

Oberflächennahe Geothermie - Nachhaltigkeit und rechtliche Situation

Dissertation

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von
Dipl.-Geol. Stefanie Hähnlein
aus Marburg an der Lahn

Tübingen
2013

Tag der mündlichen Qualifikation:

Dekan:

1. Berichterstatter:

2. Berichterstatter:

18.07.2013

Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel

Prof. Dr. Peter Grathwohl

Jun.-Prof. Dr. Philipp Blum

Danksagung Mein Dank geht an meine Betreuer, Prof. Dr. Grathwohl, Jun.-Prof. Dr. habil. Philipp Blum und Dr. Peter Bayer, für die gute Zusammenarbeit, die inhaltliche Anregung und Förderung. Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen Ke Zhu, Ilka Herklotz, Michael Scheunemann, Jozsef Hecht, Nelson Molina-Giraldo, Steffen Rehner und Valentin Wagner für die guten Diskussionen, Gespräche und die Zusammenarbeit bedanken. Dank geht auch an Marion Schäffling, der guten Seele des Instituts. Ebenso bedanke ich mich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Finanzierung der Arbeit durch ein Promotionsstipendium. Weiterer Dank geht an Hanna und Moritz für motivierende Gespräche, liebevolle Betreuung unserer Kinder und Korrekturlesen insbesondere in der Abschlussphase.

Herzlichster Dank geht an meinen Mann und an meine Eltern, für die bedingungslose Unterstützung während der ganzen Promotionszeit. Auch allen Anderen meiner Familie danke ich für die vielfältige Unterstützung, ohne die ich diese Arbeit nicht geschrieben hätte.

Abstract

Discussion on renewable energies is again important due to the negative consequences of energy production by fossil fuels and nuclear energy, particularly after the nuclear accident in Fukushima. Demands for energy security and protection of the environment are arising and therefore supporting the development of renewable energies. Hence, the use of shallow geothermal energy can play an important role in the future. Its usage however, might result in changes in the physical, chemical and biological characteristics of the subsurface and groundwater ecosystem. Groundwater plays a big role not only as a source of drinking water for the population but is also important for several life-forms and therefore is considered as a good which deserves protection.

In this study the current situation of shallow geothermal energy was analyzed with emphasis on the sustainability and legal situation in order to give suggestions for its long-term sustainable use and securing. Therefore, the influence of shallow geothermal energy on the groundwater and the underground was analyzed.

At the same time, the legal situation of ground source heat pump systems in Germany was evaluated with emphasis on minimum distances and temperature thresholds as a basis for long-term sustainable use. For a broader assessment basis the national study was fortified by an international study with 48 countries.

The results showed that the legal situation in Germany as well as in other countries is unsatisfying. This holds particularly for minimum distances between borehole heat exchangers and other points of reference, as well as absolute and relative temperature changes allowed in the groundwater and underground in order to diminish the influence of using shallow geothermal energy on the subsurface system. Moreover, these few existing regulations for temperature thresholds and minimum distances show clear differences among countries regarding their legal embedding as well as in the fixed threshold values.

A crucial reason for this seems to be the immense gaps in knowledge of governing processes, particularly in the area of the ecological effects and their interaction. In order to tackle this problem, long-term studies on ecological effects with different hydrochemical and hydrobiological conditions are needed. The studies also showed that none of the countries have implemented a strategy for the long-term sustainability of shallow geothermal energy yet. In the present thesis, criteria for the definition of the sustainability of the use of shallow geothermal energy are provided. Moreover, a scheme of assessment and planning was developed. Six decision levels were integrated (type, use, size, technical assessment, ecological assessment and licensing procedure). The suggested sustainability criteria as well as the scheme of assessment and planning can be used as a basis for the development of a legally binding guiding principle for sustainable use of shallow geothermal energy.

Kurzfassung

Durch die spürbaren negativen Folgen fossiler und atomarer Energiegewinnung, insbesondere nach dem Atomunglück von Fukushima, werden alternative Energiequellen intensiver denn je diskutiert. Forderungen nach Klimaschutz und Energiesicherheit stehen dabei im Vordergrund und unterstützen die Entwicklung dieser Energieformen. Die Nutzung der oberflächennahen Geothermie kann dabei eine wichtige Rolle spielen, führt jedoch zu Veränderungen der physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Untergrundes und des Grundwassers. Letzteres spielt eine herausragende Rolle als Trinkwasserquelle für weite Teile der Bevölkerung. Gleichzeitig ist es lebenswichtig für unterschiedliche Lebensformen und aus diesen Gründen besonders schützenswert.

In dieser Dissertation wurde die aktuelle Situation der oberflächennahen Geothermie unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit und der rechtlichen Situation analysiert, um Vorschläge für eine entsprechende Nutzung und deren Sicherstellung zu geben. Daher wurden die Auswirkungen oberflächennaher Geothermie auf das Grundwasser und den Untergrund betrachtet.

Parallel wurde die rechtliche Situation von Erdwärmesonden in Deutschland mit dem Schwerpunkt auf Mindestabständen und tolerierbaren Temperaturänderungen als Basis der Sicherung einer nachhaltigen Nutzung analysiert. Eine internationale Studie in 48 Ländern sollte dafür eine erweiterte Bewertungsbasis liefern.

Die Ergebnisse zeigen, dass die rechtliche Situation national wie auch international unbefriedigend ist. So gelten feste Mindestabstände zwischen den Anlagen und weiteren Referenzpunkten sowie absolute und relative Temperaturgrenzwerte für das Grundwasser und den Untergrund, um negative Auswirkungen der Nutzung oberflächennaher Geothermie gering zu halten. Diese wenigen bestehenden Regelungen weisen zudem in ihrer rechtlichen Verankerung sowie den festgelegten Grenzwerten deutliche Unterschiede zwischen

den Ländern auf. Ein entscheidender Grund hierfür scheinen die immensen Wissenslücken zu sein, insbesondere im Bereich der ökologischen Auswirkungen und ihrem Zusammenspiel. Nur in langfristigen Feldversuchen bei unterschiedlichen hydro-chemischen und hydro-biologischen Bedingungen können diese geschlossen werden. Die Studie zeigte somit auch, dass noch keines der Länder eine Strategie zur nachhaltigen Nutzung der oberflächennahen Geothermie umsetzt.

In der vorliegenden Dissertationsschrift wurden auf der rechtlichen Bestandsanalyse basierend Kriterien für die Definition der nachhaltigen flachen Geothermie festgelegt und ein Bewertungs- und Planungsschema entwickelt. Darin sind sechs Entscheidungsebenen (Typ, Nutzung, Größe, Technische Untersuchung, Ökologische Untersuchung, Genehmigungsverfahren) integriert, die eine nachhaltige Gewinnung der oberflächennahen Geothermie ermöglichen. Die vorgeschlagenen Nachhaltigkeitskriterien sowie das Bewertungs- und Planungsschema können als Basis für die Entwicklung einer rechtlich bindenden Richtlinie für eine nachhaltige Nutzung der oberflächennahen Geothermie verwendet werden.

Für Leyla und Justus

„You turned my whole world upside down“
E. Clapton

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Allgemeine Einführung und Zieldefinition	1
1.2	Technologischer Hintergrund	2
1.3	Ökologischer Hintergrund	3
1.4	Rechtlicher Hintergrund	4
2	Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden	7
3	International legal status of the use of shallow geothermal energy	25
4	Oberflächennahe Geothermie - aktuelle rechtliche Situation in Deutschland	43
5	Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy	55
6	Zusammenfassung	79

1 Einführung

1.1 Allgemeine Einführung und Zieldefinition

Geothermie, geothermische Energie oder Erdwärme bezeichnet die im zugänglichen Teil der Erdkruste in Form von Wärme gespeicherte Energie. Ab ca. 15 m Tiefe ist die Temperatur im Untergrund nahezu jahreszeitenunabhängig und nimmt aufgrund des Wärmestroms aus dem Erdinneren um rund 3 °C pro 100 m zu [1]. Bis zu einer Tiefe von 400 m spricht man dabei von der oberflächennahen, flachen oder un tiefen Geothermie. Ab 400 m wird sie als tiefe Geothermie bezeichnet. Der Abschlussbericht eines Projektes der Europäischen Union (EU) schlägt 500 m Tiefe als Grenze vor [2]. Geothermie zählt zu den erneuerbaren Energien und zeichnet sich insbesondere durch ihre Grundlastfähigkeit aus. Grundsätzlich kann sie überall sowie tages- und jahreszeitenunabhängig gewonnen werden. Das Haupteinsatzgebiet stellt derzeit die Klimatisierung und in Deutschland vor allem die Wärmegewinnung zur Beheizung von Gebäuden dar. Aber auch bei innovativen Projekten wie der Beheizung von Wegen, Straßen oder Parkplätzen, um diese eisfrei zu halten, kommt Erdwärme zum Einsatz.

Im Zusammenhang mit der Geothermie werden immer wieder die drei Begriffe 'erneuerbar', 'umweltfreundlich' und 'nachhaltig' verwendet.

- 'Erneuerbar' bezieht sich auf den Charakter der Ressource [3]. Die Geothermie wird zu den erneuerbaren Energien gezählt, da sie in menschlichen Zeiträumen als regenerierbar gilt.
- 'Umweltfreundlich' meint 'der natürlichen Umwelt nicht schadend' und bezieht sich bei ganzheitlicher Betrachtung somit auf die Ökobilanz. Dabei darf nicht nur die Geothermie als Wärmequelle betrachtet werden, sondern jeder Schritt von der Aufsuchung über Gewinnung bis zur Nutzung muss Berücksichtigung finden.
- Schlussendlich wird Geothermie auch häufig als 'nachhaltig' bezeichnet, wobei sich dies genau genommen auf die Art und insbesondere die Intensität der Ressourcennutzung bezieht [4].

Abbildung 1.1 zeigt, dass diese drei Eigenschaften eng in Verbindung stehen und im Zusammenhang betrachtet werden müssen. Die Wirkungsfaktoren beeinflussen diese ebenfalls. So sollte, bevor eine erneuerbare Energiequelle als nachhaltig bezeichnet wird, deren Nutzungsintensität betrachtet werden

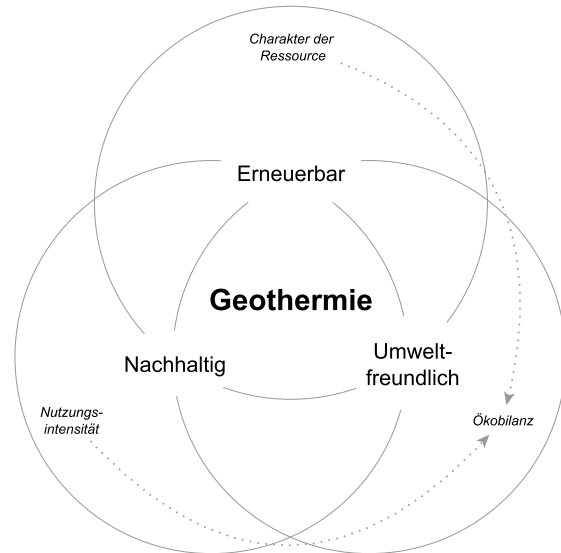


Abbildung 1.1: Zusammenspiel der drei Eigenschaften 'erneuerbar', 'umweltfreundlich' und 'nachhaltig', sowie deren Wirkungsfaktoren (kursiv).

(siehe auch [5]). Zusätzlich haben der Charakter der Ressource und die Nutzungsintensität Einfluss auf die Ökobilanz.

Damit eine geothermische Anlage als nachhaltig bezeichnet werden kann, müssen technische, ökologische, ökonomische und soziale Aspekte, sowie die Betrachtungsdauer eine Rolle spielen. Es muss betont werden, dass vereinfachende Kategorisierungen, immer im engen Zusammenspiel miteinander verbunden und Überschneidungen vorhanden sind. In Bezug auf die oberflächennahe Geothermie sind aus naturwissenschaftlicher Sicht insbesondere die technische und ökologische Nachhaltigkeit von Bedeutung. Die technische Nachhaltigkeit bezieht sich dabei auf eine lange und ergiebige Betriebsdauer der Anlage sowie die physikalischen Auswirkungen. Die ökologische Betrachtungsweise wendet sich insbesondere den chemischen und biologischen Auswirkungen zu. Diese können sich jedoch durch verschiedene Effekte auf die Lebensdauer einer Anlage auswirken (vgl. Kapitel 5). Diese Differenzierung, technisch/ökologisch, spiegelt sich teils im zeitlich kategorisierten Nachhaltigkeitsbegriff wieder. Dabei kann zwischen kurzfristiger (Tage und Wochen), mittelfristiger (ein Betriebszyklus, z. B. eine Heizperiode) sowie langfristiger Betrachtung (mehrere Jahre/Zyklen) unterschieden werden. So kann eine

kurzfristige intensive geothermische Gewinnung ökologisch verträglich, aber über lange Sicht untragbar sein. Gleichwohl könnte eine solche Nutzung aus technischer Sicht positiv betrachtet werden.

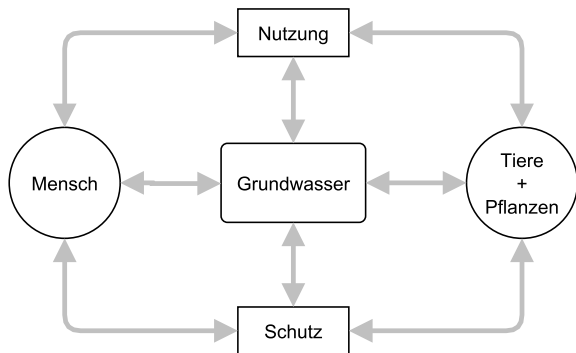


Abbildung 1.2: Spannungsfeld des Grundwassers zwischen Akteuren und Aktionen.

Ob der derzeitige Umgang mit oberflächennaher Erdwärme als nachhaltig bezeichnet werden kann, wird unterschiedlich bewertet. Dies liegt, wie oben dargestellt, zum einen an den sich überschneidenden Definitionen, aber auch am Mangel von Bewertungskriterien. Grundsätzlich muss berücksichtigt werden, dass die thermische Nutzung des Untergrundes aber insbesondere des Grundwassers ein Spannungsfeld (siehe Abb. 1.2) zwischen Aktionen (Schutz und Nutzung) und Akteuren (Menschen, Tieren und Pflanzen) darstellt, das es so zu gestalten gilt, dass eine langfristige nachhaltige Nutzung möglich ist. Es muss ein Mittelweg gefunden werden, der die natürliche Umwelt nicht schädigt und die notwendige Nutzung zulässt. Eine interdisziplinäre Herangehensweise ist dabei unabdingbar.

Ziel der Dissertation war es daher, die aktuelle Situation der oberflächennahen Geothermie mit dem Fokus auf Nachhaltigkeit und rechtliche Situation zu analysieren sowie Vorschläge für eine nachhaltige Nutzung und deren rechtlicher Sicherstellung zu geben. Dazu wurden die Auswirkungen der oberflächennahen Geothermie auf das Grundwasser und den Untergrund untersucht. Parallel wurde die rechtliche Situation von Erdwärmesonden in Deutschland als Basis der Sicherung einer nachhaltigen Nutzung analysiert. Um eine erweiterte Bewertungsbasis zu erhalten, wurde diese Studie auf internationale Ebene ausgedehnt. Aus den Ergebnissen von 48 Ländern aus Europa, Amerika und Asien sowie der nationalen Analyse zeigte sich, dass die rechtliche Situation national wie auch international unbefriedigend ist und kaum Strategien für eine nachhaltige Nutzung der oberflächennahen Geothermie bestehen. Infolgedessen wurden Kriterien für die Definition der nachhaltigen flachen Geothermie festgelegt und aus diesen ein Bewertungs- und Planungs-

schema entwickelt, in dem vielfältige Kriterien für eine nachhaltige Nutzung integriert sind.

Im ersten Kapitel werden technologische (1.2), ökologische (1.3) und rechtliche Hintergründe (1.4) dargestellt. In der ersten Publikation (Kapitel 2) wird gezeigt, wie sich die Ausdehnung von Kälteanlagen für konservative Bedingungen analytisch berechnen lassen. Die Ergebnisse werden dann im Kontext mit der rechtlichen Situation in Deutschland diskutiert. In der zweiten Veröffentlichung (Kapitel 3) werden die Ergebnisse der internationalen Studie zur rechtlichen Situation präsentiert. Die dritte Publikation (Kapitel 4) befasst sich mit der aktualisierten Rechtslage in Deutschland, da das Wasserhaushaltsgesetz während der Promotionszeit geändert wurde. In der vierten Publikation (Kapitel 5) ist der Schwerpunkt auf die Nachhaltigkeit gelegt. Es wird, aufbauend auf der rechtlichen Situation und den ökologischen Folgen, ein Verfahrensschema für eine nachhaltige Nutzung der oberflächennahen Geothermie entwickelt. Im letzten Kapitel (6) werden die Ergebnisse kurz zusammengefasst und abschließend kommentiert.

1.2 Technologischer Hintergrund

Im Folgenden wird ein Einblick in den technologischen Hintergrund der oberflächennahen Geothermie geliefert. Dazu werden die verschiedenen Techniken kategorisiert und in ihrer Funktionsweise kurz erläutert. Da zwei der Publikationen in englischer Sprache verfasst sind, werden hier die englischen Begriffe mit eingeführt.

Direkte Nutzung	
Erdwärmesonden Ground Source Heat Pump	Grundwasserwärmepumpen Groundwater heat pump
Geschlossene Systeme	Offene Systeme
Erdwärmesondenspeicher Borehole thermal energy storage	Grundwasserwärmespeicher Aquifer thermal energy storage
Untergrundwärmespeicherung	

Abbildung 1.3: Techniken der Erdwärmennutzung.

In der oberflächennahen Geothermie werden verschiedene Techniken eingesetzt. Grundsätzlich muss zwischen geschlossenen und offenen Systemen unterschieden werden (Abb. 1.3). Zu den geschlossenen Systemen werden Erdwärmesonden (EWS; Ground Source Heat Pump (GSHP) system), Erdwärmepfähle und -körbe, Flächenkollektoren und Erdwärmesondenspeicher (EWSS; Borehole Thermal Energy Storage (BTES) system) gezählt. Zu den offenen Systemen gehören Grundwasserwärmepumpen (GW-

WP; Groundwater Heat Pump (GWHP) system) und Grundwasserwärmespeicher (GWWS; Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) system). Als weitere Kategorisierung bietet sich die Nutzungsart an, die sich insbesondere auf die Größe der Gesamtanlage auswirkt. Für die direkte Nutzung, hauptsächlich die Klimatisierung von Gebäuden, werden Erdwärmesonden und Grundwasserwärmepumpen verwendet. Zu den Systemen der Untergrundwärmespeicherung (Underground thermal energy storage (UTES) system) zählen die Erdwärmesondenspeicher und Grundwasserwärmespeicher [6]. Zur indirekten Nutzung zählen tiefe geothermische Anlagen zur Stromerzeugung. Im Fokus der Arbeit stehen jedoch die Systeme für die direkte Nutzung für Heizung und Kühlung.

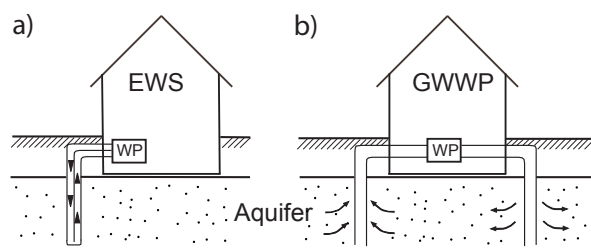


Abbildung 1.4: Schematische Darstellung einer a) Erdwärmesonde und einer b) Grundwasserwärmepumpe. Zur Verfügung gestellt von Jozsef Hecht-Mendez.

Zur Wärmegewinnung werden insbesondere Erdwärmesonden oder Grundwasserwärmepumpen eingesetzt (vgl. Abbildung 1.4). Erdwärmesonden sind meist Doppel-U-Sonden aus HDPE (High Density Polyethylen) in einem vertikalen Bohrloch. In Ausnahmefällen kommen auch Stahlrohre zum Einsatz. Des Weiteren werden auch einfache U-Sonden sowie Koaxialsonden eingesetzt. In der Sonde zirkuliert eine Wärmeträgerflüssigkeit, meist ein Glykol-Wasser-Gemisch. Dabei dient das Glykol insbesondere als Frostschutzmittel. Bei den (Doppel-)U-Sonden fließt das Wärmeträgermedium auf der einen Seite nach unten und auf der anderen Seite wieder zur Wärmepumpe (WP) zurück nach oben und wird dabei erwärmt. Bei den Koaxialsonden fließt das Wärmeträgermedium im äußeren Rohrraum nach unten, wird dabei erwärmt und durch den inneren Rohrraum zur Wärmepumpe zurück transportiert. Die Nachteile dabei sind die halbierte Strecke und Zeit zum Wärmeaustausch, jedoch ist der Einbau der Koaxialsonde technisch einfacher [7]. Bei Grundwasserwärmepumpen zirkuliert das Grundwasser zwischen einem Extraktions- und Injektionsbrunnen oder mehreren Brunnen und wird direkt als Wärmeträgermedium verwendet [8]. Alle oberflächennahen geothermischen Anlagen entziehen dem Untergrund Wärme oder nutzen die niedrigeren Temperaturen des Grundwassers und des Un-

tergrundes zum Kühlen. Im Rahmen der Niedertemperaturspeicherung können Temperaturen von 30 °C und mehr auftreten. Bei Temperaturen bis zu 90 °C spricht man von Hochtemperaturspeicherung [9]. Bei Speicherungsanlagen können aber auch Temperaturen bis 150 °C auftreten [10]. Erdwärmesonden und Grundwasserwärmepumpen senken die Temperatur im Schnitt um 4 °C bis 5 °C. Im Sommer, wenn das Grundwasser zur Kühlung dient, wird es hingegen um bis zu 10 °C erwärmt [11, 12]. Aber auch hier können höhere Temperaturen mit Erwärmungen über 10K und Grundwassertemperaturen über 20 °C auftreten (vgl. Kapitel 5).

1.3 Ökologischer Hintergrund

Dieses Unterkapitel gibt einen ersten Eindruck über die möglichen ökologischen Konsequenzen der oberflächennahen Geothermie. Im Folgenden werden als erstes die auftretenden Temperaturanomalien erläutert, da sie eine fundamentale Rolle der Arbeit spielen. Im weiteren werden chemische, biologische und generelle physikalische Veränderungen angesprochen. Eine ausführliche Darstellung findet sich in Kapitel 5. Der Einsatz geothermischer Anlagen führt durch Wärmezufuhr oder -entzug gegenüber dem Normalzustand des Aquifers zu einer lokalen Veränderung der Temperatur (Temperaturanomalie) im Untergrund und im Grundwasser. Grundsätzlich können zwei natürliche Wärmetransportprozesse unterschieden werden. Dies ist zum einen der konduktive Transport, auch Wärmeleitung genannt und zum anderen der konvektive Transport. Bei letzterem wird die Wärme mit dem Grundwasser transportiert, weshalb dieser Prozess auch als advektiver Wärmetransport bezeichnet wird. Beide Begriffe konvektiv und advektiv, werden gleichermaßen verwendet (vgl. Kapitel 2). Durch Wärmezufuhr oder -entzug entsteht ein Temperaturgradient in Grundwasserfließrichtung, bzw. radial um die Anlage im Falle dominant konduktiver Bedingungen, bis zu dem Punkt an dem wieder die ursprüngliche Umgebungstemperatur oder eine akzeptierte Temperaturabweichung besteht. Diese Zone wird mit dem Begriff Kältefahne (cold plume) im Falle des Wärmeentzugs, beziehungsweise Wärmefahne (heat plume) bei Wärmezufuhr umschrieben [13, 14]. Sobald sich ein Gleichgewicht zwischen Wärmezufuhr/-entzug und dem natürlichen Wärmeausgleich eingestellt hat, breitet sich die Temperaturänderung nicht weiter aus, und es stellt sich ein stationärer Zustand ein (vgl. Kapitel 2). Durch Nutzungsvariationen können sich die Temperaturanomalien teilweise regenerieren. Grundsätzlich lassen sich die ökologischen Auswirkungen ganz klassisch in physikalisch, chemische

und biologische Konsequenzen klassifizieren. Für eine Betrachtung der Nachhaltigkeit sind jedoch ebenfalls die damit verbundenen Effekte von Bedeutung. Die Temperaturvariationen bewirken eine Änderung der Löslichkeit von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen sowie des pH-Werts. Beeinflusst werden beispielsweise Sauerstoffgehalt, Stickstoffhaushalt und das Kalk-Kohlensäuregleichgewicht [15]. So wurde in Beispielen nachgewiesen, dass sich Abkühlung und Erwärmung auf Lösungs- und Fällungsprozesse von Mineralien auswirken [16] und gegebenenfalls unter dem Einfluss von Mikroorganismen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Anlage nehmen können [17]. Zwar gibt es die Vermutung, dass diese Prozesse bei der Auslegung von Erdwärmesonden nicht berücksichtigt werden müssen und dass die Nutzung von Grundwasserleitern als Wärmespeicher mit einer Temperaturerhöhung auf 50 °C für kalkfreie Grundwasser unbedenklich ist [16], um eine thermische Nutzung nachhaltig zu gestalten, sollten diese Prozesse jedoch auf fundierte Weise Beachtung finden. Temperaturveränderungen können auch Auswirkungen auf Fortpflanzung, Wachstum und Überleben von Lebewesen, sowie auf den umgebenden Boden haben. Für die meisten Bodenorganismen liegt das Temperaturoptimum zwischen 10 °C und 35 °C [18]. Eine erhöhte Temperatur kann für viele chemische Prozesse von Vorteil sein, da Reaktionen leichter und schneller ablaufen. Jedoch sind beispielsweise Enzyme – als wichtige Bestandteile der Zelle – hitzeempfindlich [19]. Untersuchungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit Inkubationsversuchen zeigen, dass signifikante, auf die Temperatur bezogene Einflüsse auf die Lebendzahlen von Mikroorganismen erst ab -20 °C auftreten [20]. Durch Absenkung der Temperatur können sich biologische Aktivitäten im Boden verringern, so dass ein positiv zu bewertender Abbau von Schadstoffen durch Organismen nicht mehr oder nur in geringerem Maße ablaufen könnte [21]. Gerade in Gegenden mit verschmutztem Grundwasser kann dieser Aspekt von erheblicher Relevanz sein. Es wird deutlich, dass physikalische, chemische und biologische Effekte nicht nur isoliert betrachtet werden dürfen, sondern immer in der Gesamtheit ihres Zusammenspiels untereinander und ihren Auswirkungen auf Funktionen der Organismen und Produktionsfähigkeit der Anlagen. In Kapitel 5 wird eine vertiefte Übersicht über die ökologischen Auswirkungen gegeben.

1.4 Rechtlicher Hintergrund

Im folgenden wird ein Einblick in die rechtliche Situation gegeben, wie sie sich zu Beginn der Promotionszeit dargestellt hat.

Flache geothermische Anlagen und insbesondere Erdwärmesonden werden mit steigender Zahl [22, 23] und an vielen Orten eingesetzt, trotzdem besteht bisher kein bundesweit einheitliches Genehmigungsverfahren [24]. Dieses Bild spiegelt sich auch auf internationaler Ebene wieder (vgl. Kapitel 3). Als Basis für die rechtliche Betrachtung in Deutschland dienen das Wasserhaushaltsgesetz und das Bundesberggesetz. Diese werden durch die Landesgesetze und unterschiedliche Leitfäden der Bundesländer spezifiziert. Dabei ist zu betonen, dass jedes Bundesland seinen eigenen Leitfaden zur Nutzung von Erdwärmesonden formuliert hat. Dies zeigt bereits die nächste Problematik auf. Zum einen stellt dies Hersteller, Planer und Installateure vor unterschiedliche rechtliche Bedingungen, zum anderen ist eine wirtschaftliche Vergleichbarkeit nicht gegeben.

Neben der Problematik der unterschiedlichen Voraussetzungen kommt als weiterer offener Punkt die noch unklare rechtliche Situation hinzu. Wie bereits dargestellt, beeinflussen Änderungen der Temperatur die physikalischen, biologischen und chemischen Charakteristika des Grundwassers und des Untergrundes. Um nachteilige Veränderungen zu verhindern, werden daher national und zum Teil international Temperaturgrenzwerte für das Grundwasser und in seltenen Fällen für den Untergrund festgelegt. Dabei können Temperaturmaximum, -minimum und akzeptierte Temperaturdifferenz unterschieden werden. Des Weiteren können solche Temperaturanomalien benachbarte Anlagen beeinflussen. Um negative Interaktionen oder eine Akkumulation der Anomalien zu verhindern, werden Mindestabstände zwischen Anlagen als technische Kriterien festgelegt. Dafür werden unterschiedliche Bezugspunkte herangezogen. In den meisten Ländern sind dies die nächste Grundstücksgrenze oder die nächste Anlage.

Eine Analyse der rechtlichen Situation für Deutschland wurde in Kapitel 2 und aktualisiert in Kapitel 4 publiziert. Die Ergebnisse der internationalen Studie sind in der zweiten Publikation in Kapitel 3 veröffentlicht.

Literatur

- [1] KALTSCHMITT, Martin; HUENGES, Ernst; WOLFF, Helmut: *Energie aus Erdwärme*. Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1999
- [2] GOODMAN, Roisini; PASQUALI, Riccardo; JONES, Gareth; REAY, Derek; EARLS, Garth; JAUDIN, Florence; FOUILLAC, Christian; SANNER, Burkhard; DUMAS, Philippe; BOISSAVY, Christian; KEPINSKA, Beata; BUJAKOWSKI, Wieslaw; KLIMA, Krisztián; HEEKEREN, Tamás Hamor-Victor v.; BUSSMAN, Werner; RUETER, Dr H.; SCHRAMADEI, Mr R.: Geothermal Regulation Framework. 2009. – Forschungsbericht
- [3] RYBACH, Ladislaus; MONGILLO, Mike: Geothermal Sustainability - A Review with Identified Research Needs. In: *Geothermal Resources Council (GRC) Transactions* 30 (2006), S. 1083–1090
- [4] AXELSSON, Gudni: Sustainable geothermal utilization - Case histories; definitions, research issues and modelling. In: *Geothermics* 39 (2010), S. 283–291
- [5] PREENE, Martin: Sustainable groundwater-source cooling systems for buildings. In: *Engineering Sustainability* 161 (2008), Nr. ES2, S. 123–133
- [6] MIDTØMME, Kirsti; BANKS, David; RAMSTAD, Randi K.; SÆTHER, Ola M.; SKARPHAGEN, Helge: Ground-Source Heat Pumps and Underground Thermal Energy Storage-Energy for the future. In: *Geology for Society, Geological Survey of Norway Special Publication* 11 (2008), S. 93–98
- [7] WALKER-HERTKORN, Simone; HÄHNLEIN, Stefanie; URBAN, Karl; BLUM, Philipp; BAYER, Peter: Genehmigungsverfahren für die oberflächennahe geothermische Nutzung. In: *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie* (2010), S. 8–13
- [8] OMER, Abdeen M.: Ground-source heat pumps systems and applications. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008), S. 344–371
- [9] ADINOLFI, Maurizio; KOCH, Michael; RUCK, Wolfgang: Ökologische und mikrobielle Folgen der Wärmespeicherung im Aquifer. In: *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft* Bd. 124. München, Germany: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 1994, S. 89–106
- [10] BRIDGER, David W.; ALLEN, Diana M.: Designing aquifer thermal energy storage systems. In: *Building for the future - A supplement to ASHRAE Journal* 47 (2005), Nr. 9, S. 32–37
- [11] HAHN, Hans J.: Erdwärmennutzung und Kühlwasser - alles Gute kommt von unten? In: *Grundwasser - Guter Zustand bis 2015!* Berlin: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, 2007, S. 30–31
- [12] ABESSER, C.: Open-loop ground source heat pumps and the groundwater systems: A literature review of current applications, regulations and problems / British Geological Survey. 2007. – Forschungsbericht
- [13] PANNIKE, Simone; KÖLLING, Martin; PANTELEIT, Björn; REICHLING, Jörg; SCHEPS, Volker; SCHULZ, Horst D.: Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten (Influence of hydrogeological parameters on temperature variations due to borehole heat exchangers). In: *Grundwasser* 11 (2006), S. 6–18
- [14] HÄHNLEIN, Stefanie; MOLINA-GIRALDO, Nelson; BLUM, Philipp; BAYER, Peter; GRATHWOHL, Peter: Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden (Cold plumes in groundwater for ground source heat pump systems). In: *Grundwasser* 15 (2010), Nr. 2, S. 123–133
- [15] LAWA: *Anforderungen an Erdwärmepumpen*. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 2002 (Gemeinsamer Unterausschuss „Erdwärmepumpen“ der ständigen Ausschüsse „A“ und „G“ der LAWA)
- [16] ARNING, Esther; KÖLLING, Martin; PANTELEIT, Björn; REICHLING, Jörg; SCHULZ, Horst D.: Einfluss oberflächennaher Wärmegegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter (Effect of nearsurface thermal extraction on geochemical processes in aquifer). In: *Grundwasser* 11 (2006), S. 27–39
- [17] LERM, Stephanie; ALAWI, Mashal; MIETHLING-GRAFF, Rona; WOLFGRAFF, Markus; RAUPPACH, Kerstin; SEIBT, Andrea; WÜRDEMANN, Hilleke: Influence of microbial processes on the operation of a cold store in a shallow aquifer: impact on well injectivity and filter lifetime. In: *Grundwasser* 16 (2011), Nr. 2, S. 93–104

- [18] SCHEFFER, Fritz; SCHACHTSCHABEL, Paul: *Lehrbuch der Bodenkunde*. 15. Heidelberg Berlin: Spektrum Verlag, 2002
- [19] GRIEBLER, Christian; MÖSSLACHER, Friederike: *Grundwasser - Ökologie (Groundwater Ecology)*. Stuttgart: UTB, 2003
- [20] SCHIPPERS, Axel; REICHLING, Jörg: Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. In: *Grundwasser* 11 (2006), Nr. 1, S. 40–45
- [21] LFB: Erdwärmennutzung in Berlin / Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz. 2010. – Forschungsbericht
- [22] SANNER, Burkhard; KARYTSAS, Constantine; MENDRINOS, Dimitrios; RYBACH, Ladislaus: Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. In: *Geothermics* 32 (2003), S. 579–588
- [23] RYBACH, Ladislaus: Status and prospects of geothermal energy. In: *World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia, 2010
- [24] HÄHNLEIN, Stefanie; BAYER, Dr. P.; BLUM, Dr. P.; KÜBERT, Dr. M.; WALKER-HERTKORN, Dr. S.: Rechtliche Rahmenbedingungen bei der thermischen Grundwasserbewirtschaftung. In: *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie* (2009), S. 14–21

2 Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden

Originalveröffentlichung erschienen auf www.springerlink.com

Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden

Hähnlein, S., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., Grathwohl, P. (2010)

Grundwasser 15 (2), 123-133.

Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden

Cold plumes in groundwater for ground source heat pump systems

Stefanie Hähnlein, Nelson Molina-Giraldo, Philipp Blum, Peter Bayer, Peter Grathwohl

Dipl.-Geol. S. Hähnlein, Eberhard Karls Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Sigwartstr. 10, 72076 Tübingen, E-Mail: stefanie.haehnlein@ifg.uni-tuebingen.de;

Dipl.-Ing. N. Molina-Giraldo, Eberhard Karls Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Sigwartstr. 10, 72076 Tübingen, E-Mail: nelson.molina-giraldo@uni-tuebingen.de

Dr. P. Blum, Eberhard Karls Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Sigwartstr. 10, 72076 Tübingen, E-Mail: philipp.blum@uni-tuebingen.de

Dr. P. Bayer, Eberhard Karls Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Sigwartstr. 10, 72076 Tübingen, E-Mail: peter.bayer@uni-tuebingen.de;

Prof. Dr. P. Grathwohl, Eberhard Karls Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Sigwartstr. 10, 72076 Tübingen, E-Mail: grathwohl@uni-tuebingen.de;

Zusammenfassung Erdwärmesonden (EWS) werden immer häufiger zur Klimatisierung von Gebäuden eingesetzt. Dabei kommt es durch lokalen Wärmeentzug zu Temperaturanomalien (Kältefahnen) im Untergrund. Um der gegenseitigen Beeinflussung solcher Kältefahnen vorzubeugen, wird von Behörden in Deutschland meist ein Mindestabstand zwischen einzelnen Anlagen von 10 m empfohlen. Die Längen der Kältefahnen können sowohl analytisch als auch numerisch modelliert werden. Die hier vorgestellten analytischen Gleichungen gelten für stationäre Bedingungen und simulieren Konduktion, Konvektion und Dispersion. Die Berechnungen zeigen, dass die Fahnenlängen von verschiedenen Materialparametern und insbesondere der Fließgeschwindigkeit abhängig sind. So werden die Kältefahnen in Kiesaquiferen kurzfristig länger als die in geringer durchlässigen Gesteinseinheiten, und sie überschreiten bei gemittelter Entzugsleistung die 10 m innerhalb einer Heizperiode. Im hier berechneten Fall erreicht eine Kältefahne nach 100 Tagen die 10 m bereits bei einem kontinuierlichen Wärmeentzug von 55 W m^{-1} . Dafür können sich Kältefahnen im Kies jedoch schneller regenerieren. Die simulierten Ergebnisse werden im rechtlichen Kontext diskutiert.

Abstract Shallow geothermal energy installations, especially ground source heat pump (GSHP) systems are increasingly being used for air conditioning and temperature control in buildings. Heating applications, for example, result in cold temperature anomalies (cold plumes) in the subsurface. To avoid interactions between adjacent cold plumes, authorities recommend minimum distances of about 10 m between installations. The length of these plumes can be simulated analytically and numerically. The presented analytical solutions are valid for steady-state conditions and consider conduction, convection and dispersion. The results show that the length depends on different parameters, especially flow velocity. The plumes in gravel aquifers become temporarily longer than in less permeable aquifers. Even under average energy extraction rates, they can exceed 10 m in length after one heating period. In the presented example the plume has a length of 10 m after 100 days under a continuous energy extraction rate of 55 W m^{-1} . However, these plumes can regenerate quickly. Finally, the analytical results are discussed in a legal context.

Keywords Ground source heat pumps (GSHP), Borehole heat exchanger (BHE), Cold plumes, Analytical solutions, Geothermal energy

Einführung

Klimaschutz und Energiesicherheit stehen heute auf annähernd jeder politischen Agenda, und der Einsatz erneuerbarer Energien steigt stetig an (BMU 2007a). Durch effizienten und sparsamen Energieeinsatz können fossile Rohstoffe eingespart und zusätzlich CO₂-Emissionen verringert werden (z. B. Blum et al. 2010). Ein besonderes Einsparpotenzial bietet die Wärmeversorgung von Häusern in der kalten Jahreszeit. Dabei stellt die oberflächennahe Geothermie einen favorisierten Lösungsweg dar. In jüngerer Zeit – insbesondere motiviert durch steigende Rohstoffpreise – wurde die Förderung der oberflächennahen Geothermie intensiviert, und es ist davon auszugehen, dass die flache Geothermie (<400 m) in einem umweltfreundlichen Energiemix der Zukunft eine wichtige Rolle spielt. Sie ist bei geeigneten hydrogeologischen Bedingungen für Einfamilienhäuser und Großanlagen gleichermaßen geeignet. Die Zahl der oberflächennahen geothermischen Anlagen steigt kontinuierlich an – alleine vom Jahr 2003 bis 2008 hat sich die Anzahl in Deutschland von 6197 auf 29.993 installierte Erdwärmesondenanlagen pro Jahr vervielfacht (BWP 2009). Im Februar 2007 sprach die Geothermische Vereinigung e. V. von insgesamt 120.000 installierten Anlagen der flachen Geothermie in Deutschland (GtV 2008).

Oberflächennahe geothermische Anlagen können in geschlossene und offene Systeme gegliedert werden. Am häufigsten werden Erdwärmesonden (EWS), d. h. geschlossene Systeme, eingesetzt. Hier zirkuliert ein Wärmeträgermedium in einem meist vertikalen Bohrloch und transportiert die Wärme aus dem Untergrund zur Wärmepumpe. Bei der Nutzung von EWS zur Klimatisierung – zum Kühlen oder Heizen – kommt es durch Wärmeeintrag oder -entzug im Untergrund zu lokalen Temperaturveränderungen. Es entsteht ein lokaler Temperaturgradient, der sich bei rein konduktivem Wärmetransport radial um die Sonde ausbreitet. Wenn im Grundwasser der konvektive Wärmetransport überwiegt, bildet sich eine Wärme- bzw. Kältefahne (Temperaturfahne) parallel zum Grundwasserfluss aus (Abb. 1). Sobald sich ein Gleichgewicht zwischen Wärmezufuhr/-entzug und dem natürlichen Wärmeausgleich eingestellt hat, breitet sich die Temperaturänderung nicht weiter aus, und es stellt sich ein stationärer Zustand ein. Es können zwei Wärmetransportprozesse unterschieden werden. Dies ist zum einen der konduktive Transport, auch Wärmeleitung genannt und zum anderen der konvektive Transport. Bei letzterem wird die Wärme mit dem Grundwasser transportiert, weshalb dieser Prozess auch als advektiver Wärmetransport bezeichnet wird. Beide Begriffe, konvektiv und advektiv, werden gleichermaßen verwendet.

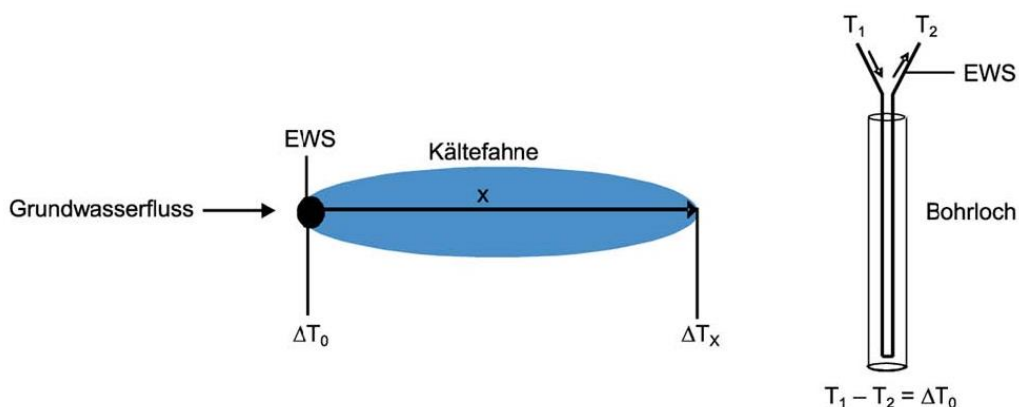


Abb. 1 Schematische Darstellung (*links*) einer Kältefahne bei dominierendem konvektivem Wärmetransport bei Einsatz einer Erdwärmesonde, sowie (*rechts*) wie ΔT_0 aus der Temperatur des Wärmeträgermediums in der EWS berechnet wird.

Tab. 1 Übersicht über Mindestabstände zwischen Erdwärmesonden, sowie zwischen Erdwärmesonden und Grundstücksgrenzen in den Bundesländern. Bei Abschluss der Arbeit lagen von Hamburg und Bremen noch keine Leitfäden vor.

Bundesland	Mindestabstand	
	zur nächsten Sonde	zur Grundstücksgrenze
Baden-Württemberg ^b	10 m	k. A.
Bayern ^{a, c}	6 m	5 m
Berlin ^{a, d}	5 m / 6 m *	5 m
Brandenburg ^e	5 m / 6 m *	k. A.
Hamburg ^{a, f}	5 m / 6 m	5 m
Hessen ^{a, g}	k. A.	5 m
Mecklenburg-Vorpommern ^h	5 m / 6 m *	5 m
Niedersachsen ^{a, i}	5 m zw. Sonden einer Anlage / 10 m zur nächsten Anlage	k. A.
Nordrhein-Westfalen ^j	k. A.	k. A.
Rheinland-Pfalz ^{a, k}	10 m	3 m
Saarland ^{a, l}	5 m zw. Sonden einer Anlage	k. A.
Sachsen ^{a, m}	5 m / 6 m *	k. A.
Sachsen-Anhalt ⁿ	k. A.	k. A.
Schleswig-Holstein ^o	5 m / 6 m *	k. A.
Thüringen ^{a, p}	5 m / 6 m *	5 m

k. A. keine Angabe; *VDI 4640, Blatt 2; ^aGültigkeit bis 30 kW Leistung; ^bLF BW (2005); ^cLF BAY (2003); ^dLF B (2007); ^eLGRBBB (2008); ^fLFHH (2009); ^gLFH (2006); ^hLFMVP (2006); ⁱLFN (2006); ^jLFNRW (2004); ^kLF RP (2006); ^lLFSL (2008); ^mLF S (2007); ⁿLFSA (2005); ^oLF SH (2006); ^pLF T (2007)

Um den Vorgaben des Wasserhaushaltsgesetzes bezüglich eines vorsorgenden Grundwasserschutzes zu entsprechen und die Auswirkungen der Temperaturanomalien einzuschränken, wurden von den Bundesländern Leitfäden zur Nutzung von EWS eingeführt. Darin sind Sonden- und Grenzabstände für den Bau von EWS vorgegeben. Sondenabstände bezeichnen den Mindestabstand zwischen zwei EWS. Grenzabstände beschreiben die Distanz, die zwischen einer EWS und der Grundstücksgrenze eingehalten werden soll. Die empfohlenen Mindestabstände liegen zwischen 5 m und bis zu 10 m (Tab. 1, Walker-Hertkorn et al. 2008, Hähnlein et al. 2009). Wird als Grenzabstand 5 m empfohlen, so ergibt sich zwischen zwei EWS auf unterschiedlichen Grundstücken ein Mindestabstand von 10 m. Weitere technische Regelungen für die oberflächennahe Geothermie bietet die Richtlinie des Verbands Deutscher Ingenieure (VDI) 4640 (VDI 4640-1, VDI 4640-2). Darin enthalten sind ebenfalls Mindestabstände und mögliche Entzugsleistungen je nach Eigenschaft des Untergrunds.

Dieses Thema ist auch Gegenstand der Studie von Pannike et al. (2006). Sie verwenden für ihre numerischen Szenarienmodellierungen von Kältefahnen im Grundwasser das Strömungs- und Wärmetransportmodell SHEMAT, womit stationäre und transiente Transportprozesse in hydrogeothermischen Reservoiren zwei- und dreidimensional dargestellt werden können (Bartels et al. 2003). Für die ersten Szenarien nehmen sie homogene Schichten an und belegen diese mit den hydro- und geologischen Eigenschaften der norddeutschen Lockersedimente. In der zweiten Modellgruppe werden mehrschichtige Modelle betrachtet, die über unterschiedliche thermische Parameter verfügen. Die Modellierungen werden für einen Zeitraum von 30 Jahren durchgeführt. Dabei wird der Wechsel der Winter(= Heizperiode) und Sommersaison (= Ruhephase) berücksichtigt. Teilweise wird im Sommerhalbjahr ein Wärmeeintrag simuliert. Die Werte für die Parameter wurden verschiedenen Literaturquellen entnommen (z. B. Freeze & Cherry 1979, Hötting 1996). Sie liegen für Ton (Schluff, Mittelsand) bei der Porosität bei 55 % (43 %; 38 %), für die Abstandsgeschwindigkeit mit einem Gradienten von $1,0 \cdot 10^{-3}$ bei $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ ($1,0 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$; $4,2 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$) sowie für die Wärmeleitfähigkeit bei $1,3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; $2,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Berechnet wird die Länge der Kältefahne einer EWS in Fließrichtung, entgegen der Fließrichtung sowie die Breite der Kältefahne. Die simulierten Längen in Fließrichtung (von der Sonde bis zu dem Punkt, an dem eine Temperaturabweichung von 1 °C erreicht ist) variieren, je nach gewählttem Szenario und Gesteinseinheit, zwischen 0,2 m (Grobsand, entzogene Wärmemenge: 8.100 kWh a^{-1}) und knapp 18 m nach 30 Jahren (Schluff, Wärmeentnahme von $10.800 \text{ kWh a}^{-1}$ und zusätzlichem Betrieb von jeweils 300 h im Sommer und Winter zur Bereitstellung von

Warmwasser). Die Modellierungen von Pannike et al. (2006) zeigen, dass in Lockersedimenten mit guter Durchlässigkeit der advective Wärmetransport mit dem Grundwasser gegenüber der Konduktion überwiegt. Des Weiteren wird dargestellt, dass die Fahnenlänge von der Fließgeschwindigkeit, der Entzugsleistung und den Sedimenteigenschaften abhängt. Aufgrund der vielfältigen Einflussparameter kommen sie zu dem Schluss, dass für eine Genehmigung von EWS Untergrundbedingungen und benötigte Wärmeleistung genau bekannt sein müssen.

Weitere numerische Modellierungen im Bereich des Wärmetransports im Zusammenhang von EWS wurden beispielsweise von Pahud et al. (2002) und Mahabadi (2006) durchgeführt. Pahud et al. (2002) verwenden numerische Modelle, um die Auswirkungen auf das Wärmeträgermedium zu betrachten. Mahabadi (2006) hingegen berechnet die Längen von Kältefahnen mit den Parametern für den Untergrund Berlins. In Hecht-Méndez et al. (2010) werden weitere numerische Modellwerkzeuge und Anwendungen im Zusammenhang von EWS ausführlich diskutiert.

Solche numerischen Modellierungen eignen sich insbesondere für große Anlagen mit mehreren EWS und heterogene Aquifere. Die im Folgenden präsentierten analytischen Gleichungen erlauben hingegen eine schnelle Abschätzung der Ausdehnung von Kältefahnen bei Einzelanlagen unter der Annahme eines homogenen Untergrunds. Für den häufigsten Einsatz von EWS, nämlich bei Einfamilienhäusern, kann in der Regel kein numerisches Wärmetransportmodell erstellt werden, und man ist auf Vereinfachungen angewiesen. Dennoch müssen zur Planung alle wichtigen Wärmetransportmechanismen im Grundwasser, d. h. Konduktion, Konvektion und Dispersion, berücksichtigt werden. Ziel dieser Arbeit ist die Abschätzung der maximalen Länge von Kältefahnen im Grundwasser durch den Einsatz von EWS. Dazu werden analytische Lösungen zum Wärmetransport im Grundwasser für den stationären Zustand herangezogen. Schwerpunkt ist die analytische Beschreibung für den zweidimensionalen (2D-) Fall ausgehend von einer vertikalen Linienquelle (EWS). Zum Vergleich wird auch der dreidimensionale (3D-) Fall diskutiert. Im Gegensatz zu vielen existierenden Arbeiten zum Wärmetransport im Grundwasser (z. B. Bear 1972, De Marsily 1986) werden sowohl die hydromechanische Dispersion als auch die Wärmeleitung im Grundwasser berücksichtigt (z. B. Hidalgo et al. 2009, Molina-Giraldo et al. 2010). Nachfolgend werden zuerst die analytischen Gleichungen vorgestellt und anschließend einige Beispielrechnungen zur Ausdehnung der Kältefahnen durchgeführt. Des Weiteren werden die Ergebnisse im rechtlichen Kontext diskutiert und im Vergleich zu den Resultaten aus den numerischen Modellierungen von Pannike (2005) und Pannike et al. (2006) betrachtet.

Temperaturausbreitung im Grundwasser

Die Grundlagen des Stoff- und Wärmetransports finden sich z. B. in Bear (1972), Häfner et al. (1992) und De Marsily (1986). Carslaw & Jaeger (1959) erläutern die mathematischen Grundlagen des Wärmetransports. Analytische Lösungen für den Wärmetransport im Grundwasser finden sich beispielsweise in Diao et al. (2004) und Hecht-Méndez et al. (2010).

Bei der Berechnung von Temperaturanomalien im Untergrund sind konduktiver und konvektiver Wärmetransport zu unterscheiden sowie stationäre und nichtstationäre Bedingungen. Wegen der ähnlichen Beschreibung von Stoff- und Wärmetransport können analytische Lösungen zum Transport von Schadstoffen (Fried et al. 1979, Domenico & Robbins 1985) auch für Wärmetransport verwendet werden.

Grundsätzlich wird in analytischen Ansätzen zwischen Punkt-, Linien- und Flächenquellen unterschieden. Dabei entsprechen die Linienquellen am ehesten den Erdwärmesonden. Ausgangspunkt unserer Betrachtung ist eine punktbzw. linienförmige Kälte- bzw. Wärmequelle im Aquifer. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

- das poröse Medium ist homogen,
- die physikalischen Eigenschaften sind temperaturunabhängig,
- die Temperatur ist über die komplette Länge der EWS konstant,
- es existiert eine gleichmäßige Hintergrundtemperatur im Grundwasser.

Für die Ausbreitung der Temperatur im Grundwasser gilt generell:

$$nc_w \frac{\partial T}{\partial t} = -v_a nc_w \frac{\partial T}{\partial x} + (\lambda_m + D_m nc_w) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho c_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$\Rightarrow (nc_w + \rho_b c_s) \frac{\partial T}{\partial t} = -v_a nc_w \frac{\partial T}{\partial x} + (\lambda_m + D_m nc_w) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) m$$

T , n , λ_m , c_w und c_s bezeichnen die Temperatur [°C bzw. K], die Porosität [-], die Wärmeleitfähigkeit [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$] des porösen Mediums sowie die volumetrische Wärmekapazität des Wassers [$\text{J m}^{-3}\text{K}^{-1}$] und die spezifische Wärmekapazität des Feststoffs [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]. Für die Trockenraumdicke ρ_b [kg m^{-3}] gilt: $\rho_b = \rho_s (1 - n)$, wobei ρ_s die Dichte des Feststoffes (Dichte des Minerals) ist. Parameter v_a steht für die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [m s^{-1}]. Der Term $\Delta T(nc_w + \rho_b c_s)$ bezeichnet den Energieinhalt des porösen Mediums [kJ m^{-3}] („Energie pro Volumen“) bei einer bestimmten Temperaturdifferenz (ΔT). D_m ist der hydromechanische Dispersionskoeffizient [m^2s^{-1}], der meist als Produkt der Abstandsgeschwindigkeit (v_a) und der Dispersivität (α) beschrieben wird. D_m kann für den longitudinalen oder transversalen Dispersionskoeffizienten stehen und mit der entsprechenden Dispersivität (α_l oder α_t) berechnet werden. Bei höheren Geschwindigkeiten kann D_m nichtlinear mit v_a zunehmen (Olsson & Grathwohl 2007). Gleichung 1 gilt analog auch für den Wärmetransport mit Sickerwasser in der ungesättigten Zone (Mortensen et al. 2006).

Unter stationären Bedingungen ($\partial T/\partial t = 0$) fallen die Speicherterme in Gleichung 1 weg:

$$0 = -v_a nc_w \frac{\partial T}{\partial x} + (\lambda_m + D_m nc_w) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

bzw.

$$0 = -v_a \frac{\partial T}{\partial x} + \left(\frac{\lambda_m}{nc_w} + D_m \right) \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Die Gleichungen 1–3 sind analog zu den gängigen Stofftransportgleichungen im Grundwasser. Im Folgenden werden rein stationäre Bedingungen und nur die transversale Dispersion betrachtet. Die Wärmeleitfähigkeit und die transversale Dispersion werden dabei zum transversalen Wärmedispersionskoeffizienten (D_t) [m^2s^{-1}] zusammengefasst:

$$D_t = \frac{\lambda_m}{c_w n} + \alpha_t v_a \quad (4)$$

D_t kann für den stationären Fall auch direkt aus der Wärmeleitungsgleichung, dem Fourierschen Gesetz (1822), abgeleitet werden:

$$F = -\lambda_m \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5)$$

F ist die Wärmestromdichte [$\text{J s}^{-1}\text{m}^{-2}$], $\Delta T/\Delta x$ bezeichnet den Temperaturgradienten [K m^{-1} bzw. $^\circ\text{C m}^{-1}$]. Der Wärmeleitfähigkeitswert λ_m beinhaltet sowohl die Wärmeleitung im Feststoff als auch im Porenraum. Für den zusätzlichen Wärmetransport durch Dispersion, d. h. im strömenden Grundwasser, gilt:

$$F = \alpha_t v_a \frac{nc_w \Delta T}{\Delta x} \quad (6)$$

Addiert man Gleichung 5 und 6, erhält man die gleiche Formulierung für die Koeffizienten der Wärmeleitung bzw. Dispersion wie in Gleichung 2 bzw. 4:

$$F = (\lambda_m + \alpha_t v_a n c_w) \frac{\Delta T}{\Delta x} = \left(\frac{\lambda_m}{nc_w} + \alpha_t v_a \right) \frac{nc_w \Delta T}{\Delta x} = D_t \frac{nc_w \Delta T}{\Delta x} \quad (7)$$

Unter instationären Bedingungen müssten die Wärmespeicherterme berücksichtigt werden. Der transversale Wärmedispersionskoeffizient $D_{t,a}$ lautet dann wie folgt:

$$D_{t,a} = \frac{\lambda_m + \alpha_t v_a n c_w}{nc_w + \rho_b c_s} = \frac{\frac{\lambda_m}{nc_w} + \alpha_t v_a}{1 + \frac{c_s \rho_b}{c_w n}} \quad (8)$$

wobei der Nenner im letzten Term den Retardationskoeffizienten (R) für den Wärmetransport darstellt ($R = 1 + (\rho_b c_s)/(nc_w)$).

2D und 3D analytische Lösungen

Analog zum Transport von Schadstoffen lassen sich die analytischen Gleichungen für die Berechnung der Länge von Temperaturfahnen für 2D- und 3D-Fälle formulieren. Für den 3D-Fall (ΔT in Abhängigkeit von den räumlichen Koordinaten x, y, z ; Abb. 2) lautet die analytische Lösung für Gleichung 2 bzw. 3 bei einer Punktquelle (analog zu Fried et al. 1979, Förstner & Grathwohl 2007):

$$\Delta T(x, y, z) = \frac{F_p}{v_a n c_w 4\pi D_t \frac{x}{v_a}} \exp\left(\frac{-(y^2 + z^2)}{4 D_t \frac{x}{v_a}}\right) \quad (9)$$

(ΔT) bezeichnet die Differenz zur Hintergrundtemperatur des Grundwassers in Kelvin oder °C an einem Punkt (x, y, z) . F_p ist die Entnahmeleistung [J s⁻¹ bzw. W] an einem Punkt x .

Bei einer linienförmigen Quelle vertikal zur Fließrichtung (2D-Fall) erfolgt die transversale Wärmeausbreitung nur in eine Raumrichtung (Abb. 3):

$$\Delta T(x, y) = \frac{F_L}{v_a n c_w \sqrt{4\pi D_t \frac{x}{v_a}}} \exp\left(\frac{-(y^2)}{4 D_t \frac{x}{v_a}}\right) \quad (10)$$

F_L ist hier die Entnahmeleistung pro Länge [J s⁻¹ m⁻¹ bzw. Wm⁻¹].

Interessiert nur die Temperaturentwicklung entlang der Achse der Fahne, d. h. für $y = 0$ und $z = 0$, dann fallen die Exponentialterme in den Gleichungen 9 und 10 weg. Im 3D-Fall ändert sich die Temperatur mit $1/x$ und im realistischeren 2D-Fall mit $1/\sqrt{x}$.

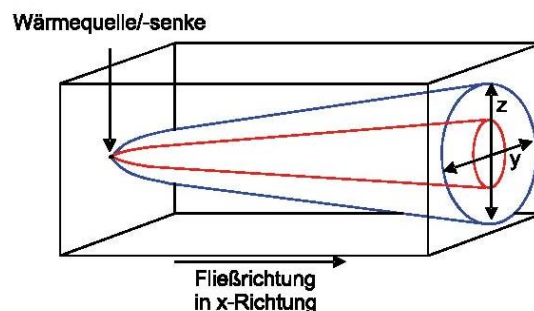


Abb. 2 Quell- und Fahngeometrie für eine Punktquelle; rote und blaue Kegel bezeichnen hohe bzw. kleinere Temperaturabweichungen vom Hintergrund.

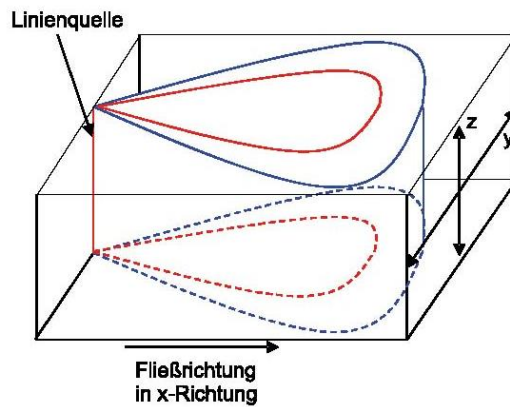


Abb. 3 Quell- und Fahnengeometrie für eine Linienquelle; rote und blaue Linien stellen eine höhere bzw. niedrigere Temperaturabweichung vom Hintergrund dar.

Liegt statt einer Punkt- und Linienquelle eine flächenhafte Quelle senkrecht zur Strömungsrichtung (y, z) vor (Abb. 4a), dann gilt für den Temperaturverlauf entlang der Fahnenachse im 3D-Fall:

$$\Delta T(x) = \Delta T_0 \operatorname{erf} \left(\frac{Y}{4 \sqrt{D_t \frac{x}{v_a}}} \right) \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{4 \sqrt{D_t \frac{x}{v_a}}} \right) \quad (11)$$

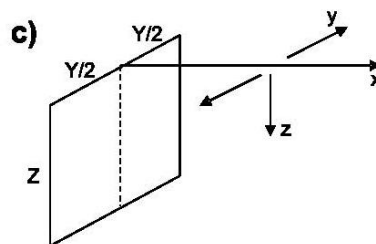
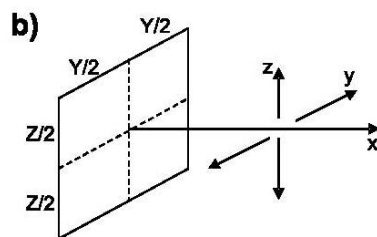
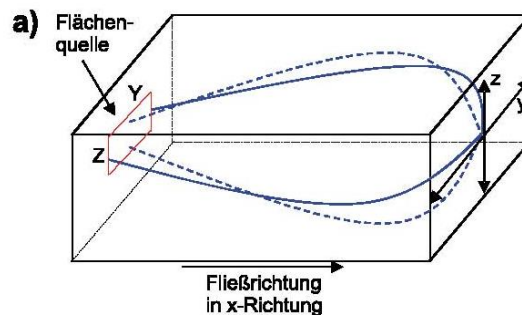


Abb. 4 (a) Quell- und Fahnengeometrie für eine Flächenquelle. Die gestrichelte und die durchgezogene Linie zeigen die vertikale (z) und horizontale (y) Ausdehnung der Temperaturabweichung vom Hintergrund an. **(b)** Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der Mitte der Flächenquelle. **(c)** Der Ursprung des Koordinatensystems liegt am Rand der Flächenquelle, die Wärmeausbreitung entlang y ist in zwei Richtungen, entlang z nur vertikal nach unten möglich.

Y und Z bezeichnen die Ausdehnung der Flächenquelle. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt hier in der Mitte der Flächenquelle (Abb. 4a, 4b). Die Wärmeausbreitung findet somit in der YZ -Ebene in jeweils zwei Richtungen ($\pm y$ und $\pm z$) statt. Wird der Ursprung an den Rand der Fläche verlegt, kann die Wärmeausbreitung in dieser Ebene nur noch in eine Richtung ($-y$) stattfinden (Abb. 4c). Es gilt dann für die vertikale Koordinate in Gleichung 11 nicht $z/4$ sondern $z/2$ (Domenico & Schwartz 1990). Die Entnahmelistung hängt somit mit der Temperaturdifferenz in der Quelle (ΔT_0) über die senkrecht zur Fließrichtung von der Quelle eingenommenen Fläche ($A = YZ$) und der Abstandsgeschwindigkeit wie folgt zusammen:

$$F_P = \Delta T_0 n v_a c_w A \quad (12)$$

Im 2D-Fall (quasi infinite vertikale Quelle mit Breite Y) gilt dann:

$$\Delta T(x) = \Delta T_0 \operatorname{erf} \left(\frac{Y}{4 \sqrt{D_t \frac{x}{v_a}}} \right) \quad (13)$$

In diesem Fall hängt die Entzugsleistung mit der Temperaturdifferenz in der Quelle (ΔT_0) und der Fließgeschwindigkeit wie in Gleichung 12 zusammen, wird aber pro Tiefe z angegeben:

$$F_L = \frac{F_P}{Z} = \Delta T_0 n v_a c_w Y \quad (14)$$

Dominiert die Querdispersion gegenüber der Wärmeleitung ($\alpha_t v_a \gg \lambda / (c_w n)$), dann ist entsprechend Gleichung 11 und 13 die Ausdehnung der Temperaturfahne unabhängig von der Fließgeschwindigkeit v_a .

Die transversale Ausbreitung der Temperatur in der abstromigen Fahne in eine Raumrichtung (y oder z ; hier durch r ersetzt) kann näherungsweise über das mittlere Verschiebungsquadrat abgeschätzt werden:

$$r^2 = 2 D_t \frac{x}{v_a} \quad (15)$$

oder bei Überwiegen der Querdispersion:

$$r^2 = 2 \alpha_t x \quad (16)$$

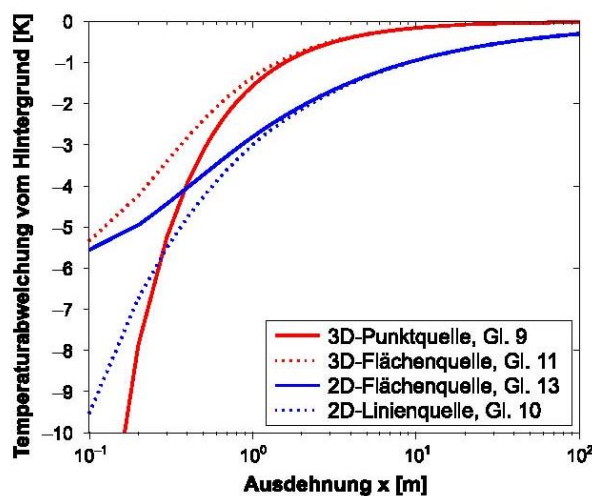


Abb. 5 Vergleich der analytischen Lösungen für 2D-(blau) und 3D-Fälle (rot) für Punkt- bzw. Linienquellen und Flächenquellen mit $v_a = 8,0 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ (ca. $0,7 \text{ mTag}^{-1}$), $n = 0,31$, $\alpha_t = 0,1 \text{ m}$, $\alpha_1 = 1 \text{ m}$, $\lambda = 2,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $F_P = 60 \text{ W}$ bzw. $F_L = 60 \text{ Wm}^{-1}$, $Y = Z = 1 \text{ m}$.

Zur Berechnung der Ausdehnung von Kältefahnen stehen also verschiedene analytische Lösungen zur Verfügung, die von der Quellgeometrie (Punkt-, Linien- oder Flächenquelle) abhängig sind. Für den folgenden Vergleich der analytischen Lösungen wurden mittlere Werte von Kies verwendet (Abb. 5). Die analytischen Lösungen für die Punkt- und Linienquellen zeigen im Vergleich zu den Flächenquellen größere Temperaturabweichungen im direkten Abstrom der Sonde; in einigem Abstand (hier bereits ab ungefähr 2 m) von der Sonde stimmen die Lösungen jeweils für den 2D und 3D-Fall aber sehr gut überein. Im 3D-Fall klingt die Temperaturanomalie schneller ab als im 2D-Fall, da hier eine weitere Raumrichtung für die Ausbreitung („Verdünnung“) der Wärme bzw. Kälte zur Verfügung steht. Der 2D-Fall (vertikale Linienquelle) kommt in der Realität einer Erdwärmesonde wohl am nächsten und kann deshalb für die Bestimmung der maximalen Ausdehnung der Kältefahne verwendet werden (Gl. 10 bzw. 18).

Ausbreitung von Kältefahnen

Wie Abbildung 5 zeigt, können zur Berechnung der Ausdehnung der Temperaturfahne bis zu einem Punkt x mit festgelegter absoluter Temperaturdifferenz (relativ zur Hintergrundtemperatur) $\Delta T(x)$ in Grundwasserfließrichtung ($y = z = 0$) einfache analytische Lösungen, d. h. Gleichungen 9 und 10, herangezogen werden:

$$3D: x = \frac{F_p}{v_a n c_w 4 \pi D_t \frac{\Delta T_x}{v_a}} \quad (17)$$

$$2D: x = \frac{F_L^2}{v_a n^2 c_w^2 4 \pi D_t \Delta T_x^2} \quad (18)$$

Überwiegt bei gegebener Entnahmelistung (F_0) die Wärmeleitung (λ) gegenüber der hydromechanischen bzw. thermischen Querdispersion (D_t), dann nimmt die Länge der Temperaturfahne im 2D-Fall mit zunehmender Fließgeschwindigkeit ab. Dominiert die hydromechanische Dispersion, was aber erst bei Fließgeschwindigkeiten über 1 m d^{-1} und verhältnismäßig großen Querdispersivitäten ($>10 \text{ cm}$) zu erwarten ist, dann reduziert sich die Ausdehnung der Temperaturfahne im 3D-Fall nach Gleichung 17 linear (hier nicht graphisch dargestellt) und im 2D-Fall quadratisch mit zunehmender Fließgeschwindigkeit (siehe Abb. 6). Dies hängt damit zusammen, dass bei höheren Fließgeschwindigkeiten die oberstromige Wärmezufuhr zur Sonde entsprechend größer ist und die Quervermischung mit zunehmender Fließgeschwindigkeit ebenfalls zunimmt.

Nach Gleichung 18 kann sehr einfach die Strecke berechnet werden, in der die beispielsweise an der Erdwärmesonde aufgetretene Temperaturabweichung in Fließrichtung bis auf eine bestimmte Temperaturdifferenz ($\Delta T(x)$) abgeklungen ist. Die wichtigsten Parameter sind die Entzugsleistung (F_0), die zwischen 10 W m^{-1} und 100 W m^{-1} variieren kann, und als technisch-rechtliches Kriterium die akzeptable Temperaturabweichung vom Hintergrund ($\Delta T(x)$). In der Schweiz werden dafür beispielsweise $\pm 3^\circ\text{C}$ akzeptiert (GSchV-CH 1998).

Eine Übersicht zu weiteren hydraulischen und thermischen Parametern für verschiedene poröse Medien bietet Tabelle 2. Exemplarisch werden jeweils Minimal- und Maximalwerte der gesteinspezifischen Porositäts- und Wärmeleitfähigkeiten angegeben. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes liegt bei ca. $2,1 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ($1,5\text{--}3,0 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ist abhängig von der Porosität, daher können die Wärmeleitfähigkeitswerte grundsätzlich auch über Mischungsgesetze bestimmt werden (z. B. Anderson 2005). Die hier angegebenen Werte sind jedoch der Literatur entnommen. Die mittlere Porosität beträgt 0,30 (0,13–0,49). Die transversale Dispersivität α_t , mit deutlich kleineren Werten als die longitudinale Dispersivität ist meist nur ein Bruchteil der mittleren Korngröße und liegt in Abhängigkeit der Abstandsgeschwindigkeit und des Beobachtungsmaßstabs zwischen 0,06 mm und 30 cm (z. B. Klénk & Grathwohl 2002, Maier & Grathwohl 2006, Olsson & Grathwohl 2007, Blum et al. 2008).

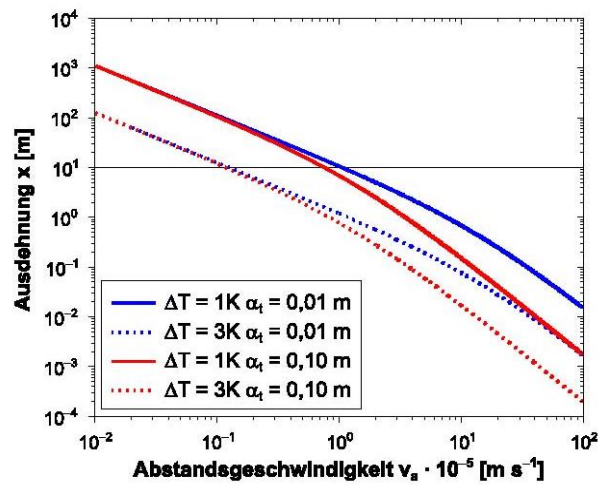


Abb. 6 Ausdehnungen der Kältefahnen nach Gl. 18 in Abhängigkeit von der transversalen Dispersivität und der Abstandsgeschwindigkeit mit $F_L = -60 \text{ Wm}^{-1}$; $n = 0,31$; $\lambda = 2,0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Tab. 2 Übersicht zu Abstandsgeschwindigkeiten, Porositäten und Wärmeleitfähigkeiten von Locker- und Festgesteinen. Die Abstandsgeschwindigkeiten wurden nach dem Gesetz von Darcy mit einem Gradienten von $1 \cdot 10^{-3}$ berechnet. Die min. und max. Werte hier spiegeln nur die Extremwerte wider. Die Mittelwerte wurden aus diesen und weiteren Werten berechnet.

Medium	Abstandsgeschwindigkeit v_a [m/s] *		Porosität n [-]		Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]		
	Mittelwert	min.	max.	Mittelwert	min.	max.	Mittelwert
Kies	$8,0 \times 10^{-6}$ a,c,h	0,24 c	0,38 c	0,31	1,8 i	1,8 i	1,8
Sand	$1,5 \times 10^{-6}$ a,c,e,f,i	0,25 d	0,53 c	0,38	1,7 i	5,0 i	2,5
Schluff	$1,0 \times 10^{-7}$ a,c,d,f,i	0,34 c	0,61 c	0,45	0,9 i	2,4 k	1,6
Ton	$1,0 \times 10^{-10}$ a,c,f,i	0,34 c	0,70 d	0,49	0,9 i	2,3 i	1,5
Sandstein	$5,9 \times 10^{-7}$ b,c,d,e,g	0,05 d	0,30 d	0,15	1,3 e	4,3 b	2,5
Kalkstein	$7,5 \times 10^{-8}$ b,c,d,e	0,005 e	0,40 c	0,13	1,4 m	4,1 m	3,0
Tonstein	$5,5 \times 10^{-13}$ e,k	0,005 e	0,40 e	0,14	1,5 m	2,2 m	1,9
Kristallin	$4,3 \times 10^{-8}$ b,c,d	0 d	0,025 c	0,01	1,9 i	4,1 i	2,8

* berechnet über k_t -Mittelwerte aus: ^aBalke (2000); ^bDe Marsily (1986); ^cDomenico & Schwartz (1990); ^dFreeze & Cherry (1979); ^eHäfner (1992); ^fHöling (1996); ^gLGRB (2007); ^hSchulze (2004); ⁱVDI 4640, Blatt 1 (2000); ^kPannike (2005); ^mAfU (2005)

Tab. 3 Mittlere Abstandsgeschwindigkeiten in porösen Medien sowie die daraus berechnete Transportstrecke (nach Gl. 21) nach 100 Tagen (Stationaritätskriterium).

Poröses Medium	Abstandsgeschwindigkeit v_a [m/d] *	Wegstrecke nach 100 Tagen [m]
Kies	0,7 a,c,h	69,1
Sand	0,1 a,c,e,f,i	13,3
Schluff	0,009 a,c,d,f,i	0,9
Sandstein	0,05 b,c,d,e,g	5,1
Kalkstein	0,007 b,c,d,e	0,7
Kristallin	0,004 b,c,d	0,4
Lockergestein (Mittelwert)	0,2	20,8
Festgestein (Mittelwert)	0,05	4,8

* berechnet über k_t -Mittelwerte aus: ^aBalke (2000); ^bDe Marsily (1986); ^cDomenico & Schwartz (1990); ^dFreeze & Cherry (1979); ^eHäfner (1992); ^fHöling (1996); ^gLGRB (2007); ^hSchulze (2004); ⁱVDI 4640, Blatt 1 (2000)

Die bisher aufgeführten Gleichungen gelten nur für den stationären Zustand, der sich mit abnehmender Fließgeschwindigkeit und zunehmender Retardation der Temperatur immer langsamer einstellt. Tatsächlich würde nach Gleichung 18 mit abnehmender Fließgeschwindigkeit eine zunehmend lange Temperaturfahne entstehen, die aber entsprechend lange brauchen würde, bis sie sich ausgebildet hat (bei stagnierendem Wasser würde sich eine Temperaturanomale immer weiter ausbreiten). Der zur Abschätzung der Geschwindigkeit einer Temperaturfront nötige Retardationsfaktor R [-] ergibt sich aus der Gesamtwärmekapazität des porösen Mediums und der Wärmekapazität des mobilen Wassers ($4.185 \text{ kJ m}^{-3}\text{K}^{-1}$):

$$R = \frac{n c_w + \rho_b c_s}{n c_w} = 1 + \frac{\rho_b c_s}{n c_w} \quad (19)$$

Bei einer Porosität von 0,33, der Feststoffdichte und Wärmekapazität von 2.650 kg m^{-3} bzw. $800 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ von Quarz ergibt sich ein Retardationsfaktor von rund 2, was auch durch Literaturwerte bestätigt wird (Andrews & Anderson 1979, Molson et al. 1992, Røsshaug et al. 2008). Die nach einer bestimmten Zeit erreichte Transportstrecke x bei Beachtung der Retardation R ist daher:

$$x = \frac{v_a t}{R} \quad (20)$$

Überschlägig kann man somit davon ausgehen, dass bei einer Fließgeschwindigkeit von 1 m d^{-1} innerhalb einer Heizperiode von 100 Tagen eine Kältefahne stationär würde und eine Länge von 50 m erreicht. In Tabelle 3 sind zusammenfassend für mittlere Abstandsgeschwindigkeiten und einem hydraulischen Gradienten von $i = 1 \cdot 10^{-3}$ die maximalen Ausdehnungen (zurückgelegte Strecke des Grundwassers) innerhalb des betrachteten Zeitraums von 100 Tagen dargestellt. Diese jedoch wurden konservativ (ohne Retardation) mit

$$x = v_a t \quad (21)$$

berechnet. In Deutschland werden meist 10 m als Mindestabstand zwischen zwei geothermischen Anlagen auf nebeneinander liegenden Grundstücken empfohlen (vgl. Tab. 1). Basierend auf den Entzugsleistungen aus der VDI 4640 können nach Gleichung 18 diese 10 m innerhalb einer Heizperiode von 100 Tagen bei den meisten Gesteinseinheiten (Einheit aus Feststoff und Porenraum), wie beispielsweise bei Ton, Schluff und Sandstein eingehalten werden (siehe Parameterübersicht in Tab. 2). Allerdings ist eine solche Ausdehnung noch nicht stationär und erweitert sich bei dominant-konduktiven Bedingungen in den nächsten Heizperioden.

Die Längen der innerhalb einer Betriebsphase von 100 Tagen stationär werdenden Kältefahnen in kiesigen und sandigen Grundwasserleitern sind in Abbildung 7 dargestellt. Dabei wurden die Kältefahnen mit $k_f = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ (Kies) und $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ (Sand); $n_e = 0,22$ bzw. $0,16$; $i = 1,0 \cdot 10^{-3}$ und weiteren Werten entsprechend Tabelle 2 berechnet. Die horizontale blaue Linie kennzeichnet den häufig verwendeten 10 m-Mindestabstand (Abb. 7). Die Linie für Sand endet bei der innerhalb einer Heizperiode von 100 Tagen möglichen Transportstrecke nach Gleichung 21 bei 13 m und überschreitet somit die 10 m. Diese Ausdehnung wird bereits mit einer Entzugsleistung von 35 W m^{-1} erreicht. Die Kältefahne in Kies überschreitet ebenfalls den 10 m-Mindestabstand, kann aber dafür stationär werden und erreicht im gewählten Modellszenario bei $F_0 = 100 \text{ W m}^{-1}$ eine Länge von 33,1 m.

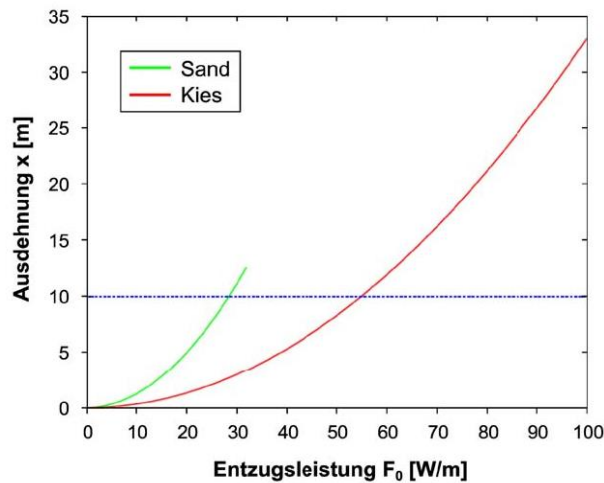


Abb. 7 Ausdehnungen der Kältefahnen in Kies und Sand nach Gleichung 18 bei einer Abkühlung von $\Delta T(x) = 1,0$ °C. Die horizontale blaue Linie kennzeichnet den von den Behörden empfohlenen bzw. einzuhaltenden 10 m-Mindestabstand. Die Linie für Sand endet bei der innerhalb einer Heizperiode von 100 Tagen maximal möglichen Ausdehnung von 13 m.

Betrachtet man die in verschiedenen Regelwerken empfohlenen Sondenabstände, die im Schnitt bei 5 m liegen, ergibt sich ein ähnliches Bild. In Einzelfällen werden 6 m als Mindestabstand zur nächsten EWS empfohlen. Die Kältefahne in Sand wird bei einer Entzugsleistung ab 20 W m^{-1} (22 Wm^{-1}) länger als 5 m (6 m), die Kältefahne in Kies erreicht diese Länge ab 39 W m^{-1} (43 Wm^{-1}). In der VDI 4640, Blatt 2 werden als mögliche Entzugsleistungen für 2.400 Betriebsstunden bei wasserführendem Sand und Kies $55 - 65 \text{ Wm}^{-1}$, für Einzelanlagen mit starkem Grundwasserfluss $80 - 100 \text{ W m}^{-1}$ genannt, d. h. die Kältefahnen im Kies sind bei diesen Entzugsleistungen länger als 10 m.

Hier ist jedoch anzumerken, dass die Berechnung der Länge von einer konstanten Entzugsleistung über einen Zeitraum von 100 Tagen ausgeht, was den EWS-Betrieb in der Praxis nur bedingt simuliert, da die Entzugsleistung täglich variiert.

Ergebnisse und Diskussion

Die thermische Nutzung des Untergrundes durch Erdwärmesonden (EWS) führt zu Temperaturanomalien (Wärme- oder Kältefahnen) im Untergrund. Deren Ausdehnung muss bekannt sein, um ihren Einfluss auf benachbarte geothermische Anlagen sowie die Ökosysteme des Untergrundes, insbesondere des Grundwassers interpretieren zu können (z. B. Schippers & Reichling 2006, Brielmann et al. 2009). Die Länge einer Kältefahne wird u. a. von thermischen und hydraulischen Materialparametern bestimmt und variiert daher unter sonst gleichen Bedingungen je nach hydro- und geologischer Einheit. Der Einfluss unterschiedlicher hydraulischer Gradienten sowie der hydraulischen als auch thermischen Dispersion könnte je nach Einzelfall vertieft werden. Zum Einfluss des hydraulischen Gradienten bestehen bisher jedoch nur wenig grundlegende Untersuchungen (z. B. Bayer & Finkel 2006). Der Einfluss der thermischen Dispersion auf die Länge der Kältefahnen wird in Molina-Giraldo et al. (2010) mithilfe von analytischen Lösungen und in Hidalgo et al. (2009) anhand von numerischen Simulationen ausführlich diskutiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Grundwasserströmung in Sanden und Kiesen eine wichtige Rolle beim Wärmetransport spielt und nicht vernachlässigt werden kann. Der vorgestellte einfache analytische Ansatz (Gl. 18) kann für die Abschätzung der maximalen Länge von Kältefahnen im Grundwasser im stationären Zustand eingesetzt werden. Bei den typischen Entzugsleistungen nach VDI 4640 werden Kältefahnen im Kies innerhalb der hier angenommenen Heizperiode von 100 Tagen stationär und deutlich länger als die in den Leitfäden häufig empfohlenen 10 m. Die Grenzempfehlung von 10 m wird von Kältefahnen in Kiesen bereits bei einer Entzugsleistung von 55 W m^{-1} , sowie einem hydraulischen Gradienten von $1 \cdot 10^{-3}$ überschritten. Über die Sommerperiode kann sich jedoch die im Winter entstandene Temperaturanomalie aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten wieder vollständig regenerieren. Bisherige Modellierungen mit

geringdurchlässigen Grundwasserleitern haben gezeigt, dass bei dominant-konduktiven Bedingungen ein kontinuierlicher Abkühlungstrend besteht, bei dem eine vollständige Regenerierung über die Sommermonate nicht stattfindet (Hähnlein et al. 2009). Dabei wurden verschiedene Szenarien angenommen. Mit geringerem Grenz- und Sondenabstand (2×3 m) besteht eine dauerhaft stärkere Abkühlung als bei größerem Abstand (2×5 m). Dies bedeutet, die Kältefahnen im Kies werden zwar innerhalb einer Heizperiode länger als die Kältefahnen in Gesteinen mit geringerer Durchlässigkeit, können sich jedoch auch schneller regenerieren.

Pannike et al. (2006) kommen zu dem Ergebnis, dass die Kältefahnen mit einer akzeptierten Abweichung der Temperatur von der ungestörten Untergrundtemperatur von $1,0$ °C bereits in Mittelsand ihre maximale Länge nach der ersten Betriebsphase erreichen. Dabei erlangen sie beispielsweise bei einer Wärmeleistung von $4,5$ kW über 1.800 h und zusätzlicher Kälteleistung von 2 kW in 500 h mit $v_a = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ eine Länge von ca. 4 m. Wird die Anlage zusätzlich noch zur Bereitstellung von Warmwasser im Sommer und Winter genutzt, werden die Kältefahnen über 5 m lang. Definiert man Kältefahnen über eine Temperaturabweichung von nur $0,1$ °C, dann erreichen sie eine Länge von über 100 m und benötigen ungefähr 10 Jahre, um stationär zu werden. Die Länge der stationären Fahne nimmt mit zunehmender Fließgeschwindigkeit ab (Gl. 18). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Modellierungen von Pannike et al. (2006) für einen längeren Zeitraum (30 Jahre) durchgeführt wurden. Die Kältefahnen haben hier also bereits die Stationarität erreicht.

Die Ergebnisse von Pannike et al. (2006) bestätigen, dass mit steigender Fließgeschwindigkeit der konvektive Wärmetransport gegenüber dem konduktiven zunehmend dominiert. Bezüglich der Abstände zu benachbarten Grundstücken kommen sie zu dem Ergebnis, dass bei einer akzeptierten Abkühlung von $< 1,0$ °C, sowie einem Wärmebedarf von $4,5$ kW bei einem Untergrund aus Mittel- bis Grobsand, der Grenzabstand von 5 m ausreicht. Für geringere Durchlässigkeiten werden dagegen größere Abstände nötig. Der Sondenabstand zwischen zwei EWS parallel zum Grundwasserfluss sollte nach Pannike et al. (2006) bei feinsandigem Untergrund zwischen 6 m und 10 m liegen. Bei einer Wärmeleistung von 3 kW sind bei Ton und Schluff Grenzabstände von 8 m und bei Fein-, Mittel- und Grobsand 5 m bis 20 cm erforderlich.

Die Ergebnisse der analytischen und numerischen Modelle zeigen, dass pauschale Empfehlungen für Mindestabstände den unterschiedlichen Untergrundbedingungen und der jeweiligen geothermischen Nutzung teilweise nicht gerecht werden. Einfache analytische Lösungen (Gl. 18) erlauben jedoch, den Untergrundverhältnissen bedingt gerecht zu werden und können an einzelnen Standorten zur schnellen Abschätzung von Fahnenlängen herangezogen werden. Sie berücksichtigen neben der Konvektion und Konduktion auch den dispersiven Wärmetransport. Grundsätzlich lässt sich zusammenfassen, dass bei einem Untergrund mit höherem Grundwasserfluss die Kältefahnen über längere Zeiträume kürzer sind und sich schneller regenerieren als bei geringeren Durchlässigkeiten, wie beispielsweise bei Ton, Sand- oder Kalkstein. Für die Genehmigungspraxis heißt das, dass bei gut durchlässigen Grundwasserleitern die vorhandenen Abstandsempfehlungen kurzfristig (1 Heizperiode) ausreichen. In gering durchlässigem Untergrund können sich Kältefahnen darüber hinaus über längere Zeiträume (Jahrzehnte) deutlich weiter ausdehnen. Geht man von einer erlaubten Abweichung von der Hintergrundtemperatur von $1,0$ °C aus, würden dann bei Kleinanlagen in stark durchlässigen Kiesen mit den möglichen Entzugsleistungen nach VDI 4640 die 10 m für eine Heizperiode nicht ausreichen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die Kältefahnen aus dem Winter vollständig im Sommerhalbjahr regenerieren. Für eine nachhaltige geothermische Nutzung bedeuten diese Ergebnisse, dass in Lockergesteinen (hier Kies und Sand) gegenüber Festgesteinen langfristig kürzere Kältefahnen auftreten, die sich auch schneller regenerieren können. Diese Aspekte sollten in der Praxis bei den Genehmigungsbehörden und bei Planungen von Siedlungsstrukturen berücksichtigt werden. Wenn der Untergrund kontrolliert als Energieressource genutzt wird, dann können EWS in der Gebäudeklimatisierung weiter erheblich an Bedeutung gewinnen.

Danksagung Für die finanzielle Unterstützung bedanken sich Stefanie Hähnlein bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU, Promotionsstipendienprogramm), Nelson Molina-Giraldo beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, IPSWaT-Programm) sowie Peter Bayer bei der Landesstiftung Baden-Württemberg (Eliteförderung für Postdoktoranden).

Literatur

- AfU: Nutzung der Geothermie in Stuttgart. Schriftenreihe des Amt für Umweltschutz 1/2005, 89 S. (2005)
- Anderson, M.: Heat as a ground water tracer. *Ground Water* 43(6), 951–968 (2005)
- Andrews, C.B., Anderson, M.P.: Thermal alteration of groundwater caused by seepage from a cooling lake. *Water Resour. Res.* 15, 595–602 (1979)
- Balke, K.D., Beims, U., Heers, F.W., Hölting, B., Homrighausen, R., Matthess, G.: Grundwassererschließung, Grundlagen – Brunnenbau – Grundwasserschutz – Wasserrecht, 740 S. Gebrüder Borntraeger, Berlin/Stuttgart (2000)
- Bartels, J., Cheng, L.Z., Chiang, W.-H., Clauser, C., Hurter, S.J., Kühn, M., Meyn, V., Pape, H., Pribnow, D.F.C., Ranalli, G., Schneider, W., Stöfen, H.: Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers, 332 S. Springer, Berlin/Heidelberg (2003)
- Bayer, P., Finkel, M.: Conventional and combined pump-and-treat systems under nonuniform background flow. *Ground Water* 40, 234–243 (2006)
- Bear, J.: Dynamics of Fluids in Porous Media, 784 S. Dover, New York (1972)
- Blum, P., Maier, U., Melzer, R., Grathwohl, P.: Bestimmung der transversalen Dispersion im Labor und im Feld. FH-DGG Tagung, Göttingen (2008)
- Blum, P., Campillo, G., Münch, W., Kölbl, T.: CO₂ savings of ground source heat pump systems – a regional analysis. *Renew. Energy* 35, 122–127 (2010)
- BMU: Entwicklung der erneuerbaren Energien im Jahr 2006 in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007a)
- Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lüders, T.: Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiol. Ecol.* 68(3), 273–286 (2009)
- BWP: Absatzzahlen von Heizungswärmepumpen in Deutschland von 2003 bis 2008. Bundesverband WärmePumpe (BWP) e. V., Berlin (2009)
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C.: Conduction of Heat in Solids, 510 S. Clarendon, Oxford (1959)
- De Marsily, G.: Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrogeology for Engineers, 440 S. Academic Press, London (1986)
- Diao, N., Li, Q., Fang, Z.: Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *Int. J. Thermal Sci.* 43, 1203–1211 (2004)
- Domenico, P.A., Robbins, G.A.: A new method of contaminant plume analysis. *Ground Water* 23, 476–485 (1985)
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W.: Physical and Chemical Hydrogeology, 824 S. Wiley, New York (1990)
- Freeze, R.A., Cherry, J.A.: Groundwater, 604 S. Prentice-Hall, New Jersey (1979)
- Fried, J.J., Muntzer, P., Zilliox, L.: Ground-water pollution by transfer of oil hydrocarbons. *Ground Water* 17, 586–594 (1979)
- Förstner, U., Grathwohl, P.: Ingenieurgeochemie: Technische Geochemie – Konzepte und Praxis, 471 S. Springer, Berlin/Heidelberg (2007)
- GSchV-CH: Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998; Schweizer Bundesrat (1998)
- GtV: Schriftliche Mitteilung der Geothermische Vereinigung – Bundesverband Geothermie e.V. (2008) vom 3. April 2008
- Häfner, F., Sames, D., Voigt, H.D.: Wärme- und Stofftransport: Mathematische Methoden, 626 S. Springer, Berlin/Heidelberg (1992)
- Hähnlein, S., Bayer, P., Blum, P., Kübert, M., Walker-Hertkorn, S.: Rechtliche Rahmenbedingungen bei der thermischen Grundwasserbewirtschaftung. Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Geothermie, 14–20 (2009)
- Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P.: Verifying the solute transport model MT3DMS for heat transport simulation of closed shallow geothermal systems. *Ground water* (im Druck)
- Hidalgo, J.J., Carrera, J., Dentz, M.: Steady state heat transport in 3D heterogeneous porous media. *Adv. Water Resour.* 32(8), 1206–1212 (2009)

- Höltling, B.: *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*, 441 S. Enke, Stuttgart (1996)
- Klenk, I.D., Grathwohl, P.: Transverse vertical dispersion in groundwater and the capillary fringe. *J. Cont. Hydrol.* 58, 111–128 (2002)
- LFB: Erdwärmennutzung in Berlin – Leitfaden für Erdwärmesonden und Erdwärmekollektoren mit einer Heizleistung bis 30 kW außerhalb von Wasserschutzgebieten, 11 S. Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Berlin (2007)
- LFBAY: Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, 19 S. Verkehr und Technologie (2003)
- LFBW: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 26 S. Umweltministerium Baden-Württemberg (2005)
- LFH: Erdwärmennutzung in Hessen – Leitfaden für Erdwärmepumpen (Erdwärmesonden) mit einer Heizleistung bis 30 kW. Hessisches Landesamt für Geologie (2006)
- LFHH: Leitfaden zur Erdwärmennutzung in Hamburg, 43 S. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg (2009)
- LFN: Leitfaden Erdwärmennutzung in Niedersachsen, 20 S. Niedersächsisches Umweltministerium (2006)
- LFMVP: Leitfaden Erdwärmesonden in Mecklenburg-Vorpommern, 24 S. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2006)
- LFNRW: Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme, 34 S. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2004)
- LFRP: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 22 S. Ministerium für Umwelt Rheinland-Pfalz (2006)
- LFS: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, 32 S. Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen (2007)
- LFSA: Geologischer Leitfaden für die oberflächennahe Erdwärmennutzung in Sachsen-Anhalt. Karte; Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (2005)
- LFSH: Leitfaden für oberflächennahe Erdwärmeeinrichtungen, 42 S. Landesamt für Natur und Umwelt, Schleswig-Holstein (2006)
- LFSL: Leitfaden Erdwärmennutzung, 20 S. Ministerium für Umwelt Saarland (2008)
- LFT: Nutzung oberflächennaher Geothermie – Vorläufige Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung angezeigter Vorhaben; Thüringer Landesverwaltungsamt (2007)
- LGRB: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. Schriftliche Mitteilung (2007)
- LGRBBB: Pers. Kom. des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (2008)
- Maier, U., Grathwohl, P.: Numerical experiments and field results on the size of steady state plumes. *J. Contam. Hydrol.* 85, 33–52 (2006)
- Mahabadi, O.K.: Geothermal simulation for the city of Berlin, 76 S. *EuroAquae*, Cottbus (2006)
- Molina-Giraldo, N., Bayer, P., Blum, P.: Evaluating the influence of mechanical thermal dispersion on temperature plumes for closed geothermal systems using analytical solutions. *Int. J. Heat Mass Trans.* (in Vorbereitung)
- Molina-Giraldo, N., Bayer, P., Blum, P.: Analytical modeling study on the role of dispersivity in heat plumes. *Int. J. Heat Mass Trans.* (2010) (in Vorbereitung)
- Molson, J.W., Frind, E.O., Palmer, C.D.: Thermal energy storage in an unconfined aquifer, 2. Model development, validation and application. *Water Resour. Res.* 28, 2857–2867 (1992)
- Mortensen, A.P., Hopmans, J.W., Mori, Y., Simunek, J.: Multifunctional heat pulse probe measurements of coupled vadose zone flow and transport. *Adv. Water Resour.* 29, 250–267 (2006)
- Olsson, Å.H., Grathwohl, P.: Transverse dispersion of non-reactive tracers in porous media: a new nonlinear relationship to predict dispersion coefficients. *J. Contam. Hydrol.* 92, 149–161 (2007)
- Pahud, D., Kohl, T., Mégel, T., Brenni, R.: Langzeiteffekte von Mehrfach-Erdwärmesonden, Publikation 220005 im Projekt 39690, 58 S. Bundesamt für Energie, Schweiz (2002)

Pannike, S.: Ausbreitung von Kältefahnen oberflächennaher Erdwärmesonden in Lockergestein, 48 S. Diplomarbeit, Universität Bremen (2005)

Pannike, S., Kölling, M., Panteleit, B., Reichling, J., Scheps, V., Schulz, H.D.: Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten. *Grundwasser* 11(1), 6–18 (2006)

Rühaak, W., Rath, V., Wolf, A., Clauser, C.: 3D finite volume groundwater and heat transport modeling with non-orthogonal grids, using a coordinate transformation method. *Adv. Water Resour.* 31, 513–524 (2008)

Schippers, A., Reichling, J.: Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. *Grundwasser* 11(1), 40–45 (2006)

Schulze, S.: Mikrobieller Abbau und Redoxzonierung im Abstrom einer teerölkontaminierten Altablagung, 101 S. Dissertation, Technische Universität Dresden (2004)

VDI 4640-1: VDI 4640 Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrundes: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, 31 S. Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf (2000)

VDI 4640-2: VDI 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, 23 S. Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf (2001)

Walker-Hertkorn, S., Kübert, M., Hähnlein, S., Bayer, P., Blum, P.: Rechtliche Situation bei der thermischen Grundwassernutzung in Deutschland. *Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau* 10, 46–51 (2008)

3 International legal status of the use of shallow geothermal energy

International legal status of the use of shallow geothermal energy
Hähnlein, S., Bayer, P., Blum, P. (2010)
Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 2611-2625.



Contents lists available at ScienceDirect

Renewable and Sustainable Energy Reviews

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rser

International legal status of the use of shallow geothermal energy

Stefanie Haehnlein ^{a,*}, Peter Bayer ^b, Philipp Blum ^c^a University of Tübingen, Center for Applied Geoscience (ZAG), Sigwartstrasse 10, 72076 Tübingen, Germany^b ETH Zürich, Engineering Geology, Sonneggstrasse 5, 8092 Zürich, Switzerland^c Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Applied Geosciences (AGW), Kaiserstrasse 12, 76131 Karlsruhe, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 July 2010

Accepted 21 July 2010

Keywords:

Geothermal energy

Renewable energy

International legislation

Ground source heat pump (GSHP) systems

Borehole heat exchanger (BHE)

ABSTRACT

Shallow geothermal energy (<400 m depth) is used in many countries worldwide, with a rising number of installations over the last decades. The use of ground source heat pump (GSHP) and groundwater heat pump (GWHP) systems results in local temperature anomalies (cold or heat plumes). Since groundwater is used in many countries as source for drinking water a balance between its use and protection has to be found. Therefore, to avoid detrimental environmental impacts it is necessary to define groundwater temperature limits for heating and cooling and minimum distances between such geothermal systems. The aim of the present study is to provide a comprehensive overview of the current international legal status for the use of shallow geothermal energy. Therefore, an international survey was performed using a questionnaire, which was sent to more than 60 countries worldwide. The questionnaire requested information on the corresponding national legislation, temperature limits and minimum distances for GSHP and GWHP systems. The answers to the inquiry showed an extremely heterogeneous outcome. Until now national and legally binding regulations only exist in few countries such as Denmark or Sweden. However, all existing regulations show a wide range for minimum distances (5–300 m) and temperature limits for groundwater. The highest inconsistency was observed for the acceptable temperature change with 3 K in Switzerland to 11 K in France. However, most countries have no legally binding regulations or even guidelines, which highlight the urgent need for further research on the environmental impact and legal management of shallow geothermal installations.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Contents

1. Introduction	2612
2. Regulation criteria	2613
2.1. Background	2613
2.2. Types of criteria	2613
3. Country overview	2615
3.1. Australia	2615
3.2. Austria	2616
3.3. Belgium	2616
3.4. Bosnia and Herzegovina	2616
3.5. Bulgaria	2616
3.6. Canada	2617
3.7. China	2617
3.8. Costa Rica	2618
3.9. Czech Republic	2618
3.10. Denmark	2618
3.11. Ecuador	2618
3.12. El Salvador	2618
3.13. Finland	2619

* Corresponding author. Tel.: +49 7071 2973185; fax: +49 7071 5059.
E-mail address: stefanie.haehnlein@uni-tuebingen.de (S. Haehnlein).

3.14. France	2619
3.15. Germany	2619
3.16. Great Britain	2619
3.17. Greece	2619
3.18. Hungary	2619
3.19. Iceland	2619
3.20. Indonesia	2620
3.21. Ireland	2620
3.22. Japan	2620
3.23. Korea	2620
3.24. Liechtenstein	2620
3.25. Lithuania	2620
3.26. Mexico	2620
3.27. Netherlands	2620
3.28. New Zealand	2620
3.29. Norway	2620
3.30. Philippines	2621
3.31. Poland	2621
3.32. Portugal	2621
3.33. Romania	2621
3.34. Slovakia	2621
3.35. Slovenia	2621
3.36. Switzerland	2621
3.37. Sweden	2621
3.38. USA	2622
3.39. Vietnam	2622
4. Discussion and conclusions	2622
Acknowledgements	2623
References	2623

1. Introduction

Energy safety, energy independence and the reduction of greenhouse gas emissions are imperative issues in current and future politics. Many countries support the development of renewable energy technologies such as geothermal energy. While deep geothermal applications (about >400 m depth) are specific and of large size, shallow systems (<400 m depth) require no extraordinary geological settings or high geothermal gradients. They are based on simple, established technological principles and therefore great in numbers and popular worldwide. Especially for domestic cooling and heating, the use of shallow geothermal energy is considered an environmental friendly alternative to traditional heating techniques such as oil or gas fired boilers [1,2]. The major technological variants are ground source heat pump (GSHP) and groundwater heat pump (GWHP) systems (Fig. 1).

GSHP systems are closed systems with a vertical borehole heat exchanger (BHE) or, less common, with a horizontal heat exchanger [3]. A heat carrier fluid is circulated within the buried closed tube system to transport heat stored in the subsurface to the aboveground heating system of a building. By using heat pumps, hot water can be generated while lowering the heat carrier fluid temperatures only by a few degrees. During warm seasons and for

release of waste heat in general, the fluid can also be used in reversed mode to convey heat to the ground. In comparison to the well manageable GSHP systems, GWHP systems are less frequently used. They are open systems, with circulated (ground)water between two or more wells. Though attractive because of the efficient direct use of groundwater, GWHP systems are more demanding due to the permanent maintenance of wells, induced hydraulic effects and hydrogeological requirements [4].

Many synonyms for GSHP systems are used such as closed loop systems and ground coupled heat pump systems. Equivalently, GWHP systems are also called open systems or open loop systems [5–11]. Aquifer thermal energy storage (ATES) and borehole thermal energy storage (BTES) systems are sub-groups of underground thermal energy storage (UTES) systems. The idea is to store the heat or cold when it is available and exploit it when it is needed. The technology of ATES (BTES) is the same as for GWHP (GSHP) systems. The difference is that for ATES and BTES larger systems with multiple boreholes or wells are normally installed [12]. For the sake of clarity, in the rest of the paper we only distinguish between closed and open, i.e. GSHP and GWHP systems.

The number of shallow geothermal installations has been continually increasing over the last decades with a peak in 2006 [1,5,6,9,13–17]. In 2004 the number of installed GSHP systems worldwide was roughly estimated at 1.1 million [17]. Such a number and expected proliferation in the future substantiates the need for a concerted regulative framework. This is particularly crucial, as shallow geothermal systems once installed, are operated for decades. Precautionary principles would require complying with well-defined sustainability standards while minimizing associated adverse environmental impacts [18]. From a more technical perspective, focus would be set on robustness and energy-efficiency. Appropriate directives can guide and also control, since an increase in popularity means also increase in competition, especially in urban areas [19] and for the use of productive aquifers in general. However, if implemented at all, we and others observe that existing regulations in different countries or states are very heterogeneous

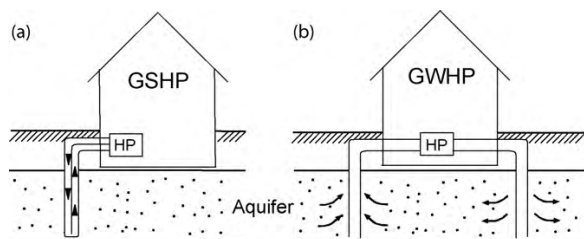


Fig. 1. (a) Ground source heat pump (GSHP) system and (b) groundwater heat pump (GWHP) system, both with a heat pump (HP).

[20–22]. Often the underlying scientific, technological or practical basis is not apparent and empirical motives seem to be followed. This study provides an insight into the variability of current international regulations and directives, and is meant as stimulus to attain convergence between the different frameworks that are reported for each country. For this a customized questionnaire was answered by experts from 46 countries. The persons asked are representatives from industry, academics and public authorities and listed in the acknowledgements.

2. Regulation criteria

2.1. Background

The use of shallow geothermal energy results in local temperature anomalies (cold or heat plumes) in the subsurface [23–28]. It is well known that changes in groundwater temperature can influence its physical properties, chemical reactions, microbiology and the interaction of these factors with each other [29–39]. This is important, especially because groundwater provides globally 50% of the drinking water [40,41]. Further, aquifers represent sluggish environments, with slow turn-over rates and long memory. Therefore long-term effects of shallow geothermal systems have to be carefully considered to find a balance between groundwater usage by shallow geothermal energy and groundwater protection. As technical rules, some countries, such as Sweden, Germany or Denmark, defined minimum distances between the installed GSHP systems and another point of reference such as property line or next GSHP system [24,25,42]. As ecological criteria threshold values for temperature changes in groundwater are defined for example in Liechtenstein or Austria [43,44].

Environmental, sustainability-based and/or technico-economic criteria have been proposed by various researchers and practitioners. However, embedding of appropriate criteria to control geothermal groundwater use in national and international legislation is still at an initial state. For example, in 2000 the European Union (EU) Water Framework Directive (WFD) defined the release of heat into the groundwater as pollution [45]. However, the cooling of groundwater is not especially mentioned. For the environment policy the WFD describes currently the following aim: to “ensure the progressive reduction of pollution of groundwater and prevent its further pollution”. The additional European Groundwater Directive (GWD) “establishes specific measures [...] in order to prevent and control groundwater pollution” [46]. Some of the national legislations have more far-reaching definitions. For example, in Germany, detrimental changes in physical, chemical and biological characteristics have to be avoided [47]. In Switzerland, the biocenosis of groundwater should be in natural state [48,49]. However, in both examples an exact definition of ‘detrimental changes’ and ‘natural state’ is absent. And hitherto, there are also no European wide technical standards for the BHE of GSHP systems, whereas for heat

pumps (e.g. EN 378 [50]) and for the safety of drilling rigs (EN 791 [51]) there is a comprehensive set of technical statutes [52]. All these basic EN standards for testing, rating, safety have been adopted by the EU member states [53].

Two European research projects have studied the legislation of geothermal systems. The GeoThermal Regulation-Heat (GTR-H) project, finished in October 2009, reviewed regulatory barriers and deficiencies for geothermal heating in the four unregulated EU countries Hungary, Ireland, Poland and United Kingdom (UK) [22]. The topics were regulation/legislation, geothermal resource data and information access, incentives, taxation, fees and royalty and the last one professional code of practice. The lack of clarity in energy, water and environmental legislation and specific regulation for geothermal energy were identified as the most primary regulatory barriers in all four countries. In addition financial aspects were identified as the main barrier in Poland and resource data availability in Ireland and UK [54]. Thereby it was not distinguished between deep and shallow geothermal energy. In addition, a review of the current best practice regulatory frameworks for the use of geothermal energy in three countries (France, Germany, and Netherlands) was carried out [55]. Finally a template for a regulatory framework was published. Therein shallow and deep geothermal is defined. The draft provides advice, for example for resource ownership, licensing system, simplified regulations and administrative procedures [56].

The second European project is GROUND-REACH, completed in December 2008 [21]. Its aim was to intensive the use of shallow geothermal installations with the superordinate target to reach the Kyoto criteria. Therefore the merits, benefits and market barriers, including legislative difficulties, in numerous EU member states were outlined. It was found out that the current governmental policy does not properly promote geothermal energy and that support in general is focused on power generation. To overcome this, a short term European information and promotion campaign for a fast market penetration of GSHP systems was started. As geothermal energy in many European countries is regulated by national Mining or Water Acts and responsibilities are spread out among different ministries or institutes, international cooperation and a harmonization of legislation are found to be rather difficult. Also, inconsistent legislative frameworks around Europe in some cases represent a real barrier to finding a common way of concerted geothermal energy use. Hence, a major conclusion of this project is that it is necessary to set up clear regulation to secure an environmentally friendly use of geothermal energy, in particular concerning protection of underground drinking water resources [16,21].

2.2. Types of criteria

In Table 1 different possible types of criteria for a sustainable thermal use of groundwater are listed. Since they represent the most commonly regulated aspects, our focus is on those rules given for temperature and minimum distances between nearby shallow

Table 1
Criteria for a sustainable thermal use of groundwater.

Criterion	Purpose
Technical accurate drilling and installation	Guarantee of operation
Backfilling	Protection of groundwater as a resource for drinking water
	Avoid leakage of hazardous materials (e.g. heat carrier fluid, drilling fluid, secondary contaminants such as oil of vehicles, drilling apparatus, etc.)
	Avoid changes in groundwater ecology
Minimum distances	Avoid hydraulic contacts between different aquifer systems
	Avoid accumulation of temperature changes
	Avoid interaction with other shallow geothermal systems
Temperature thresholds	Avoid influence on other technical systems (drinking water wells, water pipes, neighboring ground)
	Avoid changes in groundwater ecology
	Guarantee of operation

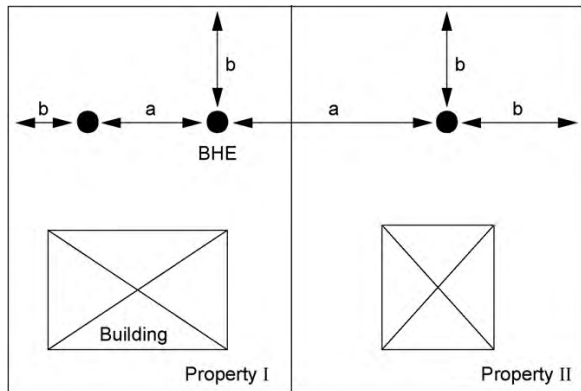


Fig. 2. Minimum distance criteria: (a) describes the distance between neighboring borehole heat exchangers (BHEs) and (b) depicts the distance from the BHE to the next property line.

geothermal installations. Minimum distances criteria between adjacent GSHP systems can be distinguished in minimum distance between technical installations and: (i) borehole heat exchanger or groundwater wells, respectively, (ii) property line, (iii) next building, (iv) drinking water well, or (v) other public installations (e.g. power line). Fig. 2 illustrates minimum distance criteria between adjacent borehole heat exchangers (BHEs) and the closest property line. Technical thresholds are also sometimes expressed with respect to energy extraction rates (“loads”). They are specified for example as allowed ‘mean load’ during one week or as ‘peak load’. ‘Peak load’ describes a maximum energy extraction that is only permitted in exceptional cases [57].

Minimum distances are often favored, because thresholds can easily be defined, controlled and communicated. Such distance restrictions are intended to indirectly limit spread and intensity of local temperature anomalies. By consideration of heat extraction (or injection) rates, lateral extension and long-term development of temperature plumes can be anticipated (Fig. 3). Limits on heat extraction rates also foster thermal recovery by natural conductive and convective heat supply, and thus support robust design and operation. Interestingly, only spatial distances are regulated. However, even if a system is operated with uniform (seasonal) loads, effects on underground temperatures change over time. This is demonstrated for example in a case study by Rybach and Eugster [58]. If a GSHP is mainly run in the heating mode, temperature drops significantly in the first years. Later the generated annual deficit decreases, as the generated temperature gradients around a BHE expedite heat supply by conduction.

Especially in densely populated urban areas, distance restrictions help to avoid or minimize mutual influence between GSHP or

GWHP systems on neighboring properties. However, commonly the true development of anomalies is neither known nor typically monitored. This is particularly relevant, as the generated temperature distribution is, among other factors, controlled by distinct and to some degree uncertain hydrogeological site parameters. Highly conductive aquifers with high flow velocities are more attractive since convective supply of heat can replenish local energy deficits more easily there than in low flow systems. In contrast, the more intense the flow velocity the more asymmetric plumes evolve [25]. Knowledge of groundwater flow velocity and direction would be necessary, however, to reliably predict influences on neighboring installations or properties, which might also substantially vary along the flow direction.

Definition of hydraulic criteria is principally relevant for open systems. Local groundwater extractions or injections of GWHP systems can adversely affect the local hydraulic regime. Subsidence may occur, although significant magnitudes are only observed for large installations [59]. Regulations for groundwater management, well design and operation are already established (e.g. [4]) and not further examined here. Sometimes, the hydraulic effects of GSHP systems are also of concern. For example in Sweden, backfilling of BHEs is usually not required and applied, whereas in Germany and Switzerland BHEs have to be fully backfilled with a concrete-bentonite mixture. This is to avoid artificial connection between different aquifer systems. It is also intended as safety measure to seal the boreholes and counteract potential leakage of the tubes in case of faulty design or material aging [53,60].

GSHP and GWHP systems commonly use normal groundwater temperatures between 5 and 30 °C [61]. Typical temperature ranges of a single GSHP system are around ± 5 K in relation to the natural groundwater temperature. For a GWHP system the temperature range is around ± 10 K. It is known that physical groundwater properties such as density, viscosity and flow velocity are temperature-dependent as well as heat capacity and thermal conductivity of the porous media [26]. Thereby, the flow velocity of water is linearly linked to the viscosity. A cooling of 2.5 °C increases the groundwater viscosity about 7% [31]. The groundwater flow velocity increases with 2–3% per one degree of temperature rise [29,30]. This is important due to the fact that the length of the temperature plume becomes shorter with increasing flow velocity [25].

In general, three types of temperature thresholds are defined: (i) an absolute allowed minimum temperature, (ii) an absolute allowed maximum temperature and (iii) a relative value describing the accepted temperature difference between disturbed and ambient undisturbed temperature. These criteria can also be distinguished in (i) technical thresholds for the heat carrier fluid in the BHE and (ii) environmentally or ecologically motivated temperature thresholds to restrain temperature changes in the aquifer. Constraints on heat carrier fluid temperature are discussed to avoid freezing and to keep temperature variations in the BHE

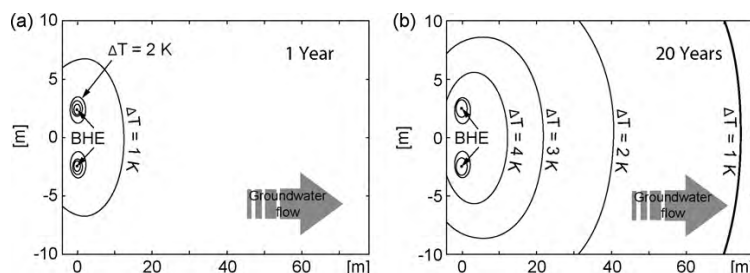


Fig. 3. Top view on simulated temperature anomalies (cold plumes) in a hypothetical aquifer: (a) depicts the length of a cold plume after 1 year, (b) after 20 years. In both cases a heat extraction of 80 W/m in 1800 h/year in low convective aquifer (groundwater flow: 1×10^{-7} m/s) is assumed. ΔT describes the difference between undisturbed and disturbed groundwater temperature.

within a defined range. This is to guarantee long-term stability and to avoid disintegration of the borehole grouting material.

Ecologically motivated or environmental criteria, even if they are taken as basis for regulations, are rarely reported. The chief concern appears to be the prevention of bacteria growth at elevated groundwater temperatures. This is also a primary reason for setting restrictions on the distance between geothermal installations and freshwater wells. Already in the 1970s, mainly caused by the 1973 oil crisis, geothermal energy use was often favored for heating and cooling [62]. The controlled change of groundwater temperature was considered as key issue for an environmental friendly thermal use of groundwater [62]. In 1978 Andrews [63] concluded that as long as surface impacts caused by lowering of groundwater temperatures are minor, groundwater can be used as a source of energy until the temperature is decreased to a point, in which energy extraction is no longer economically feasible. Meanwhile, such an opinion appears widely outdated. Although not visible, hydrogeological environments are considered as safeguard subjects themselves with their specific characteristics and importance for intrinsic and dependent ecosystems. Aquifers offer ecosystem services of high economic value and are of enormous importance as ubiquitous freshwater reservoirs. However, studies on the impact of geothermal use on groundwater ecosystem are extremely scarce [36,38,39,64]. Hence, it is still necessary to develop specific evaluation mechanisms to study such impacts [48,65].

3. Country overview

In this chapter, regulations in selected countries are separately presented and discussed. The collected information from questionnaires (Table 2) is completed with a comprehensive review of publicly available literature and legislations dealing with shallow geothermal energy. Thus, a comprehensive analysis of the current international legal state is elaborated that describes the common practice in most countries using shallow geothermal energy. The

collected record is extensive, but of course not complete. It can easily be extended once further data is accessible or country specific updates are available.

Table 3 summarizes all identified laws regarding shallow geothermal energy. Furthermore, Table 4 provides an overview about the legal status of regulations for ecological and technological temperature thresholds and minimum distances for open and closed systems of the countries that answered the questionnaire.

3.1. Australia

Federal geothermal regulations are variable in Australia. Ownership and regulations of onshore resources vary with each state and territory government. Shallow geothermal systems in Australia are not comprehensively monitored or regulated by the government. Their use is currently not widespread; however, there is an increasing trend. One of the largest installations, with 350 boreholes of 100 m depth is in the Geoscience Australia headquarters near Canberra [66,67].

In Western Australia neither temperature thresholds for heating and cooling of the groundwater nor regulations for minimum distances are defined. Water usage or production of any water for the operation of such systems is subject to the more general laws such as Rights in Water and Irrigation Act of 1914. The Petroleum and Geothermal Energy Resources Act from 1967 is not valid for small-scale installations such as GSHP systems. In the federal state of Queensland, for example, also no temperature thresholds and regulations for minimum distances exist. The Water Act from 2000 is only concerned about groundwater for other uses such as stock and domestic purposes. However, there is a need to obtain a water license for geothermal purposes, if the water is to be extracted and used (i.e. for open systems). Policy and legislation in relation to domestic use of geothermal energy are currently under development in Queensland and will be enacted in 2010.

Table 2
International questionnaire.

Question	Possible answers
Are there temperature thresholds? If yes: Please report the specific values	Yes/No Technical thresholds Relative values (limit for heating/cooling) Absolute values (maximum/minimum temperature)
Are the thresholds legally binding? Which are the relevant laws/ordinances? What is the basis for these values?	Technical thresholds Relative values (limit for heating/cooling) Absolute values (maximum/minimum temperature) Yes/No; Level (state, city, etc.) Title, year Rule of thumb Scientific studies Something else
If no: Is there a particular reason? Are any regulations planned for the future? Are there regulations referring to minimum distances?	Yes/No; Explanation Yes/No; Description Yes/No
If yes: Which are the relevant laws/ordinances? What is the basis for these values?	Title, year, name of the law/ordinance Rule of thumb Result of research Something else
If no: Is there a particular reason? Are any regulations planned for the future? Does your country have any other laws, ordinances or regulations concerning thermal groundwater use? If yes, which are the relevant laws or ordinances?	Yes/No; Explanation Yes/No; Description Yes/No Title, year, comments

Table 3

Laws concerning the use of shallow geothermal energy.

Country	Laws (publishing date)	Country	Laws (publishing date)
Australia	Energy Resources Act (1967) The Petroleum and Geothermal Rights in Water and Irrigation Act (1914) Water Act (2000)	Indonesia	Geothermal Law (23/10/2003)
Austria	Österreichischer Wasser- und Abfallzweckverband (ÖWAV) Regelblatt 207: Thermal Use of Groundwater and Subsurface – Heating and Cooling (2009)	Lithuania	Underground Law (1-1034, 05/01/1996)
Belgium	Decree on Environmental Permits (28/06/1985)	Mexico	Water Act (1992)
Bulgaria	Constitution (1991) Law on the Renewable and Alternative Sources of Energy and the Biofuels (2007)	Netherlands	Groundwater Law (1981) Mining Law (01/01/2003)
Canada	Water Act (1999)	Norway	Neighbor Law (n.a.)
China	Water Act (1985) Renewable Energy Law (2006)	Philippines	Economic Activity Law (n.a.) Geological and Mining Law (19/11/1999) Renewable Energy Act (2008)
Czech Republic	Building and Planning Act (No 183/2006)	Poland	Water Act (1974)
Denmark	Order on Heat Abstraction and Groundwater Cooling Plants (BEK-1206, 24/11/2006) Order on Groundwater Heating BEK-1203, 20/11/2006)	Portugal	Decree-Law 87/90 (16/03/1990)
Ecuador	Water Act (n.a.)	Romania	Environment Protection Law (No. 265/2006) Mining Law (No. 61/1998) Water Law (No. 310/2004)
Finland	Environmental Protection Act (2000) Water Act (1961)	Slovakia	Water Law (2004) (Law No. 364/2004)
France	Decree 74-498 (24/03/1978) Decree 77-620 (16/06/1977) Decree 78-498 (28/03/1978) Mining Law (16/08/1956)	Slovenia	Mining Law 2004 (Official Gazette, 98/2004) Water Law 2002 (Official Gazette, 67/2002)
Germany	Mining Law (13/08/1980) Federal Water Act (27/07/1957)	Sweden	Normbrunn 97 (2002)/Normbrunn 07 (2008)
Great Britain	Water Environment Regulations (2005)	Switzerland	Water Protection Order (28/10/1998)
Greece	Decision of Minister of Development No. Δ9B, Δ/Φ166/OIK 18508/5552/207 on Installation Permits for Ground Source Heat Pumps (n.a.)		

n.a., not available.

3.2. Austria

In Austria no federal law for shallow geothermal energy has yet been defined. However, in Upper Austria technical temperature thresholds apply for the heat carrier fluid and minimum distances for adjacent GSHP systems. The technical thresholds are ± 15 K as temperature difference and 35 °C as maximum temperature. The recommended minimum distance to the property line is restricted to 2.5 m. For open GWHP systems there are temperature limits for heating and cooling of the groundwater. These legally binding thresholds of 6 K, 5 and 20 °C for temperature difference, minimum and maximum are average values compared with international practice (Table 7). To estimate the length of cold or heat plumes of open systems an analytical model is recommended by Rauch [68].

There are also some general national industry standards relevant for GSHP systems, which concern the heat pump (ÖNORM M 7753, ÖNORM M 7755-2+3) and the 'systems for the exploitation of geothermal heat' (ÖWAV RB 207) [52]. In addition, some regions such as Carinthia and Vorarlberg have their own recommendations for minimum distances. Here, in Carinthia, a minimum distance of 4 m to the neighboring property is binding [69].

3.3. Belgium

For Flanders, the Flemish Region in northern Belgium, no general law for the thermal use of groundwater exists at this time. Hence, there are neither temperature limits for the change of groundwater temperature, nor minimum distances. Permissions

are regulated in the Decree on Environmental Permits from 1985. Here, no specific aspects of thermal use of groundwater or the subsurface are included. Decisions are based on general permit rules, depending on the local situation of the aquifer.

3.4. Bosnia and Herzegovina

There are currently no special regulations for shallow geothermal installations in Bosnia and Herzegovina. The main reason is that there is no financial support from the authorities for the development of geothermal energy. Hence, there is currently hardly any motivation of the population or the financial sector to invest in such renewable energy systems.

3.5. Bulgaria

In Bulgaria, there is the recent Water Act – following the EU-WFD – where the injection of heat in water is defined as pollution [70]. The use of thermal waters is included in the Water Act and Constitution (1999); they are owned by the state or by municipalities [71]. The use of renewable energy including geothermal energy is however presently promoted with the Law on the Renewable and Alternative Sources of Energy and the Biofuels [72]. For obtaining permits and concessions, some regulations exist and also guidelines for geothermal exploration. There is no specific law that controls shallow geothermal energy. Temperature limits for groundwater use and minimum distances are therefore missing [73].

Table 4

International legal situation for closed and open shallow geothermal energy systems (according to questionnaire response).

	Open systems			Closed systems		
	Ecology	Technology	Minimum distances	Ecology	Technology	Minimum distances
Albania	–	–	–	–	–	–
Australia	–	–	–	–	–	–
Austria	+	–	–	–	+	+
Belgium (Fl.)	–	–	–	–	–	–
Bosnia and Herzegovina	–	–	–	–	–	–
Bulgaria	–	–	–	–	–	–
Canada	–	–	–	–	–	–
China	–	–	–	–	–	–
Costa Rica	–	–	–	–	–	–
Czech Republic	–	–	+	–	–	+
Denmark	+	–	–	–	+	+
Ecuador	–	–	–	–	–	–
El Salvador	–	–	–	–	–	–
Finland	–	–	–	–	–	o
France	+	–	–	–	–	–
Germany	o	o	o	–	o	o
Great Britain	o	o	?	?	?	?
Greece	–	–	+	–	–	–
Honduras	–	–	–	–	–	–
Hungary	–	–	–	–	–	–
Iceland	–	–	–	–	–	–
India	–	–	–	–	–	–
Ireland	–	–	–	–	–	–
Japan	–	–	–	–	–	–
Korea	–	–	–	–	–	–
Latvia	–	–	–	–	–	–
Liechtenstein	+	–	–	–	–	+
Lithuania	–	–	–	–	–	–
Macedonia	–	–	–	–	–	–
Mexico	–	–	–	–	–	–
Netherlands	+	–	–	–	–	–
New Zealand	–	–	–	–	–	–
Norway	–	–	–	–	–	–
Philippines	–	–	–	–	–	–
Portugal	–	–	–	–	–	–
Romania	–	–	–	–	–	–
Saudi Arabia	–	–	–	–	–	–
Scotland	–	–	–	–	–	–
Slovakia	–	–	–	–	–	–
Slovenia	–	–	–	–	–	–
Spain	–	–	–	–	–	–
Sweden	?	?	o	?	?	o
Switzerland	+	?	?	+	?	?
Turkey	–	–	–	–	–	–
USA	?	?	+	?	?	+
Vietnam	–	–	–	–	–	–
Summary	6 + 2 o	2 o	3 + 2 o	2 +	2 + 1 o	5 + 3 o

?, no information available; –, No regulations; +, Legally binding; o, Recommended.

3.6. Canada

Shallow geothermal installations have a long tradition in Canada. Nevertheless, there are no regulations from the federal government, due to the fact that some natural resources such as geothermal energy and groundwater are generally property of the Queen of Canada; however these resources are managed by Canadian provinces. The general Water Act regulates concessions for the direct use of groundwater. As of now, thermal impacts have not yet been investigated or documented, so there are no defined temperature action values or minimum distances. Guidelines for the design and implementation of GSHP systems are given in standard CSA-448-02 (Design and Installation of Earth Energy Systems). In the province of *Ontario* there is currently an initiative to develop regulations for shallow geothermal energy use.

3.7. China

Research on GSHP systems and their commercial use started in the 1980s [17]. In 2006 the China Renewable Energy Law and also the first technical standard for geothermal heat pump systems (GB50366-2005) was enacted. It is valid for open and closed systems and also for surface water heat pumps and it contains project investigation, general information for such systems, for example system design or backfilling material. As distance between each BHE for GSHP systems 3 and 6 m are recommended [74]. Since 2006 general documents on renewable energy have increasingly been issued by the Chinese authorities [17]. In practice a minimum distance of 4 m between individual BHEs is usually applied. However, there are not yet any regulations for temperature thresholds or minimum distances for closed and open systems.

Table 5

International technical temperature limits for the heat carrier fluid inside the borehole heat exchanger of a GSHP system.

Country	Temperature difference [K]	Temperature maximum [°C]	Temperature minimum [°C]
Austria	±15	35	0 ^a /–5 ^b
Denmark	–	25	2
Germany	±11 ^a /±17 ^b	–	–

^a With weekly mean load.

^b With peak load.

3.8. Costa Rica

Costa Rica is a tropical country with an average temperature of about 20 °C throughout the year. Thus, geothermal energy is currently only considered for electricity production. At present there are five power plants and one under construction. Shallow geothermal utilization is mainly for swimming pools and balneology, for which no special legislation applies.

3.9. Czech Republic

In the Czech Republic the same procedures are valid for open and for closed groundwater systems. Regulations do not distinguish between planning, permission, control, evaluation and monitoring. All systems with quantitative or qualitative impact on the groundwater resource need permission from the regional water authority. They decide each single case based on hydrogeological assessment from an external expert. Hence, considerable differences exist between the 13 different regions and general valid temperature thresholds are mostly not available. Nevertheless, the minimum distance of 5 m between a geothermal system and the next property line is regulated by the federal Building and Planning Act of 2006 (Table 6).

3.10. Denmark

In Denmark ecological temperature thresholds for closed systems are embedded in the Order on Heat Abstraction and Groundwater Cooling Plants from 2006 (Table 5). They are legally binding on a state level [75]. Heat extraction, and consequently the cooling of groundwater, is not considered an environmental problem. However, there is a minimum distance of 300 m between a GSHP system and a drinking water supply well (Table 6). This

Table 7

International groundwater temperature thresholds for open geothermal systems.

Country	Temperature difference [±K]	Temperature maximum [°C]	Temperature minimum [°C]
Austria	6 ^a	20 ^a	5 ^a
Denmark	–	25 ^a	2 ^a
France	11 ^a	–	–
Germany	6 ^b	20 ^b	5 ^b
Great Britain	10 ^b	25 ^b	–
Liechtenstein	–3/+1.5 ^a	–	–
Netherlands	–	25 ^a	5 ^a
Switzerland	3 ^a	–	–

^a Legally binding.

^b Recommended.

value is based on estimated degradation times of bacterial parameters and embedded in the National Order on Groundwater Heating (2006). In contrast, for open systems an empirical temperature maximum of 25 °C and minimum of 2 °C for the groundwater is defined, which are legally binding on state level (Table 7). For both national orders a revision is currently planned.

3.11. Ecuador

Due to the geological conditions in Ecuador the focus is predominantly on the use of high temperature geothermal energy. The actual government is willing to develop geothermal resources for electricity generation and direct use [67]. The actual water law allows the use of thermal waters only for social purposes, especially swimming pools and spas. According to our knowledge no geothermal heat pumps are used for heating or air conditioning. Therefore no regulations exist for closed and open geothermal systems. However, the situation might change in the near future, due to the new water law, which is under discussion at the National Congress of Ecuador. In the latter important issues are ecological aspects and ancestral rights.

3.12. El Salvador

According to our knowledge in El Salvador groundwater is not used for domestic heating and cooling. Thus, no laws, ordinances or regulations on the use of shallow geothermal energy are yet defined. Until 2005 only some interest in the direct use of geothermal heat for drying grains, coffee beans and fruits was

Table 6

Recommended and legally binding minimum distances for closed and open geothermal systems.

Country	Closed systems	Open systems	Legal status
Austria	2.5 m to the next property line	–	Recommended
China	3–6 m to the next BHE	–	Recommended
Czech Republic	5 m to the next property line	5 m to next property line	Legally binding
Denmark	300 m to drinking water well	–	Legally binding
Finland	30 m to all wastewaters, 20 m to the onsite wastewater treatment system, 5 m to the sewers and water pipes, 20 m to the dug or energy well, 40 m to the bored well, 3 m to the next building, 10 m to the next property line	–	Recommended
Germany	5 m to the next property line, 10 m to the next installation	–	Recommended and state specific
Greece	–	5 m to the neighboring buildings, 20 m to the next power line	Legally binding, if included in permission
Liechtenstein	3 m to the next property line, 6 m to the next installation	–	Recommended
Sweden	10 m to the next property line, 20 m to the next installation, 30 m to the next drinking water well	10 m to the next property line, 20 m to the next installation, 30 m to the next drinking water well	Recommended
Switzerland	3–4 m to the next property line, 5–8 m to the next installation	–	Recommended/Legally binding

reported [67]. Only high temperature geothermal resources ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) from depths between 600 m and 2.5 km are used for electricity production in the geothermal power plants of Ahuachapán and Berlín.

3.13. Finland

In Finland there are no national regulations on temperature thresholds as of now. Before 2009 only two municipal guidelines with recommended minimum distances between two BHE used for GSHP systems existed. In 2009 the Finnish Environment Institute (SYKE) published a guidebook with regulations for GSHP systems regarding recommended minimum distances between a GSHP system, a well building and property line [76]. The distance between two boreholes (BHE) used for GSHP systems should be 15 m. The distance between BHE and property line is 5 m in Tampere and 7.5 m in Helsinki. Related laws are the Water Act (1961) and the Environmental Protection Act (2000). However, these are general regulations without direct reference to the thermal use of groundwater.

3.14. France

There is a legal framework defined by several French laws and regulations. Geothermal energy is mainly embedded in the mining law (Code Minier). The resource belongs to the state and therefore a permission is necessary (Decree 77-620 (16/06/1977) and Decree 74-498 (24/03/1978)) [14,53]. Low-enthalpy geothermal deposits (drilling depth less than 100 m, maximum possible heat extraction rate is less than 200 Thermies per hour, with 1 Thermie = 1.128 kJ = 0.3 kWh) are exempt of these authorizations according to Decree 78-498 (28/03/1978 – Section 17).

For closed systems no explicit temperature limits for the groundwater are defined. Nevertheless, there applies a liberal temperature limit of 11 K for the change in groundwater temperature as stipulated by the Water Law, which is part of the Environmental Code (Table 7).

3.15. Germany

According to the German mining law (Bundesberggesetz, BBergG) shallow geothermal energy belongs to the federal state [77]. The state can allow the extraction of geothermal energy, if groundwater is concerned, then the federal Water Act (2002) is applicable. According to this law detrimental changes in chemical, biological and physical characteristics have to be avoided. However, no clear definition of these detrimental changes exists yet [47]. For the application of GSHP systems, currently 15 out of 16 federal states have their own guidelines (e.g. [78–81]). They describe the permission process and local regulations for the use of vertical and horizontal GSHP systems. They also include recommended minimum distances that range between 5 and 10 m between two BHE and 3 and 5 m between BHE and property line. An overview of these processes and regulations is given in Ref. [82]. In the state of Baden-Württemberg a guideline for open systems was published in 2009 [83], which is the first one in Germany. It also includes an analytical solution for calculating the length of cold plumes for open geothermal systems.

In addition, there are some technical and general guidelines such as the VDI 4640 and VBI-guideline [57,84–87]. They provide advice, for example, for planning and design of such shallow systems. The VDI 4640 includes different recommendations for maximum temperature and temperature difference for heating and cooling of the heat carrier fluid and for the groundwater (Tables 5 and 7).

3.16. Great Britain

The Environment Agency (EA) in Great Britain is in charge of England and Wales, whereas Scotland and Northern Ireland have their own agencies. There are currently no national regulations on geothermal energy in Great Britain [14].

In *England and Wales* no temperature thresholds and minimum distances for the use of closed systems are yet defined. Furthermore, no license is necessary for GSHP systems. The direct use of groundwater for GWHP systems has to be announced to the Environmental Agency; the purpose and the amount of extracted groundwater must be indicated. However, for an abstraction volume less than 20 m³ per day no abstraction license is needed [88]. The existing temperature thresholds such as the 25 °C for the maximum temperature for the injection well are internally set as an initial starting point to control the local discharge of heated up groundwater to the confined Chalk in London (Table 7). However, they are not part of any law and therefore recommended but not legally binding thresholds.

In *Scotland* there are also no individual regulations on temperature changes or minimum distances for closed and open systems. The Water Environment Regulations (2005) includes General Binding Rules for specific low risk activities such as shallow open loop ground source heat/cooling systems, i.e. to a maximum of approximately 100 m depth. General Binding Rule 17 concerns the abstraction and subsequent return of groundwater for the purpose of extracting geothermal energy. It states that the abstracted water must be returned to the same geological formation from which it was abstracted. The volume of injected water must be the same as the extracted volume. The chemical composition of the abstracted water must not be altered prior to its return to the geological formation. Future regulations on shallow geothermal systems are planned.

3.17. Greece

There are no regulations or recommendations for temperature thresholds in the legislation of Greece. Groundwater with temperatures below 25 °C is not considered as a mineral resource. However, a water permit is needed for GSHP systems using groundwater temperature below 25 °C, according to the Minister's Decision (Table 3). It also recommends a minimum distance of 5 m to the neighboring buildings [89].

3.18. Hungary

There is no specific act for shallow geothermal energy. However, existing regulations consider facilities using ground heat as water facilities, for which an installation and operation license is needed. The national Water Act defines geothermal water as the water from the underground with temperature of 30 °C or higher. Extraction of geothermal energy from the ground is embedded in the Mining Act of 1997 [90].

3.19. Iceland

Because of the extraordinary geological conditions with shallow high temperature ground, over half of Iceland's energy demand is satisfied with geothermal energy. Already, more than 88% of all homes use geothermal energy. It is also preferably used for the heating of swimming pools, greenhouses, fish farming, as well as de-icing pavements, sidewalks and parking lots [67]. However, Iceland has no specific law or regulation for the thermal use of shallow geothermal energy.

3.20. Indonesia

Indonesia has the largest geothermal energy potential world-wide. The current focus is on the generation of electricity [91] and until 2005 only 3–4% of the reserves were used for power generation [92]. The first Indonesian geothermal plant for power generation has been in operation since 1978. The Geothermal Law (2003) provides safety to the industry and describes the contribution of geothermal energy to energy security and independence of fossil fuels [93]. There are not yet any regulations referring to shallow geothermal installations.

3.21. Ireland

Ireland has the highest level of energy import dependence in the European Union. Thus, renewable energy is intensively promoted. A recent study showed that a significant geothermal potential (deep and shallow) exists, which may help the Irish government to achieve its goal to generate 33% of Ireland's electricity from renewable sources by the year 2020 [94]. There are 42 reported warm springs, but geothermal energy is mainly used for space heating by shallow geothermal installations [95]. At this time Ireland does not have any federal regulations or standards for temperature thresholds or minimum distances. Some planners use the German VDI 4640 [57,85–87] as a primary technical guideline, which currently serves as an established European code; and is also available in English. There is also no general law for the regulation of geothermal energy. However, groundwater extraction and injection require permission [14].

3.22. Japan

The number of shallow geothermal installations is still very low. As of 2005 only 41 heat pump projects were reported, mainly installed by industrial companies, with an estimated installed capacity of about 1.7 Mwt [67]. The government recently recognized the advantages in saving energy and avoiding additional CO₂ emissions by using shallow geothermal energy for cooling and heating. They have now started to encourage people to use such systems, and therefore do not yet have any limits for the usage. In essence, there are no regulations pertaining to thermal use of groundwater and the subsurface. However, open geothermal systems are not always feasible. In many large urban areas, it is strictly forbidden to extract groundwater, due to serious subsidence problems in the past.

3.23. Korea

The number of installed shallow geothermal systems has been continuously rising since 2004. New installations between 2000 and August 2008 consist of about 70% closed systems and 30% open systems. There are no regulations concerning minimum distances and temperature limits. There are only some standards for location and design of GSHP systems [96].

3.24. Liechtenstein

Although the Principality of Liechtenstein is rather small with only around 35,500 inhabitants, it is one of the most regulated countries in the use of shallow geothermal energy. In July 2009 the government defined temperature thresholds for groundwater. In comparison to the undisturbed groundwater temperature, groundwater is not allowed to be cooled more than 3 K. The maximum heating of groundwater is set to be 1.5 K. The use of groundwater for heating and cooling is only allowed as long as it is comprehensively demonstrated that no detrimental impact for

groundwater, surface and surface waters occurs. Still detrimental impacts are not further defined. Existing minimum distances for closed systems with 3 m to property line and 6 m to next installation are recommended (Table 6).

3.25. Lithuania

In Lithuania neither temperature limits nor minimal distances exist. The legislation concerning the underground (Underground Law of 1996 [97]) is only very general. For the future it is planned to develop regulations for utilization of geothermal energy. Discussions between specialists are currently taking place and a committee was established by the Ministry of Energy.

3.26. Mexico

In Mexico there is only a minor number of shallow geothermal energy applications. Geothermal resources are mainly used to generate electricity and also for bathing, spas and therapeutic purposes [67]. Only few installations for heating and cooling exist in the private sector and only few pilot industrial projects are reported [98]. Thus, there is presently no urgent need identified for legislation. The National Water Act refers to groundwater temperature, if it is higher than 80 °C. It is stated that groundwater at >80 °C is mainly for the generation of electricity; it can only be used for other purpose if it is not being used for the generation of electricity.

3.27. Netherlands

The use of shallow geothermal energy started in the early 1980s. Due to the fact that aquifers can be found almost everywhere in the country, almost all early installations are GWHP systems. From the 1990s on GSHP systems became more important [99]. Geothermal energy in general is embedded in the Mining Law. So far, there are no regulations or requirements for closed systems. However, starting in 2011 there will be a new Ministerial Regulation for closed systems under the Soil Protection Act. From then on permission is needed. For open systems a permit requirement under the Water Act defines temperature thresholds for groundwater. As maximum temperature for groundwater 25 °C is defined, allowed minimum temperature is 5 °C. These values are legally binding on regional level based on the regulations of Drinking Water Act for Legionella. Probably these values will be defined in a Ministerial Order starting in 2011. There are no regulations for minimum distances. The Water Act is a distribution act for groundwater, on the principle first come first serve. With the extraction permission one is allowed to extract water also from the subsoil of the neighbor. Starting in 2010 or 2011 provinces and municipalities are allowed to develop "ambition areas" for ATEs systems. To regulate the underground within these ambition areas master plans will be made soon.

3.28. New Zealand

Shallow geothermal heat pump systems have made hardly any impact on the energy market in New Zealand [67]. Thus, New Zealand has currently no federal law concerning shallow geothermal energy. No temperature thresholds are defined. Rules for minimum distances for deep geothermal systems are formulated by regional councils. These regulations are very diverse and strongly depend on the extracted amount of energy.

3.29. Norway

The Norwegian energy demand is traditionally met by developing hydropower as renewable resource. In 2005 a limit

was already more or less reached for developing further hydropower without detrimental environmental changes [100]. Thus, geothermal energy became progressively more attractive. In 2003, for example, there were 55,100 heat pumps installed mainly for heating [67]. Meanwhile, various famous buildings are supplied by GSHP systems for heating and cooling, including Norway's international airport terminal and a commercial building in Nydalen, Oslo [9]. No law for the thermal use of groundwater is defined, neither for closed systems nor open systems. The Water Resource Law (2001) does not mention thermal groundwater use for any purpose. Also, no explicit regulations on temperature thresholds or minimum distances exist. Of relevance in this context is the Neighbor Law. It generally states that nobody should have, do or initiate anything that unnecessarily induces damage or inconveniences to the neighboring ground.

3.30. Philippines

The Philippines defined the first Renewable Energy Act in Southeast Asia. It considers geothermal energy as renewable and therefore the Renewable Energy Act is applicable, if it is produced through natural or enhanced recharge [101]. Until now shallow geothermal installations are not well developed and consequently no regulations are yet defined.

3.31. Poland

In Poland no specific law for geothermal energy exists. According to the Geological and Mining Law (Official Journal No. 27, item 96 with amendments), deposits of useful minerals, including geothermal waters, belong to the state. The Polish Mining Law controls exploration and usage of thermal water. The Water Act is in charge of heat production with groundwater extraction [14]. The Economic Activity Law from 1999 (Official Journal No. 101, item 1178 with amendments) claims that exploration and exploitation of natural resources requires a concession [53].

3.32. Portugal

Only deep geothermal energy is included in a law [14]. There are no regulations for closed systems. For open systems there are minimum distances depending on the perimeter of protection defined for the resource and (hydro-) geological factors. An existing Decree-Law from 1990 regulating geothermal resources research and exploitation is applicable only to 'high temperature' resources. It regulates exploitation of open systems, which cover high or medium temperature resources, direct heating or for power generation. As a rule of thumb, only water with temperature higher than 40 °C is expected to be commercially exploited. The need for a more comprehensive law including shallow geothermal installations is perceived; no short term plans for the implementations of new laws are currently being considered.

3.33. Romania

Mineral resources in Romania, including heat contained in mineral, plain and thermal waters, are public property. The National Agency for Mineral Resources defined geothermal water as underground water with a wellhead temperature higher than 20 °C. The Mining Law regulates mining activities in Romania. The utilization of renewable energy is supported by a government decision with a utilization strategy, in which geothermal energy, referring to hydrothermal reservoirs, is mentioned in general. As GSHP and GWHP systems are not yet eminent, shallow geothermal installations are not considered important to regulate. Therefore,

there is no specific geothermal legislation defined. Existing guidelines are dedicated to geothermal exploration permits and licensing exploitation. Well drilling for underground fluids is involved in the Environment Protection Law. As an exception, groundwater wells for domestic use with depths less than 50 m are excluded from the authorization procedure [53].

3.34. Slovakia

In Slovakia no general law for thermal use of groundwater exists. Furthermore, no temperature thresholds or recommendations for minimum distances for closed and open systems are provided. The Water Law (2004), based on the EU-Water Framework Directive [45], regulates licensing of (thermal) water quantity and used water quality. It does not contain any specific requirements that deal with shallow geothermal installations. However, it states that exploited geothermal water should not deteriorate the existing surface water quality.

3.35. Slovenia

Slovenia has not yet defined a federal law on geothermal energy. There are no temperature limits or recommended minimum distances. The Water Law (2002) and water rights concern concessions for balneology, touristic use of thermal groundwater and water permits for heating and cooling with GWHP systems. Concessions for geothermal energetic source (doublet system) and borehole drilling permissions are regulated by the Mining Law (2004). At the moment there is an initiative to prepare some guidelines, which will adopt the best practice from Swiss standard for GSHP systems (SN 565/384/6) and Austrian guidelines for closed systems [44]. Some proposals of criteria for a revision of groundwater permits have already been made [102].

3.36. Switzerland

Switzerland has no specific law for geothermal energy and also no federal mining law [14]. In Switzerland there is the general Water Protection Order from 1998 [103]. It is valid for the federal state and includes temperature thresholds for an accepted temperature difference of the groundwater of 3 K (Table 7). It is not specific for closed or open systems. The regions (canton) are generally responsible for the enforcement of the water ordinance, though some have further delegated the regulation of groundwater use to the municipalities. Hence, in some regions there are more regulations and also additional values for minimum distances, for example in the region of St. Gallen and Zug. Finally, there are standards of the Swiss engineer and architect association (SIA) for other shallow geothermal techniques such as energy piles (SIA D 0179, SIA D 190) [52].

3.37. Sweden

The boom of shallow geothermal installations in Sweden started in the early 1980s. The total number of installations in the year 2004 was already around 200,000. Sweden is therefore one of the foremost countries in the use of shallow geothermal energy [9]. One reason is probably the liberal legislation for such systems. General regulations apply to any type of activity that may have detrimental impact on the environment. Normbrunn 97 [104], replaced in 2008 by Normbrunn 07 [105], is a quality standard for wells for BHE and contains requirements for the borehole itself, equipment and competence of drillers. In addition, some recommendations for minimum distance between the borehole and property line are included (Table 6) [53,89]. However, legally binding regulations do not exist in Sweden.

3.38. USA

In the USA shallow geothermal systems are mostly sized for cooling load. The number of geothermal heat pumps has increased continuously in the past 15 years up to an estimated number of 120,000 systems. 70% of geothermal heat pumps are installed in residential buildings. 90% of these pumps are closed systems (ground coupled, here: GSHP) and 10% open systems (here: GWHP). The remaining 30% are installed in commercial and institutional buildings [106]. However, despite the rising numbers no federal law or guideline for shallow geothermal energy use is defined. Each state has its own laws and restrictions. For minimum distances there is only a general regulation, which states that vertical boreholes have to be 5–7 m apart. Geothermal energy is sometimes considered as a water resource and in some cases as a mineral resource. Other states regulate it by temperature criteria. In the state of *Oregon*, for example, if the water temperature is below 250 F (121 °C), it is regulated by the Department of Water Resources. On the other hand if the temperature is above 121 °C, the Department of Geology and Mineral Industries is responsible.

3.39. Vietnam

In Vietnam there are about 300 hot springs, but the geothermal water is exploited for mineral water bottling, spa, salt drying and medical purposes. As of now no regulations concerning temperature thresholds and minimum distances for the use of shallow geothermal energy are defined yet.

In *Honduras*, *India*, *Latvia*, *Macedonia*, *Saudi Arabia*, *Valencia Region (Spain)*, *Spain* [89] no laws, regulations or ordinances concerning the legislation are available and published. Possible reasons are as follows:

- Only deep geothermal reservoirs are used.
- There are currently only few or no shallow geothermal installations.
- Thermal use of groundwater for heating and cooling is not common.
- Temperature changes in groundwater caused by the use of geothermal energy are not of major concern.

In *Albania* there are also no regulations, however, these are in process. *Turkey* has not yet defined a specific law for geothermal use of groundwater and there are neither temperature thresholds nor minimum distances, although there are a large number of shallow and deep geothermal energy installations.

4. Discussion and conclusions

The presented survey shows a rather diverse international legal status of the use of shallow geothermal energy. European countries are in particular more heavily regulated with a variety of laws, regulations, standards, guidelines and certificates. Liechtenstein and Finland are among the most regulated countries. The European situation is most likely due to the fact that in Europe shallow geothermal energy is very popular and commonly used more often than deep geothermal energy systems, whereas in New Zealand, El Salvador, Indonesia and Central America deep geothermal energy is more commonly used. In contrast, China and Korea, where shallow geothermal installations dominate, weak and partial vague standards are still applied.

In most countries, there are no regulations or recommendations on temperature limits for the thermal use of groundwater and the shallow subsurface (<400 m depth). If considered, minimum distance criteria can vary substantially (Table 5), and appear to be empirically defined rather than scientifically evaluated. For

example, the minimum distance of closed geothermal systems to the next property line is set 2.5 m in Austria, 5 m in Germany and 10 m in Finland and Sweden. Some countries distinguish in their regulations between open and closed systems (e.g. Greece) while others do not (e.g. Sweden). For open geothermal systems, often established regulations for well installations and groundwater use come into force. Not only threshold values, but also the definition of the point of compliance is often country-specific. For example, in Finland one has to obey distances to the next building, sewer and water pipe, in Sweden and Denmark to the next drinking water wells and in Greece even to the next power line.

Ecological thresholds, for heating and cooling the groundwater with open geothermal systems, vary between 15 and 25 °C for maximum temperatures and 2 and 5 °C for minimum temperatures. For example, a comparatively large range from 2 to 25 °C is accepted in Denmark. Such fixed absolute values only exist in few countries, while acceptable temperature differences are more common. The allowed temperature difference between undisturbed and influenced groundwater temperature varies from ±3 °C (e.g. Switzerland) to ±11 °C (France), reflecting significant national differences.

There are no absolute temperature limits for heating and cooling of groundwater for closed geothermal systems. Only few countries such as Austria and Denmark define technical temperature thresholds for such systems. The defined thresholds refer to the heat carrier fluid inside the borehole heat exchanger. As maximum temperature Austria defines 35 °C and Denmark 25 °C. The accepted temperature minimum is between –5 °C for the peak load in Austria and 2 °C in Denmark. Similarly to open geothermal systems, acceptable temperature differences are given for closed systems. They range between ±11 K for the weekly mean load in Germany and ±17 K for the peak load in Germany.

A major finding of this review is that if the use of shallow geothermal energy is regulated, applied criteria and defined thresholds vary considerably, which can be explained by many factors. In many countries, the use of shallow geothermal energy is not so significant in comparison to other renewable energy resources. Thus, there is little or no experience with such shallow geothermal systems, and therefore there is no perceived need for regulations. Furthermore, less preventive boundary conditions for closed or open geothermal systems might be stimulating for the market development. Additionally legal restrictions might also be considered as unwanted barriers that could decelerate the development of such shallow geothermal systems.

The focus in some countries is on open geothermal systems, in others on closed systems. The characteristic physical, chemical and biological effects of both technologies might explain the individual management of these systems. However, even if one technology is favored in one country, a neighboring country or region with similar climate and hydrogeological conditions might formulate completely dissimilar regulations, recommendations, codes and technical guidelines. For example, one of the main aims of minimal distances between geothermal installations and neighboring properties or buildings clearly is to minimize potential thermal influence on the neighboring property. Thus, a person or company should not be negatively influenced, i.e. experience a decrease in efficiency of his installation due to an adjacent geothermal system. The defined regulations seem often to be subjective and show a major deficiency in the use of scientific studies and understanding of the main underlying processes. Meanwhile, in countries such as Germany and Austria, the use of simple analytical models, for example, for the estimation of the temperature development in the subsurface due to the use of shallow geothermal system is recommended using site-specific hydrogeological conditions and case-specific energy extractions.

One of the main purposes of environmental regulations is to control and to avoid unwanted potential irreversible effects on and misuse of the environment and future generations. In almost all cases, regulative frameworks are based on technical considerations and a concern for property rights. In contrast, the environmental impacts of changing groundwater temperatures due to the thermal use of the subsurface are rarely discussed or considered. Instead, in some countries such as Denmark and Austria, regulations and threshold values for closed geothermal systems are defined for the heat carrier fluid in the borehole heat exchanger, apparently to only guarantee the technical performance of the system. In contrast, open geothermal systems are mainly controlled by regulations that are established for the supply of drinking water using groundwater wells. This indicates that technical aspects such as land subsidence or distance to the next power line are mainly considered. Environmental aspects seem to be of minor importance. This does not inevitably mean ignorance, as there might be some other reasons. One reason could be that groundwater ecosystems are currently not well understood and studied. The development of generally valid environmental indicators is at an initial stage and no consensus on practical guidelines to save and sustain these groundwater ecosystems exists. Furthermore, the importance of groundwater flora and fauna in aquifers is identified, but public awareness has not yet been stimulated.

Finally, often temperature anomalies caused by seasonal applications of GSHP or GWHP systems are, if in any way, only pronounced in the proximal zones around the borehole heat exchangers or wells respectively and diminish rather fast with increasing distances [24–26]. Significant increase or decrease of aquifer temperatures is mainly restrained due to techno-economic performance of the systems, as for example the efficiency of heating decreases with aquifer temperature. Thus, the necessity to save and protect the environment does not guide the formulation of current national regulations. Instead, an incentive to embed environmental criteria in legal national or international frameworks is to avoid apparent threats such as unwanted bacteria growth in heated aquifers [36].

In principle it would be desirable for the different regulative frameworks to converge, and to establish more objective and scientifically motivated environmental, technical and economical criteria. Thus, country-specific differences in subsurface and climatic conditions, the different practice of the use of shallow geothermal energy and the individual social, cultural or political priorities should define the baseline for the formulations of legal regulations. Preferably, static as well as dynamic aspects and the resulting spatial and temporal changes in subsurface temperature due to cooling and heating should also be considered.

Acknowledgements

The authors would like to thank the following people who replied to our international questionnaire, without whom the current review would have not been possible: Ramadan Alushaj (Polytechnic University, Albania), K. Ameer R. Ghorri (Western Australia), Peter Green (Queensland, Australia), Anthony Budd (Australia), Hans Aschauer (Austria), Didier D'Hont (Belgium, Flanders), Neven Miosic (Federal Geological Survey, Bosnia and Herzegovina), Valeri Trendafilov (Ministry of Environment and Water, Bulgaria), Philippe Pasquier (Golder Associates, Canada), Grant Ferguson (St. Francis Xavier University, Canada), Zhaohong Fang (GSHP Research Center, Shandong Jianzhu University, China), Alfredo Mainieri Protti (Service Centre for Geothermal Resources, Costa Rica), Josef Datel (Charles University, Prague, Czech Republic), Gunver Heidemann and Martin Skriver (Ministry of the Environment, Denmark), Bernardo Beate (National Politechni-

cal School, Ecuador), Julio Guidos (LaGeo, El Salvador), Janne Juvonen (Finnish Environment Institute, Finland), Florence Jaudin (BRGM – GTH, France), Victoria Fry (Environment Agency, UK), Brighid Ó Dochartaigh (British Geological Survey, Scotland, UK), Dimitrios Mendrinou (Centre for Renewable Energy Sources and Energy Savings, Greece), Cesar Augusto Lagos (Geotermica Platanares, Honduras), Larus Olafsson (National Energy Authority, Iceland), Dornadula Chandrasekharam (Indian Institute of Technology, India), Eamon Ryan (Ministry of Communications, Energy and Natural Resources, Ireland), Kasumi Yasukawa (Institute for Geo-Resources and Environment, Tsukuba, Japan), Youngmin Lee (Korean Institute of Geosciences & Mineral Resources, Korea), Erika Ulane (Latvia), Egon Hilbe (Amt für Umweltschutz, Liechtenstein), Kaspar Papritz (Dr. Bernasconi AG, Liechtenstein), Juozas Mockevicius (Geological Survey, Lithuania), Sanja Popovska-Vasilevska (University St. Kliment Ohridski, Macedonia), Luis C.A. Gutiérrez-Negrín (Mexican Geothermal Association), Marc Koenders (IF Technology, Netherlands), Katherine Luketina (Waikato Regional Council, New Zealand), Björn Frengstad (Geological Survey, Norway), Fernando S. Penarroyo (National Geothermal Association, Philippines), Carla Lourenco (National Institute of Energy, Technology and Innovation, Portugal), A. Rodrigues da Silva (Ministry of Economy and Innovation, Portugal), Marcel Rosca (University of Oradea, Romania), Shafiq Rehman (King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia), Peter Malik (Geological Survey, Slovakia), Andrej Lapanje (Geological Survey, Slovenia), Göran Risberg (Geological Survey, Sweden), Roger Nordman (Technical Research Institute, Sweden), Umran Serpen (Turkey), John W. Lund (Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, USA), Tran Trong Thang (Vietnam Institute of Geoscience and Mineral Resources, Vietnam). Furthermore, we thank our colleagues from the hydrogeothermics group in Tübingen. This work was financed by a scholarship from the German Federal Environmental Foundation (DBU) to S. Hähnlein. This work was also supported by a research grant from the GWAT-LCA project within the 7th Framework Program of the EU (Contract no. PIEF-GA-2008-220620). We thank Margaret Hass for her valuable help during the preparation of the manuscript.

References

- [1] Blum P, Campillo G, Münch W, Kölbl T. CO₂ savings of ground source heat pump systems: a regional analysis. *Renewable Energy* 2010;35:122–7.
- [2] Fridleifsson IB, Bertani R, Huenges E, Lund JW, Ragnarsson A, Rybach L. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. In: Hohmeyer O, Trittin T, editors. IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources. 2008, p. 59–80.
- [3] Badescu V. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. *Renewable Energy* 2007;32:845–55.
- [4] Banks D. Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of analytical approaches. *Hydrogeology Journal* 2009;17.
- [5] Rafferty K. Ground water issues in geothermal heat pump systems. *Ground Water* 2009;41(4) [July–August 2003].
- [6] Sanner B, Karytsas C, Mendrinou D, Rybach L. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics* 2003;32:579–88.
- [7] Clauser C. Geothermal energy. In: Heinloth K, editor. *Landolt-Börnstein: numerical data and functional relationships, Group VIII: advanced materials and technologies*. Heidelberg-Berlin: Springer Verlag; 2006. p. 493–604.
- [8] Omer AM. Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:344–71.
- [9] Lund JW, Sanner B, Rybach L, Curtis R, Hellström G. Geothermal (ground – source) heat pumps a world overview. *GHC Bulletin* 2004;(September):10.
- [10] Dickson MH, Fanelli M. *What is Geothermal Energy?*. Pisa, Italy: Istituto di Geoscienze e Georisorse; 2004. p. 43.
- [11] Rafferty K. Design aspects of commercial open-loop heat pump systems. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin* 2001;22:16–24.
- [12] Nielsen K. Thermal energy storage: A state-of-the-art. Norway: Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Trondheim; 2003. p. 25.
- [13] Mands DE, Sauer M, Grundmann E, Langguth K, Sanner DB, Gäbler W. Stand der technischen Entwicklung oberflächennaher Geothermie in Deutschland. *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau*; 2008. p. 56–65.

- [14] Sanner DB, Mands DE. Erdgekoppelte Wärmepumpen in Deutschland und Europa: ein Wachstumsmarkt, bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie; 2009. p. 22–35.
- [15] Rumohr DS. Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Hessen - Zahlen und Kenngrößen, bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, vol. 3; 2009. p. 46–52.
- [16] Pieters H. Barriers to GSHP market penetration. *Ground Reach* 2007;286.
- [17] Gao Q, Li M, Yu M, Spitzer JD, Yan YY. Review of development from GSHP to UTES in China and other countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13:1383–94.
- [18] Saner D, Juraske R, Kübert M, Blum P, Hellweg S, Bayer P. Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010. doi:10.1016/j.rser.2010.04.002.
- [19] Campillo G, Kölbl T, Blum P. Techno- economic and spatial analysis of ground source heat pump systems in South Germany [submitted]. *Energy Conversion and Management* 2010.
- [20] Ferguson G. Unfinished business in geothermal energy. *Ground Water* 2009;47:167.
- [21] <http://www.groundreach.eu/en/> [12.04.2010].
- [22] <http://www.gtrh.eu/index.html> [13.04.2010].
- [23] Molson JW, Frind EO, Palmer CD. Thermal energy storage in an unconfined aquifer 2. Model development, validation and application. *Water Resources Research* 1992;28:2857–67.
- [24] Pannike S, Kölling M, Panteleit B, Reichling J, Scheps V, Schulz HD. Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten [Influence of hydrogeological parameters on temperature variations due to borehole heat exchangers]. *Grundwasser* 2006;11:6–18.
- [25] Hähnlein S, Molina-Giraldo N, Blum P, Bayer P, Grathwohl P. Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden [Cold plumes in groundwater for ground source heat pump systems]. *Grundwasser* 2010;15:123–33.
- [26] Hecht-Méndez J, Molina-Giraldo N, Blum P, Bayer P. Evaluating MT3DMS for heat transport simulation of closed geothermal systems. *Ground Water* 2010. doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00678.x.
- [27] Warner DL, Algan U. Thermal impact of residential ground-water heat pumps. *Ground Water* 1984;22:6–12.
- [28] Palmer CD, Blowes DW, Frind EO, Molson JW. Thermal energy storage in an unconfined aquifer 1. Field injection experiment. *Water Resources Research* 1992;28:2845–56.
- [29] Willibald D. Auswirkungen von Wärmepumpen auf das Grundwasser. In: Glatzel W-D, Heise K-D, editors. *Wärmepumpen und Gewässerschutz*. Berlin: Erich Schmidt Verlag; 1979.
- [30] Balke K-D. Problematik der Kühlwassereinleitung in den Untergrund. *Gewässerschutz Wasser Abwasser* 1978;29:371–89.
- [31] Adams JJ, Bachu S. Equations of state for basin geofluids: algorithm review and intercomparison for brines. *Geofluids* 2002;257–71.
- [32] Balke K-D. Das Grundwasser als Energieträger. *Brennstoff-Wärme-Kraft* 1977;29:191–4.
- [33] Arning E, Kölling M, Panteleit B, Reichling J, Schulz HD. Einfluss oberflächennaher Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter [Effect of nearsurface thermal extraction on geochemical processes in aquifer]. *Grundwasser* 2006;11:27–39.
- [34] Chapelle FH. The significance of microbial processes in hydrogeology and geochemistry. *Hydrogeology Journal* 2000;8:41–6.
- [35] Bennett PC, Hiebert FK, Rogers JR. Microbial control of mineral-groundwater equilibria: macroscale to microscale. *Hydrogeology Journal* 2000;8:47–62.
- [36] Brielmann H, Griebler C, Schmidt SI, Michel R, Lueders T. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiology Ecology* 2009;68:273–86.
- [37] Würdemann H, Vieth A, Miethling-Graff R, Seibt A, Wolfram M. Mikrobiologie geothermisch genutzter Aquifere: Untersuchungen zum Einfluss auf die Betriebssicherheit. Karlsruhe: GTV-Tagung; 2006. pp. 141–7.
- [38] York KP, Jahangir ZMG, Solomon T, Stafford L. Effects of a large scale geothermal heat pump installation on aquifer microbiota. In: 2nd Stockholm International Geothermal Conference; 1998. p. 8.
- [39] Adinolfi M, Koch M, Ruck W. Ökologische und mikrobielle Folgen der Wärmespeicherung im Aquifer. Stuttgart: Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. Germany: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München; 1994. pp. 89–106.
- [40] Foster SSD, Chilton PJ. Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 2003;358:1957–72.
- [41] Barth JAC, Filimonau V, Bayer P, Struckmeier W, Grathwohl P. Global water balance. In: Graedel TE, Voet EVD, editors. *Strüngmann Forum Report—linkages of sustainability*. MIT Press; 2010.
- [42] Hähnlein S, Bayer DP, Blum DP, Kübert DM, Hertkorn DSW. Rechtliche Rahmenbedingungen bei der thermischen Grundwasserbewirtschaftung, bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie; 2009. p. 14–21.
- [43] Hähnlein S, Bayer P, Blum P. Review on the international legal status for the thermal use of groundwater. In: *World Geothermal Congress*; 2010.
- [44] ÖWAV. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband [Austrian society of groundwater and waste economy], Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen [Thermal use of groundwater and subsurface—heating and cooling], ÖWAV-RB 207, 2009.
- [45] EU-WFD, European Parliament, European Water Framework Directive 2000/60/EC, 2000.
- [46] EU-GWD, European Union, Groundwater Directive 2006/118/EG, 2006.
- [47] WHG, Deutscher Bundestag, Wasserhaushaltsgesetz, 2002.
- [48] Danielopol DL, Griebler C, Gunatilaka A, Notenboom J. Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental Conservation* 2003;30:104–30.
- [49] Griebler C, Lueders T. Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. *Freshwater Biology* 2009;54:649–77.
- [50] CEN. Refrigerating systems and heat pumps—safety and environmental requirements. Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria. European Committee for Standardization, EN 378; 2008.
- [51] CEN. Drill rigs - Safety. European Committee for Standardization, EN 791; 2008.
- [52] Sanner B. Guideline, standards, certification and legal permits for Ground source heat pumps in the European Union. In: 9th International IEA Heat Pump Conference; 2008. p. 9.
- [53] MVV-Consulting, Technical assistance on the standards and codes applied to heating and cooling from renewable energies sector, 2007. p. 72.
- [54] Pasquali R, Goodman R, Bujakowski W, Kepinska B, Pajak L, Holojuch G, et al. GTR-H WP2: Deficient Regulation Questionnaire Feedback Report, 2007. p. 13.
- [55] Goodman R, Pasquali R, Kepinska B, Sanner B, Hámor T, Reay D, et al. GTR-H: geothermal legislation in Europe. In: *World Geothermal Congress*; 2010. p. 5.
- [56] GTR-H, GTR-H WP4: Draft Template Framework, 2009. p. 15.
- [57] VDI, Verein Deutscher Ingenieure, Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen [Part 2: Thermal use of the underground—ground source heat pump systems], VDI-4640/2, 2001.
- [58] Rybach L, Eugster WJ. Sustainability aspects of geothermal heat pumps. In: 27th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering; 2002. p. 50–64.
- [59] Axtmann RC. Environmental impact of a geothermal power plant. *Science* 1975;187:795–803.
- [60] Eugster WJ. Wärmenutzung aus Boden und Grundwasser [Use of heat from subsurface and groundwater]. Bern, Switzerland: Bundesamt für Umwelt; 2009. p. 51.
- [61] Curtis R, John W, Lund B, Sanner L, Rybach G, Hellström. Ground source heat pumps—geothermal energy for anyone, anywhere: current worldwide activity. In: *World Geothermal Congress*; 2005. p. 9.
- [62] Staud R. Der Einfluß der Temperatur auf biologische Abbauprozesse. In: Glatzel W-D, Heise K-D, editors. *Wärmepumpen und Gewässerschutz*. Berlin: Erich Schmidt Verlag; 1979.
- [63] Andrews CB. The impact of the use of heat pumps on ground-water temperatures. *Ground Water* 1978;16:437–43.
- [64] Schippers A, Reichling J. Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. *Grundwasser* 2006;11:40–5.
- [65] Steube C, Richter S, Griebler C. First attempts towards an integrative concept for the ecological assessment of groundwater ecosystems. *Hydrogeology Journal* 2009;17:23–35.
- [66] Chopra PN. Status of the Geothermal Industry in Australia, 2000–2005. In: *World Geothermal Congress 2005*; 2005.
- [67] Lund JW, Freeston DH, Boyd TL. Direct application of geothermal energy: 2005 worldwide review. *Geothermics* 2005;34:691–727.
- [68] Rauch W. Ausbreitung von Temperaturerhöhungen im Grundwasser [Dissertation]. Innsbruck: Universität Innsbruck; 1992.
- [69] Kärntner-Umweltamt, Landesregierung Kärnten, Merkblatt Tiefsonden, 2007.
- [70] BGR-WL, Bulgarien National Assemblée, Water Act (Закон за водите), 2009 [as amended on 12/13.02.09].
- [71] Barokov K, Toshev V. Regulatory framework for thermal waters in Bulgaria. In: *World Geothermal Congress*, 2010; 2010.
- [72] BGR-RASEB, Bulgarien National Assemblée, Law on the Renewable and Alternative Sources of Energy and the Biofuels [Закон за възобновяемите и алтернативни енергийни източници и биогоривата], 2008 [as amended on 14.11.08].
- [73] Bojadgieva K, Hristov H, Hristov V, Benderev A, Toshev V. Geothermal update for Bulgaria (2000–2005). In: *World Geothermal Congress*; 2005.
- [74] Yang H, Cui P, Fang Z. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: a review of models and systems. *Applied Energy* 2010;87:16–27.
- [75] BEK-1206, Danish Parliament, Order on heat abstraction and groundwater cooling plants [Bekendtgørelse om varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg] BEK nr 1206 [24.11.06], 2006.
- [76] Juvonen J. Lämpökaivo - Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, Suomen ympäristökeskus, 2009.
- [77] BBERG, Deutscher Bundestag, Bundesberggesetz, 1980.
- [78] LFNRW, Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 2004. p. 34.
- [79] LFSH, Leitfaden für oberflächennahe Erdwärmeanlagen, Landesamt für Natur und Umwelt, Schleswig-Holstein, 2006. p. 42.
- [80] LFS, Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen, 2007. p. 32.
- [81] LFHH, Leitfaden zur Erdwärmenutzung in Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg, Germany, 2009. p. 42.
- [82] Kübert M, Walker-Hertkorn S, Blum P, Bayer P, Hähnlein S. Praktische Hinweise zur Genehmigungspraxis der thermischen Nutzung des Unter-

- grundbes, bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau. Sonderheft Oberflächennahe Geothermie 2009;8–13.
- [83] Bauer M, Eppinger A, Franßen W, Heinz M, Keim B, Mahler D, et al. Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. Stuttgart: Umweltministerium Baden-Württemberg; 2009, pp34.
- [84] VBI, VBI-Leitfaden Oberflächennahe Geothermie, Verband Beratender Ingenieure, 2008, p. 59.
- [85] VDI, Verein Deutscher Ingenieure, Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrundes - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte [Part 1: Thermal use of the underground—fundamentals, approvals, environmental aspects], VDI-4640/1, 2000.
- [86] VDI, Verein Deutscher Ingenieure, Blatt 3: Thermische Nutzung des Untergrundes - Unterirdische Thermische Energiespeicher [Part 3: Utilization of the subsurface for thermal purposes—underground thermal energy storage], VDI-4640/3, 2001.
- [87] VDI, Verein Deutscher Ingenieure, Blatt 4: Thermische Nutzung des Untergrundes - Direkte Nutzung [Part 4: Thermal use of the underground—direct uses], VDI-4640/4, 2004.
- [88] Fry VA. Lessons from London: regulation of open-loop ground source heat pumps in central London. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 2009;42:325–34.
- [89] Spiccia M, Olivieri R. Inventory of EU legislation on ground coupled heat pumps (GCHPS) 2006;164.
- [90] Szita G. Decreased opportunities for geothermal in Hungary. In: World Geothermal Congress 2005; 2005.
- [91] Ibrahim R, Fauzi F, Suryadarma A. The progress of geothermal energy resources activities in Indonesia. In: World Geothermal Congress; 2005.
- [92] Suryantoro S, Dwipa S, Ariati R, Darma S. Geothermal deregulation and energy policy in Indonesia. In: World Geothermal Congress 2005; 2005.
- [93] Darma S, Harsoprayitno S, Ibrahim HD, Effendi A, Triboesono A. Geothermal in Indonesia: government regulations and power utilities, opportunities and challenges of its development. In: World Geothermal Congress; 2010.
- [94] Rourke FO, Boyle F, Reynolds A. Renewable energy resources and technologies applicable to Ireland. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13:1975–84.
- [95] O'Connell S, Allen A, Cassidy S. Utilisation of geothermal resources in the Irish Republic. In: World Geothermal Congress; 2005.
- [96] Lee J-Y. Current status of ground source heat pumps in Korea. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13:1560–8.
- [97] I-1034, Seimas of the Republic of Lithuania, Underground Law I-1034 1996.
- [98] Gutiérrez-Negrín LCA, Quijano-León JL. Update of Geothermics in Mexico. In: World Geothermal Congress; 2005.
- [99] Heekeren EVv, Snijders AL, Harms HJ. The Netherlands Country Update on Geothermal Energy, Antalya, Turkey; 2005.
- [100] Midttomme K. Norway's geothermal energy situation. In: World Geothermal Congress; 2005.
- [101] Penarroyo FS. Renewable Act of 2008: legal and fiscal implications to Philippine geothermal exploration and development. In: World Geothermal Congress; 2010.
- [102] Rman N, Lapanje A, Prestor J. Hydrogeological expert basis to water permitting in the low temperature geothermal system in the Mura-Zala basin in the NE Slovenia. In: World Geothermal Congress; 2010.
- [103] CH-GSchV, Schweizer Bundesrat, Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober 1998 (Water Protection Order), 1998.
- [104] SGU, Sveriges geologiska undersökning, Normbrunn -97, Kriterier för utförande av energibrunn i berg, 2002.
- [105] SGU, Sveriges geologiska undersökning, Normbrunn -07, Att borra brunn för energi och vatten – en vägledning, 2008.
- [106] Lund JW, Gawell K, Boyd TL, Jennejohn D. The United States of America Country Update 2010. In: Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering; 2010. p. 19.

Stefanie Hähnlein is currently a PhD Student at the Center for Applied Geoscience (ZAG) at the University of Tübingen (Germany). Her PhD is mainly on legal aspects of the use of shallow geothermal energy in Germany and internationally. In 2008, she did her Master of Science in Applied Geosciences at the University of Tübingen.

Peter Bayer has been senior research associate at the Department for Engineering Geology at the ETH Zürich since February 2010. His main activities deal with hydrogeological modeling, technico-economic evaluation as well as environmental system analyses. Special focus has been set on application and further development of environmental assessment methodologies such as in the framework of life cycle assessment (LCA). In 2008, he was a co-founder of the Hydrogeothermics group at the University of Tübingen, Germany. In recent years his research has also been dedicated to computer-based optimization techniques, their implementations for inverse modeling and management in hydrogeology, geothermics and engineering geology.

Philipp Blum has recently been appointed as an assistant professor for engineering geology in the Institute of Applied Geosciences (AGW) at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT). From 2006 to 2010 he was an assistant professor for hydrogeothermics at the Center for Applied Geoscience (ZAG) at the University of Tübingen (Germany). In 2003, as part of the international research project DECOVALEX, he received his PhD on hydromechanical processes in fractured rocks at the School of Earth Sciences at the University of Birmingham (UK). From 2003 to 2005 he worked for URS Deutschland GmbH as project manager and hydrogeologist. His current research interests are contaminant hydrogeology, shallow geothermal energy and engineering geology in porous and fractured rocks.

4 Oberflächennahe Geothermie - aktuelle rechtliche Situation in Deutschland

Originalveröffentlichung erschienen auf www.springerlink.com
Oberflächennahe Geothermie - aktuelle rechtliche Situation in Deutschland
Hähnlein, S., Blum, P., Bayer, P. (2011)
Grundwasser 16 (2), 69-75.

Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland

Shallow geothermal energy—current legal situation

Stefanie Hähnlein, Philipp Blum, Peter Bayer

Dipl.-Geol. S. Hähnlein, Eberhard Karls Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Sigwartstr. 10, 72076 Tübingen, E-Mail: stefanie.haehnlein@ifg.uni-tuebingen.de;

Jun.-Prof. Dr. habil. P. Blum, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften, Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Email: philipp.blum@kit.edu

Dr. Peter Bayer, ETH Zürich, Engineering Geology, Sonneggstrasse 5, 8092 Zürich, Email: bayer@erdw.ethz.ch

Zusammenfassung Die Nutzung der oberflächennahen Geothermie (< 400 m Tiefe) wird durch verschiedene Bundesgesetze wie das Wasserhaushaltsgesetz und das Bundesberggesetz geregelt. Verschiedene Landesgesetze, Erlässe, Richtlinien und Leitfäden ergänzen die Bundesgesetze. Bisher besteht in Deutschland jedoch kein spezielles Gesetz für die flache Geothermie. Die vom Einzelfall abhängigen Auswirkungen auf den Untergrund (z. B. Entwicklung von Temperaturanomalien, Veränderung der Grundwasserökologie) werden nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt. Vereinzelt werden Temperaturgrenzwerte und Mindestabstände als Kriterien herangezogen, um Anomalien einzugrenzen. In der vorliegenden Studie werden die relevanten bundesrechtlichen Regelungen zusammenfassend dargestellt. Ebenso wird ein internationaler Überblick über Temperaturgrenzwerte für das Grundwasser und über Mindestabstände zwischen einzelnen Anlagen gegeben. Dabei zeigt sich, dass sowohl national wie auch international kaum Regelungen zu finden sind bzw. diese sehr heterogen sind. Vor diesem Hintergrund wäre eine grundlegende Überarbeitung, welche die rechtliche Situation homogenisiert sowie negative und nachhaltige Veränderungen auf den Untergrund minimiert, wünschenswert.

Abstract The use of shallow geothermal energy (< 400 m depth) is regulated by different federal laws, as for example the water act and mining act. Yet, there is no special law for shallow geothermal energy. Federal state laws, instructions and guidelines specify them. To restrict temperature anomalies only detached temperature thresholds and minimum distances exist. In this study relevant federal regulations are presented and discussed. In addition, an international overview on temperature thresholds for the groundwater and on minimum distances for ground source heat pump systems is given. It is recognizable that there are national and international only few regulations and that they are also heterogeneous. A fundamental revision is necessary to homogenize the legal situation and to avoid negative effects on the subsurface.

Keywords Geothermal energy, Legislation, Ground source heat pump systems, Groundwater temperature, Minimum distances

Einführung

Im Bereich der Gebäudeklimatisierung bietet die oberflächennahe Geothermie (< 400 m Tiefe) eine interessante Alternative zu herkömmlichen Technologien. Die Zahl der Anlagen stieg in den letzten Jahren kontinuierlich an und erreichte im Jahr 2006 einen ersten Höhepunkt (Sanner et al. 2003, Lund et al. 2004, Mands et al. 2008, Gao et al. 2009, Rafferty 2009, Rumohr 2009, Hähnlein et al. 2010a). Geothermische Energie wird in menschlicher Zeitrechnung als erneuerbar betrachtet, und flache geothermische Anlagen, wie z. B. Erdwärmesonden, können in Deutschland CO₂ Einsparungen von 30 % und mehr gegenüber herkömmlichen Heizanlagen wie Öl und Gas bewirken (Blum et al. 2010, Saner et al. 2010).

Bei flachen oder untiefen geothermischen Anlagen wird grundsätzlich zwischen geschlossenen und offenen Systemen unterschieden. Bei offenen Systemen, wie z. B. Grundwasserwärmepumpen, zirkuliert das Grundwasser zwischen zwei oder mehr Brunnen und wird direkt als Wärmeträger-medium verwendet. Bei den geschlossenen Systemen werden am häufigsten die Erdwärmesonden (EWS) eingesetzt. Dies sind in einem meist vertikalen Bohrloch eingebrachte U-Rohre oder Koaxialrohre aus Kunststoff, meist HDPE (hochdichtes Polyethylen). In der Sonde zirkuliert eine frostsichere Wärmeträgerflüssigkeit, welche die Wärme bzw. Kälte aus dem Untergrund zur Wärmepumpe bzw. zum Kühlsystem des Gebäudes führt. Für private Nutzer mit Einfamilienhaus sind unter den geothermischen Technologien vor allem EWS interessant, da sie einen geringen Flächenbedarf, geringe Betriebskosten sowie eine lange Lebensdauer aufweisen.

Es gilt zu bedenken, dass die geothermische Nutzung Auswirkungen im Untergrund hat. Die Nutzung von geschlossenen und offenen Systemen erzeugt im Untergrund lokale Temperaturanomalien. Wärmeentzug aus dem Untergrund führt zu einer Abkühlung, und man spricht dann von einer „Kältefahne“. Umgekehrt entsteht bei Kühlung und der damit verbundenen Wärmezufuhr in den Untergrund eine „Wärmefahne“. Da in Deutschland und generell in Mitteleuropa v. a. EWS-Anlagen zum Heizen eingesetzt werden, wird im Folgenden vereinfachend nur von Kältefahnen gesprochen. Deren Ausdehnung ist von geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten, wie Porosität, Wärmeleitfähigkeit und -kapazität, Grundwasserfließgeschwindigkeit sowie der entzogenen Gesamtenergie abhängig. Bei konduktivem Wärmetransport breitet sich die Fahne radial um die Sonde aus. Bei dominant konvektivem (advektivem) Wärmetransport entwickelt sich die Fahne parallel zum Grundwasserfluss. Um eine Akkumulation der Kältefahnen und weitere negative Veränderungen auf den Untergrund, wie z. B. auf das Grundwasserökosystem (Brielmann et al. 2009, 2011) zu unterbinden, wurden von Behörden und Gremien Temperaturgrenzwerte für das Grundwasser und Mindestabstände zwischen den Anlagen empfohlen (LAWA 2002). Eine Übersicht und Diskussion der Werte findet sich in Pannike et al. (2006) und Hähnlein et al. (2010b).

Die steigenden Zahlen und häufige Nutzung auf engem Raum bieten ein gewisses Konfliktpotenzial. Dieser Umstand und die Auswirkungen auf das Ökosystem des Untergrundes werden bisher rechtlich nicht umfassend aufgefangen. Um eine Balance zwischen Schutz und Nutzung des Untergrundes zu finden, ist eine Betrachtung der verschiedenen Aspekte erforderlich. Vorliegende Arbeit bietet daher einen Abriss über die aktuelle rechtliche Situation flacher geothermischer Anlagen mit Schwerpunkt auf den zahlreichen bereits installierten EWS in Deutschland. Zusätzlich wird ein Überblick zur Festlegung von Temperaturgrenzwerten auf internationaler Ebene gegeben, der offene Systeme und das Wärmeträgermedium in EWS und deren Mindestabstände einschließt.

Rechtliche Situation in Deutschland

Für die thermische Grundwassernutzung existiert aktuell kein eigenes Gesetz. Rechtliche Rahmenregelungen lassen sich grundsätzlich jedoch aus dem Bundesberg-, Wasserhaushalts-, Bundesnaturschutz-, oder Bundes-Immissionsschutzgesetz ableiten (Abb. 1).

In allen Bundesländern existieren spezielle Leitfäden zur thermischen Grundwassernutzung mit EWS (LFNRW 2004, LFBW 2005, LFN 2006, LFSH 2006, LFRP 2007, LFS 2007, LFSL 2008, LFHH 2009, www.infogeo.de). Außerdem bieten die zugehörigen Landesgesetze und entsprechende Verwaltungsvorschriften Ergänzungen. Kübert et al. (2009) zeigen auf, wie sich länderspezifische Genehmigungsverfahren und deren Anforderungen zum Teil erheblich unterscheiden. In Butscher et al. (2011) wird am Beispiel des Erdwärmekonzepts des Schweizer Kantons Basel-Landschaft dargestellt, wie eine risikoorientierte Bewilligung aussehen kann. Als Beispiel wird ein mögliches Vorgehen bei EWS-Bohrungen in Karstgebieten vorgestellt. Die für EWS relevanten deutschen Bundesgesetze werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Das deutsche Wasserhaushaltsgesetz (WHG 2009) ist das grundlegende Rahmengesetz für den Gewässerschutz. Für die Umsetzung und Ergänzung der rahmenrechtlichen Vorgaben sind die Länder zuständig. Ziel des WHG ist es, durch nachhaltige Bewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, Lebensgrundlage des Menschen sowie als Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu sichern und als nutzbares Gut zu schützen. Dabei sollen vermeidbare Beeinträchtigungen der ökologischen Funktionen der Gewässer und somit auch des Grundwassers unterlassen werden. Die Bewirtschaftung muss so gestaltet

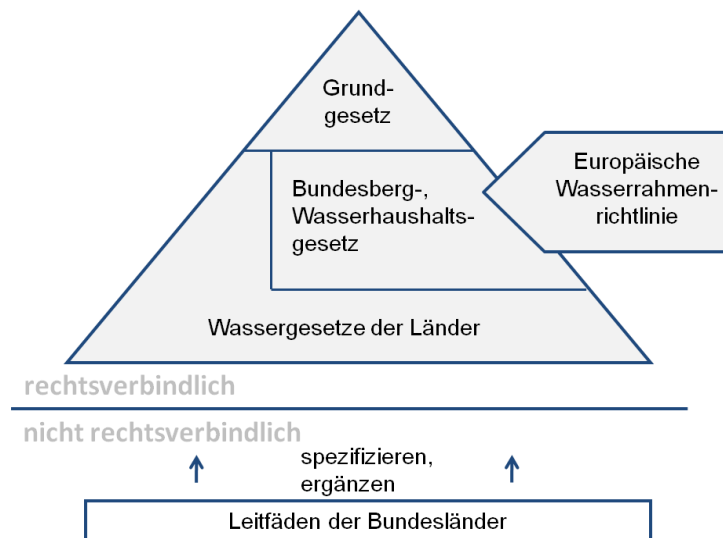


Abb. 1 Die Rechtspyramide stellt die Hierarchie der Regelwerke dar, die für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie durch private Verbraucher von Bedeutung sind.

sein, dass eine nachhaltige Entwicklung der Gewässer gewährleistet ist. Der Einsatz von geothermischen Anlagen (z. B. EWS) stellt einen Benutzungstatbestand bezüglich der Gewässer dar und bedarf daher einer Erlaubnis oder Bewilligung der zuständigen Wasserbehörde. In der ökologisch-rechtlichen Diskussion ist insbesondere die Veränderung der Grundwassertemperatur durch Geothermieanlagen von Interesse, die eine „nachteilige Veränderung“ der Gewässereigenschaften darstellen kann. Nach § 5 WHG gilt grundsätzlich die Sorgfaltspflicht, wonach eine nachteilige Veränderung zu vermeiden ist. Der verwendete Begriff der „schädlichen Veränderung“ ist jedoch bisher nicht genauer definiert.

Das Bundesberggesetz (BBergG 1980) dient der Regelung der Erschließung von Bodenschätzen, der Gewährleistung von Betriebssicherheit, dem schonenden Umgang mit Grund und Boden sowie der Vorsorge gegen Gefahren. Erdwärme gilt als „bergfreier Bodenschatz“, was bedeutet, dass sich das Grundstückseigentum nicht auf die Erdwärme erstreckt. Für das Aufsuchen bedarf es einer Erlaubnis (BBergG 1980). Für die Gewinnung wird eine Bewilligung benötigt, wenn die Erdwärmeanlage über die Grundstücksgrenzen hinausragt, das Nachbargrundstück thermisch oder stofflich beeinträchtigt und die gewonnene Wärme nicht rein grundstücksbezogen eingesetzt wird. Dies ist vor allem bei der tiefen Geothermie, die zur Stromgewinnung dient, der Fall. Das BBergG geht nicht weiter auf bestehende Geothermieanlagen ein und liefert auch keine Vorgaben wie etwa zu konkreten Abständen zwischen einzelnen EWS und großen EWS-Anlagen mit mehreren EWS. Nach dem Lagerstättengesetz besteht eine Anzeigepflicht für das Abteufen von Bohrungen, die im Vorfeld erfolgen muss, und nach Abschluss der Arbeiten sind die Bohrergebnisse dem zuständigen geologischen Dienst der entsprechenden Behörde mitzuteilen (LagerstG 1934, DVGW 2008, Rumohr & Schäfer 2010).

Dem Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG 2009) obliegt es, die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes auf Dauer zu sichern. Die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung ist für Geothermieanlagen im Normalfall nur eingeschränkt von Bedeutung, da sie nicht für Anlagen im Innenbereich gilt. Von Bedeutung kann diese Regelung sein, wenn großflächige Erdwärmesondenfelder auf Freiflächen installiert werden. Für den privaten Anwender (Einfamilienhaus) ist das BNatSchG somit irrelevant.

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchV 2002) soll Menschen, Tiere und Pflanzen, Boden, Wasser und die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorbeugen. EWS fallen daher in den Zuständigkeitsbereich des BImSchG, sie werden jedoch nach der 4. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV 2009) nicht als genehmigungsbedürftige Anlagen aufgeführt, sodass sie keiner bundesimmissionsschutzrechtlichen Erlaubnis bedürfen (BImSchV 2009).

Zweck des Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG 1998) ist es, die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen. Die Bodenfunktionen sind vielfältig und für das menschliche Leben und die Natur unersetzlich. Durch die Erzeugung von Biomasse und Lebensmitteln sowie als Wasser- und Nährstofflieferant bildet der Boden bzw. Untergrund die Lebensgrundlage für Mensch und Natur. Solange es keine rechtliche Festlegung gibt, ab welcher Temperaturveränderung von einer Beeinträchtigung der Bodenfunktionen gesprochen werden kann, greift das Bundesbodenschutzgesetz nicht direkt. Es wird für Erdwärmeanlagen in Abgrenzung zum Bundesberggesetz nur subsidiär und erläuternd betrachtet (LABO 2000).

Die wichtigste Trinkwasserressource (TrinkwV 2001) stellt das Grundwasser dar. Daher sollte auch die Trinkwasserverordnung Beachtung finden. Ihr Zweck ist es, die Gesundheit der Menschen vor den nachteiligen Einflüssen, die sich aus Verunreinigungen von Wasser ergeben, durch Gewährleistung seiner Genusstauglichkeit und Reinheit zu schützen. In Bezug auf geothermische Anlagen ist daher § 4 von Bedeutung, nach dem das Wasser frei von Krankheitserregern, genusstauglich und rein sein muss. Des Weiteren dürfen keine chemischen Stoffe in Konzentrationen vorhanden sein, die eine Schädigung der menschlichen Gesundheit besorgen lassen (§ 6 TrinkwV).

Ökologische Kriterien

Für die Bewertung von Geothermieranlagen aus ökologischer Perspektive ist das Wasserhaushaltsgesetz maßgebend. In dessen Sinne können die zwei folgenden Punkte Ursache einer möglichen Beeinträchtigung sein:

Erstens kann es bei Errichtung und Betrieb von geothermischen Anlagen zum Eintrag relevanter Mengen an bedenklichen Fremdstoffen, beispielsweise kritischer Wärmeträgermedien, in die Umwelt kommen (z. B. Klotzbücher et al. 2007; Saner et al. 2010). Dies ist jedoch nur bei unsachgemäßen Arbeiten bzw. bei Unfällen oder Störfällen der Fall. Als Wärmeträgerflüssigkeit werden Gemische eingesetzt, die in Wassergefährdungsklassen (WGK) eingestuft sind. Meist werden Glykol-Wasser-Gemische verwendet, die der Wassergüteklasse (WGK) 1 zuzuordnen sind. Darin enthaltene Frostschutzmittel sind z. B. Ethylenglykol, Betain oder Kaliumkarbonat-Sole. Für Hessen beispielsweise liegen für etwa die Hälfte der EWS-Anlagen Daten über die Wärmeträgermittel vor. Demnach wird dort zu 90 % Monoethylenglykol, gefolgt von Propylenglykol mit rund 3 % eingesetzt (Rumohr 2009). Weitere Additive als Korrosionsschutz, Stabilisatoren oder zur Schaumreduzierung sind in Konzentrationen von 3 bis 4 % enthalten. In Klotzbücher et al. (2007) wurden verschiedene Wärmeträgermedien auf ihre Bedenklichkeit hin untersucht. Die Studie zeigt, dass die meist eingesetzten Glykole in vielen oxidischen und anoxischen Umgebungen biologisch im Grundwasser abbaubar sind. Da sie zusätzlich in geringen Konzentrationen verwendet werden, ist das Risiko einer Schädigung eher gering. Auch eine ökobilanzielle Betrachtung von EWS-Systemen zeigte auf, dass potenzielle Umweltbeeinträchtigungen durch die Wärmeträgerflüssigkeit bei einer ganzheitlichen Bewertung vernachlässigbar sind (Saner et al. 2010).

Als zweiter Punkt sind – mit deutlich größerer Bedeutung, da sie dauerhaft und immer auftreten – die anhaltenden und variierenden Kältefahnen im Umfeld von Anlagen von Interesse. Entsprechend dem Wasserhaushaltsgesetz müssen schädliche Veränderungen der physikalischen, biologischen und chemischen Eigenschaften vermieden werden. Nach der Richtlinie VDI 4640 des Verbands Deutscher Ingenieure (VDI) stellt die geringfügige Temperaturveränderung beim Betrieb von Einzelanlagen bis 30 kW Heizleistung keinen Benutzungstatbestand dar (VDI 2010). Die Leitfäden für EWS einiger Bundesländer richten sich bei ihrer Beurteilung nach der VDI 4640 (VDI 2001) und betrachten die Temperaturbeeinflussung und ihre möglichen Auswirkungen als generell unerheblich (LFRP 2007, LFS 2007), gering (LFSL 2008) oder erwähnen sie gar nicht. In Baden-Württemberg wird die Erwärmung durch EWS nicht generell als schädlich angesehen (LFBW 2005). Die Stadt Stuttgart hat hingegen einen eigenen Leitfaden, in dem definiert wird, ab wann eine verträgliche Bewirtschaftung endet (Hellenthal 2006). Dies ist der Fall, wenn bei Wärmeentzug (Wärmeeinleitung) „in der Toleranzentfernung von 50 m der Untergrund bzw. das Grundwasser um 2 K kälter (wärmer) als die mittlere normale Jahresdurchschnittstemperatur ist“ (Hellenthal 2006).

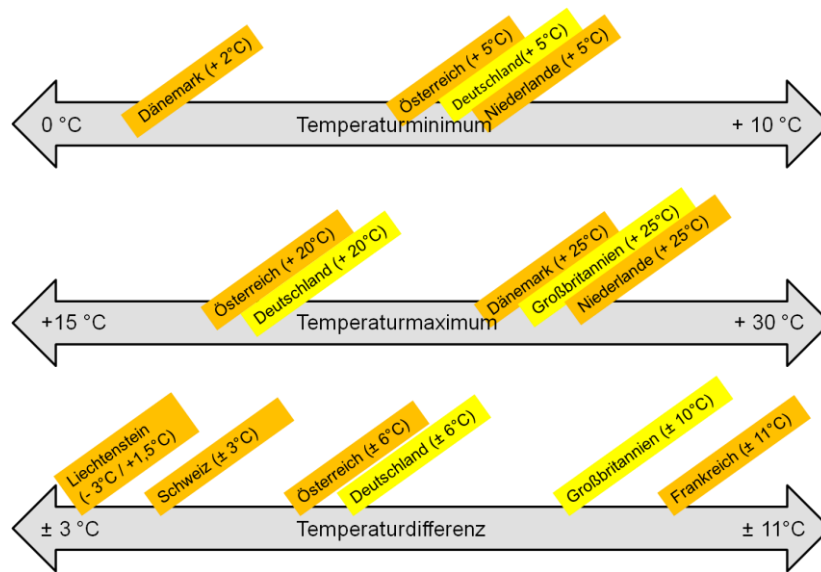


Abb. 2 Absolute und relative Temperaturgrenzwerte für das Grundwasser.

Ähnlich wie in der Stadt Stuttgart werden national und international Temperaturgrenzwerte für Erwärmung und Abkühlung des Grundwassers (Abb. 2) sowie für das Wärmeträgermedium in geschlossenen Systemen festgelegt.

Die Temperaturgrenzwerte beziehen sich hauptsächlich auf das Grundwasser und sind somit vorrangig für offene Systeme von Interesse (Abb. 2). In Deutschland sind die Werte in der VDI 4640 festgehalten. Als maximale Temperaturdifferenz werden hier ± 6 K akzeptiert. Dabei darf das Grundwasser nicht auf mehr als 20 °C aufgeheizt und nicht tiefer als 5 °C abgekühlt werden. Die ansonsten vorgegebenen Werte sind technische Temperaturgrenzwerte, die sich auf das Wärmeträgermedium beziehen und ebenfalls aus der VDI 4640 stammen. Die akzeptierte Temperaturdifferenz liegt bei ± 11 K und ± 17 K im Wochenmittel bzw. als kurzfristige Spitzenbelastung.

Interessant ist auch, Beispiele aus dem europäischen Raum zu erwähnen (Abb. 2). Laut Grundwasserrichtlinie 80/68/EWG und EU-Wasserrahmenrichtlinie gilt der Wärmeeintrag in das Grundwasser generell als Verschmutzung, und für Grundwasser gilt das Verschlechterungsverbot. Trotzdem sind derzeit in nur wenigen Ländern rechtlich bindende Temperaturgrenzwerte für das Grundwasser festgelegt. Diese sind in Abb. 2 graphisch dargestellt. Des Weiteren bestehen nur in Österreich, Dänemark und Deutschland Grenzwerte für geschlossene Systeme (d. h. EWS). Zusätzlich sind diese Grenzwerte nur in Dänemark rechtlich bindend. Die akzeptierte Temperaturdifferenz in Österreich liegt bei 15 K, die maximale Temperatur bei 25 °C/ 35 °C in Dänemark/Österreich und die minimale Temperatur bei 0 °C im Wochenmittel in Österreich beziehungsweise 2 °C in Dänemark (Hähnlein et al. 2010a).

Als weiteres Mittel, um negative Veränderungen auf den Untergrund, primär eine Akkumulation der Kältefahnen und eine Beeinflussung benachbarter EWS bzw. weiterer Systeme zu unterbinden, wurden Mindestabstände eingeführt (Tab. 1). Dabei ist hauptsächlich zwischen den Grenzabständen (Abstand zwischen Anlage und Grundstücksgrenze) und den Sondenabständen (Abstand zwischen zwei Anlagen) zu unterscheiden. Als Bezugspunkt dient also entweder eine weitere EWS oder die Grundstücksgrenze. Die Vorgaben der Bundesländer in Deutschland variieren zwischen 5 m und 10 m. Auch hier lohnt sich ein Blick auf die internationale Situation. Als Bezugspunkte dienen hier zusätzlich beispielsweise Trinkwasserbrunnen oder Abwasserleitungen. In der Mehrheit werden jedoch ebenfalls Grenz- oder Sondenabstände festgelegt, in einer Spanne zwischen $2,5$ m und 20 m (Hähnlein et al. 2010a).

Tab. 1 Mindestabstände für geschlossene Systeme in Deutschland und international.

Land	Mindestabstand	Bezugspunkt
China ^a	3-6 m	Erdwärmesonde
Dänemark ^a	300 m	Trinkwasserbrunnen
Deutschland ^b		
Baden-Württemberg	10 m	Erdwärmesonde
Bayern	6 m 5 m	Erdwärmesonde Grundstücksgrenze
Berlin	5 - 6 m 5 m	Erdwärmesonde Grundstücksgrenze
Brandenburg	5 - 6 m	Erdwärmesonde
Bremen	k. A.	k. A.
Hamburg	5 - 6 m 5 m	Erdwärmesonde Grundstücksgrenze
Hessen	5 m	Grundstücksgrenze
Mecklenburg-Vorpommern	5 - 6 m 5 m	Erdwärmesonde Grundstücksgrenze
Niedersachsen	5 m 10 m	Sonde der gleichen Anlage Sonde der nächsten Anlage
Nordrhein-Westfalen	k. A.	k. A.
Rheinland-Pfalz	10 m 3 m	Erdwärmesonde Grundstücksgrenze
Saarland	5 m	Sonde der gleichen Anlage
Sachsen	5 - 6 m	Erdwärmesonde
Sachsen-Anhalt	k. A.	k. A.
Schleswig-Holstein	5 - 6 m	Erdwärmesonde
Thüringen	5 - 6 m 5 m	Erdwärmesonde Grundstücksgrenze
Finnland ^a (u. a.)	3 m 5 m 10 m	Gebäude Wasser- und Abwasserleitung Grundstücksgrenze
Liechtenstein ^a	3 m 6 m	Grundstücksgrenze Erdwärmesonde
Österreich ^a	2,5 m	Grundstücksgrenze
Schweden ^a	10 m 20 m 30 m	Grundstücksgrenze Erdwärmesonde Trinkwasserbrunnen
Schweiz ^a	3 - 4 m 5 - 8 m	Grundstücksgrenze Erdwärmesonde
Tschechische Republik ^a	5 m	Grundstücksgrenze

k. A. keine Angabe

Werte zusammengefasst aus:

^a (Hähnlein et al. 2010a)

^b (Hähnlein et al. 2010b)

^c www.gdfb.de

Zusammenfassung und Diskussion

Es lässt sich zusammenfassen, dass in Deutschland verschiedene Bundesgesetze einen rechtlichen Rahmen für die oberflächennahe Erdwärmennutzung formulieren, jedoch keine Vorgaben bzw. Grenzwerte (z. B. Mindestabstände und Temperaturgrenzwerte) definieren. Dabei sind das Bundesberggesetz und das Wasserhaushaltsgesetz hervorzuheben. Das Wasserhaushaltsgesetz und die Trinkwasserverordnung stellen rechtliche Kriterien auf, mit denen das Grundwasser vor Verschmutzungen geschützt wird. Um deren Einhaltung zu sichern und möglichen Schädigungen durch Kältefahnen und den Auswirkungen von Leckagen Einhalt zu gebieten, werden Temperaturgrenzwerte für das Grundwasser und Mindestabstände zwischen den Anlagen in zahlreichen Leitfäden der Länder oder technischen Empfehlungen festgelegt. Die Mindestabstände liegen in den meisten Fällen bei 5 m zur nächsten Erdwärmesonde (EWS).

In anderen Ländern gelten weitere Kriterien. In Finnland z. B. werden zusätzlich noch Wasser- und Abwasserleitungen als Referenzpunkte für Mindestabstände berücksichtigt. Die absoluten Temperaturgrenzwerte für das Grundwasser bei geschlossenen Systemen variieren zwischen +2°C (Dänemark) und +5 °C (z. B. in den Niederlanden) als Mindesttemperatur. Bei Erwärmung des Grundwassers dürfen 20 °C beispielsweise in Österreich und 25 °C in Großbritannien oder in den Niederlanden nicht überschritten werden. Die Grenzwerte in Österreich und in den Niederlanden sind rechtlich bindend, in Großbritannien hingegen wird ein Richtwert von der nationalen Umweltbehörde bisher lediglich empfohlen. Eine deutlich größere Spannweite weisen dagegen die relativen Grenzwerte auf. So darf in Liechtenstein das Grundwasser um nicht mehr als 3 K abgekühlt und nur um 1,5 K aufgewärmt werden. Frankreich zeigt sich in diesem Punkt am liberalsten und erlaubt eine Temperaturveränderung um ± 11 K. Diese Werte zeigen, wie heterogen sich die Regelungen national wie auch international darstellen. Im internationalen Vergleich lässt sich feststellen, dass vor allem in europäischen Ländern rechtliche Regelungen (Gesetze, Erlässe, Richtlinien und Normen) bestehen, da hier oberflächennahe geothermische Anlagen häufiger genutzt werden als in anderen Gebieten mit Schwerpunkt auf tiefe Geothermie, wie beispielsweise Neuseeland, Indonesien oder Mittelamerika.

Ein kritischer Punkt ist die Definition geeigneter Grenzwerte für die Bewertung von Temperaturänderungen durch den Betrieb von EWS. Studien haben gezeigt, dass sich unter Großstädten wie beispielsweise Köln (Balke 1977, Zhu et al. 2010) Wärmeinseln bilden. Hier ist der Untergrund bereits um 3 bis 5 K wärmer als in den umliegenden ländlichen Gebieten. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit absolute Grenzwerte sinnvoll sind oder worauf sie sich beziehen sollen, auf die bereits anthropogen veränderte oder die natürliche, d. h. ungestörte Temperatur.

Für Deutschland sollten die rechtlichen Rahmenbedingungen für die oberflächennahe Geothermie aus Wasserhaushaltsgesetz, Bundesberggesetz und der Trinkwasserverordnung zusammengeführt und u. U. angepasst werden, indem die rechtlichen Regelungen und Genehmigungsverfahren mindestens bundesweit vereinheitlicht werden. Bestehende Regelungen, wie die grundstücksbezogene Nutzung sowie der Ausschluss thermischer Beeinträchtigungen von Nachbargrundstücken, erschweren den Einsatz oberflächennaher und vor allem offener geothermischer Anlagen in Neubaugebieten mit kleinen Grundstücksparzellen und im urbanen Raum. Langfristig wäre daher eine 3D-Planung und entsprechendes Management für die thermische Nutzung des Untergrundes sinnvoll, die sich an verbesserten und neuen bundesrechtlichen Rahmenbedingungen orientiert. Damit könnte unter gleichen rechtlichen Voraussetzungen lokalen Unterschieden Rechnung getragen und gleichzeitig eine am Gefährdungspotenzial und Ressourcenschutz orientierte Bewilligungspraxis entwickelt werden, ähnlich wie sie für den Schweizer Kanton Basel-Landschaft vorgestellt wurde (Butscher et al. 2011). Es bleibt des Weiteren zu überlegen, ob ein eigenständiges Geothermiegesetz analog zum Bundesberggesetz und subsidiär zum Wasserhaushaltsgesetz oder eine ergänzende Verordnung sinnvoll wäre, um die Nutzung der oberflächennahen Erdwärme nachhaltig zu gestalten.

Danksagung Dank geht an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die Finanzierung von Frau Hähnlein (Promotionsstipendienprogramm) sowie an die beiden Gutachter und Frau Würdemann für die konstruktiven Anregungen.

Literatur

- Balke, K.-D.: Das Grundwasser als Energieträger. *Brennst. Wärme Kraft* **29**(5), 191–194 (1977)
- BergG: Bundesberggesetz. Deutscher Bundestag (1980)
- BodSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BodSchG). Deutscher Bundestag (1998)
- BImSchG: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz). Deutscher Bundestag (2002)
- BImSchV: Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Art. 1 d. V zur Neufassung und Änderung von Verordnungen zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes) (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV). Deutscher Bundestag (2009)
- Blum, P., Campillo, G., Münch, W., Kölbl, T.: CO₂ savings of ground source heat pump systems—a regional analysis. *Renew. Energy* **35**(1), 122–127 (2010)
- BNatSchG: Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz). Deutscher Bundestag (2009)
- Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lueders, T.: Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiol. Ecol.* **68**(3), 273–286 (2009)
- Brielmann, H., Lueders, T., Schreglmann, K., Ferraro, F., Blum, P., Bayer, P., Hammerl, V., Griebler, C.: Oberflächennahe Geothermie und ihre potentiellen Auswirkungen auf die Grundwasserökologie. *Grundwasser* **16**(2) (2011)
- Butscher, C., Huggenberger, P., Auckenthaler, A., Bänninger, D.: Risikoorientierte Bewilligung von Erdwärmesonden. *Grundwasser* **16**(1), 16–34 (2011). doi:10.1007/s00767-010-0154-5
- DVGW: Positionspapier zum Thema „Erdwärmennutzung in Trinkwassereinzugsgebieten“. 17 S. (2008)
- Gao, Q., Li, M., Yu, M., Spitler, J.D., Yan, Y.Y.: Review of development from GSHP to UTES in China and other countries. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **13**, 1383–1394 (2009)
- Hähnlein, S., Bayer, P., Blum, P.: International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **14**(9), 2611–2625 (2010a)
- Hähnlein, S., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., Grathwohl, P.: Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden (Cold plumes in groundwater for ground source heat pump systems). *Grundwasser* **15**(2), 123–133 (2010b)
- Hellenthal, N.: Nutzung der Geothermie in Stuttgart. 89 S. Amt für Umweltschutz, Stuttgart (2006)
- Klotzbücher, T., Kappler, A., Straub, K.L., Haderlein, S.B.: Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. *Geothermics* **36**, 348–361 (2007)
- Kübert, M., Walker-Hertkorn, S., Blum, P., Bayer, P., Hähnlein, S.: Praktische Hinweise zur Genehmigungspraxis der thermischen Nutzung des Untergrundes. *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie*, 8–13 (2009)
- LABO: Abgrenzung zwischen Bundes-Bodenschutzgesetz und Bundesberggesetz (2000)
- LagerstG: Gesetz über die Durchforschung des Reichsgebietes nach nutzbaren Lagerstätten (Lagerstättengesetz). Deutscher Bundestag (1934)
- LAWA: Anforderungen an Erdwärmepumpen, 5 S. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2002)
- LFBW: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. Umweltministerium Baden-Württemberg, 28 S. Stuttgart (2005)
- LFHH: Leitfaden zur Erdwärmennutzung in Hamburg. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, 42 S. Hamburg, Deutschland (2009)
- LFN: Leitfaden Erdwärmennutzung in Niedersachsen. Niedersächsisches Umweltministerium, 20 S. (2006)
- LFNRW: Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Nutzung von oberflächennaher Erdwärme.

- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 34 S. (2004)
- LFRP: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz, 24 S. Mainz (2007)
- LFS: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen, 32 S. Dresden (2007)
- LFSH: Leitfaden für oberflächennahe Erdwärmeanlagen. Landesamt für Natur und Umwelt, Schleswig-Holstein, 42 S. Flintbek (2006)
- LFSL: Leitfaden Erdwärmennutzung. Ministerium für Umwelt, Saarland, 20 S. Saarbrücken (2008)
- Lund, J.W., Sanner, B., Rybach, L., Curtis, R., Hellström, G.: Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview. *GHC Bulletin* September 10 (2004)
- Mands, D.E., Sauer, M., Grundmann, E., Langguth, K., Sanner, D.B., Gäbler, W.: Stand der technischen Entwicklung oberflächennaher Geothermie in Deutschland. *bbr* 12, 56–65 (2008)
- Pannike, S., Kölling, M., Panteleit, B., Reichling, J., Scheps, V., Schulz, H.D.: Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten (Influence of hydrogeological parameters on temperature variations due to borehole heat exchangers). *Grundwasser* 11(1), 6–18 (2006)
- Rafferty, K.: Ground water issues in geothermal heat pump systems. *Ground Water* 41, 408–410 (2009)
- Rumohr, S.: Nutzung der oberflächennahen Geothermie in Hessen – Zahlen und Kenngrößen. *bbr* 3, 46–52 (2009)
- Rumohr, S., Schäfer, I.: Nutzen der Regelungen des Lagerstättengesetzes für die Geothermiebranche. *bbr* 60, 22–27 (2010)
- Saner, D., Juraske, R., Kübert, M., Blum, P., Hellweg, S., Bayer, P.: Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallowgeothermal systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14(7), 1798–1813 (2010)
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinós, D., Rybach, L.: Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics* 32, 579–588 (2003)
- TrinkwV: Trinkwasserverordnung. Deutscher Bundestag (2001)
- VDI: Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte (Part 1: Thermal use of the underground—Fundamentals, approvals, environmental aspects). Verein Deutscher Ingenieure (2010)
- VDI: Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen (Part 2: Thermal use of the underground—Ground source heat pump systems). Verein Deutscher Ingenieure (2001)
- WHG: Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das durch Artikel 12 des Gesetzes vom 11. August 2010 (BGBl. I S. 1163) geändert worden ist. Deutscher Bundestag (2009) Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K.-D., Bayer, P.: Geothermal potential of urban heat Islands. *Environ. Res. Lett.* 5, 044002 (2010)

5 Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy

Originalveröffentlichung erschienen unter
Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy
Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., Blum, P. (2013)
Energy Policy 59, 914-925.

Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy

Stefanie Hähnlein ^{a,*}, Peter Bayer ^b, Grant Ferguson ^c, Philipp Blum ^d

^a University of Tübingen, Center for Applied Geoscience (ZAG), Sigwartstraße 10, 72076 Tübingen, Germany

^b ETH Zürich, Engineering Geology, Sonneggstrasse 5, 8092 Zürich, Switzerland

^c University of Saskatchewan, Department of Civil and Geological Engineering, 57 Campus Drive, Saskatoon, SK S7N 5A9, Canada

^d Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Applied Geosciences (AGW), Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Germany

*Corresponding author. University of Tübingen. Tel.: +49-7071-2973185, Fax: + 49-7071-295059; E-mail: stefanie.haehnlein@uni-tuebingen.de

Abstract

Shallow geothermal energy is a renewable energy resource that has become increasingly important. However, the use has environmental, technical and social consequences. Biological, chemical, and physical characteristics of groundwater and subsurface are influenced by the development of this resource. To guarantee a sustainable use it is therefore necessary to consider environmental and technical criteria, such as changes in groundwater quality and temperature. In the current study a comprehensive overview of consequences of geothermal systems in shallow aquifers is provided. We conclude that there is still a lack of knowledge on long-term environmental consequences. Due to local differences in geology and hydrogeology as well as in technical requirements, it is not recommendable to define only static regulations, such as fixed and absolute temperature thresholds. Flexible temperature limits for heating and cooling the groundwater and subsurface are therefore advisable. The limits should be oriented on previously undisturbed temperatures, and chemical, physical and biological conditions of aquifers. Based on these findings, recommendations for a sustainable policy for shallow geothermal systems are provided including a potential legal framework for a sustainable use.

KEYWORDS: Geothermal energy; Sustainable legislation; Heat pump systems;

Introduction

Geothermal energy is one of the rising renewable energies. Low-enthalpy shallow geothermal energy (<400 m depth) is an attractive alternative to fossil resources, especially for the heating and cooling of buildings. The number of geothermal installations has been continuously rising for the past 15 years (Bayer et al., 2012; Lund et al., 2011; Lund et al., 2004; Rybach, 2010; Sanner et al., 2003). In general, it can be distinguished between open and closed geothermal systems, with the latter being mainly ground source heat pump (GSHP) systems. GSHP systems have commonly one or more vertical borehole heat exchangers (BHE) with a circulating heat carrier fluid inside one or more closed pipes that are operated in a closed loop. By continuous circulation, the fluid transports the heat from the subsurface to the heating system of the building, where a heat pump is often applied. If the hydrogeological and hydrochemical conditions are suitable, the energy can also be extracted in an open loop, directly using the groundwater. These applications are called groundwater heat pump (GWHP) systems. Another categorization can be found, which is based on the operation mode and whose variants are distinguished from GSHPs and GWHPs, which are specifically utilized for heat or cold storage. Borehole thermal energy storage (BTES) systems, equivalent to GSHP systems, and aquifer thermal energy storage (ATES) systems, equivalent to GWHP systems, are sub-

groups of underground thermal energy storage (UTES) systems, which use the same technology, but are mainly designed to store energy (e.g., Palmer et al., 1992).

The geothermal use of the shallow subsurface can result in local temperature anomalies in the subsurface and the groundwater (e.g., Ferguson and Woodbury, 2006; Hähnlein et al., 2010b; Palmer et al., 1992; Pannike et al., 2006; Rybach and Eugster, 2010). These anomalies are often referred to as cold plumes in case of heat extraction, or heat plumes in case of heat injection (e.g., Hähnlein et al., 2010b; Pannike et al., 2006).

Decreasing or increasing temperatures influence chemical (Arning et al., 2006; Brons et al., 1991; Griffioen and Appelo, 1993), biological (Briemann et al., 2009; Briemann et al., 2011; Hall et al., 2008) and physical properties of groundwater (Balke, 1978; Bonte et al., 2011b). Such interventions into the environment may become critical and substantially alter the natural conditions. According to the European environmental policy, these impacts should be minimized on a low level that no detrimental effects can occur (EU-WFD, 2000). At the same time, worldwide energy demand is rising and the popularity of renewables is spurred on by the need of saving or reducing greenhouse gas emissions. Thus, a balance between these interests, i.e. minimizing detrimental effects of renewable energy technologies and rising energy demand, is desirable.

Groundwater has many functions for the biosphere. For example, in Europe about 75% of the habitants and estimated 50% of the world's population are dependent on groundwater as drinking water resource (Brandt and Henriksen, 2003; Danielopol et al., 2008; European-Commission, 2011). In addition, aquifers are habitats for flora and fauna, and is the Earth's largest reservoir of liquid fresh water (Boulton, 2005; Danielopol et al., 2003). For humans, groundwater offers a broad spectrum of ecosystem services and probably the most important one is its role as a fresh water resource. Therefore, the use of the subsurface as a freshwater and energy reservoir has to be well managed. This makes it necessary to design a sustainable use of shallow geothermal energy (Axelsson et al., 2010; Bonte et al., 2011b; Ferguson and Woodbury, 2006), which is also declared by the European Geothermal Energy Council (EGEC, 2006). This may be an intricate task, especially when different system types have to be integrated or even compete with each other. For example, in land planning of urban areas, where aquifer remediation is required, infrastructure such as transportation tunnels and sanitation are foreseen and geothermal energy systems are integrated (Brandl, 2006; Schädler et al., 2011). Bonte et al. (2011b) elaborates on the possible conflicts of use between subsurface functions and groundwater, such as ATEs versus water supply or gas storage. In Bonte et al. (2011a) they focus on the effects on groundwater as drinking water source. They conclude that ATEs systems have impacts on groundwater and that risk management strategies have to be developed for shallow geothermal storage systems.

In our study, environmental and technical, as well as social and policy aspects are reviewed, which are relevant for the entire spectrum of sustainable thermal use of the shallow groundwater and subsurface. Subsequently, different definitions of sustainability are discussed, and then a possible policy framework is developed that is based on the precautionary principle. Finally, recommendations for a legal policy are deduced.

Definition of sustainability

Geothermal energy is regarded as an environmentally friendly (Axelsson and Stefánsson, 2003; Blum et al., 2010), renewable and sustainable energy (Rybach and Mongillo, 2006). *Environmental friendliness* of a potentially green technology is commonly quantified within a life cycle assessment (LCA) framework, including, for example, a CO₂ balance (Bayer et al., 2012; Saner et al., 2010). *Renewable* refers to the natural state of the energy and describes a characteristic of the resource (Rybach and Mongillo, 2006). *Sustainable* applies to the way of how the resource is used (Axelsson, 2010). However, there are diverse and controversial definitions of sustainability (e.g., Mihelcic et al., 2003; Wright, 1998). In fact, the terms renewable and sustainable are dependent on each other, and the difference is not that apparent, for instance, when the geothermal resource is overexploited. In such a case, the extracted energy cannot naturally be replenished, and through this unsustainable use, the geothermal source becomes exhaustible, which is typical for non-renewables. Consequently, the use-mode defines the renewability of the source.

Further, the environmental performance is often included in definitions of sustainability, which is expanded to include environmental impacts or merits (e.g., Preene, 2008; Younger, 2008). This reflects that the way a resource is used, and the applied technology and strategy, are determining for the associated primary or secondary environmental impacts. This overlap, therefore, is inevitable and a combined view of sustainability and renewability is reasonable, as a technology with poor environmental performance can hardly be evaluated as sustainable. In the following we categorize technical, ecological and social sustainability. Technical sustainability refers to the production ability and ecological sustainability to the effect of primary environmental consequences. The original idea of social sustainability refers to the social life of state or society. This can be broken down to the level of direct neighborhood and then includes neighborhood dissent, potentially caused by interferences between geothermal systems. This can also be expanded to all social effects, such as financial, caused by the use of shallow geothermal energy.

In the sense of the European Groundwater Act, the aim of sustainable use of shallow geothermal energy is maintaining a good status of the resources (subsurface and groundwater) (EU-GWD, 2006). This leaves considerable freedom for the selection of indicators that measure a satisfactorily "good status". The original definition of "sustainability", given by the Brundtland Commission (World Commission on Environment and Development, 1987) is: "Meeting the needs of the present generation without compromising the needs of future generations". This definition also includes economical, ecological and social aspects (UN, 2002). However, referring to geothermal energy, an eminent definition is related to the production ability and thus, represents a technical perspective: "sustainability means the ability of the production system to sustain production levels over long periods" (Rybach, 2003; Rybach and Mongillo, 2006). Preene (2008) adds to this definition the requirement of flexibility in response to any future changes in operation. Rybach and Eugster (2010) suggest that "for each geothermal system and for each mode of production, there exists a certain level of maximum energy production, below which it will be possible to maintain constant energy production from the system for a very long time (100-300 years)". This technical interpretation of sustainability is oriented at the extractable energy of the natural system and is suitable especially for deep production systems. In Axelsson (2010), four modes for sustainable deep and/or high enthalpy geothermal utilization, based on the definition above, are presented: (i) constant production on the sustainable level, where sustainability is related to the production ability of the system over a long period; (ii) stepwise increasing of production until sustainable level is achieved; (iii) cyclic production (with an alternation of excessive production and periods of dormancy to allow for recovery); and (iv) an excessive production followed by a reduced, steady production. In principle, these modes can be adapted to the production of shallow geothermal energy with shorter production cycles and lifetimes.

Above mentioned descriptions of sustainability are all focused on reaching and maintaining a high efficiency by a technically robust geothermal system (technical sustainability). For a specific case, this requires energy-balance calculations, consideration of normal, peak demand and paused operation mode, and reliable predictions for the entire lifetime of a system. Social and ecological aspects are not covered in this definition. According to Rybach and Eugster (2010), this is due to the time-variability of these criteria, having in mind that shallow geothermal installations usually operate for decades. Another reason is that productivity and technical performance can be quantitatively measured and predicted by engineers, based on standard simulation techniques or rules of thumb. Long-term productivity has a direct economic meaning, as it directly influences the profit and thus, is crucial for system design. Social criteria appear much more difficult to specify. They may vary significantly between different communities and finally, are not of primary importance for cost-benefit calculations. This also applies to ecological aspects, which are rarely discussed in the context of shallow geothermal energy.

Consequences of shallow geothermal energy use

Assessment of the application or renewability of the resource, with respect to sustainability, means putting values and weights on identified consequences of shallow geothermal energy development (Figure 1). There are many different ways to classify these consequences, and the most primary ones at the place of operation are environmental consequences, which are of physical, chemical and biological nature. Although the underlying processes are strongly coupled, this differentiation is considered the most suitable one. Bonte et

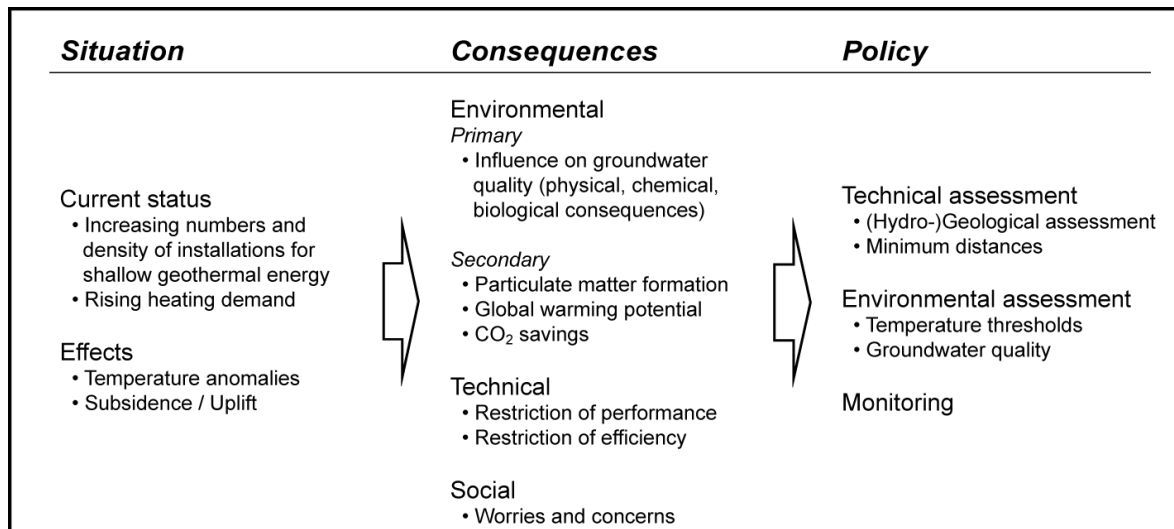


Figure 1: Situation, consequences and recommendations for a policy on the sustainable thermal use of shallow geothermal energy.

al. (2011b), who focused on underground thermal energy storages (UTES) in Europe, particularly in the Netherlands, considered various environmental risks using similar categories, such as hydrological, thermal, chemical and microbiological impacts. They provided a qualitative overview of the negative effects of UTES, also including an estimation of the probability of occurrence.

Physical consequences: The use of geothermal systems results in local temperature anomalies in the subsurface and groundwater (e.g., Banks, 2009; Ferguson and Woodbury, 2006; Molina-Giraldo et al., 2011a; Palmer et al., 1992; Warner and Algan, 1984). In UTES systems, injection temperature can reach up to 150°C, or it is chilled (6°C to 12°C) (Bridger and Allen, 2005). Almost all ATEs systems in the Netherlands have a temperature range of 5°C to 25°C (Bonte et al., 2011a), which in comparison is very low. For most seasonal aquifer thermal energy storage (SATES) (injecting in summer, recovery in winter or vice versa) only limited temperature changes ($\Delta T < 9 \text{ K} / 6 \text{ K}$) between warm ($< 20 \text{ °C}$) and cold well (around 5 °C) for an undisturbed groundwater temperature of around 11 °C occur (Zuurbier et al., 2013). Field applications with a GWHP system like the Royal Festival Hall in London showed temperature differences of 15 K, with an average temperature of 22°C, therefore 8 K above the undisturbed groundwater temperature (14°C). Another example of a GWHP system is a Belgian hospital. The ATEs system (one warm and one cold well) has a maximum temperature difference of 4 K for heating/ 6 K for cooling (injection temperature cold/warm well: 8°C/18°C) with an undisturbed groundwater temperature of 11.7°C (Vanhoudt et al., 2011). From the Edremit Geothermal District Heating System (GDHS) in Balikesir, Turkey a temperature difference of around 20 K (58-59°C extraction temperature and 40-42°C discharge (to the Edremit river) temperature) is reported (Coskun et al., 2009). Ferguson and Woodbury (2006) show a temperature increase of 6 K but also nearly 10 K in an extraction well in an area with multiple GWHP systems and undisturbed groundwater temperature of around 6 °C in Winnipeg, Canada.

For GSHP systems with multiple boreholes, long-term temperature changes can be substantial. This is demonstrated in the simulation studies by Beck et al. (2013) and Hecht-Méndez et al. (2013), with strong cooling by more than 10 K when regeneration is not sufficient. For single GSHP systems ground temperature is rarely monitored for years. However, an example is the Elgg site in Switzerland, a single GSHP system, which is located in a setting with negligible groundwater flow (Rybach and Eugster, 2010). The thermal anomaly induced by this GSHP system was examined for about 10 years. At the peak times during the heating period, temperatures initially decreased by more than 8 K in the vicinity of the BHE. However, this strong cooling is only of short time and ground temperatures are much less influenced at a few meters distance. In GWHP systems, groundwater temperature changes are strongly depend on the hydrogeological conditions. Simulations by Zhou and Zhou (2009) identified hydraulic gradient and flow rate of groundwater between injection and extraction well as dominant factor. Numerical simulations by LoRusso and Civita (2009) showed that the thermal dispersivity in the aquifer is an important factor. In case of substantial

groundwater flow, thermal anomalies are balanced by advective heat or cold replenishment, and induced temperature changes are expected to be small (e.g. Hecht-Méndez et al., 2013). The physical consequences, such as the impact of changing physical properties of groundwater, changed availability, and the spatial and temporal distribution of the temperature anomalies, for the system design, operation and post-operation (recovery) time, have to be comprehensively understood. Physical properties of groundwater, such as viscosity, density, compressibility and vapor pressure, are temperature-dependent. For the spatial and temporal evaluation of resulting temperature anomalies, which also depend on extraction rates and the thermal properties of the subsurface, various analytical and numerical heat transport models are available (e.g., Carslaw and Jaeger, 1959; Eskilson, 1987; Molina-Giraldo et al., 2010; Mottaghy et al., 2011; Yang et al., 2010). For example, Hecht-Méndez et al. (2010) demonstrated that within a typically small temperature range of the generated anomalies, dependency of thermal properties only marginally influence the heat transport simulations of closed shallow geothermal systems. However, with increasing temperature differences of more than 10 K, such thermal effects have to be considered.

With regard to technical sustainability, a geothermal system can be seen as sustainable, if long production ability is guaranteed (> 30 years). For closed systems in unconsolidated materials, with little or no groundwater flow, such as clays and silts, the evolving temperature plume does not reach steady-state in one operation cycle (Hähnlein et al., 2010b). This transient cooling effect was also observed, especially in the first 2-3 years for the Elgg site. Afterwards, the temperature in the subsurface decreased until a quasi-steady-state condition, a stable thermal equilibrium of 1-2 K below the initial undisturbed temperature, was reached (Rybach and Eugster, 2010). In contrast, the temperature plume of a GSHP system in soils with sufficient groundwater flow, such as sands and gravels, could achieve steady-state conditions in just one operation cycle (Hähnlein et al., 2010b). Hence, for such systems, a full recovery is possible during the summer, if the system is not operating and/or only used for cooling.

Similar conclusions to those for closed systems can be drawn for open systems. With increasing flow velocity, the temperature plumes quickly reach a steady-state and under these conditions the plumes are shorter. However, with increasing heat extraction rates, the time to reach a steady-state temperature plume also increases. Banks (2009), who studied the thermal and hydraulic feedbacks of open systems in the context of technical sustainability, recommended a way to improve the technical sustainability by avoiding thermal feedbacks in four steps: (1) increase the distance between injection and extraction wells; (2) decrease the pumping rates; (3) reconsider the system design (e.g., rearrangement of well locations); (4) consider the viability of a balanced, seasonally reversible scheme. Analytical solutions, for instance by Tsang et al. (1977) and Lippmann and Tsang (1980), are available to study the risk of a thermal breakthrough (thermal feedback) at the extraction well. For complex designs, such as in heterogeneous aquifers and/or ATEs systems with more than two wells, numerical flow and heat transport models are favorable to reliably assess the technical sustainability of open geothermal systems (Banks, 2009; Tsang et al., 1977).

Open systems need extraction and/or injection of groundwater, which affects the subsurface flow regime. Even if injection and extraction are balanced in doublets, a permanent disturbance of the aquifer occurs (Bredehoeft, 2002). Changes in the water budget are most critical if extracted groundwater is not re-injected in the same aquifer and in the most extreme case yield surface subsidence. Well operation may also influence natural groundwater-surface water interaction and/or groundwater dependent ecosystems (GDE). Such changes cannot be avoided, but it is possible to minimize their impacts if attention is given to well placement and extraction/injection rates. These hydraulic consequences are normally dealt with in conventional groundwater regulation.

When the operation of a shallow geothermal system ends, the recovery phase is important for assessment of technical (and ecological) sustainability. Signorelli et al. (2004) presented results of numerical simulations of the recovery phase, illustrating an almost total recovery after 30 years for a production time also of 30 years. Accordingly, the recovery characteristics for closed systems can be summarized as follows: they are strong at the beginning and slow down asymptotically over time, with an infinite amount of time for total recovery. An almost complete recovery is reached after a period similar to the lifetime of the production systems (Rybach and Eugster, 2010; Rybach and Mongillo, 2006). The last two studies showed that for a typical lifetime of 30 years, single systems are technically sustainable. However, it would always be

environmentally beneficial for the alternation of heat extraction and injection to be performed, as for example also recommended for open systems (Banks, 2009). In general, increased dynamics, either stimulated by dual use mode or due to natural processes accelerate recovery.

We can conclude that local and spatial temperature changes during the operation and recovery phase of shallow geothermal systems have to be accepted and are indispensable. Therefore, even if reaching centuries, the lifetime of geothermal systems is limited. This is also reflected in a common technical interpretation of geothermal sustainability, which is achieved when a certain production level can be maintained for a desired (long) period (Rybach and Eugster, 2010). For this purpose, appropriate technical design that exploits all degrees of freedom plays a prominent role. This is, for example, demonstrated for the operation of multiple closed systems, where optimization of individual borehole energy extraction rates is suggested (e.g., DePaly et al., 2012).

Chemical consequences are especially important for open systems, where groundwater is directly used. The cooling or heating of groundwater can affect chemical reaction times. For instance, according to the rule of Van't Hoff, the rise of the groundwater temperature by 10 K results in a 2-4 times faster chemical reaction (Balke, 1978). Furthermore, temperature variations also influence mixing processes in groundwater (Bonte et al., 2011b). These variations change geochemical equilibria of minerals, such as carbonate precipitation (Griffioen and Appelo, 1993), they control the solubility of salts (Balke, 1978; Willibald, 1979) and dissolution of silicate minerals (Arning et al., 2006). They change the mobilization of organic compounds from sediments (Brons et al., 1991), as well as oxygen saturation and gas solubility (Balke, 1978; Danielopol et al., 2003). A common observation due to these processes is clogging in the re-injection well of open systems, which is routinely moderated by periodic backflushing.

In Table 1 selected biological and physical processes and their possible chemical and biological effects for open systems are listed. Their impacts on the geothermal system or the influenced aquifer are also evaluated. Table 2 gives a general overview how open and closed shallow geothermal systems and their temperature affected areas (TAA) can be affected. Apparently there are several chemical (and biological) processes that promote clogging and therefore can result in decreased production ability and compromise technical sustainability. So clogging is an important effect for open geothermal systems (Table 2). In contrast, for example, corrosion by enhanced microbiological activity shows only very low significance (Wagner et al., 1988).

A further chemical aspect is the potential input of contaminants and/or creation of contaminant transport pathways. This can be caused by incautious installation or hydrological short circuit through boreholes that connect contaminated and pristine aquifers. Even if boreholes of closed systems are backfilled, there is a risk of deficient installations with inadequate back-filling, e.g., due to debonding of the back-filling (Avci, 1992), which may promote cross-aquifer flow (Santi et al., 2006). Debonding can also result in lower heat conduction, particularly when it happens between backfilling and pipe (Philippacopoulos and Berndt, 2001).

Biological consequences: There exist several potential biological consequences of shallow geothermal energy use on subsurface and groundwater fauna, groundwater dependent organisms and ecosystems (e.g., Hancock et al., 2009). Aside from these, biologically induced fouling and clogging, which has been discussed above, is a common effect in wells such as those used in open systems (Table 2).

The influence by shallow systems on the surface ecosystem, aboveground flora and soil fauna, seems to be minor and with increasing depth of the geothermal installation the influence becomes smaller (Adinolfi et al., 1994; Kolb and Heise, 1979). However, any alteration of vertical heat flux, which leads to unnatural local heating or cooling up to the surface, generates changes in microclimate (Kolb and Heise, 1979). In particular near surface geothermal collectors (at approximately 2 m), which directly use the seasonally recharged shallow geothermal energy and which – in contrast to more common vertical installations – cover relatively large areas, play a role here. Their influence can be observed, for example, in delayed development of snow cover (Adinolfi et al., 1994). For soil fauna and flora, rather than the changes of seasonal temperature trends, the modification and conditioning of the soil has to be considered relevant. Artificial sand layers imbed the collector tubes and thus hamper capillarity and fauna mobility. Also the injection of cooled or heated (ground-)water to surface waters by open systems has biological effects. Significant heating of

surface water modifies the diversity of fishes, and also a sudden reduction of heating back to undisturbed temperature regime influences the ground storey (Verones et al., 2010; Wunderlich, 1979).

Microbes such as bacteria and groundwater invertebrates are essential components of groundwater ecosystems, which offer crucial ecosystem services, such as water purification and filtration. To protect this functionality an intact ecosystem is desirable. Shifts in microbe community due to temperature changes appear only favorable, if it results in an improvement of functionality. Microbial diversity in groundwater ecosystems is directly or indirectly controlled by numerous abiotic and biotic parameters, such as habitat size, biogeography and contaminations (Griebler and Lueders, 2009). Additional important factors are temperature, pH and the availability of water, light and oxygen (Brunke and Gonser, 1997; Yates et al., 1985). Thus, temperature changes in subsurface and in the groundwater influence the bacterial community composition (Hall et al., 2008). For more insight, four studies analyzing the influence of temperature changes by shallow geothermal systems on groundwater microbes, are presented in Table 3.

Table 1: Possible processes, effects and their potential impact for open shallow geothermal energy systems.

Process	Effects	Follow-up event	Potential Impact	Significance	References
Temperature increase	Enhanced microbiological activity	Mineral precipitation	Clogging	++	Abesser (2007)
			Biofilms	+	Lerm et al. (2011)
		Biofouling		–	Wagner et al. (1988)
		Slime production		–	
		Mass explosion	Clogging	---	Snijders (1990); Wagner et al. (1988)
		Sedimentation of iron ochre		++	Kolb and Heise (1979)
	Corrosion		–	Wagner et al. (1988)	
	Increase of mineral solubility (e.g., iron, manganese) ¹	Increase of mineral concentration in the groundwater (e.g., sedimentation of iron ochre)	Clogging	++	Andersson (1990); Kolb and Heise (1979)
		Mass explosion (algae and bacterial growth) ¹		++	UMBW (2009)
Temperature decrease	Increase of CO ₂ solubility	Increased carbonate load	Clogging	++	Abesser (2007); Kolb and Heise (1979)
Algae growth	Lowering pH Removing CO ₂	Mineral precipitation ¹	Clogging	–	Abesser (2007); UMBW (2009)
Shifting of material (Solifluction)	Increase of holes		Changes in flow regime	–	Wagner et al. (1988)
	Accumulation of material			–	
			Clogging	–	

Significance of impact is: (++) high, (+) moderate, (–) low, (–) very low.

¹ Critical iron concentration > 0.1 mg/l and manganese concentration > 0.05 mg/l (UMBW, 2009)

Psychrophilic microbes are of particular interest when examining the effects of shallow geothermal energy, which have a preferred habitat temperature similar to that found in natural aquifers. Psychrophilic microbes grow at 0°C and have their temperature optimum at 15°C or lower. Above 30°C these microbes are not able to survive (Adinolfi et al., 1994), and thus substantial anomalies can have harsh effects. If groundwater temperatures are raised to 15°C or 20°C, this already supports the growth of mesophilic species (Briellmann et al., 2011), and thus temperature anomalies can yield locally altered microbial communities and specific reaction intensity. In these laboratory experiments, tolerance towards temperature increase is obvious for a

few days and a groundwater temperature of 20°C appears to be the critical maximum temperature for groundwater invertebrates (Briellmann et al., 2011). We can conclude that there exists a tolerable range of temperature variations due to a heating or cooling, however, this should be minimized in intensity, expansion and duration. Until now, the studies of Briellmann et al. (2009, 2011) hypothesize that for undisturbed aquifers a maximum temperature of 20°C and temperature difference of ± 6 K, as recommended by the VDI 4640 (VDI, 2001, 2010), is acceptable and should not be exceeded (Briellmann et al. 2009, 2011). This is comparable to earlier thresholds such as those recommended by Kolb and Heise (1979). They interpreted from the results of a workshop on “heat pumps and water protection” that a maximum cooling of 5°C for pumped water is acceptable. It can be summarized that the use of shallow geothermal energy, especially the effect of temperature change influences bacterial diversity and community composition in groundwater. However, it does not have high impact on the amount of microbes (Briellmann et al., 2011; Lerm et al., 2011). Thus, in the sense of European environmental policy, for protecting the natural state and functionality of the ecosystems, it is necessary to keep temperature anomalies within a range of a few degrees.

Table 2: Consequences and the affected systems.

Follow-up event	Affected system			
	Open system		Closed system	
	System	TAA	System	TAA
Algae growth	+	+	–	+
Appearance of temperature anomalies	–	+	–	+
Changes in bacterial and faunal community		+		+
Changes in microbiological activity	+	+	–	+
Debonding	–	–	+	–
Gas solubility	–	++	–	+
Hydrological circuit/ Perforation of separating layers	+	–	+	–
Hydrological feedback	+		–	
Influence on surface ecosystem	–	+	–	++
Solifluction	–	+	–	–
Thermal feedback	+		– ¹ / + ²	

Follow-up event: (–) does not impact, (+) impact, (++) more pronounced impact on the system or temperature affected area (TAA)
¹ for single GSHP systems / ² for multiple GSHP systems

Environmental (and also other) consequences can be distinguished into primary (direct) and secondary (indirect) effects. The described physical, chemical and biological consequences reflect the direct effects. Most apparent indirect effects stem from the continuous energy consumption by heat pump operation, which, depending on the electricity consumed, results in greenhouse gas emissions and particulate matter formation at power plants. Saner et al. (2010), who studied the environmental effects, including health effects, during the entire lifecycle of average European GSHP system, concluded that 55% of the environmental effects are related to climate change, 34% by fossil depletion and only 8% by the formation of particulate matter due to the burning of fossil fuels. These negative effects are mostly compensated by the achieved CO₂ savings and even reductions (Blum et al., 2010). This mainly depends on the provided energy supply and type of installation, i.e. installation in a new building (potential savings) or replacement of an existing energy system for heating or cooling (potential reductions). Saner et al. (2010) and Bayer et al. (2012) show that for Europe, in comparison to fossil fuel based conventional heating or cooling systems, the CO₂ savings or reductions of shallow geothermal systems can be rather high. For the year 2011, the installed geothermal heat pumps (about 1.25 Mio.) are expected to save about 5.5 Mio. t CO₂.

Table 3: Overview of four studies on the influence of temperature change on microbiology by the use of shallow geothermal energy systems.

Aim	Test site and system	Results	Conclusion	References
Dieback and growth of microorganisms	Bremen (North Germany)	No significant influence of temperature on the amount of microorganisms above the freezing point. Only for – 20°C a decrease of living cell number was detectable, potentially caused by speed defrosting.	The use of shallow geothermal energy has no influence on the amount of microorganisms in the subsurface.	Schippers and Reichling (2006)
Change on bacterial cell number, faunal abundance and water chemistry	Bavaria (South Germany), Oligotrophic shallow quaternary aquifer in with a mean depth of 8-15 m GWHP system	Composition of bacterial and faunal community changes and the diversity increases with rising temperatures, but no significant impacts on bacterial or faunal abundance.	Reaction intensity of different species is variable. Tolerance towards temperature changes is obvious for a few days. For undisturbed aquifers a maximum temperature of 20°C and temperature difference of ± 6 K is acceptable.	Brielmann et al. (2009); Brielmann et al. (2011)
Potential of suspected population explosions and subsequent plugging	Stuttgart (South Germany) Model of ATES heat storage system	Confirmed field observations on further ATES systems, where no mass explosions could be noticed.	Mass explosion is not important as expected.	Adinolfi et al. (1994)
Influence of bacteria on operability of the system	Berlin (North Germany; Parliament), Quaternary sand aquifer in the North German Basin ATES cold and heat storage system	Formation of iron-sulfide deposits by metabolism support filter clogging.	Shifts in microbial community composition can influence lifetime and production ability of ATES systems.	Lerm et al. (2011)

Morofsky (2007) suggests a checklist of potential environmental concerns, which should be addressed through thermal storage system design and monitoring. In addition to environmental risks, consequences on the production ability and social consequences also cause concern, which is ideally considered by a policy for sustainable use (Figure 1). In the present study, the technical consequences, such as the restrictions of performance and efficiency, are discussed in context of physical consequences and technical sustainability of shallow geothermal systems. As indicated above, social aspects are rarely emphasized. One example is the market analysis by Kölbel et al. (2009). They showed that in the state of Baden-Württemberg in Germany, most owners of shallow geothermal systems are satisfied with their GWHP or GSHP systems. The majority switched from heating oil to GSHP systems because of rising energy costs and potential energy savings, which shows that the people agree to these systems and that an ecological awareness exists.

International policy and legislations

In the following, the fundamentals of current environmental policy and international legislations for shallow geothermal energy are presented. Two main principles, risk based and precautionary principle, are applied to manage groundwater and subsurface contaminations worldwide (Rügner et al., 2006). The precautionary principle means taking anticipatory action in the absence of complete proof or scientific uncertainty of harm. The present tendency is to become more precautionary, and to change from a reacting to a more formative policy (EU-COM, 2011; TFEU). This includes the possibility of creating a totally new policy. In contrast, risk-based attitude is reflected in a reacting and passive policy. For example, Butscher et al. (2010) presented a risk-oriented licensing for the Canton Basel-Landschaft in Switzerland. Thereby, the licensing procedure is dynamic and oriented on potential risks, related to geology and hydrogeology.

For the European Union, the Treaty on the Functioning of the European Union (TFEU) (Article 191, paragraph 2) arrogate precautionary as one of the leading principles for European environmental policy and therefore, it is also imbedded in the European Water Framework Directive (EU-WFD, 2000). In the USA, contaminated land and groundwater management is usually risk-based (Rügner et al., 2006). For deeper geothermal systems (> 400 m depth), most countries apply existing mining laws, which are not originally based on precautionary principle. For example, in Germany a gentle handling is stated as convention for mining (BBergG, 1980). It is apparent that if sustainable use of shallow geothermal energy is desirable, it is necessary to incorporate the precautionary principle in the many mining laws worldwide. Nevertheless, for a legislation ensuring a sustainable use, further aspects have to be regarded. For more insight, we subsequently review the findings from three recent studies that examined existing national legislations (Bonte et al., 2011b; Goodman et al., 2009; Hähnlein et al., 2010b). The European Project, GeoThermal Regulation – Heat (GTR-H), inspected existing regulatory frameworks for the use of geothermal energy with the main focus, however, on deep geothermal systems. In the final report additional issues, such as clear definition and classification of geothermal energy, resource ownership and licensing system, are discussed. These should be stated and included in each national and European geothermal legislation. These measures are grouped as follows: legal, financial and flanking measures (e.g., market penetration). It is concluded that effective national regulations need a well-founded legislation. The focus here is on economic aspects, and no environmental consequences are considered (Goodman et al., 2009).

In a second study, Hähnlein et al. (2010a) show the current status of international regulations for shallow geothermal energy systems in 48 countries, with special interest in threshold values for groundwater temperatures and minimum distances between installations. It is revealed that, in order to prevent detrimental changes in groundwater characteristics, regulations are embedded in national laws of some countries such as Netherlands, Denmark and Germany. In other countries, for example in Canada, until now, regulations are primarily provided on a provincial level. In most countries, still there are no regulations. The few existing ones typically include threshold values for groundwater temperatures and/or minimum distances. The most commonly used minimum and maximum absolute groundwater temperatures for heating and cooling of groundwater are 5°C and 25°C, respectively (Figure 2). The acceptable temperature difference (ΔT) ranges between 3 K in Switzerland and 11 K in France (Hähnlein et al., 2010a). These threshold values for groundwater temperatures are typically defined to mitigate any impact on the groundwater ecosystem (e.g., Briemann et al., 2009, 2011).

Minimum distances between different points of reference vary between 2.5 m in Austria up to 300 m in Denmark. As point of reference mostly serves the next property line, but for example in Denmark the next drinking water well is also suggested as point of reference. Often, even national regulations such as in Austria or Germany are inconsistent (Hähnlein et al., 2010b), and frequently regulations are recommendations and therefore not legally binding.

Bonte et al. (2011b) investigated the environmental risks and policy developments for UTES systems. In their study, they identified various impacts such as chemical, biological, thermal and hydrogeological. They examined the Dutch Water Act and presented case studies from different Dutch provinces. For example, for the protection of the deep groundwater in the province of Noord-Brabant, extraction and injection wells of ATEs systems are not allowed to be deeper than 80 m. They also concluded that there is currently no

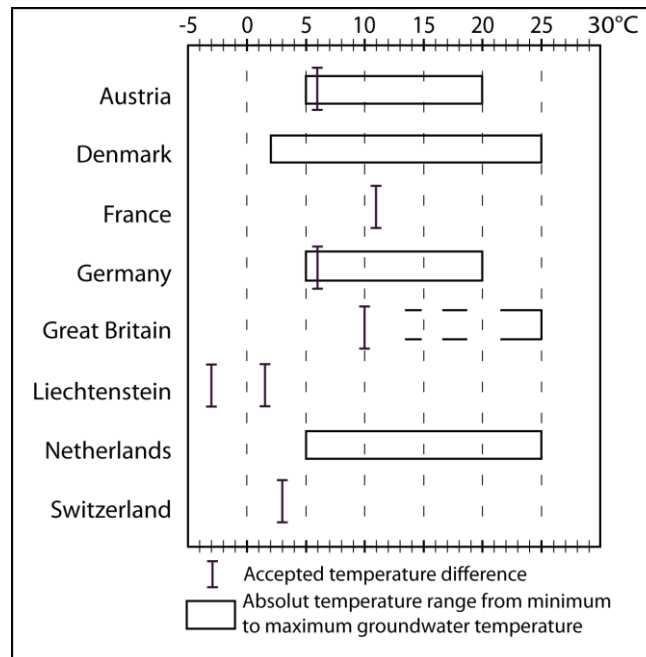


Figure 2: Nationally regulated threshold values for groundwater temperatures. In Great Britain, until recently, no limit for cooling of groundwater was defined. The negative value for Liechtenstein indicates that a different threshold applies for cooling and for heating.

international consistent legislation and that there are partially major differences between countries and minor differences even within countries. Furthermore, it is revealed that a scientifically based risk management strategy is lacking. More research on the impacts of UTES systems, cross-sectoral subsurface planning of different subsurface installations, European wide guidelines and standards is recommended for quality assurance and control.

These recent reviews highlight, that legislation for the sustainable thermal use of groundwater and the shallow subsurface are recommendable worldwide. These regulations have to be adjusted to climatic conditions, stages of development, financial resources and/or dissimilar decision boards in politics and policy. Ideally they follow a similar policy and the national legislations are harmonized with each other or at least with neighboring countries.

Synthesis and discussion

The number of production systems for shallow geothermal energy is on a continuous rise, and this increases the pressure from especially direct environmental consequences, such as the development of temperature anomalies. Available ecological studies indicate that permanent changes by more than 5 or 6 K could potentially have detrimental effects on groundwater and subsurface ecosystems, and also change the natural chemical and physical conditions. Detrimental effects of groundwater heating may even be amplified in cases where the ground is already heated from climate change, urbanization (e.g., Zhu et al., 2010) and/or neighboring geothermal installations. To conserve the functions of groundwater for nature, animals and humans, especially to save it as source for drinking water, it is necessary to develop a sustainable geothermal energy use strategy. Preferably, this is based on the precautionary principle such as that recommended in the European water framework directive (EU-WFD, 2000). At the same time, there are technical reasons such as to guarantee the operability of the systems (Rybach and Eugster, 2010) and to avoid conflicts between different interests, that make it necessary to define sustainability-based regulations (Bonte et al., 2011b). Furthermore, there are social and political arguments that support well controlled long-term shallow geothermal energy use: Renewable energies and energy independency become increasingly important; and there is a world-wide interest to reduce greenhouse gas emissions. Finally, regulations cannot only abet sustainable use, but it is also essential to avoid uncontrolled growth, to provide

confidence in a new technology, to support market penetration and ultimately achieve economically attractive conditions (Blum et al., 2011). So far, there is no general and international policy for evaluating or planning sustainable geothermal systems. Based on the current situation and the identified potential consequences of shallow geothermal energy use, we suggest an inclusive legal framework as shown in Figure 3.

Type

On the first level, the type of system is defined. Due to the different primary environmental and social consequences by open and closed systems as well as fundamental differences in technical design, it is necessary to distinguish from the beginning between these types of systems.

Usage

The second level accounts for the different use, storage or direct use. For instance, for high-enthalpy systems UTES systems are typically used and not GWHP or GSHP systems (e.g., Sanner et al., 2005).

Size

The dimension and size of storage systems are usually larger than average GWHP or GSHP systems (e.g., Bonte et al., 2011b). Thus, the usage level is a preliminary decision step for the third one, which concerns the size (single system or multiple) of the system. This is analogous to standard guidelines such as the German VDI 4640, where the distinction is only made based on power of the systems, e.g. power of more or less than 30 kW (e.g., VDI, 2010). Hence, the system size generally determines the extent of impact intensity, required space and therefore overall consequences. The number of boreholes (BHEs or wells) is of primary importance for the environmental impact, because a higher number of boreholes means a greater volume of the ground or aquifer is exploited and therefore also impacted. Moreover, the temperature anomalies from multiple boreholes might interfere and have superimposed intensity. UTES systems and multiple GWHP and GSHP systems typically require more space in the subsurface than single systems for direct use (e.g., Katsura et al., 2008). In general, the risk of mistakes rises with increasing number of boreholes and BHEs. Thus, we can assume that single systems need less effort for the planning and design and therefore should also be treated differently in comparison to larger scale systems.

Technical assessment

After the third level, the technical assessment should be performed to avoid and evaluate potential consequences in size and intensity. In general, the main objective is to realize a system that operates sustainably for decades (>30 years), which has to be adjusted to the specific conditions in the ground, while generating an often temporally variable heat and/or cold demand. A broad range of commercial software applications are available that support site-specific optimal planning (e.g., Schmidt and Hellström, 2005). For a given energy extraction or cold injection, standardized planning tools assist in adjusting borehole configurations, layout of multiple borehole fields or well doublets, as well as their operation mode. Simple BHE installations to supply Central European single family housings can be configured based on empirical rules of thumbs such as the commonly used heat extraction rate of 50 W/m (e.g., Blum et al., 2011). The total required borehole length is calculated based on type of ground (i.e. its expected thermal conductivity) and energy demand (e.g., VDI, 2010). More sizeable and complex applications may require analytical or numerical modeling, which is in particular suitable to predict the evolving temperature anomalies in the ground. While appropriate technological planning, which also means technologically efficient and sustainable design and maintenance, is guided by cost-effectiveness, policy focuses on the associated long-term disturbances of nature and on concerted regulation of neighboring installations. However, before the planning and specific design of a specific system, several prerequisites are needed, which are typically defined in national and international guidelines and standards (e.g., Hähnlein et al., 2010a; Hähnlein et al., 2011; Sanner, 2008).

Geological prerequisites include the geological assessment of the subsurface at the potential location of the BHEs or wells, respectively. Thus, the potential of swelling (i.e. anhydrite swelling) or subsidence of the geological layer, which will be penetrated, has to be carefully evaluated, which could result in local depth restrictions (e.g., Blum et al., 2010). For example, in the city of Staufen in South Germany an inadequate backfilling of BHEs caused an uprising of groundwater, which resulted in the swelling of anhydrite and finally

a massive damage of houses in the city center (e.g., Goldscheider and Bechtel, 2009; Sass and Burbaum, 2010). Hence, any drilling in such sensitive rock formations like the Gipskeuper (Triassic) should be avoided and/or strictly regulated.

Besides, hydrogeological requirements have to be assessed such as the location of the site in context of adjacent groundwater supplies and in particular groundwater protection zones. For example, in the German state of Baden-Württemberg, no licence is given for systems inside the catchment of a groundwater supply. Only in outer groundwater protection zones GSHP systems might be approved (UMBW, 2005). In addition, hydraulic shortcuts between different aquifers such as short circuits by drilling of boreholes or during the backfilling of a BHE, as well as unwanted hydraulic effects from operating GHWP have to be avoided (Fry, 2009).

One main physical consequence from geothermal installations are temperature anomalies in the ground. For the sake of long-term technological efficiency, there is often an interest in keeping the temperature anomalies within a certain range, that is, for example significant long-term cooling of aquifers is not desirable since this also mitigates the seasonal performance factor of the heat pump used in the heating mode. Ideally a self-regulative mechanism therefore applies that compensates significant anomalies by combined heating/cooling or limits the heat extraction rates for given aquifer volumes. Even so, temperature anomalies may evolve that are not acceptable. Under these conditions, analytical or numerical simulation is suggested to inspect the long-term evolution of underground temperature. This reveals the expected intensity of anomalies, and potential interception of neighboring installations can be anticipated. If an analytical simulation is sufficient or a numerical simulation is necessary, depends on type, size of the system, as well as hydrogeological conditions such as degree of heterogeneity. In our proposed legal framework for a single GSHP system in an environment with negligible groundwater flow, i.e. in an aquitard, reference values from previous studies might be consulted. In Pannike et al. (2006) and Hähnlein et al. (2010b) temperature anomalies for GSHP systems in aquitards are simulated using numerical and analytical solutions for different uses (e.g., heating in winter, cooling in summer). The results of Pannike et al. (2006) show that for an accepted temperature difference of < 1 K and heating demand of 4.5 kW for middle to coarse sand a minimum distance of 5 m is sufficient. For clay and silt and heat capacity of 3 kW a minimum distance of 8 m is necessary (Pannike et al., 2006). In Hähnlein et al. (2010b) it is demonstrated that the maximum length of plumes after 100 days for the most extreme case, that is, permanent heat extraction, has a mean value for solid materials of 4.8 m (with sandstone 5.1 m, limestone 0.7 m, crystalline 0.4 m). Both studies conclude that the length depends on heat extraction rates and subsurface conditions and therefore regulations for minimum distances should always be a case-by-case decision.

For a small single GWHP and GSHP systems, simple analytical solutions such as presented by Ingerle (1988) for open systems and by Yang et al. (2010) or Hähnlein et al. (2010a) for closed systems might be adequate. The latter presents an analytical solution for GSHP systems, in which conduction, advection and dispersion are considered (Molina-Giraldo et al., 2011b). Therewith, the maximum length of plumes for steady-state conditions and constant heating extraction can be calculated. The results show that the analytical solution can be used for a primary estimation of maximal plume length and that anomalies in an aquifer become longer after one heating period than in an aquitard, but regenerate faster.

For both single borehole applications as well as BTES, analytical solutions or semi-analytical g-function based models such as Earth Energy Designer EED (Hellström and Sanner, 2000) or GLHEPRO (2007) might be used. For multiple GSHP systems, GWHP systems, single GWHP systems and ATES systems numerical heat transport models such as SHEMAT (e.g., Mottaghy et al., 2011) or MT3DMS (Hecht-Méndez et al., 2010), FEFLOW (Wasy, 2010), or EED (Hellström and Sanner, 2000) are advisable. If the geothermal use results in substantial temperature anomalies, coupled transport models such as SEAWAT (Langevin et al., 2008) or FEFLOW, in which temperature-dependent fluid density and viscosity can be considered, should be applied.

If the results of the numerical simulation identify interference such as overlap of temperature anomalies, superimposing of temperature changes or in case of influences of adjacent installations such as water supplies, repositioning of the boreholes might be necessary and therefore a new and more detailed simulation is required (e.g., Katsura et al., 2008).

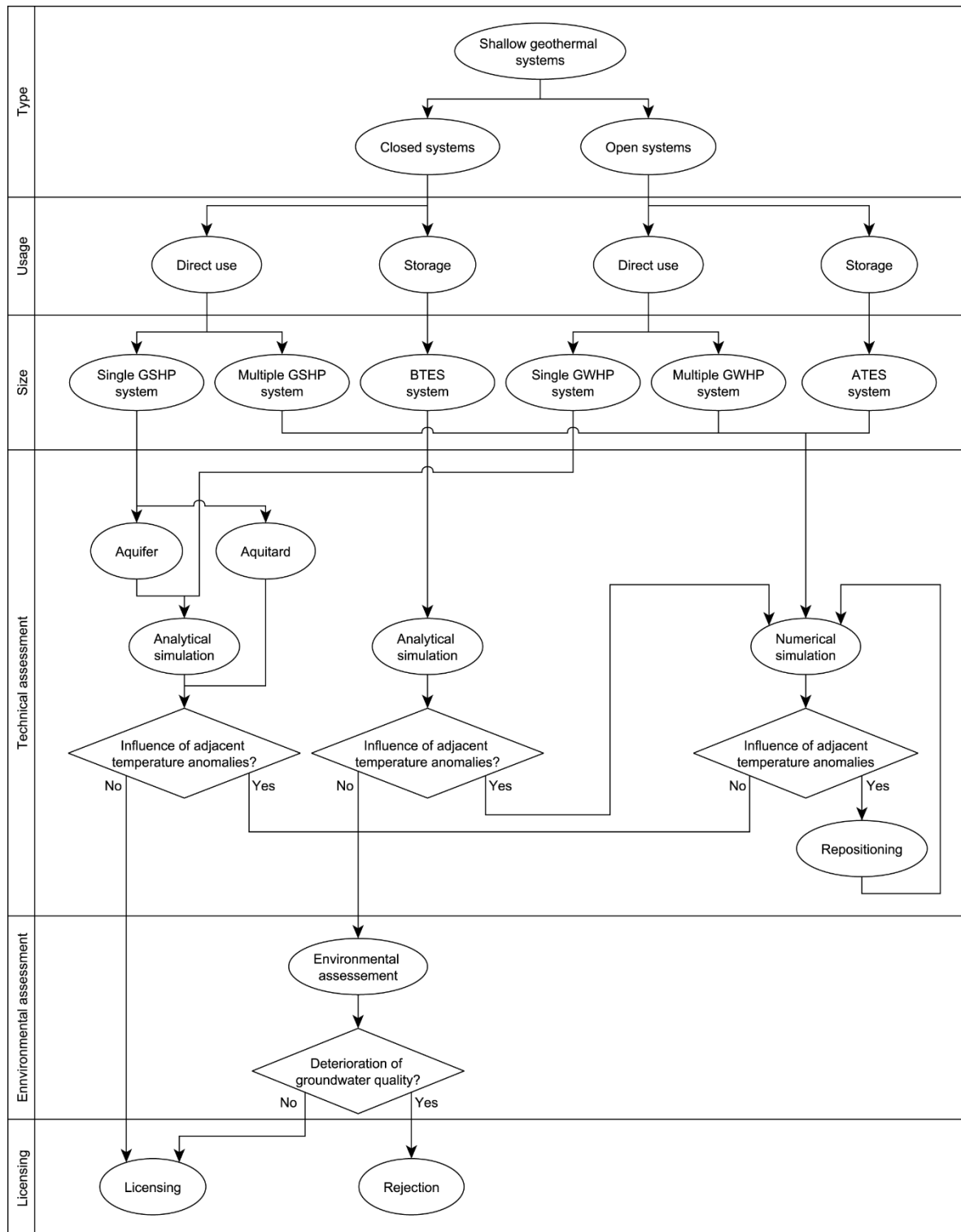


Figure 3: Suggested legal framework for a sustainable use of shallow geothermal energy. The workflow of the legal framework is divided in six levels: (1) type, (2) usage, (3) size, (4) technical assessment, (5) environmental assessment, and (6) licensing.

Environmental assessment

If the results show no interferences or low acceptable interferences the next step is the environmental assessment (fifth level). This is necessary to identify the primary environmental consequences of the systems. The general decision on extent and manner of the environmental assessment depends on various

aspects such as absolute temperature difference and type and size of the systems, and therefore should always be a case-by-case review. Also due to the fact that there is still a need for research on the environmental consequences (e.g., Brielmann et al., 2011), we conclude that with the current knowledge it is impossible to define a general procedure for the environmental assessment. So far, for open systems the intensity of the effects of mineral precipitation or dissolution, mobilization of organic compounds, oxygen saturation, changes in mesophilic populations and increase of undesirable bacteria are generally recommended as reference points for the environmental assessment. A chemical analysis of the groundwater for open systems should be adapted to the local chemical groundwater character, as defined for example in the context of the European Water Framework Directive (EU-WFD, 2000).

Beside potential alteration of the natural groundwater character also anthropogenic contaminations have to be considered. For example, in contaminated aquifers, it could be even beneficial, if groundwater temperature is elevated to intensify microbiological degradation as supporting aspect for enhanced natural attenuation (Slenders et al., 2010). However, possible positive effects depend on manner of contamination (Zuurbier et al., 2013). In the Netherlands, the combination of groundwater plume treatment (e.g., pump and treat system) and shallow open geothermal systems is considered to be beneficial (Pijls and Boode, 2011). In addition, it is necessary to be aware of the difficulties arising with groundwater flow. For heat extraction groundwater flow is advantageous, whereas for groundwater remediation minimal flows can be favored to avoid distribution effects. Thus, novel management concepts and legislation might be required (Slenders et al., 2010), which also enables the reinjection of minor contaminated water. Thereby, the concepts of sustainable energy (geothermal energy) and remediation are combined. If necessary, additional nutrients for an enhanced remediation can be added. However, such combined heat extraction and remediation concepts need a comprehensive planning to avoid any uncontrolled spreading of contaminants. For foresighted groundwater protection the reinjection of heavily contaminated water without previous remediation should not be permitted.

For closed systems the extent of the environmental assessment is minor. However, the composition of the heat carrier fluids and in particular the commonly used additives should be carefully addressed to avoid any environmental risk due to a potential leakage of the BHE. Although, Saner et al. (2010) could demonstrate that in context of the entire life-cycle of a GSHP system the environmental impact of a total leakage of such heat carrier fluids is minor. Klotzbücher et al. (2007) found out that commonly used heat carrier fluids such as ethylene and propylene glycol are readily biodegradable under both oxic and anoxic conditions. Other critical and toxic chemical additives, which are also commonly applied such as corrosion inhibitors or biocides (e.g., borates and sodium nitrite), might pose an environmental threat. Current studies on the biodegradability of some additives showed that the corrosion inhibitors, benzotriazole and tolyltriazole are persistent under various redox conditions (Ilieva et al., 2011). A comprehensive environmental assessment of these additives is however currently not available.

If there is no thermal influence of small adjacent closed systems, in our opinion no environmental assessment is necessary and the licensing procedure can begin (Figure 3). On the other hand, more pronounced impacts from large scale systems should be studied in detail. If the outcome of the environmental assessment is negative and in particular a degradation of groundwater quality is anticipated, permission should be rejected.

Licensing

A positive outcome of the technical and environmental assessment facilitates licensing. The details of the application and licensing procedure strongly depend on the country-specific standards and guidelines. A comprehensive overview of currently available standards and guidelines is provided by Sanner (2008) and Hähnlein et al. (2011). Although there are country-specific differences, a license application should include a drilling notice, the site plan with the location of the planned systems, dimensions of the planned installation and results of technical assessment, and if necessary, the outcome of the environmental assessment.

Based on this application the public authorities have to check the proposed location of the system, if there are any protected areas such as nature reserve or drinking water protection zones. Furthermore, the authority has to evaluate the provided results of technical and environmental assessment. Parriaux et al.

(2004) presented an organigram showing a methodology for the identification of potential sites for geothermal systems. This framework fits to our fourth level (technical assessment). However, it does not consider the potential hydraulic circuit between two aquifers or environmental aspects, and it focuses on the interaction between buildings and so called geothermal structures.

Finally, during the operation of larger geothermal systems (e.g., multiple GWHP systems, multiple GWHP systems ATEs, BTES) monitoring should be performed, which controls the size of temperature anomalies over time and especially temperature differences between natural and disturbed subsurface.

Conclusion

For the sustainable thermal use of shallow geothermal energy, technical, economical, environmental and also social aspects should be integrative considered. We conclude that a shallow geothermal system is sustainable, if the following aspects are principally fulfilled:

- From technical aspects:
 - The system operates without any major technical failures;
 - Other adjacent systems are not impacted;
- From economical aspects:
 - The system implies no main financial disadvantage in comparison with other renewable or conventional heating and cooling systems;
- From ecological aspects:
 - The generated energy is mainly renewable energy;
 - CO₂ emissions and particulate matter emissions are saved or even reduced;
 - Impacts on groundwater quality, quantity and ecology are negligible;
 - Temporary changes during the operation are reversible;
- From social aspects:
 - The owner has a user-friendly and controllable heating system;
 - The system contributes to environmental protection and climate change;
 - The user obtains or feels a social prestige;
 - No interferences with adjacent installations exist (e.g., possible conflicts with the neighbor).

Currently, there is still a lack of knowledge, especially on the validation of the available heat transport models and design tools with long-operating systems, the long-term environmental impacts, the functions of the groundwater ecosystems, and the optimum integrated system and operation. Due to local differences in geology and hydrogeology as well as in technical requirements, it is not recommendable to define only static regulations such as fixed and absolute temperature thresholds. Advisable are flexible temperature limits for heating and cooling the groundwater and subsurface, based on previously long-term undisturbed and locally observed groundwater temperatures such as anthropogenic caused temperature anomalies (i.e. urban heat islands in the subsurface; (Menberg et al., 2013), chemical, physical and biological aquifer conditions. Furthermore, already existing groundwater usages for heating and cooling should always be carefully considered, because this might be locally beneficial. Thus, for example geothermal systems for heating in the centers of urban areas results in cooling of anthropogenic locally warmed up aquifers. The proposed legal framework follows a systematical procedure, in which more criteria might be gradually included in the decision making process providing profound basis for drafting a country-specific legislation of sustainable shallow geothermal energy utilization. In the future, the proposed framework offers the possibility to be adopted and extended according to the advancing knowledge and innovation.

Acknowledgements

This work was supported by a scholarship from the German Federal Environmental Foundation (DBU) to S. Hähnlein, and by the EU FP7 ECO-GHP project of P. Bayer.

References

- Abesser, C., 2007. Open-loop ground source heat pumps and the groundwater systems: A literature review of current applications, regulations and problems, British Geological Survey Open Report, OR/10/045. British Geological Survey, p. 31.
- Adinolfi, M., Koch, M., Ruck, W., 1994. Ökologische und mikrobielle Folgen der Wärmespeicherung im Aquifer, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München, Germany, pp. 89–106.
- Andersson, O., 1990. Scaling and corrosion in subsurface thermal energy storage systems, in: Hooghart, J.C., Posthumus, C.W.S. (Eds.), Hydrochemistry and energy storage in aquifers. TNO Committee on Hydrological Research, Ede, The Netherlands, pp. 53-72.
- Arning, E., Kölling, M., Panteleit, B., Reichling, J., Schulz, H.D., 2006. Einfluss oberflächennaher Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter (Effect of nearsurface thermal extraction on geochemical processes in aquifer). *Grundwasser* 11, 27-39.
- Avci, C.B., 1992. Flow occurrence between confined aquifers through improperly plugged boreholes. *Journal of Hydrology* 139, 97-114.
- Axelsson, G., 2010. Sustainable geothermal utilization - Case histories; definitions, research issues and modelling. *Geothermics* 39, 283-291.
- Axelsson, G., Bromley, C., Mongillo, M., Rybach, L., 2010. The sustainability task of the International Energy Agency's Geothermal Implementing Agreement, World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.
- Axelsson, G., Stefánsson, V., 2003. Sustainable management of geothermal resources, International Geothermal Conference, Reykjavík, Iceland, pp. 40-48.
- Balke, K.-D., 1978. Problematik der Kühlwassereinleitung in den Untergrund. *Gewässerschutz Wasser Abwasser* 29, 371-389.
- Banks, D., 2009. Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of analytical approaches. *Hydrogeology Journal* 17, 1149-1155.
- Bauer, M., Eppinger, A., Franßen, W., Heinz, M., Keim, B., Mahler, D., Milkowski, N., Pasler, U., Rolland, M.K., Schölch-Ighodaro, R., Stein, U., Vöröshazi, M., Wingerling, M., 2009. Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen, 1 ed. Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, p. 34.
- Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L., Blum, P., 2012. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 16, 1256-1267.
- BBergG, 1980. Bundesberggesetz. Deutscher Bundestag, p. 99.
- Beck, M., 2008. Optimierung Geothermischer Anlagen (Optimization of geothermal systems), Informatik, Angewandte Geowissenschaften. Eberhard Karls Universität Tübingen, Tübingen, Germany, p. 92.
- Beck, M., Bayer, P., de Paly, M., Hecht-Mendez, J., Zell, A., 2013. Geometric arrangement and operation mode adjustment in low enthalpy geothermal fields for heating. *Energy and Building* 49, 434-443.
- Blum, P., Campillo, G., Kölbl, T., 2011. Techno-economic and spatial analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. *Energy* 36, 3002–3011.
- Blum, P., Campillo, G., Münch, W., Kölbl, T., 2010. CO2 savings of ground source heat pump systems - a regional analysis. *Renewable Energy* 35, 122-127.
- Bonte, M., Stuyfzand, P.J., Berg, G.A.v.d., Hijnen, W.A.M., 2011a. Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: a case study from the Netherlands. *Water Science & Technology* 63, 1922-1931.
- Bonte, M., Stuyfzand, P.J., Hulsmann, A., Beelen, P.V., 2011b. Underground thermal energy storage: Environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society* 16, Art: 22.
- Boulton, A.J., 2005. Chances and challenges in the conservation of groundwaters and their depen-

- dent ecosystems. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 15, 319-323.
- Brandl, H., 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* 56, 81-122.
- Brandt, G., Henriksen, H.J., 2003. Protection of drinking water sources for quality and quantity – Groundwater protection in the Greater Copenhagen area. 6.
- Bredehoeft, J.D., 2002. The Water Budget Myth Revisited: Why Hydrogeologists Model. *Ground Water* 40, 340-345.
- Bridger, D.W., Allen, D.M., 2005. Designing aquifer thermal energy storage systems. Building for the future - A supplement to ASHRAE Journal 47, 32-37.
- Briemann, H., Griebler, C., Schmidt, S.I., Michel, R., Lueders, T., 2009. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiology Ecology* 68, 273-286.
- Briemann, H., Lueders, T., Schreglmann, K., Ferraro, F., Avramov, M., Hammerl, V., Blum, P., Bayer, P., Griebler, C., 2011. Oberflächennahe Geothermie und ihre potenziellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme (Shallow geothermal energy usage and its potential impacts on groundwater ecosystems). *Grundwasser* 16, 77-91.
- Brons, H.J., Griffioen, J., Appelo, C.A.J., Zehnder, A.J.B., 1991. (Bio)Geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Research* 25, 729-736.
- Brunke, M., Gonser, T., 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology* 37, 1-33.
- Butscher, C., Huggenberger, P., Auckenthaler, A., Bänninger, D., 2010. Risikoorientierte Bewilligung von Erdwärmesonden. *Grundwasser* 16, 13-24.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, USA, New York.
- Coskun, C., Oktay, Z., Dincer, I., 2009. New energy and exergy parameters for geothermal district heating systems. *Applied Thermal Engineering* 29, 2235-2242.
- Danielopol, D.L., Griebler, C., Gunatilaka, A., Hahn, H.J., Gibert, J., Mermillod-Blondin, F., Messina, G., Notenboom, J., Sket, B., 2008. Incorporation of groundwater ecology in environmental policy, in: Quevauviller, P. (Ed.), *Groundwater Science & Policy*. The Royal Society of Chemistry, RSC Publishing, London, pp. 671-689.
- Danielopol, D.L., Griebler, C., Gunatilaka, A., Notenboom, J., 2003. Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental Conservation* 30, 104-130.
- DePaly, M., Hecht-Méndez, J., Beck, M., Blum, P., Zell, A., Bayer, P., 2012. Optimization of energy extraction for closed shallow geothermal systems using linear programming. *Geothermics* 43.
- EGEC, 2006. EGEN's response to the EC Public consultation exercise on the promotion of heating and cooling from renewable energies, Brussels.
- Eskilson, P., 1987. *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*, Department of Mathematical Physics. University of Lund, Lund.
- EU-COM, 2011. Roadmap to a resource efficient Europe, COM(2011) 571 final.
- EU-GWD, 2006. Groundwater Directive, 2006/118/EG. European Union.
- EU-WFD, 2000. European Water Framework Directive, 2000/60/EC. European Parliament.
- European-Commission, 2011. Groundwater.
- Ferguson, G., Woodbury, A.D., 2006. Observed thermal pollution and post-development simulations of low-temperature geothermal systems in Winnipeg, Canada. *Hydrogeology Journal* 14, 1206-1215.
- Fry, V.A., 2009. Lessons from London: regulation of open-loop ground source heat pumps in central London. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 42, 325-334.
- GLHEPRO, 2007. GLHEPRO Version 4.0 User's Manual. <http://www.hvac.okstate.edu/glhepro/>.
- Goldscheider, N., Bechtel, T.D., 2009. Editors' message: The housing crisis from underground—damage to a historic town by geothermal drillings

- through anhydrite, Staufen, Germany. *Hydrogeology Journal* 17, 491-493.
- Goodman, R., Pasquali, R., Jones, G., Reay, D., Earls, G., Jaudin, F., Fouillac, C., Sanner, B., Dumas, P., Boissavy, C., Kepinska, B., Bujakowski, W., Klima, K., Heekeren, T.H.V.v., Bussman, W., Rueter, H., Schramadei, R., 2009. Geothermal Regulation Framework, *GeoThermal Regulation for Heat (GTR-H)*, p. 24.
- Griebler, C., Lueders, T., 2009. Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. *Freshwater Biology* 54, 649-677.
- Griffioen, J., Appelo, C.A.J., 1993. Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage. *Applied Geochemistry* 8, 161-176.
- Hähnlein, S., Bayer, P., Blum, P., 2010a. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2611-2625.
- Hähnlein, S., Blum, P., Bayer, P., 2011. Oberflächennahe Geothermie - aktuelle rechtliche Situation (Shallow geothermal energy - current legal situation). *Grundwasser* 16, 69-75.
- Hähnlein, S., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., Grathwohl, P., 2010b. Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden (Cold plumes in groundwater for ground source heat pump systems). *Grundwasser* 15, 123-133.
- Hall, E.K., Neuhauser, C., Cotner, J.B., 2008. Toward a mechanistic understanding of how natural bacterial communities respond to changes in temperature in aquatic ecosystems. *The ISME Journal*, 1-11.
- Hancock, P.J., Hunt, R.J., Boulton, A.J., 2009. Preface: hydrogeoecology, the interdisciplinary study of groundwater dependent ecosystems. *Hydrogeology Journal* 17, 1-3.
- Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., 2010. Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems. *Ground Water* 48, 741-756.
- Hecht-Méndez, J., Paly, M.d., Beck, M., Bayer, P., 2013. Optimization of energy extraction for vertical closed-loop geothermal systems considering groundwater flow. *Energy Conversion and Management* 66, 1-10.
- Hellström, G., Sanner, B., 2000. EED Earth Energy Designer, in: 2.0, U.M.-V. (Ed.).
- Ilieva, D., Morasch, B., Haderlein, S.B., 2011. Risikominimierung beim Einsatz von Additiven in Wärmeträgerflüssigkeiten, in: *Zwischenbericht, P.N.Z.E. (Ed.), Programm "Herausforderung Erdwärme"*, Karlsruhe.
- Ingerle, K., 1988. Beitrag zur Berechnung der Abkühlung des Grundwasserkörpers durch Wasserpumpen. *Österreichische Wasserwirtschaft* 40, 280-284.
- Katsura, T., Nagano, K., Takeda, S., 2008. Method of calculation of the ground temperature for multiple ground heat exchangers. *Applied Thermal Engineering* 28, 1995-2004.
- Klotzbücher, T., Kappler, A., Straub, K.L., Haderlein, S.B., 2007. Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. *Geothermics* 36, 348-361.
- Kolb, D., Heise, K.-D., 1979. Wärmepumpen mit Grundwassernutzung, in: Glatzel, W.-D., Heise, K.-D. (Eds.), *Wärmepumpen und Gewässerschutz*. Erich Schmidt Verlag, Berlin, pp. 283-308.
- Kölbel, T., Münch, D.W., König, R., Leucht, M., Campillo-Bermudo, G., 2009. Erdwärme aus Kundensicht. *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie*, 88-94.
- Langevin, C.D., Jr., D.T.T., Dausman, A.M., Sukop, M.C., Guo, W., 2008. SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport., Book 6, Cha. A22. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Reston, Virginia: USGS.
- Lerm, S., Alawi, M., Miethling-Graff, R., Wolfgramm, M., Rauppach, K., Seibt, A., Würdemann, H., 2011. Influence of microbial processes on the operation of a cold store in a shallow aquifer: impact on well injectivity and filter lifetime. *Grundwasser* 16, 93-104.
- LFBW, 2005. Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, p. 28.

- Lippmann, M.J., Tsang, C.F., 1980. Groundwater use for cooling: associated aquifer temperature changes. *Ground Water* 18, 452-458.
- LoRusso, S., Civita, M.V., 2009. Open-loop groundwater heat pumps development for large buildings: A case study. *Geothermics* 38, 335-345.
- Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L., 2011. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics* 40, 159-180.
- Lund, J.W., Sanner, B., Rybach, L., Curtis, R., Hellström, G., 2004. Geothermal (ground - source) heat pumps a world overview. *GHC Bulletin* September, p. 10.
- Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S., Blum, P., 2013. Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the Total Environment* 442, 123-133.
- Mihelcic, J.R., Crittenden, J.C., Small, M.J., Shonnard, D.R., Hokanson, D.R., Zhang, Q., Chen, H., Sorby, S.A., James, V.U., Sutherland, J.W., Schnoor, J.L., 2003. Sustainability Science and Engineering: The Emergence of a New Metadiscipline. *Environmental Science and Technology* 37, 5314-5324.
- Molina-Giraldo, N., Bayer, P., Blum, P., 2011a. Evaluating the influence of thermal dispersion on temperature plumes from geothermal systems using analytical solutions. *International Journal of Thermal Sciences* 50, 1223-1231.
- Molina-Giraldo, N., Bayer, P., Blum, P., Cirpka, O.A., 2010. Propagation of Seasonal Temperature Signals into an Aquifer upon Bank Infiltration. *Ground Water* 49, 491-502.
- Molina-Giraldo, N., Blum, P., Zhu, K., Bayer, P., Fang, Z., 2011b. A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences* 0, 2506-2513.
- Morofsky, E., 2007. History of thermal energy storage. *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*, NATO Science Series 234, 3-22.
- Mottaghy, D., Pechnig, R., Vogt, C., 2011. The geothermal project Den Haag: 3D numerical models for temperature prediction and reservoir simulation. *Geothermics* 40, 199-210.
- Palmer, C.D., Blowes, D.W., Frind, E.O., Molson, J.W., 1992. Thermal Energy Storage in an Unconfined Aquifer, 1. Field Injection Experiment. *Water Resources Research* 28, 2845-2856.
- Pannike, S., Kölling, M., Panteleit, B., Reichling, J., Scheps, V., Schulz, H.D., 2006. Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten (Influence of hydrogeological parameters on temperature variations due to borehole heat exchangers). *Grundwasser* 11, 6-18.
- Parriaux, A., Tacher, L., Joliquin, P., 2004. The hidden side of cities—towards three-dimensional land planning. *Energy and Buildings* 36, 335-341.
- Philippacopoulos, A.J., Berndt, M.L., 2001. Influence of debonding in ground heat exchangers used with geothermal heat pumps. *Geothermics* 30, 527-545.
- Pijls, C.G.J.M., Boode, J., 2011. Combination of shallow geothermal energy systems and soil remediation - Practical experiences in the Netherlands, in: Stuttgart, U. (Ed.), *Mitteilungen / Institut für Wasserbau*, pp. 5-12.
- Preene, M., 2008. Sustainable groundwater-source cooling systems for buildings. *Engineering Sustainability* 161, 123-133.
- Rügner, H., Finkel, M., Kaschl, A., Bittens, M., 2006. Application of monitored natural attenuation in contaminated land management - A review and recommended approach for Europe. *Environmental Science & Policy* 9, 568-576.
- Rybach, L., 2003. Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics* 32, 463-670.
- Rybach, L., 2010. Status and prospects of geothermal energy, *World Geothermal Congress*, Bali, Indonesia.
- Rybach, L., Eugster, W.J., 2010. Sustainability aspects of geothermal heat pump operation, with experience from Switzerland. *Geothermics* 39, 365-369.
- Rybach, L., Mongillo, M., 2006. Geothermal Sustainability - A Review with Identified Research Needs. *Geothermal Resources Council (GRC) Transactions* 30, 1083 - 1090.

- Saner, D., Juraske, R., Kübert, M., Blum, P., Hellweg, S., Bayer, P., 2010. Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallowgeothermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1798-1813.
- Sanner, B., 2008. Guideline, standards, certification and legal permits for Ground source heat pumps in the European Union, 9th International IEA Heat Pump Conference, Zürich, Switzerland, p. 9.
- Sanner, B., Kabus, F., Seibt, P., Bartels, J., 2005. Underground Thermal Energy Storage for the German Parliament in Berlin, System Concept and Operational Experiences, World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, p. 8.
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinou, D., Rybach, L., 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics* 32, 579-588.
- Santi, P.M., McCray, J.E., Martens, J.L., 2006. Investigating cross-contamination of aquifers. *Hydrogeology Journal* 14, 51-68.
- Sass, I., Burbaum, U., 2010. Damage to the historic town of Staufen (Germany) caused by geothermal drillings through anhydrite-bearing formations. *Acta Carsologica* 39, 233-245.
- Schädler, S., Morio, M., Bartke, S., Rohr-Zänker, R., Finkel, M., 2011. Designing sustainable and economically attractive brownfield revitalization options using an integrated assessment model. *Journal of Environmental Management* 92, 827-837.
- Schippers, A., Reichling, J., 2006. Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. *Grundwasser* 11, 40-45.
- Schmidt, T., Hellström, G., 2005. Ground source cooling - Working paper on usable tools and methods, EU Commission SAVE program and Nordic Energy research, p. 21.
- Signorelli, S., Kohl, T., Rybach, L., 2004. Sustainability of production from borehole heat exchanger fields, 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Slenders, H.L.A., Dols, P., Verburg, R., Vries, A.J.d., 2010. Sustainable remediation panel: sustainable synergies for the subsurface: combining groundwater energy with remediation. *Remediation Journal* 20, 143-153.
- Snijders, A.L., 1990. Research on hydrochemistry and water treatment for heat storage; state of the art, in: Hooghart, J.C., Posthumus, C.W.S. (Eds.), *Hydrochemistry and energy storage in aquifers*. TNO Committee on Hydrological Research, Ede, The Netherlands, pp. 125-138.
- TFEU, 2010. Consolidated version of the Treaty on the Functioning of the European Union, 2010/C 83/01. European Parliament.
- Tsang, C.F., Lippmann, M.J., Witherspoon, P.A., 1977. Production and reinjection in geothermal reservoirs. *Geothermal Resources Council Transactions* 1, 301-303.
- UMBW, 2005. Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden, in: Umweltministerium Baden-Württemberg (Ed.), Stuttgart, p. 28.
- UMBW, 2009. Arbeitshilfe zum Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen für Ein- und Zweifamilienhäuser oder Anlagen mit Energieentzug bis zirka 45.000 kWh pro Jahr, in: Umweltministerium Baden-Württemberg (Ed.), Stuttgart.
- UN, 2002. Johannesburg Declaration on Sustainable Development, in: Nations, U. (Ed.), A/CONF.199/20, Johannesburg, South Africa.
- Vanhoudt, D., Desmedt, J., Bael, J.V., Robeyn, N., Hoes, H., 2011. An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings. *Energy and Building* 43, 3657-3665.
- VDI, 2001. Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen (Part 2: Thermal use of the underground - Ground source heat pump systems), VDI-4640/2. Verein Deutscher Ingenieure, p. 43.
- VDI, 2010. Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrundes - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte (Part 1: Thermal use of the underground - Fundamentals, approvals, environmental aspects), VDI-4640/1. Verein Deutscher Ingenieure.

- Verones, F., Hanafiah, M.M., Pfister, S., Huijbregts, M.A.J., Pelletier, G.J., Koehler, A., 2010. Characterization factors for thermal pollution in freshwater aquatic environments. *Environmental Science & Technology* 44, 9364–9369.
- Wagner, R., Koch, M., Adinolfi, M., 1988. Chemische und biologische Prozesse in Aquifer-Wärmespeichern, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft e.V. Stuttgart, p. 106.
- Warner, D.L., Algan, U., 1984. Thermal Impact of Residential Ground-Water Heat Pumps. *Ground Water* 22, 6-12.
- Wasy, 2010. White Papers Vol. 5, DHI-Wasy GmbH, Berlin.
- Willibald, D., 1979. Auswirkungen von Wärmepumpen auf das Grundwasser, in: Glatzel, W.-D., Heise, K.-D. (Eds.), *Wärmepumpen und Gewässerschutz*. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Wright, P.M., 1998. The sustainability of production from geothermal resources. *Geo Heat Center (GHC) Quarterly Bulletin* 19, 9-12.
- Wunderlich, M., 1979. Auswirkungen des Wärmeentzugs auf die Güte von Oberflächengewässern, in: Glatzel, W.-D., Heise, K.-D. (Eds.), *Wärmepumpen und Gewässerschutz*. Erich Schmidt Verlag, Berlin, pp. 183-194.
- Yang, H., Cui, P., Fang, Z., 2010. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. *Applied Energy* 87, 16-27
- Yates, M.V., Gerba, C.P., Kelley, L.M., 1985. Virus persistence in groundwater. *Applied and Environmental Microbiology* 49, 778-781.
- Younger, P.L., 2008. Ground-coupled heating-cooling systems in urban areas: How sustainable are they? *Bulletin of Science Technology & Society* 28, 174-182.
- Zhou, Y.-z., Zhou, Z.-f., 2009. Simulation of thermal transport in aquifer: A GWHP system in Chengdu, China. *Journal of Hydrodynamics* 21, 647-657.
- Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K.-D., Bayer, P., 2010. Geothermal potential of urban heat islands. *Environmental Research Letters* 5.
- Zuurbier, K.G., Hartog, N., Valstar, J., Post, V.E.A., Breukelen, B.M.v., 2013. The impact of low-temperature seasonal aquifer thermal energy storage (SATES) systems on chlorinated solvent contaminated groundwater: Modeling of spreading and degradation. *Journal of Contaminant Hydrology* 147, 1-13.

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse kurz zusammengefasst und ein Fazit zur Nachhaltigkeit und der rechtlichen Situation der oberflächennahen Geothermie gezogen.

Die Zahl der geothermischen Anlagen steigt kontinuierlich. Gleichzeitig besteht weltweit ein steigender Energiebedarf und ein politisches Interesse an verstärktem Umwelt- und Klimaschutz. Aus diesen Gründen werden erneuerbare Energien, wie auch die Geothermie gefördert. Die Nutzung geothermischer Energie hat jedoch Auswirkungen auf den Untergrund und das Grundwasser. Insbesondere kommt es zu Veränderungen der physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Grundwassers und damit auch des Untergrunds. Gleichzeitig ist es besonders schützenswert, denn in der Europäischen Union beziehen ca. 75 % der Bevölkerung ihr Trinkwasser aus Grundwasser [1]. Dies zeigt, dass ein Gleichgewicht unter der Berücksichtigung der Bedürfnisse aller Nutzer - Tiere, Pflanzen und Menschen - zwischen Schutz und Nutzung des Grundwassers gefunden werden muss.

Ein erstes Ziel dieser Arbeit war daher die Analyse der rechtlichen Situation in Deutschland und ergänzend die internationale rechtliche Situation. In den Leitfragen wurde dabei nach der rechtlichen Behandlung flacher Geothermie und ihrer Auswirkungen gefragt. Ein zweites Ziel war die Analyse der Auswirkungen und des Nachhaltigkeitsbegriffs in der Geothermie, mit den Leitfragen, welche Auswirkungen die Geothermie überhaupt hat und wie die Nutzung der Geothermie nachhaltig gestaltet werden kann. Ergänzend dazu werden Ansätze zur Implementierung des Nachhaltigkeitsgedanken in der oberflächennahen Geothermie zu dessen langfristiger Sicherung aufgezeigt.

Bezüglich der oberflächennahen Geothermie existiert in Deutschland aktuell kein spezifisches Gesetz. Rechtliche Rahmenregelungen lassen sich grundsätzlich jedoch aus dem Wasserhaushalts-, Bundesberg-, Bundesnaturschutz- oder Bundes-Immissionsschutzgesetz ableiten. In allen Bundesländern existieren spezielle Leitfäden zur thermischen Grundwassernutzung mit EWS. Diese werden durch zugehörige Ländergesetze und entsprechende Verwaltungsvorschriften ergänzt. Kübert et al. [2] zeigen auf, wie sich länderspezifische Genehmigungsverfahren und deren Anforderungen zum Teil erheblich unterscheiden.

Das deutsche Wasserhaushaltsgesetz ist das grundlegende Gesetz für den Gewässerschutz, dessen Ziel eine

nachhaltige Bewirtschaftung zum Schutz und zur Sicherung der Gewässer ist. So sind vermeidbare nachteilige Beeinträchtigungen zu unterlassen, wobei der Begriff der nachteiligen Veränderung bisher nicht genau definiert ist (vgl. Kapitel 4 und [3]).

Hinweise zur Interpretation, insbesondere der chemischen Veränderungen, bietet beispielsweise die Grundwasserverordnung [4] oder die Bundesbodenschutzverordnung [5]. Thermische Verschmutzungen sind jedoch auch darin nicht explizit aufgeführt. Dies ist erstaunlich, da der Eintrag von Wärme auf der Ebene der Europäischen Union als Verschmutzung anerkannt ist [6].

Das Bundesberggesetz ist insbesondere deshalb von Bedeutung, da es eine Gewinnung der Erdwärme unter die Bewilligungspflicht stellt, wenn die Erdwärmeanlage über die Grundstücksgrenzen hinausragt, das Nachbargrundstück thermisch oder stofflich beeinträchtigt und die gewonnene Wärme nicht rein grundstücksbezogen eingesetzt wird (vgl. Kapitel 4 und [7]). Somit stellt das Bundesberggesetz eine weitere argumentative Grundlage für Mindestabstände zwischen geothermischen Anlagen oder anderen Referenzpunkten dar.

Um den Vorgaben des Wasserhaushaltsgesetzes bezüglich eines vorsorgenden Grundwasserschutzes zu entsprechen und die Auswirkungen der Temperaturanomalien einzuschränken, wurden von den Bundesländern insbesondere im Jahr 2006 Leitfäden zur Nutzung von EWS eingeführt. In den Leitfäden sind Sonden- und Grenzabstände für den Bau von EWS vorgegeben. Die empfohlenen Mindestabstände liegen zwischen 5 m und bis zu 10 m (Tab. 1 in Kapitel 4). Dabei stellt sich die Frage, ob diese Abstände ausreichend sind. Für eine schnelle Abschätzung der Ausdehnung von Temperaturfahnen bei Einzelanlagen im Grundwasser mit stationärem Zustand kann die analytische Gleichung in Kapitel 2 herangezogen werden. Sie simuliert Konduktion, Konvektion und dispersiven Wärmetransport. Mit den Berechnungen konnte gezeigt werden, dass die Ausdehnung der Anomalien von verschiedenen Materialparametern und insbesondere der Fließgeschwindigkeit des Grundwasser abhängig ist. Diese wirkt sich wie folgt aus: Mit zunehmender Fließgeschwindigkeit,

- dominiert der konvektive gegenüber dem konduktiven Wärmetransport.
- weisen die Anomalien im stationären Zustand geringere Längsausdehnungen auf.

Im Vergleich zu Einheiten mit geringeren Durchlässigkeiten

- werden die Anomalien schneller stationär.
- können die Anomalien schneller regeneriert werden.

Es wurde gezeigt, dass für Sand- und Kiesaquifere der typische Mindestabstand von 10 m bei den angenommenen konservativen Bedingungen im stationären Zustand bereits innerhalb einer Heizperiode (100 Tage) überschritten wird. Für Festgesteinseinheiten werden die Anomalien bei konservativen Betrachtungen innerhalb einer Heizperiode nicht stationär. In Bezug auf die Genehmigungspraxis kann somit festgestellt werden, dass hydrogeologische Bedingungen berücksichtigt werden müssen und pauschale Abstandsregelungen nicht sinnvoll sind.

Die im Rahmen dieser Dissertation erarbeiteten Ergebnisse präsentieren ebenfalls ein heterogenes Bild der internationalen rechtlichen Situation bezüglich oberflächennaher Geothermie. In den meisten der 48 befragten Ländern aus Europa, Amerika und Asien bestehen diesbezüglich keinerlei Regelungen. Die Gründe dafür sind entweder, dass nur tiefe geothermische Reservoirs genutzt werden, dass nur wenige flache geothermische Anlagen in Betrieb sind oder die Auswirkungen als von nicht großer Bedeutung angesehen werden. Auf Basis der Ergebnisse aus der internationalen Umfrage lässt sich des Weiteren festhalten, dass im weltweiten Vergleich in Europa die meisten Regelungen, Leitfäden, Normen und Zertifikate für die oberflächennahe Geothermie existieren. Dabei zeigen sich die Staaten Liechtenstein und Finnland als die am stärksten regulierten Länder. Dies ergibt sich aus der Situation, dass in der Europäischen Union flache geothermische Anlagen häufiger genutzt werden, als beispielsweise in Neuseeland, El Salvador, Indonesien oder Mittelamerika. Dort liegt der Schwerpunkt auf tiefen Geothermieanlagen zur Stromgewinnung. Im Gegensatz dazu bestehen in China und Korea, trotz hoher und steigender Zahlen an flachen Anlagen, bisher nur schwache und wenige Regelungen. Bestehende Regelungen weisen international beträchtliche Unterschiede bezüglich ihrer Vorgaben, sowie der rechtlichen Verankerung auf. So variieren beispielsweise die akzeptierten Temperaturdifferenzen von ungestörter zu gestörter Untergrundtemperatur zwischen ± 3 K in Liechtenstein und ± 11 K in Frankreich. Die Grenzwerte sind ausführlich in Kapitel 3 dargestellt und diskutiert.

Es konnte gezeigt werden, dass die bestehenden Bestimmungen zur oberflächennahen Geothermie ungenügend sind. Für die Sicherstellung einer nachhaltigen Gestaltung ist es jedoch notwendig, naturwissenschaftlich fundierte Kriterien für eine solche Nutzung zu definieren und diese zukünftig in gesetzliche Regelungen zu überführen. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen,

dass in den verschiedenen Regionen unterschiedliche klimatische aber auch soziale, kulturelle und politische Ausgangsbedingungen bestehen. Dabei ist insbesondere die klimatische Situation, sowie sich daraus ergebende Anforderungen (Heizen, Kühlen oder Kombination beider Funktionen) zu nennen. Ebenso müssen Anregungen zur Markteinführung der Technik, beispielsweise Förderprogramme und die Vermarktung selbst die wirtschaftliche und developmentpolitische Lage der Länder berücksichtigen.

Das Ziel politischer Bemühungen sollte sein, eine weltweit gültige Konvention, beispielsweise unter dem Dach der Vereinten Nationen, zum Schutz des Grundwassers und dessen nachhaltiger Nutzung zu verfassen. Auf Europäischer Ebene sollten das vorgestellte Verfahrensschema, ökologische Kriterien sowie Temperaturgrenzwerte in der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie integriert werden. In Deutschland muss die Implementierung des Wärmeeintrags entweder im Wasserhaushaltsgesetz oder in der Grundwasserverordnung erfolgen.

Auf Basis der Ergebnisse der Dissertation lässt sich festhalten, dass für die Festlegung rechtlicher Regelungen folgende Punkte beachtet werden sollten:

- Das Prinzip der Temperaturgrenzwerte für Erwärmung und Abkühlung des Grundwassers und des Untergrundes ist nicht von Grund auf falsch. Als Temperaturgrenzwerte sollten jedoch keine statischen Werte festgelegt werden. Es müssen die lokale Hydrogeologie und anthropogene Anomalien erfasst werden. Relative Temperaturgrenzwerte zur ungestörten Grundwassertemperatur bzw. Untergrundtemperatur als flexible Lösung sind daher empfehlenswert.
- Bei den Mindestabständen zwischen Anlage und Referenzpunkt sollte das gleiche Prinzip gelten. Es müssen die Hydrogeologie, insbesondere die Grundwasserfließgeschwindigkeit, Entzugsleistungen und die Positionierung weiterer Anlagen (parallel oder orthogonal zum Grundwasserfluss etc.) Berücksichtigung finden.
- Bei der Planung und Bewertung oberflächennaher geothermischer Anlagen sollte entsprechend dem entwickelten Schema (siehe Kapitel 5, Abb. 3) vorgegangen werden und die dort integrierten Stufen Typ, Nutzung, Größe, technische Prüfung, ökologische Prüfung und Monitoring Berücksichtigung finden.

Grundsätzlich muss dabei beachtet werden, dass neue rechtliche Regelungen keine Hemmschwelle für Interessenten, Markteinführung oder Förderung bedeuten dürfen. Sie sollen zur rechtlichen Absicherung von Planern, Installateuren und Betreibern aber ebenso zur Sicherung der Grundwasserqualität und des Untergrundes beitragen (vgl. Abb. 1.2).

Bezüglich der Nachhaltigkeit oberflächennaher Geothermieanlagen müssen verschiedene Punkte, wie die Betrachtungsdauer, sowie technische, ökologische, ökonomische und soziale Aspekte berücksichtigt werden. Man kann davon ausgehen, dass der Wärmehaushalt durch eine Wechselfolge von Wärmeentnahme und Wärmezugabe im mehrjährigen Mittel erhalten bleibt und somit in Bezug auf die technische Nachhaltigkeit als positiv zu bewerten ist. Betrachtet man den einzelnen Betriebszyklus (mittelfristig), kann ohne den alternierenden Einsatz von Abkühlung und Erwärmung der Wärmehaushalt aus dem Gleichgewicht gebracht und je nach hydrogeologischen Bedingungen nur bedingt regeneriert werden. Hier kann sich ein System ausbilden, das im Sinne der technischen Nachhaltigkeit als nicht nachhaltig zu bezeichnen wäre.

In Bezug auf die ökologische Nachhaltigkeit lässt sich festhalten, dass unter anderem nach den Untersuchungen von Brielmann et al. [8] in ungestörten Aquiferen eine nicht zu starke Temperaturspreizung (mit typischen Werten von ± 3 K bis zu ± 6 K) vertretbar zu sein scheint. Jedoch ist auch hier zu betonen, dass der Grundwassercharakter und natürliche Anomalien berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich müssen Temperaturanomalien beim Einsatz der Geothermie in Kauf genommen werden. Es besteht jedoch die Chance, im Sinne des Vorsorgeprinzips, ökologische Kriterien zu entwickeln die eine dauerhafte Schädigung der Ökosysteme im Untergrund und Grundwasser vermeiden und diese Anomalien als anthropogene geothermische Ressource zu gestalten. Eine ausführliche Diskussion findet sich in Kapitel 5. Es ist empfehlenswert die dort dargestellten Kriterien bei der Planung und Installation von Neuanlagen, sowie der Bewertung bestehender Anlagen zu berücksichtigen. So können die Anlagen ganzheitlich auf ihre Nachhaltigkeit geprüft werden. Für eine langfristige Sicherung nachhaltiger geothermischer Anlagen ist es wichtig solche Kriterien rechtlich zu verankern. Es ist festzuhalten, dass Art und Umfang der technischen und ökologischen Bewertung dabei stark von der geplanten Anlage abhängen. Bei der technischen Bewertung sollte mit numerischen oder analytischen Lösungen der Wärmetransportgleichung, die Ausdehnung und Intensität der entstehenden Kältefahnen ermittelt werden. Die ökologische Untersuchung gestaltet sich derzeit noch deutlich schwieriger. Es wurde gezeigt (vgl. Kapitel 5), dass insbesondere in Bezug auf das Ökosystem Grundwasser noch weiterer Forschungsbedarf besteht. In der Hauptsache offenbart sich dieser Bedarf hinsichtlich der Funktionen der Mikroorganismen und deren Einflüsse auf die geothermischen Anlagen, dem Prozessverständnis auf langfristige Sicht und den langfristigen Auswirkungen. Zusätzlich müssen auch hier die lokalen Unterschiede in Hy-

drogeologie und chemische, sowie biologische Hintergrundbedingungen (Anomalien) berücksichtigt werden. Natürliche chemische Anomalien oder anthropogen begründete Verunreinigungen bedürfen unterschiedlicher Handhabung. Somit ist eine strikte einheitliche Vorgabe auch hier nicht zweckmäßig und angepasste Verfahrensabläufe sind empfehlenswert. In der Summe lässt sich auf Basis der vorliegenden Ergebnisse zusammenfassen, dass oberflächennahe Geothermie nachhaltig gestaltbar ist, wenn

- aus ökologischer Sichtweise
 - die Anlage umweltfreundlich mit 'grünem' Strom aus erneuerbarer Energie, wie Wasser-, Solar- oder Windkraft betrieben wird und dadurch CO₂- und Feinstaubemissionen reduziert und/oder eingespart werden (vgl. Bayer et al. 2011 [9]).
 - auftretende Auswirkungen auf den Untergrund und das Grundwasser, sowohl in kurz- als auch langfristiger Sicht, gering sind, so dass es nicht zu bleibenden Schäden kommt.
 - auftretende Veränderungen sich regenerieren können.
 - bei der Installation und während des Betriebs keine Verunreinigung des Aquifers und des Untergrundes durch Fremdstoffe auftritt.
- aus ökonomischer Sichtweise
 - die Anlage keine finanziellen Nachteile gegenüber anderen Heizungs- und Kühlungsanlagen mit sich bringt.
- aus sozialer Sichtweise
 - die Anlage benutzerfreundlich in Betrieb und Handhabung ist.
 - kein Mehraufwand, beispielsweise in der Wartung oder Reinigung, im Vergleich zu alternativen Anlagen besteht.
 - der Betreiber einen Beitrag zum Umweltschutz leisten kann und somit an sozialem Prestige gewinnt.
 - keine Konflikte zu benachbarten Anlagen (und damit auch zur Nachbarschaft) auftreten.
- aus technischer Sichtweise
 - die Anlage langfristig wartungsarm in Betrieb ist.
 - keine Einschränkungen bestehen
 - * durch und für benachbarte Anlagen und deren Temperaturanomalien.
 - * durch chemische oder mikrobiologische Einflüsse.
 - * durch thermische Kurzschlüsse.
 - * durch hydraulische Kurzschlüsse.

Je mehr dieser Punkte erfüllt sind, desto höher ist der Grad der Nachhaltigkeit einer oberflächennahe geothermische Anlage einzustufen.

Aus meiner Sicht kann mit einer nachhaltigen Gestaltung der oberflächennahen Geothermie und deren rechtlicher Verankerung, die Geothermie in der Zukunft einen wichtigen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz im Energiesektor liefern. Ein wichtiger Punkt dafür ist die Nutzung des Untergrundes und des Grundwassers als Wärmespeicher. Sonnenenergie die im Sommer mit Solaranlagen gewonnen wird, kann mit ATES und BTES Systemen im Untergrund gespeichert werden. Solche Anlagen müssen auch für Wohneinheiten mit verschiedenen kleineren Anlagen (Einfamilienhäuser) attraktiv gestaltet werden und benötigen daher eine besondere Planung. Des Weiteren ist es wichtig, dass bereits bei der Herstellung und des Betriebs geothermischer Anlagen auf Umweltaspekte Rücksicht genommen wird und unterschiedliche, umweltfreundliche Energiequellen verknüpft werden.

Grundsätzlich ist zu bedenken, dass der Fokus einer nachhaltigen Umweltpolitik auf der Reduzierung des Energiebedarfs liegen sollte. Im Hauptnutzungsbereich der flachen Geothermie, der Klimatisierung von Gebäuden, kann insbesondere die Gebäudedämmung einiges dazu beitragen. Ein weiterer Punkt ist die Nutzung von Abwärme, beispielsweise Computerabwärme in Bürogebäuden (z. B. Aquasar, ETH Zürich; Europäische Zentralbank in Frankfurt am Main). Ebenso sollte grundsätzlich bei der Neu- oder Umplanung städtischer Gebiete die Gewinnung und Nutzung von Erdwärme mit Flächenplanung, Sanierungsverfahren, Tiefbauarbeiten und Abwassernutzung kombiniert werden. So könnte die Wärme aus Tunneln oder von Abwässern beispielsweise für die Eisvermeidung auf Straßen genutzt werden. Schlussendlich ist es für den Ausbau nachhaltiger Geothermie unerlässlich durch interdisziplinäre Herangehensweise einen einheitlichen, naturwissenschaftlich begründeten gesetzlichen Rahmen zu schaffen.

Literatur

- [1] EUROPEAN-COMMISSION: Groundwater protection in Europe / European-Commission. 2008. – Forschungsbericht. – 36 S.
- [2] KÜBERT, Markus; WALKER-HERTKORN, Simone; BLUM, Philipp; BAYER, Peter ; HÄHNLEIN, Stefanie: Praktische Hinweise zur Genehmigungspraxis der thermischen Nutzung des Untergrundes. In: *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie* (2009), S. 8–13
- [3] WALKER-HERTKORN, Simone; KÜBERT, Markus; HÄHNLEIN, Stefanie; BAYER, Peter ; BLUM, Philipp: Rechtliche Situation bei der thermischen Grundwassernutzung in Deutschland. In: *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau* (2008), Nr. 10, S. 46–51
- [4] GRWV: *Grundwasserverordnung vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513)*. 2010
- [5] BBODSCHV: *Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 16 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist*. 2009
- [6] EU-WRRL: *Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG)*. 2000
- [7] HÄHNLEIN, Stefanie; BAYER, Dr. P.; BLUM, Dr. P.; KÜBERT, Dr. M. ; WALKER-HERTKORN, Dr. S.: Rechtliche Rahmenbedingungen bei der thermischen Grundwasserbewirtschaftung. In: *bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Sonderheft Oberflächennahe Geothermie* (2009), S. 14–21
- [8] BRIELMANN, Heike; LUEDERS, Tillmann; SCHREGLMANN, Kathrin; FERRARO, Francesco; AVRAMOV, Maria; HAMMERL, Verena; BLUM, Philipp; BAYER, Peter ; GRIEBLER, Christian: Oberflächennahe Geothermie und ihre potentiellen Auswirkungen auf Grundwasserökosysteme. In: *Grundwasser* 16 (2011), Nr. 2, S. 77–91
- [9] BAYER, P.; SANER, D.; BOLAYA, S.; RYBACH, L. ; BLUM, P.: Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), S. 1256–1267