

# **Umwelt- und Naturschutzaspekte bei der Erschließung und Nutzung von Erdwärme**

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

DIPLOM-GEOÖKOLOGE

an der Universität Potsdam

Institut für Geoökologie

vorgelegt von

Marc Thiele

Potsdam, Januar 2004

betreut von

Dr. Holger Rößling

Dipl. Biol. Karl Scheurlen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhalt</b> .....	<b>I</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Methodik</b> .....	<b>4</b>
2.1 Grundlagen .....	4
2.2 Ableitung der Wirkfaktoren .....	5
<b>3 Geowissenschaftliche Grundlagen</b> .....	<b>8</b>
3.1 Erdaufbau .....	8
3.2 Wärmequellen.....	9
3.3 Temperaturgradient in der Erdkruste.....	10
3.4 Temperaturverteilung und Wärmetransport im Untergrund.....	10
3.5 Energetisch nutzbare Erdwärmevorkommen .....	12
3.5.1 Oberflächennahe Erdwärmevorkommen .....	13
3.5.2 Hydrothermale Niederdrucklagerstätten .....	13
3.5.3 Hydrothermale Hochdrucklagerstätten .....	14
3.5.4 Heiße, trockene Gesteine (Hot-Dry-Rock).....	14
3.5.5 Magmavorkommen .....	15
<b>4 Technische Potenziale der Erdwärmenutzung in Deutschland</b> .....	<b>16</b>
4.1 Strom- und Wärmepotenziale .....	16
4.2 Potenziale der einzelnen Erdwärmevorkommen .....	17
4.2.1 Oberflächennahe Erdwärmenutzung .....	17
4.2.2 Hydrothermale Erdwärmenutzung .....	18
4.2.3 Tiefe Erdwärmesonden.....	20
4.2.4 Nutzung klüftige kristalliner Formationen mittels HDR .....	21
<b>5 Darstellung technischer Verfahren</b> .....	<b>23</b>
5.1 Oberflächennahe Erdwärmenutzung .....	23
5.1.1 Reifegrad und Realisation von Anlagen .....	23
5.1.2 Technologie .....	23
5.1.2.1 Grundprinzip .....	23
5.1.2.2 Erschließung der Wärmequellen .....	24
5.2 Hydrothermale Erdwärmenutzung .....	26
5.2.1 Reifegrad und Realisation von Anlagen .....	26
5.2.2 Technologie .....	27
5.2.2.1 Grundprinzip .....	27
5.2.2.2 Erschließung der Wärmequellen .....	27
5.3 Erdwärmenutzung mit tiefen Erdwärmesonden.....	29
5.3.1 Reifegrad und Realisation von Anlagen .....	29
5.3.2 Technologie .....	29
5.3.2.1 Grundprinzip .....	29
5.3.2.2 Erschließung der Wärmequellen .....	29

5.4	Nutzung klüftig-poröser Lagerstätten mittels HDR-Technologie .....	30
5.4.1	Reifegrad und Realisation von Anlagen .....	30
5.4.2	Technologie .....	30
5.4.2.1	Grundprinzip .....	30
5.4.2.2	Erschließung der Wärmequellen .....	31
<b>6</b>	<b>Genehmigungsrechtliche Aspekte der Erdwärmenutzung .....</b>	<b>33</b>
6.1	Die Bergrechtlichen Grundlagen der Erdwärmenutzung .....	33
6.1.1	Gesetzliche Voraussetzungen für die Erdwärmegewinnung nach BBergG .....	33
6.1.2	Betriebsplanpflicht für Erdwärmeanlagen .....	35
6.1.3	Umweltverträglichkeitsprüfung für Erdwärmeanlagen .....	36
6.2	Die Wasserrechtlichen Grundlagen der Erdwärmenutzung .....	37
6.2.1	Wasserrechtliche Genehmigungen und Benutzungstatbestände .....	37
6.2.2	Anzeige- und Erlaubnispflicht der unterschiedlichen Anlagen .....	39
6.2.3	Hinweise zu den Antragsunterlagen für eine wasserrechtliche Genehmigung .....	42
6.3	Weitere rechtliche Belange für die Erdwärmenutzung .....	43
6.3.1	Naturschutzrecht .....	43
6.3.2	Immissionsschutzrecht .....	45
6.3.3	Baurecht .....	46
6.3.4	Ergänzungen .....	47
<b>7</b>	<b>Systematische Zusammenstellung der Wirkfaktoren .....</b>	<b>49</b>
7.1	Ableitung der Wirkfaktoren und Definitionen .....	49
7.1.1	Systematik und Definition der Wirkfaktoren .....	49
7.1.2	Definition potenziell betroffener Wirkbereiche .....	50
7.2	Darstellung der Wirkfaktoren .....	51
7.2.1	Darstellung baubedingter Wirkfaktoren .....	54
7.2.2	Darstellung anlagenbedingter Wirkfaktoren .....	58
7.2.3	Darstellung betriebsbedingter Wirkfaktoren .....	60
7.2.3.1	Betriebsbedingte Wirkfaktoren der oberflächennahen Erdwärmenutzung .....	60
7.2.3.2	Betriebsbedingte Wirkfaktoren der hydrothermalen Erdwärmenutzung .....	63
7.2.3.3	Betriebsbedingte Wirkfaktoren bei der Nutzung tiefer Erdwärmesonden .....	67
7.2.3.4	Betriebsbedingte Wirkfaktoren der HDR-Technologie .....	67
7.2.4	Darstellung der durch Störfälle verursachten Wirkfaktoren .....	70
7.2.4.1	Durch Störfälle verursachte Wirkfaktoren während der Bohr- und Erschließungsarbeiten .....	70
7.2.4.2	Durch Störfälle verursachte Wirkfaktoren während des Anlagenbetriebes .....	70
<b>8</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>73</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>87</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
<b>11</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>106</b>
<b>12</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>109</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung der dynamischen Erde mit möglichen Erdwärmevorkommen ...	12
Abbildung 2:	Schematische Darstellung eines idealen geothermalen Systems.....	13
Abbildung 3:	Anteil verschiedener Reservoirtypen am geothermischen Strompotenzial ..	17
Abbildung 4:	Gebiete mit potenziellen hydrothermalen Energievorräten in Deutschland..	19
Abbildung 5:	Funktionsprinzip verschiedener Techniken zur oberflächennahen Erdwärmenutzung.....	25
Abbildung 6:	Aufbau eines Thermalwasserkreislaufs für hochsalinare Wässer [mit Förderbohrung(1), Förderpumpe (2), Förderleitung (3), Wärmeüberträger (4), Injektionsbohrung (5), Filtereinrichtungen (6), Inertgas- (7) und Druckhaltesystem (8), Slopgruben (9) sowie Heiznetz (10)] .....	28
Abbildung 7:	Schema eines Hot-Dry-Rock Kreislaufs .....	31
Abbildung 8:	HDR-Forschungsbohrung des GfZ Potsdam in Groß-Schönebeck.....	32
Abbildung 9:	Temperaturverlauf im Erdwärmesondenfeld auf dem Max-Planck-Campus in Golm gemessen an der Erdwärmesonde 2 .....	61
Abbildung 10:	Weit sichtbare Wasserdampfwolke über einem US-amerikanischen Erdwärmekraftwerk .....	65
Abbildung 11:	Dampfausstoß einer HDR-Versuchsanlage in Hijiori (Japan) .....	68
Abbildung 13:	Hydrothermales Kraftwerk Neustadt-Glewe, Hauptgebäude .....	79
Abbildung 14:	ORC-Anlage und Kühltürme des hydrothermalen Kraftwerkes in Neustadt-Glewe .....	81
Abbildung 15:	Produktionsbohrung GPK II des HDR-Forschungsprojektes in Soultz-sous-Fôrets.....	83

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Liste der konsultierten Sachverständigen.....	4
Tabelle 2:	Eigenschaften der Erdkruste .....	8
Tabelle 3:	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität im Untergrund .....	11
Tabelle 4:	Potenzial oberflächennaher Erdwärmenutzung in Deutschland.....	17
Tabelle 5:	Potenzial hydrothermalen Erdwärmenutzung in Deutschland .....	20

Tabelle 6:	Potenzial der Erdwärmenutzung mit tiefen Sonden in Deutschland.....	21
Tabelle 7:	Potenzial der HDR-Nutzung in Deutschland.....	22
Tabelle 8:	Hinweise zum Inhalt von Antragsunterlagen.....	42
Tabelle 9:	Übersicht der genehmigungsrechtlichen Grundlagen .....	48
Tabelle 11:	Übersicht über die baubedingten Wirkfaktoren und deren inhaltliche Bedeutung (OFN-Oberflächennahe Erdwärmenutzung, HYT-Hydrothermale Erdwärmenutzung, TES-Tiefe Erdwärmesonden, HDR-Hot-Dry-Rock) .....	52
Tabelle 12:	Übersicht über die anlagebedingten Wirkfaktoren und deren inhaltliche Bedeutung (OFN-Oberflächennahe Erdwärmenutzung, HYT-Hydrothermale Erdwärmenutzung, TES-Tiefe Erdwärmesonden, HDR-Hot-Dry-Rock) .....	52
Tabelle 13:	Übersicht über die betriebsbedingten Wirkfaktoren und deren inhaltliche Bedeutung (OFN-Oberflächennahe Erdwärmenutzung, HYT-Hydrothermale Erdwärmenutzung, TES-Tiefe Erdwärmesonden, HDR-Hot-Dry-Rock) .....	53
Tabelle 14:	Übersicht über die Wirkfaktoren bei Störfällen und deren inhaltliche Bedeutung (OFN-Oberflächennahe Erdwärmenutzung, HYT-Hydrothermale Erdwärmenutzung, TES-Tiefe Erdwärmesonden, HDR-Hot-Dry-Rock) .....	54
Tabelle 15:	Baubedingte Wirkfaktoren bei der Erdwärmenutzung und die betroffenen Schutzgüter.....	58
Tabelle 16:	Flächenverbrauch verschiedener Technologien der Energieerzeugung .....	59
Tabelle 17:	Anlagenbedingte Wirkfaktoren bei der Erdwärmenutzung und die betroffenen Schutzgüter .....	60
Tabelle 18:	Mögliche spezifische Wärmeentzugsleistungen aus dem Erdreich für 1800 bis 2400 Jahresbetriebsstunden.....	61
Tabelle 19:	Betriebsbedingte Wirkfaktoren der oberflächennahen Erdwärmenutzung und die betroffenen Schutzgüter .....	63
Tabelle 20:	Betriebsbedingte Wirkfaktoren der hydrothermalen Erdwärmenutzung und die betroffenen Schutzgüter .....	66
Tabelle 21:	Betriebsbedingte Wirkfaktoren bei der Nutzung tiefe Erdwärmesonden und die betroffenen Schutzgüter .....	67
Tabelle 22:	Betriebsbedingte Wirkfaktoren der HDR-Technologie und die betroffenen Schutzgüter .....	69
Tabelle 23:	Wirkfaktoren durch Störfälle .....	72

# 1 Einleitung

Die Beendigung der Abhängigkeit des gegenwärtigen Energiesystems von fossilen Energieträgern ist aus energiewirtschaftlicher und ökologischer Sicht politisches Ziel der Bundesregierung. Ein wesentliches Element zur Senkung klimawirksamer Emissionen und für einen schonenden Ressourcenverbrauch ist der Einsatz regenerativer Energieträger, z.B. der Erdwärme. Diesem Ziel folgend wurde im Jahr 2000 das "Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien" verabschiedet. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) verpflichtet die Stromnetzbetreiber, die aus der Solarenergie, der Wasser- und Windkraft, der Biomasse und der Erdwärme gewonnene Elektrizität vorrangig abzunehmen und dafür einen gesetzlich festgelegten Preis zu zahlen. Mit der möglicherweise schon im Frühjahr 2004 in Kraft tretenden Novelle des EEG werden die Bedingungen für die Nutzung Erneuerbarer Energien nochmals deutlich verbessert. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz und die darin verankerte Stärkung regenerativer Energien stellt den Anlass für diese Diplomarbeit dar.

Seit das Gesetz in Kraft getreten ist, wurden zahlreiche Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien neu errichtet. Die erneuerbaren Energien tragen heute mit etwa 2,9 Prozent zu der gesamten Energiebereitstellung in Deutschland bei (BMU, 2003 c). Die Bundesregierung verfolgt Pläne, den Anteil dieser Energien an der Energieversorgung bis zum Jahr 2010 zu verdoppeln. Mitte des Jahrhunderts soll sogar die Hälfte der benötigten Energie aus Wind, Sonne, Biomasse, Wasserkraft und Erdwärme erzeugt werden.

Der Erdwärme ist für die Umsetzung der energiepolitischen Zielsetzungen der Bundesregierung eine große Bedeutung beizumessen. Einer durch das BMU beim Institut für Umwelt und Energetik in Leipzig in Auftrag gegebenen aktuellen Studie zufolge besitzt die Erdwärme ein technisches Erzeugungspotenzial von ca. 350 TWh pro Jahr. Das entspricht 60% des aktuellen Bruttostromverbrauchs für Deutschland (BMU, 2003 a). Unter allen erneuerbaren Energieträgern nimmt sie bezüglich sich bietender Potenziale eine Spitzenstellung ein. Zudem ist die Erschließung und Nutzung von Erdwärme im Gegensatz zu den anderen regenerativen Energieträgern weder tages- noch jahreszeitenabhängig und dient sowohl zur Bereitstellung von Grundlaststrom als auch zur Versorgung mit Nahwärme. Löst man die bestehenden technologischen Probleme, kann sich die Nutzung geothermischer Energie zu einer tragenden Säule des zukünftigen Energiesystems entwickeln.

Die Erdwärme als regenerative Energie steht im Mittelpunkt verschiedener Forschungs- und Entwicklungsstudien sowie Förder- und Maßnahmenprogramme. Stellvertretend sind an dieser Stelle das Marktanreizprogramm für erneuerbare Energien (MAP) und das Zukunftsinvestitionsprogramm des Bundesumweltministeriums (ZIP) zu nennen. Die Schwerpunkte der bisherigen Forschung liegen auf dem Gebiet der Erforschung und Weiterentwicklung technischer Aspekte der Erschließung und Nutzung geothermischer Energie, der Herausarbeitung verschiedener Nutzungsszenarien sowie der Erstellung von Energie- und Ökobilanzen.

Demgegenüber bestehen gegenwärtig Defizite im Bereich der Untersuchung und Bewertung der Auswirkungen geothermischer Energieerzeugung aus umwelt- und naturschutzfachlicher Sicht. Vor dem Hintergrund der existierenden Energiepotenziale und im Hinblick auf den weiteren dynamischen Ausbau der Anlagen zur Nutzung der geothermischen Energiepotenziale müssen die umwelt- und naturschutzfachlichen Fragestellungen, die sich auch gerade im Hinblick auf die Genehmigung von Erdwärmeanlagen ergeben, frühzeitig geklärt werden und Eingang in die Forschung und Entwicklung finden. In dem Zusammenhang ist es die vornehmliche Zielstellung dieser Arbeit,

- die für die behördliche Genehmigung der Erschließung und Nutzung der Erdwärme derzeit vorgesehenen gesetzlichen Regelungen systematisch aufzuarbeiten,
- die mit den Techniken zur Erschließung der Erdwärmevorkommen und die mit den Anlagen zu deren Nutzung verbundenen umweltrelevanten Wirkfaktoren auszuweisen und systematisch darzustellen,
- die möglichen Wirkungen auf die Schutzgüter des UVPG qualitativ zu erfassen und, soweit dies bei dem derzeitigen Stand von Forschung und Entwicklung möglich ist, zu quantifizieren,
- die Wirkungen vor dem Hintergrund ihrer Bedeutung und Erheblichkeit im Rahmen von behördlichen Genehmigungsentscheidungen zu bewerten und zu vergleichen, sowie

- die Anforderungen an den Inhalt von Antragsunterlagen darzustellen.

Aus den Ergebnissen der Arbeit ergeben sich Aussagen hinsichtlich des weiteren Forschungsbedarfes auf dem Gebiet der Umwelt- und Naturschutzaspekte der Erdwärmegewinnung und –nutzung.

## 2 Methodik

### 2.1 Grundlagen

Die vorliegende Arbeit ist als Literaturstudie konzipiert. Sie basiert sie auf der Auswertung vorhandener Publikationen zum Thema Erdwärme. Dabei handelt es sich um Fachbücher zu den Themen Erdwärme und erneuerbare Energien, veröffentlichte Ergebnisse von abgeschlossenen Forschungsvorhaben, Zwischenergebnisse aus laufenden Forschungsvorhaben, wissenschaftliche Studien, Dissertationen, Fachinformationen des Bundesumweltministeriums sowie von Landesumweltministerien und Behördenberichte. Des weiteren basiert die Arbeit auf der Analyse von Gesetzestexten bzw.- Kommentaren, Rechtsverordnungen, Technischen Anleitungen und Richtlinien. Um auf dem aktuellsten Forschungs- und Wissensstand zu sein und um das derzeit übliche Vorgehen der Verwaltungen einbeziehen zu können, wurden Mitarbeiter von Forschungseinrichtungen, Behörden und eines großen Energieanbieters befragt (s. Tabelle 1).

**Tabelle 1: Liste der konsultierten Sachverständigen**

<b>Name</b>	<b>Institut/ Firma</b>
Dr. E. Broßmann	Technischer Projektleiter bei der BEWAG AG & Co. KG Berlin für die Stromerzeugung im Erdwärme-Kraftwerke Neustadt-Glewe
H. Burkhardt	Untere Wasserbehörde des Landkreises Potsdam-Mittelmark, Belzig
V. Freyberg	Fachgebiet Bohrlochbergbau, Landesbergamt Brandenburg, Cottbus
R. Fischer	Untere Wasserbehörde der Landeshauptstadt Potsdam
K. Getzlaff	Landesumweltamt Brandenburg, Abt. Immissionsschutz (Lärmbekämpfung)
M. Hielscher	WEMAG AG, Betriebsleiter des Erdwärme-Kraftwerkes Neustadt-Glewe
H. Jung	Leiter der Betriebstechnik für den Max-Planck-Campus Golm, technischer Leiter der Wärmespeicheranlage mit 160 Erdwärmesonden
Dr. M. Kopf	Dezernat für Wirtschaftsgeologie, Brandenburgische Landesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Kleinmachnow
Dr. B. Legarth	Sektion Geothermie, GeoForschungsZentrum, Potsdam

Fundamentaler Bestandteil der Recherchen waren die Besichtigung und Untersuchung einer Anlage zur Nutzung der oberflächennahen Erdwärme (Max-Planck-Campus in Golm) und des Erdwärme-Kraftwerkes in Neustadt-Glewe.

Die Arbeit fußt vornehmlich auf Untersuchungsergebnissen, die in Deutschland gewonnen wurden. Im Zuge der Bearbeitung stellte sich jedoch heraus, dass der Umfang der publizierten Ergebnisse auf dem Themengebiet der Umweltauswirkungen der Erdwärme vergleichsweise gering ist und nicht alle bedeutsamen Fragestellungen behandelt werden. Daher wurde der Rahmen der Studie erweitert, indem Ergebnisse und Publikationen aus weiteren Ländern untersucht worden, insbesondere aus der Schweiz, Österreich, Island, England, Italien und der USA.

Den rechtlichen Bezug stellen die Gesetze des Bundeslandes Brandenburg dar, soweit nicht die ausschließliche Gesetzgebungskompetenz des Bundes betroffen ist (vgl. Art. 71 i.V.m. Art 73 Grundgesetz).

Im Rahmen dieser Arbeit wird keine inhaltliche Unterscheidung der Begriffe „Erdwärme“ und „Geothermie“ getroffen, sie werden gleichbedeutend verwandt. Eine Erklärung dieser und andere Begriffe ist im Glossar der Arbeit nachzulesen.

## **2.2 Ableitung der Wirkfaktoren**

Die im Rahmen dieser Arbeit ausgewiesenen Wirkfaktoren stellen jene Einflussgrößen dar, die einem Erdwärmeverhaben entspringen und potentiell zu einer Beeinträchtigung der Umwelt führen können.

Die Ableitung der Wirkfaktoren, die Gegenstand des sechsten Kapitels ist, basiert auf der Auswertung der studierten Literatur und der Expertenmeinungen. Darüber hinaus gründen die Aussagen zu Wirkfaktoren und Wirkungen auf selbst gewonnenen Einschätzungen nach der Besichtigung der geothermischen Anlagen in Neustadt-Glewe und auf dem Max-Planck-Campus in Golm.

Eine weitere Methode zur Wirkfaktorenableitung ist der Analogieschluss aus vergleichbaren Vorhabenstypen. In Frage kommen an dieser Stelle die Erschließung von Erdöl-, Erdgas- und Trinkwasserreserven speziell in Bezug auf die dort zum Einsatz kommende Bohrtechnik und die verwendeten Bohrverfahren. Des gleichen wurde die Errichtung baulicher Anlagen im Bereich des Kraftwerkbaus vergleichend herangezogen. Der Analogieschluss ist insbesondere dann notwendig, wenn relativ

wenige oder keine Erfahrungen, Untersuchungs- und Forschungsergebnisse über Umwelteffekte von Erdwärmeanlagen vorliegen.

Die Wirkfaktoren werden standortunabhängig ermittelt und zusammengestellt. Ihre Bestimmung basiert auf der Analyse der verschiedenen Technologien zur Erschließung und Nutzung der Erdwärme, die in Kapitel 5 beschrieben werden. Um eine umfassende und differenzierte Betrachtung zu gewährleisten, wurde ein Gesamtvorhaben zur Erschließung und Nutzung von Erdwärme mittels einer spezifischen Technologie in einzelne Vorhabensbestandteile zerlegt, aus denen sich bau-, anlage- und betriebsbedingte Wirkfaktoren ableiten lassen. Deren systematische Herleitung und begriffliche Definition erfolgt in Kapitel 6.1.2.

Wirkfaktoren und Wirkungen werden lokalen und regionalen Wirkungsbereichen zugeordnet. Von einer Zuordnung der Wirkfaktoren und Wirkungen zu überregionalen bzw. globalen Wirkungsbereichen wird Abstand genommen. Gasförmige Emissionen wie Methan oder Kohlendioxid tragen einerseits durch ihren Charakter als Treibhausgase zur globalen Klimaproblematik bei, aus diesem Grund wären sie durchaus Bestandteil eines überregionalen bzw. globalen Wirkungsbereiches. Andererseits substituieren Erdwärmeanlagen jedoch fossile Brennstoffe und deren Emissionen. wären auf dieser Betrachtungsebene die Erstellung einer Ökobilanz sinnvolles Arbeitsmittel zur umfassenden Untersuchung der Umweltwirkungen. Dies ist jedoch nicht Gegenstand der Arbeit. Die Wirkfaktoren und die Wirkungen werden auf die Schutzgüter des UVPG in ihrer folgenden Ausprägung abgebildet: Grundwasser, Oberflächenwasser, Boden, Pflanzen und Biotope, Tiere, Klima und Luft sowie Landschaft und Erholung. Diese Unterteilung findet auch in Umweltverträglichkeitsstudien standardmäßig Verwendung (vgl. UVPG; GASSNER & WINKELBRANDT, 1997).

Die Darstellung der Betroffenheit der einzelnen Schutzgüter erfolgt abschließend sowohl verbal-argumentativ als auch tabellarisch in einer Wirkmatrix.

Im Rahmen der Technologie zur Nutzung oberflächennaher Erdwärmevorkommen mittels erdgekoppelter Wärmepumpen werden bauliche Anlagen nicht zu den zu betrachtenden Anlagenteilen gezählt, da es sich hierbei in der Regel um bereits existierende Gebäude und Fahrwege handelt. Darüber hinaus ist die Betrachtung der Umwelteffekte der Wärmepumpe auf deren Arbeits- bzw. Kältemittel beschränkt. Stoffliche oder akustische Emissionen, die beim Betrieb des Wärmepumpenmotors

oder fossil beheizter Zusatzanlagen für den Spitzenlastbetrieb entstehen, fallen aus der Betrachtung.

Bei der Untersuchung der Wirkfaktoren tiefer Erdwärmesonden wird davon ausgegangen, dass es sich bei dieser Technologie um keine Nachnutzung einer unabhängig von ihrer Zielsetzung aufgegebenen Tiefbohrung handelt. Es wird folglich unterstellt, dass alle Arbeitsschritte mit den Erschließungsarbeiten beginnend die Zielsetzung der Installation einer tiefen Erdwärmesonde hatten. Die Darstellung der Umwelteffekte der Wärmepumpe, deren Anschluss an den Heizkreislauf bei tiefen Sonden ebenfalls notwendig ist (KALTSCHMITT, NILL & SCHREIBER, 2003), ist auf die Verwendung findenden Arbeits- bzw. Kältemittel beschränkt. Stoffliche oder akustische Emissionen bleiben entsprechend der oberflächennahen Geothermie unberachtet.

### 3 Geowissenschaftliche Grundlagen

Im anschließenden Kapitel werden die naturwissenschaftlichen Grundlagen erläutert, die für die Nutzung der Erdwärme als erneuerbarer Energieträger von Belang sind. Darüber hinaus werden konkrete Aussagen zu den verschiedenen Erdwärmevorkommen vorgenommen.

#### 3.1 Erdaufbau

Nach dem derzeitigen Wissensstand wird ein Schalenaufbau der Erde favorisiert. Messungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen, die beispielsweise durch Erdbeben verursacht werden, stützen diese Annahme. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen wird von der Struktur des Erdinneren bestimmt. In den Übergangsbereichen zwischen Zonen unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften ändert sich ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit zum Teil deutlich. Der diskontinuierliche Verlauf der Geschwindigkeitsänderungen begründet die Annahme, dass die Erde in ihrem Inneren schalenförmig aufgebaut ist (HOTH & HUENGES, 1999).

Die äußere Schale stellt die Erdkruste dar. Sie erstreckt sich unter den Kontinenten bis mehr als 40 km Tiefe, während sie unter den Ozeanen durchschnittlich 10 km mächtig ist. Es überwiegen magmatische, metamorphe und Sedimentgesteine mit insgesamt granitischer Zusammensetzung sowie ab ca. 20 km Tiefe Gesteine basaltischem Charakters wie Gabbro (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Eigenschaften der Erdkruste (nach HOTH & HUENGES, 1999)**

<b>Erdschale</b>	<b>Tiefenbereich</b>	<b>Hauptgesteine</b>	<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>
Obere Erdkruste	0-15 km	Sedimente, Metamorphite, Granite	<2,5-2,8
Untere Erdkruste	15-40 km	Gabbro, Gneise, Eklogite	2,8-3,0

Mit zunehmender Tiefe steigen die Temperaturen dieser obersten Schale bis auf 1000°C an. Unterhalb der Erdkruste schließt sich der Erdmantel an, der bis in ca. 2.900 km Tiefe reicht und vorwiegend aus Peridotit besteht. Die Temperaturen des Mantels bewegen sich zwischen 1.000 und 3.000°C. Im Zentrum des Erdkörpers

befindet sich der Erdkern, dessen äußere Bereiche (ca. 3.000 - 5.100 km Tiefe) flüssig sind. Der innere Erdkern ist hingegen fest und besteht hauptsächlich aus Eisen sowie Nickelanteilen. Die Kerntemperaturen schwanken zwischen 3.000 und 5.000°C.

Der Erschließung geothermischer Energiequellen sind primär technologische Grenzen gesetzt. Die tiefste bisher betriebene Bohrung reichte in Russland ca. 12 km hinab. In Deutschland wurde 1994 die kontinentale Tiefbohrung (KTB) in der Oberpfalz bei 9101 m eingestellt (PRESS & SIEVER, 1995). Folglich stellt die obere Erdkruste bislang die Grenze für die Erschließung und Nutzung geothermaler Energiereserven dar.

### 3.2 Wärmequellen

Wird für die Erde eine mittlere spezifische Wärme von 1 kJ/(kg K) und eine mittlere Dichte von 5.500 kg/m<sup>3</sup> angenommen, so lässt sich ihr Wärmeinhalt auf rund 12 bis  $24 \cdot 10^{30}$  J schätzen. Der Wärmeinhalt in der Erdkruste bis in eine Tiefe von 10 km wird auf  $6 \cdot 10^{26}$  J geschätzt. Die dort gespeicherte Energie reicht aus, um eine Million Kraftwerke mit einer Leistung von jeweils 200 MW über einen Zeitraum von 10.000 Jahren zu betreiben (RUMMEL & KAPPELMEYER, 1993).

Als Quellen der Erdwärme sind drei Prozesse maßgeblich. Zum Einen ist der Aufschlag von Materie auf die Ur-Erde zu nennen. In Folge dessen wandelte sich die kinetische Energie der aufschlagenden Materie in Wärmeenergie um. Zum Zweiten erhöhte sich durch die Anlagerung neuer Materie die Masse der Erde. Die Folge war ein Druckanstieg im Erdinneren, der seinerseits einen weiteren Temperaturanstieg verursachte. Der dritte bedeutende Ursprung des Wärmeinhalts der Erde ist im Zerfall radioaktiver Isotope begründet, welcher seit der Bildung der Ur-Erde besteht. Dem heutigen Wissensstand zufolge sind besonders in den granitischen und basaltischen Gesteinen der Erdkruste wärmeproduzierende Isotope (Uran  $U^{238}$ ,  $U^{235}$ , Thorium  $Th^{232}$ , Kalium  $K^{40}$ ) angereichert (HUENGES & KALTSCHMITT, 2003).

### 3.3 Temperaturgradient in der Erdkruste

Mit zunehmender Tiefe steigt die Umgebungstemperatur innerhalb der äußeren Erdkruste. Im Umkehrschluss bedeutet dies einen stetigen Wärmefluss vom Erdinneren in Richtung Erdoberfläche. Ein Maß des Anstieges der Temperatur mit zunehmender Tiefe ist der geothermische Gradient.

Ist der Wärmefluss ungestört, beträgt der geothermische Gradient für die kontinentale Kruste im Durchschnitt 30 K/km. Dieser Wert stellt eine Richtgröße dar (HOTH & HUENGES, 1999). Temperaturmessungen in verschiedenen Tiefenbohrungen ergaben stark abweichende Temperaturgradienten. In der Regel werden in alten Kontinentalgebieten wie Kanada oder Südafrika kleinere Gradienten festgestellt, als an jungen, tektonisch aktiven Grenzen von Lithosphärenplatten (z.B. Island) oder in Grabenregionen (Oberrheintalgraben, Deutschland). (HUENGES & KALTSCHMITT 2003).

### 3.4 Temperaturverteilung und Wärmetransport im Untergrund

Die Temperaturverteilung in den oberflächennahen Erdschichten wird maßgeblich durch die solare Einstrahlung, den Niederschlag, die Bodenfeuchte sowie die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmespeicherkapazität des Bodens bestimmt. Durch die Kopplung dieser Faktoren an die solaren Strahlungsverhältnisse ist die Temperaturverteilung in den obersten Erdschichten ähnlichen jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen, wie die Lufttemperaturen.

Der Einfluss der jahreszeitlichen Temperaturveränderungen ist bis in eine Tiefe von 10-20 m nachweisbar. In Tiefen darüber hinaus ist ihr Einfluss zu vernachlässigen, so dass sich zunächst eine Zone mit ganzjährig konstanten Temperaturen einstellt - die so genannte neutrale Zone. Ihre Temperatur entspricht in etwa der langjährigen Jahresmitteltemperatur an der Erdoberfläche in der jeweiligen Region.

Unterhalb der neutralen Zone ist der geothermische Wärmefluss bzw. Wärmestrom der temperaturbestimmende Faktor. Er ist als die Wärmemenge definiert, die in einer bestimmten Zeiteinheit durch eine bestimmte Fläche fließt. Die terrestrische Wärmeleitung erfolgt zum einen über den konduktiven Wärmestrom, das heißt durch Wärmeleitung über das Festgestein. Zum anderen verläuft sie über den konvektiven Wärmestrom mittels Wärmeleitung über Fluide. Das geothermisch relevante Fluid ist Wasser, welches atmosphärischen Niederschlägen entstammt und bereits am

Wasserkreislauf teilgenommen hat (meteorisches Wasser). In Abhängigkeit von seiner Temperatur und dem Umgebungsdruck im Untergrund befindet es sich in der flüssigen oder gasförmigen Phase. In diesem Wasser sind oft chemische Verbindungen oder Gase wie z. B. Kohlendioxid oder Schwefelwasserstoff enthalten (DICKSON & FANELLI 1995).

Der Wärmestrom durch eine Fläche im Bereich einer bestimmten Schichtmächtigkeit wird als Wärmestromdichte charakterisiert. Sie setzt sich aus Anteilen des konduktiven und konvektiven Wärmestroms sowie der entlang des Tiefenbereichs summierten Wärmeproduktion zusammen. Im Bereich der kontinentalen Erdkruste überwiegt der Anteil der konduktiven Wärmestromdichte. Der bestimmende Faktor ist die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine der Erdkruste (Tabelle 3) (Hoth & HUENGES, 1999).

**Tabelle 3: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität im Untergrund (SANNER & RYBACH, 1997)**

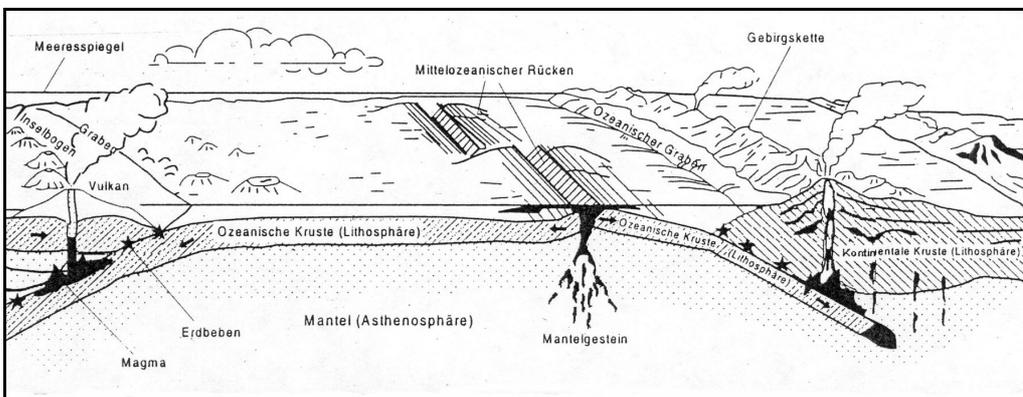
<b>Gestein</b>	<b>Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]</b>	<b>spez. Wärmekapazität (volum.) [MJ/(m<sup>3</sup> K)]</b>
<i>Magmatische Gesteine:</i>		
Basalt	1,3 - 2,3	2,3 - 2,6
Granit	2,1 - 4,1	2,1 - 3,0
<i>Metamorphe Gesteine:</i>		
Gneis	1,9 - 4,0	1,8 - 2,4
Marmor	1,3 - 3,1	2,0
Glimmerschiefer	1,5 - 3,1	2,2
<i>Sedimentgesteine:</i>		
Kalkstein	2,5 - 4,0	2,1 - 2,4
Mergel	1,5 - 3,5	2,2 - 2,3
Sandstein	1,3 - 5,1	1,6 - 2,8
Ton-/ Schluffstein	1,1 - 3,5	2,1 - 2,4
<i>Lockergesteine:</i>		
Moräne	1,0 - 2,5	1,5 - 2,5
Sand, trocken	0,3 - 0,8	1,3 - 1,6
Sand, wassergesättigt	1,7 - 5,0	2,2 - 2,9
Ton/ Schluff, trocken	0,4 - 1,0	1,5 - 1,6
Ton/ Schluff, wassergesättigt	0,9 - 2,3	1,6 - 3,4
<i>andere Stoffe:</i>		
Luft (0-20 °C, trocken)	0,02	0,0012
Wasser (+10 °C)	0,59	4,15

Die Temperaturverteilung im tiefen Untergrund hängt von verschiedenen Wärmetransportprozessen ab. Als Konsequenz treten, regional bedingt, in gleicher Tiefe verschiedene Temperaturen auf. Anders als die in den oberflächennahen Erdschichten gespeicherten Wärmeenergie ist der geothermische Wärmefluss keinen jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen.

### 3.5 Energetisch nutzbare Erdwärmevorkommen

Im Gegensatz zu dem vornehmlich durch die Solarstrahlung verursachten Energiefluss außerhalb des Erdkörpers, der ca.  $1,35 \cdot 10^6$  mW/m<sup>2</sup> beträgt, ist der mittlere terrestrische Wärmestrom von 65 mW/m<sup>2</sup> vergleichsweise unbedeutend. Die Erklärung dafür gibt die gute Wärmeisolation des Erdkörpers, welche lediglich einen schwachen Energiestrom aus dem Erdinneren an die Oberfläche zulässt.

Direkt an der Erdoberfläche lässt der geringe mittlere Wärmestrom keine wirtschaftliche Nutzung zu. In tieferen Schichten stellen indes heiße Tiefenwässer oder Dampfvorkommen ein ertragreiches energetisches Nutzungspotential dar. Besonders günstige Zonen für energetische Nutzungen sind an aneinandergrenzende Lithosphärenplatten gebunden, da hier hohe Temperaturen schon in geringen Tiefen erzielt werden (Abbildung 1).



**Abbildung 1: Darstellung der dynamischen Erde mit möglichen Erdwärmevorkommen (in: KALTSCHMITT, HUNEGS & WOLFF, 1999)**

Abbildung 2 zeigt schematisch ein ideales geothermales System. Für eine energetische Nutzung geothermaler Energieressourcen eignen sich insgesamt fünf verschiedene geothermische Systeme, die anschließend kurz beschrieben werden.

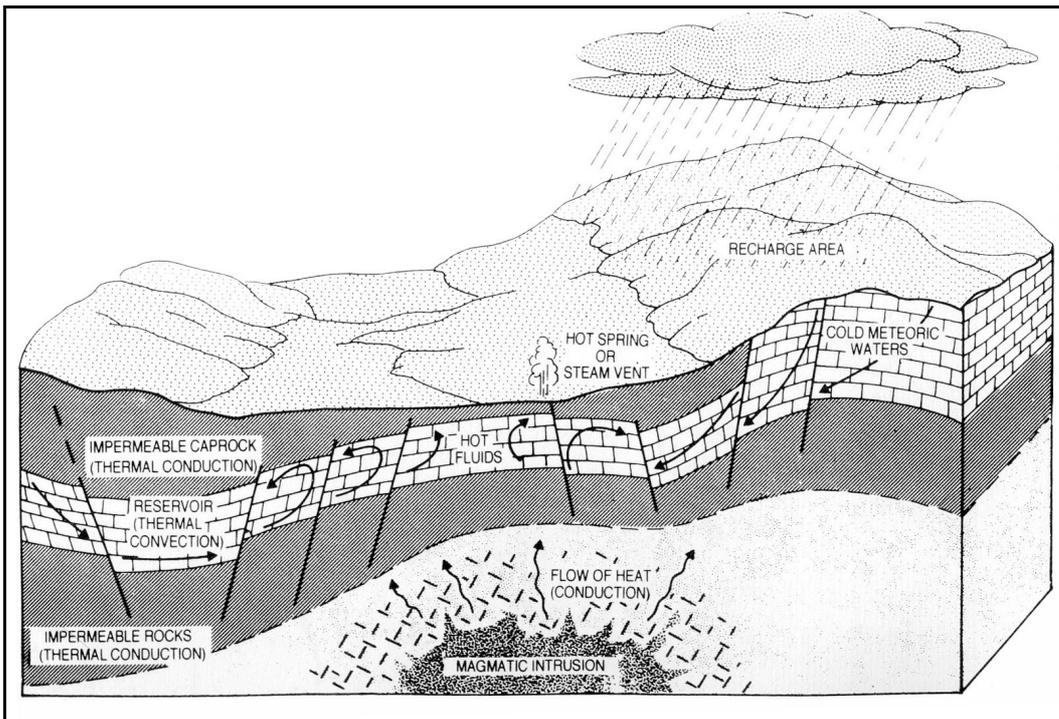


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines idealen geothermalen Systems (in: DICKSON, FANELLI 1995)

### 3.5.1 Oberflächennahe Erdwärmevorkommen

Erdwärmevorkommen, die bis in Tiefen zwischen 400 und 500 m hinabreichen, werden als oberflächennah charakterisiert. Sie bilden eine nahezu überall erschließbare Energiequelle. Die Temperaturen übersteigen in diesen Zonen selten 20°C. Noch bis in eine Tiefe von 20 m unterliegen diese Energieressourcen den Einflüssen der solaren Strahlung, der Wärmeleitung des Bodens sowie dem konvektiven Wärmetransport (s. Abschnitt 3.4). Die energetische Nutzung dieser Systeme erfolgt aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus indirekt über erdgekoppelte Wärmepumpen (SANNER & RYBACH, 1997).

### 3.5.2 Hydrothermale Niederdrucklagerstätten

Hydrothermale Niederdrucklagerstätten sind an stark wasser- oder dampfführende Gesteinsschichten gebunden. Ihre Bildung ist die Folge des Aufstiegs heißen Gesteins aus dem Erdmantel oder der Entstehung tiefer Sedimentformationen (RUMMEL & KAPPELMEYER, 1993). Die Trägermedien der Wärmeenergie sind in den Porenräumen des Gesteins eingeschlossene Wasser- oder Dampfvorkommen.

Zu unterscheiden sind Warmwasservorkommen, deren Temperatur weniger als 100°C beträgt, und Heißwasservorkommen mit einer Temperatur über 100°C. Hydro-

thermale Niederdrucklagerstätten mit Temperaturen zwischen 60 und 120°C existieren in Deutschland in einer Tiefe bis zu 3000 m. In dieser Tiefe treten darüber hinaus besonders hohe Temperaturen (150 bis 250°C) nur unter speziellen tektonischen Bedingungen auf. Solche Bedingungen sind in Bruchzonen der Erdkruste gegeben, in denen heiße Gesteinsmassen aus dem tieferen Untergrund aufsteigen können (vgl. Abbildung 1, S. 12).

### **3.5.3 Hydrothermale Hochdrucklagerstätten**

Kommt es im Zuge tektonischer Prozesse zum raschen Absenken poröser Sedimentpakete in größere Tiefen, können die in den Sedimenten enthaltenen Porenwässer sowie Gasinhalte (vornehmlich Methan) eingeschlossen werden. Durch die Absenkung werden Wasser und Gas einem erheblichen Überlagerungsdruck von bis zu 130 MPa und Temperaturen von bis zu 200°C ausgesetzt.

Die Entstehung hydrothermalen Hochdrucklagerstätten erfolgt zumeist in tiefen Meeresbecken wie dem Golf von Mexiko. Gleichwohl sind vergleichbare Vorkommen in anderen Geosynklinalgebieten wie der Molasse des Voralpenlandes oder in der Po-Ebene vorstellbar (RUMMEL & KAPPELMEYER, 1993).

### **3.5.4 Heiße, trockene Gesteine (Hot-Dry-Rock)**

In den derzeit technologisch erreichbaren Tiefen sind wirklich trockene Gesteinschichten ein Sonderfall. Aus diesem Grund klassifiziert man bereits solche Formationen als trocken, die nicht über genügend natürlich vorkommendes Wasser verfügen, um eine Nutzung über mehrere Jahre zuzulassen (BAUMGÄRTNER, RUMMEL et al., 1997). Eine Ursache dafür ist der durch die überlagernden Deckgebirgsformationen bestimmte Umgebungsdruck von ca. 1.650 bar (in 6 km Tiefe). Durch ihn wird das Vorkommen heißer Kluftwasserfluide sowie deren Mobilität stark eingeschränkt.

Für HDR-Formationen eröffnet sich demnach ein ausgedehntes Spektrum unterschiedlicher kristalliner und metamorpher Gesteinsformationen, die von einer geringen Permeabilität und niedriger Porosität gekennzeichnet werden. Diese machen den bei weitem größten Teil der Erdkruste aus.

Die HDR-Zonen bieten weltweit das größte energetische Potential unter den geothermischen Energieträgern. Theoretisch ist es möglich, einen Kubikkilometer heißen

Untergrund (Temperatur  $>200^{\circ}\text{C}$ ) um 100 K abzukühlen und mit der dadurch gewonnenen Energie ein geothermisches Kraftwerk von 30 MW elektrischer Leistung 30 Jahre lang zu betreiben (RUMMEL & KAPPELMEYER, 1993). Da die Erdwärme in dieser Form nahezu überall gewonnen werden kann, ist der Standort einer HDR-Anlage fast unbeschränkt wählbar.

### 3.5.5 Magmavorkommen

Geschmolzene Gesteine mit einer geringeren Dichte als das umgebende Festgestein, so genannte Magmen, weisen Temperaturen von über  $700^{\circ}\text{C}$  auf. Sie sind charakteristisch für Regionen mit jungem (die Eifel) und zum Teil noch aktivem Vulkanismus (Island). Magmen steigen aufgrund ihrer geringeren Dichte aus größeren Tiefen auf und bilden in ca. 3-10 km Tiefe Vorkommen. Der Aufschluss solcher Magmenkammern und die Energiegewinnung stellen bislang eine nicht bewältigte technologische Herausforderung dar (HUENGES, HOTH & SCHEYTT, 1999).

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Ausbeutung aller dieser verschiedenen Erdwärmevorkommen von deren Energiegehalt abhängt, welcher wiederum durch die jeweilige Temperatur bestimmt wird. Um Erdwärmevorkommen zur Stromerzeugung nutzen zu können, sind Temperaturen oberhalb von 150 bis  $170^{\circ}\text{C}$  notwendig. Für Temperaturen unter  $150^{\circ}\text{C}$  erschließen sich eine Vielzahl verschiedener Nutzungsmöglichkeiten: Geothermische Heizzentralen, Thermalbäder kombiniert mit Gebäudeheizungen bzw. Treibhäusern, Erdwärmesonden zum Heizen und Kühlen sowie unzählige kleinere dezentrale Anlagen zur Gebäudeheizung (CLAUSER, 1997).

## **4 Technische Potenziale der Erdwärmennutzung in Deutschland**

Dieses Kapitel beinhaltet Angaben zu den Potenzialen der verschiedenen Erdwärmevorkommen, die unterstreichen, welche Bedeutung diesem Energieträger in der Zukunft beizumessen ist.

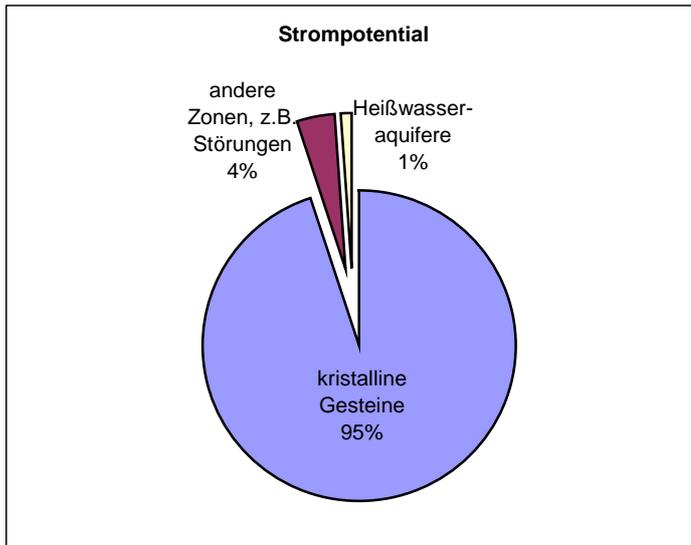
Bei der Betrachtung der verfügbaren Potenziale der Energiequelle Erdwärme wird zwischen verschiedenen Potenzialbegriffen unterschieden, welche im Glossar nachzuschlagen sind. Bei PASCHEN et al. (2003) und KAYSER & KALTSCHMITT (1998) werden die verschiedenen Potenzialbegriffe ausführlich erläutert.

Zu berücksichtigen ist, dass die Ergebnisse von Potenzialabschätzungen sowohl von den jeweiligen Autoren als auch von den Jahren, in welchen sie erhoben wurden, abhängen und zum Teil erheblich voneinander abweichen. Dafür ursächlich dürften voneinander abweichende Bewertungsvoraussetzungen sowohl für geologische als auch für technische Parameter sein.

### **4.1 Strom- und Wärmepotenziale**

Nach einer aktuellen Einschätzung des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (PASCHEN et al., 2003) stellt Geothermie eine ernst zu nehmende Option für die zukünftige Energieversorgung dar. In Deutschland existieren erhebliche technische Potenziale, welche die Möglichkeit einer geothermischen Strom- und Wärmeversorgung auch wirtschaftlich sinnvoll erscheinen lassen.

Das technische Gesamtpotenzial für die geothermische Stromerzeugung liegt bei ca. 1.200 EJ. (ca. 300.000 TWh) und entspricht somit dem 600fachen des deutschen Jahresstrombedarfes. Abgesehen davon existiert ein zusätzliches Potenzial an thermischer Energie (Wärme bei Kraft-Wärme-Kopplung). Wird dabei auf den Einsatz von Wärmepumpen verzichtet, ist es mit dem 1,5fachen des Strompotenzials zu beziffern. Finden Wärmepumpen Verwendung, beläuft sich das Potenzial an thermischer Energie auf das 2,5fache des Strompotenzials (PASCHEN et al., 2003).



**Abbildung 3: Anteil verschiedener Reservoirtypen am geothermischen Strompotential (JUNG et al. 2002, IN: TAB 2003)**

Herauszuheben ist die Notwendigkeit einer nachhaltigen Nutzung der Speicher. Die Erschließung der technischen Potenziale sollte sukzessive erfolgen, da der geringe natürliche Wärmestrom die Erdwärmespeicher nur langsam energetisch wieder auffüllen kann.

## 4.2 Potenziale der einzelnen Erdwärmevorkommen

### 4.2.1 Oberflächennahe Erdwärmennutzung

Das für die oberflächennahe Erdwärmennutzung in Frage kommende theoretische Potenzial lässt sich auf der Basis des mittleren, aus dem unteren Erdreich maximal gewinnbaren Energieaufkommens berechnen und wird mit rund  $360 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{a})$  angegeben. Dieser Wert stellt die theoretische Obergrenze des erschließbaren Energiepotenzials bzw. den maximalen Entzugswert für horizontale Erdkollektoren dar. Auf die Fläche Deutschlands bezogen ergibt sich ein theoretisches Potenzial von ca. 130 EJ/a (Tabelle 4) (Lux & KALTSCHMITT, 1999).

**Tabelle 4: Potenzial oberflächennaher Erdwärmennutzung in Deutschland (KALTSCHMITT & WIESE, 1997)**

	Wärme
Theoretisches Potenzial in EJ/a	130
Technisches Angebotspotenzial (Erdwärme) in PJ/a	940

Das technische Angebotspotenzial thermischer Energie aus dem flachen Untergrund beträgt für Deutschland 940 PJ/a (Tabelle 4) (LUX & KALTSCHMITT, 1997). Die

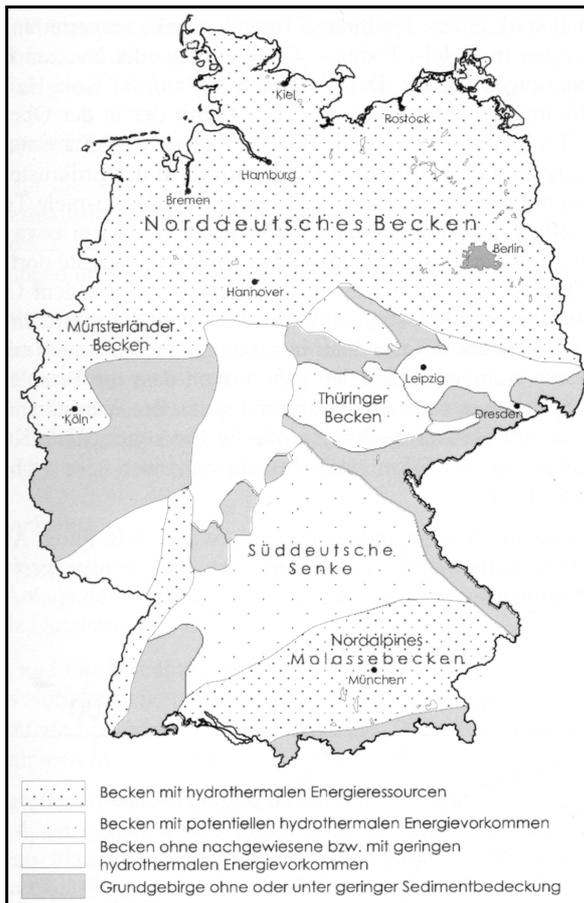
Differenz zum theoretischen Potenzial ergibt sich aus den folgenden Einschränkungen: Weit von dem Verbraucher entfernte Flächen werden nicht zur Nutzung herangezogen. Nutzbar sind den Gebäuden direkt zugeordnete Flächen (Gebäude- und Freiflächen), welche in der Summe 5,8% der Fläche Deutschlands ausmachen (Lux & KALTSCHMITT, 1999). Wegen bestehender Gebäudestrukturen und gesetzlicher oder sonstiger Einschränkungen können von diesen Flächen nur etwa 40% herangezogen werden. Darüber hinaus ist das Einbringen der Kollektoren nicht bei jeder Bodenstruktur möglich und sinnvoll. Schließlich ist die Nutzung oberflächennaher Geothermie in Grundwasserschutzgebieten nur begrenzt möglich.

Somit steht ein Drittel der Gebäude- und Freiflächen der Bundesrepublik für eine oberflächennahe Erdwärmenutzung technisch zur Verfügung. Verschiedene bautechnische und wirtschaftliche Aspekte führen dazu, dass von diesen verbleibenden Flächen letztendlich nur 40% tatsächlich nutzbar sind (LUX & KALTSCHMITT, 1999).

#### **4.2.2 Hydrothermale Erdwärmenutzung**

Unter etwa 35% der Fläche Deutschlands ist eine Nutzung hydrothermalen Energievorräte theoretisch denkbar. Bis in eine Tiefe von 3.000 m sind derartige Energiereserven gegenwärtig bohr-technisch vergleichsweise einfach und ökonomisch vertretbar zu erschließen. Werden normale Temperaturverhältnisse, d.h. einen Temperaturgradienten von 3K/100 m im Untergrund vorausgesetzt, ist das theoretische Energiepotenzial bis in 3.000 m Tiefe mit 42.000 EJ beziffern. Bis in eine Tiefe von 7.000 m erhöht sich das theoretische Potenzial Deutschlands auf 650.000 EJ (RUMMEL & KAPPELMEYER, 1992).

Für die Nutzung hydrothermalen Erdwärme taugliche Aquifere sind in Deutschland vornehmlich in drei Gebieten vorzufinden (Abbildung 4). Zu nennen sind an dieser Stelle das Süddeutsche Molassebecken, der Oberrheingraben sowie das Norddeutsche Becken. In diesen Gebieten herrschen Sedimentstrukturen vor, in denen höchstwahrscheinlich Aquifere mit ausreichend großer Wasserführung in nicht zu großer Tiefe existieren. Nachfolgend wird für die drei Regionen das technisch gewinnbare Potenzial dargelegt.



**Abbildung 4: Gebiete mit potenziellen hydrothermalen Energievorräten in Deutschland (GFZ, 1998)**

Süddeutsches Molassebecken. Die hydrothermalen Energievorräte des Süddeutschen Molassebeckens sind von FRISCH (1989) und HAENEL (1988) detailliert abgeschätzt worden. Für die Schichten des Malmkarst (oberes Jura) ergibt sich ein technisches Angebotspotenzial von 53,6 EJ. Weitere 34,4 EJ lassen sich aus den Schichten des Tertiärs und der Kreide gewinnen. Insgesamt bietet das Süddeutsche Molassebecken ein technisches Angebotspotenzial von 88 EJ (KAYSER & KALTSCHMITT, 1998).

Oberreingraben. Für den Oberreingraben kann von einem technischen Angebotspotenzial in Höhe von ca. 60 EJ ausgegangen werden (HAENEL, 1988). Die ergiebigen Schichten befinden sich im Bundsandstein, im oberen Muschelkalk sowie im Jura. Im Oberreingraben ist mit salzhaltigen Wässern zu rechnen. Der Salzgehalt steigt mit der Tiefe an (KAYSER & KALTSCHMITT, 1998).

Norddeutsches Becken. Für das Norddeutsche Becken fehlen bislang zusammenhängende und detaillierte Untersuchungen des technisch gewinnbaren Potenzials hydrothermalen Energievorkommen. Grobe Abschätzungen gehen davon aus, dass

die Hälfte der Fläche des Norddeutschen Beckens, ca. 50.000 km<sup>2</sup>, thermalwasserführende Aquifere bereithält, welche die Mindestanforderungen (bezüglich Temperatur und Ergiebigkeit) an eine geothermische Nutzung erfüllen. KAYSER und KALTSCHMITT (1998) berechneten ein technisches Angebotspotenzial von 50 EJ.

In Tabelle 5 sind die Potentiale hydrothermalen Erdwärmennutzungen für die drei soeben besprochenen Gebiete übersichtshalber wiedergegeben.

**Tabelle 5: Potenzial hydrothermalen Erdwärmennutzungen in Deutschland (KALTSCHMITT & WIESE, 1997; KAYSER & KALTSCHMITT, 1998)**

	<b>Molasse- becken</b>	<b>Oberrhein- graben</b>	<b>Norddeutsches Becken</b>	<b>Summe</b>
Fläche in km <sup>2</sup>	20.000	5000	100.000	125.000
Theoretisches Potenzial in EJ	6.700	1.700	33.600	42.000
Technisches Angebotspotenzial (Erdwärme) in EJ (PJ/a)	88 (880) <sup>2</sup>	60 (600) <sup>2</sup>	50 <sup>1</sup> (500) <sup>2</sup>	198 (1.980) <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Voraussetzungen: mittlere Thermalwassertemperatur 60°C, Injektionstemperatur nach der Nutzung 20°C, Doublettenförderung, Zirkulationsmenge je Doublette 75 m<sup>3</sup>/h, Lebensdauer 50 Jahre, jährliche Mindestnutzung 5.000 h, Anzahl der Doubletten 17.000

<sup>2</sup> Nutzungsdauer von 100 Jahren und Tiefe bis 3.000m unterstellt

Insgesamt ist in Deutschland ein technisches Angebotspotenzial hydrothermalen Geothermie von rund 200 EJ vorhanden. Wird dieses Potenzial über eine Zeitspanne von 100 Jahren nutzbar gemacht, stehen zur Deckung der Nachfrage an Niedertemperaturwärme rund 2.000 PJ pro Jahr zur Verfügung.

#### 4.2.3 Tiefe Erdwärmesonden

Um das theoretische Potenzial für die Erdwärmennutzung mit tiefen Sonden (Tabelle 6) zu bestimmen, kann die gesamte Fläche Deutschlands als verfügbar betrachtet werden. Bei durchschnittlichen Temperaturverhältnissen (d.h. ein Temperaturgradient 3 K/100 m) ist für das Gebiet der Bundesrepublik ein Energievorrat in bis zu 3.000 m Tiefe von 120.000 EJ theoretisch zugänglich (KAYSER & KALTSCHMITT, 1997).

Das technische Angebotspotenzial bestimmt sich gegenüber dem theoretischen durch ähnliche Restriktionen, wie bei der oberflächennahen Erdwärmennutzung (vgl. Abschnitt 4.3.1). Vom potentiellen Verbraucher weit entfernte Gebiete fallen ebenso wie dicht besiedelte, bebaute oder anderweitig belegte Flächen aus der Betrachtung

heraus. Theoretisch wären demzufolge nur 2,55% der Fläche Deutschlands technisch nutzbar.

Da im Erdreich unter diesen freien Flächen jedoch zum Teil Infrastrukturelemente (Gasleitungen, Kabel o.ä.) verlaufen, verringert sich die technisch nutzbare Fläche um rund weitere 45%. Schließlich steht in Deutschland eine Fläche von  $5 \cdot 10^9 \text{ m}^2$  für das Abteufen tiefer Sonden zu Verfügung. Daraus lässt sich, unter Einhaltung eines Mindestabstandes von 100 m zwischen den Sonden, ein technisches Angebotspotenzial von annähernd 3.010 PJ pro Jahr berechnen.

**Tabelle 6: Potenzial der Erdwärmennutzung mit tiefen Sonden in Deutschland (KALTSCHMITT & WIESE, 1997)**

	<b>Wärme</b>
Theoretisches Potenzial in EJ/a	120.000
Technisches Angebotspotenzial (Erdwärme) in PJ/a	3.010 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ausgehend davon, dass dem Erdreich 200 W/m durch tiefe Erdwärmesonden entzogen werden kann

#### **4.2.4 Nutzung klüftige kristalliner Formationen mittels HDR**

Unter der Annahme, dass sich dem Gestein Wärme bis auf etwa 20°C Resttemperatur entziehen lässt, ergibt sich für das Gebiet Deutschlands ein theoretisches Potenzial für die Nutzung heißer, trockener Gesteine bis in 10.000 m Tiefe von  $1,2 \cdot 10^6$  EJ (JUNG et al., 2003; Tabelle 7).

Um das technische Angebotspotenzial bestimmen zu können, ist vereinfacht davon auszugehen, dass es die geologischen und tektonischen Voraussetzungen auf rund einem Drittel der deutschen Gebietsfläche zulassen, die in großen Tiefen gespeicherten Energievorräte zu erschließen. Des Weiteren spielen oberirdische Gegebenheiten wie Bebauung, Schutzgebiete u.ä. an dieser Stelle eine Rolle.

Für die geothermische Nutzung trockener, heißer Gesteine liegt die technisch-ökonomische Grenze derzeit bei ca. 7.000 m Tiefe. Um die HDR-Technologie einsetzen zu können, ist es notwendig, die Wärme im Untergrund auf einem möglichst hohen Temperaturniveau zu erschließen. Aus diesem Grund bleibt nur der Tiefenbereich zwischen 3.000 und 7.000 m Gegenstand der Potenzialbewertungen. Unter dem unterstellten Drittel der Gebietsfläche Deutschlands ließe sich ein Gesteinsvolumen von 476.000 km<sup>3</sup> erschließen. Etwa die Hälfte dieser Fläche besitzt ein Temperatur-

niveau, welches auch zur Stromgewinnung ausreicht. KALTSCHMITT setzte 1997 für eine Abschätzung des technischen Potenzials einer Wärmegewinnung aus dem tiefen Untergrund Folgendes voraus:

- Abkühlung des gesamten Gesteinsvolumens von 476.000 km<sup>3</sup> um 0,01 K pro Jahr,
- spezifische Wärmekapazität des Tiefengesteines: 0,75 kJ/(kg\*K) sowie
- mittlere Gesteinsdichte: 2,8 kg/dm<sup>3</sup>.

Diese Parameter vorausgesetzt lässt sich für Deutschland ein technisches Potenzial für die Erdwärmenutzung aus dem tiefen Untergrund von 10.000 PJ/a bestimmen. Im Bezug auf die Möglichkeit einer geothermischen Stromerzeugung errechnete Jung (2003) für Deutschland ein technisches Stromerzeugungspotenzial von 321 TWh/a (auf eine Nutzungsdauer von 1000 Jahre bezogen).

**Tabelle 7: Potenzial der HDR-Nutzung in Deutschland (KALTSCHMITT & WIESE 1997)**

	<b>Wärme</b>
Theoretisches Potenzial in EJ/a	1,2 * 10 <sup>6</sup>
Technisches Angebotspotenzial (Erdwärme) in PJ/a	10.000

## **5 Darstellung technischer Verfahren**

In dem nachfolgenden Kapitel werden die unterschiedlichen technischen Verfahren vorgestellt, mit welchen sich Erdwärmevorkommen erschließen und nutzbar machen lassen.

### **5.1 Oberflächennahe Erdwärmenutzung**

#### **5.1.1 Reifegrad und Realisation von Anlagen**

Mit erd- und grundwassergekoppelten Wärmepumpen steht eine in höchstem Maße ausgereifte und langlebige Technologie für die dezentralen Wärmeversorgung zur Verfügung. Diese Nutzungsform der Erdwärme blickt auf eine jahrzehntelange Entwicklungsgeschichte zurück und ist in Europa und Nordamerika weit verbreitet.

In Deutschland sind bis 1997 schätzungsweise bereits 15.000 bis 22.500 erdgekoppelte Wärmepumpen in Betrieb genommen worden (LUX, KALTSCHMITT & SANNER, 1997). Beispiele für in Deutschland realisierte Anlagen finden sich unter anderem bei SANNER (1992). Im Jahr 2001 wurden annähernd 8.600 Wärmepumpenanlagen neu installiert, von denen rund zwei Drittel erdgekoppelt und rund 14 Prozent grundwassergekoppelt betrieben werden (KALTSCHMITT, 2003)

#### **5.1.2 Technologie**

##### **5.1.2.1 Grundprinzip**

Bei der Nutzung oberflächennaher Erdwärmevorkommen fungiert das Erdreich oder das Grundwasser als Wärmequelle für die Wärmepumpen.

Eine Wärmequellenanlage ("Wärmesammler") dient dem Wärmeentzug aus dem Erdreich. Im Boden wird ein Wärmetauscher installiert, in welchem ein Wärmeträgermedium zirkuliert (geschlossenes System). Wird das Grundwasser als Wärmequelle erschlossen, wird es abgepumpt und im Anschluss an die energetische Nutzung wieder in den Untergrund eingeleitet (offenes System). In diesem Fall ist das Grundwasser selbst das Wärmeträgermedium.

Die dem Erdreich oder dem Grundwasser entzogene Wärmeenergie wird einer Wärmepumpe zugeführt. Diese bringt die Wärme auf ein höheres, für einen dem Wärmepumpenkreislauf angeschlossenen Heizkreislauf nutzbares Temperaturniveau.

### 5.1.2.2 Erschließung der Wärmequellen

Geschlossenes System. Das Erdreich als oberflächennahe Erdwärmequelle lässt sich durch Erdwärmetauscher erschließen.

Horizontal verlegte Wärmetauscher ("Erdwärmekollektoren", Abbildung 5) bestehen aus Metall- oder Kunststoffrohren. Sie werden in einer Tiefe zwischen einem und zwei Metern in das Erdreich eingebracht. Der Abstand zwischen zwei Rohren sollte 0,5 bis einen Meter betragen. Um auch während längeren Kälteperioden dem Erdreich genügend Wärme entziehen zu können, sollte die genutzte Fläche etwa das zwei- bis dreifache der zu beheizenden Fläche betragen (SANNER, STREICHER & KALTSCHMITT, 2003). In Abhängigkeit von den jeweiligen Bodeneigenschaften variieren die entzogenen Wärmeleistungen zwischen 10 und 35 W/m<sup>2</sup> (STIEBEL-ELTRON, 1991). Aus einem Quadratmeter Erdreich können im Verlauf der Heizperiode ca. 360 MJ Wärme gewonnen werden. Dabei schwankt die spezifische Rohrlänge zwischen 15 und 125 m pro kW Heizleistung (SANNER, 1992).

Eine Verringerung des Flächenbedarfs wird durch das Verlegemuster eines Grabenkollektors erreicht. Dabei werden die Wärmetauscherrohre an den Wänden eines 2,5 m tiefen und 3 m breiten Grabens verlegt. Als Orientierungswert kann eine spezifische Grabenlänge von 2 m pro kW Heizleistung genannt werden. Vertikal verlegte Erdwärmetauscher ("Erdwärmesonden", Abbildung 5) besitzen im Vergleich zu den Erdkollektoren einen deutlich geringeren Flächenbedarf. Als wirtschaftlich sinnvoll haben sich Verlegetiefen zwischen 50 und 150 m erwiesen. Das Bohrverfahren, mit dem die Sonden abgeteuft werden, wird in Abhängigkeit vom Aufbau der Erdschichten und von den Platzverhältnissen vor Ort gewählt. Für Lockergestein stehen der Einsatz einer Hohlbohrschnecke oder das Spülbohrverfahren (Rotary-Verfahren) zur Auswahl. Für Bohrungen in Festgestein, hat sich der Imlochhammer bewährt. Um eine optimale thermische Kopplung zwischen der Sonde und dem Erdreich zu erlangen, werden die Bohrlöcher hinterfüllt. Zu diesem Zweck wird vorwiegend Bentonit-Zement verwendet.



(A) Horizontaler Erdwärmekollektor



(B) Vertikale Erdwärmesonde



(C) Grundwasserbrunnen

**Abbildung 5: Funktionsprinzip verschiedener Techniken zur oberflächennahen Erdwärmenutzung (Quelle: [www.sytherma.de](http://www.sytherma.de))**

Übliche Erdwärmesonden sind als U-Sonden (2 Rohre), Doppel-U-Sonden (4 Rohre) oder Koaxialsonden aufgebaut und bestehen zumeist aus Polyethylen oder kunststoffbeschichteten Edelstahl- bzw. Kupferrohren.

Technologisch junge vertikale Wärmetauscher sind so genannte Energiepfähle. Dabei handelt es sich um mit Wärmetauschern ausgestattete Gründungspfähle für die Bauwerksgründung.

Im Inneren aller Wärmetauscher zirkuliert ein Wärmeträgermedium. Dabei handelt es sich um einen Stoff, dessen Gefrierpunkt unter  $0^{\circ}\text{C}$  liegt. Über den Wärmetauscher

entzieht das Trägermedium dem Erdreich Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau und führt sie dem Wärmepumpenverdampfer zu. Als Wärmeträgermedium findet vorwiegend Wasser Verwendung, das mit einem Frostschutzmittel (Monoethylenglykol, Monopropylenglykol) versetzt ist.

Offenes System. Neben dem Erdreich steht das Grundwasser als Wärmequelle für Wärmepumpensysteme zur Verfügung. Das zu jeder Jahreszeit stetige Temperaturniveau des Grundwassers zwischen 8 und 12°C begünstigt seine energetische Nutzung. Der Wärmequellenkreislauf besteht aus einem Förderbrunnen und einem Schluckbrunnen, in welchem das energetisch genutzte und abgekühlte Grundwasser in den Untergrund zurückgepumpt wird (Abbildung 5). Üblicherweise beträgt die Brunnentiefe zwischen 4 und 10 m. Relevant ist die Forderung, dass Entnahme- und Schluckbrunnen hinreichend weit voneinander entfernt sind. Auf diese Weise verhindert man einen thermisch-hydraulischen Kurzschluss zwischen den beiden Brunnen (SANNER, STREICHER & KALTSCHMITT, 2003).

Die technische Funktionsweise des im Anschluss an den Wärmequellenkreislauf installierten Wärmepumpen- und Heizkreislauf ist entsprechend der Methodik nicht Gegenstand der Betrachtungen dieser Arbeit.

## **5.2 Hydrothermale Erdwärmenutzung**

### **5.2.1 Reifegrad und Realisation von Anlagen**

Die Erschließung hydrothermalen Energien durch Geothermische Heizzentralen und Heizwerke ist nach Jahren der Forschung und Entwicklung technologisch ausgereift. Beispielanlagen im nordostdeutschen Raum wie die geothermischen Heizzentralen in Waren/Müritz, Neustadt-Glewe oder Neubrandenburg können das belegen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, mittels einer ORC-Anlage geothermischen Strom zu erzeugen. Eine derartige Anlage wurde im November 2003 in Neustadt-Glewe erstmals in Betrieb genommen.

Allen Anlagen für die Nutzung der Hydrothermie ist der Umstand gemein, dass die mit der Erschließung der Geothermiespeicher und die mit den obertätigen Verfahrenstechniken verbundenen Investitionskosten eine Einbindung in große Wärmeversorgungsstrukturen und somit eine zentrale Nutzung notwendig machen (KABUS et al., 1997).

Die technische Lebensdauer solcher Anlagen und des Verteilernetzes wird mit 25 Jahren beziffert. Dies bedeutet, dass alle Anlagenteile mit Ausnahme der Rohrleitungen und Gebäude innerhalb von 25 Jahren mindestens einmal ausgetauscht werden müssen (HUENGES, ERBAS & SCHALLENBERG, 1996).

## **5.2.2 Technologie**

### **5.2.2.1 Grundprinzip**

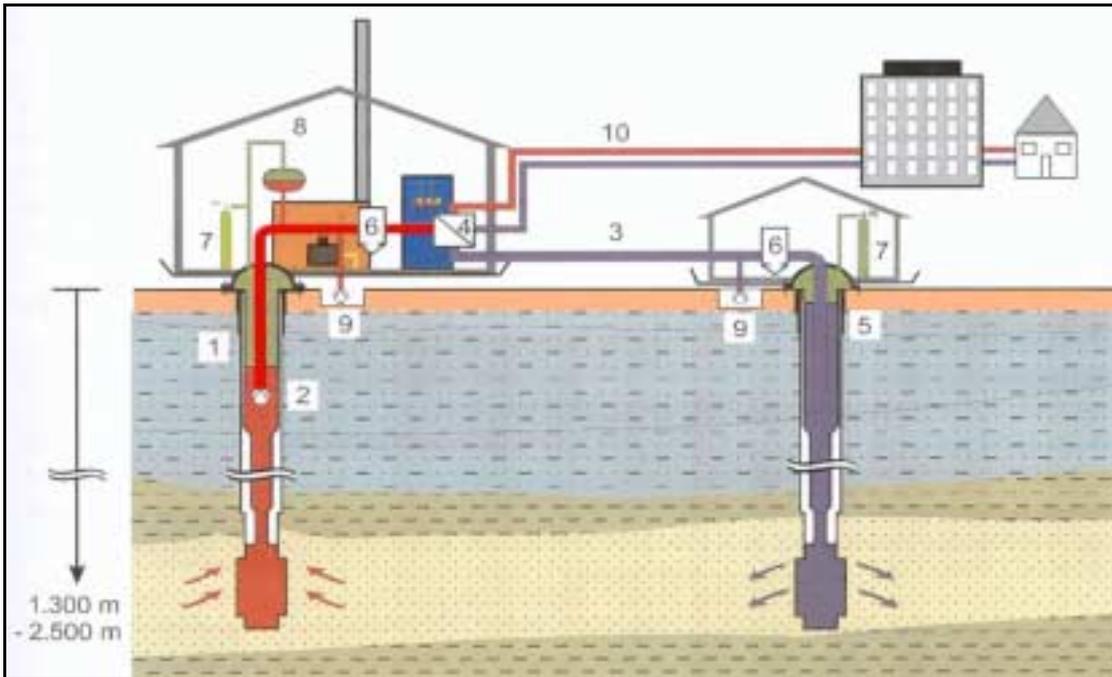
Im Rahmen dieser Technologie werden niedrigthermale (40 -100°C) oder hochthermale (> 100 °C) Tiefenwässer mittels einer Bohrung aus über 2.000 m Tiefe an die Erdoberfläche gefördert. In Geothermischen Heizzentralen oder in Blockheizkraftwerken zur kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung wird deren energetisches Potenzial ausgebeutet (BROßMANN, 2003). Wärmetauscher entziehen dem heißen Tiefenwasser die Wärmeenergie, welche in einem sekundären Kreislauf an den Verbraucher abgegeben wird.

Im Anschluss werden die Wässer mit Hilfe einer Injektionsbohrung wieder in den Untergrund verpresst (Doublettenprinzip), um die Mengenbilanz und das hydraulische Gleichgewicht in den Aquiferen aufrechtzuerhalten. Da es sich zudem bei dem geförderten Thermalwasser überwiegend um hochsalinates Wasser handelt, ist dessen oberirdische Verwendung oder Ableitung aus Umweltschutzgründen nicht gestattet (HUENGES & ERBAS, 2000).

### **5.2.2.2 Erschließung der Wärmequellen**

Neben der notwendigen Bohrung, dem Bohrungsausbau und einem Wärmeverteiler-netz stellt der obertägige Anlagenteil mit dem Thermalwasserkreislauf das Kernstück einer Anlage zur hydrothermalen Erdwärmenutzung dar (s. Abbildung 6). Sie verbindet das thermische Potenzial des Untergrundes mit der entsprechenden Abnehmeranlage (z.B. einem Heizsystem). Die folgenden Komponenten sind mindestens Bestandteil des Thermalwasserkreislaufes: Förderbohrung, Förderpumpe, Förderleitung und Wärmeüberträger (ERBAS et al., 1999).

Hauptfunktionen dieses geschlossenen Primärkreislaufes sind die Förderung und Weiterleitung des Thermalwassers, die Wärmeübertragung an ein sekundäres Heizsystem, die Thermalwasseraufbereitung sowie die Druckerhöhung und anschließende Injektion des Thermalwassers zurück in den Untergrund (KABUS, 1991).



**Abbildung 6:** Aufbau eines Thermalwasserkreislaufs für hochsalinare Wässer [mit Förderbohrung(1), Förderpumpe (2), Förderleitung (3), Wärmeüberträger (4), Injektionsbohrung (5), Filtereinrichtungen (6), Inertgas- (7) und Druckhaltesystem (8), Slopgruben (9) sowie Heiznetz (10)] (HUENGES & ERBAS, 1999)

Das heiße Tiefenwasser wird dem jeweiligen Trägergestein durch den Untertageteil des Thermalwasserkreislaufs entnommen. Dazu sind kostenintensive Tiefenbohrungen erforderlich. Die Förderung wird durch Tiefpumpen realisiert, welche in Tiefen zwischen 100 und 400 m installiert sind.

Der Transport des Thermalwasser erfolgt vorwiegend über erdverlegte wärmeisolierte Rohrleitungen. Die hohe Salinität der geförderten Wässer, die Salzkonzentration kann bis zu 300 g/l erreichen, begründet ihre stark korrosive Wirkung. Der Salzgehalt des in Neustadt-Glewe geförderten Thermalwassers beträgt 277 mg/l (HIELSCHER, pers. Mit., 2003). Daher ist ein besonderer Korrosionsschutz der Rohrleitungen nötig (HUENGES & ERBAS, 2000). Die Schutzmaßnahmen erstrecken sich primär auf die Materialauswahl und die Beschichtung der Leitungen. Üblich sind glasfaserverstärkte Kunststoffe oder beschichtete metallische Werkstoffe.

Geothermische Heizzentralen werden unter einem Druck von bis zu 1 MPa betrieben. Zusätzlich beaufschlagt man alle mit Thermalwasser in Berührung kommenden Anlagenteile mit Inertgas (z.B. Stickstoff). Auf diese Weise soll ein Sauerstoffeintrag in das geschlossene System verhindert werden.

Sowohl im Bohrloch als auch in der obertägigen Anlage angeordnete Filter dienen dem Schutz der Anlagenteile und des Speicherhorizonts vor Fremdpartikeln oder

Fällungsprodukten. Eine weitere Schutzeinrichtung stellt die Leckageüberwachung der Transportleitungen dar, da austretendes hochsalinares Thermalwasser auf Flora und Fauna toxisch wirken kann. Ein so genanntes Slopsystem nimmt außerhalb der Rohrleitungen anfallende Wässer auf und mischt sie bei geeigneter Qualität dem Injektionsstrom wieder bei.

Nach der energetischen Nutzung des Tiefenwassers wird es abschließend über die Injektionsbohrung in den Speicherhorizont zurück verpresst. An die Qualität des zu injizierenden Thermalwassers werden dabei hohe Ansprüche gestellt. Die Durchlässigkeit des Injektionshorizonts muss jederzeit gewährleistet sein (SEIBT, KABUS & KELLNER, 1997).

### **5.3 Erdwärmennutzung mit tiefen Erdwärmesonden**

#### **5.3.1 Reifegrad und Realisation von Anlagen**

Tiefe Erdwärmesonden sind robuste und langlebige Technologieträger für die Nutzbarmachung geothermischer Energie. Aus Kostengründen werden sie jedoch derzeit in Deutschland so gut wie nicht genutzt. Ein Anlagenbeispiel stellt das Heizwerk in Prenzlau nördlich von Berlin dar.

#### **5.3.2 Technologie**

##### **5.3.2.1 Grundprinzip**

Lässt sich durch eine Tiefbohrung kein Thermalwasserreservoir erschließen, besteht statt dessen die Möglichkeit, eine tiefe Erdwärmesonde in das Bohrloch einzubringen. Diese Variante der Nutzung geothermischer Energie beruht auf dem gleichen Funktionsprinzip, wie die Erschließung oberflächennaher Erdwärmevorkommen.

##### **5.3.2.2 Erschließung der Wärmequellen**

Als Erdwärmesonde fungiert eine Tiefbohrung, die 1.000 bis 4.000 m tief reicht. Für den Bohrstrang wird eine doppelte Verrohrung verwendet. In den Raum zwischen dem äußeren und dem inneren Rohr wird ein Wärmeträgermedium eingeleitet. Dies ist in aller Regel Wasser. Auf der Fließstrecke zum tiefsten Punkt der Bohrung erwärmt sich das Trägermedium und wird anschließend durch das innere, besonders gut wärmeisolierte Rohr ("Steigrohr") wieder nach oben gefördert. Es zirkuliert in der Bohrung, die nach außen vollkommen abgedichtet ist. Auf diesem Wege werden jeg-

liche stoffliche Wechselwirkungen zwischen dem anstehenden Festgestein und dem Zirkulationssystem ausgeschlossen. Das erhitzte Trägermedium kann nunmehr als Wärmequelle für Wärmepumpen dienen (KALTSCHMITT, NILL & SCHRÖDER, 2003).

Aussagen zur technischen Funktionsweise des Wärmepumpenkreislaufes werden an dieser Stelle entsprechend den methodischen Festlegungen nicht getroffen.

## **5.4 Nutzung klüftig-poröser Lagerstätten mittels HDR-Technologie**

### **5.4.1 Reifegrad und Realisation von Anlagen**

Die Erschließung von Erdwärmevorkommen in klüftig-porösen Lagerstätten der unterirdischen Gesteinsschichten durch die Hot-Dry-Rock-Technologie ist die modernste unter den hier besprochenen Methoden. Im Gegensatz zu den anderen befindet sie sich jedoch noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium.

Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang das deutsch-französische HDR-Forschungsprojekt in Soultz-sous-Forêts im Elsass am Rand des Oberrheingrabens, das Kraftwerk-Forschungsprojekt im brandenburgischen Groß-Schönebeck sowie im baden-württembergischen Bad Urach.

Berechnungen zufolge wäre ein HDR-Kraftwerk wirtschaftlich, wenn es zwischen 50 und 100 MW thermische Leistung bei einer Laufzeit von 20 Jahren erreicht (BAUMGÄRTNER, JUNG et al., 1992).

### **5.4.2 Technologie**

#### **5.4.2.1 Grundprinzip**

Der größte Teil der Erdwärme ist in unterirdischen tiefgelegenen Gesteinsschichten gespeichert. Durch die Hot-Dry-Rock-Technologie (Abbildung 7) ist es möglich, diese Ressourcen auszubeuten. Dabei werden anfangs zwei Bohrungen eingebracht.



unter Einbeziehung natürlicher Störungszonen außergewöhnlich große Zirkulationssysteme schaffen. Die Wärmeaustauschfläche in Soultz beträgt  $3 \text{ km}^2$ .

Mit Hilfe von Bohrlochgeophonen wird während der Frac-Experimente die Größe und die Lage des erzeugten Rissystems überprüft.

Natürliche Stützmechanismen, die auf einen irreversiblen Versatz der gegenüberliegenden Rissoberflächen zurückzuführen sind, halten die Risse offen und die Fließwiderstände gering. Problematisch ist in diesem Zusammenhang der Wasserverlust in periphere, von Natur aus offene Störungszonen.



**Abbildung 8: HDR-Forschungsbohrung des GfZ Potsdam in Groß-Schönebeck (Foto: GfZ)**

Im Versuchsprojekt Soultz-sous-Forêts läuft momentan die Planungsphase einer HDR-Pilotanlage mit 30 MW thermischer Leistung. Es wird eine Tiefe der unterirdischen Wärmetauscherfläche von 5000 m angestrebt. Die Temperatur im Untergrund beträgt  $200^\circ\text{C}$ .

## **6 Genehmigungsrechtliche Aspekte der Erdwärmennutzung**

Das nachfolgende Kapitel beinhaltet eine Darstellung der für die Genehmigung der Erdwärmennutzung relevanten gesetzlichen Regelungen sowie Aussagen über die behördliche Genehmigungspraxis für geothermische Anlagen. Des Weiteren werden in diesem Abschnitt Aussagen zu den Anforderungen an die Genehmigungsunterlagen für Erdwärmeeinrichtungen getroffen, wie sie sich im Bundesland Brandenburg ergeben.

Stellvertretend für alle anderen finden die gesetzlichen Regelungen des Bundeslandes Brandenburg Eingang in die Arbeit. Brandenburg besitzt nicht nur eine lange Tradition auf dem Gebiet des Umwelt- und Naturschutzes, sondern bietet beachtliche geothermische Energiepotenziale. Auf dem Gebiet der Erforschung und Entwicklung von Technologien zur Erdwärmennutzung ist mit dem GeoForschungsZentrum (GfZ) eine weltweit führende Institution in der brandenburgischen Landeshauptstadt Potsdam angesiedelt.

Für eine Anlagengenehmigung sind die Bestimmungen des Bundesberggesetzes sowie die Normen des Wasserhaushaltsgesetzes bzw. seiner landesrechtlichen Regelungen in besonderem Maße von Bedeutung. Darüber hinaus ergeben sich auch aus anderen Rechtsgebieten wie dem Naturschutz-, Immissionsschutz- und Baurecht genehmigungsrelevante Aspekte. Auf die Bearbeitung von Fragestellungen, die sich aus dem Lagerstätten- und Energierecht ergeben, wurde verzichtet, weil sich aus Sicht des Autors daraus keine umwelt- und naturschutzrelevanten Bezüge ergeben.

Eine Zusammenstellung der genehmigungsrechtlichen Grundlagen für die verschiedenen Technologien und Anlagentypen findet sich in Tabelle 9 am Ende dieses Kapitels.

### **6.1 Die Bergrechtlichen Grundlagen der Erdwärmennutzung**

#### **6.1.1 Gesetzliche Voraussetzungen für die Erdwärmegewinnung nach BBergG**

Seit der Verabschiedung des Bundesberggesetzes im Jahr 1980 ist die „Erdwärme und die im Zusammenhang mit ihrer Gewinnung auftretenden anderen Energien“ nach § 3 III Nr. 2 b BBergG den bergfreien Bodenschätzen gleichgestellt. Da sich der Geltungsbereich des BBergG laut § 2 I BBergG auf das „Aufsuchen, Gewinnen und

Aufbereiten von bergfreien und grundeigenen Bodenschätzen“ einschließlich der damit verbundenen Tätigkeiten wie z.B. Verladen, Befördern, Lagern u.s.w. erstreckt, unterliegt die Gewinnung von Erdwärme grundsätzlich den Regelungen des Bundesberggesetzes.

Die Anwendung des Bergrechtes greift nicht mehr für die anschließende Nutzung der Erdwärme, die nach § 4 III Nr. 2 Satz 2 BBergG einer Weiterverarbeitung gleichzustellen ist, welche gem. § 2 BBergG nicht dem Bergrecht unterliegt. Dementsprechend findet das Bergrecht nur auf die Errichtung und den Betrieb jener Anlagenteile Anwendung, welche unter Verwendung eines Wärmeträgermediums dem Untergrund Wärme entziehen und für eine anschließende Nutzung bereitstellen (KOPF, 1998). Als geeignete Schnittstelle, an der die Regelungen des Bundesberggesetzes enden, kann sich der Übergang zu einer Wärmepumpe oder einem Wärmetauscher erweisen, da hier die „Übergabe“ der Wärme aus technisch-physikalischer Sicht an einen Heizkreislauf zur Nutzung der Erdwärme erfolgt (VDI, 2000; EHRLICH, 1998).

Erdwärme, die auf einem Grundstück aus Anlass oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder städtebaulicher Nutzung gewonnen wird und die der Klimatisierung dieser baulichen Anlagen dient, fällt entsprechend § 4 II Nr. 1 BBergG nicht unter die Normen des Bundesberggesetzes, soweit die Bohrungen nicht mehr als 100m in den Boden eindringen (VDI, 2000; KOPF, 1998; NAST, 1996). Dieser Fall ist zutreffend für zahlreiche private Kleinanlagen in Form von offenen und geschlossenen Systemen der oberflächennahen Geothermie. Dem entspricht die Verwaltungspraxis der deutschen Länderbehörden (BURKHARDT, pers. Mit., 2003; SCHULZ, 2003). Voraussetzung für dieses Verwaltungshandeln in der Praxis ist, dass keine gewerbliche Nutzung über die Grundstücksgrenzen hinaus erfolgt und dass die energetische Nutzung des Untergrundes nicht die Rechte von Dritten verletzt. Dies wäre der Fall, wenn die Reichweite der Erdwärmegewinnung die Grenzen des eigenen Grundstückes überschreitet und ein Nachbargrundstück thermisch oder stofflich beeinflusst wird.

Eine weitere Begründung für die unterschiedliche genehmigungsrechtliche Behandlung der Erdwärmegewinnung aus Teufen von weniger und mehr als 100 m ergibt sich aus den gesetzlichen Bestimmungen des § 127 I BBergG, demnach Bohrungen, die mehr als 100m in den Boden eindringen, bereits den Bestimmungen des Berg-

rechts unterliegen. Bohrungen dieser Tiefe sind auch aus Kostengründen ohnehin nicht auf die Gewinnung von Erdwärme für die Beheizung eines Wohnhauses ausgerichtet.

Letztlich kann die Entscheidung, ob ein Projekt erdwärmebezogen ist, von Fall zu Fall unterschiedlich sein. An dieser Stelle erweist sich in der Verwaltungspraxis die Auslegung nach dem Ziel und dem Zweck des Projektes als dienlich, da das Bundesberggesetz gem. § 2 I Nr. 3 BBergG auf Anlagen und Einrichtungen Anwendung findet, die überwiegend (zu mehr als 50 %) bergbaulichen Zwecken dienen (EHRlich, 1998).

Laut § 6 Satz 1 BBergG bedarf derjenige, der bergfreie Bodenschätze aufsuchen will, der bergrechtlichen Erlaubnis nach § 7 BBergG. Wer bergfreie Bodenschätze gewinnen will, bedarf der Bewilligung gem. § 8 BBergG oder des Bergwerkeigentums gem. § 9 BBergG und untersteht somit dem jeweiligen Landesbergamt als Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde. Der Antragsteller hat in seinen Antragsunterlagen bestimmte gesetzliche Kriterien zu erfüllen. Wesentlich sind:

- die Vorstellung eines konkreten Arbeitsprogramms, welches den technischen und zeitlichen Ablauf des Projekts beschreibt,
- die Bestätigung der erforderlichen finanziellen Mittel (auch für die Verfüllung des Bohrlochs und Bohrplatzre kultivierung im Falle einer Fehlbohrung),
- die Beurteilung der Gefährdung anderer Erdwärmenutzungen durch das neue Projekt sowie
- öffentliche Interessen, die dem Projekt von vornherein entgegenstehen, aufzuzeigen und zu erörtern (z.B. Lage in einem Schutzgebiet) (NAST, 1996).

### **6.1.2 Betriebsplanpflicht für Erdwärmeanlagen**

Das Betriebsplanverfahren ist ein Genehmigungsverfahren, welches den speziellen Verhältnissen des Bergbaus Rechnung trägt (KREMER, 1990). Der Betreiber eines genehmigungsbedürftigen Erdwärmeprojektes ist gesetzlich dazu verpflichtet, sämtliche Aktivitäten im Zusammenhang mit der Erkundung und der Gewinnung in bergrechtlichen Betriebsplänen (§§ 51 ff. BBergG) zu dokumentieren und auf diese Weise die technischen Details dem Landesbergamt zur Zulassung einzureichen (NAST, 1996). Auf diese Weise ist der Behörde ein Werkzeug in die Hand gegeben, um die

vielfältigen Auswirkungen des Bergbaus zu betrachten und abzuwägen. So können sowohl Arbeits- und Gesundheitsschutz-, als auch Umweltschutzbelange sichergestellt werden.

Betriebspläne als Genehmigungsunterlagen haben auszugsweise folgenden Inhalt: allgemeine Angaben zur Lage des geplanten Projekts sowie zur aktuellen Flächennutzung in dem Gebiet, eine Darstellung des Nutzungskonzeptes und der Funktionsweise der geothermischen Anlage, Aussagen zur Geologie, Hydrologie und Lithologie des Gebietes, die Darstellung der Betriebseinrichtungen und der Betriebsarten sowie diverser technischer Parameter. Unabdingbar sind abgesehen von der Beschreibung der Kontroll- und Überwachungsprogramme für eine Sicherstellung des ordnungsgemäßen Betriebes Aussagen und Garantien des Umweltschutzes (z.B. in Form von Wasseranalysen und der Darstellung des Verlaufes der Untergrundtemperaturen). Werden als Wärmeträgermittel wassergefährdende Stoffe verwendet, sind diese durch die Beifügung von Sicherheitsdatenblättern gem. Richtlinie 91/155 EWG auszuweisen.

Genehmigungsrechtlich relevant ist die Tatsache, dass „die Zulassung eines Betriebsplanes die nach anderen Gesetzen erforderlichen Genehmigungen, Bewilligungen oder Erlaubnisse etc. nicht einschließt“ (KREMER, 1990). Der einfache Betriebsplan entfaltet somit keine Konzentrationswirkung. Seine Geltungsdauer kann unterschiedlich lang bemessen sein. Im Fall der Erdwärmesondenanlage auf dem Max-Planck-Campus in Golm beträgt sie z.B. 5 Jahre (JUNG, pers. Mit., 2003).

Auf Antrag des Betreibers kann die zuständige Behörde gem. § 51 III BBergG „Betriebe von geringer Gefährlichkeit und Bedeutung ganz oder teilweise oder für einen bestimmten Zeitraum von der Betriebsplanpflicht befreien, wenn der Schutz Beschäftigter und Dritter und das Wiedernutzbarmachen der Oberfläche [...] auch ohne Betriebsplanpflicht sichergestellt werden können.“

### **6.1.3 Umweltverträglichkeitsprüfung für Erdwärmeanlagen**

Betriebsplanpflichtige Vorhaben, die erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben können, bedürfen gem. § 57 c BBergG einer Umweltverträglichkeitsprüfung. Für diese Vorhaben ist nach § 52 II a S. 1 BBergG ein Rahmenbetriebsplan aufzustellen und für dessen Zulassung ein Planfeststellungsverfahren gem. §§ 57 a und 57 b BBergG durchzuführen. Dabei ergibt sich nicht direkt aus dem Bundesberggesetz,

um welche Art Vorhaben es sich handelt. Das Gesetz stellt die Ermächtigungsgrundlage für die vom Bundesminister für Wirtschaft erlassene „Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-Bergbau)“ dar, in welcher die UVP-pflichtigen Vorhaben aufgelistet sind. Im Bereich der Geothermie sind nach § 57 c BBergG i.V.m. § 1 Nr. 8 UVP-Bergbau „Tiefbohrungen zur Gewinnung von Erdwärme ab 1000m Teufe in ausgewiesenen Naturschutzgebieten oder gemäß den Richtlinien 79/409/EWG oder 92/43/EWG ausgewiesenen besonderen Schutzgebieten“ betriebsplanpflichtige Vorhaben, die einer UVP bedürfen.

„Das im Fall der Erforderlichkeit einer Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführende Planfeststellungsverfahren tritt an die Stelle des herkömmlichen Betriebsplanverfahrens. Sofern für das bergbauliche Verfahren auch nach anderen Vorschriften Planfeststellungsverfahren oder vergleichbare behördliche Entscheidungen vorgesehen sind, ist grundsätzlich nur das bergrechtliche Planfeststellungsverfahren durchzuführen“ (KREMER, 1990; vgl. § 57 b III S. 1 BBergG). Bergrechtliche Betriebsplanzulassungen entfalten somit durchaus eine Konzentrationswirkung, insofern es sich dabei um Planfeststellungen nach § 52 Abs. 2a BBergG handelt.

Ist in einem planfestzustellenden bergrechtlichen Betriebsplan eine Gewässerbenutzung vorgesehen, entscheidet die zuständige Bergbehörde gemäß des § 14 WHG im Einvernehmen mit der zuständigen Wasserbehörde auch über die Gewässerbenutzung (MUNR, 1998).

## **6.2 Die Wasserrechtlichen Grundlagen der Erdwärmenutzung**

### **6.2.1 Wasserrechtliche Genehmigungen und Benutzungstatbestände**

Wie die Ausführungen in Kapitel 6 zeigen, ist bei der thermischen Nutzung des Untergrundes das Schutzgut Wasser zahlreichen Einwirkungen ausgesetzt. Dabei ist das Grundwasser in besonderem Maße betroffen. Aus diesem Grund sind bei der Erschließung von Erdwärmevorkommen sowie dem Bau und dem Betrieb geothermischer Anlagen die wasserrechtlichen Regelungen und planerischen Zielsetzungen zu beachten, welche sich aus den Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes in Verbindung mit den jeweiligen Landes-Wassergesetzen ableiten lassen.

§ 1 I Nr. 2 WHG bestimmt, dass Grundwasser ein Gewässer darstellt und somit den Normen des Wasserhaushaltsgesetzes unterworfen ist. Der § 3 WHG formuliert diverse Benutzungstatbestände, für welche nach § 2 I WHG eine Gestattung seitens

der Behörde notwendig ist. Diese Gestattung erfolgt in Form einer wasserrechtlichen Erlaubnis nach § 7 WHG oder einer wasserrechtlichen Bewilligung nach § 8 WHG. Nach § 6 WHG können Erlaubnis oder Bewilligung begründet versagt werden. Im Zuge der energetischen Nutzung der Erdwärme spielen folgende Benutzungstatbestände aus wasserrechtlicher Sicht eine wesentliche Rolle:

1. Entnahme und Wiedereinleiten von Grundwasser, wie es im Zuge der Benutzung offener Systeme der oberflächennahen Geothermie oder der hydrothermalen Erdwärmenutzung erfolgt,
2. Einleiten von Stoffen in Form Bohrhilfsmitteln oder austretender Wärmeträgerflüssigkeit in das Grundwasser,
3. Entnehmen von Wasser aus oberirdischen Gewässern im Rahmen der Erschließung klüftig-poröser Lagerstätten oder von Zirkulationstests der HDR-Technologie (VDI, 2000; MUNR, 1998) sowie
4. Entnahme von Grund- oder Oberflächenwasser zur Verwendung als Kühlwasser.

Darüber hinaus stellen auch „Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen“ Benutzungen gem. § 3 II Nr. 2 WHG dar. Denkbar wäre an dieser Stelle zum Beispiel die thermische Beeinflussung des Untergrundes und des Grundwassers durch geschlossene Systeme sowie der Austritt von Wärmeträgerflüssigkeiten in Folge von Leckagen in den erdgebundenen Leitungen. Im Land Brandenburg ist für die wasserbehördliche Beurteilung der Erdwärmenutzung neben der thermischen Beeinflussung des Grundwassers vor allem das Durchteufen schützender Deckschichten zwischen verschiedenen Grundwasserstockwerken sowie die Grundwasserverschmutzung durch eintretende Bohrhilfsmittel oder Wärmeträgerflüssigkeiten entscheidungserheblich (BURKHARDT, pers. Mit., 2003; MUNR, 1998).

Eine Entscheidung über eine wasserrechtliche Bewilligung oder Erlaubnis erfolgt unabhängig von der Frage, ob es sich um eine bergbauliche Anlage handelt oder nicht (s. § 14 II und III WHG, § 127 II BBergG) (KOPF, 1998).

### 6.2.2 Anzeige- und Erlaubnispflicht der unterschiedlichen Anlagen

In der Regel bedürfen Arbeiten, die in den Boden eindringen, keiner wasserrechtlichen Erlaubnis oder Bewilligung. Ist durch solche Arbeiten jedoch ein Einwirken auf das Grundwasser zu befürchten, so sind diese Erdaufschlüsse nach § 35 WHG i.V.m. § 56 BbgWG zwei Monate vor Beginn der Maßnahme bei der Wasserbehörde anzuzeigen. Diese wasserrechtliche Anzeigepflicht ist im Landkreis Potsdam-Mittelmark auch für horizontal in 1 bis 2 m Tiefe verlegte Erdwärmekollektoren gängige Verwaltungspraxis (BURKHARDT, pers. Mit., 2003).

Offene Systeme. Während des Betriebes einer grundwassergekoppelten Wärmepumpenanlage wird über den Förderbrunnen Grundwasser entnommen. Dies stellt einen nach § 2 I WHG genehmigungsbedürftigen Benutzungstatbestand i.S.d. § 3 I Nr. 6 WHG dar. Einer Genehmigung durch die Wasserbehörde bedarf ebenso das Wiedereinleiten abgekühlten Grundwassers, das nach § 3 I Nr. 5 WHG gleichfalls eine Benutzung darstellt. Unabhängig von der größeren Tiefe treffen die selben Genehmigungsvoraussetzungen im Bezug auf die Errichtung und den Betrieb von Anlagen der hydrothermalen Geothermie zu. Darüber hinaus ist es hierbei in der Regel erforderlich, vor dem Erreichen des zumeist hochmineralisierten Tiefenwassers schwach mineralisierte Aquifere zu durchteufen. An dieser Stelle liegt das Hauptaugenmerk im Rahmen der Genehmigungsentscheidung auf der Notwendigkeit der Abdichtung zwischen den unterschiedlich mineralisierten Grundwasserleitern, die jedoch bei der Einhaltung des Standes der Technik gewährleistet ist (KOPF, 1998).

Die Grundwasserentnahme für den Betrieb einer Wärmepumpe ist keine erlaubnisfreie Benutzung gem. § 33 I Nr. 1 WHG.

Geschlossene Systeme. Fraglich ist, ob sich im Verlauf des Betriebes einer Anlage auf der Basis eines geschlossenen Systems eine genehmigungspflichtige Grundwasserbenutzung ergibt. Denkbare Benutzungstatbestand wäre eine Veränderung der chemischen oder physikalische Grundwasserbeschaffenheit nach § 3 II Nr. 2 WHG. Die Beurteilung erfolgt im Einzelfall unter Betrachtung der technischen Daten der Anlage sowie unter Beachtung der hydrogeologischen Gegebenheiten. Für horizontal in ein bis zwei Metern verlegte Kollektoren ist eine physikalische Beschaffenheitsveränderung in Folge des Wärmeentzugs zu verneinen, da die Temperaturveränderungen nicht ausreichend sind, um diese Beschaffenheitsveränderung hervorzurufen (MUNR, 1998; KOPF, 1998). Aus diesem Grund ist für diese Anlagen

keine erlaubnispflichtige Gewässerbenutzung zu qualifizieren. Voraussetzung sind an dieser Stelle die Einhaltung des Standes der Technik sowie die Beachtung der VDI-Richtlinie 4640 (Blatt 2, S. 13) welche horizontale Zwischenräume zwischen den einzelnen Rohrsträngen von 0,3 m bis 0,8 m vorsieht.

Bei der Verwendung vertikal verlegter Erdwärmesonden (auch tiefer Erdwärmesonden) kann ein erlaubnispflichtiger Benutzungstatbestand nach § 3 II Nr. 2 WHG erfüllt sein. Dies geschieht in Abhängigkeit vom Ausmaß der physikalischen Beschaffenheitsveränderung des Grundwassers, welche mit der Heizleistung der Anlage korrespondiert. Sowohl die VDI-Richtlinie 4640 (Blatt 1) als auch das vom brandenburgischen Umweltministerium veröffentlichte „Merkblatt über die wasserrechtlichen Anforderungen an geothermische Anlagen“ (1998) verneinen für den Fall der Beheizung eines Ein- oder Zweifamilienhauses den Tatbestand der Gewässerbenutzung, da die Temperaturveränderungen in diesem Fall zu geringfügig sind. Als Schwelle nennt das Merkblatt einen Wert von 20 kW Heizleistung, ab dem der Tatbestand der Gewässerbenutzung grundsätzlich als erfüllt anzusehen ist. Somit ist für den Bau und Betrieb größere Anlagen als 20 kW laut Brandenburgs Umweltministerium eine wasserrechtliche Erlaubnis einzuholen.

In geschlossenen Systemen werden in den Kollektoren Wärmeträgerflüssigkeiten geführt, die der Wassergefährdungsklasse 1 (VwVwS, 1999) angehören und bei ihrem Austritt die chemische und biologische Beschaffenheit des Grundwassers verändern können (vgl. Kap.6.2.4.2). Gemäß der „Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe“ sind einwandige Kollektoren, die wassergefährdende Stoffe enthalten, unzulässig (§ 3 Nr. 2 Satz 2 VawS). Demnach müssten Erdwärmekollektoren doppelwandig ausgeführt werden. In diesem Fall ist jedoch die Funktionsfähigkeit der Anlage nicht mehr gewährleistet. Das realisierte auch das Brandenburger Umweltministerium, welches sich 1999 schriftlich an die Unteren Wasserbehörden der Landkreise und kreisfreien Städte, an die Obere Wasserbehörde (LUA Brandenburg) sowie an das Wasserwirtschaftsamt wandte und die Verwendung von Wärmeträgerflüssigkeiten der Wassergefährdungsklasse 1 in Kollektoren für zulässig erklärte.<sup>1</sup> Unbedingter Bestandteil ist in jedem Fall aus Gewässerschutzsicht der Einbau eines baumustergeprüften Druckwächters (MUNR, 1998).

Bei der Nutzung tiefer Grundwasserstockwerke ergeben sich spezielle Anforderungen, da für den Fall, dass im Untergrund Grundwasser angetroffen wird, ein erlaubnispflichtiger Benutzungstatbestand nach § 3 II Nr. 2 WHG zustande kommt. Dieser erklärt sich durch die Bohrung in ein gespanntes Grundwasserstockwerk, welche zur Verbindung chemisch unterschiedlich beschaffener Aquifere führen kann. Dem trägt auch die Verwaltungspraxis der Wasserbehörde des Landkreises Potsdam-Mittelmark Rechnung, welche unter Umständen eine Tiefenbeschränkung für die Erdwärmennutzung ausspricht (BURKHARDT, pers. Mit., 2003)2.

Genehmigungsrechtlich bedeutsame Benutzungstatbestände ergeben sich darüber hinaus bei der Nutzung der HDR-Technologie. In Frage kommt dabei die Entnahme großer Wassermengen aus Oberflächengewässern, welche eine erlaubnispflichtigen Benutzung gemäß § 3 I Nr. 1 WHG darstellt.

Neben den herkömmlichen wasserrechtlichen Genehmigungen ist unter Umständen eine Rohrleitungsgenehmigung nach § 19 a WHG einzuholen. Sie wird gesondert für das Befördern wassergefährdender Stoffe in Rohrleitungsanlagen notwendig. Um welche Art Stoffe es sich dabei handelt, ist dem § 19 a II WHG sowie der „Verordnung über wassergefährdende Stoffe bei der Beförderung in Rohrleitungsanlagen“ zu entnehmen. Es sind jedenfalls Stoffe, „die geeignet sind, Gewässer zu verunreinigen oder sonst in ihren Eigenschaften nachteilig zu verändern“ (§ 19 a II Nr. 2 WHG). Stark salzhaltige Thermalwässer sind solche Stoffe.

Ausschlussgebiete für die Erdwärmegewinnung und -nutzung stellen Wasserschutzgebiete (§ 15 BbgWG i.V.m. § 19 WHG) dar. Dabei handelt es sich um schützenswerte Trinkwasservorkommen, die der Trinkwassernutzung vorbehalten bleiben. In der Musterverordnung für Wasserschutzgebiete des Landes Brandenburg wird dieser Tatsache in der Form Rechnung getragen, dass für die Erdwärmegewinnung nötige Arbeiten wie Erdaufschlüsse oder Bohrungen in den jeweiligen Schutzzonen untersagt sind (s. § 16 V BbgWG i.V.m. § 4 Nr. 17 und Nr. 18, § 5 Nr. 12 und Nr. 30, § 6 Nr. 3 der Musterverordnung für Wasserschutzgebiete im Land Brandenburg). Auf Antrag kann die untere Wasserbehörde Ausnahmen von den oben genannten Verboten zulassen, wenn das Wohl der Allgemeinheit die Befreiung vom Verbot erforderlich macht oder das Verbot im Einzelfall zu einer offenbar unbeabsichtigten Härte führen würde (§ 8 Musterverordnung).

### 6.2.3 Hinweise zu den Antragsunterlagen für eine wasserrechtliche Genehmigung

Die folgenden Anforderungen an die Antragsunterlagen (Tabelle 8) richten sich an Personen, die Genehmigungen für Anlagen mit Grundwasserbrunnen (offene Systeme) oder mit Kollektoren (geschlossene Systeme) beantragen. Es handelt sich dabei um Auszüge aus dem vom brandenburgischen Umweltministerium veröffentlichten Merkblatt über wasserrechtliche Anforderungen an geothermische Anlagen, in welchem sie ausführlich nachgelesen werden können:

**Tabelle 8: Hinweise zum Inhalt von Antragsunterlagen**

<b>Offene Systeme</b>	<b>Geschlossene Systeme</b>
Beschreibung der Anlage und ihrer technischen Bestandteile	Beschreibung der Anlage und ihrer technischen Bestandteile
Konstruktionszeichnung mit Schema der Gesamtanlage	Konstruktionszeichnung mit Schema der Gesamtanlage
DIN-Sicherheitsdatenblätter des Wärmeträgers, Wassergefährdungsklasse	DIN-Sicherheitsdatenblätter des Wärmeträgers, Wassergefährdungsklasse
Angaben über die Wärmepumpenleistung	Angaben über die Wärmepumpenleistung
Angaben über die geplante Grundwasserentnahmemenge und wieder einzuleitenden Wassermenge in m <sup>3</sup> /h, m <sup>3</sup> /d, m <sup>3</sup> /a, zeitliche Verteilung während des Jahres	Lageplan M 1:500 mit Angaben über Gemarkung, Flur und Flurstück, Eintragung der geplanten Standorte für die vertikalen bzw. horizontalen Kollektoren
Lageplan M 1:500 mit Angaben über Gemarkung, Flur und Flurstück, Eintragung der geplanten Standorte des Entnahme- und Schluckbrunnens, der Grundwasserfließrichtung, der Rohrleitungen und der Wärmepumpe	Übersichtsplan 1:10.000 oder 1:25.000 mit Hoch- und Rechtswerte der vertikalen bzw. horizontalen Kollektoren
Übersichtsplan 1:10.000 oder 1:25.000 mit Hoch- und Rechtswerte der Brunnenanlage	Technischer Aufbau der Kollektoren
Grundwasseranalyse	Angaben zu dem in den Kollektoren verwendeten Wärmeträgermittel
technische Daten des Entnahme- und Schluckbrunnens (z.B. Material, Tiefe in m, Durchmesser, Wasserspiegel in Ruhe und während der Entnahme/Einleitung)	ausführende Firma
ausführende Firma (Brunnenbaubetrieb)	Angaben zu Bohrverfahren und Bohrhilfsmitteln
Angaben zu Bohrverfahren und Bohrhilfsmitteln	<i>Bei horizontalen Kollektoren:</i> Angabe des höchsten zu erwartenden Grundwasserstandes in m uGOK und Angabe der geplanten Verlegetiefe der Kollektoren in m uGOK <i>Bei vertikalen Kollektoren:</i> Anzahl, Abstand und Tiefe in m uGOK der Kollektoren

Antragsunterlagen für eine wasserrechtliche Genehmigung von Großwärmepumpenanlagen enthalten ergänzend folgende Inhalte. Diese dürften aus wasserrechtlicher Sicht auch für die hydrothermale Geothermie relevant sein:

- Allgemeine Erklärung der hydrogeologischen Situation
- Nachweisführung der Gewinnbarkeit der notwendigen Grundwassermenge
- Nachweisführung der Rückleitung der genutzten Grundwassermenge in den Grundwasserleiter
- Anordnung der Förder- und Schluckbrunnen
- Nachweis der Veränderung der Grundwassertemperatur
- Einschätzung der territorialen Auswirkungen
- Größe der Reichweite der Absenkung und der Aufhöhung des Grundwassers

### **6.3 Weitere rechtliche Belange für die Erdwärmenutzung**

#### **6.3.1 Naturschutzrecht**

Schwerpunkt für die Beurteilung der naturschutzrechtlichen Zulässigkeit von geothermischen Vorhaben ist aus materiell-rechtlicher Sicht die Eingriffsregelung gem. §§ 18 ff. BNatschG bzw. §§ 10 ff. BbgNatschG. Dabei sind Eingriffe im Sinne des BNatschG „Veränderungen der Gestalt oder Nutzung von Grundflächen oder Veränderungen des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels, die die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes oder das Landschaftsbild erheblich beeinträchtigen können.“ Nach dem brandenburgischem Naturschutzgesetz kommen im Rahmen der Erdwärmeerschließung und -nutzung folgende Eingriffstatbestände in Betracht:

- Errichtung oder Änderung von Anlagen, die einem Planfeststellungsverfahren unterliegen [...] (§ 10 II Nr. 1 BbgNatschG),
- Abbau oder Gewinnung von Bodenschätzen oder Bodenbestandteilen [...] (§ 10 II Nr. 2 BbgNatschG),
- Die selbstständige Beseitigung der Bodendecke auf nicht bewirtschafteten Grundflächen, soweit nicht mehr als 100m<sup>2</sup> in Anspruch genommen werden (§ 10 II Nr. 4 BbgNatschG),

- Das Verlegen oberirdischer und unterirdischer Versorgungs-, Entsorgungs- und Materialtransportleitungen im Außenbereich (§ 10 II Nr. 7 BbgNatschG) sowie
- Das Errichten oder wesentliche Änderung baulicher Anlagen im Außenbereich (§ 10 II Nr. 9 BbgNatschG).

Diese Eingriffstatbestände unterliegen der Rechtsfolgenregelung der §§ 12 ff. BbgNatschG. Demnach muss der Antragsteller des zuzulassenden Erdwärmeprojektes vermeidbare Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft unterlassen (§ 12 I S. 1 BbgNatschG). Unvermeidbare Beeinträchtigungen sind innerhalb einer bestimmten Frist zu beseitigen oder durch Maßnahmen des Naturschutzes oder der Landschaftspflege auszugleichen (§ 12 II S. 1 BbgNatschG). Sind Beeinträchtigungen nicht zu vermeiden und nicht auszugleichen, ist der Eingriff unzulässig, falls die Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege bei einer Abwägung den Interessen der Erdwärmenutzung im Range vorgehen (§ 13 I BbgNatschG). Weiterhin bietet das brandenburgische Naturschutzgesetz die Möglichkeit, nach § 13 BbgNatschG zulässige aber nicht ausgleichende Eingriffe durch Ersatzmaßnahmen wiederherzustellen (§ 14 BbgNatschG) oder eine Ausgleichsabgabe zu zahlen (§ 15 I BbgNatschG).

Um Bagatellvorgänge auszuschließen gilt die Rechtsfolgenregelung gem. § 20 I BNatschG nur für Eingriffe, die nach anderen Rechtsvorschriften der Genehmigung seitens einer Behörde bedürfen (BENDER, SPARWASSER, ENGEL; 2000). Im Land Brandenburg wird die Zuständigkeit und das Verfahren der Eingriffsregelung nach § 17 BbgNatschG gelenkt: „Wenn für den Eingriff in anderen Rechtsvorschriften eine behördliche Zulassung oder Anzeige vorgeschrieben ist, so hat die hierfür zuständige Behörde die zur Durchführung der §§ 12 bis 15 erforderlichen Entscheidungen und Maßnahmen zu treffen“ (§ 17 I S. 1 BbgNatschG). Für den Fall der Geothermie sind dies das Landesbergamt bzw. die Wasserbehörden. Die Entscheidungen ergehen in Brandenburg im Einvernehmen mit der gleichgeordneten Naturschutzbehörde. Eingriffe, für die keine besondere behördliche Genehmigung oder Anzeige vorgeschrieben ist (welche dann im „Huckepackverfahren“ im Einvernehmen mit der gleichgeordneten Naturschutzbehörde zu erteilen wäre), benötigen im Bundesland Brandenburg zumindest eine naturschutzrechtliche Genehmigung durch die untere Naturschutzbehörde (§ 17 III BbgNatschG).

Aus naturschutzfachlicher Sicht des besonderen Gebietsschutzes sind des weiteren Konflikte denkbar, sollte ein Vorhaben zur Nutzung der Erdwärme in einem ausgewiesenen Schutzgebiet (§§ 22 ff. BNatschG, §§ 19 ff. BbgNatschG) geplant sein. Auf Antrag kann die zuständige Naturschutzbehörde eine Befreiung von den Auflagen (Gebote und Verbote der Schutzgebietverordnung) des Schutzgebietes aussprechen (§ 72 BbgNatschG). Befreiungen kommen jedoch nur in untypischen Sonderfällen in Betracht, bei denen der Antragsteller ein sich von allen anderen unterscheidendes Sonderinteresse nachweisen muss. Wird ein Schutzgebiet durch ein geplantes Vorhaben in erheblichem Umfang angetastet oder seine Schutzwürdigkeit angetastet, kommt eine Befreiung nicht in Frage (BENDER, SPARWASSER & ENGEL, 2000).

Sollte ein Vorhaben in einem gem. § 33 BNatschG ausgewiesenen FFH-Gebiet<sup>3</sup> oder Europäischen Vogelschutzgebiet<sup>4</sup> geplant sein, ist in jedem Fall eine Verträglichkeitsprüfung durchzuführen, ob das geplante Vorhaben den Erhaltungszielen des Gebiets zuwiderläuft (§ 34 BNatschG). "Ergibt die Prüfung der Verträglichkeit, dass das Projekt zu erheblichen Beeinträchtigungen eines in Absatz 1 genannten Gebiets in seinen für die Erhaltungsziele oder den Schutzzweck maßgeblichen Bestandteilen führen kann, ist es unzulässig" (§ 34 II BNatschG). Ein Projekt darf in einem FFH- oder Europäischen Vogelschutzgebiet nur dann zugelassen oder durchgeführt werden, wenn es "aus zwingenden Gründen des überwiegenden öffentlichen Interesses, einschließlich solcher sozialer oder wirtschaftlicher Art, notwendig ist" (§ 34 III Nr. 1 BNatschG) und "zumutbare Alternativen, den mit dem Projekt verfolgten Zweck an anderer Stelle ohne oder mit geringeren Beeinträchtigungen zu erreichen, nicht gegeben sind" (§ 34 III Nr. 2 BNatschG).

Schließlich sind gem. § 30 I BNatschG und in Brandenburg gem. § 32 I BbgNatschG Maßnahmen verboten, die zu einer Zerstörung oder erheblichen oder nachhaltigen Beeinträchtigung bestimmter besonders geschützter Biotope führen. Mögliche Beeinträchtigungen werden im Einzelfall mit einer Erheblichkeitsprüfung untersucht. Dies ist auch für die Standortplanung von Erdwärmeanlagen von Bedeutung.

### **6.3.2 Immissionsschutzrecht**

Fraglich ist, ob die Errichtung oder der Betrieb von Erdwärmeanlagen auch einer Genehmigung nach § 4 I BImSchG bedürfen. Dann müssten geothermische Anlagen den Anlagenbegriff gem. § 3 V BImSchG erfüllen und in der 4. Bundesimmissions-

schutzverordnung aufgeführt sein. Letzteres ist allerdings nicht der Fall. Aus diesem Grund gehören Erdwärmeeinrichtungen zu den immissionsschutzrechtlich genehmigungsfreien Anlagen. Dennoch gelten für sie die §§ 22 ff. BImSchG (Pflichten des Betreibers nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen, Anforderungen an die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen). Diese Bestimmungen erfassen jedoch nur übermäßige Anlagen des Bergwesens, die den Anlagenbegriff aus § 3 V BImSchG erfüllen (NIERMANN, 1992).

### **6.3.3 Baurecht**

Im Bundesland Brandenburg unterliegt die Errichtung geothermischer Anlagen gesetzlich dem Regelungsbereich des Baugesetzbuches und der Brandenburgischen Bauordnung. Folgende Vorhaben sind jedoch zunächst vom Geltungsbereich der Bauordnung ausgeschlossen: „Anlagen, die der Bergaufsicht unterliegen sowie endgültig stillgelegte bergbauliche Anlagen, die nicht mehr der Bergaufsicht unterliegen, mit Ausnahme von Gebäuden auf der Geländeoberfläche“ (§ 1 II Nr. 3 BbgBO), Leitungen, die der öffentlichen Versorgung mit Wasser, Gas, Elektrizität, Wärme, der öffentlichen Abwasserbeseitigung oder der Telekommunikation dienen, mit Ausnahme von Masten und Unterstützungen“ (§ 1 II Nr. 4 BbgBO) sowie Nr. 5 „Rohrleitungen, die dem Ferntransport von Stoffen dienen, mit Ausnahme von Masten und Unterstützungen“ (§ 1 II Nr. 5 BbgBO).

Prinzipiell bedürfen geothermische Anlagen keiner Baugenehmigung. In der Brandenburgischen Bauordnung sind im § 55 genehmigungsfreie Bauvorhaben ausgewiesen, so z.B. § 55 II Nr. 1 „Gebäude ohne Aufenthaltsräume, Toiletten oder Feuerstätten mit nicht mehr als 75 m<sup>2</sup> unbebautem Raum, die nicht im Außenbereich liegen [...]“. Derartige Räume sind in der Regel zur Unterbringung einer geothermischen Heizzentrale bzw. eines geothermischen Kraftwerkes geeignet, solange es sich nicht um eine Vorzeiganlage mit Besucherverkehr wie in Neustadt-Glewe handelt (KOPF, schriftl. Mit., 2003).

Im Rahmen der Erdwärmenutzung kommen weitere nicht genehmigungsbedürftige Vorhaben gemäß der brandenburgischen Bauordnung in Frage. Gemäß § 55 II BrbBauO sind das Leitungen für Wasser, Abwasser, Niederschlagswasser, Gas, Elektrizität, Gas oder Wärme in Gebäuden (Nr. 3), Wasser- und Warmwasserversorgungsanlagen in Gebäuden (Nr. 4), Anlagen zum Verteilen von Wärme bei

Warmwasser- und Niederdruckdampfheizungen (Nr.5) sowie gem. § 55 II BrbBauO Wärmepumpen (Nr. 8) und Brunnen (Nr. 9) (KOPF, schriftl. Mit., 2003).

#### **6.3.4 Ergänzungen**

An dieser Stelle wird ergänzend auf die Regelungen der Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierenden Strahlen (Strahlenschutzverordnung) vom 20. Juli 2001 verwiesen. Durch deren Novellierung wird nunmehr auch natürlich vorkommende Strahlung erfasst. Einschlägig ist der § 1 Nr. 1 StrlSchV: „Diese Verordnung trifft Regelungen für folgende Tätigkeiten a) den Umgang mit [...] bb) natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen, wenn dieser Umgang aufgrund ihrer Radioaktivität [...] erfolgt“ sowie § 1 I Nr. 2 StrlSchV: „Diese Verordnung trifft Regelungen für Arbeiten, durch die Personen natürlichen Strahlungsquellen so ausgesetzt werden können, dass die Strahlenexpositionen aus der Sicht des Strahlenschutzes nicht außer Acht gelassen werden dürfen“. Die Regelungen der Strahlenschutzverordnung greifen zum Beispiel für hydrothermale Heizzentralen, wenn im Thermalwasser Radon enthalten ist, welches sich im Inneren verschiedener Bauteile anlagern kann und bei seinem radioaktiven Zerfall Strahlung freisetzt.

Tabelle 9: Übersicht der genehmigungsrechtlichen Grundlagen

Anlagentyp		genehmigt nach:	Bergrecht	Wasserrecht	Naturschutzrecht	Baurecht	Immissionsschutzrecht
Oberflächennahes geschlossenes System	< 100 m	Wasserrecht gem. § 2 I WHG ab 20 kW Leistung, sonst genehmigungsfrei	vom Bergrecht ausgenommen gem. § 4 II Nr. 1 BBergG	anzeigepflichtig gem. § 35 WHG i.V.m. § 56 BbgWG wasserrechtliche Genehmigung gem. § 2 I WHG i.V.m. § 3 II Nr. 2 WHG (Beschaffenheitsveränderung durch Wärmeentzug) Wasserschutzgebiete sind Ausschlussgebiete für Erdwärmeanlagen § 16 V BbgWG i.V.m. jeweiliger Schutzgebietsverordnung	§ 18 BNatSchG (Eingriffsregelung) §§ 22 – 29 BNatSchG (Schutzgebiete) § 30 BNatSchG (geschützte Biotope) § 34 BNatSchG (NATURA 2000) in Verbindung mit Landesrecht	bedarf prinzipiell keiner Baugenehmigung	§§ 22 ff. BlmschG Pflichten der Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen
	> 100 m	Bergrecht gem. § 6 S. 1 BBergG, § 127 I BBergG,	unterliegt Bergrecht gem. § 127 I BBergG §§ 51 ff. BBergG (Bergrechtlicher Betriebsplan) § 127 II BBergG (Wasserrecht bleibt unberührt)	anzeigepflichtig gem. § 35 WHG i.V.m. § 56 BbgWG wasserrechtliche Genehmigung gem. § 2 I WHG i.V.m. § 3 II Nr. 2 WHG (Beschaffenheitsveränderung durch Wärmeentzug) Wasserschutzgebiete sind Ausschlussgebiete § 16 V BbgWG i.V.m. jeweiliger Schutzgebietsverordnung	§ 18 BNatSchG (Eingriffsregelung) §§ 22 – 29 BNatSchG (Schutzgebiete) § 30 BNatSchG (geschützte Biotope) § 34 BNatSchG (NATURA 2000) in Verbindung mit Landesrecht	bedarf prinzipiell keiner Baugenehmigung	§§ 22 ff. BlmschG Pflichten der Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen
Oberflächennahes offenes System	< 100 m	Wasserrecht gem. § 2 I WHG	vom Bergrecht ausgenommen gem. § 4 II Nr. 1 BBergG	anzeigepflichtig gem. § 35 WHG i.V.m. § 56 BbgWG wasserrechtliche Genehmigung gem. § 2 I i.V.m. § 3 I Nr. 5, 6 WHG (Entnahme und Einleiten von Grundwasser) Wasserschutzgebiete sind Ausschlussgebiete § 16 V BbgWG i.V.m. jeweiliger Schutzgebietsverordnung	§ 18 BNatSchG (Eingriffsregelung) §§ 22 – 29 BNatSchG (Schutzgebiete) § 30 BNatSchG (geschützte Biotope) § 34 BNatSchG (NATURA 2000) in Verbindung mit Landesrecht	bedarf prinzipiell keiner Baugenehmigung	§§ 22 ff. BlmschG Pflichten der Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen
	> 100 m	Bergrecht gem. § 6 S. 1 BBergG, § 127 I BBergG	unterliegt Bergrecht gem. § 127 I BBergG §§ 51 ff. BBergG (Bergrechtlicher Betriebsplan) § 127 II BBergG (Wasserrecht bleibt unberührt)	anzeigepflichtig gem. § 35 WHG i.V.m. § 56 BbgWG wasserrechtliche Genehmigung gem. § 2 I i.V.m. § 3 I Nr. 5, 6 WHG (Entnahme und Einleiten von Grundwasser) Wasserschutzgebiete sind Ausschlussgebiete § 16 V BbgWG i.V.m. jeweiliger Schutzgebietsverordnung	§ 18 BNatSchG (Eingriffsregelung) §§ 22 – 29 BNatSchG (Schutzgebiete) § 30 BNatSchG (geschützte Biotope) § 34 BNatSchG (NATURA 2000) in Verbindung mit Landesrecht	bedarf prinzipiell keiner Baugenehmigung	§§ 22 ff. BlmschG Pflichten der Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen
Hydrothermale Anlage		Bergrecht gem. § 6 S. 1 BBergG	§§ 51 ff. BBergG (Bergrechtlicher Betriebsplan) § 57 c BBerG i.V.m. § 1 Nr. 8 UVP-Bergbau (UVP-Pflichtigkeit)	wasserrechtliche Genehmigung gem. § 2 I i.V.m. § 3 I Nr. 5, 6 oder § 3 II Nr. 2 WHG (Entnahme und Einleiten von Grundwasser oder Beschaffenheitsveränderung durch Bohren in gespanntes Aquifer) § 14 WHG wasserrechtliche Genehmigung erteilt Bergbehörde im Einvernehmen mit Wasserbehörde Wasserschutzgebiete sind Ausschlussgebiete § 16 V BbgWG i.V.m. jeweiliger Schutzgebietsverordnung	§ 18 BNatSchG (Eingriffsregelung) §§ 22 – 29 BNatSchG (Schutzgebiete) § 30 BNatSchG (geschützte Biotope) § 34 BNatSchG (NATURA 2000) in Verbindung mit Landesrecht	bedarf prinzipiell keiner Baugenehmigung § 55 II Nr. 1 BbgBO	§§ 22 ff. BlmschG Pflichten der Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen
Tiefe Erdwärmesonde		Bergrecht gem. § 6 S. 1 BBergG	§§ 51 ff. BBergG (Bergrechtlicher Betriebsplan) § 57 c BBerG i.V.m. § 1 Nr. 8 UVP-Bergbau (UVP-Pflichtigkeit)	wasserrechtliche Genehmigung gem. § 2 I WHG i.V.m. § 3 II Nr. 2 WHG (Beschaffenheitsveränderung durch Bohren in gespanntes Aquifer oder Wärmeentzug) § 14 WHG wasserrechtliche Genehmigung erteilt Bergbehörde im Einvernehmen mit Wasserbehörde Wasserschutzgebiete sind Ausschlussgebiete § 16 V BbgWG i.V.m. jeweiliger Schutzgebietsverordnung	§ 18 BNatSchG (Eingriffsregelung) §§ 22 – 29 BNatSchG (Schutzgebiete) § 30 BNatSchG (geschützte Biotope) § 34 BNatSchG (NATURA 2000) in Verbindung mit Landesrecht	bedarf prinzipiell keiner Baugenehmigung	§§ 22 ff. BlmschG Pflichten der Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen
HDR		Bergrecht gem. § 6 S. 1 BBergG	§§ 51 ff. BBergG (Bergrechtlicher Betriebsplan) § 57 c BBerG i.V.m. § 1 Nr. 8 UVP-Bergbau (UVP-Pflichtigkeit)	wasserrechtliche Genehmigung gem. § 2 I WHG i.V.m. § 3 I Nr. 1 und II Nr. 2 WHG (Einleiten von Oberflächenwasser oder Beschaffenheitsveränderung durch Bohren in gespanntes Aquifer) § 14 WHG wasserrechtliche Genehmigung erteilt Bergbehörde im Einvernehmen mit Wasserbehörde Wasserschutzgebiete sind Ausschlussgebiete § 16 V BbgWG i.V.m. jeweiliger Schutzgebietsverordnung	§ 18 BNatSchG (Eingriffsregelung) §§ 22 – 29 BNatSchG (Schutzgebiete) § 30 BNatSchG (geschützte Biotope) § 34 BNatSchG (NATURA 2000) in Verbindung mit Landesrecht	bedarf prinzipiell keiner Baugenehmigung § 55 II Nr. 1 BbgBO	§§ 22 ff. BlmschG Pflichten der Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen

## **7 Systematische Zusammenstellung der Wirkfaktoren**

Nachfolgend wird eine Darstellung und Analyse der umweltrelevanten Wirkfaktoren und Wirkungen vorgenommen, die im Zuge der Untersuchung von umwelt- und naturschutzfachlichen Tatbeständen bei verschiedenen Genehmigungsverfahren und der dafür notwendigen Grundlagen wie der Eingriffregelung, der FFH-Verträglichkeitsuntersuchung oder der Umweltverträglichkeitsprüfung etc. Bedeutung erlangen.

### **7.1 Ableitung der Wirkfaktoren und Definitionen**

#### **7.1.1 Systematik und Definition der Wirkfaktoren**

Die Analyse der für die geothermische Energiegewinnung relevanten Anlagen und Prozesse bezüglich der mit ihnen verbundenen Wirkfaktoren und potenziellen Wirkungen erfolgt für die folgenden Technologien:

- oberflächennahe Erdwärmenutzung mit erd- und grundwassergekoppelten Wärmepumpen,
- hydrothermale Erdwärmenutzung,
- Erdwärmenutzung mit tiefen Erdwärmesonden sowie
- Nutzung klüftig poröser Lagerstätten mittels der HDR-Technologie.

Die Vorhabensbestandteile und Prozesse, die mit den unterschiedlichen Verfahren zusammenhängen, werden systematisiert nach (KÖPPEL, FEICKERT, SPANDAU & STRAßER, 1998):

- Bau (Bau oder Installation der Anlagen, Erschließung der Erdwärmevorkommen, Produktionstests),
- Anlagen (technische Bauwerke und deren Infrastruktur wie Fahrwege und Leitungen) und
- Betrieb der Anlagen.

Über die Systematik bau-, anlagen- und betriebsbezogener Wirkfaktoren hinaus ist eine Betrachtung der in Folge von Störfällen auftretenden Wirkfaktoren ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen.

Die Wirkfaktoren werden wie folgt definiert:

- Baubedingte Wirkfaktoren: Zeitlich sind sie an die Bau- bzw. Testphase der Anlage gebunden und aus diesem Grund befristet. Beispiele für diese Wirkfaktoren sind stoffliche oder akustische Emissionen des Bohrgerätes oder der Baumaschinen oder Flächeninanspruchnahme durch die Infrastruktur der Baustelleneinrichtung.
- Anlagebedingte Wirkfaktoren: Sind dauerhaft. Sie werden durch die physische Präsenz der Energiegewinnungsanlagen selbst oder durch für ihren Betrieb notwendige technische Einrichtungen herbeigeführt. Typisch für anlagebedingte Wirkfaktoren ist die Belegung von Grundflächen.
- Betriebsbedingte Wirkfaktoren: Diese Wirkfaktoren entstehen durch die Nutzung der Anlagen im bestimmungsgemäßen Betrieb sowie aller zu ihrem reibungslosen Betrieb notwendigen Maßnahmen wie Verkehrsbewegungen oder Instandhaltungsmaßnahmen. Wie die anlagebedingten Wirkfaktoren sind auch diese Faktoren dauerhaft. Beispielshalber sind an dieser Stelle luftgetragene Emissionen zu nennen.
- Störfall: Als Störfälle werden alle bei unsachgemäßer Ausführung der Erschließungsarbeiten (Bohrungen), infolge von Materialverschleiß sowie bei technischen Fehlfunktionen der geothermischen Anlagen auftretenden Zwischenfälle charakterisiert, die nicht einem bestimmungsgemäßen Betrieb oder sachgemäßem Handeln entsprechen. Sie werden als temporär charakterisiert. An dieser ließe sich beispielshalber der Austritt von heißem Thermalwasser an die Erdoberfläche aufführen.

### **7.1.2 Definition potenziell betroffener Wirkbereiche**

Bei der Ableitung der Wirkfaktoren wird, soweit dies möglich ist, gleichermaßen eine Unterteilung nach der Dimension der erwarteten Wirkungen, das heißt dem zu erwartenden räumlichen Ausmaß der Wirkfaktoren getroffen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die standortspezifische Anlagengröße oder spezielle lokale Gegebenheiten nicht berücksichtigt.

Es werden lokale und regionale Wirkbereiche unterschieden:

- Wirkungen sind lokal, wenn die möglichen Wirkungen unmittelbar auf den Eingriffsort beschränkt bleiben, z.B. die Flächenversiegelung.
- Wirkungen sind regional, wenn der Eingriff signifikante Wirkungen im gleichen Funktionsraum verursachen kann, z.B. die Grundwasserabsenkung infolge der Entnahme großer Wassermengen

Die Trennung zwischen lokaler und regionaler Wirkung ist im Allgemeinen einzelfallabhängig. Aus diesem Grund ist eine eindeutige Zuordnung der Wirkfaktoren zu den Wirkbereichen nicht immer möglich. Unter diesen Voraussetzungen erfolgt eine Zuordnung zu zwei Wirkbereichen. Überregionale bzw. globale Wirkbereiche werden bei der Betrachtung der Erdwärmennutzung in dieser Arbeit nicht ausgewiesen (s. Kapitel 2). Die Darstellung der Wirkbereiche von einzelnen Wirkfaktoren erfolgt tabellarisch in der Wirkmatrix.

## **7.2 Darstellung der Wirkfaktoren**

Einen Überblick über die für die Erdwärmennutzung relevanten Wirkfaktoren und deren inhaltliche Bedeutung geben die Tabelle 10 bis Tabelle 13. Dabei erfolgt eine Zuordnung der Wirkfaktoren zu den Technologien, für die sie signifikant sind.

**Tabelle 10: Übersicht über die baubedingten Wirkfaktoren und deren inhaltliche Bedeutung (OFN-Oberflächennahe Erdwärmenutzung, HYT-Hydrothermale Erdwärmenutzung, TES-Tiefe Erdwärmesonden, HDR-Hot-Dry-Rock)**

Wirkfaktor	Erläuterung der Wirkfaktoren	Technologiezuordnung			
		OFN	HYT	TES	HDR
Geräuschemissionen	Der Verkehr der Baufahrzeuge sowie der reguläre Baubetrieb bei der Erschließung der untertägigen Erdwärmevorkommen (insbesondere das Abteufen von Bohrungen, Produktionstests) und bei der Errichtung von Gebäuden verursachen Lärm.	X	X	X	X
Erschütterungen	Das Abteufen von Bohrungen sowie der Verkehr von großen Baufahrzeugen verursachen Erschütterungen.	X	X	X	X
Stoffliche Emissionen	Stoffliche Emissionen, welche ins Erdreich gelangen können, besitzen verschiedene Quellen: Kraftstoffe oder Schmiermittel der Fahrzeuge, Schmier- und Kühlmittel sowie Spülmittelzusätze der Bohrtechnik.	X	X	X	X
Flächeninanspruchnahme	Für die Dauer des Baubetriebs werden Flächen durch Bauteile, Geräte, Fahrzeuge, Gebäude, Materialien, Bodenaushub oder Abfälle in Anspruch genommen.	X	X	X	X
Verlust natürlichen Bodenmaterials	Unter Umständen ist ein Bodenaushub notwendig, in dessen Folge das ausgehobene Bodenmaterial abtransportiert wird und in situ für den Boden verloren geht.	X	X	X	X
Veränderung des Landschaftsbildes	Technische Infrastruktur wie Bohrtürme prägen für die Dauer der Bauphase das Landschaftsbild und beeinflussen dessen natürlichen Charakter.		X	X	X
Wasserverlust	Während Zirkulationstests können große Mengen injizierten Wassers, das oberirdischen Gewässern entstammt, unterirdisch abfließen und verloren gehen.				X

**Tabelle 11: Übersicht über die anlagebedingten Wirkfaktoren und deren inhaltliche Bedeutung (OFN-Oberflächennahe Erdwärmenutzung, HYT-Hydrothermale Erdwärmenutzung, TES-Tiefe Erdwärmesonden, HDR-Hot-Dry-Rock)**

Wirkfaktor	Erläuterung der Wirkfaktoren	Technologiezuordnung			
		OFN	HYT	TES	HDR
Flächenbelegungen/ Versiegelungen	Bauliche Anlagen wie Gebäude, Zufahrtswege oder oberirdische Leitungen (Rohrleitungen) beanspruchen Grundfläche und führen zu Flächenversiegelungen.		X	X	X
Veränderung des Landschaftsbildes	Technische Anlagen (z.T. mit Kühltürmen, Stromleitungen) verändern die ursprüngliche Struktur der Landschaft und beeinflussen das Landschaftsbild.		X	X	X

**Tabelle 12: Übersicht über die betriebsbedingten Wirkfaktoren und deren inhaltliche Bedeutung (OFN-Oberflächennahe Erdwärmenutzung, HYT-Hydrothermale Erdwärmenutzung, TES-Tiefe Erdwärmesonden, HDR-Hot-Dry-Rock)**

	Erläuterung der Wirkfaktoren	Technologiezuordnung			
		OFN	HYT	TES	HDR
Auskühlung des Untergrundes <sup>G)</sup>	Thermische Beeinflussung des Bodens, der Hangenden- und Liegendenschichten durch den Wärmeentzug aufgrund des zirkulierenden Wärmeträgermedium oder des Wiederverpressens abgekühlten Wassers.	X	X	X	X
Thermische Beeinflussung der Bohrungsumgebung <sup>G)</sup>	Zwischen dem in der Bohrung strömenden Fluid und der bohrungsnahen Umgebung treten Wärmeströme auf, welche zu einem Temperaturanstieg bzw. -abfall des Gesteins führen können.		X	X	X
Verzögerung jahreszeitlich bedingter Entwicklung der Bodentemperaturen <sup>G)</sup>	Infolge des Wärmeentzugs aus dem Erdreich durch die Wärmekollektoren kann es zu einer Veränderung des jahreszeitlich bedingten Rhythmus der Bodentemperaturen kommen.	X			
Hydraulische Veränderungen im Untergrund	Grundwasserentnahme und -injektion anderorts führt zu einer räumlich begrenzter Strömungsanpassung.	X	X		
Grundwasserverlust <sup>G)</sup>	Im Normalbetrieb kann es nach der Reinjektion thermisch genutzten Grund- und Tiefenwassers zu Verlusten durch einen lateralen Wasserabfluss im Untergrund kommen. Ein Teil des Grundwasser geht bei Kraftwerken über die Kühltürme als Wasserdampf in der Atmosphäre verloren.		X		X
Thermische Beeinflussung des Aquifers (Doublettenprinzip) <sup>G)</sup>	Das energetisch genutzte Wasser befindet sich auf einem geringeren Temperaturniveau und führt bei seiner Reinjektion zu einer kontinuierlichen Abkühlung der initialen Speichertemperaturen und einem zeitlich variierenden Temperaturgradienten zwischen Speicher und seinen Umgebungsschichten.		X		
Gasförmige Emissionen <sup>G)</sup>	Freisetzung von Gasen aus dem Untergrund, Emissionen der mit fossilen Brennstoffen befeuerten Zusatz- bzw. Spitzenlastanlagen.		X	X	X
Geomechanische Beeinflussung <sup>G)</sup>	Im Langzeitbetrieb können vertikale Absenkungserscheinungen infolge verfahrensbedingter langfristiger Abkühlung und damit verbundene Kontraktionen des Speicherbereichs bis zur Oberfläche auftreten.		X		X
Veränderung der Chemie im Thermalwasserreservoir <sup>G)</sup>	Sauerstoffeintrag kann zu verändertem Redoxpotential und somit zu Ausfällungen mit der Folge von Permeabilitätsverringerungen innerhalb des Speichers führen.		X		
Lösung von Salzen und Mineralien <sup>G)</sup>	Das im Untergrund zirkulierende Wärmeträgermedium kann zur Lösung von Salzen und Mineralien führen.				X
Geräuschemissionen	Der Normalbetrieb geothermischer Anlagen verursacht Betriebslärm.		X		X
Abwärme	Über die Kühltürme abgegebene Abwärme kann das Klima im Bereich um die Kühltürme beeinflussen.		X		X

**Tabelle 13: Übersicht über die Wirkfaktoren bei Störfällen und deren inhaltliche Bedeutung (OFN-Oberflächennahe Erdwärmenutzung, HYT-Hydrothermale Erdwärmenutzung, TES-Tiefe Erdwärmesonden, HDR-Hot-Dry-Rock)**

Wirkfaktor	Erläuterung der Wirkfaktoren	Technologiezuordnung			
		OFN	HYT	TES	HDR
Verbindung mehrerer Aquiferstockwerke <sup>G)</sup>	Durch die Bohrung können mehrere Aquiferstockwerke verbunden werden.	X	X	X	X
Einfließen von Schadstoffen oder Oberflächenwasser durch das Bohrloch in den Untergrund	Schadstoffe oder Oberflächenwasser können bei ungenügender Bohrungsabdichtung einfließen und in tiefere Aquifere gelangen, wo es die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer beeinflusst.	X	X	X	X
Austritt des Wärmepumpenarbeitsmittels <sup>G)</sup>	Durch Leckagen in Leitungen können Arbeitsmittel von Wärmepumpen austreten und in den Boden oder das Grundwasser eindringen.	X		X	
Austritt des Frostschutzmittels <sup>G)</sup>	Durch Leckagen können Frostschutzmittel austreten und in den Boden oder das Grundwasser eindringen.	X			
Austritt von salinaren Thermalwässern an die Erdoberfläche <sup>G)</sup>	Durch Leckagen in den Fördereinrichtungen können heiße saline Tiefenwässer an der Erdoberfläche austreten.		X		
Austritt von Heißdampf an die Erdoberfläche <sup>G)</sup>	Störungsbedingter Austritt des geförderten Wärmeträgermediums (Heißdampf oder heißes Wasser) an der Erdoberfläche.		X		X
Freisetzung gelöster Gase <sup>G)</sup>	Bei einer störungsbedingten Druckentlastung im Kraftwerk oder Leckagen kann es zur Freisetzung gelöster Gase kommen.		X		X

### 7.2.1 Darstellung baubedingter Wirkfaktoren

Die baubedingten Wirkfaktoren (Tabelle 14) der vier betrachteten Technologien lassen sie sich nach Ansicht des Autors zusammenfassend betrachten, weil die damit verbundenen Beeinträchtigungen zum überwiegenden Teil die gleichen Wirkungen auf die Schutzgüter verursachen. Dennoch ergeben sich Unterschiede im Bezug auf die Vielfalt der Wirkfaktoren zwischen der oberflächennahen und der tiefen Erdwärme. Das Hauptaugenmerk der Untersuchung bezüglich der Einflüsse auf die Schutzgüter ist auf jene Wirkfaktoren zu legen, die als Folge der Bohr- und Erschließungsarbeiten auftreten, weil das Beeinträchtigungspotenzial dieser Maßnahmen als besonders hoch eingestuft wird. Die Bohrverfahren und die Tiefe der Bohrungen ergeben sich als Konsequenz der verwendeten Erdwärme-Technologie. Dieser Umstand verursacht sowohl einander gleiche als auch spezifische baubedingte Wirkfaktoren.

Um eine ebene Ausgangsfläche für die Bohrarbeiten zu schaffen, ist unter Umständen der Abtrag von Bodenmaterial, im Bedarfsfall bis mehrere Meter Profiltiefe, nötig (H. JUNG, pers. Mit., 2003). Der Aushub kann, wie z.B. bei der Anlage auf dem Max-Planck-Campus in Golm für die Dauer der Bohrungen und Installation zwischengelagert werden. Im Anschluss wird er wieder auf die Fläche verbracht. Diese Arbeiten stellen einen Eingriff in das natürliche Bodengefüge dar, die damit verbundenen Wirkungen sind jedoch hinsichtlich der Intensität vernachlässigbar. Gleiche Aussagen sind für die Verlegung horizontaler Erdwärmetauscher zu treffen, welche in jedem Fall den Aushub von Boden bedürfen.

Bodenschadverdichtungen können durch den Verkehr von Baufahrzeugen erzeugt werden, weiterhin können Kraftstoffe oder Öl in den Boden oder flache Grundwasserleiter gelangen.

Angaben zum Flächenbedarf von Bohrplätzen finden sich bei KRISTMANNSDÖTTIR (2003, S. 3), die in Abhängigkeit von der Bohrtechnik und der Bohrtiefe eine Flächengröße zwischen 200 und 2.500 m<sup>2</sup> angibt.

Bei Bohrungen, die tiefer als 100 m reichen, findet in Deutschland das Bundesberggesetz Anwendung (§§ 2 ff. BBergG). Unter der Beachtung der Sicherheitsmaßnahmen wird ein standardisierter Bohrplatz eingerichtet. Seine Flächengröße beträgt mindestens 2000 m<sup>2</sup>. Der Bohrplatzuntergrund wird einer Behandlung durch Bodenaushub und anschließender Aufschüttung einer etwa 30 cm starken Kies-schicht unterzogen. Die gesamte Fläche wird versiegelt, um das Erdreich gegen das Eindringen kontaminierter Fluide oder anderer Emissionen zu schützen (WOLFF, 1999). Diese Behandlung des Bohrplatzes unterbindet natürliche Bodenfunktionen wie die Lebensraumfunktion oder die Funktion als Abbau-, Ausgleichs- und Aufbau-medium.

Durch Bauarbeiten, insbesondere wenn Boden auf größerer Fläche abgetragen wird, wird die Vegetation in diesem Bereich ebenfalls entfernt. Auf diese Weise kann die Struktur von Biotopen verändert werden.

Allgemein sind Bohrungen mit akustischen Emissionen verbunden. Die Intensität ist abhängig von der verwendeten Bohrtechnik. Finden schallungedämpfte Pressluftbohrer Verwendung, treten Schallpegel bis zu 120 dB (RYBACH, 2002) auf, beim Einsatz schallgedämpfter Pressluftbohrer verringert sich der Pegel auf 80 dB (RYBACH, 2002).

Spülbohrungen wie das Rotary-Verfahren erreichen ohne eine Schalldämpfung einen Schallpegel von 80 dB (RYBACH, 2002). Zum Vergleich: Intensiver Stadtverkehr ist mit einem Schallpegel zwischen 80 und 90 dB verbunden (RYBACH, 2002). Sowohl der durch die Bohrungen als auch der von Baufahrzeugen verursachter Lärm führt zu einer Beeinträchtigung störungsempfindlicher Tierarten durch die Verursachung von Stress oder die Behinderung ihrer Kommunikation führen (HERMANN, 2001). Lärm setzt den Erholungswert einer Landschaft herab. Gleiche Aussagen sind für Erschütterungen zu treffen, die durch Bohrungen oder den Verkehr großer Baufahrzeuge verursacht werden.

Bohrarbeiten können den Eintrag stofflicher Emissionen in den Boden und das Grundwasser verursachen. Durch das Bohrgerät, Bohrgestänge oder weiteres technisches Zubehör können Öl bzw. Schmiermittel sowie Kühlmittel des Bohrers in das Erdreich oder das Grundwasser gelangen. Bei Spülbohrungen stellen Spülmittelzusätze, die dem zumeist als Spülmittel Verwendung findenden Wasser beigemischt werden, gegebenenfalls ein Risiko für Boden und Grundwasser dar. Bei Bohrungen zur oberflächennahen Erdwärmenutzung handelt es sich vornehmlich um Bentonite (SANNER & KALTSCHMITT, 1999), welche den chemischen und physikalischen Charakter des Grundwassers und der Bodenmatrix verändern können.

Im Verlauf von Bohrungen zur Erschließung tiefer Erdwärmevorkommen ergeben sich im Vergleich zur untiefen Geothermie Unterschiede in der Auswahl der Spülmittelzusätze als Konsequenz größerer Bohrtiefen, die zu höheren Temperaturen an der Bohrlochsohle führen. Um diese hohen Temperaturen zu beherrschen, werden den Bohrspülungen temperaturbeständige Zusätze beigemischt. Die Spülbohrung nach dem Rotary-Verfahren ist eine zur Erschließung tiefer Erdwärmevorkommen weit verbreitete Methode. Bohrtechnisch bedeutsame Additive sind Lignosulfonate und Lignite. Bei hohen Temperaturen von ca. 190 °C setzen Lignosulfonate Schwefelwasserstoff frei (WOLFF, 1999), welcher nicht nur die Bohrtechnik angreift, sondern auch die Schutzgüter Grundwasser, Boden sowie die Bodenfauna und -flora beeinträchtigen kann.

Die Bauphase geht bei allen betrachteten Erdwärmetechnologien mit der Belegung freier Flächen zum Zwecke der Ablagerung von Baumaterialien, Bodenaushub und Abfällen einher. Zumindest in dieser Zeit kann der auf diese Weise genutzte Boden die natürlichen Bodenfunktionen nur eingeschränkt erfüllen. Die auf der Erdober-

fläche installierte Bohrtechnik, insbesondere der Bohrmast, führt zu einer Beeinträchtigung des Landschaftsbildes. Die Bohranlage (Bohrmast und Unterbau) wird in Abhängigkeit von der Bohrtiefe gewählt und kann eine Höhe von bis zu 54 m erreichen (WOLFF, 1999).

Bei der Nutzung tiefer Erdwärmevorkommen ist die Liste baubedingter Wirkfaktoren im Vergleich zur oberflächennahen Geothermie wie folgt zu erweitern:

Während der hydrothermalen Erdwärmennutzung gleichsam wie bei der Nutzung tiefer Sonden oder der HDR-Technologie kann es im Anschluss an die Bohrungen oder im Verlauf von Produktionstests zu akustischen Emissionen kommen, welche die Fauna sowie den Erholungswert einer Landschaft beeinträchtigen. Dieser hochfrequente Lärm tritt als Folge von Dampfablass aus dem Bohrloch auf und erreicht eine Stärke von bis zu 120 dB (KRISTMANNSDÓTTIR & ÁRMANNSSON, 2003).

Bei der Erschließung klüftig-poröser Gesteinsschichten mittels HDR-Technologie ist zudem mit einem erhöhten Wasserverbrauch zu rechnen, welcher bereits in der Phase der Zirkulationstests zum Tragen kommt. Er kann bis zu einigen Tausend m<sup>3</sup>/Tag betragen (RYBACH, 2003). Im Verlauf der künstlichen Generierung des unterirdischen Zirkulationssystems wird bei der HDR-Technologie eine seismische Aktivität induziert. Diese kann Werte erreichen, die an der Erdoberfläche von der Tierwelt wahrgenommen und zu deren Beeinträchtigung führen können.

Weitere baubedingte Wirkfaktoren ergeben sich bei der Errichtung der Kraftwerksanlagen und technischer Infrastruktur wie Pipelines oder Rohstofftanks. Hierbei ist zunächst mit Bodenaushub zu rechnen, der das natürliche Bodengefüge zerstört. Bodenmaterial wird von der Baufläche verbracht und geht dauerhaft an Ort und Stelle verloren. Der regelmäßige Verkehr schwerer Baumaschinen oder LKW kann zu Bodenschadverdichtungen führen. Kraftstoff oder Öl der Baufahrzeuge können in den Boden oder Grundwasser gelangen und diese verunreinigen. Zur Zwischenlagerung von Baumaterialien werden Grundflächen beansprucht, unter denen der Boden für diese Zeit seine natürliche Funktionen nicht mehr ausüben kann.

**Tabelle 14: Baubedingte Wirkfaktoren bei der Erdwärmenutzung und die betroffenen Schutzgüter**

Anlagen und Prozesse	Wirkfaktoren	Schutzgüter							Wirkbereich	
		Grundwasser	Oberflächenwasser	Boden	Pflanzen/ Biotope	Tiere	Klima/ Luft	Landschaft/ Erholung	lokal	regional
Baustelleneinrichtung/ Baubetrieb	Lärm, Erschütterungen durch Baumaschinen					x		x	x	
	Bodenschadverdichtungen	x		x					x	
	Emissionen: Kraftstoffe, Öl und Schmiermittel	x	x	x	x	x		x	x	
	Temporäre Flächenbelegung			x	x	x		x	x	
	Höhe der obertägigen Bohrtechnik							x	x	
Bohrungen/ Aushub	Stoffliche Emissionen durch Spülmittelzusätze	x	x	x	x	x		x	x	
	Stoffliche Emissionen durch Öle und Schmier- und Kühlmittel des Bohrers	x	x	x	x	x		x	x	
	Bohrlärm, Erschütterungen					x		x	x	
	Zerstörung des Bodengefüges			x					x	
	Verlust von natürlichem Bodenmaterial			x					x	
	Beseitigung der Vegetation				x					
Generierung des Zirkulationssystems	Seismische Aktivität					x			x	
Zirkulationstests	Wasserverlust		x						x	
Produktionstests	Lärm					x		x	x	

### 7.2.2 Darstellung anlagenbedingter Wirkfaktoren

Die Nutzung oberflächennaher Erdwärme ist nicht mit anlagenbedingten Wirkfaktoren verbunden (Tabelle 16). Demgegenüber führt die Nutzung der tiefen Erdwärmevorkommen anlagebedingt zu Auswirkungen auf die Schutzgüter. Diese sind bei den verschiedenen Nutzungstechniken gleichartig (vgl. Tabelle 11). Daher



len. Obwohl moderne geothermische Anlagen im Vergleich zu früher kleiner gebaut sind, bleibt deren Sichtbarkeit erhalten (RYBACH, 2002).

**Tabelle 16: Anlagenbedingte Wirkfaktoren bei der Erdwärmennutzung und die betroffenen Schutzgüter**

Anlagen und Prozesse	Wirkfaktoren	Schutzgüter							Wirkbereich	
		Grundwasser	Oberflächenwasser	Boden	Pflanzen/ Biotope	Tiere	Klima/ Luft	Landschaft/ Erholung	lokal	regional
Bauliche Anlagen (Gebäude, Pipelines, Brennstofftanks, Wege	Flächenverbrauch/ Versiegelung	x		x	x	x		x	x	
	Zerschneidung von Biotopen und Lebensräumen				x	x			x	
	Visuelle Beeinträchtigungen							x	x	

### 7.2.3 Darstellung betriebsbedingter Wirkfaktoren

Die betriebsbedingten Wirkfaktoren der verschiedenen geothermischen Nutzungstechnologien sind zu spezifisch, um sie zusammenfassend behandeln zu können. Unterscheidet man die einzelnen Technologien hinsichtlich ihrer Wirkungen auf die Umwelt, so sind die betriebsbedingten Wirkfaktoren in diesem Punkt ausschlaggebend. Aus diesem Grund werden sie in Abhängigkeit von der jeweiligen Technologie dargestellt.

#### 7.2.3.1 Betriebsbedingte Wirkfaktoren der oberflächennahen Erdwärmennutzung

Betriebsbedingte Wirkfaktoren im Rahmen der oberflächennahen Erdwärmennutzung (Tabelle 18) erstrecken sich zunächst auf die thermische Beeinflussung des Bodens und des Grundwassers. Die Ursache dafür ist der Wärmeentzug im Normalbetrieb der Anlagen (Tabelle 17) (KALTSCHMITT, WIESE & STREICHER, 2003; SANNER & RYBACH, 1997; SANNER & KNOBLICH, 1991).

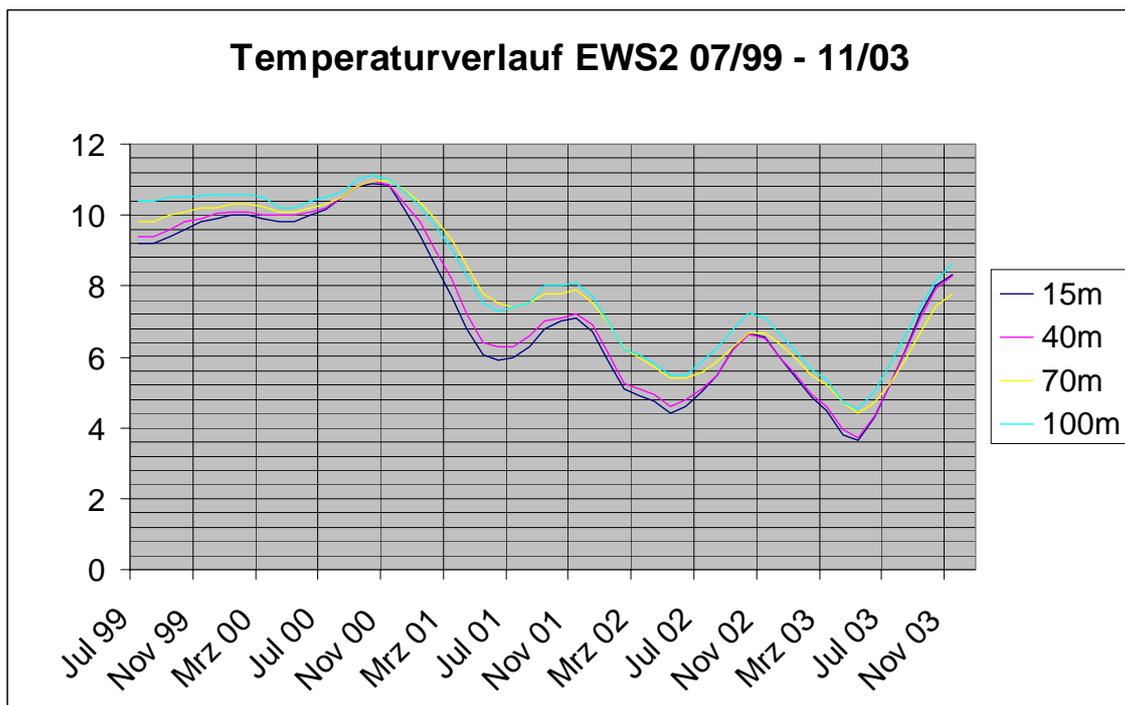
In zwei Meter Abstand von Erdsondenanlagen sind Temperaturabsenkungen von bis zu zwei Kelvin festzustellen, in einem Abstand von fünf Metern betragen sie 0,3 bis 0,5 Kelvin (SANNER & KNOBLICH, 1991). Horizontal verlegte Erdreichwärme-

tauscher verzögern geringfügig die jahreszeitlich bedingte Temperaturentwicklung im Erdreich. In den Sommermonaten erfolgt eine Anpassung an den natürlichen Jahresgang der Bodentemperaturen (Abbildung 9) (SANNER, 1992)

**Tabelle 17: Mögliche spezifische Wärmeentzugsleistungen aus dem Erdreich für 1800 bis 2400 Jahresbetriebsstunden (nach VDI 4640, Blatt 2, S. 12 und 16)**

Untergrund	Spezifische Entzugsleistung			
	Erdwärmekollektoren		Erdwärmesonden	
	1800 h	2400 h	1800 h	2400 h
Trockener, nichtbindiger Boden	10 W/m <sup>2</sup>	8 W/m <sup>2</sup>	25 W/m <sup>1)</sup>	20 W/m <sup>1)</sup>
Feuchter, bindiger Boden	20-30 W/m <sup>2</sup>	16-24 W/m <sup>2</sup>	60 W/m <sup>1)</sup>	50 W/m <sup>1)</sup>
Wassergesättigter Sand/Kies	40 W/m <sup>2</sup>	32 W/m <sup>2</sup>	65-80 W/m <sup>1)</sup>	55-65 W/m <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> pro Meter Sondenlänge



**Abbildung 9: Temperaturverlauf im Erdwärmesondenfeld auf dem Max-Planck-Campus Gölz gemessen an der Erdwärmesonde 2 (H. JUNG, SCHRFTL. MITT., 2004)**

Bei einem zu geringen Abstand zwischen den horizontal verlegter Erdkollektoren ist im Winter infolge des Wärmeentzugs die Bildung einer durchgehenden Frostschicht zwischen den Schleifen der Kollektoren möglich. Diese kann den Sickerwasserfluss beeinträchtigen und die Bodenstruktur feinkörniger Böden beeinflussen. Bei zu tiefen

Bodentemperaturen sinkt die Aktivität verschiedener Bodenlebewesen (z.B. Regenwürmer), während sich die Vegetation unter Umständen langsamer entwickelt (SANNER & KNOBLICH, 1991). Bei größeren Verlegetiefen der Kollektoren können ökologische relevante Auswirkungen der Abkühlung ausgeschlossen werden, da ab ca. 10 m üblicherweise keine Pflanzen oder Tiere aufzufinden sind (LUX & SANNER, 1992). Während Pilze und Bakterien auch in tieferen Bodenschichten leben können, dringen viele höhere Bodenorganismen höchstens einige Zentimeter in den Boden ein, da sie sich von der frischen Laubstreu ernähren (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 1998). Somit sind die Auswirkungen des Betriebes geschlossener Systeme räumlich stark begrenzt.

Im Verlauf des Betriebes offener Systeme wird das kalte Wasser nach der energetischen Nutzung des Grundwassers über den Schluckbrunnen in den Grundwasserleiter zurückgeführt. Daraus ergeben sich Kältefahnen in Strömungsrichtung. Über die Auswirkungen von Temperaturabkühlungen auf die Qualität des Grundwasser können keine Aussagen getroffen werden.

Der Betrieb von grundwassergekoppelten Wärmepumpen führt zu einer Störung des Grundwasserhaushalts, die sich als hydraulischen Veränderungen im Untergrund darstellt. Bei der Entnahme kommt es zu einer Grundwasserabsenkung um den Förderbrunnen, während das Wiedereinleiten zu einer Grundwasseranreicherung rund um den Injektionsbrunnen führt. Als Folge kommt es zu einer räumlich begrenzten Strömungsveränderung (KALTSCHMITT, NILL & SCHRÖDER, 2003). Der Verlust bestimmter Grundwassermengen nach dem Wiedereinleiten durch einen lateralen Wasserabfluss in andere Boden- und Grundwasserschichten ist nicht ausgeschlossen. Darüber hinaus kann es zu Ausfällungen von Metalloxiden kommen, sollte Sauerstoff in den Wasserkreislauf gelangen. Diese Metalloxide können die Poren im benutzten Grundwasserleiter zusetzen und somit den Wasserdurchfluss behindern. Der Umfang dieser Schädigung kann so stark sein, dass ein Betrieb der Anlage nicht mehr möglich ist (BURKHARDT, pers. Mit., 2003).

**Tabelle 18: Betriebsbedingte Wirkfaktoren der oberflächennahen Erdwärmenutzung und die betroffenen Schutzgüter**

Anlagen und Prozesse	Wirkfaktoren	Schutzgüter							Wirkbereich	
		Grundwasser	Oberflächenwasser	Boden	Pflanzen/ Biotope	Tiere	Klima/ Luft	Landschaft/ Erholung	lokal	regional
Wärmetauscher	Auskühlung des Untergrundes	x		x	x	x			x	
	Verzögerung jahreszeitlicher Temperaturentwicklung im Boden				x	x			x	
Förderbrunnen	Störung des Grundwasserhaushalts	x							x	
Schluckbrunnen	Grundwasserabkühlung durch wiedereingeleitetes Grundwasser	x			x	x			x	
	Grundwasserverlust	x		x	x	x			x	
	Veränderung der Chemie im Grundwasser	x		x					x	

### 7.2.3.2 Betriebsbedingte Wirkfaktoren der hydrothermalen Erdwärmenutzung

Der Betrieb hydrothermalen Erdwärmevorkommen ist mit vielfältigen Wirkfaktoren verknüpft (Tabelle 19). Verschiedene Wirkfaktoren verursachen eine thermische Beeinflussung des Bodens, des Grundwassers sowie der Gesteinsschichten im Untergrund. Die betriebsbedingte Reinjektion abgekühlten Tiefenwassers führt im Betriebsverlauf kontinuierlich zu einer Abnahme der initialen Speichertemperaturen. Zwischen dem Speicher und dessen umgebenden Schichten entsteht ein zeitlich variierender Temperaturgradient, welcher wiederum einen konduktiven Wärmefluss aus den Umgebungsschichten in den Speicher nach sich zieht. Dieser bewirkt eine teilweise Wiedererwärmung des Reservoirs, während die Deckschichten abkühlen. Berechnungen zufolge (ERBAS et al., 1999) dringen die thermischen Veränderungen nach kalkulierten 30 Betriebsjahren maximal 160 m in die Deckschichten des Reservoirs ein. Die Temperaturabnahmen belaufen sich in weniger als 70 m Eindringtiefe auf mehr als 10 K.

Während des Betriebes entstehen Wärmeströme zwischen dem in der Bohrung zirkulierenden Wärmeträgermedium und der Bohrungsumgebung. Der Temperaturanstieg bzw. die -absenkung wirken sich auf die Boden- und Grundwasserbereiche sowie auf Flora und Fauna in einer kreisförmigen Fläche in unmittelbarer Nähe der Bohrung aus (SEIBT et al., 2003; ERBAS et al., 1999). Die Bodenschichten, in welchen die Rohrleitungen zum Transport des Thermalwassers von der Bohrung vom Kraftwerk verlegt sind, unterliegen denselben thermischen Beeinflussungen (HIELSCHER, pers. Mit., 2003).

Geomechanische Einflüsse im Langzeitbetrieb entwickeln sich einerseits als Konsequenz langfristiger Auskühlung. Damit ist eine Kontraktion des Gesteins im Speicherbereichs verbundenen, die bis zur Tagesoberfläche reicht (GTN, 1994; zit. in: ERBAS et al., 1999). Andererseits kann die Entnahme des Thermalwasser und dessen Wiederverpressung in den Untergrund als Ursache betrachtet werden. Auf diese Weise kommt es zu Veränderungen der Porendruckverhältnisse, welche die Felsspannungsverhältnisse beeinflussen. Die Folge wäre eine Verstärkung der natürlichen Seismizität (RYBACH, 2002; BIRKLE, 1998; ÁRMANNSSON & KRISTMANNSDÓTTIR, 1992). An der Oberfläche spürbare geomechanische Einflüsse können zu einer Störung der Tierwelt führen.

Die Förderung des thermalen Tiefenwassers bedeutet einen Eingriff in die unterirdische Mengenbilanz des Wassers. Temporär begrenzt entsteht durch die Förderung ein Mengendefizit innerhalb des Reservoirs, welches die Strömungsverhältnisse des Tiefenwassers verändern kann. Darüber hinaus kann die Fluidentnahme zu einer Absenkung des Grundwasserhorizonts führen (KRISTMANNSDÓTTIR & ÁRMANNSSON, 2003).

Eine negative Grundwasser-Mengenbilanz entsteht, wenn nicht die gesamte geförderte Thermalwassermenge in das Reservoir zurückverpresst wird, sondern ein Teil verdunstet oder in flachere Aquifere versickert (BIRKLE, 1998).

Die betriebsbedingte Zirkulation des thermalen Tiefenwassers kann die Lösung und Freisetzung von Mineralien bewirken, welche die Qualität des Thermalwassers beeinträchtigen (SEIBT et al., 2003; RUMMEL & KAPPELMEYER, 1993).

Der Betrieb geothermischer Anlagen ist mit der Emission von nichtkondensierbaren Gasen verbunden, die weniger als fünf Prozent des Gewichts der emittierten Dampfphase ausmachen (BROPHY, 1997). Die bedeutendsten Anteile stellen Kohlendioxid

sowie Schwefelwasserstoff dar. Weitere Inhaltsstoffe der gasförmigen Phase sind Methan, Quecksilber, Radon, Ammoniak, Bor oder Schwefeldioxid (KRISTMANNSDÓTTIR & ÀRMANNSSON, 2003). Im Hinblick auf ihre Klimawirksamkeit als Treibhausgas sind von diesen Stoffen Kohlendioxid und Methan besonders relevant. Die Emission von Schwefelwasserstoff führt insbesondere zu signifikanten Beeinträchtigungen der Luftqualität und der Landschaft, da dieses Gas bereits in geringen Konzentrationen mit einem äußerst unangenehmen Geruch verbunden ist. In höheren Konzentrationen wirkt es toxisch. Die Bandbreite der von Hydrothermalanlagen emittierten luftschädliche Gase erweitert sich um Mengen an Kohlendioxid, Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden, wenn für den Spitzenlastbetrieb der Anlage fossile Brennstoffe wie leichtes Heizöl oder Erdgas zugefeuert werden (KAYSER & KALTSCHMITT, 1999).

Während des Normalbetriebes geothermischer Anlagen begrenzt ein Schalldämpfer die umweltrelevante Geräuschkulisse in Abhängigkeit vom Kraftwerktyp. In Deutschland gelten die Anforderungen der TA Lärm und der VDI-Richtlinie 2571 „Schallabstrahlung von Industriebauten“. Demnach darf der Lärmpegel einer Anlage in reinen Wohngebieten in der Nacht 35 dB nicht überschreiten.



Abbildung 10: Weit sichtbare Wasserdampfwolke über einem US-amerikanischen Erdwärmekraftwerk (<http://geothermal.marin.org>)

Der Wirkungsgrad geothermischer Kraftwerke ist relativ gering. Er liegt wegen vergleichsweise niedriger Dampftemperaturen nur um 15% (BAYRISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2000). Aus diesem Grund kann ungenutzte Abwärme einen relevanten Wirkfaktor am Kraftwerksstandort darstellen, welcher eine signifikante Beeinflussung des Mikroklimas rund um die Kühleinrichtungen der Kraftwerke hervorruft (RYBACH, 2002). Damit verbunden ist je nach Wetterlage und Standort des Kraftwerkes die Prägung des Landschaftsbildes durch aufsteigende Wasserdampf Wolken (Abbildung 10), deren Quelle verdampfendes Kühlwasser ist. Somit kommt es zum Verlust bestimmter Mengen von Grundwasser, das als Kühlwasser benutzt wird (HIELSCHER, pers. Mit., 2003).

**Tabelle 19: Betriebsbedingte Wirkfaktoren der hydrothermalen Erdwärmenutzung und die betroffenen Schutzgüter**

Anlagen und Prozesse	Wirkfaktoren	Schutzgüter							Wirkbereich	
		Grundwasser	Oberflächenwasser	Boden	Pflanzen/ Biotope	Tiere	Klima/ Luft	Landschaft/ Erholung	lokal	regional
Untertage teil	Auskühlung des Untergrundes	x		x					x	
	thermische Beeinflussung der Bohrungs- und Rohrleitungsumgebung	x		x	x	x			x	
	Störung des unterirdischen Wasserhaushalts	x							x	x
	Veränderung der Chemie im Thermalwasserreservoir	x							x	
	Grundwasserverluste	x							x	x
	geomechanische Beeinflussung der Oberfläche						x		x	
Übertage teil	luftgetragene Emissionen					x	x	x	x	x
	Betriebslärm					x		x	x	
	Abwärme						x		x	
	Aufsteigende Wasserdampf Wolken							x	x	x

### 7.2.3.3 Betriebsbedingte Wirkfaktoren bei der Nutzung tiefer Erdwärmesonden

Wirkfaktoren durch den Betrieb tiefer Erdwärmesonden (Tabelle 20) bedeuten zunächst eine thermische Beeinflussung des Bodens und des Grundwassers in der Sondenumgebung. Sie können als Wärmeentzug aus dem Untergrund charakterisiert werden und betreffen den unmittelbaren Bereich rund um den Bohrstrang. Eine langfristige Auskühlung mit entsprechenden Wirkfaktoren wie bei der hydrothermalen Geothermie ist indes nicht zu befürchten, da dem Untergrund nur so viel Wärme entzogen werden kann, wie durch den natürlichen Wärmestrom nachgeliefert wird. Stoffliche Emissionen in den Boden oder das Grundwasser sind wegen der notwendigerweise guten Abdichtung des Untertagebaus der Anlage während des Normalbetriebes nicht zu befürchten (KAYSER, 1999).

Einzig bei der Zufeuerung fossiler Energieträger im Spitzenlastbetrieb kommt es zu gasförmigen Emissionen von Luftschadstoffen (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>), die das Schutzgut Klima bzw. Luft beeinträchtigen.

**Tabelle 20: Betriebsbedingte Wirkfaktoren bei der Nutzung tiefer Erdwärmesonden und die betroffenen Schutzgüter**

Anlagen Prozesse	und	Wirkfaktoren	Schutzgüter						Wirkbereich		
			Grundwasser	Oberflächenwasser	Boden	Pflanzen/ Biotope	Tiere	Klima/ Luft	Landschaft/ Erholung	lokal	regional
Erdwärmesonde		Auskühlung des Untergrundes	x		x					x	
		Thermische Beeinflussung der Bohrungsumgebung	x		x	x	x			x	
Heizungsanlage/		luftgetragene Emissionen						x		x	x

### 7.2.3.4 Betriebsbedingte Wirkfaktoren der HDR-Technologie

Im Verlauf des Normalbetriebes einer HDR-Anlage kann das im Untergrund zirkulierende Wärmeträgermedium partiell Salze und Mineralien lösen (KAYSER & KALTSCHMITT, 1999), welche, in das Grundwasser oder Bodenschichten gelangt, deren Qualität beeinflussen können. Darüber hinaus führt die betriebsbedingte Auskühlung des Untergrundes zu Änderungen im mechanischen Spannungsfeld und

kann grundsätzlich für eine Mikroseismizität ursächlich sein (BAUMGÄRTNER et al. 1992). Diese kann empfindliche Tierarten stören.

Während der Zirkulation im Untergrund ist der Verlust bestimmter Wassermengen durch den Abfluss in periphere Risszonen nicht auszuschließen.

Der übertägige Anlagenteil, das geothermische Heizkraftwerk, emittiert gasförmige Stoffe (Abbildung 11). Die Art der Emissionen, die in geothermischem Dampf enthalten sind, entsprechen wesentlich denen, die auch im Rahmen der hydrothermalen Geothermie auftreten. Hervorzuheben sind an dieser Stelle ebenfalls Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff (RYBACH, 2002), deren Wirkungsproblematik für die Schutzgüter des UVPG in Kapitel 7.2.3.2 besprochen wurden. Daneben ist mit der Existenz unter anderem von Quecksilber, Bor, Methan, Stickstoff, Wasserstoff und Radon zu rechnen (RYBACH, 2002). BARBIER (1997), der bei RYBACH (2002) zitiert wird, gibt Konzentrationen nichtkondensierbarer geothermischer Gase zwischen 2,5 und 47 g pro kg Dampf an.



**Abbildung 11: Dampfausstoß einer HDR-Versuchsanlage in Hijiori (Japan)**  
([www.nedo.go.jp](http://www.nedo.go.jp))

Wird auf der Basis des HDR-Prinzips elektrische Energie erzeugt, ist aufgrund des geringen Wirkungsgrades mit hohen Abwärmemengen zu rechnen. Können diese nicht in der Umgebung durch den Bedarf an Nahwärme aufgefangen werden, führen

sie zu einer Beeinträchtigung des Klimas in der Kraftwerksumgebung (JUNG et al. 2003; BAUMGÄRTNER et al., 1999; RUMMEL & KAPPELMEYER, 1993).

Es kommt zum Verlust von Wasser (zumeist Grundwasser), wenn es als Kühlwasser eingesetzt wird und über die Kühltürme in der Atmosphäre verdunstet. In Abhängigkeit von Wetterlage und Anlagenstandort können aufsteigende Wasserdampfwolken weit sichtbar werden und somit das Landschaftsbild prägen.

Der Betrieb eines HDR-Kraftwerkes ist mit einem moderaten Lärmpegel der Kühltürme verbunden (RYBACH, 2002), der die Landschaft in unmittelbarer Nachbarschaft beeinflusst sowie dort lebende Tiere.

Im Boden verlegte Rohrleitungen zum Transport des Wärmeträgermediums können die Bodenschichten in ihrer unmittelbaren Umgebung thermisch beeinflussen. Das geschieht durch einen Wärmeaustausch zwischen den in den Pipelines zirkulierenden heißen Medium und den umgebenden Bodenschichten (HIELSCHER, pers. Mit., 2003). Die betriebsbedingten Wirkfaktoren der HDR-Anlagen sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

**Tabelle 21: Betriebsbedingte Wirkfaktoren der HDR-Technologie und die betroffenen Schutzgüter**

Anlagen und Prozesse	Wirkfaktoren	Schutzgüter						Wirkbereich		
		Grundwasser	Oberflächenwasser	Boden	Pflanzen/ Biotope	Tiere	Klima/ Luft	Landschaft/ Erholung	lokal	regional
Untertage teil	Auskühlung des Untergrundes	x		x					x	
	Lösung von Salzen und Mineralien	x		x					x	
	geomechanische Beeinflussung der Oberfläche					x			x	
	Wasserverlust	x	x							
	thermische Beeinflussung der Rohrleitungsumgebung			x	x	x				
Übertage teil	luftgetragene Emissionen						x	x	x	x
	Betriebslärm					x		x	x	
	Abwärme						x		x	
	Aufsteigende Wasserdampfwolken							x	x	x

## **7.2.4 Darstellung der durch Störfälle verursachten Wirkfaktoren**

Umweltrelevanten Wirkfaktoren, die als Folge von Störfällen (Tabelle 22) auftreten, lassen sich in zwei Kategorien einordnen. Eine Kategorie enthält jene Wirkfaktoren, die als Folge von Störfällen während der Bohr- und Erschließungsarbeiten auftreten. Die innerhalb dieser Kategorie dokumentierten Wirkfaktoren sind für alle Erdwärmetechnologien gleichermaßen relevant. Die zweite Kategorie bilden die Wirkfaktoren infolge von Störfällen während des Anlagenbetriebs. Sie treten spezifisch in Abhängigkeit von der jeweiligen Erdwärmetechnologie auf.

### **7.2.4.1 Durch Störfälle verursachte Wirkfaktoren während der Bohr- und Erschließungsarbeiten**

Gefährdungsmomente für die Schutzgüter Grundwasser und Boden entstehen als Folge einer unsachgemäß abgeteufelten Bohrung. Unter der Voraussetzung entsprechender geologischer Bedingungen kann es zu einer Verbindung zweier Aquiferstockwerke unterschiedlichen Druckniveaus kommen. Die Folge wäre unter Umständen eine Veränderung der Grundwasserdruckflächen. Der hydraulische Kontakt von zwei Aquiferen ist insbesondere dann problematisch, wenn eine Schicht hochmineralisiertes oder kontaminiertes Wasser führt (LUX & SANNER, 1992; SANNER & KNOBLICH, 1991).

Wird eine Bohrung an der oberen Geländekante unzulänglich abgedichtet, können Stoffe in den Untergrund einfließen, welche die Schutzgüter Grundwasser oder Boden beeinträchtigen können. Der Eintritt von Oberflächenwasser durch das Bohrloch führt ebenso zu einer Beeinträchtigung der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers (KALTSCHMITT, NILL & SCHRÖDER, 2003).

### **7.2.4.2 Durch Störfälle verursachte Wirkfaktoren während des Anlagenbetriebes**

Beim Betrieb von Anlagen zur Nutzung oberflächennaher Erdwärme werden dem Wärmeträgermedium Wasser Frostschutzmittel hinzugefügt. Treten Leckagen in den erdgebundenen Leitungen auf, kommt es zum Eindringen des Frostschutzmittels in Boden und Grundwasser. Die beiden am häufigsten eingesetzten Mittel Ethylenglykol und Propylenglykol (KALTSCHMITT, NILL & SCHRÖDER, 2003) sind der Wassergefährdungsklasse 1 zugeordnet (VWVWS ANHANG II, 1999) und können daher die Grundwasserqualität beeinträchtigen (SANNER & KNOBLICH, 1991).

Neben den Frostschutzmitteln stellen die Wärmepumpenarbeits- bzw. Kältemittel im Störfall das Grundwasser, den Boden, das Klima und Lebewesen beeinflussende Wirkfaktoren dar. In älteren Anlagen werden zur Direktverdampfung noch Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) oder teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffe (HFCKW) verwendet, deren Benutzung jedoch inzwischen verboten ist. Dem Boden oder dem Grundwasser gegenüber verhalten sich diese Arbeitsmittel weitgehend neutral, besitzen jedoch z.T. ein hohes Ozonabbau- und Treibhauspotential (LUX & SANNER, 1992). Für den Menschen stellen sie (z.B. Dichlordifluormethan) beim Einatmen ein Gesundheitsrisiko dar. Da FCKW's und HFCKW's bei Temperaturen über 0 °C gasförmig und schwerer als Luft sind, reichern sie sich bei einer Leckage am Boden und in der oberen Bodenzone an, wo sie sauerstoffverdrängend wirken. Auf diesem Weg können sie für die Fauna dieses Lebensraums gefährlich werden (SANNER & KNOBLICH, 1991). In neueren Anlagen verwendete organische Kohlenwasserstoffe wie Propan oder Propen führen zu zeitlich und räumlich stark begrenzten Boden- und Grundwasserbeeinträchtigungen (INGERLE & BECKER; zit. in: KALTSCHMITT, WIESE & STREICHER, 2003).

Im Verlauf der hydrothermalen Erdwärmenutzung kann es bereits in der Testphase sowie durch Störfälle während des regulären Betriebes der Anlagen zu einem ungewollten Austritt heißer Thermalwässer an die Erdoberfläche kommen (KAYSER & KALTSCHMITT, 1999; ERBAS et al., 1999). Da Thermalwässer in entsprechender Dosierung toxische chemische Bestandteile beinhalten, kann dies zu einer Gefährdung der Vegetation und Tierwelt im betroffenen Bereich führen. Zu nennen sind an dieser Stelle Schwefelwasserstoff, Arsen, Radon, Bor, Quecksilber, Blei, Cadmium, Eisen, Zink, Mangan, Lithium, Ammoniak und Aluminium. Versickern diese Wässer, werden der Boden und flache Grundwasserleiter nachteilig beeinträchtigt. Darüber hinaus sind Thermalwässer wegen ihrer hohen Salinität für die Schutzgüter Grund- und Oberflächenwasser, Boden, Pflanzen und Tiere von Bedeutung (KRISTMANNSDÓTTIR & ARMANNSSON, 2003).

Im Störfall während des Betriebes einer tiefen Erdwärmesonde ermöglichen Leckagen in den Leitungen der Wärmepumpe den Eintritt von Frostschutz- oder Wärmepumpenarbeitsmitteln in Boden und Grundwasser. Damit verbundene Wirkungen unterscheiden sich nicht vom Wärmepumpenbetrieb im Rahmen der oberflächennahen Geothermie.

Im Verlauf des Einsatzes der HDR-Technologie kann es zu Belastungen aller Schutzgüter außer des Klimas infolge unkontrollierten Austretens des mit Salzen und Mineralien angereicherten Wärmeträgermediums kommen (JUNG et al., 2003; BAUMGÄRTNER et al., 1999). Durch ungewollte Druckentlastungen im Kraftwerk oder bei Leckagen kann es zum Austritt gelöster Gase kommen, unter denen Schwefelwasserstoff besonders relevant ist (BAUMGÄRTNER et al., 1992).

Werden die untertägigen Verrohrungen von Anlagen zur Erschließung tiefer Erdwärmevorkommen beschädigt, kann dies einen hydraulischen Kurzschluss zwischen mehreren Aquiferen sowie den Stoffeintrag in den Boden und das Grundwasser verursachen (KALTSCHMITT, NILL & SCHRÖDER 2003).

**Tabelle 22: Wirkfaktoren durch Störfälle**

Anlagen und Prozesse	Wirkfaktoren	Schutzgüter							Wirkbereich	
		Grundwasser	Oberflächenwasser	Boden	Pflanzen/ Biotope	Tiere	Klima/ Luft	Landschaft/ Erholung	lokal	regional
Störfälle bei Bohr- und Erschließungsarbeiten	Verbindung mehrerer Aquiferstockwerke durch die Bohrung	x							x	x
	Einsickern von Schadstoffen oder Oberflächenwasser durch das Bohrloch	x		x					x	x
Störfälle im Anlagenbetrieb	Austritt des Frostschutzmittels	x		x					x	
	Austritt des Arbeitsmittels	x		x		x	x	x	x	
	Austritt heißer Thermalwässer an die Erdoberfläche	x	x	x	x	x		x	x	
	Austritt des Wärmeträgermediums (Wasser o. Heißdampf) an die Erdoberfläche	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Freisetzung gelöster Gase (z.B. H <sub>2</sub> S)					x	x	x	x	
	Hydraulischer Kurzschluss zwischen zwei Aquiferen	x							x	x
	Stoffeintrag in den Untergrund	x		x					x	x

## 8 Diskussion

Nach derzeitiger Rechtslage besteht für Verfahren und Anlagen zur Erschließung und Nutzung der Erdwärme als Energieträger nur unter vergleichsweise eingeschränkten Voraussetzungen die Pflicht zu Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung. Die Rechtsgrundlage für eine UVP-Pflicht ergibt sich gemäß § 57 c Bundesberggesetz i.V.m. § 1 Nr. 8 UVP-Bergbau und beschränkt sich auf Tiefbohrungen zur Gewinnung von Erdwärme mit einer Teufe ab 1000 m, die in ausgewiesenen Naturschutzgebieten oder gemäß den Richtlinien 79/409/EWG oder 92/43/EWG ausgewiesenen besonderen Schutzgebieten geplant sind.

Nur ein kleiner Teil aller Erdwärmeanlagen ist somit durch die Pflicht zur Durchführung einer UVP erfasst. Der weitaus größere Teil der Anlagen, speziell derer für die Nutzung der oberflächennahen Erdwärmevorkommen, sind nicht UVP-pflichtig.

Die mit der Erschließung und Nutzung geothermischer Energie verbundenen Beeinträchtigungen der Schutzgüter und die daraus abzuleitende Bewertung von umwelt- und naturschutzfachlichen Belangen finden dennoch Eingang in die Genehmigungsverfahren, z.B. im Rahmen der Naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung (§§ 18 ff. BNatschG) oder der FFH-Verträglichkeitsprüfung (§ 34 BNatschG). Abgesehen davon wird ihnen dadurch Rechnung getragen, dass z.B. die Antragsunterlagen für eine wasserrechtliche Genehmigung von Erdwärmavorhaben einen Katalog von Informationen enthalten müssen, auf deren Basis eine zuverlässige Abschätzung der Umwelt- und Naturschutzbelange des Vorhabens erfolgen kann.

Die Grundlage der in dieser Arbeit getroffenen Einschätzung, welche Schwerpunkte sich bei Erdwärmavorhaben aus Natur- und Umweltschutzsicht ergeben, bildet die Analyse und Bewertung der mit den jeweiligen Vorhaben gekoppelten Wirkfaktoren und Wirkungen. Die Wirkfaktoren und Wirkungen auf die Schutzgüter werden standortunabhängig und qualitativ abgeleitet. Hinweise auf die mögliche Erheblichkeit von Wirkungen lassen sich aus diesem Grund nur pauschal geben und werden von der Intensität der Wirkfaktoren abgeleitet. Die Frage der Erheblichkeit möglicher Wirkungen wird am Ende der Diskussion erneut aufgegriffen.

Im Zuge der Erschließung und Nutzung von Erdwärmevorkommen können Wirkfaktoren und Wirkungen ausgemacht werden, die bei den verschiedenen Technologien gleichermaßen relevant sind. Dies trifft vornehmlich für die während der Bau-

phase auftretenden Wirkfaktoren wie Baulärm zu. Darüber hinaus sind die jeweiligen Anlagentypen mit spezifischen Wirkfaktoren verbunden, die sich sowohl in ihrer Qualität als auch in dem Umfang der damit zusammenhängenden Beeinträchtigungen unterscheiden.

Nacheinander werden die verschiedenen Technologien oberflächennahe Erdwärmennutzung mit geschlossenen und offenen Systemen, tiefe Erdwärmesonden, hydrothermale Erdwärmennutzung und HDR behandelt.

Die Untersuchung von **Erdwärmesonden und -kollektoren zum Zweck der Nutzung oberflächennaher Erdwärmevorkommen** (geschlossene Systeme) lässt den Schluss zu, dass die während der Bauphase auftretenden Beeinträchtigungen insbesondere durch Bohrungen oder Bodenaushub aus Natur- und Umweltschutzsicht am bedeutendsten sind. Baubedingt sind die Schutzgüter Boden und Grundwasser von den meisten Auswirkungen betroffen. Zu einer Beeinträchtigung der Bodenfunktionen kann es durch Bodenabtrag, durch Verdichtung als Folge des Verkehrs von Baufahrzeugen oder durch den Eintrag von Schadstoffen während der Bohrarbeiten kommen. Das Grundwasser unterliegt ebenfalls dem Eintrag von Schadstoffen. Diesen potenziellen Beeinträchtigungen wird seitens der Behörden in Form einer Anzeigepflicht (§ 35 i.V.m. z.B. § 56 BbgWG) Rechnung getragen. Diese gilt auch für die Errichtung von geschlossenen Systemen, deren Betrieb selbst unter Umständen keiner Genehmigung bedarf. Eine Anzeigepflicht besteht beispielsweise im Landkreis Potsdam-Mittelmark selbst für Kollektoren, die in 1 bis 2 m Tiefe verlegt werden und gewährleistet somit eine optimale Überwachung seitens der Behörde (BURKHARDT, 2003). Trinkwassergebiete stellen Ausschlussgebiete für einer Erdwärmennutzung dar, da in diesen Zonen Bohrungen auf Grund der damit verbundenen potenziellen Beeinträchtigungen des Grundwassers verboten sind.

Durch großflächigen Bodenabtrag bzw. –aushub, der bei großen Erdwärmesondenfeldern maßgeblich ist, kommt es zu einem Verlust der Vegetation und der Veränderung der Biotopstruktur.

Lärm und Erschütterungen treten als relevante Wirkfaktoren während des Baubetriebes auf. Sie entsprechen hinsichtlich Art und Intensität denen vergleichbarer Bauvorhaben, z.B. der Erschließung von Erdöl- oder Erdgaslagerstätten (FREYBERG, 2003). Baulärm wird gesetzlich in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm–Geräuschimmissionen (AVV Baulärm) geregelt. Bei der Genehmi-

gung Lärm emittierender Vorhaben werden vorwiegend die Belange der menschlichen Gesundheit berücksichtigt (RECK, HERDEN, RASSMUS & WALTER, 2001).

Darüber hinaus kann Lärm das Landschaftserleben mindern. In diesem Zusammenhang sind z.B. die Intensität des Lärms, seine Dauer, der Zeitpunkt der Einwirkung (tags oder nachts) oder die Zusammensetzung der Lärmkulisse aus verschiedenartigen Geräuschen von Bedeutung (ZSCHALICH & JESSEL, 2001).

Für die Dauer der Arbeiten können besonders Tiere beeinträchtigt werden, da Lärm deren Kommunikation unterbinden, den zugänglichen Lebensraum einschränken, Fluchtreaktionen auslösen oder als Stressfaktor wirken kann (HERMANN, 2001).

Die Wirkungen von Lärm auf wildlebende Tiere ist bislang jedoch noch nicht hinreichend erforscht und findet kaum Berücksichtigung bei Genehmigungsverfahren. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Während des bestimmungsgemäßen Betriebes oberflächennaher geschlossener Systeme kommt als potenzieller Wirkfaktor lediglich die thermische Beeinflussung des Bodens und des Grundwassers durch den Wärmeentzug der Anlage in Betracht. Das Ausmaß des Wärmeentzuges und die damit gekoppelten Wirkungen auf den Boden und das Grundwasser sind bei Anlagen geringerer Leistungsklassen (zwischen 8 und 13 kW) unerheblich (BURKHARDT; H. JUNG, 2003). Im Bundesland Brandenburg werden die physikalischen Beschaffenheitsveränderungen des Bodens und des Grundwassers beispielsweise erst ab einer Anlagenleistung von 20 kW als so relevant eingeschätzt, dass eine wasserrechtliche Genehmigung notwendig wird.

Die Frage, ab welchem Wärmeentzug von einer erheblichen Beeinträchtigung der Schutzgüter Boden und Wasser zu sprechen ist und ob dadurch die Flora oder Fauna beeinflusst werden, kann zu dem aktuellen Zeitpunkt der Forschung nicht beantwortet werden. Es ist unklar, ob eine Beeinträchtigung des Bodens als Schutzgut durch einen Wärmeentzug im Rahmen der Geothermie überhaupt vorliegt. Grund für mögliche Zweifel sind in der gängigen Definition des Bodenbegriffs begründet. Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998) wird Boden wie folgt definiert: „Ein Boden ist ein Naturkörper, bei dem ein Gestein an der Erdoberfläche unter einem bestimmten Klima, einer bestimmten streuliefernden Vegetation und Population von Bodenorganismen durch bodenbildende Prozesse (Verwitterung und Mineralbildung, Zersetzung und Humifizierung, Gefügebildung und verschiedene Stoffumlagerungen) umgeformt wird“. Demnach reicht der Bodenbegriff nur so weit, wie Böden belebt

sind. Als Konsequenz wäre die Feststellung möglich, dass eine thermische Bodenbeeinflussungen durch die Erdwärmenutzung allgemein nur soweit vorliegt, wie die definitorischen Bodenmerkmale erfüllt sind. In diesem Punkt besteht noch weiterer Forschungsbedarf und Definitionsbedarf.

Die Reichweite der Temperaturabsenkung ist nach bisherigen Erkenntnissen bei erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen räumlich stark begrenzt (SANNER & KNOBLICH, 1991; LUX & SANNER, 1992). In einer Distanz von 400-600 m rund um das Sondenfeld des Max-Planck-Campus in Golm sind keine Abweichungen mehr vom normalen Bodentemperaturprofil zu erkennen. Eine Normalisierung der Temperaturen erfolgt in den Sommermonaten (JUNG, pers. Mit., 2003). Dennoch ist der Verlauf der räumlichen Ausbreitung thermischer Beeinflussungen weitergehend zu untersuchen, um Aussagen über die mögliche Beeinträchtigung von Flächen in unmittelbarer Nachbarschaft der betriebenen Anlagen treffen zu können. Besonderes Interesse besteht, wenn es sich dabei um naturschutzrechtlich schützenswerte Flächen oder Biotope handelt. Diese Frage ist bezüglich der Ausweisung von Mindestabständen geothermischer Anlagen zu anderen Flächen in der Genehmigungspraxis besonders relevant.

Denkbar wäre die Untersuchung bereits bestehender Anlagen durch die Installation von Temperaturmesssonden in deren Umfeld, um die Reichweite des Wärmeentzuges zu bestimmen.

Während der Bauphase **offener Systeme der oberflächennahen Erdwärmenutzung (Grundwasserbrunnen)** sind die Brunnenbohrungen aus umwelt- und naturschutzfachlicher Sicht von besonderem Interesse. Über die Art, das Ausmaß und die Bedeutung der daraus resultierenden Wirkfaktoren und Wirkungen sind dieselben Aussagen zu treffen, wie für die Bohrungen zum Niederbringen der Erdwärmesonden. Großflächiger Bodenabtrag ist dagegen nicht nötig.

Im Betriebsverlauf der offenen Systeme stehen die Auswirkungen auf das Grundwasser im Mittelpunkt der Betrachtungen und sind aus Umwelt- und Naturschutzsicht sowie im Bezug auf eine Anlagengenehmigung besonders relevant. Daher ist eine genaue Kenntnis der hydrogeologischen Situation notwendig. Die Entnahme und das Wiedereinleiten verursachen eine Störung im Grundwasserhaushalt, mögliche Ausfällungen als Folge von Oxidationsprozessen verändern die chemische Zusammensetzung des Grundwassers. Eisenoxidausfällungen, die mit dem wiedereingeleiteten

Grundwasser in den Grundwasserleiter gelangen, können dessen Poren zusetzen und somit zu einer Schädigung des Aquifers führen (BURKHARDT, pers. Mit., 2003). Die Grundwasserdurchflussmenge wird dadurch vermindert. All jene Beeinträchtigungen werden durch die Notwendigkeit einer wasserrechtlichen Genehmigung berücksichtigt. Diese ist unter Umständen in Abhängigkeit von der hydrogeologischen Situation mit Auflagen verbunden, welche eine bestimmte Obergrenze der Entnahmemenge vorschreiben (BURKHARDT, pers. Mit., 2003).

Die umweltrelevanten Wirkfaktoren und Wirkungen, die während der Bauphase **tiefer Erdwärmesonden** auftreten, sind wesentlich umfangreicher, als bei der oberflächennahen Erdwärmenutzung. Die Unterschiede ergeben sich als eine Konsequenz der größeren Bohrtiefen. Bohrungen für die Erschließung aller tiefen Erdwärmevorkommen sind mit Auswirkungen auf alle Schutzgüter mit Ausnahme der Luft verbunden.

Der Boden und das Grundwasser stehen bei der Beurteilung der baubedingten Beeinträchtigungen im Vordergrund, da sie den meisten Einwirkungen ausgesetzt sind. Durch die Einrichtung des Bohrplatzes, den Bohrbetrieb selbst sowie den Fahrzeugverkehr werden die Schutzgüter Boden und Grundwasser in besonderem Maße betroffen. Bodenverdichtungen und Versiegelungen führen zu Beeinträchtigungen und dem kompletten Verlust der natürlichen Bodenfunktionen. Der Eintrag von Kraftstoff, Öl oder Schmiermittel sowie Bohrkühlmitteln und Bohrradditiven in den Boden und das Grundwasser sind besonders beachtenswert aus Sicht des Umwelt- und Naturschutzes (WOLFF, 1999). Für Tiefbohrungen ist eine berg- und wasserrechtliche Genehmigung nötig. So haben die zuständigen Behörden die Möglichkeit, die Umwelt- und Naturschutzrelevanz der Arbeiten zu bewerten und die Bohrungen zu beaufsichtigen. Im Rahmen von Genehmigungsverfahren wird aus Gründen des Grundwasserschutzes besonderes Augenmerk auf das ordnungsgemäße Abteufen der Bohrungen gelegt (BURKHARDT, 2003). Dies trifft sowohl für die tiefe als auch für die untiefe Erdwärmegewinnung zu.

Die Beeinträchtigungen der Tierwelt und der Landschaft durch Baulärm wurden bereits auf Seite 74 diskutiert. Der Lärmpegel einer Baustelle zur Erschließung tiefer Erdwärmevorkommen ist dem der oberflächennahen Erdwärmeerschließung in seiner Bedeutung gleichzustellen .

Eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes ist für die Dauer der Erschließungs-

arbeiten durch die obertägige Bohrtechnik, insbesondere den Bohrturm gegeben (WOLFF, 1999). Diese Beeinträchtigungen der Natürlichkeit des Landschaftsbildes sind insgesamt betrachtet von geringer Bedeutung, weil ihr Wirken zeitlich eng befristet ist und sie nach Beendigung der Arbeiten durch den Rückbau der Bohranlagen vollständig aufgehoben werden.

Anlagebedingt gehen tiefe Erdwärmesonden mit Beeinträchtigungen einher, deren Ursprung in den Wirkungen der Betriebsgebäude auf das Schutzgut Boden zu sehen ist. An erster Stelle sind hier die Auswirkungen zu nennen, die sich in Folge von Bodenversiegelungen ergeben und in jedem Fall einen Eingriffstatbestand darstellen.

In der Betriebsphase tiefer Erdwärmesonden steht ebenfalls der unterirdische Wärmeentzug und somit die Schutzgüter Boden und Grundwasser im Mittelpunkt der Betrachtungen. Dabei ergeben sich höhere Wärmeentzugsleistungen, als bei der oberflächennahen Geothermie.

Gerade im Hinblick auf die Nutzung tiefer Erdwärmesonden besteht Forschungsbedarf hinsichtlich ihrer Wirkungen auf die physikalischen Eigenschaften des Bodens und des Grundwassers und deren räumlicher Ausbreitung während des Anlagenbetriebes. Allerdings stellen tiefe Sonden derzeit lediglich eine unbedeutende Anlagenform zur Nutzung tiefer Erdwärmevorkommen dar, für die in Deutschland kaum Nachfrage besteht.

**Hydrothermale Heiz- oder Kraftwerke** sind bau-, anlagen- und betriebsbedingt mit umfangreicheren Beeinträchtigungen der Schutzgüter verbunden, als die zuvor beschriebenen Formen der Erdwärmennutzung. Das Ausmaß der betriebsbedingten Wirkungen ist weitreichender.

Hydrothermale Tiefenwässer werden ebenfalls durch eine Tiefbohrung erschlossen. Diesbezüglich sind die Aussagen über die Erschließung tiefer Erdwärmevorkommen zutreffend, die im Zusammenhang mit den tiefen Erdwärmesonden auf S. 77 diskutiert wurden.

Die anlagenbedingten Wirkfaktoren hängen von der technischen Ausstattung und den dafür nötigen Gebäuden ab. Am stärksten wird das Schutzgut Boden beeinträchtigt. Der wesentliche Wirkfaktor ist in der Versiegelung zu sehen, die zum Verlust sämtlicher Bodenfunktionen führt. Weniger bedeutsam als der Boden wird das Grundwasser durch die Versiegelungen beeinträchtigt. Relevanter Wirkfaktor ist die

Unterbrechung der Niederschlagsinfiltration, die die Grundwasserneubildung hemmt. Aus Sicht des Naturschutzes ist die Zerschneidung von Lebensräumen speziell von Insekten durch Zufahrts- und Fußwege, aber auch durch möglicherweise oberirdisch verlegte Rohrleitungen von Bedeutung.



**Abbildung 12: Hydrothermales Kraftwerk Neustadt-Glewe, Hauptgebäude (eigene Aufnahme)**

Durch Erdwärmeanlagen herbeigeführte visuelle Beeinträchtigungen wirken sich auf das Landschaftsbild aus (Abbildung 12). Die hydrothermale Erdwärmenutzung ist insgesamt in einer kompakten Bauweise möglich und von vergleichsweise geringem Flächenbedarf (Abbildung 13) gekennzeichnet, da die eigentliche Energiegewinnung unterirdisch erfolgt. Der Standort kann flexibel gewählt werden. Es sollte im Rahmen von Planungen und Genehmigungen angestrebt werden, auf die Nutzung ohnehin anthropogen überformter Flächen z.B. in Gewerbegebieten zurückzugreifen.

Während des Betriebes von Hydrothermalanlagen ist vornehmlich das Grundwasser beeinträchtigt. Als Wirkfaktoren sind in diesem Zusammenhang die Entnahme und das Reinjezieren des Thermalwassers zu nennen, die eine Veränderung der Grundwasserbilanz und der Grundwasserströmungsrichtung verursachen können.

Die allmähliche Auskühlung der Deckschichten in der Umgebung des genutzten Aquifers stellt eine Wirkung der hydrothermalen Erdwärmenutzung dar. Daraus lassen sich Wechselwirkungen ableiten, die jedoch ausschließlich das genutzte thermale Grundwasser betreffen. Hinsichtlich der Wechselwirkung mit anderen Schutzgütern liegen bisher keine Erkenntnisse vor, da Hydrothermalanlagen in geschlos-

senen Kreisläufen betrieben werden (HIELSCHER, pers. Mit., 2003). Die Auskühlung der Deckschichten wurden bisher unter technologischen und ökonomischen Gesichtspunkten diskutiert, die sich auf die Nutzungsdauer des Aquifers beziehen.

Die Entnahme von Grundwasser und dessen anschließende Verwendung als Kühlwasser führt zu einem stetigen Grundwasserverlust durch Verdampfen in der Atmosphäre. Im Erdwärmekraftwerk Neustadt-Glewe beträgt die Menge des verdampften Kühlwassers während des Betriebes der ORC-Anlage rund  $4 \text{ m}^3$  pro Stunde (HIELSCHER, pers. Mit., 2003). Eine ununterbrochene jährlichen Betriebsdauer von fünf Monaten angenommenen, würden ca.  $13.400 \text{ m}^3$  Grundwasser als Kühlwasser in der Atmosphäre verdampfen.

Die Veränderung der chemischen Zusammensetzung, also der Qualität des Grundwassers durch die Ausfällung von Metalloxiden nach der Oxidation mit Luftsauerstoff oder durch die Lösung von Salzen oder Mineralien stellt eher ein technisches Problem dar (HIELSCHER, pers. Mit., 2003). Die Veränderung selbst ist durchaus eine Wirkung, die zu betrachten ist. Dass im Normalbetrieb Wechselwirkungen des Thermalwassers mit anderen Schutzgütern auftreten, kann ausgeschlossen werden, da die Anlagen in einem hermetisch abgeschlossenen Kreislauf funktionieren müssen.

Den Beeinträchtigungen, denen das Grundwasser bei der hydrothermalen Erdwärmenutzung potenziell ausgesetzt ist, wird seitens der Behörde in Form der verschiedenen Genehmigungsverfahren Rechnung getragen. Nicht zuletzt der bergrechtliche Betriebsplan, der einer Beurteilung des Anlagenbetriebes dient und auch regelmäßig die Beprobung des Thermalwassers verlangt, ermöglicht der Behörde die Aufsicht über die Umweltverträglichkeit der Anlagen.

Mikroseismizität, die durch das im tiefen Untergrund zirkulierende Thermalwasser hervorgerufen werden kann, ist in Deutschland unbedeutend (LEGARTH, pers. Mit., 2003).

Die Kühltürme (Abbildung 13) zeichnen sich für Betriebslärm als wesentlichen Wirkfaktor verantwortlich. Die Anlagen selbst funktionieren ohne äußerlich wahr-

nehmbare Geräuschemissionen<sup>1</sup>. Das Maß der Beeinträchtigung der Landschaft durch diesen Betriebslärm wird in der TA Lärm geregelt.



**Abbildung 13: ORC-Anlage und Kühltürme des hydrothermalen Kraftwerkes in Neustadt-Glewe (eigene Aufnahme)**

In geringem Maße wird die Umgebung der Kühltürme während des Betriebes der ORC-Anlage durch Abwärme beeinträchtigt (RYBACH, 2002; JUNG et al., 2003). Damit verknüpfte Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes durch aufsteigende Wasserdampfwolken sind unter bestimmten meteorologischen Bedingungen in den kalten Jahreszeiten relevant, da sie an die umgebende Lufttemperatur gebunden sind. Nur bei entsprechend tiefen Lufttemperaturen kommt es zur Kondensation von Wasserdampf. Ihre Bewertung hängt wesentlich von dem Standort der Anlage sowie von dem ästhetischen Empfinden des Betrachters ab.

Während des Grundlastbetriebes werden von Hydrothermalanlagen keine klimarelevanten Gase oder sonstige gasförmige Stoffe emittiert. Einzig im Spitzenlastbetrieb, wenn fossile Brennstoffe zugeführt werden müssen, werden Luftschadstoffe wie Kohlendioxid, Schwefeldioxid oder Stickstoffdioxid emittiert (HIELSCHER, pers. Mit., 2003). Der Grad der Beeinträchtigung des Schutzgutes Klima/Luft durch die von einer Hydrothermalanlage emittierten Luftschadstoffe kann nur im Einzelfall unter Betrachtung der jeweiligen Anlagenform erfolgen.

Die umfassende Bewertung sämtlicher umwelt- und naturschutzfachlicher Wirkfaktoren und Wirkungen, die mit der Erschließung und Nutzung der Erdwärme mittels **HDR-Anlagen** verbunden sind, ist zu diesem Zeitpunkt nicht zu leisten. Diese An-

---

<sup>1</sup> Eigene Erfahrung durch die Besichtigung der Anlage in Neustadt-Glewe.

lagentechnologie befindet sich derzeit in Deutschland noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium.

Mit den Erfahrungen aus den Forschungsprojekten des GfZ in Groß-Schönebeck oder des europäischen HDR-Forschungsprojektes im elsässischen Soultz-sous-Fôrets können zumindest für die Arbeitsschritte während der Bau- bzw. Erschließungsphase gesicherte Aussagen getroffen werden. Für die Tiefbohrungen zur Erschließung der unterirdischen Wärmetauscherflächen sind im Hinblick auf ihre umwelt- und naturschutzspezifischen Wirkfaktoren und Wirkungen dieselben Aussagen zu treffen sind, wie für alle Tiefbohrungen (s. S. 77).

Weitere besonders beachtenswerte Wirkfaktoren und Wirkungen ergeben sich im Zuge des Hydraulic Fracturing zur Schaffung des unterirdischen Zirkulationssystems. In diesem Zusammenhang ist zunächst den Beeinträchtigungen des Schutzgutes Wasser große Bedeutung beizumessen. Die Entnahme großer Mengen von Oberflächenwasser und deren anschließendes Verpressen in den Untergrund stellt einen markanten Eingriff in den natürlichen Wasserhaushalt dar (RYBACH, 2003) und bedarf in jedem Fall einer wasserrechtlichen Genehmigung.

Die Bewertung der in Folge der Generierung eines unterirdischen HDR-Zirkulationssystems auftretenden seismischen Aktivität richtet sich zum momentanen Zeitpunkt nach den Ergebnissen der verschiedenen Forschungsvorhaben. Mikroseismische Aktivitäten, die während der Stimulation des unterirdischen Zirkulationssystems auftreten, übertreffen die prognostizierte betriebsbedingte Mikroseismizität deutlich (LEGARTH, pers. Mit, 2004). Auch in diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass seismische Erschütterungen auf Tiere wirken. Nicht bekannt ist, ob die durch das Hydraulic Fracturing und den Betrieb einer HDR-Anlage induzierte Mikroseismizität innerhalb der Reizschwelle von Tieren liegt, so dass eine Beeinträchtigung der Tierwelt gegeben ist. Auf Grund ihres Ausmaßes ist die durch die Erschließung und Nutzung von Geothermie induzierte Seismizität in Deutschland nach aktuellem Wissensstand im Bezug auf den Erholungswert einer Landschaft und das Wohlbefinden des Menschen von untergeordneter Bedeutung (LEGARTH, 2004).

Die während der Erschließungsphase durchgeführten Produktionstests sind regelmäßig mit einem oberirdischen Dampfablass verbunden. Der dadurch verursachte Lärm kann bis zu 120 dB erreichen (KRISTMANNSDÓTTIR & ÁRMANNSSON, 2003) und führt in besonderem Maße zu einer Beeinträchtigung der Tierwelt. Dabei

sind einmalige akustische Ereignisse im Bezug auf ihre Bedeutung und die damit verbundenen Auswirkungen insbesondere auf die wildlebende Säugetierwelt unter Umständen strenger zu bewerten als ein dauerhafter Lärmpegel, an den sich die Tiere gewöhnen können. Einmalige plötzliche Laute haben für Säugetiere eine große Bedeutung als Auslöser von Schreck- und Fluchtreaktionen (HERRMANN, 2001).

Momentan können keine fundierten Aussagen im Bezug auf die tatsächlichen Auswirkungen und deren Umfang, die sich aus der Gestalt einer HDR-Anlage ableiten lassen, gemacht werden. Hierfür fehlen die praktischen Erfahrungen, denn in Deutschland existiert noch keine baufertige HDR-Anlage. Aufgrund der Ähnlichkeit dieses Anlagentyps mit Hydrothermalkraftwerken ist abzuleiten, dass die anlagenbedingten Wirkfaktoren und deren Wirkungen auf die Schutzgüter denen eines Hydrothermalkraftwerkes entsprechen. Diese wurden ab Seite 78 diskutiert.



**Abbildung 14: Produktionsbohrung GPK II des HDR-Forschungsprojektes in Soultz-sous-Fôrets. (<http://www.geothermie.de>)**

Die Gestalt und das Ausmaß der anlagebedingten Beeinträchtigungen, wie sie sich derzeit auf dem Gelände des Forschungsprojektes in Soultz-sous-Fôrets zum Beispiel durch die weitreichenden Bodenversiegelung ergeben (Abbildung 14), dürften die tatsächlichen Beeinträchtigungen einer fertiggestellten HDR-Anlage weit übertreffen.

Im ordnungsgemäßen Betriebsverlauf eines HDR-Kraftwerkes sind die Einwirkungen auf das Schutzgut Wasser vorrangig von Bedeutung. Durch die Wasserzirkulation im Untergrund können Salze und Mineralien gelöst werden, die die Qualität des Was-

sers verändern (KAYSER & KALTSCHMITT, 1999). Ebenso wie bei der hydrothermalen Geothermie entstehen jedoch keine Wechselwirkungen mit anderen Schutzgütern, da das HDR-Prinzip auch auf einem komplett geschlossenen Betriebskreislauf basiert. Die Auswirkungen bleiben auf das zirkulierende Wasser beschränkt. Problematisch ist die nicht hinreichend geklärte Frage des Wasserverlustes in periphere Risszonen. In diesem Punkt kann keine Bewertung vorgenommen werden. Es besteht weiter Forschungsbedarf.

Die Wirkungen von Mikroseismizität, die durch die unterirdische Wasserzirkulation betriebsbedingt induziert wird, werden als unerheblich eingestuft (LEGARTH, pers. Mit., 2004).

Ebenso wie bei dem Betrieb von Hydrothermalkraftwerken kommt es bei den HDR-Kraftwerken betriebsbedingt zu akustischen Emissionen und der Emission von Abwärme und verdampfendem Kühlwasser über die Kühltürme (JUNG et al. 2003; RYBACH, 2002). Daraus resultierende Wirkungen werden denen der hydrothermalen Erdwärmenutzung entsprechend betrachtet und auf Seite 80 beginnend diskutiert.

Die Wirkfaktoren von Störfällen und deren Auswirkungen können alle Schutzgüter betreffen. Sie nehmen im Ergebnis der Analyse eine besondere Stellung ein, da ihr Auftreten einen ungewollten Ausnahmefall darstellt. Das Vorkommen von Störfällen ist nicht in jedem Fall auszuschließen, das Ausmaß ihrer Wirkungen ist nicht pauschal zu prognostizieren. Im Rahmen der Erdwärmenutzung sind das Grundwasser und der Boden potenziell am stärksten gefährdet, die durch verschiedene stoffliche Emissionen als Folge des Austritts der Wärmeträgermedien oder der Arbeitsmittel von Wärmepumpen (SANNER & KNOBLICH, 1991) sowie im Falle des Grundwassers durch hydraulische Verbindungen mehrerer Aquiferstockwerke (LUX & SANNER, 1992; SANNER & KNOBLICH, 1991) beeinträchtigt werden können.

An der Erdoberfläche können ebenfalls stoffliche und gasförmige Emissionen zum Beispiel nach dem Austritt von heißem Thermalwasser oder -dampf die Schutzgüter gefährden (KAYSER & KALTSCHMITT, 1999; ERBAS et al., 1999). In der Frage der Beurteilung von Störfällen erlangt die behördliche Auflage, die gängigen Sicherheitsstandards nachzuweisen, größte Bedeutung. Relevanter als die Bewertung potenzieller Auswirkungen von Störfällen selbst dürfte im Hinblick auf eine Anlagene genehmigung ein Nachweis der Beachtung aller einschlägigen Sicherheits- und

Arbeitsvorschriften sowie der anerkannten Regeln der Technik sein. Diese zielen im Ergebnis auch auf die Vermeidung von Störfällen ab.

Aus naturschutzrechtlicher Sicht stellt sich die Frage, ob die Erschließung von Erdwärmevorkommen und der Betrieb geothermischer Anlagen unter Umständen einen Eingriff in die Natur und die Landschaft darstellen. Von besonderem Interesse hinsichtlich der Rechtsfolgenregelung ist in diesem Zusammenhang die Frage, ob die einzelnen Erdwärmetechnologien erhebliche Beeinträchtigungen der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes oder des Landschaftsbildes verursachen. Die Erheblichkeit einer Beeinträchtigung ergibt sich aus deren räumlichem Umfang und insbesondere deren Intensität (KÖPPEL, FEICKERT, SPANDAU, STRASSER, 1998). Erheblich sind Eingriffe, wenn sie eine Beeinträchtigung verursachen, die das kurz- bis mittelfristige Regenerationsvermögen der Natur überfordert, so dass sich in der Folge andersartige Funktionen und Werte des Naturhaushaltes oder ein im betroffenen Raum verändertes Landschaftsbild entwickeln (ARGE EINGRIFFS-REGELUNG, 1995; zitiert in: KÖPPEL et al., 1998).

Im Ergebnis der Analyse der Wirkfaktoren und Wirkungen, die Hauptbestandteil dieser Arbeit ist, zeigt sich, dass bestimmte Wirkungen in den Positivlisten der Landesnaturschutzgesetze, z.B. dem brandenburgischen Naturschutzgesetz, aufgeführt sind. Darüber hinaus fehlen jedoch standardisierte und eindeutige Bewertungsmaßstäbe, um die Erheblichkeit eines Eingriffs festlegen zu können. Es bleibt somit für eine Vielzahl von Anlagen besonders auf dem Gebiet der oberflächennahen Geothermie schwierig, eine Erheblichkeitsschwelle für die von ihnen verursachten Beeinträchtigungen auszuweisen.

Dies ist in besonderem Maße für geschlossene Systeme zutreffend, die während des normalen Anlagenbetriebes ausschließlich eine thermische Beeinflussung des Bodens und des Grundwassers bewirken. Es existieren derzeit keine Untersuchungen, ob überhaupt und wenn ja ab welchem Wärmeentzug aus dem Untergrund von einer erheblichen Beeinträchtigung zu sprechen ist. An dieser Stelle kann zumindest auf die Funktionserfüllung der Schutzgüter Boden und Grundwasser abgestellt werden. So lange die Erfüllung allgemeiner Boden – und Grundwasserfunktionen trotz des Betriebes einer erdgekoppelten Wärmepumpe gewährleistet ist, liegen keine erheblichen Beeinträchtigungen vor. Ob während der Bauphase in Folge der Verlegung der Wärmekollektoren/-sonden in den Boden erhebliche Beeinträchtigungen auf-

treten, hängt ebenso von der Beibehaltung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit der betroffenen Schutzgüter ab.

Die Erdwärme als regenerativer Energieträger bietet enorme Energiepotenziale (PASCHEN et al., 2003; KAYSER & KALTSCHMITT, 1998; LUX & KALTSCHMITT, 1997; JUNG et al., 2003). Vor diesem Hintergrund ist zukünftig ist mit einer dynamischen Entwicklung des Einsatzes von Erdwärmeeinrichtungen für eine zentrale als auch für eine dezentrale Wärme- und Stromversorgung zu rechnen. Daher gewinnt die Betrachtung und Bewertung der umwelt- und naturschutzfachlichen Auswirkungen der Erdwärmegewinnung und -nutzung zunehmend an Bedeutung. Dieser Aspekt muss bereits frühzeitig in die Forschung und Entwicklung der Anlagen einbezogen werden, um im Zuge von Genehmigungsverfahren eindeutige Aussagen im Hinblick auf mögliche Gefährdungspotenziale der Erdwärme als Energieträger treffen und diese in die Planung einbeziehen zu können.

## 9 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkungen der geothermischen Energieerzeugung aus umwelt- und naturschutzfachlicher Sicht zu untersuchen und zu bewerten. Auf der Grundlage einer umfassenden Literaturstudie, von Expertenbefragungen sowie der Besichtigung des Hydrothermalen Erdwärmekraftwerkes in Neustadt-Glewe und der Erdwärmesondenanlage auf dem Max-Planck-Campus in Golm wurden die für eine behördliche Genehmigung der Erschließung und Nutzung von Erdwärmevorkommen notwendigen gesetzlichen Regelungen systematisch aufgearbeitet und die mit den Techniken zur Erschließung bzw. den Anlagen zur Nutzung von Erdwärme verbundenen umweltrelevanten Wirkfaktoren ausgewiesen und systematisch dargestellt.

Darauf aufbauend wurden die potenziellen Wirkungen auf die Schutzgüter des UVPG qualitativ erfasst und, soweit es in Anbetracht des derzeitigen Standes der Forschung möglich war, quantifiziert. Die Wirkungen wurden schließlich hinsichtlich ihrer Bedeutung und Erheblichkeit im Rahmen von behördlichen Genehmigungsentscheidungen bewertet und miteinander verglichen. Die Anforderungen an den Inhalt von Antragsunterlagen wurden dargestellt.

Die Genehmigung von Erdwärmeprojekten erfolgt nach Bergrecht und Wasserrecht, bestimmte geschlossene Anlagen der oberflächennahen Erdwärmennutzung sind genehmigungsfrei.

Nach der derzeitigen Rechtslage ist die Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung auf Tiefbohrungen zur Gewinnung von Erdwärme mit einer Tiefe ab 1000 m, die in ausgewiesenen Naturschutzgebieten, FFH-Gebieten oder Vogelschutzgebieten geplant sind, beschränkt.

Die Bewertung der Schutzgutbeeinträchtigungen, die mit der Erschließung und Nutzung der Erdwärme verbunden sind, findet abgesehen davon z.B. im Rahmen der Naturschutzrechtlichen Eingriffregelung (§§ 18 ff. BNatschG, Landesnaturschutzgesetze) oder der FFH-Verträglichkeitsprüfung (§ 34 BNatschG, Landesnaturschutzgesetze) Eingang in die entsprechenden Genehmigungsverfahren. Die Anforderungen an den Inhalt von Antragsunterlagen geben den Behörden eine Beurteilungshilfe.

Im Zuge der Nutzung von Erdwärme als Energieträger kommt es im Verlauf der Erschließungs- und Bauphase zu entscheidungserheblichen Beeinträchtigungen der Schutzgüter Boden und Grundwasser durch Versiegelungen, Bodenabtrag oder Stoffeinträge. Baulärm stellt am Ort des Vorhabens einen relevanten Wirkfaktor dar. Die visuellen Beeinträchtigungen und die Prägung des Landschaftsbildes durch die oberirdische Bohrtechnik sind von untergeordneter Bedeutung. Nach aktuellem Wissensstand hat die durch die Erdwärmeerschließung und -nutzung induzierte Mikro-seismizität im Bezug auf den Erholungswert einer Landschaft und das menschliche Wohlbefinden keinen Belang. Ob Mikro-seismizität zu Beeinträchtigungen der Tierwelt führt, ist dagegen ungewiss.

Die anlagenbedingten Wirkfaktoren und die damit verbundenen Beeinträchtigungen der Schutzgüter Boden, Grundwasser und Tiere werden von der technischen Ausstattung der Anlagen bestimmt. In erster Linie kommt die Bodenversiegelung und die Zerschneidung von Lebensräumen in Betracht. Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes hängen von der Anlagengröße ab.

Im Verlauf des bestimmungsgemäßen Betriebes geschlossener oberflächennaher Systeme sowie tiefer Erdwärmesonden erlangt lediglich die thermische Beeinflussung räumlich begrenzter Bereiche des Bodens und des Grundwassers Bedeutung. Für die oberflächennahen offenen Systeme ergeben sich bedeutende Beeinträchtigungen insbesondere auf das Grundwasser. Diese resultieren aus seiner Verwendung als Wärmeträgermedium. Während des Betriebes von hydrothermalen Erdwärmeanlagen ist das Grundwasser durch seine Benutzung als Wärmeträgermedium aus umwelt- und naturschutzfachlicher Sicht am stärksten beeinträchtigt. Im Normalbetrieb treten keine Wechselwirkungen zwischen dem thermalen Grundwasser und anderen Schutzgütern auf, da Hydrothermalanlagen in einem geschlossenen Kreislauf betrieben werden. Durch den Betrieb von HDR-Anlagen wird ebenfalls das Schutzgut Wasser durch die Verwendung von Oberflächenwasser als Wärmeträgermedium beeinträchtigt. Auch HDR-Anlagen funktionieren bestimmungsgemäß in einem geschlossenen System, so dass Wechselwirkungen zwischen dem zirkulierenden Wasser und anderen Schutzgütern unterbleiben. Wird durch Hydrothermal- oder HDR-Anlagen in einem Kraftwerksprozess Strom erzeugt, kommt es zu Beeinträchtigungen des Schutzgutes Wasser auf Grund seiner Verwendung als Kühlwasser, das Schutzgut Klima/Luft wird durch die Emission gasförmiger Stoffe oder von Abwärme beeinflusst. Betriebslärm

beeinträchtigt Tiere und das Schutzgut Landschaft. Letztlich können aufsteigende Wasserdampf Wolken das Landschaftsbild beeinflussen.

Störfälle können sämtliche Schutzgüter beeinträchtigen. In der Frage ihrer Bewertung spielt besonders der Nachweis von Sicherheitseinrichtungen und die Beachtung der Sicherheits- und Arbeitsvorschriften eine bedeutende Rolle.

Mit den verschiedenen Anlagen für eine oberflächennahe und tiefe Erdwärmennutzung steht eine umwelt- und ressourcenschonende Technologie zur Verfügung. Erdwärmeeinrichtungen zeichnen sich insbesondere durch die vergleichsweise geringe Emission von Klimagasen aus. Sie können flexibel für die zentrale und dezentrale Wärme- und Stromversorgung eingesetzt werden und erlangen in der Zukunft vor dem Hintergrund der sich bietenden Potenziale zunehmend Bedeutung. Die mit den Anlagen und Prozessen zur Erschließung und zur Nutzung der Erdwärme gekoppelten Wirkfaktoren sowie die davon abzuleitenden Wirkungen sind beherrschbar und können im Rahmen der Genehmigungsverfahren minimiert werden.

## 10 Literaturverzeichnis

- ARGE Eingriffsregelung (Arbeitsgruppe Eingriffsregelung der Landesanstalten/-ämter und des Bundesamtes für Naturschutz, 1995): Empfehlungen zum Vollzug der Eingriffregelung, Teil II. Inhaltlich-methodische Anforderungen an Erfassungen und Bewertungen.
- ÁRMANNSSON, H., H. KRISTMANNSDÓTTIR (1992). "Geothermal Environmental Impact", *Geothermics* 21: 869-880.
- BARBIER, E. (1997): "Nature and technology of geothermal energy: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1: 1-69.
- BAUMGÄRTNER, J., F. RUMMEL, E. HUENGES, M. KALTSCHMITT (1997). Erdwärme. In: Kaltschmitt, M., Wiese, A.: Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 2. Auflage, Springer Verlag - Berlin Heidelberg New York. S. 540.
- BAUMGÄRTNER, J., O. KAPPELMEYER, M. KALTSCHMITT, F. RUMMEL (1997). Nutzung heißer, trockener Gesteinsschichten. In: Kaltschmitt, M., A. Wiese: Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 2. Auflage, Springer Verlag - Berlin Heidelberg New York. S. 412-426.
- Baumgärtner, J., R. Jung et al. (1992). Hot-Dry-Rock-Technologie zur Nutzung der Erdwärme aus dem heißen Untergrund. Geothermische Energie-Forschung und Anwendung in Deutschland. R. Schulz. Karlsruhe, C.F. Müller GmbH. S. 24-47.
- Baumgärtner, J. et al. (1992): Nutzung heißer, trockener Gesteinsschichten. In: Verein Deutscher Ingenieure (1992). Erdwärme. Teil IV der Reihe Regenerative Energien. Informationsschriften der VDI-Gesellschaft Energietechnik. Düsseldorf, VDI-Verlag. S. 55.
- Baumgartner, P. (2001). Wörterbuch der Energietechnik mit Anwendungsbeispielen. Wiesbaden, Oscar Brandstetter Verlag GmbH.
- Bayrisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (2000): Fachinformation "Umwelt und Gesundheit": Erdwärme.
- Beck, H. (Bearb.) (2001): Lärm und Landschaft. Referate der Tagung "Auswirkungen von Lärm und Planungsinstrumente des Naturschutzes" in Schloss Salza

- bei Kiel am 2. und 3. März 2000. Angewandte Landschaftsökologie, Heft 44. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.
- Birkle, P. (1998). Herkunft und Umweltauswirkungen der Geothermalwässer von Los Azufres, Mexico. Freiberg, Akademische Buchhandlung Freiberg.
- Blume, H.-P., P. Felix-Henningsen, W.R. Fischer, H.G. Frede, R. Horn, K. Stahr (2003): Handbuch der Bodenkunde. 17. Ergänzungslieferung. ecomed-Verlagsgesellschaft mbH. Landsberg/Lech.
- Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (1998): Bodendefinition. <http://www.soil.ch/BGS/docsaktuell/Bodef98d.pdf> (besucht 08.01.2004).
- Böhmer, T. (2002): Das Erneuerbare-Energien-Gesetz – Erfahrungen, Auswirkungen, Perspektiven. In: EW: das Magazin für die Energie-Wirtschaft. Bd. 101, Heft 10, S. 28-34. Verband der Elektrizitätswirtschaft. Frankfurt/ Main.
- Broßmann, E. (2003) BEWAG Aktiengesellschaft, persönliche Mitteilungen.
- Brophy, P. (1997): „Environmental advantages to the utilization of geothermal energy“. Renewable Energy 10: 367-377.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2003 a): Entwicklung der erneuerbaren Energien. Stand August 2003. BMU, Referat Z III 1 " Allgemeine und grundsätzliche Angelegenheiten der Erneuerbaren Energien. Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2003 b): Fachtagung "Geothermische Stromerzeugung - eine Investition in die Zukunft", 20./21. Juni 2002, Landau/Pfalz. Tagungsband. Referat für Öffentlichkeitsarbeit. Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2003 c): Erneuerbare Energie in Zahlen. Stand März 2003. BMU. Reihe Umweltpolitik. Referat für Öffentlichkeitsarbeit. Berlin.
- Burkhardt, H. (2003) Untere Wasserbehörde des Landkreises Potsdam-Mittelmark, Belzig, persönliche Mitteilungen.
- Bußmann, W., F. Kabus, P. Seibt (Hrsg.) (1991). Geothermie - Wärme aus der Erde: Technologie, Konzepte, Projekte. Karlsruhe, Verlag C.F. Müller GmbH.

- Clauser, C. (1997). "Erdwärmenutzung in Deutschland." Geowissenschaften 15: 218-224.
- Dickson, M. H., M. Fanelli (Hrsg.) (1995). Geothermal Energy. UNESCO Energy Engineering Series. Chichester, John Wiley & Sons.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1999): Grundwassergefährdung durch Baumaßnahmen. DVWK-Materialien 3.
- Ebersbach, F. (2003): Landesbergamt Mecklenburg-Vorpommern, Stralsund, persönliche Mitteilung.
- Eckhardt, G. (1994): Die hydrothermale Energiegewinnung aus bergrechtlicher Sicht. In: Geothermische Energie: Nutzung, Erfahrung, Perspektive. Tagungsband Geothermische Fachtagung Bonn. Forum für Zukunftsenergien, Schriftenreihe des Forums Nr. 33. S. 175-185.
- Egloff, V., H. Issler, et al. (1981). Beurteilung der Umweltauswirkungen der Nagra-Tiefbohrung in der Nordschweiz einschließlich Stellungnahme zu den Einsprachen. Baden, Nationale Genossenschaft zur Lagerung radioaktiver Abfälle. Schweiz.
- Ehrlich, H., K. Erbas, E. Huenges (Hrsg.) (1998). Geothermie Report 98-1. Angebotspotential der Erdwärme sowie rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Nutzung hydrothermalen Ressourcen. Scientific Technical Report STR98/09. Potsdam, GeoForschungsZentrum.
- Erbas, K., A. Seibt, P. Hoth, E. Huenges (Hrsg.). (1999). Geothermie Report 99-2. Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen. Scientific Technical Report STR99/09. Potsdam, GeoForschungsZentrum.
- Fischer, R. (2003) Untere Wasserbehörde der Landeshauptstadt Potsdam, persönliche Mitteilung.
- Frisch, H. et al. (1989): Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken. Schlussbericht Forschungsvorhaben 03 E 6240 A/B.
- Freyberg, (2003) Landesbergamt Brandenburg, Cottbus, persönliche Mitteilung.

- Gassner, E. (Hrsg.), A. Winkelbrandt (1997): UVP: Die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Praxis. 3. überarbeitete Auflage, Verlagsgruppe Jehle und Rehm. München-Berlin.
- GEO Agentur Berlin Brandenburg (2000). Nutzung geothermischer Energie in Berlin und Brandenburg. InfoForum Geothermie, Berlin.
- Geothermal Resource Council (1999): Global Geothermal Resources: Sustainable Energy for the Future. Geothermal Resource Council 1999 Annual Meeting, Reno.
- Geothermische Vereinigung e.V. (2001): Erdwärme zum Heizen und Kühlen - Potentiale, Möglichkeiten und Techniken der Oberflächennahen Geothermie. Kleines Handbuch der Geothermie, Band 1. Geothermische Vereinigung Geeste.
- Geothermische Vereinigung (1998): Geothermie: Forschung, Entwicklung, Markt. 5. Geothermische Fachtagung, Straubing, Geothermische Vereinigung, e.V. Stadtwerke Straubing.
- GTN (1994): Geowissenschaftliche, geotechnologische und verfahrenstechnische Forschungsarbeiten zur Vervollkommnung des Verfahrens der Nutzung geothermischer Ressourcen im Hinblick auf das Langzeitverhalten, BMBF-Forschungsvorhaben 0326912 A, Geothermie Neubrandenburg GmbH, 1994; Teilthema: Geomechanische Bewertung der Nutzhorizonte im Langzeitbetrieb. Zit in: Erbas, K. et al., Eds. (1999). Geothermie Report 99-2 .Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen. Scientific Technical Report STR99/09. Potsdam, GeoForschungsZentrum.
- Gupta, H. K. (1980). Geothermal Resources: an Energy Alternative. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Haenel, R. und E. Staroste (Hrsg.) (1988): Atlas of Geothermal Resources in the European Community, Austria and Switzerland. Th. Schäfer, Hannover.
- Haenel, R., M. Kleefeld, I. Koppe (1984/ 1988): Geothermisches Energiepotential; Pilotstudie: Abschätzung der geothermischen Energievorräte an ausgewählten Beispielen in der Bundesrepublik Deutschland. Bericht,

- Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (unveröffentlicht); Veröffentlichung in Haenel Staroste (1988).
- Hartmann, H. , A. Strehler (1994). Die Stellung der Biomasse im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern aus ökologischer, ökonomischer und technischer Sicht. München, Institut und Bayerische Landesanstalt für Landtechnik der Technischen Universität München-Weihenstephan.
- Hermann, M. (2001): Lärmwirkung auf frei lebende Säugetiere – Spielräume und Grenzen der Anpassungsfähigkeit. In: Beck, H. (Bearb.) (2001): Lärm und Landschaft. Referate der Tagung "Auswirkungen von Lärm und Planungsinstrumente des Naturschutzes" in Schloss Salzau bei Kiel am 2. und 3. März 2000. Angewandte Landschaftsökologie, Heft 44. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg. S. 41-69.
- Hielscher, M. (2003): Erdwärme-Kraftwerk Neustadt-Glewe - Geothermie Neubrandenburg GmbH, persönliche Mitteilungen.
- Hoth, P., A. Seibt, T. Kellner, E. Huenges (Hrsg.) (1997). Geothermie Report 97-1. Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen in Norddeutschland. Scientific Technical Report STR97/15. Potsdam, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- Huenges, E., M. Kaltschmitt (2003): Grundlagen des regenerativen Energieangebots. Erdwärme. In: Kaltschmitt, M., Wiese, A., Streicher, W. (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. S. 103.
- Huenges, E., A. Saadat (2002): Stromerzeugung aus Niedertemperaturwärme – Geothermische Wärmequellen, Konversionsanlagen. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Geothermische Stromerzeugung. Stand der Technik und Perspektiven. Tagung Potsdam 17./ 18. Oktober 2002. VDI-Berichte 1703. VDI Verlag GmbH Düsseldorf.
- Gassner, E. (1995): Das Recht der Landschaft: Gesamtdarstellung für Bund und Länder. Neumann Verlag, Radebeul.
- Huenges, E., A. Saadat, S. Köhler, W. Rockel, S. Hurter, A. Seibt, D. Naumann, M. Zimmer, J. Erzinger, T. Wiersberg, B. Legarth und H. Wolff (2000). Geothermische Technologieentwicklung - geologische und energietechnische An-

- satzpunkte. Scientific Technical Report STR00/23. Potsdam, GeoForschungsZentrum.
- Huenges, E., K. Erbas (2000). Nutzung der Erdwärme des tiefen Untergrundes. InfoForum Geothermie, Berlin.
- Huenges, E., P. Hoth (1999): Wärmebilanz der Erde. In: Kaltschmitt, M., E. Huenges, H. Wolff (Hrsg.): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart. S. 32.
- Huenges, E., P. Hoth, T. Scheytt (1999): Technisch nutzbare Erdwärmevorkommen. In: Kaltschmitt, M., E. Huenges, H. Wolff (Hrsg.): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart. S. 40.
- Huenges, E., K. Erbas, K. Schallenberg (Hrsg.). (1996). Geothermie Report 96-1. Hydrogeothermale Anlagen: Systemvergleich und Emissionsbilanzen. Scientific Technical Report STR96/08. Potsdam, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- Hoth, P., E. Huenges (1999): Aufbau, Struktur und Geodynamik der Erde. In: Kaltschmitt, M., E. Huenges, H. Wolff (Hrsg.): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart. S. 26.
- Hurter, S. (1997). "Geothermische Energie in Europa." Geowissenschaften 15: 241-243.
- Hunt, T. (2001): Five lectures on environmental effects on geothermal energy utilisation. United Nations University Geothermal Training Program 2000. Report I. Reykjavik, Iceland.
- Ingerle, K, W. Becker (1995): Ausbreitung von Wärmepumpen-Kältemitteln im Erdreich und Grundwasser. Studie im Auftrag der Elektrizitätswerke Österreichs. Wien.
- Jung , H. (2003) Leiter der Betriebstechnik Max-Planck-Campus Golm, persönliche Mitteilungen.
- Jung, R. et al. (2003): Geothermische Stromerzeugung. In: Kaltschmitt, M., Wiese, A., Streicher, W. (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. S. 487.

- Jung, R., J. Baumgärtner et al. (1997). "HDR-Technologie - geothermische Energiegewinnung der Zukunft." *Geowissenschaften* 15: 259-263.
- Kabus, F. (1991). Die obertägige Verfahrenstechnik geothermischer Heizzentralen: Der Thermalwasserkreislauf. In: Bußmann, W.: *Geothermie - Wärme aus der Erde: Technologie, Konzepte, Projekte*. Karlsruhe, Verlag C.F. Müller GmbH. S. 117.
- Kabus, F. et al. (1997). Hydrothermale Erdwärmenutzung. In: Kaltschmitt, M., A. Wiese: *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 2. Auflage, Springer Verlag - Berlin Heidelberg New York. S. 371.
- Kaltschmitt, M. (2003): Nutzung von Umgebungsluft und oberflächennaher Erdwärme. Potentiale und Nutzung. In: Kaltschmitt, M., Wiese, A., Streicher, W. (Hrsg.): *Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. S. 436.
- Kaltschmitt, M., Wiese, A., Streicher, W. (Hrsg.) (2003): *Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Kaltschmitt, M., A. Wiese (Hrsg.). (1997). *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 2. Auflage. Springer Verlag - Berlin Heidelberg New York.
- Kaltschmitt, M., M. Nill, G. Schröder (2003): Nutzung von Umgebungsluft und oberflächennaher Erdwärme. Ökonomische und ökologische Analyse. In: Kaltschmitt, M., A. Wiese, W. Streicher (Hrsg.): *Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. S. 422.
- Kaltschmitt, M. et al. (2002): Geothermische Stromerzeugung . Umweltaspekte im Vergleich zu anderen Optionen einer Stromerzeugung aus regenerativen Energien sowie Marktchancen. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): *Geothermische Stromerzeugung. Stand der Technik und Perspektiven*. Tagung Potsdam 17./ 18. Oktober 2002. VDI-Berichte 1703. VDI Verlag GmbH Düsseldorf.

- Kaltschmitt, M., Huenges, E., Wolff, H. (Hrsg.) (1999): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart.
- Kayser, M. (1999): Erdwärmennutzung durch tiefe Einzelsonden. In: Kaltschmitt, M., Huenges, E., Wolff, H. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart. S. 152.
- Kayser, M., M. Kaltschmitt (1999): Energiewirtschaftliche Analyse. Nutzung der Energie des tiefen Untergrundes. In: Kaltschmitt, M., Huenges, E., Wolff, H. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart. S. 189.
- Kayser, M., M. Kaltschmitt (1998): Potentiale hydrothermalen Erdwärmes in Deutschland. In: Huenges, E. et al. (1998): Angebotspotential der Erdwärme sowie rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Nutzung hydrothermalen Ressourcen. Geothermie-Report 98-1. Scientific Technical Report STR 98/09. GeoForschungsZentrum Potsdam.
- Kayser, M., M. Kaltschmitt (1997). Erdwärmennutzung mit tiefen Erdwärmesonden. In: Kaltschmitt, M., A. Wiese: Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 2. Auflage, Springer Verlag - Berlin Heidelberg New York. S. 403.
- Kopf, M. (2003) Landesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Kleinmachnow, schriftliche Mitteilungen.
- Kopf, M. (1998): „Rechtliche Voraussetzungen zur Genehmigung geothermischer Anlagen“. Erzmetall 51: 548-560.
- Köppel, J., U. Feickert, L. Spandau, H. Strasser (1998): Praxis der Eingriffsregelung: Schadenersatz an Natur und Landschaft? Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).
- Kremer, E. (1990): „Umweltverträglichkeitsprüfung im Bergrecht – Anmerkungen zur vierten Änderung des Bundesberggesetzes“. NVwZ 8: 736-738.
- Kristmannsdóttir, H., H. Ármannsson (2003): „Environmental aspects of geo-thermal energy utilization“. Geothermics, im Druck. <http://www.sciencedirect.com>.
- Kristmannsdóttir, H. et al. (2000): “Sulfur gas emissions from geothermal power plants in Iceland”. Geothermics 29: 525-538.

- Kühne, G., Gaentzsch, G. (1992): Wandel und Beharren im Bergrecht: Perspektiven der Bergrechtsentwicklung in Deutschland. Veröffentlichungen des Instituts für Energierecht an der Universität Köln, Bd. 68. Baden-Baden, Nomos Verlagsgesellschaft.
- Kühne, G., Schoch, F., Beckmann, M. (1995): Gegenwartsprobleme des Bergrechts. Veröffentlichungen des Instituts für Energierecht an der Universität Köln, Bd. 74. Baden-Baden, Nomos Verlagsgesellschaft.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): Anforderungen an Erdwärmepumpen, 16./17.9.2002.
- Legarth, B. (2004) GeoForschungsZentrum Potsdam, persönliche Mitteilungen.
- Lux, R., M. Kaltschmitt (1999): Energiewirtschaftliche Analyse –Oberflächennahe Erdwärmennutzung. In: Kaltschmitt, M., Huenges, E., Wolff, H. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart., S. 175.
- Lux, R., M. Kaltschmitt (1997): „Außenluft- und erdreichgekoppelte Wärmepumpen – Systemtechnische und energiewirtschaftliche Analyse“. Zeitschrift für Energiewirtschaft 21, 1: 69-77.
- Lux, R., M. Kaltschmitt, B. Sanner (1997): Oberflächennahe Erdwärmennutzung. In: Kaltschmitt, M., A. Wiese: Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 2. Auflage, Springer Verlag - Berlin Heidelberg New York. S. 345.
- Lux, R., B. Sanner (1992): Oberflächennahe Erdwärmennutzung. In: Verein Deutscher Ingenieure: Erdwärme. Teil IV der Reihe Regenerative Energien. Informationsschriften der VDI-Gesellschaft Energietechnik. Düsseldorf, VDI-Verlag. S. 14.
- Nast, K. (1996): Erdwärme – Rechtsgrundlagen der Erkundung und Gewinnung. Tagungsband 4. Geothermische Fachtagung Konstanz. S. 436-444.
- Niermann, R.P. (1992): Betriebsplan und Planfeststellung im Bergrecht. Beiträge zum Siedlungs- und Wohnungswesen und zur Raumplanung. Bd. 143. Selbstverlag des Instituts für Siedlungs- und Wohnungswesen und des Zentralinstituts für Raumplanung der Universität Münster.

- Paschen, H., D. Oertel, R. Grünwald (2003): Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland. Sachstandsbericht. TAB Arbeitsbericht Nr. 84, Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).
- Press, F., R. Siever (1995). Allgemeine Geologie. Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg-Berlin-Oxford.
- Reck, H., C. Herden, J. Rasmus, R. Walter (2001): Die Beurteilung von Lärmwirkungen auf freilebende Tierarten und die Qualität ihrer Lebensräume - Grundlagen und Konventionsvorschläge für die Regelung von Eingriffen nach § 8 NatschG. In: Beck, H. (Bearb.) (2001): Lärm und Landschaft. Referate der Tagung "Auswirkungen von Lärm und Planungsinstrumente des Naturschutzes" in Schloss Salzau bei Kiel am 2. und 3. März 2000. Angewandte Landschaftsökologie, Heft 44, S. 1225-151. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.
- Rockel, W., P. Hoth et al. (1997). "Charakteristik und Aufschluss hydrogeothermaler Speicher." Geowissenschaften 15: 244-252.
- Rummel, F., O. Kappelmeyer (Hrsg.) (1993): Erdwärme: Energieträger der Zukunft? Fakten, Forschung, Zukunft. Verlag C.F. Müller, Karlsruhe.
- Rybach, L. (2002): Umweltaspekte der geothermischen Stromerzeugung. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Geothermische Stromerzeugung. Stand der Technik und Perspektiven. Tagung Potsdam 17./ 18. Oktober 2002. VDI-Berichte 1703. VDI Verlag GmbH Düsseldorf.
- Sanner, B. (1999): „Neue Entwicklung bei der Genehmigung von Erdwärmesonden“. Aus: Geothermische Energie 24/25, 7. Jahrgang, Heft 1/2.
- Sanner, B. (1992). Erdgekoppelte Wärmepumpen - Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. Karlsruhe, Fachinformationszentrum Karlsruhe.
- Sanner, B., W. Streicher, M. Kaltschmitt (2003): Systemtechnische Beschreibung. Nutzung von Umgebungsluft und oberflächennaher Erdwärme. In: Kaltschmitt, M., Wiese, A., Streicher, W. (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. S. 390.

- Sanner, B., W. Bußmann (Hrsg.) (2001): Erdwärme zum Heizen und Kühlen - Potentiale, Möglichkeiten und Techniken der Oberflächennahen Geothermie. Geeste.
- Sanner, B., M. Kaltschmitt (1999): Oberflächennahe Erdwärmennutzung. In: Kaltschmitt, M., Huenges, E., Wolff, H. (Hrsg.): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart. S. 60.
- Sanner, B., L. Rybach (1997): "Oberflächennahe Geothermie - Nutzung einer allgegenwärtigen Ressource." Geowissenschaften 15: 225-231.
- Sanner, B., A. Lehmann (1994). 2. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen. IZW-Berichte. Karlsruhe, Fachinformationszentrum Karlsruhe.
- Sanner, B., A. Lehmann (Hrsg.) (1991). Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen. IZW-Berichte. Karlsruhe, Fachinformationszentrum Karlsruhe.
- Sanner, B., K. Knoblich (1991): Umwelteinfluß erdgekoppelter Wärmepumpen. In: Sanner, B., A. Lehmann (Hrsg.) (1991). Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen. IZW-Berichte. Karlsruhe, Fachinformationszentrum Karlsruhe.
- Sanner, B., K. Knoblich (1991): „Umweltverträglichkeit der Wärmeträgermedien und Kältemittel verschiedener erdgekoppelter Wärmepumpensysteme“. Zeitschrift für angewandte Geowissenschaften 10: 67-90.
- Schallenberg, K., K. Erbas et al., Eds. (1999). Geothermie Report 99-1: Geothermisches Heizwerk Neustadt-Glewe: Zustands- und Stoffparameter, Prozessmodellierung, Betriebserfahrungen und Emissionsbilanzen. Scientific Technical Report STR99/04. Potsdam, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- Scheffer, F., P. Schachtschabel (1998). Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart.
- Schulte, H. (1993): Kernfragen des bergrechtlichen Genehmigungsverfahrens. Baden-Baden, Nomos Verlagsgesellschaft.
- Schulz, R. (2003): Bergrecht und Erdwärme – Gesichtspunkte zur Bemessung von Erlaubnis und Bewilligungsfeldern.  
[http://www.geothermie.de/gte/gte40/bergrecht\\_und\\_erdwaerme.htm](http://www.geothermie.de/gte/gte40/bergrecht_und_erdwaerme.htm) (besucht im Oktober 2003).

- Schulz, R. (2002): Geothermische Stromerzeugung. Erschließungsverfahren im süd-deutsch-oberösterreichischen Molassebecken. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Geothermische Stromerzeugung. Stand der Technik und Perspektiven. Tagung Potsdam 17./ 18. Oktober 2002. VDI-Berichte 1703. VDI Verlag GmbH Düsseldorf.
- Schulz, R. (1997). "Geothermische Energie - Ein internationaler Überblick." Geowissenschaften 15: 213-217.
- Schulz, R., R. Werner et al., Eds. (1992). Geothermische Energie - Forschung und Anwendung in Deutschland. Karlsruhe, Verlag C.F. Müller GmbH.
- Seibt, A., F. Kabus, T, Kellner (1997). "Der Thermalwasserkreislauf bei der Erdwärmennutzung." Geowissenschaften 15: 253-258.
- Seibt, P., F. Hoffmann (2002): Geothermische Stromerzeugung. Erschließungsverfahren im Norddeutschen Becken. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Geothermische Stromerzeugung. Stand der Technik und Perspektiven. Tagung Potsdam 17./ 18. Oktober 2002. VDI-Berichte 1703. VDI Verlag GmbH Düsseldorf.
- Siebertz, T., H. Wolff, Huenges, E. (1998): Technisch-wirtschaftliche Aufschlussalternativen hydrothormaler Ressourcen. In: Ehrlich, H., K. Erbas, E. Huenges (Hrsg.) (1998). Geothermie Report 98-1. Angebotspotential der Erdwärme sowie rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Nutzung hydrothormaler Ressourcen. Scientific Technical Report STR98/09. Potsdam, GeoForschngsZentrum.
- Staiß, F. (2003) Jahrbuch Erneuerbare Energien 02/03. Hrsg. von: Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg. Bieberstein-Fachbuchverlag Radebeul.
- Stiebel-Eltron (Hrsg.) (1989/ 1991): Warmes Wohnen mit Umweltenergie, Wärmepumpenanlagen, Planung und Installation.
- VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.) (2002): Geothermische Stromerzeugung. Stand der Technik und Perspektiven. Tagung Potsdam 17./ 18. Oktober 2002. VDI-Berichte 1703. VDI Verlag GmbH Düsseldorf.

Verein Deutscher Ingenieure (1992). Erdwärme. Teil IV der Reihe Regenerative Energien. Informationsschriften der VDI-Gesellschaft Energietechnik. Düsseldorf, VDI-Verlag.

Wessolek, G. (2003): Bodenüberformung und –versiegelung. In: Blume, H.-P. et al. (2003): Handbuch der Bodenkunde. 17. Ergänzungslieferung. ecomed-Verlagsgesellschaft mbH. Landsberg/Lech. Bd.3, Abschn. 6.1.

Wolff, H. (1999). Nutzung der Energie des tiefen Untergrundes. In: Kaltschmitt, M., E. Huenges, H. Wolff (Hrsg.): Energie aus Erdwärme. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart.

Zschalich, A. und B. Jessel (2001): Lärm, Landschaft(sbild) und Erholung. In: Beck, H. (Bearb.) (2001): Lärm und Landschaft. Referate der Tagung "Auswirkungen von Lärm und Planungsinstrumente des Naturschutzes" in Schloss Salzau bei Kiel am 2. und 3. März 2000. Angewandte Landschaftsökologie, Heft 44. S. 115-124. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.

<http://www.umweltministerium.bayern.de/service/umwberat/ubberdw.htm>

<http://www.geothermie.de/egec-geothernet/impact.htm>

### **Gesetze, Verordnungen, Kommentare, Merkblätter und andere Rechtsvorschriften**

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm– Geräuschimmissionen (AVV Baulärm) vom 19. August 1970. Bundesanzeiger Nr. 160 vom 1. September 1970.

Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe – VwVwS) vom 17. Mai 1999, veröffentlicht im Bundesanzeiger Nr. 98a.

Baugesetzbuch (BauGB) vom 27. August 1997 (BGBl. I S. 2141).

Boldt, G., Weller, H. (1984): Bundesberggesetz: vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310); nebst Durchführungsbestimmungen d. Bundes und d. Länder sowie

- Gesetz zur vorläufigen Regelung des Tiefseebergbaus vom 15. August 1980 (BGBl. I S. 1457); Kommentar. Berlin; New York, de Gruyter.
- Boldt, G., Weller, H. (1991): Bundesberggesetz: vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310); Kommentar, Ergänzungsband. Berlin; New York, de Gruyter.
- Brandenburgische Bauordnung (BbgBO) vom 16. Juli 2003 (GVBl S. 210).
- Brandenburgisches Naturschutzgesetz (BbgNatschG) vom 25. Juni 1992 (GVBl. S. 208) zuletzt geändert d. G. vom 18. Dezember 1997 (GVBl S. 124).
- Brandenburgisches Wassergesetz (BbgWG) vom 13. Juli 1994 (GVBl.I/94 S. 302, ber. GVBl.I/97 S. 62), zuletzt geändert durch Art. 2 des Gesetzes vom 10. Juli 2002 (GVBl.I/02 S. 62, 67).
- Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980, BGBl. I S. 1310, zuletzt geändert durch Artikel 38 des Gesetzes vom 21. August 2002, BGBl. I S. 3322.
- Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl I S. 502, geändert durch G. v. 9. 9. 2001, BGBl I S. 2331).
- Bundesminister des Inneren (1985): Katalog wassergefährdender Stoffe. Fortgeführt durch die Kommission zur Bewertung wassergefährdender Stoffe (KBwS). Dokumentations- und Auskunftsstelle wassergefährdende Stoffe.
- Czychowski, M, M, Reinhardt (2003): Wasserhaushaltsgesetz unter Berücksichtigung der Landeswassergesetze. Kommentar. 8. neubearbeitete Auflage. Verlag C.H. Beck, München.
- Erbguth, W., A. Schlink (1996): Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung: Kommentar. 2. vollst. überarb. Auflage. Verlag C.H. Beck, München.
- Erneuerbare Energien Gesetz (2003): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien vom 29. März 2000, BGBl. I 2000, S. 305; zuletzt geändert durch G v. 22.12.2003, BGBl. I 3074.
- Gassner, E., G. Bendomir-Kahlo, A. Schmidt-Räntsch, J. Schmidt-Räntsch (1996): Bundesnaturschutzgesetz: Kommentar. Verlag C.H. Beck, München.
- Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, MLUR (2001): Musterverordnung für Wasserschutzgebiete im Land Brandenburg. Aktualisierte Version für nicht unterteilte Zone III, Ausfertigung vom 20. März 2001.

- Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, MLUR (1999): Umgang mit wassergefährdenden Stoffen – Wassergefährdungsklassen von Leckanzeigeflüssigkeiten bei doppelwandigen Behältern und Rohrleitungen und von Kältemitteln bei Wärmepumpen mit Kollektoren. Schriftliche Mitteilung an die Unteren Wasserbehörden der Landkreise und kreisfreien Städte, an die Obere Wasserbehörde (LUA Brandenburg) sowie an das Wasserwirtschaftsamt.
- Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, MUNR, Abteilung Gewässerschutz und Wasserwirtschaft (1998): Merkblatt über wasserrechtliche Anforderungen an geothermische Anlagen. Potsdam.
- Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, MUNR (1998): Verwaltungsvorschrift über Wasserschutzgebiete (VvWSG), veröffentlicht im Amtsblatt für Brandenburg 1998, S. 654.
- Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz: TA Lärm - Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm vom 26. August 1998 (GMBI. 1998 S. 503).
- Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG): Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung vom 21. Februar 1990 (BGBl. I S. 205); zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 27. Juli 2001 (BGBl. I 1950).
- Verein Deutscher Ingenieure (200/2001): VDI Richtlinie 4640 - Thermische Nutzung des Untergrundes. Blatt 1 (2000): Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte; Blatt 2 (2001): Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Berlin.
- Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (Anlagenverordnung – VawS) vom 3. August 1996 mit der Berichtigung vom 6. März 1997 (GVBl. Nr. 6/1997 S. 56) unter Berücksichtigung der Verordnung zur Änderung der Anlagenverordnung vom 21.11.2000 (GVBl. Nr. 28/2000 S. 793).
- Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierenden Strahlen StrlSchV - Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I Nr. 38 vom 26.07.2001, S. 1714; ber. 2002 S. 1459; 18.6.2002 S. 186902).

Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-Bergbau) vom 13. Juli 1990, BGBl. I S. 1420.

Verordnung über wassergefährdende Stoffe bei der Beförderung in Rohrleitungsanlagen vom 19. Dezember 1973 (BGBl I 1973, 1946).

Verordnung zum Verbot von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen (FCKW-Halon-Verbots-Verordnung) vom 6. Mai 1991. (BGBl I S.1090), zuletzt geändert am 29. Oktober 2001, BGBl I S. 2785.

Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 12. November 1996 (BGBl I S. 1695, zuletzt geändert durch G. v. 9.9. 2001, BGBl I S. 2331).

Wasserrahmenrichtlinie, RICHTLINIE 2000/60/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.

## 11 Glossar

Abteufen	Niederbringen einer Bohrung
Additive	Zusätze
Anerkannte Regeln der Technik	die Beschreibung, ob und mit welchen technischen Verfahren ein ggf. gesetzlich vorgeschriebenes Anforderungsniveau oder Schutzziel zu erreichen ist, finden sich insbesondere in DIN-Vorschriften und in den technischen Regelwerken der Fachverbände, VDI-Richtlinien
Aquifer	grundwassererfüllter Bereich eines Locker- oder Festgesteinskörpers; auf Grund seiner hydraulischen Leitfähigkeit ist er dazu geeignet, Grundwasser aufzunehmen, es zu speichern und weiterzuleiten.
Bentonit	tonhaltiges Gestein, das durch die Verwitterung vulkanischer Asche entsteht
Bundsandstein	feinkörniges klastisches Sedimentgestein, meist durch Beimengung von Eisenoxid-Mineralen eingefärbt; oft geschichtet
Erdwärmekollektor	Wärmeüberträger, die horizontal oder schräg in den oberen fünf Metern des Untergrundes eingebaut werden
Erdwärmesonde	Wärmeüberträger, die vertikal oder schräg in den Untergrund eingebracht werden.
Erdwärme	(=Geothermische Energie) die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde
Geosynklinale	Großmulde der Erdkruste mit sinkendem Boden, wurde über geologisch lange Zeiträume (mehr als 100 Millionen Jahre) mit dem Verwitterungsschutt der anliegenden Festländer gefüllt
Hangendes	Schichten, welche sich über einem Bezugsniveau befinden, das stratigraphisch Hangende entspricht jüngerem Gesteinen
Hot-Dry-Rock (HDR)	"Heißes, trockenes Gestein"; Formationen aus heißem Tiefengestein, die über kein oder ausgesprochen wenig Kluftwasser verfügen
Hydraulic Fracturing (Frac-Experimente)	Injektion von Wasser unter hohem Druck und hohen Fließraten in den Untergrund, um Gestein hydraulisch aufzuspalten
Inertgas	Gas das im Organismus keinen metabolischen Veränderungen unterliegt, reaktionsträge, enthält keinen

	Sauerstoff, häufig als Schutzgas gegen eine unerwünschte Oxidation verwendet
Isotop	Atome desselben chemischen Elementes, die sich in der Anzahl ihrer Neutronen im Atomkern unterscheiden
Liegendes	Schichten, welche sich unter einem Bezugsniveau befinden, das stratigraphisch Liegende entspricht älterem Gesteinen
Malmkarst	mehrere hundert Meter mächtige Ablagerungen aus Riff- und Plattenkalken aus der Zeit des Jura
Molasse	Ablagerungen aus der Zeit des Tertiär, Schichtgestein
Muschelkalk	Ablagerungen aus der Zeit des Trias, entstanden durch chemische Ausfällungen unter Meeresabdeckung
Organic Rankine Cycle (ORC)	Turbine mit zwei Kreisläufen (Binärmaschine); die Turbine wird mit einem Arbeitsmittel angetrieben das bereits bei geringen Temperaturen verdampft, über einen Wärmetauscher nimmt dieses Arbeitsmittel thermische Energie z. B. aus dem Thermalwasser auf, das Thermalwasser selbst gelangt dabei nicht in die Turbine.
Peridotit	ultrabasisches Tiefengestein
Redoxpotenzial	Maß für die Reduktions- oder Oxidationskraft eines Mediums = Spannung, die sich an einer in dem Medium eingetauchten Edelmetallelektrode einstellt, höhere (positive) Redox-Spannungen bedeuten eine größere Oxidationskraft, niedrigere (negative) Redox-Spannungen eine größere Reduktionskraft
Rotary Bohrverfahren	Die Bohrungen werden mit Hilfe eines drehend-drückend wirkenden Gestänge niedergebracht. Bei kontinuierlichem Drehen des Bohrgestanges wird der Bohrmeißel mit einem konstanten Bohrandruck beaufschlagt und ein Spülungskreislauf bewirkt den Austrag des Bohrkleins.
Neutrale Zone	ist der Bereich im Untergrund unmittelbar unter der Erdoberfläche, ab dem der Jahresgang der dortigen Temperatur um nicht mehr als 0,1 K schwankt
Theoretisches Potenzial	das theoretische Potenzial einer regenerativen Energiequelle ergibt sich aus deren physikalischem Energieangebot, welches in einer bestimmten Region innerhalb eines bestimmten Zeitraumes theoretisch genutzt werden kann
Technisches Potenzial	Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Beachtung der derzeit technischen Möglichkeiten nutzbar ist.

## Technisches

Angebotspotenzial beinhaltet die ausschließlich unter technischen Restriktionen bereitstellbare Energie (z.B. die hydrogeothermisch bereitstellbare Niedertemperaturwärme).

## Technisches

Nachfragepotenzial es werden zusätzlich zu den technischen Restriktionen nachfrageseitige Beschränkungen beachtet (z.B. die hydrogeothermisch bereitstellbare Niedertemperaturwärme, die auch im Energiesystem Deutschlands genutzt werden kann)

## Teufe

bergmännischer Ausdruck für Tiefe. Im Bezug auf Bohrungen meint Teufe die gesamte Länge unter Tage, die von der absolut errichteten Tiefe der Bohrung unter der Geländeoberfläche abweichen kann

## 12 Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
BBergG	Bundesberggesetz
BbgBo	Brandenburgische Bauordnung
BbgNatschG	Brandenburgisches Naturschutzgesetz
BbgWG	Brandenburgisches Wassergesetz
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BNatschG	Bundesnaturschutzgesetz
d	Tag
dB	Dezibel
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
GfZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
h	Stunde
HDR	Hot-Dry-Rock
HFCKW	Halogenierter Fluorchlorkohlenwasserstoff
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
LUA	Landesumweltamt
m	Meter
MUNR	Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
ORC	Organic Rankine Cycle

StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TA	Technische Anleitung
TWh	Terawattstunde
uGOK	unter Geländeoberkante
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz
VawS	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wasser- gefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VvWSG	Verwaltungsvorschrift über Wasserschutzgebiete
VwVwS	Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

#### **Vorsätze und Vorsatzzeichen**

Hekto	H	$10^2$	Hundert
Kilo	K	$10^3$	Tausend
Mega	M	$10^6$	Million
Giga	G	$10^9$	Milliarde
Tera	T	$10^{12}$	Billion
Peta	P	$10^{15}$	Billiarde
Exa	E	$10^{18}$	Trillion

#### **Umrechnungsfaktoren**

1 KJ = 0,000278 kWh

1 kWh = 3.600 KJ

Die Zahlen beziehen sich auf den Heizwert