "load" of the structural foundation components/absorber components, had been determined by the institute *arsenal research* using a comprehensive building simulation. This building simulation covered the whole structure of the station including all thermal boundary conditions such as solar radiation, indoor temperatures, outside temperatures, lost heat and a simplified soil model in order to demonstrate the interaction between energy demand (within the building) and the energy supply (from the geothermal energy plant and district heating), taking the heat pump of the plant into account.

The seasonally varied heat flows at the absorber surfaces (bored piles, diaphragm walls, foundation slabs) as well as thermal conditions in the garage car park represented the energetic input data for the numerical simulation of the geothermal energy plant. Figure 8 shows a section of the three-dimensional finite element model with the arrangement of energy piles and energy diaphragm walls.

4.2 Use of ductile driven piles at Salzburg main Station

In course of the rebuilding and extension works at Salzburg Main Station, a large number of ductile driven piles had to be installed due to unfavourable geotechnical conditions (the foundation slabs are situated just above the lacustrine clay). These piles were installed to depths of up to 35 m. Most of the piles in the area of the station underpass are not only used for structural but also for geothermal purposes. In total 440 piles with 15 m long pile probes were installed, which consist of simple U-probes (32 × 2.9 mm). The prefabricated probes were installed into the

die Massivabsorbertechnologie in einem Tunnelbauwerk eingesetzt wurde. Die Erfahrungen mit dieser Anlage führten schließlich zu weiteren Großanwendungen bei Infrastrukturbauten wie die vier neu errichteten Wiener U-Bahn-Stationen U2/1 bis U2/4, die im Jahr 2008 in Betrieb genommen wurden. Zu weiteren Großanwendungen zählt das Lainzer Tunnel Baulos LT44 mit einer Massivabsorberanlage sowie die offene Grundwassernutzung beim Neubau der Wirtschaftuniversität Wien. Auch bei neuen Bahnhöfen der Österreichischen Bundesbahnen wird auf Erdwärme gesetzt, wobei die Geothermieanlagen der neuen Hauptbahnhöfe in Wien und Salzburg im Folgenden näher vorgestellt werden. Die wesentlichen Kenngrößen der Anlagen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

4.1 Großanwendung beim Hauptbahnhof Wien

Beim Neubau des Hauptbahnhofs Wien wird die Massivabsorbertechnologie in Form von Energiepfählen und Energiebodenplatten zur Nutzung der Erdwärme eingesetzt. Für die Ausschreibungsplanung war es erforderlich, den Betrieb der geplanten Erdwärmeanlage zu simulieren, um einerseits die Funktionsfähigkeit nachzuweisen und andererseits eine Optimierung der Anlage durchführen zu können. Zur Berücksichtigung der komplexen Geometrie des Hauptbahnhofs, inklusive dessen Gründungselemente, wurde erstmals ein dreidimensionales Simulationsmodell erstellt, bei dem sämtliche Massivabsorberelemente inklusive der Kellergeschosse modelliert wurden.

Die thermischen Untergrundeigenschaften (ungestörte Erdreichtemperatur, Wärmeleitfähigkeit) wurden bereits im Vorfeld mit Thermal Response Tests an zwei Erdwärmesonden bestimmt und im Berechnungsmodell berücksichtigt. Der Heiz- und Kühlbedarf, der quasi die thermische „Belastung" der Gründungselemente bzw. Absorberelemente darstellt, wurde im Rahmen einer gesamtheitlichen Gebäudesimulation – durchgeführt von *arsenal research* – ermittelt. Diese Gebäudesimulation umfasste den kompletten Hochbau der Verkehrsstation inklusive aller thermischen Randbedingungen wie Sonneneinstrahlung, Innentemperaturen, Außentemperatur und Abwärme sowie ein vereinfachtes Bodenmodell, um die Interaktion zwischen Energiebedarf (im Gebäude) und Energiedargebot (durch Erdwärmeanlage und durch Fernwärme) unter Berücksichtigung der Wärmepumpe für die Erdwärmeanlage abzubilden.

Die mit der Jahreszeit variierenden Wärmeströme an den Absorberflächen (Bohrpfähle, Schlitzwände, Bodenplatten) sowie die Temperaturverhältnisse in der Garage waren die energetischen Eingangsdaten für die numerische Simulation der Erdwärmeanlage. Bild 8 zeigt einen Ausschnitt aus dem dreidimensionalen Finite-Elemente-Modell mit der Anordnung von Energiepfählen und Energieschlitzwänden.

4.2 Nutzung duktiler Rammpfähle am Hauptbahnhof Salzburg

Im Zuge des Um- und Ausbaus am Hauptbahnhof Salzburg wurden aufgrund der schlechten Baugrundverhältnisse – die Fundamentplatten kommen knapp oberhalb des Seetons zu liegen – eine Vielzahl an duktilen Rammpfählen in den Boden gerammt. Diese wurden in Tiefen bis

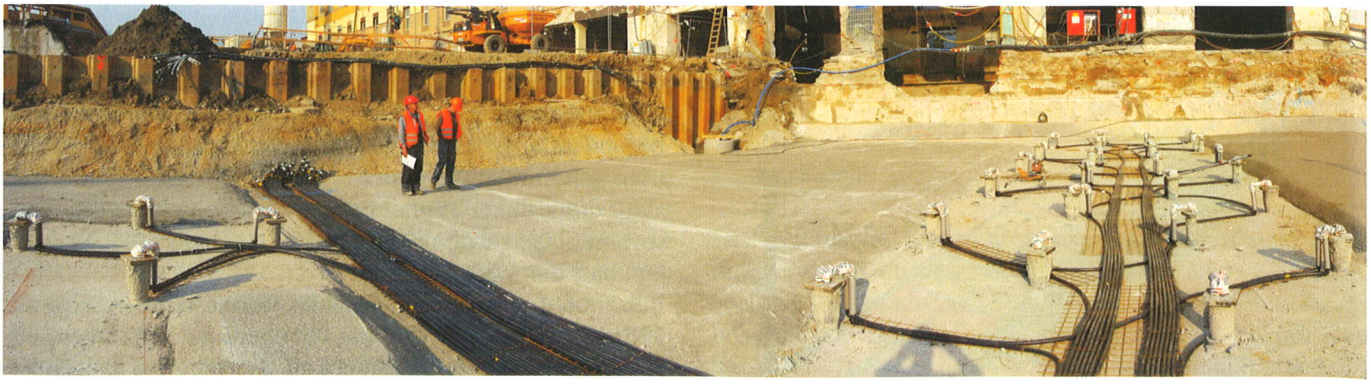


Fig. 9. Driven energy piles and connection pipes at Salzburg Main Station
Bild 9. Energie-Rammpfähle und Anbindeleitungen am Hbf Salzburg

wet pile concrete immediately after the driving of the piles using extendable push bars. Because of resistances during the installation (buoyancy, friction on concrete and pile tube), the depth is limited to about 15 to 16 m unless heavy equipment is used, but the use of mechanical force, for example with an excavator, was avoided due to the risk of damaging the probe. Because of the high degree of material utilisation of the pile head, the two probe pipes were led through the pile head slab and then directed back into the blinding layer beneath the future foundation slab (Figure 9). Three pile probes were connected to each circuit in order to save pipe lengths to the distributors. The connecting lines were routed in sections to the manifold locations and covered with a protective layer of concrete after pressure and flow tests. The reinforcement of the foundation slab was then fixed on top of this layer. After installing the surrounding walls, the connecting lines were then led through a duct above the groundwater table and connected to the main collecting lines using manifolds. In addition to the

zu 35 m eingebracht. Der Großteil dieser Pfähle im Bereich der Bahnhofspassage wird nicht nur statisch, sondern auch thermisch genutzt. Insgesamt etwa 440 Rammpfähle wurden mit 15 m langen Pfahlsonden ausgestattet. Diese bestehen aus Einfach-U-Sonden (32 mm × 2,9 mm). Die vorgefertigten Sonden wurden unmittelbar nach dem Rammen des Pfahles in den noch weichen Pfahlbeton mittels verlängerbaren Druckstangen eingebaut. Aufgrund der Widerstände beim Einbringen (Auftrieb, Reibung mit dem Beton und am Pfahlrohr) ist die Einbringtiefe ohne Zuhilfenahme von schwererem Gerät mit etwa 15 bis 16 m begrenzt. Auf ein maschinelles Eindrücken, z.B. mit einem Bagger, wurde wegen der Beschädigungsgefahr der Sonden bewusst verzichtet. Durch die hohe Materialauslastung des Pfahlkopfs wurden die zwei Sondenrohre durch die Pfahlkopfplatte geführt und dann wieder in die Sauberkeitsschichte unterhalb der späteren Bodenplatte geleitet (Bild 9). In der Regel wurden jeweils drei Pfahlsonden zu einem Kreis zusammengeschlossen,

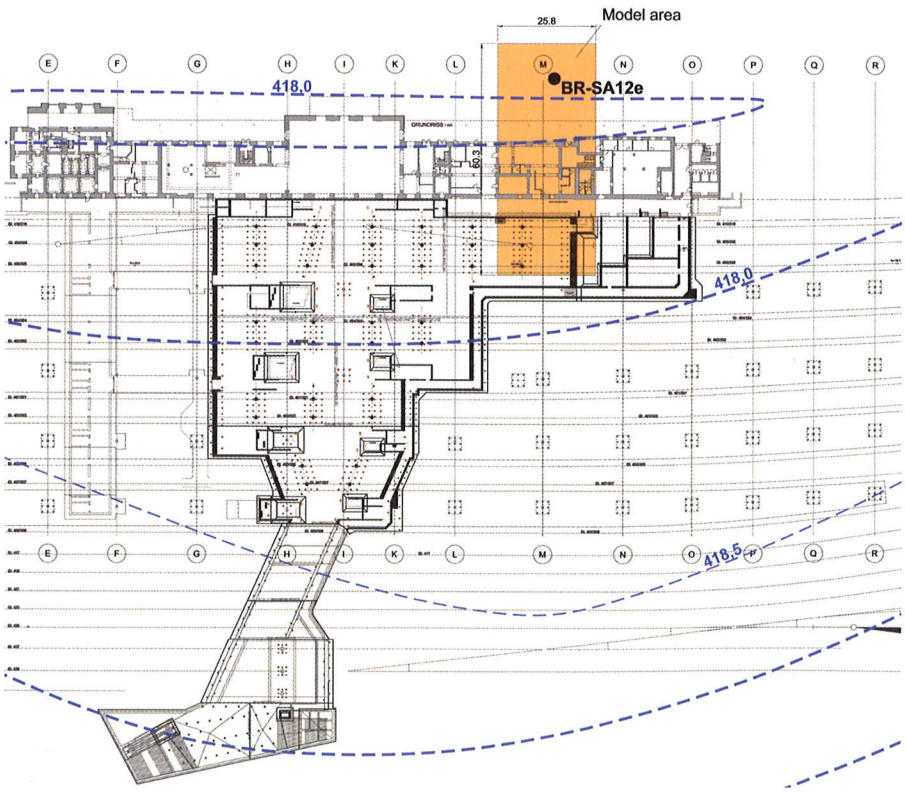


Fig. 10. Model area for thermal simulations at Salzburg Main Station
Bild 10. Modellbereich für die Simulation am Hbf Salzburg

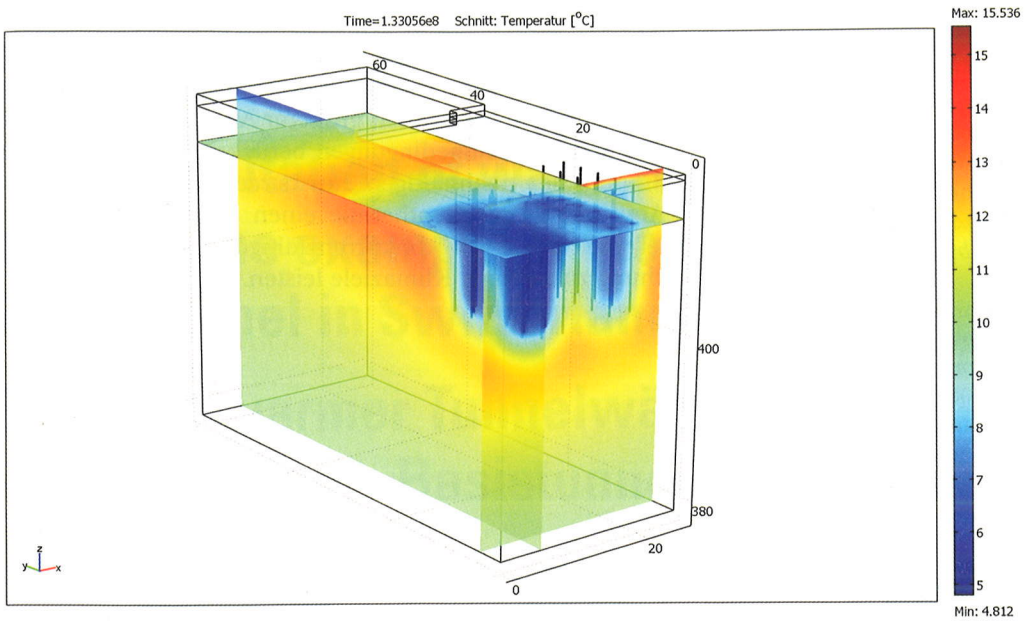


Fig. 11. Simulation model with temperature distribution considering ground water flow.
Bild 11. Temperaturverteilung im Modellbereich mit Berücksichtigung der Grundwasserströmung

driven energy piles, 21 thermal probes were installed at a depth of 135 m (simple-U 40 × 3.7 mm). The appropriate design layout of the geothermal plant enabled water without the addition of an anti-freezing agent to be utilised as the heat transfer medium

The effect of the geothermal plant on nearby water concessions had to be analysed as part of the submission under Austrian water legislation. In this case, a groundwater extraction well for groundwater balance purposes at the adjacent, lower-level regional train station was identified as the nearest concession (Figure 10). The groundwater flow within the Quaternary towards the river Salzach had a significant influence and had to be considered in the creation of the model. The model displays one part of the absorber system, situated upstream of the reference point. Due to the prevalent boundary conditions, only a three-dimensional model could provide meaningful results (Figure 11). In order to assess the influence of the absorber system on the temperature in the well, two models (the absorber system being operational or not operational respectively) were calculated over the course of several years of operation. Comparing both temperatures at the reference point, the model showed a difference of less than 0.5 K resulting from the operation of the absorber system.

5 Summary and future prospects

The use of geothermal energy provides an environmental friendly, resource-saving and economically efficient energy source for structures, especially if the foundations are already suitable for geothermal activation. Based on a number of applications on major projects, it has been shown that the technical challenges can be solved during the design stage and that the implementation can be integrated in the normal construction sequence. Particularly the progress in the development of simulation tools has enabled more precise statements regarding the system behaviour of larger systems and more complex boundary conditions can be taken into account. In accord with the sustainable use of resources, the application of geothermal energy can make a safe and already economically competitive contribution to reaching future emission targets.

um Leitungslänge zu den Verteilern zu sparen. Die Anbindeleitungen wurden abschnittsweise zu den Verteilerstandorten geführt und nach Durchgangs- und Druckprüfung mit einer Schutzbetonschicht abgedeckt. Darauf konnte nun die Bewehrung der Bodenplatte aufgebracht werden. Die Anbindeleitungen wurden nach Herstellung der Umfassungswände oberhalb des Grundwasserspiegels in einen Kollektorgang geführt und dort über Sammler und Verteiler mit den Sammelleitungen verbunden. Zusätzlich zu den Energie-Rammpfählen wurden 21 Erdwärmesonden mit einer Tiefe von 135 m hergestellt (Einfach-U 40 mm × 3,7 mm). Als Wärmeträger konnte durch die geeignete Anlagenauslegung Wasser ohne Beigabe von Frostschutz verwendet werden.

Im Zuge der wasserrechtlichen Einreichung musste auch der Einfluss der Erdwärmeanlage auf benachbarte Wasserrechte untersucht werden. Dabei wurde ein Entnahmebrunnen für den Grundwasserausgleich am tiefliegenden, benachbarten Lokalbahnhof als nächstgelegenes Wasserrecht identifiziert (Bild 10). Die im Quartär vorhandene Grundwasserströmung in Richtung Salzach war von großem Einfluss und musste in der Modellbildung berücksichtigt werden. Der Modellbereich bildet einen Teil der Absorberanlage oberstromig des Referenzpunktes ab. Aufgrund der vorhandenen Randbedingungen konnte nur ein dreidimensionales Modell aussagekräftige Ergebnisse liefern (Bild 11). Für die Bewertung der Einflüsse der Absorberanlage auf die Temperatur im Brunnen wurden zwei Modelle – ohne und mit Absorberbetrieb – über mehrere Betriebsjahre gerechnet. Der Vergleich der Temperaturen am Referenzpunkt lieferte Differenzen aufgrund des Absorberbetriebs von weniger als 0,5 K.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Geothermienutzung ermöglicht eine umweltfreundliche, ressourcenschonende und wirtschaftliche Energieversorgung von Bauwerken, besonders wenn schon die Gründungsmaßnahmen eine thermische Aktivierung ermöglichen. Anhand immer zahlreicher werdender Anwendungen bei Großprojekten konnte gezeigt werden, dass die technischen Herausforderungen in der Planung gelöst

References

[1] VDI 4640 Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrunds, Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte *(Thermal exploitation of subsoil: basics, approvals, environmental aspects)*. Verein Deutscher Ingenieure, 2008.

[2] ÖWAV-Regelblatt 207: Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen *(Thermal exploitation of groundwater and subsoil – heating and cooling)*. 2. Auflage. Wien, 2009.

[3] VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen und Kostenberechnung *(Cost-effectiveness of building services plant and cost estimation)*. Verein Deutscher Ingenieure. Überprüfte Neuausgabe 2007.

[4] Program Comsol Multiphysics, Comsol AB, Sweden.

[5] Program Earth Energy Designer. www.buildingphysics.com.

[6] Program Pilesim. Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana.

und die Umsetzung in den üblichen Bauablauf integriert werden konnten. Speziell durch die Weiterentwicklung von Simulationswerkzeugen können nun genauere Aussagen zum Systemverhalten größerer Anlagen gemacht und komplexere Randbedingungen berücksichtigt werden. Im Sinne einer nachhaltigen Ressourcennutzung kann die Anwendung der Geothermie einen sicheren und schon jetzt wirtschaftlich konkurrenzfähigen Beitrag zur Erreichung zukünftiger Klimaziele leisten.

Dipl.-Ing. Hans Hofinger
j.hofinger@ic-group.org

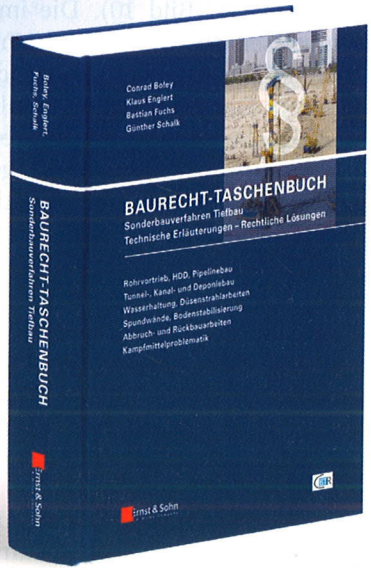
Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Unterberger
w.unterberger@ic-group.org

Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Markiewicz
roman.markiewicz@geotechnik-adam.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam
dietmar.adam@geotechnik-adam.at

Both:
iC consulenten ZT GmbH
Zollhausweg 1
5101 Bergheim
Austria

Both:
Geotechnik Adam ZT GmbH
Wiener Straße 66-72/15/4
2345 Brunn/Gebirge
Austria



Baurecht-Taschenbuch
Sonderbauverfahren Tiefbau

Nahezu alle Baubeteiligten, insbesondere Bauherren, Ingenieure, Projektsteuerer, Generalübernehmer, Architekten, Bauhandwerker und Unternehmer, benötigen eine Hilfe, um den undurchdringlichen Nebel des Baurechts wenigstens etwas lichten zu können. Das Baurecht-Taschenbuch ist von der Praxis gefordert worden, weil es gerade zu den hier behandelten Sonderbauverfahren keine interdisziplinär nachvollziehbaren Abhandlungen und damit Hilfen für die immer wieder auftauchenden und zu lösenden Fragen gibt. Das Baurecht-Taschenbuch ist so Nachschlagewerk und Ratgeber für Sonderbauverfahren in Einem. Mithilfe der Erläuterungen aller wesentlichen rechtlichen Vorgaben, die das jeweilige Bauverfahren von der Planung über die Ausführung bis hin zur Abnahme und Abrechnung begleiten, können – oft sehr teure – Fehler auf allen Vertragsseiten vermieden und damit auch Streitigkeiten ad acta gelegt werden.

HRSG.: CONRAD BOLEY, KLAUS ENGLERT, BASTIAN FUCHS, GÜNTHER SCHALK
Baurecht-Taschenbuch
Sonderbauverfahren Tiefbau, Technische Erläuterungen – Rechtliche Lösungen
2010. ca. 352 Seiten, ca. 115 Abb.
Gebunden.
ISBN 978-3-433-02966-4
ca. € 89,–*

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt. zzgl. Versandkosten. Irrtum und Änderungen vorbehalten. 0191200006_dp

Online-Bestellung: www.ernst-und-sohn.de

Ernst & Sohn
A Wiley Company

Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG

Kundenservice: Wiley-VCH
Boschstraße 12
D-69469 Weinheim

Tel. +49 (0)6201 606-400
Fax +49 (0)6201 606-184
service@wiley-vch.de