

- Schmidt HG, Seitz J (1998) Grundbau. Sonderdruck aus dem Betonkalender 1998. Ernst & Sohn, Berlin
- Sêco e Pinto P (Ed) (1998) Environmental geotechnics. Vol 1–4. Balkema, Rotterdam (Niederlande)
- SRU (1989) Sondergutachten „Altlasten“ des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen. Metzler-Poeschel, Stuttgart
- SRU (1995) Sondergutachten „Altlasten II“ des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen. Metzler-Poeschel, Stuttgart
- Steinkamp S (1988) Erfahrungen mit dem Entwässerungssystem der Zentraldeponie Hannover. Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Landesgewerbeanstalt Bayern, H 51
- Vogler M (1999) Einfluß der Kapillarität auf die Mehrphasenströmung bei der Sanierung von Mineralölschadensfällen im Boden. Mitteilungen des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, H 45
- WHG (2002) Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz)
- Weiler H (1998) Flachglas-Elemente als dauerhafte Schadstoffsperrschicht in Deponiebasisabdichtungen – Integrierte-Glas-Sandwich-Dichtung (IGSD). Mitteilungen des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, H 41
- Witt, KJ (2009) Die Standsicherheit im Lebenszyklus von Oberflächenabdichtungssystemen. 25. Fachtagung „Die sichere Deponie 2009“

Normen

- DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau (01/2005)
- DIN 1995-1: Bindemittel und Steinkohlenteerpech; Anforderungen an die Bindemittel; Straßenbaubitumen (10/1989)
- DIN 4021: Baugrund; Aufschluß durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben (10/1990)
- DIN 4022-1: Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekerkerten Proben im Boden und im Fels (09/1987)
- DIN 4022-3: Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen mit durchgehender Gewinnung von gekerkerten Proben im Boden (05/1982)
- DIN 4084: Baugrund – Geländebruchberechnung (01/2009)
- DIN 4124: Baugruben und Gräben – Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten (10/2002)
- DIN 18200: Übereinstimmungsnachweis für Bauprodukte – Werkseigene Produktionskontrolle, Fremdüberwachung und Zertifizierung von Produkten (05/2000)
- DIN 19667: Dränung von Deponien; Technische Regeln für Bemessung, Bauausführung und Betrieb (05/1991)

4.5 Oberflächennahe Geothermie

Rolf Katzenbach, Isabel M. Wagner

4.5.1 Einführung

4.5.1.1 Definition

Die Geothermie, die Nutzung von Baugrund und Grundwasser zur Gewinnung und Speicherung thermischer Energie, ist eine nachhaltige und grundlastfähige erneuerbare Quelle von Energie. Die Erde weist im Inneren eine Temperatur von ca. 6.000°C auf und erzeugt damit einen kontinuierlichen Wärmestrom hin zur Erdkruste. Ungefähr 98% der Erdkugel weisen eine Temperatur von mehr als 1.000°C auf, während lediglich 0,1% kühler als 100°C sind. Geothermie wird begrifflich in oberflächennahe und tiefe Geothermie unterteilt. Bei der thermischen Nutzung des Untergrundes bis in eine Tiefe von 400 m unter der Geländeoberfläche wird von oberflächennaher Geothermie gesprochen. Eine Nutzung, die über eine Tiefe von 400 m hinausgeht und bis zu mehreren tausend Metern Tiefe reichen kann, wird als tiefe Geothermie bezeichnet.

Der Untergrund weist in Mitteleuropa ab einer Tiefe von 10–20 m eine jahreszeitlich nahezu konstante Temperatur von 8–12°C auf (Abb. 4.5-1). In dicht besiedelten Großstädten sind infolge unterirdischer Infrastrukturen lokal allerdings auch Temperaturen von 20°C und mehr möglich. Dieser oberflächennahe Bereich, in dem die jahreszeitlich bedingten Schwankungen weniger als 0,1 K betragen, wird als Neutrale Zone bezeichnet. Der geothermische Gradient, d.h. die Zunahme der Temperatur mit der Tiefe, beträgt in Deutschland im Mittel etwa 3 K/100 m.

Der Gebäudebetrieb stellt mit knapp 50% den mit Abstand größten Endenergieverbraucher in Deutschland dar. Im Bereich der Gebäudetemperierung bietet die thermische Nutzung des Untergrundes somit langfristig ein großes Einsparpotenzial. Der Einsatz oberflächennaher Geothermie zur Temperierung von Gebäuden überzeugt durch Flexibilität, permanente Verfügbarkeit, Nachhaltigkeit und durch die weitgehende Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern. Die energetische Nutzung des Baugrundes bietet im Rahmen der erforderlichen Reduzierung der CO₂-Emissionen als umwelt- und ressourcenschonende, erneuerbare

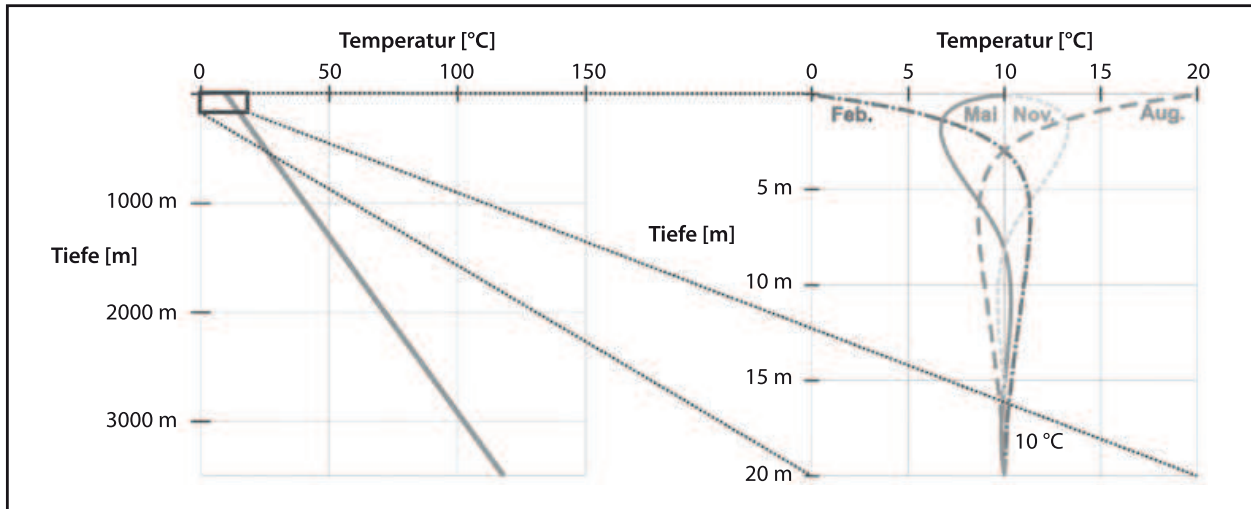


Abb. 4.5-1 Temperaturprofil des Bodens über die Tiefe

Energie eine zukunftsweisende Alternative zu konventionellen Energiesystemen.

Im Rahmen der geothermischen Nutzung des Untergrundes wird im Winter dem gegenüber der Umgebungstemperatur wärmeren Untergrund Energie entzogen und dem Gebäude zu Heizzwecken zur Verfügung gestellt. Im Sommer weist der Boden eine zur Umgebungstemperatur geringere Temperatur auf und kann damit zur Kühlung des Gebäudes genutzt werden.

Neben der konventionellen Nutzung der Geothermie im Bereich der Gebäudeklimatisierung bieten sich weitere Anwendungsbereiche dieses Gebietes an. So stellt die Nutzung der Geothermie im Verkehrswegebau eine effiziente Alternative zu herkömmlichen Winterdienstsystemen und eine Erhöhung der Verkehrssicherheit dar [Katzenbach et al. 2005].

4.5.1.2 Geothermische Kategorien

Geothermische Anlagen werden in Anlehnung an die „Geotechnischen Kategorien“ des Eurocode EC7 (DIN EN 1997) und der bauaufsichtlich eingeführten DIN 1054 in Abhängigkeit von ihrer Größe und Komplexität, der Schwierigkeit der vorhandenen Baugrundverhältnisse, der Wechselwirkung zur Umgebung sowie des daraus resultierenden Anspruchs an Planung und Ausführung in sog. „Geothermische Kategorien“ kategorisiert [VBI 2008].

Der geothermischen Kategorie GtK1 werden kleine, einfache geothermische Anlagen mit einer installierter Leistung von bis zu 30 kW bei einfachen und übersichtlichen Baugrundverhältnissen zugeteilt. Die Anlage kann basierend auf gesicherten Erfahrungen von Ingenieuren mit geotechnischen und geothermischen Kenntnissen entworfen und bemessen werden.

Die geothermische Kategorie GtK2 umfasst geothermische Anlagen mittlerer Größe bzw. Baugrundverhältnisse mittleren Schwierigkeitsgrades, die eine ingenieurmäßige Bearbeitung mit geotechnischen und geothermischen Kenntnissen und Erfahrungen erfordern und nicht den geothermischen Kategorien GtK1 oder GtK3 zuzuordnen sind.

Der geothermischen Kategorie GtK3 werden komplexe geothermische Anlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 100 kW und/oder schwierige Baugrundverhältnisse bzw. komplexe Wechselwirkungen zur Umgebung zugeteilt. Zum Entwurf und zur Bemessung sind vertiefte geotechnische und geothermische Kenntnisse und Erfahrungen der Ingenieure erforderlich.

4.5.1.3 Wärmetransport im Boden

Um dem Boden Energie entziehen zu können, wird mithilfe einer durch die Erdwärmeaustauscher zirkulierenden Wärmeträgerflüssigkeit (Arbeitsmittel) ein künstlicher Temperaturgradient im Boden erzeugt, der Wärmetransportvorgänge in

Richtung des niedrigeren Temperaturniveaus hervorruft. Die wesentlichen Wärmeübertragungsmechanismen sind dabei Konduktion (Wärmeleitung), Konvektion und Dispersion. Als Konduktion wird der Energietransport von einem Molekül mit höherer Energie auf ein Molekül mit geringerer Energie bezeichnet (Brown'sche Molekularbewegung). Konvektion beschreibt den Energietransport infolge von Fluidbewegungen. Im Untergrund kann Konvektion in den Phasen Wasser und Luft auftreten, wobei der Konvektionsanteil der Porenluft i. d. R. aufgrund der geringen spezifischen Wärmekapazität der Luft zu vernachlässigen ist. Die Strömungsprozesse sind im porösen Medium Boden von hydrodynamischen Durchmischungen geprägt, die auf die Durchlässigkeit und Speicherheterogenität des Untergrundes zurückzuführen sind. Die unterschiedlichen mikro- und makroskopischen Transportphänomene sind in der Dispersion zusammengefasst.

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Wärmetransportmechanismen im Boden, wie Wärmestrahlung, Verdunstungs- und Kondensationsprozesse, Frost- und Tauprozesse sowie Ionenaustauschprozesse. Im Vergleich zu Konduktion, Konvektion und Dispersion sind diese aber bei der Beschreibung des Wärmetransports im Boden i. d. R. von untergeordneter Bedeutung und werden daher meist vernachlässigt.

Auf der Grundlage einer Wärmebilanzbetrachtung an einem Kontrollvolumen lässt sich die Änderung der inneren Energie eines Baugrundkörpers pro Zeiteinheit und somit der Wärmetransport im Baugrund unter Beachtung der Wärmeübertragungsmechanismen Konduktion, Konvektion und Dispersion sowie innerer Wärmequellen mit folgender Differentialgleichung beschreiben [Ennigkeit 2002]:

$$\underbrace{\text{div}(\lambda \text{ grad } T)}_{\text{Konduktion}} - \underbrace{(\rho \cdot c)_w \text{ div}(v \cdot T)}_{\text{Konvektion}} + \underbrace{\text{div}(D_\lambda \text{ grad } T)}_{\text{Dispersion}} + \underbrace{\dot{Q}_i}_{\text{Wärmequellen}} = \underbrace{\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t}}_{\text{zeitl. Änderung}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]$$

(4.5.1)

mit:

$$\rho \cdot c = n(\rho \cdot c)_w + (1-n)(\rho \cdot c)_s$$

Darin beschreibt λ die Wärmeleitfähigkeit des Bodens [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] und T die Temperatur des Bodens [K]. In den Term der Konvektion findet die Filtergeschwindigkeit v des Wassers [m/s] Eingang, ebenso wie die volumetrische Wärmekapazität des Grundwassers $(\rho \cdot c)_w$ [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$], die sich aus der Dichte ρ [kg/m^3] und der spezifische Wärmekapazität c [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$] zusammensetzt. D_λ beschreibt den Wärmedispersionskoeffizienten des Bodens [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]. \dot{Q}_i beschreibt innere Wärmequellen [W/m^3], t die Zeit [s] und n den vorhandenen Porenanteil [-] des Bodens.

Der Betrieb einer geothermischen Anlage hat eine Temperaturveränderung im Boden zur Folge, die sich bei ruhendem Grundwasser radialsymmetrisch um den vertikal im Boden installierten Erdwärmeaustauscher ausbreitet. Ist eine Grundwasserströmung vorhanden, so bildet sich bei geothermischen Anlagen zum Wärmeentzug eine sog. Kältefahne in Richtung der Grundwasserströmung (im Abstrom der geothermischen Anlage) aus [Katzenbach 2009b].

4.5.2 Technologien der oberflächennahen Geothermie

Hauptbestandteile einer geothermischen Anlage sind Anlagenteile der technischen Baugrundausrüstung und der technischen Gebäudeausrüstung.

4.5.2.1 Technische Baugrundausrüstung

Geschlossene Systeme

In geschlossenen geothermischen Systemen zirkuliert zwischen Baugrund und Gebäude zum Energietransport ein Wärmeträgermedium in einem geschlossenen Kreislauf, das i. d. R. aus Wasser und Frostschutzmitteln besteht. Durch den Baugrund temperiert wird es entweder einer Wärmepumpe zugeführt, die in einem Kreislauf aus Verdampfer, Kompressor, Verflüssiger und Expansionsventil die zur Gebäudetemperierung erforderlichen Temperaturen erzeugt, oder zur direkten Gebäudetemperierung genutzt. Zu den geschlossenen Systemen zählen neben den Geothermiesonden und den horizontal verlegten Erdwärmekollektoren u. a. die Massivabsorber/Erdberührten Betonbauteile. In der Regel werden die Primärkreisläufe der geschlos-

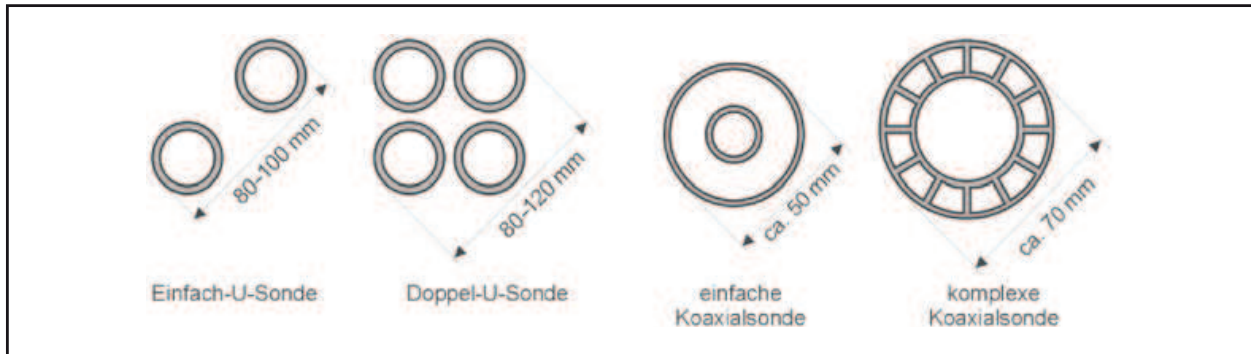


Abb. 4.5-2 Geothermie-Sondensysteme [VDI 2001]

senen Systeme über horizontale Anbindeleitungen, die in einer frostsicheren Tiefe verlegt werden sollten, an einen Sekundärkreislauf einer Wärmepumpe angeschlossen.

Geothermiesonden. Die am weitesten verbreitete Bauform eines geschlossenen geothermischen Systems ist die Geothermiesonde, auch Erdwärmesonde genannt. Sie besteht üblicherweise aus einem in ein vertikal oder geneigt abgeteuftes Bohrloch eingebrachten Rohr aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD).

Es stehen diverse Sondensysteme zur Verfügung: Einfach-U-Sonde, Doppel-U-Sonde, einfache sowie komplexe Koaxialsonde (Abb. 4.5-2).

Bauart, geometrische Abmessungen (Länge und Anzahl), Material und Arbeitsmedium werden aufgrund der Betriebsanforderungen und der örtlichen Gegebenheiten gewählt. Bei der Verwendung von Einfach-U- und Doppel-U-Sonden sind Abstandhalter vorzusehen, die einen Kontakt zwischen den Sondenrohren vermeiden und eine Zentrierung im Bohrloch sicherstellen sollen. Beim Einbringen der Sonde ist eine Verfüllung des Bohrlochs im Kontraktorverfahren von unten nach oben vorzusehen, bis die Verfüllung am Bohrlöchkopf austritt. Auf diese Weise können im Bohrloch vorhandenes Wasser oder Reste der Bohrspülung nach oben weggedrückt und eine möglichst optimale thermische Anbindung der Sonde an das Erdreich ohne Fehlstellen erreicht werden. Zur Verbesserung des Wärmeübergangs ist der Einsatz von thermisch optimiertem Verpressmaterial empfehlenswert. Weiterhin dient die Bohrlöcherverpressung der Abdichtung einzelner Grundwasserstockwerke, um hydraulische Kurzschlüsse

zu vermeiden. Es ist auf eine gute Fließfähigkeit, eine ausreichende Druckfestigkeit sowie Frostbeständigkeit zu achten [Tholen et al. 2008].

Alternativ zur herkömmlichen Geothermiesonde kann ein Wärmerohr (Heat Pipe), ein geschlossenes zweiphasiges System, als Erdwärmeaustauscher verwendet werden. Durch einen kontinuierlichen Kreislauf von Verdampfung und Kondensation eines Arbeitsmediums innerhalb des Rohres ist der Transport von Wärme bereits bei kleiner treibender Temperaturdifferenz möglich. Dabei wird die große Differenz der Enthalpie des Arbeitsmediums zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase des Arbeitsmediums genutzt. Das Wärmerohr verfügt über eine sehr hohe spezifische Wärmeleitfähigkeit und weist dabei nur eine geringe Wärmespeicherkapazität auf.

Am Sondenkopf (Abb. 4.5-3) wird die Energie leistungsfähiger kompakter Wärmeaustauscher als Kondensator abgegriffen. Genauso wie bei herkömmlichen Geothermiesonden werden Wärmerohre in ein Bohrloch eingebracht und idealerweise mit einem thermisch optimierten Verpressmaterial an den anstehenden Boden angebunden. Ein Wärmerohr besteht üblicherweise aus einem druckdicht geschlossenen Rohr, hergestellt aus einem gut wärmeleitenden Material wie Kupfer, Aluminium oder Stahl. Die Bauart des Rohres und die Abmessungen werden entsprechend der anstehenden Baugrundverhältnisse gewählt. In der Regel kommt eine Kombination des Wärmerohres mit einem Sekundärkreislauf und einer Wärmepumpe zur Anwendung. Es gibt allerdings auch Ansätze, das Wärmerohr ohne zusätzliche Wärmepumpe – also direkt – zu nutzen.

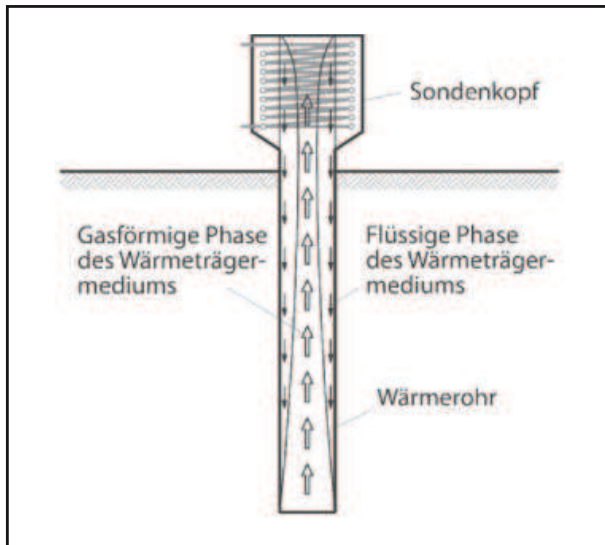


Abb. 4.5-3 Prinzip eines Wärmerohrs am Beispiel einer CO₂-Geothermiesonde

Im Inneren des Rohres befindet sich ein Arbeitsmedium. Je nach Betriebstemperatur und -druck lassen sich sehr unterschiedliche Arbeitsmedien einsetzen: übliche Arbeitsmedien sind Ammoniak (NH₃), Propan (C₃H₈) und Kohlendioxid (CO₂). Für den Einsatz im Boden bietet sich CO₂ insbesondere wegen seiner physikalischen Eignung und che-

mischen Unbedenklichkeit an. Für die Ausbildung eines vollständigen Konvektionsvorgangs innerhalb des Wärmerohrs müssen der Druck und die Menge des eingefüllten Arbeitsmediums auf die Temperaturbedingungen eingestellt werden.

Wärmerohre arbeiten i. d. R. wartungsfrei, da sie keinerlei mechanisch bewegte Bauteile beinhalten, benötigen zum Betrieb der Sonde keine Antriebssysteme, die äußeren Energieaufwand erfordern, und arbeiten geräuschlos. Somit können günstige Auswirkungen auf die Arbeitszahl und damit die Effizienz von mit CO₂-Geothermiesonden ausgerüsteten Anlagen erwartet werden. Mit CO₂-Geothermiesonden lassen sich ähnliche Entzugsleistungen erreichen wie mit herkömmlichen Geothermiesonden.

Allerdings können Wärmerohre derzeit nur zum Heizen, nicht aber zur Kühlung herangezogen werden.

Erdwärmekollektoren. Erdwärmekollektoren sind Wärmeaustauscher, die horizontal im Untergrund verlegt werden, und die die durch die Sonneneinstrahlung erhöhte Temperatur der oberflächennahen Bodenschichten nutzen (Abb. 4.5-4). Die Verwendung von Erdwärmekollektoren ist verbunden mit der Notwendigkeit einer ausreichend großen, unbebauten und nicht schattigen Fläche, um die

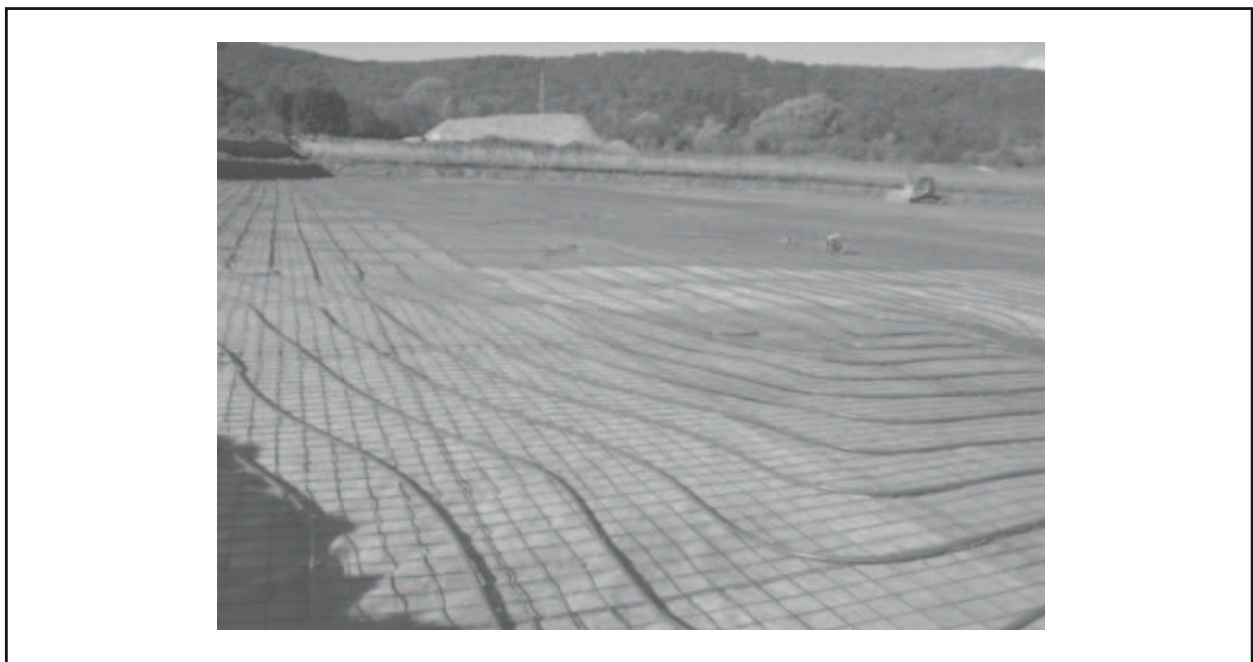


Abb. 4.5-4 Erdwärmekollektorenfeld (Zent-Frenger Gesellschaft für Gebäudetechnik mbH)



Abb. 4.5-5 Bewehrungskorb eines Energiepfahls

Sonnenenergie optimal nutzen zu können und eine thermische Regeneration des Erdreiches zu ermöglichen [Tholen et al. 2008]. Die Erdwärmekollektoren frieren während des Heizbetriebs im Winter ein. Dabei wird die beim Phasenwechsel des Wassers vom flüssigen in den gefrorenen Zustand freierwerdende latente Wärme genutzt.

Die Kollektoren werden in einer Tiefe zwischen 1,2 m und 1,5 m mit einem Abstand von 0,3 m bis 0,8 m verlegt und sollten zu frostempfindlichen Ver- und Entsorgungsanlagen einen Mindestabstand von 0,7 m einhalten [VDI 2001]. Die Wärmeaustauscherröhre sind in einem Sandbett zu verlegen, um eine Beschädigung zu vermeiden.

Aufgrund der in der geringen Verlegetiefe vorhandenen klimatischen Beeinflussung der Bodentemperatur weisen geothermische Systeme mit Erdwärmekollektoren eine geringere Energieeffizienz auf als vertikale geothermische Systeme wie Geothermiesonden.

Sogenannte Grabenkollektoren als besondere Form der Erdwärmekollektoren ermöglichen eine Reduzierung des bei Erdwärmekollektoren erhöhten Platzbedarfs. Eine weitere Alternative bieten Erdwärmekörbe, die in räumlich beengten Situationen Anwendung finden. Spiralförmig wird das

Wärmeträgerfluid außen nach unten geführt und in Korbmitte auf kürzestem Wege wieder nach oben. Auf diese Weise wird ein optimaler Wärmeaustausch generiert.

Massivabsorber. Massivabsorber, wie Energiepfähle, Energieschlitzwandelemente und thermisch aktivierte Bodenplatten, sind statisch erforderliche Gründungs- und Verbauwandelemente, die durch den Einbau von Wärmeaustauscherröhrchen sowohl statisch als auch thermisch genutzt werden [Katzenbach et al. 2007]. Dabei darf die Temperatur in den Massivbauteilen die Frostgrenze nicht unterschreiten, um eine Verringerung der Tragfähigkeit durch Frost-Tauwechsel zu verhindern. Die Dimensionierung der Massivbauteile erfolgt nach statischen Gesichtspunkten.

Zur energetischen Nutzung von Pfählen und Schlitzwänden werden Austauscherröhrchen an der Innenseite des Bewehrungskorbes angebracht (Abb. 4.5-5). Die Festlegung der Anzahl der Wärmeaustauscherschleifen erfolgt in Abhängigkeit der Bauteildimensionierung sowie der Mindestbiegeradien der Wärmeaustauscherröhre.

Müssen Pfähle oder Schlitzwände aufgrund größerer Längen auf der Baustelle gestoßen wer-

den, so sind entsprechende Verbindungsmuffen für die Wärmeaustauscherröhre einzuplanen.

Bodenplatten werden durch das horizontale Verlegen von Wärmeaustauscherröhrchen in der Sauberkeitsschicht thermisch aktiviert.

Neben den klassischen Anwendungen wurden in jüngster Vergangenheit Forschungsaktivitäten zur Nutzung von Massivabsorbern in Tunnelbauwerken vorangetrieben. Dazu zählen die Entwicklung von Energievliesen [Adam et al. 2005], die in bergmännisch aufgeföhrenen Tunneln Anwendung finden, sowie von Energietübbingen beim Maschinellen Tunnelvortrieb [Franzius et al. 2009].

Offene Systeme

Offene Systeme ermöglichen eine direkte thermische Nutzung des Grundwassers und stellen die wirtschaftlichste oberflächennahe Geothermienutzung dar. Bedingung hierfür ist neben einem ausreichenden Grundwasservorkommen auch eine entsprechende Grundwasserqualität und -ergiebigkeit. Zum Einsatz kommen für offene Systeme meist Dublettenanlagen, die aus einem Förderbrunnen zur Grundwasserentnahme sowie einem Schluckbrunnen, auch Infiltrationsbrunnen genannt, zur Reinjektion des Grundwassers bestehen. Deren Positionierung muss auf die Grundwasserfließrichtung abgestimmt werden. Durch eine geeignete Positionierung sowie einen ausreichenden Abstand zwischen den Brunnen ist sicherzustellen, dass ein thermischer und hydraulischer Kurzschluss ausgeschlossen werden kann. Im Sinne einer Sicherung der Grundwassereigenschaften ist das rückgeführte Wasser in das gleiche Grundwasserstockwerk zu infiltrieren, aus dem es entnommen wurde [VBI 2008].

Um eine Verockerung (Ausfällungen von Eisenverbindungen) und damit eine Reduzierung der Brunnenleistung zu verhindern, ist auf eine ausreichende hydrochemische Wasserqualität und regelmäßige Wartungsintervalle zu achten [VBI 2008]. Weiterhin ist zu beachten, dass sich die hydrochemischen Eigenschaften des Grundwassers aufgrund der Temperaturänderung verändern. In Trinkwasserschutzgebieten ist der Einsatz offener Systeme daher nicht genehmigungsfähig [VDI 2001].

Neben einer thermischen Beeinflussung, die bei allen geothermischen Anlagensystemen droht, besteht bei offenen Systemen zudem die Gefahr einer

hydrologischen Beeinflussung infolge der Entnahme und Infiltration des Grundwassers.

4.5.2.2 Technische Gebäudeausrüstung – Wärmepumpe

Die Wärme, die mittels oberflächennahen geothermischen Anlagen gewonnen werden kann, weist für die Nutzung zu Heizzwecken von Gebäuden i. d. R. ein nicht ausreichendes Temperaturniveau auf. Durch den Einsatz einer Wärmepumpe wird mithilfe mechanischer oder elektrischer Antriebsenergie das Erreichen eines höheren Temperaturniveaus ermöglicht und so die Umweltenergie nutzbar gemacht. Durch die Umkehrung der Wärmepumpe kann diese auch als Kältemaschine genutzt werden (reversible Wärmepumpe).

Im Sinne einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit einer geothermischen Anlage kann im Sommer durch die Nutzung einer sog. freien Kühlung auf die Verwendung einer Wärmepumpe verzichtet werden, sofern sich der Baugrund zur direkten Aufnahme der vom Gebäudekreislauf abzuföhrenden Energie eignet.

Funktionsweise

Wärmepumpen werden hinsichtlich ihrer Antriebsart z. B. in Kompressions- und Adsorptionswärmepumpen unterschieden. Die mit mechanischer Energie angetriebene Kompressionswärmepumpe ist die am weitesten verbreitete Art der Wärmepumpe. Die vom Wärmeträgermedium im Sondenkreislauf aufgenommene Energie wird im Verdampfer an das in der Wärmepumpe zirkulierende Fluid abgegeben (Abb. 4.5-6). Im Kompressor wird das Wärmeträgermedium verdichtet, wodurch ein höheres Temperaturniveau erreicht wird. Im Kondensator gibt das Wärmeträgermedium des Wärmepumpenkreislaufes seine Energie an das Wärmeträgermedium des Gebäudekreislaufes ab und kondensiert wieder. Im Expansionsventil wird die Temperatur des Wärmeträgermediums der Wärmepumpe reduziert, um eine Energieaufnahme im Verdampfer zu ermöglichen. Der Kreislauf beginnt von Neuem.

Betriebsarten

Unterschieden wird zwischen den Betriebsweisen monovalent (die Wärmepumpe deckt den Wärmebedarf vollständig), monoenergetisch (die Wärme-

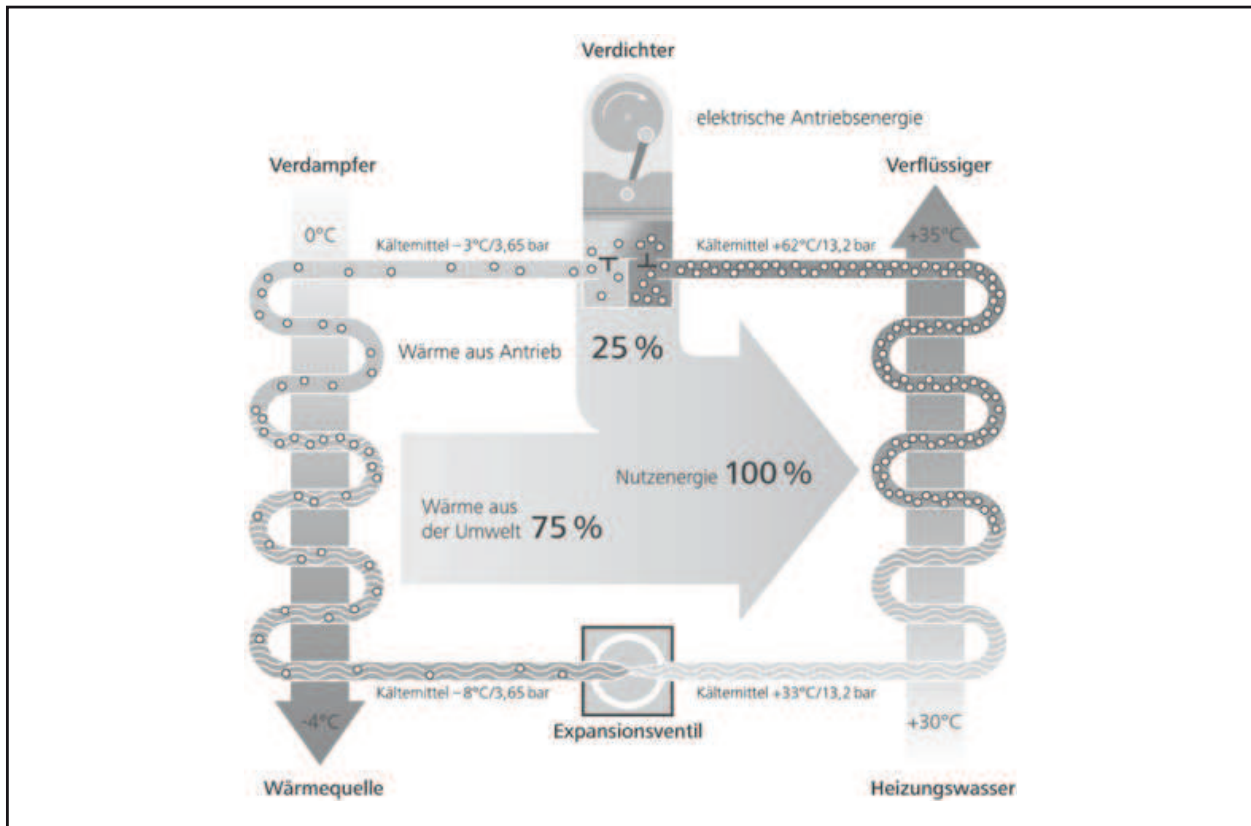


Abb. 4.5-6 Prinzip einer Kompressionswärmepumpe (Quelle: Gerber Ingenieurgesellschaft Geothermie)

pumpe wird durch einen mit der gleichen Energieart (Strom) betriebenen Heizstab o. ä. unterstützt, um insbesondere die Spitzenlasten abzudecken), bivalent-alternativ (die Wärmepumpe wird ab einer bestimmten Temperatur von einem anderen Wärmeerzeuger abgelöst), bivalent-parallel (die Wärmepumpe wird ab einer bestimmten Temperatur von einem anderen Wärmeerzeuger unterstützt) oder bivalent-teilparallel (die Wärmepumpe wird durch einen anderen Wärmeerzeuger teilweise unterstützt bzw. im Falle einer zu geringen Wärmepumpenvorlauftemperatur ersetzt) [Tholen et al. 2008].

Kennzahlen

Die Effizienz einer Wärmepumpe wird über die Leistungszahl ϵ , den Coefficient of Performance (COP) oder die Jahresarbeitszahl (JAZ) beschrieben. Die Leistungszahl ϵ wird definiert als das Verhältnis der dem Gebäude zur Verfügung gestellten Leistung zur aufgenommenen Leistung (in Form von Antriebsleistung etc.) ohne Berücksichtigung der erforderlichen Leistung der Hilfsaggregate

(beispielsweise Umwälzpumpen). Der COP berücksichtigt im Gegensatz dazu die benötigte Hilfsenergie. Die JAZ beschreibt das Verhältnis der dem Gebäude zur Verfügung gestellten Arbeit zur aufgenommenen Arbeit inklusive der Hilfsenergie. Für die Bewertung der Gesamtanlage ist die Jahresarbeitszahl maßgeblich.

Je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen der Quellen- (Boden-) und Nutzttemperatur (Heiztemperatur) ist, desto größer werden Leistungszahl, COP und JAZ und desto effizienter kann die geothermische Anlage arbeiten. Derzeit erreichen energieeffiziente Anlagen Jahresarbeitszahlen größer 4.

4.5.2.3 Geothermische Nutzungsarten

Insbesondere Bürogebäude erfordern neben der Gebäudeheizung zusätzlich eine Gebäudekühlung, die mit einem hohen Energieaufwand verbunden ist. Die Nutzung des Baugrundes als Saisonaler Thermospeicher ist eine kostengünstige und energetisch sinnvolle Lösung. Dabei wird ein Boden-

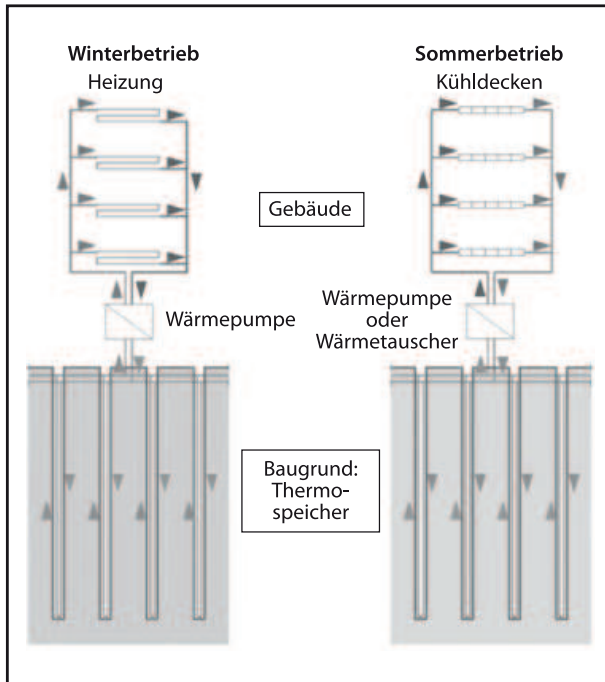


Abb. 4.5-7 Prinzip des Saisonalen Thermospeichers

korpus durch die Bestückung mit Wärmeaustauschern zur Speicherung von Wärme bzw. Kälte herangezogen. Dem Saisonalen Thermospeicher (auch Pendelspeicher genannt) wird im Winter über die in den Erdwärmeaustauschern zirkulierende Wärmeträgerflüssigkeit Energie entzogen und dem zu heizenden Gebäudekomplex zugeführt (Abb. 4.5-7). Durch den Wärmeentzug wird die Temperatur im Baugrund reduziert. Dies entspricht einem Eintrag eines Wärmemengendefizits, d. h. einer Speicherung von Kälte im Boden. In den Sommermonaten muss der Bodenkörper wieder aufgewärmt werden, um ein langfristiges Auskühlen des Baugrundes zu verhindern. Im Sommer kann das aufgeheizte Gebäude mit der während des Winters über den Saisonalen Thermospeicher im Boden gespeicherten Kälte gekühlt werden. Durch die resultierende Erwärmung des thermisch aktivierten Bodenkörpers wird das ursprüngliche Temperaturniveau für den Winterbetrieb wieder hergestellt und eine ausgeglichene Energiebilanz erreicht.

Bei hohen Grundwasserfließgeschwindigkeiten im Baugrund ($v > 0,05$ m/d) ist eine Wärmespeicherung nicht ohne weiteres möglich, da die im Baugrund gespeicherte Energie infolge konvekti-

ver Wärmetransportvorgänge mit dem Grundwasserfluss abtransportiert wird [van Meurs 1986]. In diesem Fall ist mit der gleichen technischen Ausrüstung des Systems des Saisonalen Thermospeichers die thermische Nutzung des natürlichen Wärmepotenzials des nachströmenden Grundwassers möglich.

4.5.3 Geothermische Erkundung

4.5.3.1 Geothermal Response Test

Zur Dimensionierung größerer geothermischer Anlagen werden i. d. R. analytische oder numerische Berechnungen durchgeführt, deren Qualität maßgeblich von der Qualität der Eingangsparameter abhängt. Wesentliche Faktoren sind hierbei zum einen der zutreffende Ansatz des Energie- und Leistungsbedarfs des zu temperierenden Gebäudes und zum anderen die Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Baugrundes. Während zur Energiebedarfsermittlung wissenschaftlich basierte Grundlagen zur wirklichkeitsnahen Abschätzung des Wärme- und Kältebedarfs von Gebäuden existieren, ist die Bestimmung der dem Baugrund zu entziehenden Energie schwierig. Es existieren zahlreiche Parameter mit komplexen Wechselwirkungen, die bei der thermischen Nutzung des Baugrundes Einfluss auf die erzielbare Leistung von Erdwärmeaustauschern haben. Im Wesentlichen lassen sich folgende Einflussfaktoren zusammenfassen [Katzenbach et al. 2009a]:

- bodenphysikalische, thermische und hydromechanische Eigenschaften des Baugrundes
 - Dichte und Porenvolumen des anstehenden Bodens,
 - Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des anstehenden Bodens,
 - natürliche Temperatur des anstehenden Bodens,
 - Temperaturgradient,
 - Grundwasserstand,
 - Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit des Grundwassers,
- Eigenschaften der Erdwärmeaustauscher
 - Anordnung, Abstand und Fläche der Erdwärmeaustauscher,

- Qualität der thermischen Anbindung an den umgebenden Baugrund,
 - äußerer und innerer Durchmesser der Wärmeaustauscherrohre,
 - Material der Wärmeaustauscherrohre,
 - Durchfluss des Wärmeträgermediums,
 - physikalische Eigenschaften des Wärmeträgermediums,
- klimatische Bedingungen.

Die Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)] des thermisch beeinflussten Baugrundes ist eine Stoffeigenschaft, die angibt, wie groß in einem Temperaturfeld der Wärmestrom ist, der sich infolge eines Temperaturgefälles ausbildet. Sie ist also ein Maß für die Geschwindigkeit, in der Energie zu einem Erdwärmeaustauscher nachströmen kann, wenn an diesem ein Energieein- oder -austrag stattfindet, und stellt damit einen der relevantesten Parameter bei der Bemessung geothermischer Anlagen dar. Da die effektiv wirksame Wärmeleitfähigkeit von den meisten der o. g. Faktoren abhängig ist, ist es sinnvoll, die gesuchte Größe in einem Feldversuch an einem fertig installierten Erdwärmeaustauscher unter möglichst betriebsnahen Randbedingungen zu ermitteln, um so möglichst viele der o. g. Einflussparameter zu berücksichtigen. Liegen weitgehend homogene Verhältnisse im Baufeld vor, können die Ergebnisse dieses Versuches bei

größeren Anlagen zur Dimensionierung weiterer Erdwärmeaustauscher herangezogen werden.

Prinzip des Geothermal Response Tests

Zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Baugrundes wird eine temperierte Flüssigkeit als Wärmeträgermedium in einem Erdwärmeaustauscher zirkuliert. Bei konstantem Energieentzug kann nach Erreichen eines quasi-stationären Zustands die effektive Wärmeleitfähigkeit anhand der thermischen Reaktion des Baugrundes (Thermal Response), die sich am Verlauf der Vor- und Rücklauftemperatur zeigt, berechnet werden (Abb. 4.5-8).

Zur Auswertung des Geothermal Response Tests wird üblicherweise die Linienquellentheorie herangezogen. Mit zunehmender Versuchsdauer und zunehmender Ausdehnung des thermisch beeinflussten Bereichs steigt die Genauigkeit der Auswertung eines Geothermal Response Tests. Die Geschwindigkeit der thermischen Ausdehnung ist vom Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit zur Wärmekapazität abhängig.

Die zeitliche Temperaturentwicklung T_f im Erdwärmeaustauscher lässt sich mit Hilfe der Linienquellentheorie wie folgt berechnen:

$$T_f(t) = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4at}{r_b^2}\right) - \gamma \right] + q \cdot R_b \quad (4.5.2)$$

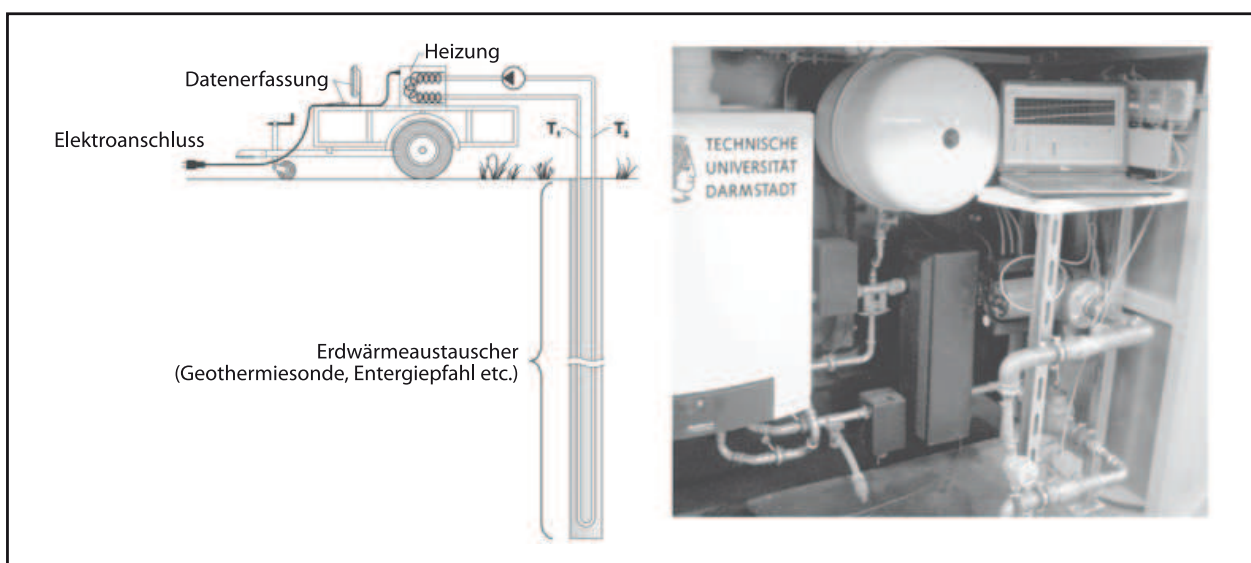


Abb. 4.5-8 Mobile Messeinrichtung zur Durchführung eines Geothermal Response Tests [Gehlin 2002, Katzenbach et al. 2009]

T_0 ist die Anfangstemperatur des Fluids/Erdsreichs zum Zeitpunkt $t = 0$ und q der spezifische Wärmeeintrag bzw. -entzug [W/m]. Die Temperaturleitfähigkeit des Erdsreichs a [m^2/s] kann über $a = \lambda/(\rho \cdot c)$ berechnet werden. r_b ist der Bohrlochradius [m] und γ die Euler'sche Konstante (0,57722). Der Bohrlochwiderstand geht über R_b [(m·K)/W] ein.

Der Bohrlochwiderstand R_b berücksichtigt kumulativ alle thermischen Widerstände, die zwischen Fluid und Bohrlochwand auftreten. Er ergibt sich aus der Differenz zwischen der Fluidtemperatur im Erdwärmeaustauscher T_f und der Temperatur an der Bohrlochwand T_b in Abhängigkeit vom spezifischen Wärmeeintrag bzw. -entzug q :

$$T_f - T_b = R_b \cdot q \quad (4.5.3)$$

Für einen konstanten Wärmeeintrag bzw. -entzug gilt für die zeitabhängige Fluidtemperatur:

$$T_f(t) = k \cdot \ln(t) + m \quad (4.5.4)$$

Wird die bei der Versuchsdurchführung gemessene mittlere Fluidtemperatur T_f über den Logarithmus der Zeit aufgetragen (Abb. 4.5-9), so ergibt sich die sog. effektive Wärmeleitfähigkeit des thermisch beeinflussten Baugrunds aus der Steigung k der sich ergebenden Versuchsgeraden:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{q}{4\pi k} \quad (4.5.5)$$

Der spezifische Wärmeeintrag bzw. -entzug q [W/m] wird durch Division des während der Versuchsdurchführung gemessenen Energieein- bzw. -austrags Q [W] durch die Bohrlochlänge H [m] berechnet. Die so ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} ist ein integraler Wert der Wärmeleitfähigkeiten aller über die Bohrlochtiefe erschlossenen Böden und beinhaltet die thermischen Einflüsse der in-situ Bedingungen wie Grundwasserströmungen, Bohrlochverfüllung etc.

Enhanced Geothermal Response Tests

Der Enhanced Geothermal Response Test (EGRT) bietet eine tiefenorientierte Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mittels faseroptischer Messeinrichtungen. Ein mit dem Erdwärmeaustauscher installiertes Glasfaserkabel ermöglicht die Erfassung der Temperaturveränderung während der Versuchsdurchführung in kurzen Zeitintervallen über die Tiefe mit einer räumlichen Auflösung von 25 cm bis 50 cm [Hurtig et al. 2000]. Der Enhanced Geothermal Response Test erlaubt somit eine bereichsweise Auswertung der effektiven Wärmeleitfähigkeit und die Lokalisierung eventueller Parameterveränderungen. Eine weitere Variation des EGRT ermöglicht über den Einbau eines Hybridkabels, das gleichzeitig als Mess- und Heizkabel fungiert, einen konstanten, von äußeren Einflüssen unbeeinflussten Energieeintrag während des Tests. Über die elektrische Aufheizung des Kabels wird eine über die gesamte Länge definierte Heizleistung in den Baugrund eingebracht und die Temperaturän-

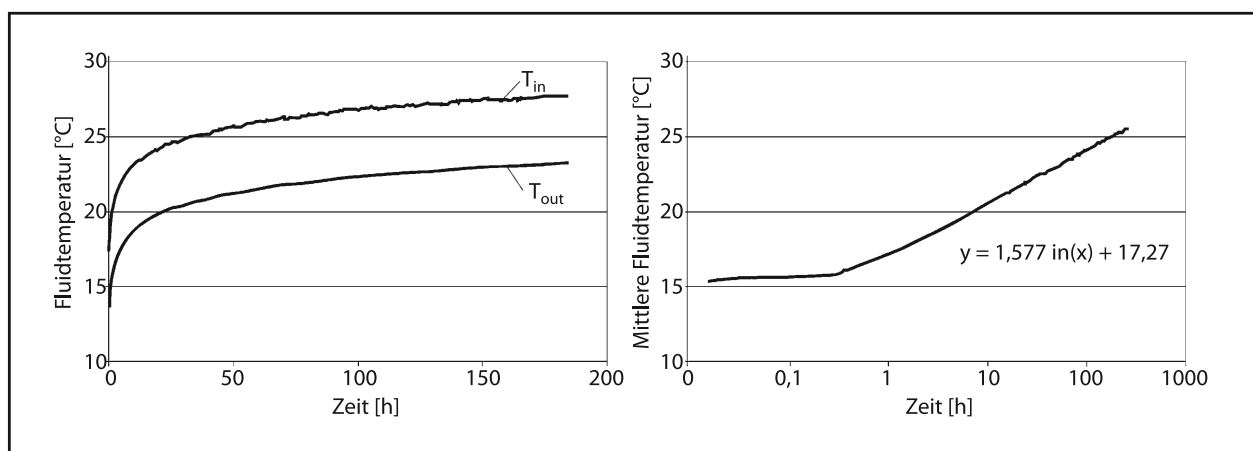


Abb. 4.5-9 Typischer Temperaturverlauf während der Versuchsdurchführung eines Geothermal Response Tests [Poppei et al. 2006] *links*: linear aufgetragen, *rechts*: halblogarithmisch aufgetragen

derung entlang der Glasfaser mit Hilfe faseroptischer Messungen aufgezeichnet [Heidinger et al. 2004]. Die effektiven Wärmeleitfähigkeiten der entlang der Messstrecke anstehenden Baugrundsichten können anschließend über den oben beschriebenen theoretischen Ansatz der Linienquelle ermittelt werden.

4.5.3.2 Laborversuche

Stehen repräsentative Bodenproben des anstehenden Untergrundes zur Verfügung, so bietet sich die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmespeicherkapazität des Bodens im Labor an.

Bei stationären Wärmeleitfähigkeitsversuchen werden die eine Seite der Probe mit einer Wärmequelle und die gegenüberliegende Seite mit einer Wärmesenke in Kontakt gebracht. Nach einiger Zeit stellt sich ein konstanter Wärmestrom (stationärer Zustand) von der wärmeren zur kühleren Seite hin ein. Instationäre Versuche sind weniger zeitintensiv in der Versuchsdurchführung, jedoch häufig aufwändiger und komplizierter in ihrer Auswertung. Der notwendige Temperaturgradient wird konstant oder impulsartig aufgebracht [Pribnow 1994].

Zur versuchstechnischen Bestimmung der Wärmespeicherkapazität c kann ein Kalorimeter herangezogen werden.

Im Vergleich zum Geothermal Response Test ermöglichen Laborversuche allerdings immer nur einen punktuellen Aufschluss über die thermischen Eigenschaften des beeinflussten Bodenkörpers. Heterogenität und der Einfluss konvektiver Wärmetransportvorgänge infolge Grundwasserströmung lassen sich im Laborversuch nicht berücksichtigen.

4.5.4 Dimensionierung

Der erforderliche Dimensionierungsumfang ergibt sich aus der Zuordnung zu den Geothermischen Kategorien (s. Abschn. 4.5.1.2).

In der Richtlinie VDI 4640 finden sich Anhaltswerte für die Entzugsleistung in Abhängigkeit vom Boden und der jährlichen Betriebsstunden (1.800 h/a oder 2.400 h/a). Diese variieren zwischen

20 W/m (bei 2.400 h/a) bzw. 25 W/m (bei 1.800 h/a) für trockene Böden, 50 W/m (bei 2.400 h/a) bzw. 60 W/m (bei 1.800 h/a) für Festgesteine bzw. wassergesättigte Böden und 70 W/m (bei 2.400 h/a) bzw. 84 W/m (bei 1.800 h/a) für Festgesteine hoher Wärmeleitfähigkeit [VDI 2001]. Die nach VDI 4640 abgeschätzten Entzugsleistungen gelten nur für Anlagen, die die folgenden Bedingungen erfüllen: kleine Anlagen mit Doppel-U-Sonden, die einen Mindestabstand von 5 m ($L \leq 50$ m) bzw. 6 m ($50 \text{ m} < L \leq 100$ m) aufweisen, und für einen reinen Wärmeentzug. Weiterhin sind der VDI 4640 Spannen sowie typische Rechenwerte für die thermischen Bodenparameter Wärmeleitfähigkeit λ sowie Wärmespeicherkapazität c zu entnehmen. Unterschieden wird zwischen trockenen und wassergesättigten Böden. Generell sind in trockenen Böden geringere Entzugsleistungen zu erwarten, während grundwasserführende hohe Entzugsleistungen erwarten lassen.

In der Literatur werden für Energiepfähle mögliche spezifische Entzugsleistung von 40–70 W/m angegeben [Adam 2007; Koenigsdorff 2005]. Die Entzugsleistung von Pfählen größeren Durchmessers (30–50 cm) kann in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers mit ca. 35 W/m² abgeschätzt werden. Eine thermische aktivierte Bodenplatte lässt eine spezifische Entzugsleistung von ca. 15–30 W/m² erwarten [Adam 2007]. Es soll an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den hier aufgeführten spezifischen Entzugsleistungen lediglich um geschätzte Werte handelt. Die tatsächlich erzielbare Entzugsleistung ist in großem Maße von den vorherrschenden Randbedingungen, also vom Gebäudebetrieb sowie den Untergrundverhältnissen abhängig.

Für verlässliche Werte hinsichtlich der zu erreichenden Entzugsleistung einer geothermischen Anlage ist jedoch der Einfluss zahlreicher weiterer Parameter zu berücksichtigen: die in Abschn. 4.5.3.1 näher beschriebenen bodenphysikalischen Randbedingungen, die Eigenschaften der Erdwärmeaustauscher, die Dauer des Wärmeentzugs bzw. -eintrags sowie ggf. vorhandene gegenseitige thermische Beeinflussung einzelner Erdwärmeaustauscher.

Als Randbedingung für die Dimensionierung wird die maximal zulässige Temperaturänderung herangezogen. Für Erdwärmekollektoren gilt nach

VDI 4640 eine maximale Temperaturänderung des zum Wärmeaustauscher zurückkehrenden Arbeitsmittels im Wochenmittel von ± 12 K und bei Spitzenlast von ± 18 K. Für Geothermiesonden hingegen ist eine maximale Temperaturänderung von ± 11 K (Wochenmittel) bzw. ± 17 K (Spitzenlast) zulässig.

Bei größeren Anlagen ist es erforderlich, hinsichtlich der thermischen Bodeneigenschaften nicht auf Erfahrungswerte zurückzugreifen, sondern die lokalen Randbedingungen z. B. durch einen in-situ Geothermal Response Test (s. Abschn. 4.5.3.1) zu bestimmen.

Insbesondere bei der Betrachtung des Langzeitverhaltens geothermischer Anlagen sind Simulationswerkzeuge unabdingbar. Programme wie Earth Energy Designer (EED) oder das Erdwärmesondenprogramm EWS ermöglichen die Bemessung größerer Sondenfelder und die Berücksichtigung ihrer geometrischen Anordnung. Eingang finden hier neben den gebäudetechnischen Parametern auch die materialspezifischen Eigenschaften der Wärmeaustauscher und der Bohrlochverfüllung.

Die Bildung von Frostkörpern im Untergrund sollte möglichst vermieden werden. Frost-Tauwechsel als Folge eines zu hohen Wärmeentzugs, einer veränderten Gebäudenutzung, einer defekten Anlage oder auch einer thermischen Beeinflussung von Nachbaranlagen können zu Schäden an der Bohrlochverfüllung in Form von Rissen führen, sodass die abdichtende Funktion der Verfüllung nicht mehr gewährleistet ist. Neben der Schaffung von Wasserwegsamkeiten im Bohrloch besteht die Gefahr des Verlustes der thermischen Anbindung an den Baugrund. Bei Energiepfählen können Frost-Tauwechsel zu einer Reduzierung der Tragfähigkeit durch eine Schädigung des Betons führen.

Insbesondere komplexe geothermische Anlagen bzw. Anlagen mit schwierigen Randbedingungen erfordern den Einsatz numerischer Berechnungsmethoden. Die Ausdehnung des thermischen Einflusses einer geothermischen Anlage sowie der Einfluss von Grundwasserströmung sind nur mittels numerischer Programme zu analysieren.

4.5.5 Qualitätssicherung

Ziel der Qualitätssicherung ist die Vermeidung schädlicher Auswirkungen auf Grundwasser und Boden sowie die Sicherstellung eines wartungsfreien Betriebes und der größtmöglichen Leistungsfähigkeit der geothermischen Anlage.

Zu den einzuhaltenden Qualitätsstandards zählt eine umweltschonende Herstellung der geothermischen Systeme unter Einhaltung einer größtmöglichen Sicherheit auf der Baustelle. Dies umfasst insbesondere die Herstellung und den Ausbau von notwendigen Bohrungen sowie die Herstellung der geothermischen Anlage einschließlich der gebäudeseitigen Anlagenteile nach dem Stand der Technik, nicht zuletzt durch die Berücksichtigung der Vorgaben der einschlägigen Regelwerke und die vollständige Dokumentation der durchgeführten Arbeiten.

Zunächst ist vor Ort während der Herstellung zu prüfen, ob die angetroffenen Baugrundverhältnisse den in der Planung und Auslegung der geothermischen Anlage berücksichtigten Verhältnissen entsprechen; ggf. sind Anpassungen vorzunehmen.

Aus bautechnischer Sicht ist bei der Herstellung von Erdwärmehaustauschern die Qualitätssicherung beim Transport und der Verarbeitung der verwendeten Rohrsysteme von besonderer Bedeutung. Zur Überprüfung der Schadfreiheit ist eine dreifache Druckprüfung vorzusehen: nach der werksseitigen Herstellung der Wärmeaustauscherrohre, nach dem Einbau und vor der Bohrlochverfüllung bzw. Betonage sowie nach Fertigstellung des Erdwärmehaustauschers.

Insbesondere bei geothermischen Anlagen, bei denen Geothermiesonden einen kleinen Abstand untereinander aufweisen, ist darauf zu achten, dass Bohrverfahren und -geräte mit möglichst geringen Bohrlochabweichungen zum Einsatz kommen.

Besonderes Augenmerk ist auf die ordnungsgemäße Verfüllung des Bohrlochs zu richten, um die Entstehung geotechnischer Schadensfälle zu vermeiden. Hilfreich für die Erkennung etwaiger Unregelmäßigkeiten ist die Messung von Verpressdruck und Verpressmenge. Ist ein deutlicher Mehrverbrauch an Verfüllmaterial erkennbar, so ist die zuständige Genehmigungsbehörde zu informieren.

Im Hinblick auf eine qualitätsgesicherte Ausführung von Geothermiebohrungen und Herstellung von Geothermiesonden haben sich in den vergangenen Jahren Zertifizierungsverfahren für Fachbetriebe, wie die DVGW W 120 (der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches), das Gütesiegel Geothermiesonden sowie die RAL-Gütesicherung GZ 696 „Gütesicherung geothermischer Anlagen“ bewährt [Tholen et al. 2008].

Soll eine geothermische Anlage dauerhaft außer Betrieb genommen werden, so ist das Arbeitsmedium durch Ausspülen zu entfernen und zu entsorgen. Während Erdwärmekollektoren nach Möglichkeit vollständig rückgebaut werden sollten, sind Geothermiesonden vollständig mit dichtendem Material zu verfüllen. Es ist Aufgabe eines unabhängigen Sachverständigen den Rückbau der geothermischen Anlagenkomponenten zu prüfen.

4.5.6 Rechtliche Aspekte und Genehmigung

Die Errichtung und der Betrieb von Anlagen zur Nutzung der Erdwärme werden in Deutschland im Wesentlichen durch das Bundesberggesetz (BBergG), das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und die jeweiligen Wassergesetze der Länder geregelt.

4.5.6.1 Bergrecht

Die Erschließung von Rohstoffen wird in Deutschland über das Bundesberggesetz (BBergG) geregelt. Demnach unterliegen das Aufsuchen von Rohstoffen einer Erlaubnispflicht und die Gewinnung einer Bewilligung. Das Bundesberggesetz definiert die Rohstoffe, für die es Anwendung findet, und schließt darin die Erdwärme, die geothermische Nutzung des Untergrundes, ausdrücklich ein. Es wird zwischen sogenannten und grundeigenen Rohstoffen unterschieden. Nach § 3 Abs. 3 BBergG ist die Erdwärme den bergfreien Bodenschätzen zuzuordnen, d. h. das Recht auf Gewinnung der Erdwärme ist dem Grundstückseigentümer entzogen. Das Aufsuchen von Erdwärme bedarf nach § 7 BBergG einer Erlaubnis und die Gewinnung von Erdwärme einer Bewilligung nach § 8 BBergG oder einer Verleihung von Bergwerksei-

gentum nach § 9 BBergG, wenn die geothermische Nutzung nicht (nur) zur Versorgung des eigenen Grundstücks dient (s. o.). Sofern eine bergrechtliche Erlaubnis bzw. Bewilligung erforderlich ist, besteht eine Betriebsplanpflicht, der durch die Aufstellung eines Betriebsplans für die Gewinnung und die dafür notwendigen baulichen Einrichtungen und Anlagen nachzukommen ist.

Für die Gewinnung von Erdwärme entfällt jedoch die Notwendigkeit einer bergrechtlichen Bewilligung, sofern die gewonnene Erdwärme für solche Zwecke genutzt wird, die im Zusammenhang mit der baulichen Nutzung eines einzelnen Grundstücks stehen (§ 4 Abs. 2 Nr. 1 BBergG). Die geothermische Nutzung zur Versorgung des eigenen Grundstücks wird, gestützt durch diese Bestimmung, in der landesverwaltungsbehördlichen Praxis als bergrechtlich nicht relevant eingestuft [Sanden 2006]. Für den Betrieb einer geothermischen Anlage mit Sondenteufen < 100 m ist eine wasserrechtliche Genehmigung ausreichend, sofern eine thermische Beeinflussung benachbarter Grundstücke weitgehend ausgeschlossen werden kann. Bei Sondenteufen > 100 m besteht nach § 127 BBergG dem Bergamt gegenüber eine Anzeigepflicht und ggf. eine Betriebsplanpflicht.

4.5.6.2 Wasserrecht

Geothermische Anlagen bergen die Gefahr möglicher negativer Auswirkungen auf die stoffliche Beschaffenheit und den gesamten Wasserhaushalt. Durch die Herstellung und den Betrieb der verschiedenen Technologien der oberflächennahen Geothermie sind unterschiedliche systematische Beeinflussungen des Untergrundes gegeben, die entsprechend zu untersuchen und wasserrechtlich zu bewerten sind. Folglich sind das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und die Wassergesetze der Länder sowie die weiteren Verordnungen der Länder für die Herstellung und den Betrieb von Anlagen der oberflächennahen Geothermie zu beachten. Gemäß § 5 Abs. 1 WHG ist die nach den Umständen erforderliche Sorgfalt anzuwenden, um eine Verunreinigung des Grundwassers bzw. eine nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu verhindern.

Nach § 9 WHG stellen die Entnahme von Grundwasser (§ 9 Abs. 1 Nr. 5 WHG) und das Einleiten

von Stoffen ins Grundwasser (§ 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG) eine Grundwasserbenutzung dar. Folglich liegt diese auch beim Betrieb einer Anlage zur direkten Grundwassernutzung (Grundwasserentnahme und Einleitung ins Grundwasser) sowie bei der Herstellung von Bohrungen (mögliche Verunreinigung des Grundwassers durch den Bohrvorgang) vor.

Besonders die thermische Beeinflussung von Grundwasser durch eine Anlage der oberflächennahen Geothermie stellt gemäß § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG eine Benutzung dar, da die geothermische Anlage damit die physikalische Beschaffenheit, nämlich die Temperatur, beeinflusst.

Grundsätzlich ist nach § 8 WHG für die Benutzung von Gewässern eine wasserrechtliche Erlaubnis oder Bewilligung erforderlich. Sofern durch die geplante Maßnahme eine Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit ausgehen könnte, die nicht durch entsprechende Auflagen oder Maßnahmen nach § 13 ausgeglichen werden kann, wird eine solche Bewilligung nach § 12 WHG versagt. Besondere Auflagen bestehen in Wasserschutzgebieten.

Im Rahmen des Verfahrens zur Erteilung einer Erlaubnis oder Bewilligung nach § 8 Abs. 1 und § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG ist nachzuweisen, dass durch Herstellung und Betrieb einer geothermischen Anlage keine dauerhafte und erheblich nachteilige Beeinflussung der physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Grundwassers erfolgt.

Der Einfluss geothermischer Anlagen ist insbesondere in Ballungszentren, in denen die Grundwassertemperatur i. d. R. infolge anthropogener Einflüsse bereits deutlich erhöht ist, sorgfältig zu analysieren. Genehmigungsbehörden machen klare Vorgaben für eine „verträgliche Bewirtschaftung“ des Bodens und des Grundwassers. Eine wasserrechtliche Erlaubnis oder Bewilligung, zumindest bei größeren Anlagen, ist daher meist von der Vorlage einer Prognose der thermischen Inanspruchnahme des Baugrundes abhängig.

Das Bewilligungs- bzw. Erlaubnisverfahren wird in den einzelnen Bundesländern von den jeweils zuständigen Behörden unterschiedlich gehandhabt.

4.5.6.3 Geothermieleitfäden der Länder

Die meisten Bundesländer haben mittlerweile Leitfäden zur oberflächennahen Geothermie veröffentlicht, die die notwendigen Schritte im Genehmigungsverfahren beschreiben und Antragsformulare enthalten. Beim Vergleich dieser Leitfäden wird ersichtlich, dass die Genehmigungspraxis in einigen Punkten, z. B. der Abstandsregelung zu Nachbargrundstücken, in den einzelnen Bundesländern derzeit noch stark differiert.

4.5.6.4 Sonstige rechtliche Vorgaben

Der Bau und Betrieb von Anlagen der oberflächennahen Geothermie wird (meist indirekt) auch vom Bauordnungs- und Bauplanungsrecht tangiert. Der bauordnungsrechtliche Umgang mit solchen Anlagen in Bezug auf Genehmigung und Bauaufsicht ist i. d. R. in den Landesbauordnungen geregelt [Benz 2007].

Naturschutzrechtliche Vorschriften können in erster Linie in Bezug auf die Herstellung geothermischer Anlagen tangiert sein, während im Immissionsschutzrechtlichen Bereich das Bundes-Immissionsschutzgesetz solche Anlagen zwar erfasst, aber als nicht genehmigungspflichtig definiert.

Literaturverzeichnis Kap. 4.5

- Adam D, Markiewicz R, Oberhauser A (2005) Nachhaltige Nutzung von Erdwärme mittels innovativer Systeme im Ingenieurtiefbau und Tunnelbau. 1. Departmentkongress Bautechnik & Naturgefahren, 10–11.05.2005, Wien
- Adam D (2007) Effizienzsteigerung durch Nutzung der Bodenspeicherung. Ringvorlesung Ökologie TU Wien, 03.05.2007
- Benz S (2007) Rechtliche Rahmenbedingungen für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie. BWV – Berliner Wissenschafts-Verlag, Berlin
- Boldt G, Weller H (1984) Bundesberggesetz – Kommentar. Verlag W. de Gruyter, Berlin
- Brandl H, Adam D (2002) Die Nutzung geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile. Geotechnique, Vol. XL, 124–149
- Dornstädter J, Heidinger P, Heinemann-Glutsch B (2008) Erfahrungen aus der Praxis mit dem Enhanced Geothermal Response Test (EGRT). Der Geothermiekongress 2008, 11.–13.11.2008, Karlsruhe, S 271–279
- Ennigkeit A (2002) Energiepfahlanlagen mit Saisonalem Thermospeicher. Mitteilungen des Institutes und der

- Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 60
- Franzius J, Pralle N, Gottschalk D (2009) Der Energietübing – Ein Bauteil zum Nutzen von Infrastruktur und regenerativer Energieversorgung. 1. Darmstädter Ingenieurkongress Bau und Umwelt, 14.–15.09.2009, Darmstadt
- Gehlin S (2002) Thermal Response Test – Method development and evaluation. Doctoral Thesis 2002:39, Lulea University of Technology, Dept. of Environmental Engineering, Div. of Water Resources Engineering, Sweden
- Halozan H, Rieberer R (2004) Erdreichnutzung mit Direktverdampfung und Wärmerohrsonden. 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpe der Geothermischen Vereinigung e.V., 10.–12.11.2004, Landau in der Pfalz, S 284–291
- Heller W (2007) Bundesberggesetz. VGE-Verlag, Essen
- Hurtig E, Ache B, Großwig S, Hänel K (2000) Fibre optic temperature measurements: a new approach to determine the dynamic behaviour of the heat exchanging medium inside a borehole heat exchanger. TERRASTOCK 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, 28.08.–1.9.2000, Stuttgart, S 189–194
- Katzenbach R, Waberseck T (2005) Innovationen bei der Nutzung geothermischer Energie im Verkehrswegebau. Bauingenieur 80 (2005) 9, S 395–401
- Katzenbach R, Clauss F, Waberseck T, Vogler M, Adamietz U (2007) Aktuelle Entwicklungen bei Energiepfahl- und Erdwärmesondenanlagen. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität, Heft 76, S 129–151
- Katzenbach R, Clauss F, Waberseck T, Wagner I (2009a) Geothermal Site Investigation using the Geothermal Response Test (GRT). 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (17th ICSMGE), 5.–9.10.2009, Alexandria, Egypt, Proceedings Vol. 2, pp 1060–1063
- Katzenbach R, Wagner I (2009b) Impacto del agua subterránea en los sistemas geotérmicos. Ingeniería Civil (2009) 156, 91–101
- Kremer E (2001) Bergrecht. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart
- Koenigsdorff R (2005) Geothermisches Heizen und Kühlen von Gebäuden. Vortragsveranstaltung des Arbeitskreises Technische Gebäudeausrüstung der VDI Baden-Württemberg, EnBW AG Stuttgart, 14.03.2005
- Laloui L, Nuth M, Vulliet L (2005) Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. Ground Improvement – Case Histories. Elsevier, Amsterdam
- van Meurs GAM (1986) Seasonal Storage in the Soil. Thesis. University of Technology Delft, Department of Applied Physics, Netherlands
- Poppei J, Schwarz R, Mattson N, Steinmann G, Laloui L (2006) Innovative Verbesserungen bei Thermal Response Tests. 9. Geothermische Fachtagung der Geothermischen Vereinigung e.V., 15.–17.11.2006, Karlsruhe, S 281–292
- Pribnow DFC (1994) Ein Vergleich von Bestimmungsmethoden der Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung von Gesteinsgefügen und Anisotropie. Fortschrittbericht der VDI-Zeitschriften, VDI-Reihe 19, Nr. 75, VDI-Verlag, Düsseldorf
- Sanden J (2006) Die Optimierung des rechtlichen Rahmens der Errichtung und des Betriebes oberflächennaher geothermischer Wärmepumpenanlagen. 9. Geothermische Fachtagung der Geothermischen Vereinigung e.V., 15.–17.11.2006, Karlsruhe, S 232–240
- Tholen M, Walker-Hertkorn S (2008) Arbeitshilfen Geothermie – Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen. wvvgw, Bonn
- VBI (2008) VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie. Verband Beratender Ingenieure (VBI), Berlin
- VDI (2001) VDI 4640 – Thermische Nutzung des Untergrundes. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Berlin
- Technische Regelwerke*
- Bundesberggesetz – BBergG (1980)
- Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG (2009) Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien
- Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG (2008) Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich
- Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz) – BBodSchG (1998)
- Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz) – WHG (2009)
- VDI-Richtlinien – VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrundes. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Blatt 1: Grundlagen, Genehmigung, Umweltaspekte. Juni 2008 (Entwurf)
- Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. September 2001
- Blatt 3: Thermische Nutzung des Untergrundes. Juni 2001
- Blatt 4: Direkte Nutzungen. September 2004