NUMERISCHE SIMULATIONSBERECHNUNGEN ZUR ERDWÄRME- UND GRUNDWASSERNUTZUNG

Dietmar Adam[1,2], Roman Markiewicz[2]
[1]Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien, Wien, Österreich
[2]Geotechnik Adam ZT GmbH, Brunn am Gebirge, Österreich

e-mail: dietmar.adam@tuwien.ac.at , Tel. +43-1-58801-22100
e-mail: markiewicz@geotechnik-adam.at , Tel. +43-2236-312244-22

KURZFASSUNG

Wärmepumpen ermöglichen eine aktive Beheizung von Gebäuden mittels Erdwärme. Seit Anfang der 90er Jahre wurden Technologien für die Nutzung von Fundamenten und Infrastrukturbauwerken zum Heizen und Kühlen entwickelt. Verstärkt kommen offene Systeme zur direkten Grundwassernutzung zur Anwendung. Technisch ausgereifte Lösungen sowie hydraulische und thermische Simulationen bilden die Grundlage für die effiziente Planung von Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes.

ABSTRACT

The development of heat pumps enables the utilization of ground energy for heating. Since the nineties absorber technologies were developed in to activate earth coupled structures like foundations and infrastructure buildings. Open source systems for the direct use of the groundwater heat are more and more common. Sophisticated technical solutions and both hydraulic and thermal simulations provide an efficient design of geothermal energy plants.

EINLEITUNG UND PRINZIP DER GEOTHERMIENUTZUNG

In den meisten Klimazonen Europas ist die Temperatur des Untergrundes ab einer Tiefe von ca. 10 – 15 m aufgrund dessen thermodynamischer Trägheit nahezu konstant. Bis zu einer Tiefe von ca. 50 m beträgt sie in der Regel 10 – 15°C. Eine Umwälzung der Wärme reicht für eine Heizung im Allgemeinen nicht aus, sodass Wärmepumpen zur Anhebung der Temperaturniveaus verwendet werden. Die Bodenwärme wird der Wärmepumpe durch den sog. Primärkreislauf zugeführt, der Sekundärkreislauf befindet sich im Bauwerk. Leistungsfähige Wärmepumpen weisen einen Wirkungsgrad von ca. 4 bis 5 auf, d.h. in diesem Fall ist nur ein Viertel bis ein Fünftel Fremdenergie erforderlich. Der Hauptanteil von rund 75% bis 80% der nutzbaren Gesamtenergie stammt aus der im Untergrund gespeicherten Wärme.

Im Falle der Kühlung wird eine Kältemaschine eingesetzt. Bei günstigen Randbedingungen besteht die Möglichkeit, ohne Kältemaschine das Auslangen zu finden. Die Kühlung erfolgt in diesem Fall lediglich durch Umwälzung der im Boden gespeicherten Kälte. Bei diesem sog. „Free Cooling“ wird der Fremdenergiebedarf auf den Betrieb einer Umwälzpumpe reduziert. Umschaltbare Wärmepumpen ermöglichen Heizung und eine Kühlung.

Für den Transport von Wärme- bzw. Kälteenergie ist ein Temperaturunterschied zwischen dem zur Nutzung herangezogenen Untergrund und dem Transportmedium erforderlich. Grundsätzlich wird zwischen zwei Systemen unterschieden:

- Geschlossene Systeme (Absorberkreislauf)
- Offene Systeme (direkte Grundwassernutzung)

Bei geschlossenen Systemen zirkuliert ein Wärmeträgermedium durch die Absorberleitungen, welches beim Durchströmen entweder erwärmt oder abgekühlt wird. Bei offenen Systemen wird das Grundwasser aus dem Aquifer entnommen und direkt genutzt, anschließend wird das erwärmte oder abgekühlte Wasser wiederum dem Grundwasserträger zugeführt.

Prinzipiell kann zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Möglichkeiten der geothermischen Energiebewirtschaftung unterschieden werden:

- Einfache geothermische Energieentnahme bzw. -zufuhr
- Saisonaler Betrieb mit Wärme- und Kältespeicherung

Während beim einfachen geothermischen Betrieb, d.h. entweder wird nur Energie aus dem Boden entnommen oder nur Energie in den Boden eingetragen, der Energiefluss lediglich in eine Richtung erfolgt, wird beim saisonalen Betrieb die thermodynamische Trägheit des Bodens herangezogen, um Energie im Boden zu speichern, sodass diese zum benötigten Zeitpunkt wiederum entnommen werden kann. Bei einem saisonalen Speicher ist es daher möglich, eine ausgeglichene Energiebilanz im Zeitraum eines Jahres zu gewährleisten. Böden mit hoher Durchlässigkeit eignen sich besonders gut für den einfachen Betrieb zur Wärme- oder Kältenutzung, Böden mit geringer Durchlässigkeit eignen sich hingegen besonders gut für die saisonale Speicherung.

ERDWÄRMEABSORBER

Neben den klassischen „Erdwärmesonden“ und „Erdwärmekollektoren“ ermöglichen auch erdberührte Bauwerksteile ("Erdwärmeabsorber") eine sehr wirtschaftliche Nutzung der Geothermie. Dies betrifft vor allem Bauwerksteile aus Beton ("Massivabsorber"). Hiefür kommen primär Tieffundierungen („Energiepfähle“, „Energieschlitzwände“), aber auch Flachfundierungen („Energiebodenplatten“) infrage. Die Absorberleitungen werden unmittelbar in die Fundierungselemente verlegt, zusätzliche Einbauten im Erdreich sind nicht erforderlich. Neue Entwicklungen stellen ganze Infrastrukturbauwerke, wie „Energietunnel“, dar bzw. Bauteile, die insbesondere für den Bau von unterirdischen Bauwerken, wie „Energieanker“, „Energievlies“, „Energietübbung“ und „Energiebrunnen“ eingesetzt werden. Energie kann mittlerweile auch aus Abwasser durch die Verwendung von speziellen Absorberelementen genutzt werden.

Abbildung 1: A: Absorberleitungen für eine Energiebodenplatte. B: Verlegung von Absorberleitungen im Bewehrungskorb eines Energiepfahls.

Abbildung 2: Einbau des Energievlieses in einem Testabschnitt des bergmännisch aufgefahrenen Lainzer Tunnels

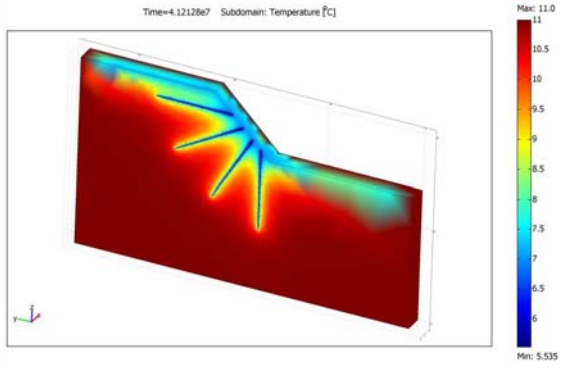


Abbildung 3: Thermische Nutzung von Ankern zur Böschungsstabilisierung.

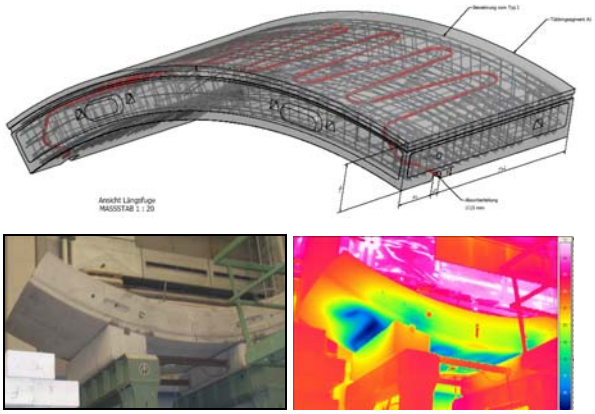


Abbildung 4: Energietübbing: Anordnung der Absorberelemente innerhalb des Betonfertigteils (oben) und testen eines Prototyps im Labor (unten). [Pralle et al, 2009]

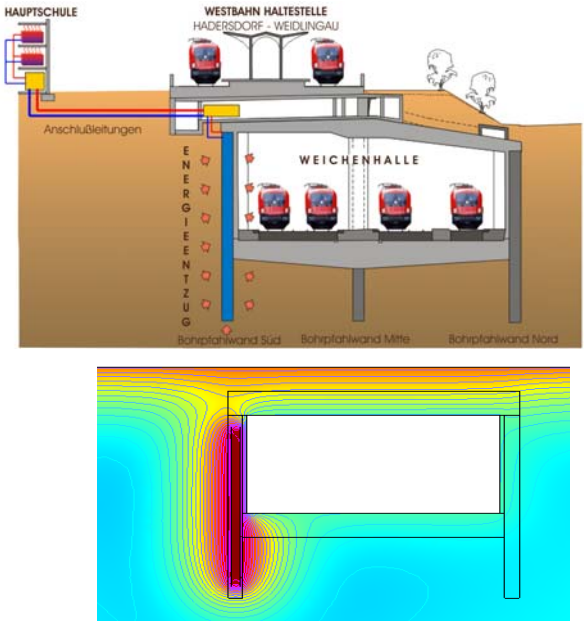


Abbildung 5: Pilotprojekt für die Erdwärmenutzung eines in offener Bauweise (Deckelbauweise) errichteten Tunnelbauwerks (oben). Simulationsberechnung zur Ermittlung des thermischen Einflussbereiches (unten).

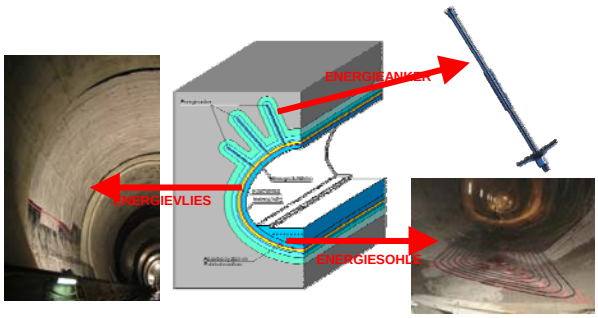


Abbildung 6: Möglichkeiten der Erdwärmenutzung in bergmännisch aufgefahrenen Tunnelbauwerken.

GRUNDWASSERBRUNNEN

Bei der direkten Nutzung der Grundwasserwärme (Offenes System) müssen mindestens zwei Brunnen gebohrt werden: ein Förderbrunnen (Quelle) und ein Schluckbrunnen (Senke). Im Heizbetrieb wird über einen oder mehrere Förderbrunnen das Grundwasser entnommen und dem Grundwasser die Wärme entzogen. Das abgekühlte Wasser wird anschließend einem oder mehreren Schluckbrunnen bzw. Versickerungsanlagen zugeführt und auf diese Weise wieder dem Aquifer zugeführt (Abbildung 7). Im Kühlbetrieb wird dem entnommenen Grundwasser Wärme zugeführt und anschließend das erwärmte Wasser versickert.

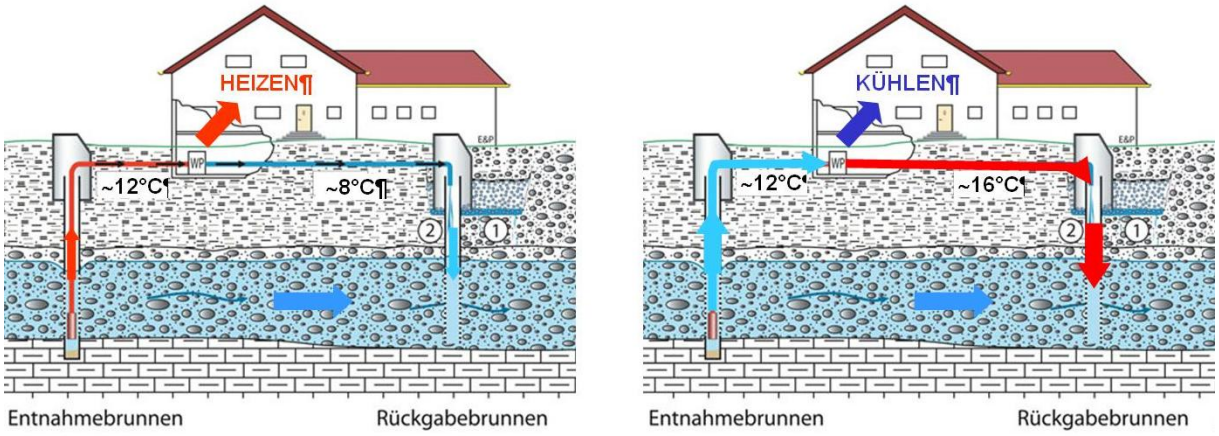
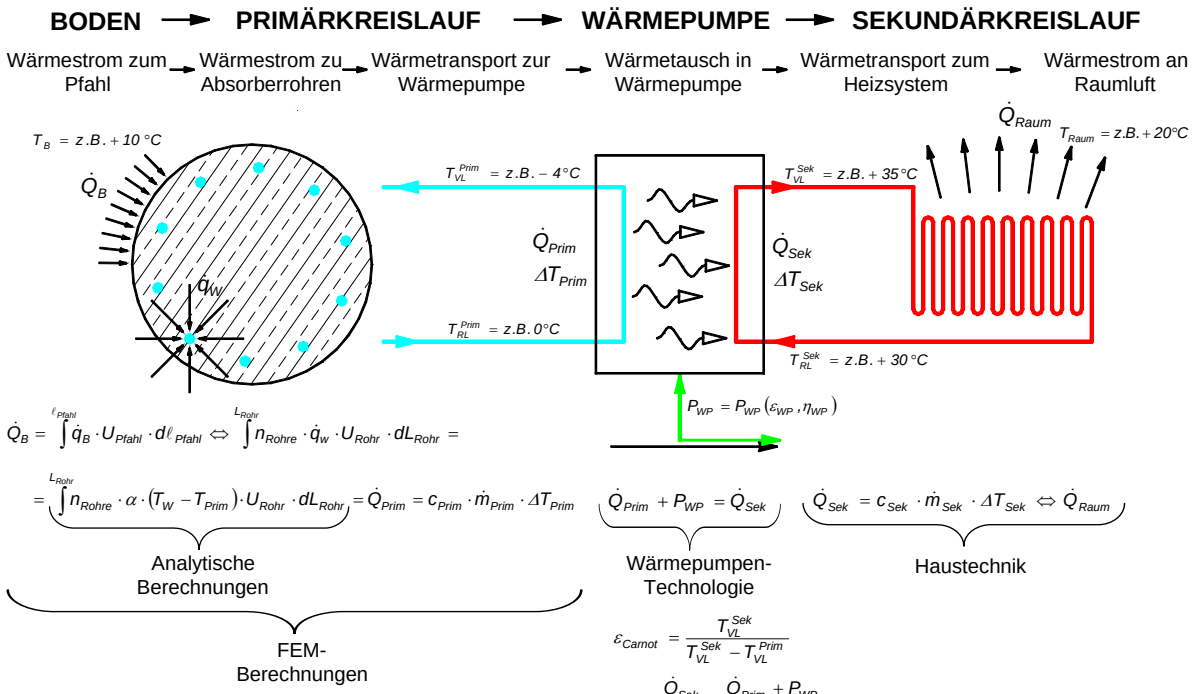


Abbildung 7: Prinzipschema der direkten thermischen Grundwassernutzung für Heiz- (links) und Kühlzwecke (rechts). [http://www.geothermie.walthelm.com/varianten_der_erdwaermenutzung.htm; Eberhard & Partner AG – Aarau)]



$\dot{Q}$: Wärmestrom [W]
$\dot{q}$: Wärmestromdichte [W/m²]
U: Umfang [m]
ℓ_{Pfahl} : Pfahllänge [m]
L_{Rohr}: Absorberrohrlänge [m]
n_{Rohre}: Anzahl Absorberrohre [Stk]
α: Wärmeübergangskoeffizient [W/(m²K)]

c: spez. Wärmekapazität [Ws/(kgK)]
$\dot{m}$: Massenstrom [kg/s]
T: Temperatur [°C]
P_{WP}: Stromaufnahme Wärmepumpe [W]
η_{WP}: Wirkungsgrad der Wärmepumpe [-]
ε_{WP}: Leistungszahl Wärmepumpe [-]

Abbildung 8: Schematische Übersicht des Wärmetransportes einer Energiepfahlanlage im Heizfall (Leistungsbilanz)

HYDRAULISCHE UND THERMISCHE SIMULATION

Geschlossene Systeme

Der Wärmetransport vom Erdreich bis zum Nutzraum ist in Abbildung 8 schematisch für den Heizfall einer Massivabsorberanlage (Beispiel Energiepfahl) dargestellt. Die Vorgänge innerhalb der Wärmepumpe (Wärmepumpenkreislauf) und des Sekundärkreislaufes können grundsätzlich als bekannt angesehen werden. Die Simulation und Dimensionierung erfolgt üblicherweise durch den HKLS-Experten, wofür geeignete Softwareprodukte am Markt erhältlich sind. Die Wärmepumpe stellt dabei die Schnittstelle zum Primärkreislauf bzw. zu den Massivabsorbern dar, für deren Simulation und Dimensionierung die Wärmetransportvorgänge innerhalb des Erdreichs, vom Erdreich zur Absorberflüssigkeit und innerhalb bzw. durch die Absorberflüssigkeit zu berücksichtigen sind.

Sobald die Vorlauftemperatur (geregelt durch die Wärmepumpe) der Absorberflüssigkeit im Primärkreislauf T_{VL}^{Prim} kleiner ist als die Boden- bzw. Erdreichtemperatur T_B, kommt es zunächst zu einer Abkühlung des Pfahles und dadurch innerhalb des Erdreiches zu einem Wärmestrom in Richtung Pfahl. Innerhalb des Pfahles wird die Wärme von der Absorberflüssigkeit aufgenommen, die sich dadurch erwärmt. Die Rücklauftemperatur T_{RL}^{Prim} kann dabei als „Ergebnis“ des Primärkreislaufes gesehen werden und ist eine der wichtigsten Beurteilungskriterien für die Effizienz einer Massivabsorberanlage. Es bildet sich schließlich ein Gleichgewicht zwischen dem Wärmestrom vom Boden zum Pfahl $\dot{Q}_B$ und dem von der Absorberflüssigkeit transportierten Wärmestrom $\dot{Q}_{Sole}$. Dieser Wärmetransport hängt von zahlreichen Faktoren ab, wie schematisch in Abbildung 9 dargestellt ist. Die einzelnen Faktoren haben auf die Effizienz einer Massivabsorberanlage einen mehr oder weniger großen Einfluss. Einige, wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches oder die Erdreichtemperatur, sind durch die Natur vorgegeben und können nicht beeinflusst werden. Faktoren, wie z.B. die Anzahl der Absorberrohre oder die Strömungsgeschwindigkeit der Absorberflüssigkeit (Massenstrom) können aber im Zuge der Dimensionierung gewählt werden. Hier gilt es ein technisch-wirtschaftliches Optimum zu finden, um den Energieaustausch zwischen Erdreich und Absorberflüssigkeit zu maximieren und die Herstell- und Betriebskosten zu minimieren.

Die Strömungsverhältnisse innerhalb der Absorberrohre und die daraus resultierende Wärmeübertragung vom Absorberrohr zur Absorberflüssigkeit können analytisch berechnet werden.

Für die Berechnung des gesamten Wärmetransportes vom Erdreich zur Absorberflüssigkeit sind allerdings aufgrund der zahlreichen Einflussparameter und der Komplexität oftmals aufwendige numerische Verfahren (z.B. FEM) erforderlich.

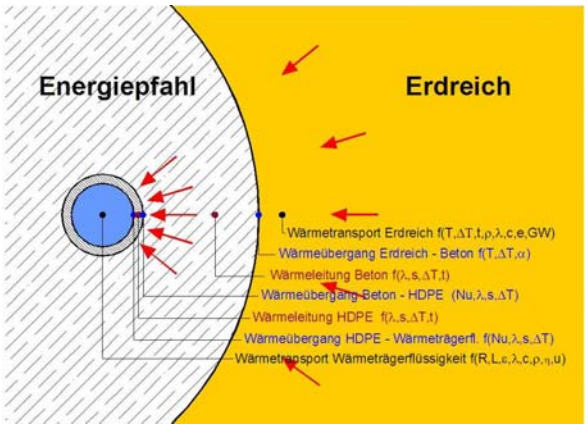


Abbildung 9: Mechanismen beim Wärmestrom vom Erdreich zur Absorberflüssigkeit (schematisch).

Bei komplexeren geometrischen Verhältnissen können die einzelnen Absorberrohre aus genannten Gründen nicht mehr im Einzelnen berücksichtigt werden. In diesen Fällen ist man gezwungen, einen Mittelwert der erwarteten Eintritts- und Austrittstemperatur anzunehmen. Die Wärmeleistung ergibt sich in diesem Fall über den Wärmefluss vom Boden zum Massivabsorber. Durch Integration des Wärmeflusses über alle mit Absorberleitungen belegten Flächen resultiert schließlich die Gesamtleistung der Anlage.

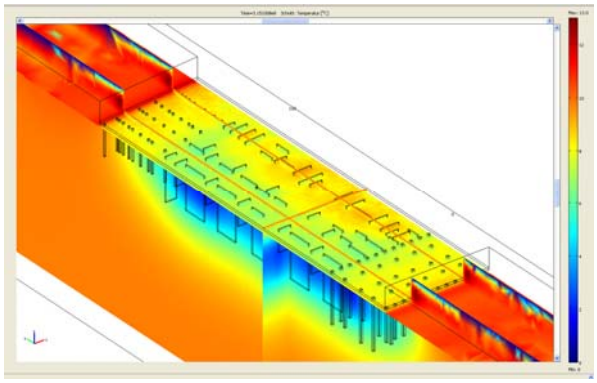


Abbildung 10: Ergebnis (Schnittdarstellung) einer dreidimensionalen thermischen Simulationsberechnung für ein Infrastrukturbauwerk, das auf Energiepfählen und Energieschlitzwänden fundiert ist.

Die Gründung des neuen Hauptbahnhofes in Wien wird zur Nutzung der Erdwärme herangezogen, die Ermittlung der nutzbaren Wärme- und Kälteenergie erforderte eine dreidimensionale Simulation der komplexen Anlagenverhältnisse. Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen exemplarisch Ergebnisse einer dreidimensionalen Simulationsberechnung zur

Ermittlung der Gesamtleistung der Massivabsorberanlage, bestehend aus Energiebodenplatte, Energiepfählen und Energieschlitzwänden.

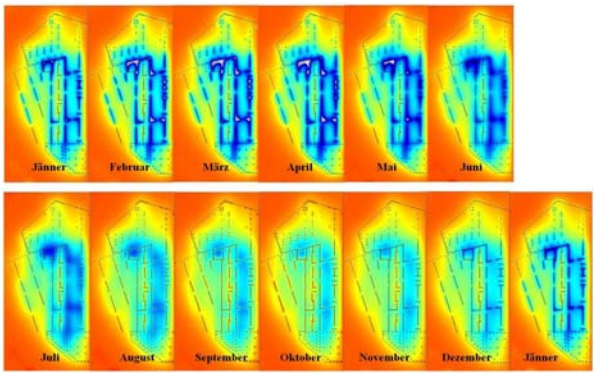


Abbildung 11: Temperaturverhältnisse (Grundrissdarstellung) im Erdreich und der Energiefundierung in einer Tiefe von 15 m unterhalb der Bodenplatte im Verlauf eines Jahres.

Offene Systeme

Hydraulische Berechnung

Bei der Simulation hydraulischer Vorgänge im Untergrund ist unter anderem zu beachten, dass der meist vorliegende maßgebende Parameter – die Filtergeschwindigkeit v_f nach *Darcy* – nur im mit Wasser vollständig gesättigten Boden gültig ist. Wie Abbildung 12 zeigt, sind im Boden jedoch Zonen vorhanden, in denen der Sättigungsgrad im Jahresverlauf schwankt – bei hohen Grundwasserständen ist die gesättigte Zone höher als bei niedrigen Grundwasserständen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass im Bereich von Wasserentnahmen aufgrund des Absenktrichters die ungesättigte Zone vergrößert und im Bereich der Versickerung die ungesättigte Zone verkleinert wird.

Um einen derartigen Wechsels zwischen gesättigten und ungesättigten Bedingungen in Simulationsberechnungen zu berücksichtigen, können die Gleichungen nach *Richard´s* mit Stoffparametern von z.B. *Van Genuchten* herangezogen werden. Für gesättigte Zonen kann die in Abbildung 12 angegebene einfachere *LaPlace* Gleichung verwendet werden, die sich aus der Kontinuitätsgleichung und der *Darcy*-Gleichung ableiten lässt.

Thermische Berechnung

Die aus dem Entnahmebrunnen nutzbare thermische Leistung lässt sich wiederum mit Gleichung (1) berechnen. Beispielsweise ergibt sich für den Heizfall entsprechend Abbildung 7 mit einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 4\,K$, einer angenommenen Förderleistung des Entnahmebrunnens von 10 l/s eine thermische Leistung von ca. $\dot{Q} = 170\ kW$. Dieses einfache Beispiel zeigt grundsätzlich das große Energiepotenzial einer thermischen Grundwassernutzung.

Um die thermische Reichweite (Thermalfront) im Bereich der Versickerung zu berechnen, ist im Regelfall eine dreidimensionale gekoppelte hydraulische-thermische Simulation durchzuführen, damit die im Untergrund auftretenden Wärmetransportmechanismen und Randbedingungen berücksichtigt werden können.

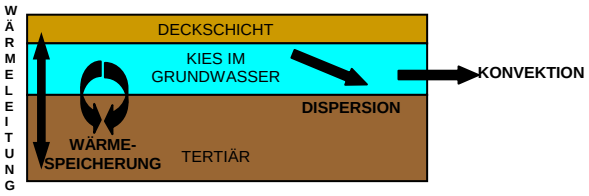


Abbildung 13: Wärmespeicherung und Wärmetransportvorgänge im Untergrund.

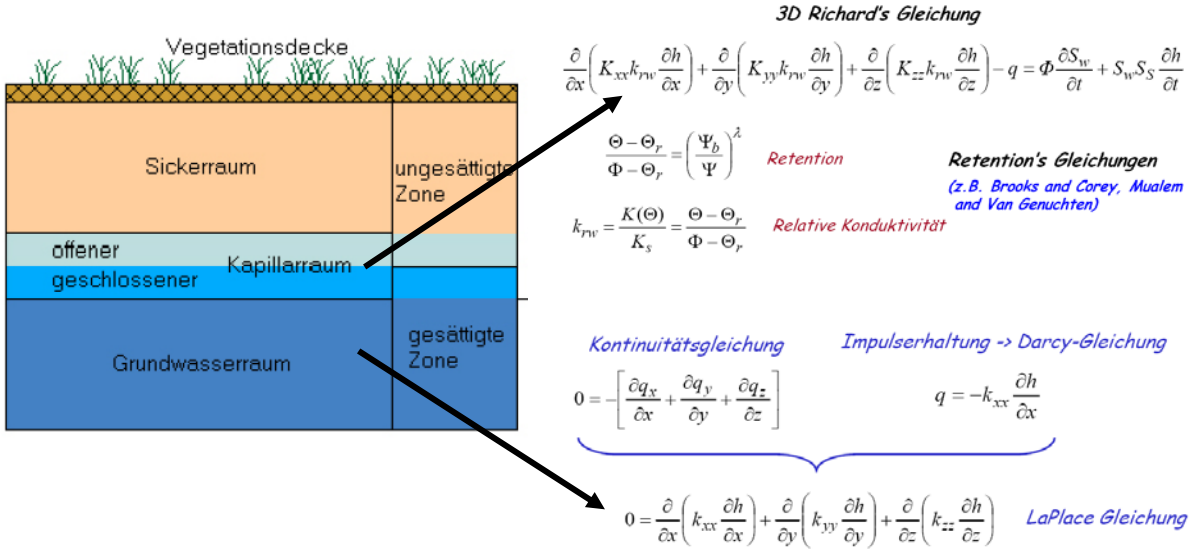


Abbildung 12: Berechnungsgleichungen für gesättigte und gesättigte/ungesättigte Zonen im Untergrund.

Da der Schwerpunkt von derartigen dreidimensionalen hydraulisch-thermischen Modellen in der Berechnung der thermischen Reichweite (Abbildung 13) des über die Schluckbrunnen bzw. Versickerungsanlage eingeleiteten Wassers liegt, kann je nach Anwendungsfall zur Modellvereinfachung eine konstante Grundwassermächtigkeit des Aquifers angesetzt werden. Im Berechnungsmodell ist somit die Schicht des Aquifers zu jedem Zeitpunkt vollständig wassergesättigt, sodass die numerisch einfacher zu bewältigende *LaPlace*-Gleichung (mit dem Gesetz von *Darcy*) zugrunde gelegt werden kann.

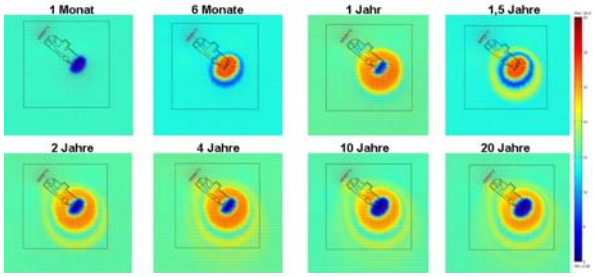


Abbildung 13: Beispiel für die Ermittlung der Reichweite der Temperaturfront bei einer direkten Grundwassernutzung (Grundrissdarstellung) durch eine gekoppelte hydraulisch-thermische Simulationsberechnung.

Der neue Campus der Wirtschaftsuniversität erhält eine Anlage zur direkten Nutzung der Grundwassertemperatur zum Heizen und Kühlen sämtlicher Bauwerke. Umfangreiche hydraulische und thermische Berechnungen zeigen nicht nur die Reichweite des hydraulischen und thermischen Einflusses der Grundwassernutzungsanlage (Abbildung 13), sondern es lässt sich damit auch das nutzbare Potenzial zum Heizen und Kühlen rechnerisch ermitteln.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die geothermische Nutzung von Fundierungen, Keller- oder Stützwänden ermöglicht ein umweltfreundliches, Ressourcen schonendes sowie wirtschaftliches Heizen und/oder Kühlen von Bauwerken. Die Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauteile ist nicht nur auf Fundierungen und massive Wände bzw. Pfahlwände beschränkt. "Energietunnels", die Heizung und/oder Kühlung von Verkehrsflächen auf Straßen sowie Brücken und die direkte thermische Nutzung von Grundwasser stellen weitere Anwendungsgebiete mit einer Vielzahl von Vorteilen dar.

Für die Simulation, Dimensionierung und Planung von Erdwärmeabsorbern und Grundwasserbrunnen waren anfänglich noch sehr aufwendige Berechnungen erforderlich. Mittlerweile existieren bereits Softwarelösungen, mit denen bestimmte (vom Softwarehersteller vorgegebene) Fälle rasch simuliert werden können.

LITERATUR

ADAM D., MARKIEWICZ R. (2003). Geothermische Energienutzung im Bauwesen. Heft 54/Oktober 2003. Wien: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik.

ADAM D., MARKIEWICZ R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. Geotechnique 59, No. 3, 229-236.

BRANDL H., MARKIEWICZ R. (2001). Geothermische Nutzung von Bauwerksfundierungen ("Energiefundierungen"). In: ÖIAZ, 146. Jg., Heft 5-6/2001, Wien.

FRANZIUS J. N., PRALLE N. (2009). Mit Tunneln heizen. Nutzung des geothermischen Potenzials im Eisenbahntunnel Jenbach. Präsentation. Berlin.

MARKIEWICZ R., ADAM D. (2003). Utilization of Geothermal Energy using earth coupled Structures – Theoretical and Experimental Investigations, Case Histories. Geotechnical Problems With Man-Made And Man Influenced Grounds. XIIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 2. 25-28th August 2003, Prag.

MARKIEWICZ R. (2004). Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau. Dissertation am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Wien, Wien.

OBERHAUSER A. (2006). Verfahrens- und Komponentenentwicklung zur Planung von Tunnelthermie®-Anlagen. Doktorarbeit, Technische Universität Wien, Wien.

OSTERMANN N.; ADAM D., UNTERBERGER, W. (2003). Erdwärmenutzung im Verkehrstunnelbau. Schriftenreihe der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik 53, p. 59 - 63.

PRALLE N, GOTTSCHALK D., HOLUB W. (2009): Umweltfreundliche Wärmeenergieversorgung des Bauhofs Jenbach. Geothermisches Tunnelkraftwerk Jenbach.

UNTERBERGER W., ADAM D., HOFINGER J. (2002). Erdwärmenutzung im Verkehrstunnelbau. Zement+Beton 4/02. Zement+Beton Handels- und Werbeges.mbH, Wien.