

Grundsätzliche Überlegungen zur regionalen hydrogeologischen Beurteilung von Standorten für den Einsatz von Erdwärmepumpen

Barthel, R.

Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

1 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag werden Möglichkeiten der Standortbewertung im Hinblick auf die Anwendung flacher geothermischer Nutzungen (bis ca. 200 m Tiefe) auf der Basis von geologischen und hydrogeologischen Grunddaten vorgestellt und verglichen. Stellvertretend für andere Nutzungen erfolgt die Diskussion anhand der heute weit verbreiteten Erdwärmesonden. Obwohl eine individuelle Bewertung von Einzelstandorten für die Vorplanungsphase auf der Basis solcher Grunddaten denkbar ist, wird der Schwerpunkt auf die Betrachtung von regionalen Bewertungsverfahren gelegt. Besonderes Augenmerk gilt dabei den in jüngerer Zeit (2002 bis 2004) zahlreich erschienenen landesweiten Leitfäden, Potentialkarten und Standorteignungskarten. Diskutiert wird, welche Ziele entsprechende regionale Karten verfolgen und erreichen können, für welchen Nutzerkreis welche Informationen relevant sind, welche Daten für die Erstellung notwendig und welche davon verfügbar sind, wie die meist als Punktinformationen vorliegenden Messdaten in die Fläche übertragen werden können und letztlich, wie sich das Verhältnis des Aufwands zur Erstellung zum Nutzen für den Anwender darstellt. Besonderes Interesse gilt der in allen Bewertungsaufgaben wiederkehrenden Frage, nach welchen Kriterien und mit welchen Algorithmen die Eignung oder das Potenzial aussagekräftig, verlässlich und anwendungsspezifisch festgelegt werden können. Ziel ist es, Hinweise auf die richtige Balance im Gefüge der maßgeblichen Randbedingungen: Problemstellung - Zielgruppe - Datenverfügbarkeit - Aufwand - Nutzen zu geben. Eine detaillierte Fallstudie anhand der Region Unterfranken in Nordbayern (8500 km²) wurde von BARTHEL (2000) vorgestellt. In Ergänzung zu dieser Arbeit werden hier nun neuere Entwicklungen und Ergänzungen in stärker verallgemeinerter Form vorgestellt.

2 Geothermische Nutzungen des flacheren Untergrundes in Deutschland

Die Verbreitung von erd- und grundwassergekoppelten Wärmepumpenanlagen für die Heizung und Kühlung von Gebäuden ist in den letzten Jahren sprunghaft angestiegen. Nachdem in den 90er Jahren die Schweiz, Schweden und die USA die größten Installationszahlen und Wachstumsraten aufzuweisen hatten, ist heute Deutschland mit insgesamt ca. 930 GWh/a installierter Heizarbeit das Land mit den höchsten Zuwächsen (etwa 20 % Steigerung pro Jahr seit 2000; SANNER, 2005a). Dies ist vor allem auch auf Anreize zurück zu führen, die durch Förderungsmaßnahmen des Bundes und der Länder für erneuerbare Energien insgesamt geschaffen wurden (aktuell z.B. Erneuerbare-Energien-Gesetz oder KfW-CO₂-Gebäudesanierungsprogramm - Übersicht und Erläuterungen unter www.energiefoerderung.info). Im speziellen sind Fördermaßnahmen wie das Förderprogramm KLIMASCHUTZ-PLUS (Oberflächennahe Geothermie) des Landes Baden-Württemberg zu nennen (MUVBW, 2005a). Weiterhin hat die frühe und intensive Beschäftigung mit dem Thema im wissenschaftlichen Bereich (z.B. SANNER, 1992) sowie die Öffentlichkeitsarbeit v.a. durch die „Geothermische Vereinigung“ (www.geothermie.de) mit ihrem Publikationsorgan „Geothermische Energie“, des „Bundesverbands WärmePumpe“ und das „IZW - Informationszentrum Wärmepumpen“ des Fachinformationszentrums Karlsruhe (www.fiz-informationsdienste.de/de/FG/EnergUmw/izw) die Vertrauenswürdigkeit der Technologien und deren Bekanntheitsgrad gefördert. Zusätzlich haben gerade auch deutsche Industrieunternehmen den sich entwickelnden Markt erkannt und sind deshalb heute in der Lage höchsteffiziente Hochtechnologie-Produkte anbieten zu können, die die energiesparende und CO₂-Ausstoß reduzierende Wirkungsweise der neuesten Wärmepumpensysteme erst möglich machen. Nicht zuletzt sind die in Deutschland in den letzten Jahren grundsätzlich gewachsene Sensibilität für energie- und umweltpolitische Themen und die gesteigerte Bereitschaft der Bevölkerung, zur Erhaltung der Umwelt, der nachhaltigen Nutzung (fossiler) Ressourcen und zum Schutz des Klimas beizutragen, als Motor der Entwicklung zu nennen. Heute sind in Deutschland etwa 45.000 erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen bekannt, die insgesamt 930 GWh pro Jahr erzeugen, wovon etwa zwei Drittel aus Erdwärme stammen. Etwa 20 größere hydrogeothermische Anlagen liefern zusätzlich etwa 280 GWh/a (SANNER, 2005a).

2.1 Funktionsweise von Erdwärmesonden und andere flache geothermische Nutzungen

Erdwärmesonden sind geschlossene Systeme von Kunststoffrohren, die in meist 40 – 100 (200) m tiefen Bohrlöchern installiert werden. In den Rohrsystemen zirkuliert ein Wasser-Sole-Gemisch, welches dem umgebenden Gestein die Wärme entzieht. Mit Hilfe einer Wärmepumpe wird die gewonnene Erdwärme anschließend auf das gewünschte Heiztemperatur-Niveau angehoben. Für weitere Details wird auf die umfangreiche einschlägige Literatur verwiesen (z.B. SANNER, 1992).

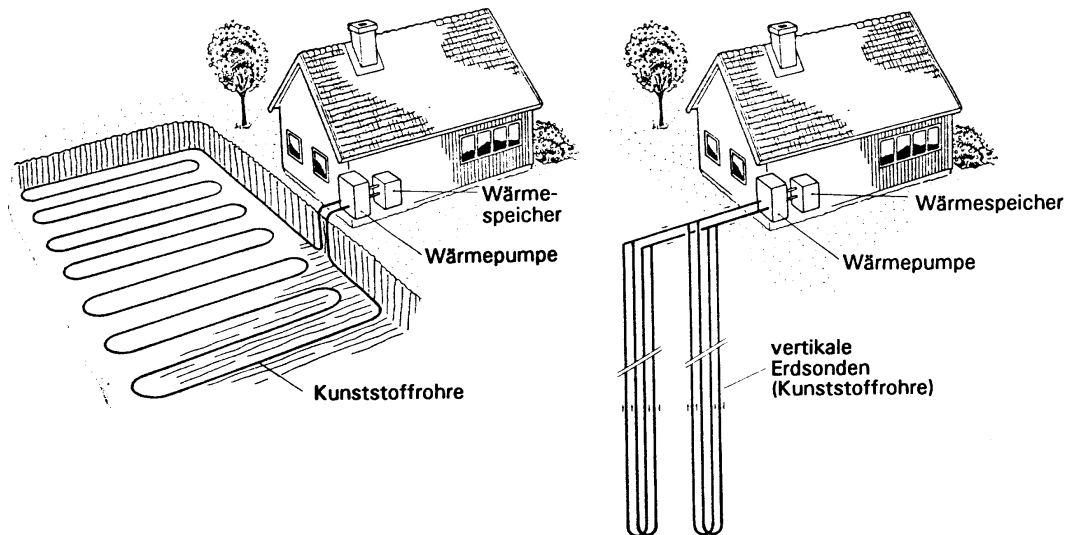


Abbildung 1: Gewinnung von Wärme aus dem Untergrund mit Hilfe geschlossener Systeme. Links: flach verlegte, horizontale Erdreichwärmetauscher (= Erdregister, Erdkollektoren). Rechts: vertikale Erdreichwärmetauscher (= Erdsonden, Erdwärmesonden). Aus SIA (1996).

Neben den inzwischen weit verbreiteten „Erdwärmesonden“, bei denen der Wärmetauscher der Wärmepumpe in Bohrlöcher eingebracht wird (Abb. 1), sind auch andere thermische Nutzungen des flacheren Untergrundes möglich. Seltener zum Einsatz kommen heute horizontale Erdwärmetauscher (in geringer Tiefe flächig verlegt, Abb. 1) und grundwassergekoppelte Systeme, bei denen die Wärmeenergie dem aus Brunnen geförderten Grundwasser entzogen wird. Neben den reinen Wärmegegewinnungssystemen ist auch die saisonale Wärmespeicherung im Untergrund möglich. Durch Wärmespeicherung kann die Effizienz z.B. von Blockheizkraftwerken, thermischen Solaranlagen etc. unter Umständen deutlich gesteigert werden, indem Überschusswärme in Zeiten niedrigen Wärmebedarfs gespeichert, und in der Heizperiode zurück gewonnen wird. Trotz intensiver Forschungsbemühungen (Übersichten siehe u.a. BAKEMA et al., 1995; BENNER & HAHNE, 2000) konnte noch kein Durchbruch erzielt werden. Dennoch wird die Technologie weiter in richtungweisenden Projekten eingesetzt (z.B. KABUS, 2005). Grundsätzlich kann der Untergrund in wechselwarmen Klimaten sowohl zu Heiz- als auch zu Kühlzwecken verwendet werden. Kühlung von Gebäuden, heute noch kein Standard im privaten Sektor, könnte in der Zukunft eine deutlich größere Rolle spielen, wenn man an Ereignisse wie den Sommer 2003 (DWD, 2004) und mögliche Klimaszenarien denkt (IPCC, 2001). Bei Anlagen, die sowohl zur Heizung als auch zur Kühlung verwendet werden, kann durchaus auch von einem saisonalen Energiespeicherungseffekt gesprochen werden, da durch den Heizbetrieb im Winter der Untergrund abgekühlt wird, wodurch im Sommer mehr „Kälte“ zum Kühlen zur Verfügung steht und umgekehrt. Damit sind die Grenzen zwischen der reinen Wärme- (Kälte-) Gewinnung und der saisonalen Speicherung von thermischer Energie im Untergrund fließend. Eine besonders beispielhafte und gleichermaßen publikumswirksame Anlage, die sich dieses Prinzip zunutze macht, wurde in Berlin für die Parlamentsgebäude und den Reichstag realisiert (KABUS, 1999). Im Folgenden wird vorwiegend auf die besonders häufig genutzten Erdwärmesonden zur Wärmegegewinnung eingegangen, um die Prinzipien der Standortbewertung zu zeigen.

3 Regionalspezifische Standortbewertungen, Planungsleitfäden und –karten

Die wachsende Popularität von Erdwärmepumpensystemen im privaten und öffentlichen Sektor macht Regulierungen und vor allem Anleitungen für ihren korrekten und gewinnbringenden Einsatz notwendig. Vier Problemfelder sind hier zu nennen:

1. Trotz der global nahezu unbegrenzten Verfügbarkeit geothermischer Wärme niedriger Temperatur (KALTSCHMITT et al., 1999) sind der lokalen (und regionalen) Entzugsleistung technische, hydrogeologische und ökologische Grenzen gesetzt, so dass lokal, z.B. in einem verdichteten Neubaugebiet, nicht beliebig viele Installationen möglich sind.
2. Die großen Unterschiede der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse an verschiedenen Standorten machen eine optimale Anpassung der Technik an die jeweiligen Bedingungen erforderlich. So ist nicht jedes Funktionsprinzip an jedem Standort einsetzbar. Gleichzeitig führt eine falsche Auslegung bzw. Ausführung der Gewinnungsanlage u.U. zu drastischen Einbußen in der Effizienz, so dass der zum Antrieb der Wärmepumpe erforderliche Primärenergieaufwand einen in der Summe höheren CO₂ Ausstoß bedingen kann als ein konventionelles System (HERTLE et al., 1999).
3. Die Installation einer erd- und grundwassergekoppelten Wärmepumpenanlage erfordert immer einen Eingriff in den Untergrund und bedingt dabei das Risiko einer direkten (z.B. durch Austritt von Kühlmittel) oder indirekten (durch die Eröffnung von Fließpfaden in den tieferen Untergrund) Kontamination von Boden und Grundwasser. Diese Risiken sind in Abhängigkeit vom geologischen Bau und von bestehenden anderweitigen (Land-)Nutzungen (Wasserversorgung, Naturschutz) lokal und regional unterschiedlich ausgeprägt (z.B. StMLU, 2003; MUVBW, 2005b).
4. Durch den Eingriff in den Untergrund werden fast immer Belange des Wasserrechts, in Einzelfällen auch solche des Bergrechts, berührt. In den meisten Fällen ist z.B. die Installation von Erdreichwärmetauschern in Trinkwasserschutzgebieten nicht zulässig (Abstufungen bezüglich unterschiedlicher Zonen sind möglich). Eine Genehmigung (Bewilligung/Erlaubnis) zur Errichtung und zum Betrieb von Anlagen bei den zuständigen Behörden (Landratsämter, Wasserwirtschaftsverwaltung, Naturschutzbehörde, Bergamt etc.) ist deshalb meistens erforderlich (z.B. MUVBW, 2005b).

Diese vier Gesichtspunkte, deren Bedeutung in der Regel von 1. nach 4. zunimmt, stellen große Anforderungen an Bauherren, Planer und Genehmigungsbehörden. Die erforderlichen Sachkompetenzen sind selten in einer einzigen Person oder Firma vereint. Eine Prüfung aller Gesichtspunkte für jede neue Anlage von Grund auf ist aus ökonomischen Gründen nicht möglich. Deshalb war und ist es das Bestreben, das Planungsverfahren durch allgemeine technische (VDI-Richtlinie 4640, Blatt 1-4) rechtliche Anleitungen (z.B. BAYLFW, 1996; LUANRW, 2004) und durch Kartenwerke zu vereinfachen, zu verallgemeinern und zu beschleunigen. Solche generellen Hilfsmittel werden unterstützt durch detaillierte Berechnungsverfahren und Modellierungssoftware für die konkrete Anlagenplanung und Auslegung (z.B. HELLSTRÖM et al., 1997).

Es ist eine interessante Tatsache, dass entsprechende Leitfäden und Wegleitungen zum Einsatz von erdgekoppelten Wärmepumpen und Erdwärmesonden im deutschsprachigen Raum in größerer Zahl parallel bzw. nacheinander durch unterschiedliche Länder oder andere Organisationseinheiten herausgegeben wurden (MUVBW, 2005b; STMLU, 2003; LUANRW, 2004; HLUG, 2004; RPMUF, 2002). Die Gültigkeit entsprechender Werke hat also offensichtlich einen regionalen Bezug, der über die grundlegenden technisch-physikalischen Prinzipien, die an jedem Ort gleich sind, hinausgeht. Der Regionalbezug ist durch mindestens zwei Gesichtspunkte gegeben:

Der Einsatz von Erdwärmesonden wird in unterschiedlicher Weise immer durch rechtliche Vorgaben beschränkt. Diese Vorgaben leiten sich zumeist aus dem Wasser- und dem Bergrecht ab, die jeweils zu einem großem Teil durch Ländergesetze bestimmt werden.

Entsprechende Anleitungen enthalten häufig Karten, die die Eignung bestimmter Gebiete darstellen oder werden durch entsprechende Kartenwerke der gleichen Herausgeber ergänzt. Die Eignung wird bestimmt durch die geologisch-hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrundes, die in Mitteleuropa stark variabel sind. Ein Lokal- und Regionalbezug der Anwendbarkeit ist also immer gegeben.

Im Folgenden wird im Wesentlichen auf die Kartenteile solcher Leitfäden eingegangen. Die Möglichkeiten, Rahmenbedingungen, Einschränkungen bei der Erstellung sowie das Potential für die Verbreitung entsprechender Technologien (Werbemaßnahme), für die konkrete Anlagenplanung und für die Beschleunigung und fachliche Absicherung von Genehmigungsverfahren werden diskutiert. Dabei steht die Beantwortung folgender Fragestellungen im Vordergrund:

- Welche prinzipiellen Zielsetzungen solcher Kartenwerke sind denkbar, sinnvoll und machbar?
- In welcher Form können und sollten Kartenwerke erstellt und verbreitet werden?
- Welche Basisdaten sollten zur Verfügung stehen?
- Wie sollten diese Basisdaten sinnvollerweise aufgearbeitet werden?
- Wie groß ist der maximal vertretbare Aufwand, der durch den entstehenden Nutzen gerechtfertigt wird?
- Welche Detailtreue ist erforderlich, machbar und sinnvoll?
- Welches sind die geeigneten Kriterien und Berechnungsverfahren für die Standortbewertung im Hinblick auf die unterschiedlichen denkbaren Nutzungen, Verbreitungsformen etc.?

Die Frage, welche weiteren Möglichkeiten über die genannten Planungsleitfäden und Karten hinaus bestehen, um mit Hilfe von hydrogeologischen Basisdaten und anderen Gebietscharakteristika Standortbewertungen durchzuführen und Planungshilfestellungen zu geben, wurde in BARTHEL (2000) ausführlich diskutiert. Im Rahmen dieser Möglichkeiten stellen landesweite Kartenwerke, wie sie derzeit vorliegen nur eine spezielle, in der Praxis aber offensichtlich erfolgreiche Variante dar.

4 Grundlagen der Bewertung von Standorten

Grundsätzlich wird hier nur von der Möglichkeit einer Erstbeurteilung des flachen Untergrundes bis ca. 200 m Tiefe bezüglich der Eignung für Erdwärmesonden im Besonderen gesprochen. Eine solche Erst- oder Vorab-Beurteilung zielt auf die Standortbewertung auf der Basis von sekundären oder indirekt verfügbaren (Grund-)Daten ab. Es geht hier also nicht um die Beurteilung von vor Ort gewonnenen Messergebnissen und Proben, sondern um eine Analyse auf der Grundlage der verfügbaren relevanten Daten und Informationen in Form von Karten, Luftbildern, Bohrungsdaten, topographischen und geomorphologischen Daten. Eine Vorab-Beurteilung in diesem Sinne unterscheidet sich also grundsätzlich von den Beurteilungsverfahren die auf in situ Messungen beruhen (z.B. SPITLER et al., 2000) oder von Simulationswerkzeugen, die zur Planung einer konkreten Anlage eingesetzt werden (z.B. HELLSTRÖM et al., 1997). Von besonderer Bedeutung ist hier der regionale bis überregionale Maßstab der Betrachtungen (Landkreis, Bezirk, Land).

Bei einer Standortbewertung ist es sinnvoll, gleichzeitig aber in der Praxis oft schwierig, die technisch-physikalischen Bedingungen und die rechtlich-ökologisch-ökonomischen Bedingungen zunächst getrennt zu betrachten. Die technisch-physikalischen Bedingungen werden im Wesentlichen durch die Eigenschaften des Untergrundes bestimmt und sind damit nach menschlichem Ermessen invariabel, während sich die rechtlichen, ökologischen und ökonomischen Voraussetzungen in vielfältiger Weise jederzeit ändern können. Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich ausschließlich auf die geologischen Bedingungen, und betrachtet die überaus wichtigen sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen nur am Rande.

Die Ermittlung der geologisch-technischen Eignung eines Standortes umfasst zwei Gesichtspunkte:

1. Der Standort soll über lange Zeiträume eine möglichst hohe Wärmegegewinnungsleistung ermöglichen, die gegenüber Heizsystemen, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, einen besseren Primärenergiewirkungsgrad erzielen. Legt man zugrunde, dass an jedem Standort prinzipiell der Einsatz der in dieser Hinsicht bestmöglichen Technologie (Wärmepumpen, Wärmetauscher) möglich ist und dass die ober- und unterirdischen Teile der Anlage nach Stand der Technik bestmöglich ausgeführt werden, so sind für die Standortbewertung allein die (unveränderlichen) physikalischen Eigenschaften des Untergrundes (Geologie) und die nichtstationären Prozesse im Untergrund (Grundwasserbewegung, Hydrogeologie) verantwortlich.
2. Der Einsatz der Wärmepumpentechnologie soll keine unmittelbaren, mittelbaren, kurz- und langfristigen nachteiligen Auswirkungen auf die am Standort und in seiner Nähe vorhandenen Ökosysteme haben. Auch hier sind bei sachgerechter und vorschriftsmäßiger Installation und der Verwendung von zugelassenen und gefährdungsarmen (-freien) Materialien wiederum die Eigenschaften des Untergrundes sowie auch die Gegebenheiten an der Erdoberfläche für die Festlegung geeigneter Standorte ausschlaggebend.

4.1 Maßgebliche Parameter für die Standortbewertung

Die für die Standortbewertung maßgeblichen Untergrundparameter sind:

- Die Untergrundtemperatur
- Die hydrogeologischen (sedimentpetrographischen, mineralogischen und hydrophysikalischen) Eigenschaften des Untergrunds.
- Die thermischen Eigenschaften des Untergrund: Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität

Dabei ist die Temperatur des Untergrundes eine vergleichsweise einfach zu bewertende Größe, sofern sie durch Messungen bekannt ist, da sie ab Tiefen von etwa 10 m keine oder eine nur sehr geringe natürliche Dynamik aufweist. Hochdynamisch kann dagegen das Auftreten und der Zustand von Wasser im Untergrund sowohl im gesättigten als auch im ungesättigten Bereich sein. Änderungen des Wassergehalts in der ungesättigten Zone rufen auch signifikante Änderungen der thermischen Eigenschaften hervor. Auf die Untergrundtemperaturen und ihre regionale Verteilung und deren Ursachen wird hier nicht eingegangen. Es wird lediglich festgehalten, dass die Untergrundtemperatur unterhalb des Einflussbereichs von täglichen und saisonalen Temperaturschwankungen an der Erdoberfläche (ca. 10m) in Deutschland annähernd linear mit etwa 3 °C/100m ansteigt.

Die maßgeblichen sedimentpetrographischen und hydrophysikalischen Größen sind Porosität n , die effektive Porosität n_e und der Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s]. Bei locker- und schwach verfestigten Gesteinen sind die Korngrößenverteilung, die Lagerungsdichte und der Zementationsgrad von entscheidender Bedeutung für viele hydrogeologische und thermische Prozesse und Eigenschaften. Bei Festgesteinen interessieren Klüfte und Trennflächen. In der ungesättigten Zone hat der Wassergehalt θ einen entscheidenden Einfluss. Die thermischen Eigenschaften und die thermischen Vorgänge im Untergrund sind entscheidend für die Bewertung von Standorten und werden wiederum maßgeblich von den hydrogeologischen Verhältnissen gesteuert. Die bedeutsamen Größen für den Wärmetransport und die Wärmespeicherung sind die Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)] und die spezifische Wärmekapazität c [J/(kg·K)] bzw. die volumetrische Wärmekapazität ρc [J/(m³K)] (ρ [g/cm³]).

Für die Wärmeausbreitung im Untergrund sind im Wesentlichen zwei Vorgänge verantwortlich: Wärmeleitung und konvektiver Wärmetransport. Wärmeleitung vollzieht sich nach dem Gesetz von Fourier:

$$q = -\lambda \cdot \nabla T \quad (1)$$

Der Wärmetransport durch Wärmeleitung als Funktion des Ortes und der Zeit bei homogenen Verhältnissen wird durch die Wärmediffusionsgleichung ausgedrückt:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

Die Größe α wird als Wärmediffusionskoeffizient [m^2s^{-1}] oder Temperaturleitfähigkeit bezeichnet und stellt den Quotient aus Wärmeleitfähigkeit und volumetrischer Wärmekapazität dar. Wärmetransport, der ausschließlich durch Wärmeleitung erfolgt, tritt nur bei Gesteinen auf, die entweder vollständig dicht (Porosität = 0) oder vollständig impermeabel sind auf. Der Wärmetransport im Grundwasser setzt sich aus einem konvektiven und einem Wärmeleitungsanteil zusammen. Wärmeleitung findet in den festen Bestandteilen des Grundwasserleiters, aber auch in der Porenfüllung statt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wärmefront v_T im bewegten Grundwasser ist meist kleiner als die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Grundwassers v_a (Gleichung 3), da das Grundwasser Wärme an die relativ kältere Gesteinsmatrix und den immobilen Haftwasseranteil abgibt. Die Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit ist deshalb wesentlich von der effektiven Porosität abhängig. Die Gesamtwärmestromdichte im strömenden Grundwasser ergibt sich als Summe aus dem Wärmeleitungsanteil q_{wL} , dem konvektiven Anteil q_K und dem Dispersionsanteil q_D :

$$q = q_{wL} + q_K + q_D = -\lambda_e \nabla T + v_T \rho c_e T - D_w \rho c_e \nabla T \quad (3)$$

Nach Erfahrungswerten breitet sich eine Temperaturanomalie im Grundwasser maximal mit der halben Fließgeschwindigkeit des Wassers aus. Bei geringer effektiver Porosität ($n_e < 5\%$) ist die Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit allerdings deutlich geringer (RAUCH, 1992).

Für die Standortbewertung ist entscheidend, dass der konvektive Wärmetransport im fließenden Grundwasser deutlich effektiver ist als die reine Wärmeleitung.

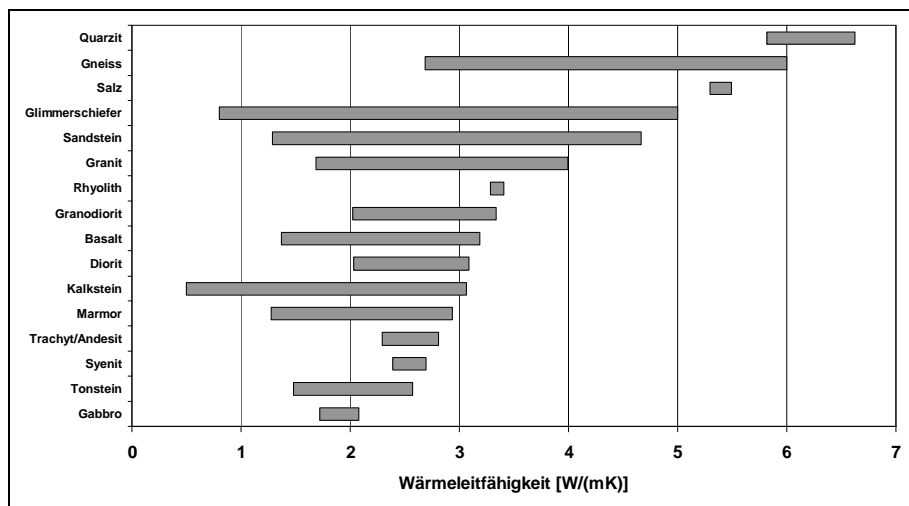


Abbildung 2: Wärmeleitfähigkeiten von Festgesteinen. Nach SANNER (1992), SCHÖN (1983) und ANGENHEISTER (1982).

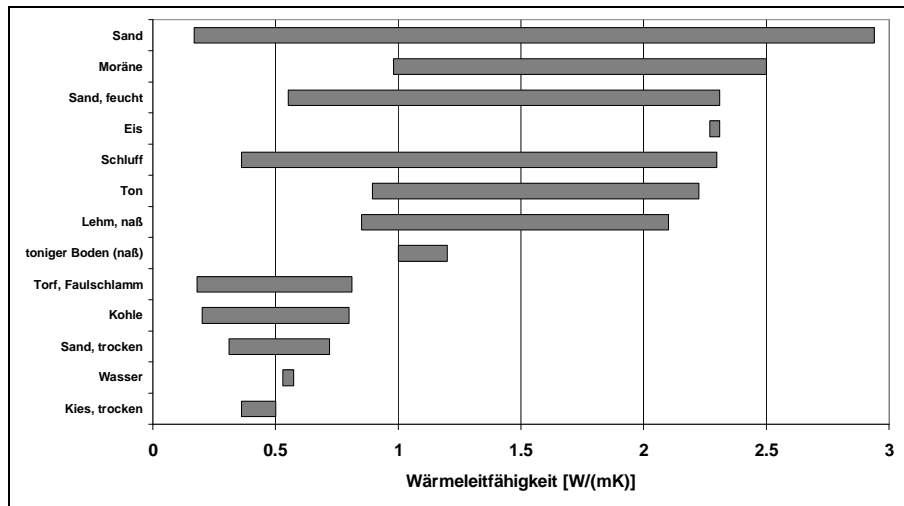


Abbildung 3: Wärmeleitfähigkeiten von Lockergesteinen. Nach SANNER (1992), SCHÖN (1983) und ANGENHEISTER (1982).

Den Abbildungen 2 und 3 ist zu entnehmen, dass die Schwankungsbreite der thermischen Kenngrößen für viele Gesteinstypen hoch ist. Daher können Vergleichswerte aus der Literatur nicht ohne weiteres herangezogen werden. Da Messwerte häufig nicht vorliegen (s.u.), müssen die Werte häufig durch Berechnungen gewonnen werden. In die Berechnung von λ und ρc gehen vorwiegend die mineralogische Zusammensetzung und der Wassergehalt, der sich hier aus Gesamtporenvolumen und dem Sättigungsgrad bestimmt, ein. Die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen zeigt meist eine Zunahme bei abnehmender Porosität, zunehmendem Wassergehalt und Sättigungsgrad, verbesserter Kornbindung bzw. Zementation, Erhöhung des Drucks, zunehmender Wärmeleitfähigkeit der festen Phase, zunehmender Wärmeleitfähigkeit des Porenhaltes, Erhöhung der Temperatur. Die Wärmekapazität ist dagegen ausschließlich von den Volumenanteilen der beteiligten Phasen abhängig. Da die Wärmekapazität von Wasser höher ist als die der festen Komponenten, steigt sie im Gestein grundsätzlich mit dem Wassergehalt an (Übersicht in BARTHEL, 2000).

4.2 Anforderungen an den Untergrund

Nach energetischen Gesichtspunkten ist die wichtigste Anforderung an den Untergrund, dass dieser möglichst viel Energie bereitstellen kann und die entzogene Wärme möglichst rasch nachgeliefert wird. Von Bedeutung sind dabei die (momentan) mögliche Entzugsleistung, die meist als spezifische Entzugsleistung in [W/m (-Sondenlänge)] angegeben wird, und die dauerhaft mögliche spezifische Entzugsarbeit [kWh/m]. Wird dem Untergrund zuviel Energie entzogen, was bei einem Dauerbetrieb mit der maximalen Entzugsleistung möglich ist, so führt dies zu einer irreversiblen Auskühlung des Untergrundes und damit langfristig zum Versagen der Anlage (vgl. z.B. WERNER ET AL., 1996). Außer den energetischen Gesichtspunkten sind allerdings auch geotechnische Gesichtspunkte (Bohrbarkeit) zu beachten. Neben den energetischen Betrachtungen spielen auch die Kosten für den Einbau der Sonden, i.W. also die Bohrbarkeit des Gesteins und die Verfüllbarkeit des Ringraums, eine Rolle.

Eine hohe und gleichmäßige Wärmequellentemperatur ist für den Betrieb einer Wärmepumpe grundsätzlich günstig. Höhere Untergrundtemperaturen werden im Allgemeinen bei größeren Bohrtiefen erreicht. Allerdings werden die positiven Effekte dann unter Umständen durch höhere Energieaufwendungen für die Soleumwälzpumpe und höhere Bohrkosten zunichte gemacht.

Der Einfluss der thermischen Untergrundeigenschaften auf die Entzugsleistung ist nach GUERNSEY et al. (1949; zitiert und modifiziert in SANNER, 1992) aus Gleichung 4 abzuleiten:

$$\Delta T = \frac{0.1832Q}{\lambda_e} \left(\log_{10} \frac{\alpha t}{r^2} + 0.217 \frac{r^2}{\alpha t} + 0.351 \right) \quad (4)$$

für $\frac{\alpha t}{r^2} \gg 1$

mit ΔT = Temperaturänderung [K]; Q = Wärmefluss pro m Rohrlänge [W/m]; λ_e =
effektive Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
 α = Thermische Diffusivität [m^2/s]; r = Entfernung zum Rohrmittelpunkt [m]; t = Zeit
[s]

Die mögliche Entzugsleistung ist demnach fast ausschließlich von der Wärmeleitfähigkeit des Gesteins abhängig. Die volumetrische Wärmekapazität spielt eine untergeordnete Rolle.

Die Anwesenheit und die Form des Auftretens von Grund- bzw. Porenwasser hat einen sehr entscheidenden Einfluss auf die Leistung von Erdsonden, da bei den meisten Gesteinen eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bei zunehmender Wassersättigung festzustellen ist. Besonders deutlich wirkt sich dies bei porösen Lockergesteinen aus. Weiterhin wird durch fließendes Grundwasser durch den Grundwasserstrom kontinuierlich Energie nachgeliefert, die die entzogene Energie ersetzt. Die spezifische momentane Entzugsleistung ändert sich dabei allerdings nicht. Erhöht wird die langfristig mögliche spezifische Entzugsarbeit. Methoden zur quantitativen Erfassung des Einflusses von strömendem Grundwasser auf das thermische Verhalten von Erdsonden werden von KLUGESCHEID et al. (1994) vorgestellt.

Für die Dimensionierung kleinerer Anlagen bis 20 kW eignen sich einfache, überschlägige Verfahren, wie sie in der VDI-Richtlinie 4640 zu finden sind. So lässt sich die mögliche spezifische Entzugsleistung L [W/m] z.B. nach:

$$L = 13 \cdot \lambda + 10 \quad \text{oder wahlweise mit} \quad L = 20 \cdot \lambda \quad \text{für} \quad 1 < \lambda < 3$$

berechnen. Eine Zusammenfassung wichtiger Gesichtspunkte der Dimensionierung mit einfachen und stärker spezialisierten Auslegungsmethoden geben SANNER & REUB (2000).

4.3 Umweltrisiken durch thermische Nutzung des Untergrundes

Nicht unerwähnt bleiben dürfen hier mögliche Umweltrisiken, die durch die Speicherung und die Gewinnung von Wärme aus Gestein und Grundwasser auftreten können. Dies sind zum einen nachteilige Veränderungen der Grundwasserqualität (physikalisch, chemisch, biologisch/hygienisch) zum anderen nachteilige Auswirkungen auf die Vegetation durch Abkühlung oder Erwärmung. Bedenken bezüglich der Veränderung der Grundwasserqualität werden von Seiten der Wasserwirtschaftsbehörden geäußert. Befürchtet werden insbesondere (zusammengefasst nach WENDEL, 2000):

- Beeinflussung der natürlichen Grundwasserfließrichtung.
- Änderung der Druckverhältnisse in gespannten Aquiferen.
- Aufhebung der Stockwerkstrennung.
- Biologische Veränderungen: Hygienische Verunreinigung durch vermehrtes Keimwachstum bei Temperaturerhöhung, Behinderung biologischer Abbauprozesse durch Änderung der Temperaturverhältnisse, Verbinden von „sauberen“ und biogen belasteten Aquiferen.
- Chemische Veränderungen: Sole- und Kältemittelaustritt aus Erdreichwärmetauschern, Verbinden von Aquiferen unterschiedlicher chemischer Eigenschaften, Verschiebung von Lösungsgleichgewichten.
- Physikalische Veränderungen: Erhöhung der Temperatur und Verlust der Trinkwasserqualität.

Weiterreichende Verunreinigungen durch Erdsonden sind durch Leckage der Sonden oder beim unsachgemäßen Einbau (unzureichende Absperrung grundwasserführender Horizonte) möglich. Ergebnisse einer Untersuchung (LAWA, 1980) zeigen, dass die Folgen geringfügiger Grundwasserabkühlungen im Allgemeinen gering sind und Schäden ausbleiben. Kritisch werden dagegen Grundwasserabkühlungen auf regionalem Niveau gesehen. Zu den Umweltrisiken, die von Erdsonden ausgehen, ist anzumerken, dass Schadensfälle sehr selten sind. So wurde aus dem Kanton Bern berichtet, dass es bei 2600 Anlagen nie zu einem Schadensfall gekommen ist, der eine Gefährdung von Grundwasservorkommen nach sich gezogen hätte (mündl. Mittlg. Herr Berdat, WEA Bern, 1997).

4.4 Rechtliche Aspekte der thermischen Nutzung des Untergrundes

Die rechtlichen Voraussetzungen sind als Hauptmotor für die Erstellung der erwähnten Länder-Leitfäden zu sehen. Die meisten beruhen auf dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und den Ländergesetzen, z.B. dem Bayerischen Wassergesetz (BayWG). Die rechtlichen Aspekte der oberflächennahen Erdwärmennutzung sind für die Standortbewertung von höchster Bedeutung. Bohrungen von mehr als 100m Tiefe erfordern meist eine Bohranzeige nach §127 BBergG. Der Wärmeentzug mit Erdwärmesonden aus der gesättigten Zone stellt i.A. eine Benutzung des Grundwassers (nach § 3, Abs. 2 Nr. 2 WHG) dar und erfordert eine Erlaubnis oder Bewilligung. Grundsätzlich gilt (wobei z.T. Unterschiede in den Ländern bestehen), dass Bohrungen für Erdwärmesonden immer einen erlaubnispflichtigen Benutzungstatbestand darstellen, die Trinkwasserversorgung Vorrang gegenüber Erdwärmennutzung genießt, Erdsonden in WSG verboten sind, (Ausnahme Zone IIIb), „Ergiebige Tiefgrundwasservorkommen“ bleiben der

Trinkwasserversorgung vorbehalten. Weiterhin ist der Einbau von Sonden nur bei freiem GW-Spiegel möglich und das Sondenfluid sollte der Wassergefährdungsklasse 0 angehören (in manchen Bundesländern auch Klasse 1). Der Wärmeentzug aus dem „Erdreich“ (ungesättigte Zone) stellt keinen Eingriff in das Grundwasser dar und bedarf daher i.d.R. keiner wasserrechtlichen Gestattung.

Drei der genannten Rechtsvorschriften sind für die vorliegende Untersuchung von besonderer Bedeutung:

1. Der (weitgehende) Ausschluss von gespannten Grundwasserleitern von der thermischen Nutzung.
2. Der (weitgehende) Ausschluss von tieferen Grundwasserstockwerken von der thermischen Nutzung.
3. Der vollständige Ausschluss von Wasserschutzgebieten und Heilquellenschutzgebieten.

Bei einer Standortbewertung, die die rechtlichen Vorschriften miteinbezieht, ergeben sich aus Punkt 1 und 2 erhebliche Probleme. Für jeden Standort muss ermittelt werden, ob und in welcher Tiefe ein gespannter oder ein tieferliegender Grundwasserleiter angetroffen wird. Steht diese Tiefe fest, so muss bewertet werden, ob sich dadurch eine Anwendung des Verfahrens ausschließt oder sich nur eine qualitative Einschränkung ergibt (z.B. wenn eine Nutzung durch mehrere weniger tiefe Sonden möglich ist).

5 Daten

Wie bei allen raumbezogenen Bewertungsverfahren, seien es komplexe Modelle oder einfache Kartendarstellungen, stellt die Datenverfügbarkeit und -qualität einen limitierenden Faktor dar. Je höher die Datendichte und je verlässlicher die Einzelinformation, desto schärfer und vertrauenswürdiger sind auch die Ergebnisse der Beurteilung. Bei allen Fragestellungen, bei denen der Untergrund zu bewerten ist, verstärkt sich dieser Einfluss um ein Vielfaches, da hier die dritte Dimension zu berücksichtigen und gleichzeitig naturgemäß die Zugänglichkeit drastisch limitiert ist. Bohrloch- und Aufschlussinformationen sind zusätzlich schwer und nicht immer eindeutig zu interpretieren, zumal die Probenqualität häufig verfahrensbedingt schlecht ist (Verfahren ohne Kerngewinnung). Grundsätzlich sind zwei Fragen entscheidend: Welche Daten werden benötigt und welche können herangezogen werden? Dabei ist die zweite Frage weitaus schwieriger zu beantworten und schafft in der Praxis sehr entscheidende Probleme. Solange der Idealzustand, in dem alle für eine Bewertung notwendigen, jemals gemessenen oder erhobenen Daten in der gewünschten Form (Punkt - Fläche, Raster, einheitlich georeferenziert usw.) aus einer allgemein zugänglichen, gut dokumentierten, qualitätsgeprüften, digitalen Datenbankstruktur abrufbar sind, nicht erreicht ist, ist es notwendig, sich mit den banalen aber entscheidenden Fragen der teilweise extrem heterogenen Datenhaltung, dem Datenaufbereitungsgrad, den Nutzungsbedingungen und anderen Hemmnisse, die die reale Datenverfügbarkeit gegenüber der Gesamtheit der vorhandenen Daten drastisch limitieren, zu beschäftigen. Die wesentlichen Gesichtspunkte sind hier kurz zusammengefasst.

5.1 Grundsätzliches

Datentypen, -quellen und -dimensionen: In diesen Bereich fallen die Fragen, ob Daten oder Informationen Raumbezug haben, Punkte, Linien, Flächen oder Volumen beschreiben, primäre, sekundäre oder tertiäre (gemessene, gezählte, aufbereitete, interpolierte etc.) Daten darstellen.

Metadaten: Informationen, die Datensätze näher charakterisieren, werden als „Metadaten“ bezeichnet. Metadaten sind z.B. Kartenprojektionen, Messmethoden, zeitliche und räumliche Gültigkeit, Vor- und Nachbearbeitung, Kontrollmechanismen, Qualitätsangaben, Quellenangaben und andere.

Datenqualität: Eine umfassende Betrachtung des Qualitätsaspektes führt z.B. WILKE (1995) durch. Allein die Darstellung der möglichen Fehlerquellen bei der Aufbereitung und Umwandlung (z.B. Digitalisierung) von Daten würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen. Ein großer Unsicherheitsfaktor besteht auch in den unzureichenden Metadaten (s.o.).

Datenverfügbarkeit: Die Verfügbarkeit von Daten ist ein, oder sogar *der* limitierende Faktor für Bewertungsmethoden. Basisdaten (z.B. Topographie) sind oft in ausreichendem Umfang vorhanden (wenngleich oft teuer), mangelhaft ist jedoch die Verfügbarkeit von Spezialdaten. Daten können aus den verschiedensten Gründen „nicht verfügbar“ sein:

- **Erhebbarkeit:** Der Aufwand, um Primärdaten vor Ort zu erheben ist hoch.
- **Fehlendes allgemeines Interesse:** Informationen von allgemeinem Interesse (z.B. Grundwasserstände) werden häufig, anwendungsspezifische (z.B. Wärmeleitfähigkeit) selten erhoben, obwohl der Aufwand zu ihrer Erhebung ähnlich hoch wäre.
- **Bearbeitungsstand:** Informationen, die routinemäßig flächendeckend erhoben werden (geologische Karten), liegen oft aus verschiedenen Gründen noch nicht flächendeckend vor.
- **Zugänglichkeit:** Daten, die erhoben wurden, können unzugänglich sein. Datenschutzgründe, Eigentumsfragen aber auch Personalmangel bei den datenhaltenden Behörden sind nur einige der Gründe für mangelnde Zugänglichkeit.
- **Datenzustand:** Daten können analog z.B. auf Papier, auf Microfiche, in verschiedener Qualität und Auflösung, tabellarisch oder als Text, handschriftlich oder gedruckt vorliegen (mit oder ohne Koordinatensysteme und Projektionsinformationen). Bei digitalen Daten sind Formate, Aktualität, Kompatibilität, Vollständigkeit (Objektattribute) usw. von hoher Bedeutung. Der Datenzustand ist für die tatsächliche Verfügbarkeit / Verwendbarkeit ein maßgebliches Kriterium.
- **Preis:** Oft wichtig für die „praktische“ Verfügbarkeit.

Datenbeschaffung, Aufbereitung und Organisation: Die Beschaffung von Basis- und Spezialdaten stellt einen überaus zeit-, kosten- und arbeitsintensiven Prozess dar. Erfahrungsgemäß hat das nicht nur für Privatfirmen und Forschungseinrichtungen, die primär nicht über Daten verfügen, Konsequenzen, sondern auch für die Fachbehörden, die für entsprechende Informationen zuständig sind und diese ganz oder teilweise selbst halten.

5.2 Erforderliche Daten

Die Eignung eines Standorts für die thermische Nutzung des Untergrundes wird im Wesentlichen durch drei Faktorengruppen bestimmt:

1. **Naturräumliche Faktoren**, die sich aufschlüsseln lassen in:

- Geologisch-physikalische Faktoren (lithologische, hydrogeologische und thermische Eigenschaften des Untergrundes)
- Klimatische Faktoren (Temperatur, Sonneneinstrahlung, Niederschlag, Bodenfeuchtigkeit)
- Geomorphologische Faktoren (Hangneigung, Geländeorientierung)

2. **Infrastrukturelle Faktoren** (z.B. Besiedlungsdichte, Erschließungspotential, Baubestand)

3. **Rechtliche Faktoren** (Genehmigungsfragen, Nutzungsbedingungen)

Die folgende Tabelle 1 listet die naturräumlichen Daten auf, die für die Standortbewertung hinsichtlich der Untergrundeigenschaften von Bedeutung sind und erläutert ihre Verwendung und Verfügbarkeit.

Tabelle 1: Erforderliche Untergrunddaten

Datentyp / - Kategorie	Parameter / Bedeutung / Verwendung	Verfügbarkeit (in Deutschland)
Geologische Karten	Darstellung der oberflächlichen Verbreitung stratigraphischer Einheiten	Gut, digital flächendeckend bis 1:200.000, analog je nach Land 50-100% der Fläche 1:25.000, digital 5-100%
Bohrungsdaten, Aufschlussprofile	Wichtigste und einzige verlässliche Informationen über den Untergrund	Mäßig, sehr heterogen, in Haltung, Bearbeitungsstand und räumlicher Verteilung
Strukturpläne (Streichkurvenkarten)	Datengrundlage für Untergrundstrukturmodelle, 3D-Analysen, stratigraphische Modelle	Mittel, relativ häufig (analog) für 1:25.000 und prominente Einheiten, digital noch selten
Schichtmächtigkeiten – Mächtigkeitskarten:	Darstellungen der Mächtigkeiten von Einheiten	Mäßig, i.A. nur in regionalem oder überregionalem Rahmen, kleine bis kleinste Maßstäbe auf (<1:500.000).
piezometrische Höhen / Grundwassergleichen	Messwerte des Grundwasserspiegels und daraus abgeleitete interpolierte Grundwassergleichenpläne	Schlecht, sehr heterogen, kleinste Ausschnitte großmaßstäbig oder grobe Übersichtsdarstellungen
Hydrophysikalische und sediment-petrographische Daten	k_f -Wert, Porosität, nutzbare Porosität, Kluftvolumen, Korngrößenverteilung, Konsistenzgrenzen, Wassergehalt	Meist schlecht, extrem heterogen
Hydrochemische Daten	Punktmessungen und flächenhafte Darstellungen z.B. von pH-Wert, Leitfähigkeit und der wesentlichen Anionen und Kationen	Ausreichend für die Zwecke der Bewertung
Thermische Parameter	Wärmeleitfähigkeit,	I.A. nicht vorhanden: müssen aus den

Datentyp / - Kategorie	Parameter / Bedeutung / Verwendung	Verfügbarkeit (in Deutschland)
	Wärmespeicherkapazität	mineralogischen und sediment-petrographischen Daten berechnet werden.
Mineralogische Parameter	Daten über die mineralogische Zusammensetzung von Gesteinen	Mäßig: schwer zu recherchieren und auszuwerten, da sie in einer Vielzahl von Einzelquellen veröffentlicht sind
digitales Höhenmodell (DHM oder auch DGM, Digitales Geländemodell)	Bezugshorizont für alle Analysen im 3-dimensionalen Untergrund	Gut, flächendeckend in ausreichender Auflösung

5.3 Interpolation und Regionalisierung

Ein aufschlussreiches regionales Bewertungssystem muss zwangsläufig flächenhafte Informationen für alle Gebiete der Region oder zumindest für diejenigen Bereiche liefern, in denen ein grundsätzliches Interesse an einer Bewertung besteht (hier: besiedelte Gebiete). Die wesentlichen relevanten Informationen liegen aber als Punktinformation, oder im Fall von Bohrungen in tiefengegliederten Punktinformationen vor. Zu der Frage, wie solche Punktinformationen in die Fläche übertragen werden können, wurden eine Vielzahl von Verfahren vorgestellt (s. z.B. LONGLEY et al., 1999, BONHAM-CARTER, 1994). Sie reichen von einfacher linearer Interpolation bis hin zu komplexen geostatistischen Interpolationsverfahren und Regionalisierungsansätzen. Allen Verfahren, die zweidimensional flächenhafte Datensätze (Raster oder Polygone) zum Ergebnis haben, ist allerdings gemeinsam, dass sie nicht in der Lage sind, die erforderliche Dreidimensionalität des zu bewertenden Untergrunds in ausreichender Weise wiederzugeben. Hierzu bedarf es Verfahren, die in dreidimensionalen oder zumindest 2,5-dimensionalen Ergebnissen resultieren.

Für die dreidimensionale Repräsentierung des Untergrundes sind zahlreiche Verfahren beschrieben, die v.a. in der Explorationsgeologie erfolgreich zum Einsatz kommen. In der Praxis sind sie aber entweder auf eine sehr hohe Anzahl von (Bohrungs-)Daten angewiesen oder auf einfache geologische Verhältnisse beschränkt. Hier soll nur festgehalten werden, dass falsch eingesetzte Interpolationsverfahren in Verbindung mit unzureichenden Daten zu erheblichen Fehleinschätzungen führen können. Eine Plausibilitätsprüfung ist sinnvoll.

An dieser Stelle soll nur kurz erwähnt werden, dass die (digitale) geologische Karte als Darstellung des Untergrundes häufig überwertet wird, wohingegen der Wert der geologischen Kartierung als Informationsquelle unterschätzt wird. Dieser scheinbare Widerspruch ist dadurch zu begründen, dass der kartierende Geologe seine Karte nicht ohne genaue Vorstellungen über die Struktur des Untergrundes, also eine Information über die dritte Dimension erstellen kann, während das fertige Produkt, die geologische Karte, diese Information nur dann erschließbar macht, wenn sie mit Zusatzinformationen (Schichtlagerungskarten, Bohrungsinformationen) kombiniert wird. Sie stellt ausschließlich die Geologie an der Erdoberfläche dar, die häufig nicht in ausreichender Weise auf

die vertikale Gesteinsabfolge schließen lässt. Daraus können Missverständnisse resultieren, wie sie bei BARTHEL (2000) ausführlich beschrieben werden.

6 Bewertungsverfahren und Kriterien zur Standortbewertung

Die Bewertung von Untergrundeigenschaften, die im Falle von Erdwärmesonden die Einbeziehung der dreidimensionalen Struktur des Untergrunds sowie die Einbeziehung dynamischer Prozesse (Grundwasserbewegung) erforderlich macht, ist ein extrem weites und schwieriges Feld, aus dem hier nur die wichtigsten Stichpunkte herausgegriffen werden. Eine ausführliche Darstellung gibt BARTHEL (2000). Bewertungen, in die mehr als ein Faktor (Standorteigenschaften) eingehen, werden sehr häufig nach folgendem Grundschemata durchgeführt (EASTMAN, 1999):

$$\text{Eignungsgrad } E = \sum_{i=1}^n w_i \cdot X_i \prod_{j=1}^m C_j ; \quad (5)$$

wobei X_i Faktoren, w_i die zugehörigen Gewichte und C_j die booleanischen Kriterien (constraints; JA / NEIN) darstellen. Faktoren können unterschiedliche Werte auf einer Skala annehmen die nominal, ordinal oder metrisch sein kann. Um Faktoren unterschiedlichen Typs gleichzeitig auswerten zu können, ist es üblich, alle in diskrete „Klassen“ einzuteilen (z.B. 1 bis 10) bzw. sie auf eine einheitliche kontinuierliche Skala zu normieren. Um den stark einschränkenden Nachteil einer strikten Kategorisierung aufzuheben, werden häufig fuzzy logic Ansätze verwendet, die eine Klassifikation mit Hilfe von Zuordnungsfunktionen erlauben (z.B. BARDOSSY & DUCKSTEIN, 1994). Problematisch in einem solchen Schema (Gleichung 5) sind Faktoren, die nicht voneinander unabhängig bzw. vom WENN-DANN-Typ sind. Für viele in diesem Zusammenhang auftretende Probleme gibt es Lösungsansätze, die z.B. von BONHAM-CARTER (1994) oder EASTMAN (1999) vorgestellt werden. Ganz grundsätzlich befreit aber kein noch so komplexes Verfahren von der Notwendigkeit, sich über die Bedeutung von Faktoren und die maßgeblichen Prozesse (statisch, dynamisch) klar zu werden. Zusätzlich sollten vorab folgende Fragen geklärt werden:

Was ist die Zielsetzung und der Anwendungsbereich der Bewertung und welche Bewertungsmaßstäbe werden angelegt? Welche Ziel- und Kontrollgrößen können herangezogen werden?

Hier muss z.B. strikt getrennt werden zwischen technischen, ökonomischen und ökologischen Zielsetzungen, die in ganz unterschiedliche Bewertungen münden können. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass projektspezifische Größen u.U. einen großen Einfluss haben. Ein Gebiet kann für kleine Anlagen geeignet, für große aber ungeeignet sein (limitiert durch maximale Bohrtiefe, z.B.). Wünschenswert wäre letztlich eine Bewertungskonzeption, die ein hohes Maß an Flexibilität aufweist. Ideal ist eine Lösung, bei der die Rahmenbedingungen der Bewertung nicht von vornherein festgesetzt sind, sondern fallweise (vom Benutzer) neu bestimmt werden können. So können unterschiedliche Anlagenkonzepte oder unterschiedliche Bewertungszielsetzungen individuell behandelt werden. Ein solches Konzept ist allerdings nicht mehr in der klassischen Kartenform zu verwirklichen, sondern erfordert eine Software-Lösung, wie z.B. von BARTHEL (2000) vorgestellt.

Letztlich sollte aber über allem auch die Frage stehen, ob die Daten, auf die die Bewertungsalgorithmen angewendet werden, auch tatsächlich in ausreichender Dichte und Qualität vorliegen und ob alle tatsächlich relevanten Informationen berücksichtigt werden können. Letzteres ist häufig nicht der Fall, wenn das Auftreten, der Zustand und die Bewegung von Wasser im Untergrund in reliefierten Festgesteinsregionen mit starker vertikaler Zonierung (hydrostratigraphisch) zu berücksichtigen sind.

Es ist auffällig, dass bei der Erstellung der bis heute vorgelegten Eignungs- und Potentialkarten häufig relativ einfache Bewertungsvarianten zur Anwendung kamen. Typisch ist z.B. die pauschale Kategorisierung der oberflächlich auftretenden Gesteine in gut, mittel und schlecht. Die Frage ist, inwieweit so etwas für die Anlagenplanung wirklich hilfreich sein kann.

6.1 Untergrundkriterien für die Standortbewertung

Bei der Beurteilung der Eignung des Untergrundes für den Wärmeentzug mit vertikalen Erdsonden (EWS) sind vier Aspekte zu beachten (die Auflistung erfolgt mit absteigender Wertigkeit):

1. **Hydrophysikalische Parameter/Wasserführung:** Gesättigte/ungesättigte Verhältnisse, Durchlässigkeit, Porosität und Grundwasserfließgeschwindigkeit. Wassersättigung erhöht i. A. die Wärmeleitfähigkeit und damit die spezifische Entzugsleistung, Grundwasserfließbewegung erhöht die spezifische Entzugsarbeit.
2. **Wärmeleitfähigkeit des Gesteins:** Die spezifische Entzugsleistung steigt direkt proportional zur Wärmeleitfähigkeit an.
3. **Temperatur des umgebenden Untergrundes:** Die Höhe der Wärmequellentemperatur ist grundsätzlich entscheidend für die Effizienz einer Wärmepumpe.
4. **Bohrbarkeit des Gesteins, Ringraumverfüllung:** Wesentlicher Kostenfaktor.

Vorhandenes Grundwasser ist grundsätzlich positiv zu bewerten (rechtliche Aspekte beim Eingriff ins Grundwasser sind hierbei zunächst unberücksichtigt). Bewegtes Grundwasser führt zu einem schnelleren Ausgleich des Wärmedefizits und damit zu einer höheren möglichen spezifischen Entzugsarbeit.

Um aus diesen allgemein formulierten Kriterien zu einer flächenhaften Standortbewertung zu kommen, müssen eine Vielzahl von Überlegungen angestellt werden. Die erforderlichen Daten über den Untergrund müssen gesammelt, wo nicht vorhanden aus Sekundärdaten berechnet, geschätzt und in die Fläche übertragen werden. Werte müssen kategorisiert und (regionalspezifisch) gewichtet werden. Ein Beispiel wie diese generellen Information in ein Bewertungsschema nach Gleichung 5 zu überführen sind, gibt BARTHEL (2000) für die Region Unterfranken.

6.2 Kalibrierung und Validierung

Ein kritischer Punkt in allen Bewertungsfragen ist die Kalibrierung des Bewertungsmodells und die Validierung der Bewertungsergebnisse. Die Validierung kann als erfolgt betrachtet werden, wenn die Ergebnisse, die an einem Standort in der Realität erzielt werden oder wurden mit den durch die Bewertung vorhergesagten Resultaten gut übereinstimmen. Dies sollte für eine möglichst große Zahl von Standorten der Fall sein, wobei die für die Validierung betrachteten Standorte nicht in die Kalibrierung des Bewertungsverfahrens miteingegangen sein sollten. Die letztere Maßgabe dürfte für die meisten derartigen Projekte schwer einzuhalten sein. Eine echte Validierung dürfte in der Praxis mit erheblichen Schwierigkeiten behaftet sein, solange die Ergebnisse der Standortbewertungen nur in wenigen Kategorien „geeignet“ – „ungeeignet“ bestehen und kein wissenschaftlich fundiertes Monitoring für viele Anlagen gewährleistet ist.

7 Kartenwerke für die Darstellung von Standorteignung und des Potentials

7.1 Potentialkarten

Die Darstellung von Potentialen thermischer Nutzungen ist in vielen Bereichen von Bedeutung. Sie dienen z.B. öffentlichen Institutionen und Forschungsförderungseinrichtungen dazu ihre Förderungsaktivitäten im Bereich der Forschung oder im Endverbraucherbereich festzulegen. Sie sind wichtig zur Prognose von Trends im Bereich technischer Entwicklungen und der Energienutzung. Für Industrieunternehmen bieten sie die Möglichkeit des gezielten (regionalen) Marketings. Letztlich sind sie dazu geeignet, den Bekanntheitsgrad und das Vertrauen in entsprechende Techniken zu erhöhen. Bei der Erstellung einer Potentialkarte muss zunächst die Zielsetzung (Zielgruppe) genau definiert und der Potentialbegriff abgegrenzt werden. Der Begriff „Potential“, bezogen auf den Einsatz erneuerbarer Energien und speziell im Bezug auf die Erdwärmenutzung, wird ausführlich bei KALTSCHMITT & WIESE (1997) und KALTSCHMITT et al. (1999) erörtert. Grundsätzlich wird zwischen theoretischen und technischen Potentialen unterschieden. Das theoretische Potential beschreibt die physikalisch maximal nutzbare Energie, das technische Potential gibt denjenigen Anteil des theoretischen Potentials an, der bei Berücksichtigung der technischen und sonstigen Einschränkungen genutzt werden kann. Solche Einschränkungen sind im Fall der oberflächennahen Erdwärmenutzung z.B. ungeeignete Schichten, aber auch Wasserschutzgebiete. Die Einschränkungen müssen im Einzelnen definiert werden. Technische Potentiale werden zusätzlich in Erzeugungs- und Nachfragepotentiale gegliedert. Das technische Nachfragepotential beinhaltet die gegebene Nachfrage unter Berücksichtigung der von der Nutzerseite vorgegebenen technisch physikalischen Anforderungen (z.B. benötigte Vorlauftemperatur). Das Gesamtpotential wird durch das Angebot (technisches Erzeugungspotential) und die potentielle Nachfrage bestimmt.

7.2 Planungskarten

„Planungskarten“ im weitesten Sinn sind darauf ausgerichtet, einen Benutzer bei der Konzeption eines konkreten Vorhabens zu unterstützen. Der wesentliche Unterschied zur einer Potentialkarte besteht darin, dass in einer Planungskarte das Nachfragepotential von sekundärem Interesse ist. Das Nachfragepotential kann aber insofern von Bedeutung sein, als es wenig sinnvoll ist, für gänzlich unbesiedelte Flächen detaillierte Planungskarten zu entwerfen. Planungskarten können je nach Detailgenauigkeit („Maßstab“), dem eingesetzten Arbeitsaufwand und der Abgrenzung der Thematik unterschiedliche Leistungen erbringen.

Einer einfachen Eignungskarte kann der Benutzer z.B. entnehmen, ob an seinem Standort prinzipiell die Wärmegewinnung aus dem Untergrund mit Wärmepumpen möglich ist und welches Verfahren gegebenenfalls das geeignetere darstellt. Der Nutzer erhält dann nur ein Minimum an Information, die für die konkrete Anlageplanung kaum bedeutend ist, im Frühstadium der Planung aber wichtige Fragen zu klären hilft. Eine solche Information ist dazu geeignet, den Anstoß zu geben, sich näher mit der Thematik zu befassen. Jede weitere Information muss vor Ort oder aus anderen Quellen gewonnen werden. Eine Erhöhung des Informationsgehaltes kann erfolgen, indem weitere Klassifikationen vorgenommen werden, z.B. die Aufteilung in Eignungsgrade gut, mittel, schlecht. Weiterhin könnte berücksichtigt werden, dass es Gebiete gibt, in denen sowohl Erdsonden als auch Grundwasserwärmepumpen eingesetzt werden könnten. In der Kombination mit der Einführung von Eignungsgraden entstehen dann schon relativ viele Kategorien, da auch Fälle wie: „für Erdsonden gut geeignet - für Grundwasser schlecht geeignet“ auftreten können. Insgesamt wird es bei einer Erhöhung der Informationsdichte in zunehmendem Maße notwendig, zwischen verschiedenen Verfahren zu unterscheiden, d.h. mehrere Karten zu erstellen. Dies mündet letztlich in stärker spezialisierten Karten mit hohem Informationsgehalt, die auf eine ganz bestimmte Fragestellung und einen bestimmten Anwendungsfall zugeschnitten sind. Der Benutzer kann aus dieser Karte konkrete Informationen für die Detailplanung seiner Anlage ablesen, z.B. die notwendige Sondenanzahl und –tiefe ermitteln. Eine weitere Spezialisierung ist durch zusätzliche Fallunterscheidungen zu treffen, z.B. in Bezug auf die betrachtete Tiefe, da sich die Untergrundverhältnisse auch in dieser Dimension ändern. Eine Darstellung solcher Karten auf Papier wird dadurch praktisch unmöglich, da sie, um eine angemessene Ablesbarkeit zu gewährleisten, in großem Maßstab ausgegeben werden müssen. Große Regionen müssten deshalb in eine Vielzahl von Einzelblättern aufgeteilt werden. Letztlich wäre ein umfangreiches Kartenwerk mit zahlreichen Einzelblättern notwendig, das teuer und zudem unkomfortabel zu handhaben wäre. In Frage kommt dagegen die Verbreitung in digitalem Format mit entsprechender Software auf Datenträgern oder im Internet. Ein erstes Beispiel ist die durch den geologischen Dienst NRW vorgelegte CD-Rom (GDNRW, 2004), die in ihrer Profiversion entsprechende Anwendung enthält (SANNER 2005b).

7.3 Karten zur Darstellungen rechtlicher Gegebenheiten

Einen Spezialfall des Typs „Planungskarte“ stellen Karten dar, die die rechtlichen Gegebenheiten in einer Region ausweisen. Rechtliche Limitierungen begrenzen den Anwendungsbereich von thermischen Nutzungen des Untergrundes klar. Sie sind deshalb meist auch Bestandteil von

Potential- und Planungskarten. Die Darstellung der rechtlichen Limitierungen beschränkt sich häufig auf Darstellung von Wasserschutzgebieten, sollte aber auch die mögliche Bohrtiefe berücksichtigen (s.o.). Die Bohrtiefe wird häufig durch die Maßgabe, dass keine tiefen (zweites Stockwerk) oder gespannten Grundwasserleiter genutzt bzw. erbohrt werden sollen, limitiert. Dies kann allerdings nur sinnvoll geschehen, wenn die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse in ihrer dreidimensionalen Ausprägung erfasst werden.

7.4 Vergleich und Bewertung der Kartentypen

Grundsätzlich ist die reine Potential- oder Eignungskarte, die ausschließlich die Untergrundeigenschaften berücksichtigt, mit einer separaten Darstellung der rechtlichen Bedingungen, das aus Sicht des Autors am besten geeignete Instrument. Die Einbeziehung der dritten Dimension (Hydrostratigraphie) ist in hohem Maße wünschenswert. In der Mischung von Potential (Eignung) und rechtlichen Voraussetzungen in Kartendarstellungen liegt ein gewisses Risiko, auf das auch SANNER (2005b) in seiner Beurteilung des vom Land Hessen herausgegebenen Leitfadens (HLUG, 2004) deutlich hinweist. Es ist dort nicht immer nachvollziehbar, ob ein Gebiet aus rechtlichen oder geologischen Gründen ungeeignet ist, wobei „rechtlich ungeeignet“ nicht notwendigerweise „verboten“ bedeutet, sondern nur eine Einzelfallprüfung verlangt. Keine Karte sollte ohne umfassende technische und rechtliche Anleitungen herausgegeben werden. Die Unsicherheiten sollten klar hervorgehoben und diskutiert werden. Dazu gehört auch, dass die Zielsetzungen der Karten und Leitfäden klar dargestellt sind (s.u.).

8 Zielsetzungen

Auf die möglichen Zielsetzungen von Standortbewertungen im Allgemeinen und auf diejenigen von Planungsleitfäden und -karten wird hier nicht im Detail eingegangen. Klare Zielsetzungen sind aber in jedem Falle eine Grundvoraussetzung für die Erstellung jeder Bewertung, da nur so festgelegt werden kann, welche Daten erforderlich sind, welche Bewertungsgrößen, -methoden und -kriterien angestrebt werden müssen. Es ist vor allem auch wesentlich dem Benutzer die Ziele transparent und unmissverständlich darzustellen, um mögliche Missverständnisse zu vermeiden, wie sie oben am Beispiel einer ungenauen Trennung der rechtlichen und hydrogeologischen Eignung diskutiert wurden. Eine unmissverständliche Definition der Zielsetzung gibt z.B. RPMUF (2002): *„...Der vorliegende Leitfaden richtet sich in erster Linie an die unteren und oberen Wasserbehörden (Kreisverwaltungen, Stadtverwaltungen und Struktur- und Genehmigungsdirektionen) und soll zu einer hinsichtlich des Grundwasserschutzes landesweit einheitlichen Beurteilung und Bearbeitung von Anträgen zur Erschließung von Erdwärme führen. Gleichzeitig enthält er nützliche Hinweise für künftige Betreiber und Anlagenbauer über technische Entwicklungen sowie Art und Umfang der Antragsunterlagen und trägt somit gezielt zur Verfahrensvereinfachung und -beschleunigung bei. Der Leitfaden gilt für den Bau von Erdwärmesonden im privaten Bereich. ...“*

9 Schlussbemerkungen und Ausblick

Ohne dass in diesem Beitrag näher darauf eingegangen wurde, stehen für die Standortbewertung auf der Basis von (hydro-)geologischen Grunddaten weitaus mehr Möglichkeiten zur Verfügung als nur die Erstellung relativ großmaßstäbiger regionaler (landesweiter) Kartenwerke. Möglichkeiten zur individuellen Standortbewertung mit in raumbezogene Datenbanksysteme integrierten Bewertungsmodellen wurden im Detail von BARTHEL (2000) vorgestellt. Eine erste praktische Umsetzung mit ähnlicher Zielsetzung gibt die CD-Rom „Geothermie – Daten zur Nutzung des oberflächennahen geothermischen Potenzials des Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen“ (GDNRW, 2004). Die Praxis hat allerdings in den letzten Jahren gezeigt, dass individuell einsetzbare interaktive Planungsinstrumente, bei denen komplexe Bewertungsmethoden zur Anwendung kommen, zwar wünschenswert, aber nicht überall mit vertretbarem Aufwand realisierbar sind. Auch ist nicht erwiesen, dass solche Planungsinstrumente tatsächlich gewinnbringend (im Sinne möglicher Zielsetzungen) eingesetzt werden können.

Ein wesentliches Hauptziel, das den Anstrengungen der Bundesländer zugrunde liegt, war die Vereinfachung der Genehmigungsverfahren. Dieses Ziel scheint weitgehend erreicht worden zu sein. Was den Nutzen von Standortbewertung(-skarten) für die Planung und Auslegung betrifft, kann durchaus bezweifelt werden, dass die bisher vorgelegten Kartenwerke über einen Werbeeffect hinaus einen deutlichen Nutzen aufweisen. Dazu ist die Diskrepanz zwischen Detailtreue der Kartenwerke und der Heterogenität der hydrogeologischen Verhältnisse zumindest in den meisten Gebieten Deutschlands zu groß. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass in der überwiegenden Anzahl der Fälle in Deutschland die hydrogeologischen Verhältnisse günstig genug sein dürften, um eine Erdwärmesondenanlage zu realisieren. Bereichsweise werden größere Sondenlängen (Bohrtiefe, Anzahl) nötig sein. Dem Bauherren und Planer genügt also u.U. die Information „nicht ungünstig“ und „genehmigungsfähig“ für seinen Standort, um sich für den Bau einer Anlage zu entscheiden. Stark limitierend sind dagegen rechtliche Bedingungen, für deren grundlegende Einschätzung aber kein sehr aufwendiges Bewertungsverfahren notwendig ist.

Dennoch hält es der Autor für sinnvoll, die Idee eines interaktiven, auf einem Untergrund-Informationssystem beruhenden, mit flexiblen Bewertungsmodellen ausgestatteten Planungssystems weiterzuverfolgen. Ein solches Planungssystem kann, auch wenn es nicht überall alle notwendigen (z.B. lithologischen) Daten in der erforderlichen Detailtreue enthält eine Vielzahl von Leistungen erbringen:

- Bereitstellung planungsrelevanter Basisdaten: verfügbares Kartenmaterial, bekannte Bohrungen, Aufschlüsse, zuständige Ämter, Klimadaten uvm.
- Bereitstellung auslegungsrelevanter Daten: Stratigraphie, Lithologie, sedimentpetrographische, mineralogische und thermische Untergrundparameter.
- Aussagen zu rechtlichen Aspekten: Wasserschutzgebiete, Stockwerksbau, Charakterisierung von Aquiferen.
- Hilfestellung bei der Erstellung von Antragsunterlagen, Lageplänen.
- Hinweise auf fehlende Informationen und wo bzw. wie diese gegebenenfalls erhoben werden können.

Dabei ist entscheidend, dass ein solches System nicht nur für Planung von Erdwärmeanlagen, sondern darüber hinaus für alle möglichen geowissenschaftlichen Fragestellungen einsetzbar ist, sei es für die Belange der Regionalplanung, im Bereich der Altlastenerkundung, für die Erstellung von Grundwassermodellen oder in der Lagerstättenerkundung uvm..

Es sollte also weiterhin versucht werden, die starren Konzepte spezialisierter, auf bestimmte Anwendungsfälle hin konzipierter „Karten“-Werke zu verlassen und statt dessen „Geoinformationssysteme“ (im Wortsinn) zu schaffen. Solche Informationssysteme können eine universelle Datenbasis für unterschiedlichste Anwendungszwecke darstellen. Sie sollten interaktiven, interdisziplinären Charakter haben und es ermöglichen Daten aus verschiedenen Sparten (z.B. Grundwasser-, Klima- und Landnutzungsinformation) miteinander zu verschneiden und auch mit sozioökonomischen Daten in Beziehung zu setzen. Ein solches umfassendes „Geoinformationssystem“ würde sowohl im angewandten- als auch im forschungsorientierten Bereich neue Wege zu öffnen. Wesentlich für den Erfolg eines solchen Systems ist ein Darstellungs- und Verbreitungskonzept, das der sich ständig ändernden Datenverfügbarkeit durch eine entsprechende Flexibilität gerecht werden kann. Nach den Erfahrungen aus der aktuellen Forschungsarbeit des Autors in großen interdisziplinären Forschungsprojekten in Bayern und Baden-Württemberg (BARTHEL et al., 2005, dieser Band) stehen Daten für solche Zwecke heute in ausreichendem Maße zur Verfügung, allerdings ist die Vernetzung der Datenquellen, die Homogenität der Datenhaltung und der Datenstrukturen sowie die Transparenz der Zuständigkeiten noch verbesserungswürdig. Um hier deutliche Fortschritte zu erzielen, wäre ein deutlich gesteigerter Personaleinsatz bei den zuständigen Behörden erforderlich. Es bleibt zu hoffen, dass der hohe Stellenwert geowissenschaftlicher Information in Politik und Öffentlichkeit erhalten bleiben wird und in dieser Hinsicht Fortschritte erzielt werden.

10 Literatur

ANGENHEISTER, G. (1982): Landoldt-Börnstein - Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik; Neue Serie, Gruppe V: Geophysik und Weltraumforschung; Band 1: Physikalische Eigenschaften der Gesteine Teilband b, (Gesamtwerk: Landolt, H., Hellwege, K.-H. & Predel, B. [Hrsg.]); Berlin, Heidelberg, New York.

BAKEMA, G., SNIJDERS, A.L. & NORDELL, B. (1995): Underground thermal energy storage: State of the art 1994. - 70 S., ISBN 90 802769 1 x; Arnhem, NL.

BARDOSSY, A., DUCKSTEIN, L. (1994): Fuzzy Rule Based Modeling with Applications to Geophysical Biological and Engineering Systems. - CRC Press, Boca Raton FL.

BARTHEL, R. (2000): Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) zur geologischen Standortbewertung, zur Analyse des regionalen Potentials und als Planungshilfsmittel für die thermische Nutzung des flachen Untergrundes bis 200m Tiefe als Wärmequelle und Wärmespeicher in Unterfranken/Bayern. – Dissertation Universität Würzburg: 353 S., 153 Abb., 74 Tab.; Würzburg (auch Hydrogeologie und Umwelt, Bd. 27, Würzburg).

- BAYLFW (1996):** Thermische Nutzung des Untergrundes, Erdwärmesonden und Erdkollektoren. - Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft Merkblatt SlgLfW, Teil 4 Nr. 4.8-3 vom 7.11.1996; München.
- BENNER, M. & HAHNE, E.W.P. (EDS.):** TERRASTOCK 2000. 8th International Conference on Thermal Energy Storage. Proceedings. Volume 1 & 2, University of Stuttgart, Germany, ISBN 3-9805274-1-7, Stuttgart 2000
- BONHAM-CARTER, G. (1994):** Geographic information systems for geoscientists modeling with GIS. - Computer Methods in the Geosciences, 13: 398 S.; Kidlington [u.a.].
- DWD (2004):** Klimastatusbericht 2003. - Deutscher Wetterdienst, 190 S., ISBN 3-88148-394-2, Offenbach
- EASTMAN, J.R. (1999):** Multi-criteria evaluation and GIS. – In: Longley et al. [ed.]: Geographical Information Systems, Volume 1 - Principles and technical issues. - 2. ed.: 493-502; New York.
- GDNRW (2004):** CD-ROM: Geothermie – Daten zur Nutzung des oberflächennahen geothermischen Potenzials. -Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen 2004 CD-ROM Basisversion ISBN 3-86029-706-6, Version Professional ISBN 3-86029-707-4.
- GUERNSEY, E.N., BETZ, P.L. & SKAN, N.H. (1949):** Earth as a heat source and storage medium for the heat pump. - ASHVE Trans, 55: 321-344.
- HELLSTRÖM, G., SANNER, B., KLUGESCHIED, M., GONKA, T. & MARTENSSON, S. (1997):** Experiences with the borehole heat exchanger software EED. - Proceedings of the Megastock '97, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, June 18, University of Hokkaido, Sapporo, Japan: 247–252; Sapporo.
- HERTLE, H., DUSCHA, M., EISENMANN, L., WIEDEMANN, F. & ZIPF, J. (1999):** Untersuchung von Möglichkeiten zur Förderung der Wärmepumpentechnik durch das Umweltzeichen. – Forschungsbericht 221 01 001 UBA-FB 99-056, Texte Veröffentlichung 44/99: 98 S.; Berlin.
- HLUG (2004):** Erdwärmennutzung in Hessen - Leitfaden für Erdwärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30 kW. - Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 33 S., ISBN 3-89026-340-2, Wiesbaden.
- IPCC (2001):** Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp.

- KABUS, F. (1999):** Geothermie im Reichstag: Energieverbund der Parlamentsbauten im Berliner Spreebogen, - Anlagen der Wärme- und Kälteversorgung, Speicherung von Wärme und Kälte in Aquiferen – Internet (<http://www.geothermie.de>).
- KABUS, F. (2005):** Neubrandenburger Aquiferwärmespeicher erstmalig gefüllt. - Geothermische Energie 45/2005, S. 16 Geeste.
- KALTSCHMITT, M. & WIESE, A. [HRSG.] (1997):** Erneuerbare Energien. - 2. Aufl.: 540 S.; Berlin, Heidelberg, New York.
- KALTSCHMITT, M., HUENGES, E. & WOLFF, M. (1999):** Energie aus Erdwärme. – 265 S., 77 Abb., 45 Tab.; Stuttgart.
- KLUGESCHIED, M., SANNER, B. & KNOBLICH, K. (1994):** Strömungsgekoppelte Simulation der Untergrundtemperaturen bei Erdwärmesonden und unterirdischer thermischer Energiespeicherung. Ber. Symp. Erdgek. Wärmepumpen 1994, IZW-Bericht 1/94: 351-360; Karlsruhe.
- LAWA (1980):** Grundlagen zur Beurteilung des Einsatzes von Wärmepumpen aus wasserwirtschaftlicher Sicht. – zitiert in Hölting, B. (1996), ZfGW Verlag; Frankfurt.
- LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J. & RHIND, D.W. (1999):** Geographical Information Systems, Volume 1 - Principles and technical issues. - 2. ed.: 580 S.; New York.
- LUANRW (2004):** Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme Merkblatt 48 des Landesumweltamtes NRW, 46 S., ISSN 0947-5788, Essen.
- MUVBW (2005a):** Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2005): Förderprogramm KLIMASCHUTZ-PLUS (Oberflächennahe Geothermie): Förderbedingungen –
- MUVBW (2005b):** Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. - Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg Stuttgart. - <http://www.klimaschutz-plus.baden-wuerttemberg.de>
- RAUCH, W. (1992):** AUSBREITUNG VON TEMPERATURANOMALIEN IM GRUNDWASSER. – VERÖFFENTLICHUNGEN der Universität Innsbruck, 188: 135 S., 23 Beil.; Innsbruck.
- RPMUF (2002):** Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 2. Fortschreibung - Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, 18. S., Mainz.
- SANNER, B. & REUB, M. (2000):** Auslegung von Wärmequellenanlagen erdgekoppelter Wärmepumpen. – Heizung-Lüftung-Haustechnik, Bd. 51 (2000) Nr. 4 – April: 50–58; Düsseldorf.

- SANNER, B. (1992):** Erdgekoppelte Wärmepumpen Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. - IZW-Berichte 2/92: 328S., Karlsruhe.
- SANNER, B. (2005a):** Nutzung geothermischer Energie - ohne Hydrogeologie undenkbar. - Grundwasser, Band 10, Heft 1, S. 1, ISSN 1430-483X, Berlin Heidelberg.
- SANNER, B. (2005b):** Genehmigungspraxis Oberflächennahe Geothermie - neue Leitfäden aus Hessen und Nordrhein-Westfalen. - Geothermische Energie, Heft 45, S. 29 - 31, Geeste.
- SANNER, B., PHETTEPLACE, G. & HELLSTRÖM G. (2000):** Introduction to Computer Models for Geothermal Heat Pumps. – Internet:
http://www.geothermie.de/oberflaechennahe/ItCMfGHP/ItCMfGHP_index.htm.
- SCHÖN, J. (1983):** Petrophysik, physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen. – 405 S., 194 Abb., 70 Tab.; Stuttgart.
- SIA (1996):** Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. - SIA-Dokumentation D 0136, Serie „Planung, Energie und Gebäude“: 142 S.; Zürich.
- SPITLER, J.D., YAVUZTURK, C. & REES, S.J. (2000):** In Situ Measurement of Ground Thermal Properties. – Proc. Terrastock 2000, pp. 165-170, Stuttgart
- STMLU (2003):** Oberflächennahe Geothermie - Heizen und Kühlen mit Energie aus dem Untergrund. Ein Überblick für Bauherren, Planer und Fachhandwerker in Bayern - Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen mit Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie, 20 S., München.
- VDI (2004):** VDI 4640: „Thermische Nutzung des Untergrunds“ Blatt 1 (Dez. 2000): Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, Blatt 2 (Sep. 2001): Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Blatt 3 (Jun. 2001): Unterirdische Thermische Energiespeicher, Blatt 4 (2004): Direkte Nutzungen.
- WENDEL, P. (2000):** Der Einsatz erd- oder grundwassergekoppelter Wärmepumpen aus wasserwirtschaftlicher Sicht. – IV. Würzburger Kolloquium 1998, Hydrogeologie und Umwelt Heft 20; Würzburg.
- WILKE, T. (1995):** Qualitätsaspekte bei der Nutzung von Geo-Informationssystemen. – in: Buziek, G. [Hrsg.]: GIS in Forschung und Praxis: 141–154; Stuttgart.
- WERNER, A., BIGLER, R., NIEDERHAUSER, A. ET. AL. (1996):** Grundlagen für die Nutzung von Wärme aus Boden und Grundwasser im Kanton Bern. - Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf. - Schlußbericht: 119 S.; Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kanton Bern (WEA), Bern.