



Originally published as:

Frick, S., Kaltschmitt, M. (2008): Ökologische Aspekte der tiefen Erdwärmenutzung - Analyse und Bewertung lokaler Umwelteffekte. - Erdöl, Erdgas, Kohle, 124, 7/8, 323-328

Ökologische Aspekte der tiefen Erdwärmenutzung – Analyse und Bewertung lokaler Umwelteffekte

Environmental Aspects using Deep Geothermal Energy – Analysis and Evaluation of Local Environmental Impacts

Stephanie Frick^a, Martin Kaltschmitt^b

^a GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam, frick@gfz-potsdam.de

^b Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE), Technische Universität Hamburg-Harburg, kaltschmitt@tu-harburg.de

Abstract

Die geothermische Strom- bzw. Strom- und Wärmeerzeugung soll – so der politische Wunsch, der sich in der energiepolitischen Weichenstellung niederschlägt – zukünftig einen deutlich größeren Beitrag zur Deckung der Energienachfrage in Deutschland – und perspektivisch weltweit – leisten. Damit gewinnen auch die mit einer derartigen Erdwärmenutzung verbundenen Umwelteffekte immer mehr an Bedeutung, denn die Mehrkosten einer Energiegewinnung aus Erdwärme sind nur zu rechtfertigen, wenn damit auch ein entsprechender Beitrag zum Umweltschutz geleistet wird. Deshalb ist es das Ziel dieser Ausarbeitung, die mit einer geothermischen Strom- bzw. Strom- und Wärmeerzeugung verbundenen lokalen Umwelteffekte zu identifizieren und zu bewerten. Dabei wird deutlich, dass diese Option mit nur wenigen Auswirkungen auf die natürliche Umwelt verbunden ist, die sich zudem meist innerhalb der gesetzlich definierten Grenzen bewegen.

According to the political will of the German Government stated within various energy related directives, power as well as power and heat provision from geothermal energy should make a larger contribution within the energy system in the future. The focus of these efforts is clearly on the environmental sound and climate neutral coverage of the German energy demand. On this background, environmental impacts due to energy provision from geothermal energy gain significant importance because additional costs compared to the use of fossil fuel energy (presently) connected with energy supply from the deep underground are only acceptable by the society if geothermal energy contributes significantly and transparently to the protection of the local and global environment. Therefore the objective of this paper is to identify and evaluate local environmental impacts related to geothermal power (and heat) provision. In doing so, it becomes evident that the potential impacts are regulated and controlled. Therefore they vary within the limitations defined by the legal administration. Only for restrictedly controllable micro-seismic activity potentially caused by stimulating the underground, this is not fully true. The use of deep geothermal energy is therefore in general characterised by fairly low impacts on the local environment. Thus, from a local viewpoint, geothermal energy can indeed contribute to a sustainable energy system in the future.

1 Hintergrund

Die geothermische Stromerzeugung stellt in Deutschland eine noch junge Option dar. Das erste geothermische Kraftwerk (gemäß dem Schema in Abb. 1) wurde 2003 in Neustadt-

Glewe durch Erweiterung der bereits bestehenden geothermischen Heizzentrale mit einer installierten elektrischen Leistung von 230 kW in Betrieb genommen [1]. Das zweite geothermische Kraftwerk mit einer Auslegungsleistung von 2,9 MW ist Ende 2007 in Landau in den Probetrieb gegangen [2]. Weitere Projekte (Unterhaching und Bruchsal) werden voraussichtlich 2008 zum ersten Mal Strom einspeisen [3], [4], so dass bis Ende 2008 eine installierte elektrische Leistung von rund 7 MW in Deutschland zu erwarten ist. Zusätzlich befinden sich noch eine Reihe weiterer geothermischer Projekte in der Entwicklung; beispielsweise waren Mitte 2007 im Süddeutschen Molassebecken mehr als 50 und im Oberrheingraben etwa 25 bergrechtliche Bewilligungsfelder mit dem Ziel der geothermischen Stromerzeugung angegeben [5], [6]. In den kommenden Jahren ist deshalb eine installierte geothermische Stromerzeugungsleistung im zweistelligen MW-Bereich zu erwarten.

Somit hat die Strom- bzw. die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung aus Erdwärme in der letzten Zeit in der energiepolitischen Diskussion in Deutschland merklich an Bedeutung gewonnen. Dies gilt einerseits aufgrund des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG), durch das finanzielle Anreize gesetzt wurden, damit eine Stromerzeugung aus Erdwärme Eingang in den Markt findet. Andererseits ist die geothermische Stromerzeugung aber auch durch die Vorkommnisse in Basel medienwirksam in die Negativ-Schlagzeilen gekommen. Dort wurden durch Erschließungsarbeiten im Untergrund Ende 2006 fühlbare Erdstöße ausgelöst. Wenngleich in Wirklichkeit nur Sachschäden von vergleichsweise untergeordneter Bedeutung verursacht wurden [7], hatte dieses Ereignis doch zur Folge, dass die Vorbehalte in der Bevölkerung gegenüber möglichen lokalen Umwelteffekten merklich zugenommen haben.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel der folgenden Ausführungen, möglicherweise auftretende lokale Umweltwirkungen einer geothermischen Strom- bzw. Strom- und Wärmeerzeugung in Deutschland auf Basis von Fachliteratur und Expertenbefragungen zu untersuchen und zu bewerten. Dabei wird unterschieden zwischen den Umwelteffekten Unter- und Übertage (vgl. Abb. 1).

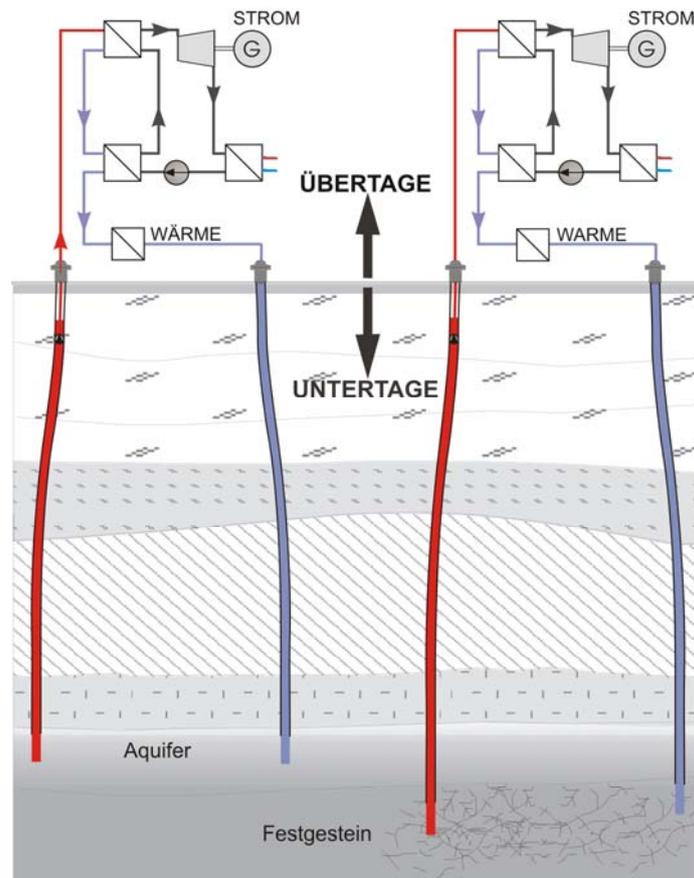


Abb. 1: Schematische Darstellung von Unter- und Übertage teil geothermischer Strom- bzw. Strom- und Wärmebereitstellung

2 Lokale Umwelteffekte Untertage

Die Nutzung geothermischer Vorkommen zur Stromerzeugung basiert auf der Erschließung des Untergrunds mittels Tiefbohrungen und ggf. anschließender Stimulation. Die dazu jeweils notwendigen Techniken werden in der Erdöl- und Erdgasindustrie bereits seit Jahrzehnten eingesetzt. Deshalb sind die mit der Erschließung des tiefen Untergrunds verbundenen Umwelteffekte weitgehend bekannt. Sie werden nachfolgend diskutiert.

2.1 Stoffliche Einträge

Bei den potenziellen Stoffeinträgen in den Untergrund ist zwischen der Erschließung, dem Betrieb und der Stilllegung der Anlage zu unterscheiden.

Während der Erschließung eines geothermischen Vorkommens können Stoffe in den Boden und den Untergrund eingetragen werden.

Einträge in den Boden z. B. durch am Bohrplatz gelagerte Stoffe und Betriebsmittel können durch eine sachgerechte Bohrplatzeinrichtung, wie sie durch das Bergrecht geregelt ist, nahezu vollständig vermieden werden.

Demgegenüber erfolgt ein unvermeidbarer stofflicher Eintrag während der Erschließung des Untergrunds durch das Eindringen der Bohrspülung in den Bohrlochnahbereich (d. h. in einem Umkreis von mehreren cm [8] bis ca. 2 m [9] um das Bohrloch). Dies ist aus technischer Sicht notwendig, um eine Bohrlochabdichtung und -abstützung zu gewährleisten [10]. Im Bereich wasser- oder gasführender Gesteinsschichten sowie in geologischen Ausnahmefällen (z. B. Störungszonen) ist auch ein weitergehender Eintrag der Bohrspülung

in den Untergrund über den Bohrlochnahbereich hinaus möglich. Deshalb wird die Bohrspülung jeweils an die entsprechenden geologischen Bedingungen angepasst. Der Eintrag von Bohrspülung in bereits niedergebrachte Bohrabschnitte wird durch ein unmittelbares Verrohren und Zementieren dieses Abschnitts nach dessen Fertigstellung (sog. Absperren) ausgeschlossen. Aufgrund der tragenden Funktion der Bohrspülung für eine technisch sichere Bohrungsniederbringung sowie deren Umweltgefährdungspotenzial ist die Zulassung der Bohrspülung Teil eines bergrechtlich zu genehmigenden Betriebsplans. Damit kann die Behörde unmittelbar Einfluss auf die potenziellen Umweltauswirkungen nehmen; in der Regel müssen beispielsweise Grundwasser nahe Bohrabschnitte unmittelbar abgesperrt werden.

Wird der Untergrund nach der Bohrungsniederbringung zusätzlich stimuliert, werden dadurch Stoffe in das Reservoir eingetragen. Je nach den geologischen Gegebenheiten und dem angewandten Stimulationsverfahren (d. h. chemische oder hydraulische Stimulation) werden Fluid-Gesteins-Wechselwirkungen (vor Allem bei Säuerung) erzeugt und ggf. verbleiben Fluid-Komponenten (z. B. Stützmittel) im Untergrund. Da es jedoch Ziel einer nachhaltigen Stimulation ist, die Lagerstätte nicht zu beschädigen und so einen effektiven Langzeitbetrieb zu ermöglichen, sind zum gegenwärtigen Kenntnisstand keine negativen Umweltauswirkungen zu erwarten [11], [12].

Während des Anlagenbetriebs können Stoffe in den Boden ggf. durch eine defekte Thermalwasserleitung eingetragen werden. Die in Abhängigkeit von den lokalen Bodenverhältnissen und der Thermalwasserzusammensetzung gegebene mögliche Umweltgefährdung wird durch das Bergrecht oder das Wasserhaushaltsrecht begrenzt bzw. verhindert. Von stofflichen Einträgen in das Reservoir (z. B. Eintrag von Ausfällungsprodukten) oder ggf. entstehenden Zirkulationsverlusten sind bisher keine umweltrelevanten Auswirkungen zu erwarten [12], [14].

Um Schadstoffeinträge in einer stillgelegten Geothermieanlage zu verhindern, wird im Rahmen des Bergrechts eine sachgemäße Verfüllung und Abdichtung der Bohrung gefordert.

2.2 Thermische Beeinflussungen

Durch die Reinjektion des abgekühlten Thermalwassers kommt es im Bereich der Injektionsbohrung zu einer Auskühlung des Untergrunds [9], [14]. Berechnungen z. B. bei hydrothermalen Reservoiren zeigen, dass nach 30 Betriebsjahren die Temperatur um mehr als 10 K in einem Radius von weniger als 70 m um die Injektionsbohrung abnimmt [15]. Bei künstlich erzeugten Riss-Systemen kann diese Ausbreitung je nach der Anbindung an ein natürliches Zirkulationssystem größer ausfallen [16]. Dadurch bedingt kann es ggf. zu hydraulischen Veränderungen in der Lagerstätte, mikrobiologisch induzierten Ausfällungen und schließlich zur Beeinträchtigung des Förder- und Injektionsverhalten kommen [14]. Abgesehen von möglichen anlagentechnischen Problemen, sind davon ausgehende Umweltauswirkungen bisher nicht bekannt [11], [17], [18]. Zudem setzt nach dem Ende der Nutzungsdauer der Regenerationsprozess ein und eine ca. 95 %-ige Wiederherstellung des Ursprungszustands im Reservoir wird nach eine Zeitspanne, die in etwa der der Nutzungsdauer entspricht, erwartet [19].

Durch die Förderung sowie den Transport des heißen Thermalwassers kommt es im Nahbereich des Bohrlochs und bei einer untertägigen Verlegung der Thermalwasserpipeline in unmittelbarer Nähe zu einer Erwärmung des Bodens. Der resultierende Eintrag thermischer Energie ist aber lokal eng begrenzt [20]. Zudem sind bei einer entsprechenden Isolierung der obertägigen Transportleitung, die in der Regel schon allein aus Wirtschaftlichkeitsgründen realisiert wird, keine umweltschädlichen Temperaturgradienten zu erwarten. Trotzdem kann durch eine Veränderung der Bodentemperatur die Aktivität der Bodenfauna und -flora

beeinflusst werden. Ab Tiefen von ca. 10 m können diese Einflüsse allerdings aufgrund der kontinuierlichen Abnahme der Bodenfauna und -flora i. Allg. vernachlässigt werden [21].

2.3 Hydraulische Veränderungen

Bei der Bohrungsniederbringung müssen ggf. nutzbare Wasserstockwerke (z. B. grundwasserführende Gesteinsschichten) durchteuft werden. Dadurch kann es zu einem hydraulischen Kurzschluss zwischen verschiedenen Grundwasserleitern und damit zur Vermischung von Grundwässern unterschiedlicher Qualitäten kommen [9]. Um dies auszuschließen, müssen nutzbare Wasserstockwerke gemäß der bergrechtlichen Vorgaben abgesperrt werden.

Durch die Stimulation des Untergrunds und ggf. durch den Anlagenbetrieb kann es zu einer Veränderung der natürlichen Strömungsverhältnisse kommen. Ist eine hydraulische Verbindung unterschiedlicher wasserführender Gesteinsschichten gegeben, können sich zudem lokale Veränderungen der natürlichen Strömungsverhältnisse in einem Reservoir auch auf darüber oder darunter liegende Wasserstockwerke auswirken. Aufgrund der notwendigen Tiefe der für die Strom- bzw. gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung relevanten Reservoirs und z. T. auch der vorliegenden Thermalwasserzusammensetzung (z. B. stark mineralisierte Thermalwässer) ist eine hydraulische Verbindung zu und Beeinflussung von z. B. Grundwasserstockwerken aber auszuschließen [18]. Ein ungewollter hydraulischer Kurzschluss zwischen unterschiedlichen Wasserstockwerken ist unter den in Deutschland gegebenen geologischen Bedingungen – werden die einschlägigen Vorschriften eingehalten – nicht möglich [18].

2.4 Geomechanische Veränderungen

Durch Spannungsänderungen im Untergrund – beispielsweise aufgrund eines massiven Druckabfalls oder durch Auskühlung – kann es während des Anlagenbetriebs zur Setzung des Bodens kommen [22]. Die Größenordnung der Setzung ist dabei von der Beschaffenheit der das Reservoir überlagernden Gesteinsschichten abhängig [22], [23] und kann beispielsweise bei konventionellen geothermischen Lagerstätten bis zu mehreren Metern betragen (die größte bisher bekannte Setzung ist im Wairakei-Feld in Neuseeland aufgetreten, wo es auf einer Fläche von 1 km² zu einer Bodensetzung von 15 m gekommen ist [24]). Bei der Nutzung hydrothermalen Reservoirs in Deutschland sind derartige Erscheinungen aber nicht zu erwarten [22], [25]. Berechnungen haben ergeben, dass beispielsweise im Norddeutschen Becken eine maximale Bodensetzung von 2 bis 3 cm im Bohrungsnahbereich möglich ist [22]. Für den Betrieb von künstlichen Riss-Systemen sind ebenfalls keine größeren Bodensetzungen zu erwarten [26]. Schäden an Bausubstanzen werden erst ab großflächigeren Bodensetzungen von 3 cm und mehr als kritisch bewertet [22].

3 Umwelteffekte Übertage

Lokale Umwelteffekte, die Übertage auftreten, resultieren aus der Erschließung des Untergrunds und aus dem Anlagenbetrieb. Sie werden nachfolgend diskutiert.

3.1 Bohrlochausbruch

Werden vorgespannte, d. h. unter Druck stehende, fluidführende Gesteinsschichten bei der Bohrungsniederbringung durchteuft, kann es zu einem unkontrollierten Ausbruch des Bohrlochs (Blow-Out) kommen. Durch gesetzlich vorgeschriebene Absperreinrichtungen am Bohrlochkopf (sog. Blow-Out-Preventer) muss aber in jedem Bohrabschnitt im Falle eines

Ausbruchs ein Vollabschluss des Bohrlochs und des Ringraums gewährleistet werden. Dadurch wird ein kontrollierter Druckabbau möglich.

3.2 Erderschütterungen

Erderschütterungen können auftreten, wenn z. B. durch einen (plötzlichen) Spannungsauf- bzw. -abbau im Untergrund mikroseismische Ereignisse künstlich ausgelöst werden und sich über die umliegenden Gesteinsschichten bis zur Erdoberfläche hin ausbreiten.

Die durch die Bohrungsniederbringung ggf. bewirkten Änderungen des Spannungsfeldes im Untergrund sind unter den in Deutschland vorliegenden geologischen Bedingungen aber meist so gering, dass sie an der Erdoberfläche nicht fühlbar sind [27].

Bei der chemischen Stimulation des Untergrunds werden in der Regel Drücke und Fließraten merklich unterhalb der kritischen Parameter realisiert [28]. Deshalb ist auch hier die Gefahr von Erderschütterungen gering.

Bei hydraulischen Stimulationen (d. h. dem Verpressen von Stimulations-Fluid in das Reservoir) kann es aber in Abhängigkeit des natürlichen Spannungszustandes im Untergrund, der verpressten Fluidmenge sowie des Stimulationsdrucks zu induzierten mikroseismischen Ereignissen kommen. Zu unterscheiden ist dabei, ob die mikroseismischen Ereignisse durch den Stimulationsdruck selbst (d. h. durch Übersteigerung der kleinsten Hauptspannung im Gestein) ausgelöst werden oder ob durch die Stimulation eine natürlich aufgebaute Spannung (zeitgleich oder zeitversetzt) schlagartig abgebaut wird [29]. In beiden Fällen kann es – in Abhängigkeit der umliegenden Gesteinsschichten – zu einer Aufschaukelung und Ausbreitung der Ereignisse bis zur Erdoberfläche kommen.

Im Falle der Stimulation von hydrothermalen Lagerstätten sind entsprechend der bisherigen Erfahrung keine maßgeblichen Magnituden zu erwarten, da die Stimulation von wasserführenden Gesteinsschichten bislang zu keinen Schadböben geführt hat [27], [30]. Selbst bei massiven Stimulationsarbeiten im Forschungsprojekt Genesys wurden nur wenige Ereignisse in einer Größenordnung von Null auf der Richterskala registriert [27]. Auch bei den Forschungsarbeiten in Groß Schönebeck konnte bislang keine Seismizität an der Oberfläche gemessen werden [31].

Bei Stimulationen zur Erzeugung künstlicher Riss-Systeme im Kristallin bzw. Festgestein sind größere seismische Ereignisse jedoch nicht auszuschließen [26], [32]. Aufmerksamkeit hat hier Ende des Jahres 2006 das HDR-Projekt in Basel erregt. Während und auch nach Stimulationsarbeiten kam es zu mehreren Erdstößen mit Magnituden größer als 2 (maximale Magnitude 3,4) [30]. Dies lässt auf den Abbau natürlicher Spannungen schließen, für welche die tektonisch vorbelastete Region um Basel bekannt ist [32]. Eine derartige Magnitude kann dabei zwar als deutlich fühlbar, nicht aber als schädliche Umweltauswirkung bewertet werden [33]. Zusätzlich ist zu beachten, dass in der Region um Basel im jährlichen Mittel mehrfach Erdbeben einer Magnitude zwischen drei und vier auftreten und bislang keine Schäden verursacht haben [32]. Bei Stimulationsarbeiten im europäischen Forschungsprojekt Soultz-sous-Forêts lag die maximale Magnitude bei den Stimulationsarbeiten im September 2004 bei 2,9 [34] und bei den darauf folgenden Stimulationen der gleichen Bohrung im Februar 2005 mit höheren Drücken und größeren Volumina bei maximal 2,3 [35].

Aufgrund der geologischen Unterschiede, vor Allem in Bezug auf die überdeckenden Gesteinsschichten sowie den Spannungszustand im Untergrund, lassen diese Beispiele nur bedingt auf Auswirkungen vergleichbarer Stimulationsmaßnahmen in Deutschland schließen. Beispielsweise waren in den ehemaligen Forschungsprojekten in Falkenberg und Urach keine fühlbaren Ereignisse zu verzeichnen [26], [36]. Unabhängig davon ist eine Vorhersage von Zeit und Intensität bzw. das Ausschließen massiverer Erdstöße derzeit nicht möglich [26], [37], da die Informationen über den genauen Spannungszustand im Untergrund meist nicht

ausreichen [30]. Außerdem sind die genauen Abläufe beim Auslösen und Ausbreiten mikroseismischer Ereignisse noch ungenügend verstanden [31], [32], [34].

Stimulationsarbeiten werden in der bergrechtlichen Auslegung in der Regel als sekundäre Erschließungsmaßnahme angesehen und sind daher in Art und Umfang im vom Bergamt zu genehmigenden Betriebsplan anzugeben. Damit sind zwar negative Umweltauswirkungen durch Stimulationsarbeiten nicht zu erwarten; größere Erdstöße durch Stimulationen im Festgestein können damit aber dennoch nicht ausgeschlossen werden.

3.3 Luftgetragene Stofffreisetzungen

Während der Anlagenerrichtung (d. h. der Bohrungsniederbringung) können Gesteinsschichten mit gasführenden Fluiden durchteuft werden. Je nach den Druckbedingungen in der Gasphase können umweltrelevante Gasbestandteile (z. B. CO₂, H₂S) in der Bohrspülung gelöst und bei der Aufbereitung der Bohrspülung Übertage freigesetzt werden [13]. Dadurch mögliche Freisetzungen gefährlicher Schadstoffkonzentrationen sind durch den gesetzlich vorgeschriebenen Einsatz von Gasabscheidern im Bohrspülungskreislauf aber unwahrscheinlich [13], [18].

Während des Anlagenbetriebs entstehen im Normalfall keine umweltrelevanten luftgetragenen Stofffreisetzungen. Der Thermalwasserkreislauf wird unter Luftabschluss (d. h. geschlossen) betrieben. Im Normalbetrieb sind damit keine Emissionen zu erwarten. Folglich kann es nur aufgrund eines Störfalls oder einer Anlagenrevision zu Gasfreisetzungen kommen; aufgrund der relativ geringen Thermalwassermengen sind aber nur ungefährliche Konzentration zu erwarten [13], [18]. Zusätzlich kann es beim Störfall in der eigentlichen Stromerzeugungsanlage zum Austritt von Arbeits- und anderen Betriebsmitteln kommen. Durch entsprechende gesetzlich vorgeschriebene konstruktive und sicherheitstechnische Vorkehrungen sind solche Freisetzungen aber als sehr unwahrscheinlich einzustufen, da es sich bei ORC- und Kalina-Anlagen um überwachungsbedürftige Anlagen im Sinne des Geräte- und Produktsicherheitsgesetzes handelt und damit die in der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) definierten Vorschriften zu beachten sind.

3.4 Thermischer Eintrag in Oberflächengewässer

Erfolgt die Kühlung geothermischer Kraftwerke mit Durchlaufsystemen wird dadurch das Kühlwasser eines Fließgewässers aufgeheizt. Eine derartige Veränderung der Wassertemperatur kann sich u. a. auf den Lebensraum von Fischen auswirken [38]. Deshalb werden der Erwärmung von Fließgewässern durch die EU-Fischgewässerrichtlinie (RL 2006/44/EG) enge Grenzen gesetzt. Hier werden eine maximale Fließwassertemperatur und eine maximale Aufwärmspanne festgelegt. Aus diesem Grund muss für eine Frischwasserkühlung eine wasserrechtliche Erlaubnis gemäß Wasserhaushaltsgesetz vorliegen. Aufgrund der bereits weitestgehend ausgeschöpften Nutzung der Fließgewässer [39] und der Gebundenheit von Geothermie-Kraftwerken an spezielle Standortbedingungen ist die Frischwasserkühlung bei Anlagen zur Stromerzeugung aus Erdwärme eher von untergeordneter Bedeutung.

3.5 Beeinflussung Mikroklima

Bei Kühltürmen kommt es lokal zu einem thermischen Eintrag in die Luft und bei Nasskühltürmen zusätzlich zu einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit. Dadurch kann das Mikroklima lokal beeinflusst werden. In Abhängigkeit der meteorologischen Standortbedingungen (z. B. Lufttemperatur, Luftfeuchte, Inversionsbildung) kann es dadurch zur Dampfschwadenbildung und ggf. zu lokal erhöhtem Niederschlag (vor Allem Taubildung) sowie zur Verringerung der jährlichen Sonneneinstrahlung kommen [38], [40], [41]. Da die Kühltürme von den

zuständigen Behörden genehmigt werden müssen, bewegen sich die genannten Auswirkungen auf die Umwelt innerhalb der gesetzlich festgelegten Grenzen.

3.6 Wasserverbrauch

Bei der Anlagenerrichtung wird für die Herstellung der Bohrspülung und für Stimulationsarbeiten Wasser benötigt, das oftmals aus Grundwasserbrunnen am Bohrungsstandort entnommen wird [18]. Je nach Bohrlochvolumen und geologischen Randbedingungen kann der durchschnittliche Wasserbedarf zwischen 1 000 und 4 000 m³ je Tiefbohrung liegen; in Ausnahmefällen sind auch höhere Verbrauchsraten bis zu 10 000 m³ möglich [8]. Im Vergleich zum nutzbaren Wasserdargebot in Deutschland [42] sind diese Mengen aber vernachlässigbar. Daher resultieren (abgesehen von Ausnahmefällen wie z. B. Bohrarbeiten während arider Sommermonate) daraus auch keine negativen Auswirkungen für die Umwelt.

Für den Betrieb des untertägigen Reservoirs im Festgestein ist in der Regel der Einsatz von Oberflächen- oder Grundwasser erforderlich, da das vorhandene Tiefenwasser meist für einen Anlagenbetrieb nicht ausreicht. Zudem kann es zu Wasserverlusten kommen, die ersetzt werden müssen. Vor Erzeugung und Erprobung des Reservoirs sind diese jedoch nicht abschätzbar. Damit können auch keine Aussagen über die damit verbundenen Umwelteffekte gemacht werden, wenn auch anzunehmen ist, dass diese sich nicht von denen der Anlagenerrichtung unterscheiden.

Für den Betrieb des obertägigen Anlagenteils wird der Wasserbedarf maßgeblich durch die Kühlung bestimmt. Bei der Durchlaufkühlung wird sie durch eine kontinuierliche Nutzung eines Fließwasserteilstroms realisiert. Bei Nass- und Hybridkühltürmen kommt es dagegen zu einer teilweisen Verdunstung des im Kreis geführten Kühlwassers. Die dabei verdunstete Kühlwassermenge muss durch die Entnahme von sog. Zusatzwasser aus Grund- oder Oberflächengewässern ersetzt werden. Die dafür jeweils notwendige Wasserentnahme bzw. Wassernutzung bedarf gemäß dem Wasserhaushaltsgesetz einer Erlaubnis, die nur erteilt wird, wenn die damit verbundenen Umweltauswirkungen als unbedenklich bewertet werden. Die resultierenden Umwelteffekte bewegen sich damit innerhalb der gesetzlichen Grenzen.

3.7 Lärmwirkung

Während der Anlagenerrichtung wird durch den Betrieb der Bohranlage sowie der notwendigen Zusatzaggregate und den Baustellenbetrieb Lärm emittiert. Durch Schalldämpfer und/oder entsprechende Einhausung können diese Lärmemissionen gemindert werden. Zudem können Schallschutzwände errichtet oder ggf. die in der Nähe befindlichen Häuser mit Schallschutzfenstern nachgerüstet werden. Insgesamt muss im Vorfeld eine lärmschutzrechtliche Genehmigung eingeholt werden, durch die sichergestellt wird, dass die Lärmbelastung die gesetzlich geregelten Grenzen nicht überschreitet.

Während des Anlagenbetriebs auftretender Lärm wird vorrangig durch den Transformator, den Generator und durch die Ventilatoren des Kühlsystems verursacht. Während Transformator und Generator in der Regel im Kraftwerksgebäude untergebracht und damit lärmtechnisch einfach beherrschbar sind, stellen die Kühlventilatoren die größten Lärmemittenten dar; hier besteht u. a. die Möglichkeit einer Verkleidung durch z. B. Holzgerüste. Generell müssen aber auch für den Anlagenbetrieb die Immissionsgrenzwerte der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm) eingehalten werden. Somit sind die entsprechenden Umweltauswirkungen auch hier begrenzt.

3.8 Abfälle

Bei der Erschließung des Untergrunds fallen Abfälle an, die zunächst auf dem Bohrplatz sachgemäß gelagert und anschließend entsprechend entsorgt werden müssen. Neben ma-

schinentechnischen Teilen (z. B. abgenutzte Bohrmeißel) fällt u. a. Bohrspülung und vor Allem Bohrklein an. Dafür ist gemäß Bergrecht der zuständigen Bergbehörde eine Darstellung der Entsorgungswege vorzulegen, da bergbautypische Abfälle vom Geltungsbereich des Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) ausgenommen sind.

Während des Betriebs fallen im Thermalwasserkreislauf z. B. Filtrerrückstände sowie während Revisionsarbeiten in Slopgruben aufgefangenes Thermalwasser an, die entsprechend zu entsorgen sind. Aber auch hier sind für den dem Bergrecht unterstellten Anlagenbetrieb (d. h. Thermalwasserkreislauf) alle Entsorgungswege bereits im Vorfeld zu klären. Demgegenüber sind für die, nicht dem Bergrecht unterstellten, obertägigen Anlagenteile nur geringe Abfallmengen (z. B. Abschlammwasser aus Kühltürmen) zu erwarten, für die ebenfalls geordnete und gesetzlich geregelte Entsorgungswege existieren.

3.9 Flächeninanspruchnahme

Während der Anlagenerrichtung ist die Flächeninanspruchnahme temporär und kann anschließend – mit Ausnahme des eigentlichen Bohrungskopfes – wieder ordnungsgemäß rekultiviert werden. Potenzielle damit verbundene Umwelteffekte sind somit begrenzt.

Für den Anlagenbetrieb maßgeblich ist die Flächeninanspruchnahme durch die obertägigen Anlagenkomponenten (u. a. Kraftwerksgebäude, Kühlsystem), die wesentlich von der Anlagenkonzeption und -auslegung bestimmt werden. Beispielsweise benötigen Luftkühlsysteme gegenüber Nasskühltürmen etwa das Vierfache an Fläche [43]. Diese Kraftwerksgrundfläche wird z. T. dauerhaft versiegelt und steht damit für organisches Leben nur noch sehr eingeschränkt zur Verfügung. Die geothermische Strom- bzw. Strom- und Wärmeerzeugung zeichnet sich im qualitativen Vergleich zu anderen Energieträgern jedoch durch eine sehr geringe Flächeninanspruchnahme in Bezug auf den produzierbaren Strom aus, da die Energieerzeugung direkt am Entstehungsort des Energieträgers erfolgt. Damit ist auch die an sich unvermeidbare Flächeninanspruchnahme vergleichsweise gering.

3.10 Visuelle Beeinträchtigung

Während der Anlagenerrichtung kann die Bohranlage aufgrund ihrer Höhe sowie der nächtlichen Beleuchtung die Anwohner visuell beeinträchtigen. Diese Beeinträchtigung ist aber auf die Bohrphase begrenzt und erheblich von der "Einstellung" des Betrachters abhängig.

Während der Betriebsphase können das Kraftwerksgebäude sowie die Komponenten des Kühlsystems (insbesondere Kühltürme) zu einer kontinuierlichen visuellen Beeinträchtigung führen. Bei den Kühltürmen kommt die Sichtbarkeit von Dampfschwaden hinzu. Werden aber beim Bau des Kraftwerks die städtebaulichen Auflagen (z. B. maximale Höhe) gemäß Bauplanungsrecht berücksichtigt und die Möglichkeiten genutzt, die Anlage möglichst unauffällig in das Umgebungsbild einzubinden, sind derartige Anlagen für viele Anwohner i. Allg. nicht sehr störend. Eine visuelle Beeinträchtigung ist dennoch nicht auszuschließen.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

In einer bezüglich potenzieller Umweltgefahren hochsensiblen Gesellschaft gewinnt die Analyse und Bewertung lokaler Umwelteffekte immer mehr an Bedeutung. Deshalb werden hier die potenziellen lokalen Auswirkungen einer energetischen Erdwärmennutzung auf die Umwelt näher untersucht. Der Großteil der potenziellen lokalen Umwelteffekte kann auf Basis von Fachliteratur und Expertenbefragungen ausreichend dargestellt werden. Mit einem weiteren Ausbau der Geothermie muss jedoch auch die Möglichkeit genutzt werden, den gegenwärtigen Kenntnisstand (z. B. durch den Einsatz entsprechender Beobachtungssysteme)

noch zu verfeinern bzw. zu vervollständigen. Folgende potenzielle Umwelteffekte lassen sich derzeit zusammenfassen:

- Potenzielle Untertage auftretende Umwelteffekte können in stoffliche Einträge, thermische Beeinflussungen sowie hydraulische und geomechanische Veränderungen des Untergrunds unterteilt werden. Alle diese Effekte sind durch gesetzliche Vorgaben, die von der zuständigen Bergbehörde überwacht werden, weitgehend geregelt.
- (Potenzielle) Übertage auftretende Umweltauswirkungen sind Bohrlochausbrüche, Erderschütterungen, Emissionen luftgetragener Stoffe, Wärmeeintrag in Oberflächengewässer, Lärmfreisetzungen, anfallende Abfälle, Wasserverbrauch, Flächeninanspruchnahme, Beeinflussung des Mikroklimas und visuelle Beeinträchtigung. Auch diese Effekte auf die lokale Umwelt werden von vielfältigen gesetzlichen Vorgaben begrenzt, sodass sie nur noch innerhalb der vom Gesetzgeber definierten Grenzen zum Tragen kommen können. Nur eingeschränkt regel- und damit vermeidbar sind Umwelteffekte infolge von Erderschütterungen bei bestimmten geologischen Bedingungen, die durch Stimulationen des Untergrunds verursacht werden können.

Anlagen zur geothermischen Strom- bzw. Strom- und Wärmeerzeugung zeichnen sich damit durch i. Allg. geringe Umwelteffekte aus. Eine geringe Flächeninanspruchnahme, die direkte Angebundenheit geothermischer Anlagen an die Energiequelle (und damit wegfallende Brennstofftransporte) sowie ein Betrieb, der überwiegend durch Lärm weniger aber durch stoffliche Emissionen gekennzeichnet ist, sind besondere Vorzüge der Geothermie. Abgesehen von geologischen Ausnahmefällen sind alle potenziellen lokalen Umwelteffekte während der Erschließung des tiefen Untergrunds, des obertägigen Anlagenbaus, des Anlagenbetriebs und des Rückbaus gesetzlich geregelt und technisch beherrschbar. Die energetische Erdwärmennutzung ist damit in der Tat aus lokaler Sicht umweltfreundlich und wird - bleibt die energiepolitische Weichenstellung auch in den kommenden Jahren bestehen – zukünftig eine zunehmend größere Rolle in einem nachhaltigeren Energiesystem spielen.

Danksagung

Der vorliegende Artikel basiert auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes FKZ 205 42 110, welches im Auftrag des Umweltbundesamtes am ehemaligen Institut für Energetik und Umwelt gGmbH in Leipzig durchgeführt wurde. Wir danken dem Umweltbundesamt für die konstruktive Zusammenarbeit und finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Erdwärme Kraft GbR: Fakten, Online unter: <http://www.erdwaerme-kraft.de/>, Stand: 11.04.2008
- [2] J. Baumgärtner: The geox GmbH Project in Landau – The First Geothermal Power Project in Palatinate / Upper Rhine Valley, Proceedings First European Geothermal Review – Geothermal Energy for Power Production, 29. – 31. Oktober 2007, Mainz 2007, S. 33
- [3] Geothermie Unterhaching: Stromerzeugung, Online unter: http://www.geothermie-unterhaching.de/cms/geothermie/geothermie_web.nsf/id/pa_stromerzeugung.html, zugegriffen am 09.04.2008
- [4] EnBW: EnBW und ewb geben Startschuss für das erste Geothermie-Kraftwerk in Baden-Württemberg, Pressemitteilung vom 16.01.2008, Online unter:

- http://www.enbw.com/content/de/presse/pressemitteilungen/2008/01/PM_20080116_cu_mw01/index.jsp, zugegriffen am 09.04.2008
- [5] Bergamt Bayern, persönliche Mitteilung R. Zimmer, April 2008
- [6] Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau: Geothermie - Konzession in Baden-Württemberg, http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/Fachbereiche/geothermie/grundlagen/laufende_projekte, Stand: Juni 2007
- [7] Baudepartement des Kantons Basel-Stadt: Information zur Schadensabwicklung in Zusammenhang mit dem Geothermieprojekt, Basel 23.02.2007, Online unter: http://www.bd.bs.ch/info_zur_schadensabwicklung.pdf, zugegriffen am 09.04.2008
- [8] M-I Swaco Deutschland GmbH, persönliche Mitteilung R. Huelke, März 2007
- [9] M. Kaltschmitt; E. Huenges; H. Wolff (Hrsg.): Energie aus Erdwärme; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1999
- [10] P. Hatzsch: Tiefbohrtechnik, Enke-Verlag, Stuttgart, 1991
- [11] T. Kohl: Alternative Energien - Vergleich Solar, Wind, Wasserstoff, Wasserkraft, Geothermie, Biomasse und Gezeitenkraft hinsichtlich Ökonomie und Ökologie, Vorlesungsunterlagen des Oberseminar Geoökologie WS 04/05, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2005, Online unter: http://www.goek.tu-freiberg.de/oberseminar/Oberseminar_04_05.htm, zugegriffen im Juni 2007
- [12] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), persönliche Mitteilung H. Schröder, November 2006
- [13] S. Niedermeyer; H.-J. Heinschild; P. Baader; D. Wenner; R. Reuther; O. Kappelmeyer; K. Smolka: Energieprojekt Hot-Dry-Rock Bestandsanalyse und Empfehlungen - Umwelteffekte, im Auftrag des Bundesministerium für Forschung und Technologie, Westheim, 1992
- [14] P. Seibt: Abbauüberwachung von Geothermiespeichern, in W. Bußmann: Geothermie – Wärme aus der Erde; Technologie – Konzepte – Projekte, Müller Verlag, Karlsruhe, 1991
- [15] R. Jung; S. Röhling; N. Ochmann; S. Rogge; R. Schellschmidt; R. Schulz; T. Thielemann: Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag; BGR/GGA, Archiv-Nr. 122 458, Hannover, 2002
- [16] P. Haidinger; J. Dornstädter; A. Fabritius: HDR economic modelling: HDRec software, Geothermics, Vol. 35, Issues 5-6, Oktober-Dezember 2006
- [17] H. Würdemann; A. Vieth; R. Miethling-Graff; A. Seibt; M. Wolfgramm: Mikrobiologie geothermisch genutzter Aquifere: Untersuchungen zum Einfluss auf die Betriebssicherheit, Geothermische Fachtagung 15. – 17. November 2006, Tagungsband, Karlsruhe, 2006
- [18] Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN), persönliche Mitteilung P. Seibt, Mai 2007
- [19] L. Rybach: Geothermal Sustainability, in Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, 30. Mai – 1. Juni 2007
- [20] GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ): Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen, Abschlussbericht zum BMBF-Projekt BEO 0326969, Potsdam, 1999
- [21] R. Lux, B. Sanner: Oberflächennahe Erdwärmennutzung, in Verein Deutscher Ingenieure: Erdwärme. Teil IV der Reihe Regenerative Energien, Informationsschriften der VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992

- [22] M. Kühn; H. Stöfen; W. Schneider: Abschätzung der Subsidenz im Einflussbereich Geothermischer Anlagen, Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 1/2002
- [23] Y. Noorollahi: Application of GIS and remote sensing in exploration and environmental management of Námfajall geothermal area, N-Iceland, MSc thesis, Faculty of Science, Department of Geology and Geography, University of Iceland, United Nations University Geothermal Training Programme, Reykjavík, Island, Report 1, 2005
- [24] H. Kristmannsdóttir; H. Armannson; F. Karman; A. Lorberer; G. Patzay; L. Rybach: Environmental aspects of geothermal energy utilization, European Geothermal Conference (EGC 2003), Szeged, HONGRIE (25/05/2003) 2003, vol. 32, no 4-6 (1 p.1/4)
- [25] Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN): Geowissenschaftliche, geotechnologische und verfahrenstechnische Forschungsarbeiten zur Vervollkommnung des Verfahrens der Nutzung geothermischer Ressourcen im Hinblick auf das Langzeitverhalten, Teilthema: Geomechanische Bewertung der Nutzhorizonte im Langzeitbetrieb, BMBF-Forschungsvorhaben 0326912 A, Neubrandenburg, 1994
- [26] Massachusetts Institute of Technology (MIT): The Future of Geothermal Energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century; An assessment by an MIT-led interdisciplinary panel, Massachusetts (USA), 2006
- [27] Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Persönliche Mitteilung H. Bunn, Juni 2007
- [28] S. Portier; A. Laurent; F. Vuataz: Modelling geochemical effects of acid treatments and comparison with field observations at Soultz-sous-Forêts, in C. Baujard & T. Kohl (Hrsg.): Proceedings of the Engine Workshop 3 “Stimulation of Reservoir and Induced Microseismicity”, 29 June – 1 July 2006, Zurich, Switzerland
- [29] Geologisch-Paläontologisches Institut, Universität Basel: Expertenbericht zu Dokumentenordner „Beantwortung der Fragen der Behörden des Kanton Basel-Stadt vom 15. Dezember 2006 zum induzierten Erdstoß vom 8. Dezember 2006 in Basel“, Basel, 2007
- [30] Geothermal Explorers: Projekt Deep Heat Mining Basel – Beantwortung der Fragen der Behörden des Kanton Basel-Stadt am 15. Dezember 2006 zum induzierten Erdstoß vom 8. Dezember 2006 in Basel, im Auftrag der Geopower Base AG, Basel, 2006
- [31] E. Huenges; T. Kohl: Stimulation of reservoir and microseismicity – summary of the Ittingen workshop June 2006, in E. Huenges & P. Ledru (Hrsg.): Conference Contributions of the ENGINE Mid-Term Conference, 9 – 12 January 2007, Potsdam
- [32] Schweizerischer Erdbebendienst (SED): Aspekte der Erdbebengefährdung im Zusammenhang mit dem Deep Heat Mining Projekt in Basel – Stellungnahme des Schweizerischen Erdbebendienstes zu Handen der Kontrollstelle für Chemie- und Biosicherheit des Kantons Basel-Stadt zum Bericht der Geopower Basel AG als Folge des induzierten Erdstoßes vom 8. Dezember 2006, Basel, 2007
- [33] G. Grünthal (Hrsg.): European Macroseismic Scale 1998, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie, Band 15, Luxemburg, 1998
- [34] J. Charléty, L. Dorbath: Microseismicity and stimulation strategy. The case of Soultz-sous-Forêts, in C. Baujard & T. Kohl (Hrsg.): Proceedings of the Engine Workshop 3 “Stimulation of Reservoir and Induced Microseismicity”, 29 June – 1 July 2006, Zurich, Switzerland
- [35] Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Persönliche Mitteilung T. Tischner, Juni 2007

- [36] Ingenieurbüro Uhlig + Partner (GEOTEC CONSULT), persönliche Mitteilung S. Uhlig, Juni 2007
- [37] P. Fokker: Hydraulic fracturing in the hydrocarbon industry, in C. Baujard & T. Kohl (Hrsg.): Proceedings of the Engine Workshop 3 “Stimulation of Reservoir and Induced Microseismicity”, 29 June – 1 July 2006, Zurich, Switzerland
- [38] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer 3. verbesserte Auflage, Erich Schmidt Verlag, 1991
- [39] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg): Die Wasserrahmenrichtlinie – Ergebnisse der Bestandsaufnahme 2004 in Deutschland; Berlin, 2005
- [40] Transferstelle für rationelle und regenerative Energienutzung Bingen (TSB): Konzeption von Verfahren zur Kühlung bzw. Wärmenutzung bei der geothermischen Stromerzeugung, Studie im Auftrag des Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz, Bingen, 2006
- [41] AXIMA Refrigeration GmbH, persönliche Mitteilung V. Schubert, Juni 2007
- [42] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg): Wasserwirtschaft in Deutschland – Teil 1 – Grundlagen, Berlin, 2006
- [43] Transferstelle für rationelle und regenerative Energienutzung Bingen (TSB): Vergleich zwischen verschiedenen Kühlsystemen von Geothermie-Anlagen, Studie im Auftrag der SGD Süd Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Abt. D, Bingen, 2005