

# Risikoorientierte Bewilligung von Erdwärmesonden

Christoph Butscher · Peter Huggenberger · Adrian Auckenthaler ·  
Dominik Bänninger

Eingang des Beitrages: 9. 3.2010 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 3. 8.2010 / Online veröffentlicht: 27. 10.2010  
© Springer-Verlag 2010

**Zusammenfassung** Die Zahl an Erdwärmesonden nimmt in ganz Europa stetig zu. Wie mit anderen Technologien der Energiegewinnung sind auch mit Erdwärmesonden Risiken verbunden. Deshalb bedarf es Leitlinien als Grundlage für die Bewilligungsverfahren, die den Bau und Betrieb einer solchen Anlage regeln. Um dabei den zu erwartenden Nutzen gegen mögliche Risiken abwägen zu können, sind Kenntnisse über die hydrogeologischen Verhältnisse am Standort und die dort stattfindenden Prozesse erforderlich. Am Beispiel des Erdwärmekonzepts des Kantons Basel-Landschaft wird gezeigt, wie die Bewilligung von Erdwärmesonden differenziert geregelt werden kann, und wie die geologischen Merkmale einer Region in ein Erdwärmekonzept integriert werden können. Dabei werden insbesondere Karstgebiete, Gebiete mit der Gefahr des Gebirgsquellens und der Subrosion, Gewässerschutzbereiche, und Gebiete mit Grundwasserstockwerkbau oder gespannten Grundwasserverhältnissen berücksichtigt. Der Artikel will damit einen Beitrag zur derzeit stattfindenden gesellschaftlichen Diskussion über den Nutzen und die Risiken der un tiefen Geothermie leisten, indem er Risiken durch den Bau und Betrieb von Erdwärmesonden beschreibt, und Möglichkeiten aufzeigt, diese Risiken in der Bewilligungspraxis zu berücksichtigen.

## Risk-oriented approval of borehole heat exchangers

**Abstract** The number of borehole heat exchangers (BHEs) is continuously rising in Europe. Just like other energy producing technologies, there are risks associated with BHE systems. Therefore, guidelines are necessary for regulating the construction and operation of such installations. In order to be able to trade-off the expected benefits against possible risks, knowledge about the local hydrogeological conditions, and the processes taking place, is required. Using the geothermal energy use concept developed for Canton Basel-Landschaft as an example, it is shown how the approval of BHE systems can be regulated in a differentiated way, and how the geological characteristics of a region can be integrated into a geothermal energy use concept. In particular, karst areas, areas with the risk of ground swelling and subrosion, water protection areas, and areas with multiple or confined aquifers are considered. The article aims at making a contribution to the present societal discussion about the benefits and risks of shallow geothermal energy systems by describing the risks associated with BHEs, and by presenting options to account for these risks in approval practice.

**Keywords** Shallow geothermal energy · Ground source heat pumps · Risk analysis · Geothermal energy use concept

---

Dr. C. Butscher (✉) · Prof. Dr. P. Huggenberger  
Universität Basel, Geologisch-Paläontologisches Institut,  
Angewandte und Umweltgeologie,  
Bernoullistr. 32, 4056 Basel, Schweiz  
E-Mail: [christoph.butscher@unibas.ch](mailto:christoph.butscher@unibas.ch)

Dr. A. Auckenthaler · Dr. D. Bänninger  
Amt für Umweltschutz und Energie Kanton Basel-Landschaft,  
Rheinstr. 29, 4410 Liestal, Schweiz

Dr. A. Auckenthaler  
E-Mail: [adrian.auckenthaler@bl.ch](mailto:adrian.auckenthaler@bl.ch)

## Einleitung

In die Entwicklung der Geothermie werden hohe Erwartungen gesetzt. Die Förderung des Baus un tiefer geothermischer Anlagen soll helfen, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern und den Anteil an erneuerbarer Energie zu steigern. Tatsächlich steigt in den meisten europäischen Ländern die Zahl der Erdwärmesonden (EWS) zur Wärmegewinnung

stetig an (Sanner et al. 2003). Auch wenn der umweltpolitische Nutzen solcher Anlagen bezüglich einer Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen unbestritten ist (z. B. Saner et al. 2010, Blum et al. 2010), birgt diese Technologie gewisse Risiken. Der Bau und Betrieb einer EWS findet an einem eng umgrenzten Ort statt, dennoch sind weiträumige Auswirkungen auf die Umwelt und insbesondere das Grundwasser möglich (Ferguson 2009). Risiken für Umwelt und Grundwasser bestehen beispielsweise durch ein mögliches Austreten der Wärmeträgerflüssigkeit aus der Sonde (Klotzbücher et al. 2007). Auch die Verwendung einer Bohrspülung und die Bohrlochhinterfüllung können problematisch sein. Das Eindringen der Bohrspülung in einen Aquifer kann das Grundwasser eintrüben und mit Keimen belasten. Aus dem für die Bohrlochhinterfüllung verwendeten Zement können Metalle und chemische Stoffe gelöst werden. In der modernen Bauindustrie werden beispielsweise chemische Zementzusätze verwendet, die toxisch sein können (Ruckstuhl et al. 2002, 2003). Dabei ist die Art und Menge solcher Bauhilfsstoffe vielfältig und einem ständigen Wandel unterworfen. Genaue Kenntnisse über Art und Menge der verwendeten Stoffe liegen zumeist nicht vor (Eiswirth et al. 1999).

Als noch problematischer sind jedoch die Folgen einzuschätzen, die indirekt durch das Schaffen oder Plombieren von Wasserwegsamkeiten im Untergrund, und somit einer Änderung der hydraulischen Verhältnisse entstehen. Diese Risiken können in vielen Fällen überhaupt nicht oder erst zu spät erkannt werden. Wasserwegsamkeiten können durch die Auflockerungszone um das Bohrloch (Tsang et al. 2005) und nicht vollständig hinterfüllte Bohrlochwände entstehen. Es ist möglich, dass dadurch die Schutzfunktion der Deckschichten über dem Grundwasser beeinträchtigt und eine dauerhafte Verbindung von der Oberfläche in das Grundwasser geschaffen wird, durch die Schadstoffe ins Grundwasser gelangen können. Die Grundwasserqualität kann in gewissen Situationen ebenfalls bei einer Verbindung von Grundwasserstockwerken gefährdet werden (La Vigna et al. 2010, Zaporozec 1981). Die Änderung der Zirkulationssysteme im Untergrund kann im Bereich von Altlasten zur Mobilisierung von Schadstoffen führen (Huggenberger et al. 2010). Außerdem ist es möglich, dass eine EWS-Bohrung eine Entwässerung von Sedimenten bewirkt. Im süddeutschen Schorndorf führte dies zum Versiegen einer Quelle und zu Setzungen an der Oberfläche, welche Risse an mehreren Wohnhäusern und einem Schulgebäude entstehen ließen. In Gebieten mit salz- oder sulfathaltigem Untergrund besteht bei Zutritt von Wasser durch neu geschaffene Verbindungen die Gefahr der Subrosion (Guerrero et al. 2004) und des Gesteinsquellens (Hauber et al. 2005). Dadurch können mit nur wenigen Bohrungen nicht nur lokal, sondern auch in angrenzenden Grundstücken Schäden an Gebäuden und Verkehrswegen durch Senkungen und Hebungen an der Oberfläche entstehen. Ein derzeit prominentes Beispiel ist die Stadt Staufen in Südwestdeutschland, wo

nach dem Bau einer EWS-Anlage schwerwiegende Schäden an Häusern der Innenstadt aufgetreten sind (Goldscheider & Bechtel 2009). Weitere Risiken, die tatsächlich auch immer wieder auftreten, sind das Austreten artesisch gespannten Grundwassers an die Erdoberfläche, das Austreten von Erdgas (Wyss 2009) und seltener das Anbohren von Erdölführenden Schichten verbunden mit einer Mobilisierung des Erdöls.

Um mögliche Risiken und negative Auswirkungen auf die Umwelt und das Grundwasser durch eine Erdwärmennutzung mittels EWS zu vermeiden oder zumindest zu minimieren, bedarf es rechtlicher Vorgaben, die den Bau und Betrieb einer solchen Anlage regeln. In der Schweiz ist auf Bundesebene die Wärmenutzung aus dem Untergrund über die Gesetze und Verordnungen zum Gewässerschutz geregelt (GSchG 1991, GSchV 1998). Darüber hinaus gibt es Leitfäden und Normen für die Praxis (BUWAL 2004, BA-FU 2009, SIA 2010). Ähnlich ist die Situation in Deutschland, wo das Wasserhaushaltsgesetz (WHG 2010) und das Bundesberggesetz (BBergG 1980) den rechtlichen Rahmen vorgeben, der durch die Leitfäden der Länder (z. B. LGRB 2005) und Baunormen (VDI 2000) spezifiziert wird. Eine Übersicht über bewilligungsrechtliche Aspekte in Deutschland geben Kübert et al. (2009) und Hähnlein et al. (2009). Für den Vollzug auf kantonaler Ebene (in der Schweiz) bzw. auf Ebene der unteren Verwaltungsbehörden (in Deutschland) ist es jedoch notwendig, konkrete Leitlinien für die Bewilligung von geothermischen Anlagen zu formulieren. Die Umsetzung der rechtlichen Vorgaben ist in föderalistischen Systemen unterschiedlich und muss den geologisch-hydrogeologischen Begebenheiten einer Region Rechnung tragen. Die Bewilligungspraxis kann eine liberale oder restriktive Haltung der zuständigen Behörde widerspiegeln, je nachdem, ob der Erdwärmennutzung oder dem Trinkwasserschutz sowie dem Schutz vor geogenen Risiken Vorrang eingeräumt wird.

In diesem Artikel wird ein risikoorientiertes Erdwärmennutzungskonzept vorgestellt, das mögliche Gefahren in Zusammenhang mit einer Installation von EWS berücksichtigt. Es basiert auf der Bewilligungspraxis im Kanton Basel-Landschaft (AUE 2010). Das Konzept zeigt, wie die spezifischen geologischen Merkmale einer Region, mit unterschiedlichen Aquiferen sowie quellfähigen oder leicht auslaugbaren Gesteinsschichten, in einem dicht besiedelten Gebiet in die Bewilligungspraxis integriert werden können. Einzelne, für eine Bewilligung von EWS herangezogenen Kriterien werden detailliert besprochen und diskutiert. Dies beinhaltet das Vorgehen in Karstgebieten, in Gebieten mit der Gefahr des Gebirgsquellens und der Subrosion, in Gewässerschutzbereichen und in Gebieten mit Grundwasserstockwerkbau oder gespannten Grundwasserverhältnissen.

### Risikoorientiertes Erdwärmenutzungskonzept

Das Erdwärmenutzungskonzept des Kantons Basel-Landschaft (AUE 2010) bezieht sich auf die oberflächennahe geothermische Energie (bis ca. 400 m), die durch Erdwärmesonden (EWS), Erdregister, Wärmekörbe, Energiepfähle und Grundwasserwärmepumpen genutzt werden kann. In diesem Artikel werden EWS als der weitaus häufigste genutzte geothermische Anlagentyp in der Schweiz (Signorelli et al. 2004) besprochen.

Das vorgestellte Erdwärmenutzungskonzept sieht bei einer Bewilligung von EWS drei verschiedene Fälle vor: An einem Standort sind EWS

- (A) unzulässig,
- (B) mit speziellen Auflagen zulässig oder
- (C) mit Standardauflagen zulässig.

Welcher der Fälle an einem konkreten Standort zur Anwendung kommt ist durch Kriterien definiert (Tab. 1), die den Risiken Rechnung tragen, die mit Bau und Betrieb einer EWS-Anlage verbunden sind. Einige der Kriterien sind naheliegend (z. B. Grundwasserschutzzonen, belastete Standorte) oder sind Spezialfälle (z. B. Ölschiefer, Thermalquellen). Auf sie wird hier nicht näher eingegangen. Andere Kriterien (Karstgebiete, Gefahr des Gebirgsquellens und der Subrosion, Gewässerschutzbereich  $A_U$ , Grundwasserstockwerksbau, gespanntes Grundwasser) lassen für ihre Bewertung mehr Spielraum und beziehen sich auf häufig angetroffene Situationen. Sie haben deshalb eine große Relevanz für die Bewilligungspraxis und sind Gegenstand dieses Kapitels.

### Datenanforderungen

Zur Beurteilung der Standortkriterien für EWS sind raumplanerische und hydrologisch-hydrogeologische Informationen erforderlich. Die raumplanerischen Daten sind in vielen Fällen bei den Bewilligungsbehörden vorhanden. Die hydrologisch-hydrogeologischen Daten müssen jedoch meist erhoben und interpretiert werden. Ist die geologische Schichtenfolge im Untergrund an einem Standort bekannt, kann diese in Bezug zu den Kriterien des Erdwärmenutzungskonzepts gebracht werden. Abbildung 1 zeigt eine stratigraphische Tabelle, die für den Kanton Basel-Landschaft repräsentativ ist, sowie die Zuordnung der stratigraphischen Einheiten zu den einzelnen Kriterien. In Schichten, denen der Fall (A) zugeordnet ist, darf generell nicht hineingebohrt werden. In Schichten, denen der Fall (B) zugeordnet ist, darf nur mit speziellen Auflagen hineingebohrt werden. Ist an einem Standort die Schichtenabfolge im Untergrund bekannt, kann die maximal zulässige Tiefe bestimmt werden, bis zu der eine Installation von EWS möglich ist.

### Karstgebiete

Karstgebiete sind bezüglich einer geothermischen Wärmenutzung durch EWS besonders problematisch. Die Problematik äußert sich beim Bohren durch Spülungsverluste, Probleme mit der Standfestigkeit und Hinterfüllung des Bohrlochs sowie Hohlräumeinstürzen. Bei Druckspülbohrungen besteht für das Grundwasser das Risiko, dass Spülflüssigkeit unkontrolliert in großen Mengen im Untergrund verschwindet und dort weitreichende Eintrübungen des Grundwassers verursacht. Diese Problematik lässt sich durch die

**Tab. 1** Kriterien für die Bewilligung von Erdwärmesonden

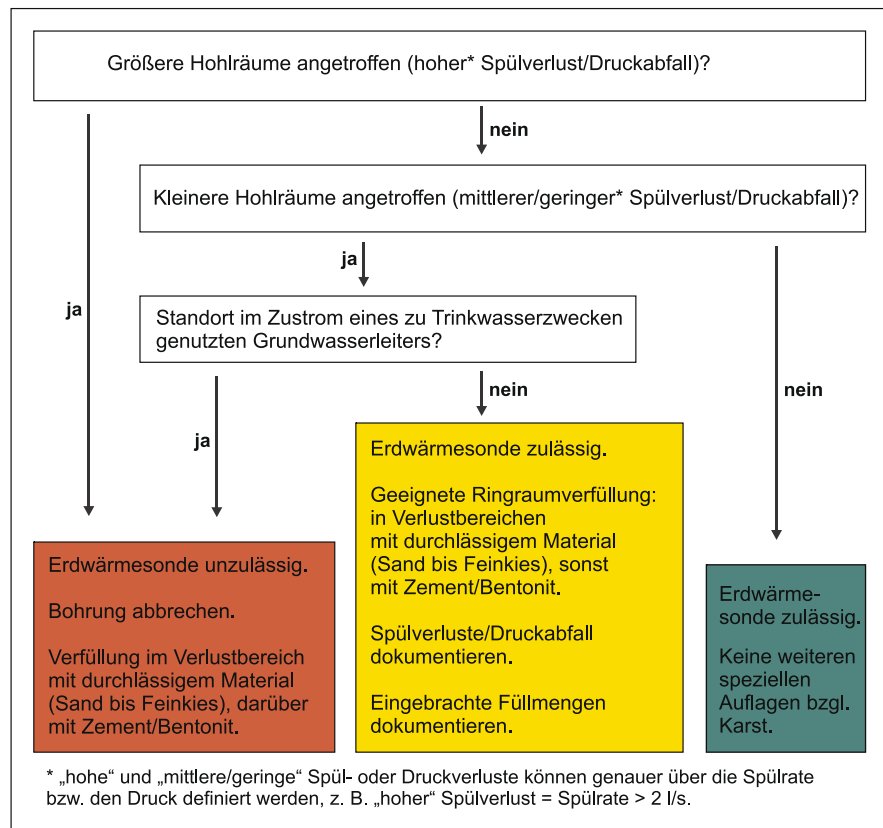
Bewilligungskriterium	Wärmenutzung durch Erdwärmesonden	Fall
Grundwasserschutzzonen und -areale (S1–S3)	unzulässig	A
Belastete Standorte (inkl. Bauschutt und Inertstoffmaterial)	unzulässig	A
Standorte mit „konkurrierender“ Nutzung (z. B. unterirdische Anlagen)	unzulässig	A
Außerhalb von Siedlungsgebieten	unzulässig	A
Karstgebiete (St. Ursanne-Fm., Oberer Muschelkalk)	unzulässig	A
Gebiete mit Gefahr des Gebirgsquellens und der Subrosion (Gipskeuper, Anhydritgruppe)	unzulässig	A
Gewässerschutzbereich $A_U$	mit speziellen Auflagen zulässig	B
Gebiete mit Kalk- und Dolomitsteinformationen	mit speziellen Auflagen zulässig	B
Grundwasserstockwerksbau, gespanntes und artesisch gespanntes Grundwasser oder stark mineralisiertes Grundwasser	mit speziellen Auflagen zulässig	B
Gebiete mit geogenen Risiken (Rutschgebiete, Ölschiefer, Gasaustritte, Gebirgsquellen, Subrosion)	mit speziellen Auflagen zulässig	B
Gebiete mit ungenügendem geologischen Wissen	mit speziellen Auflagen zulässig	B
Einflussbereich von Mineral- und Thermalquellen	mit speziellen Auflagen zulässig	B
Übrige Gebiete	mit Standardauflagen zulässig	C

System o. Serie	Stufe oder Formation	typische Mächtigkeit [m]	Fall	(regionaler) Grundwasser-Leiter	Bemerkungen	
Quartär		variabel	B	nur Schotter		
Tertiär	Pliozän	bis 60	B	nur Schotter		
	Miozän	Obere Süßwassermolasse	bis 180	B	nur Juranagelfluh	
		Obere Meeresmolasse	bis 25	C		
	Oligozän	Untere Süßwassermolasse (Tüllinger-Sch., Elsässer Molasse, Cyrenenmergel)	bis 510	B	teilw. Elsässer Molasse*	*) nur sandige Fazies bei großer Mächtigkeit, Grundgips-Sch. der Tüllinger-Sch., ev. Elsässer Molasse potenziell stark mineralisiertes GW
		Untere Meeresmolasse (Meletta-Sch., Meeressand)	bis 380	B	Meeressand, teilw. Meletta-Schichten*	* nur sandige Fazies bei großer Mächtigkeit.
		Bunte Mergel (Haustein)	bis 100	C		
		Streifige Mergel	bis 200	C		
Eozän u. Paläozän		bis 50	C			
Malm	Kalksteine des Malm (Courgenay-/ Vellerat-/ St.-Ursanne-Fm.)	bis 290–350	A/B		Potenziell verkarstet. Keine Bohrung in St. Ursanne-Fm. oder beim Antreffen großer Hohlräume.	
	Oxford-Mergel (Liesberg-Sch./ Terrain à Ch./Renggeri-Tone bzw. Effinger-Sch./Birmenstorfer-Sch.)	bis 80–160	C			
Dogger	„Oberer Dogger“ (Anceps-Athleta-Sch. bis Ferrugineus-Oolith)	20–70	C			
	Hauptrogenstein-Fm.	75–150	B		Potenziell verkarstet. Keine Bohrung beim Antreffen großer Hohlräume.	
	„Unterer Dogger“ (Blagdeni-Sch. bis Murchisonae-Sch.)	25–105	C			
	Opalinuston-Fm.	70–150	C			
Lias		15–60	B		Ölschiefer-führende Bereiche im Posidonienschiefer möglich	
Keuper	Rhät	0–5	C			
	Obere Bunte Mergel	10–40	C			
	Gansinger Dolomit	5–15	C			
	Untere Bunte Mergel	0–15	C			
	Schilfsandstein-Gruppe	0–20	B			
	Gipskeuper	60–150	A		Anhydrit führend und lösliche Bestandteile (Salz, Gips)	
	Lettenkohle	0–10	C			
Muschelkalk	Trigonodus-Dolomit (Oberer Muschelkalk)	20–25	A		Potenziell verkarstet. Potenziell stark mineralisiertes GW	
	Hauptmuschelkalk (Oberer Muschelkalk)	35–55	A		Potenziell verkarstet. Potenziell stark mineralisiertes GW	
	Anhydritgruppe (Mittlerer Muschelkalk)	45–130	A	nur Dolomitzone	Anhydrit-führend und lösliche Bestandteile (Salz, Gips). In Dolomitzone potenziell verkarstet und potenziell stark mineralisiertes GW	
	Wellengebirge (Unterer Muschelkalk)	35–45	C			
Bunt-sandstein		25–100	B	nicht Röt		
Grundgebirge (inkl. Permokarbon)			C			

**Abb. 1** Stratigraphische Tabelle der Region Basel mit Hinweisen zur Wärmenutzung aus dem Untergrund. In geologischer Einheit ist eine Erdwärmesonde (A) nicht zulässig, (B) mit speziellen Auflagen zuläs-

sig oder (C) mit Standardauflagen zulässig. Stratigraphie und Mächtigkeitsangaben: Fischer (1969)

**Abb. 2** Mögliches Vorgehen bei Erdwärmesondenbohrungen in Karstgebieten



Verwendung moderner Inlochhammerverfahren, die mit einer Druckluftspülung arbeiten, vermeiden. Eine Grundwasserverschmutzung kann auch beim Einbringen von Injektionsmittel entstehen. Injektionen werden bei Bohrungen in Karstgebieten häufig angewandt, um der oben genannten Problematik durch Karsthohlräume zu begegnen (Kutzner 1991). Es ist möglich, dass dazu Zementzusätze verwendet werden, die toxisch sind (Eiswirth et al. 1999, Ruckstuhl et al. 2002, 2003). Das Risiko einer Grundwasserverschmutzung ist in Karstgebieten als besonders hoch einzustufen, weil Schadstoffe in Karströhren besonders weit transportiert werden können (z. B. White 1999). Außerdem können durch den Bohrvorgang dauerhaft neue Wasserwegsamkeiten entstehen oder durch das Einbringen von Zement bestehende Wasserwegsamkeiten plombiert werden, sodass sich die hydraulischen Verhältnisse im Untergrund ändern. Dabei muss berücksichtigt werden, dass in allen Karstgebieten zumindest vorübergehend mit einer Wasserführung zu rechnen ist.

Auf behördlicher Seite kann diesen Risiken auf verschiedene Weise Rechnung getragen werden. In manchen Kantonen der Schweiz sind EWS in Karstgebieten generell nicht zulässig. In ausgedehnten Karstgebieten wird durch eine solche Regelung die oberflächennahe Erdwärmenutzung als regenerative Energiequelle weiträumig verhindert. Es ist jedoch auch möglich, differenzierte Lösungen zu finden. Die

Bewilligungsbehörde kann ein spezielles Vorgehen beim Bau von EWS-Anlagen in Karstgebieten vorschreiben. Dabei können sowohl die tatsächliche Situation am Standort (Vorhandensein von Hohlräumen), als auch raumplanerische Gesichtspunkte (Grundwassernutzung im Abstrom) berücksichtigt werden (Abb. 2).

Im Gebiet des Schweizer Juras, für welches das vorgestellte Erdwärmenutzungskonzept entwickelt wurde, kommen drei regional bedeutende Grundwasserleiter vor, die verkarstet sind oder sein können. Diese Grundwasserleiter sind an geologische Formationen gebunden, die auch in Teilen Süddeutschlands eine weite Verbreitung haben (vgl. Abb. 1):

- die Kalk- und Dolomitsteine des Oberen Muschelkalks (Hauptmuschelkalk, Trigonodusdolomit) zusammen mit der darunterliegenden Dolomitzone des Mittleren Muschelkalks;
- der Hauptrogenstein (Oberer Dogger);
- die Kalksteine des Malms: St. Ursanne-Formation („Rauracien-Korallenkalk“), Courgenay- und Velleratformation („Sequankalk“).

Dabei sind die St. Ursanne-Formation und der Obere Muschelkalk besonders anfällig für Verkarstungen. EWS sind im Kanton Basel-Landschaft in diesen beiden Formationen deshalb unzulässig, während sie in anderen Kalk- und Dolo-

mitsteinformationen bei einem Vorgehen entsprechend des Entscheidungsbaums Abbildung 2 zulässig sind.

### Gebiete mit Gefahr des Gebirgsquellens und der Subrosion

Beim Bau einer EWS können aufgrund der Auflockerungszone um das Bohrloch und einer nicht vollständigen Hinterfüllung die hydraulischen Verhältnisse im Untergrund verändert werden und neue Wegsamkeiten für das Grundwasser entstehen. Der Zutritt von Wasser zu Gips oder Salz führenden Schichten kann zur Lösung dieser Bestandteile und dadurch zu Auslaugungserscheinungen führen (Gipskarst, Salzkarst). Folge können Senkungen an der Erdoberfläche (Subrosion) sein. In Gebieten mit anhydrithaltigen Schichten kann bei Wasserzutritt Anhydrit in Gips umgewandelt werden. Dies ist verbunden mit einer erheblichen Volumenzunahme und der Entstehung hoher Quelldrücke. Der Quellvorgang kann das Bohrloch und die EWS zerstören. Im Extremfall können die Quelldrücke zu Hebungen an der Erdoberfläche führen. Dieses Phänomen ist auch aus dem Straßen und Tunnelbau bekannt (Hauber et al. 2005). Weniger bekannt hingegen sind dabei die im Gebirge ablaufenden Prozesse (Anagnostou 2007).

Die Vorstellung, dass ohne Risiko in sulfathaltige Schichten hineingebohrt werden kann, solange sie nicht mit Aquiferen verbunden werden, greift zu kurz. Im Schweizer Jura folgen beispielsweise im Liegenden des Gipskeupers zunächst Dolomitsteine und Mergel des Lettenkeupers und anschließend Kalk- und Dolomitsteine des Oberen Muschelkalks (vgl. Abb. 1). Der Obere Muschelkalk bildet einen regional bedeutsamen Aquifer. Bei Überdeckung mit geringdurchlässigen Keuperschichten liegt das Grundwasser dort häufig gespannt vor. Beim Durchfahren der Keuperschichten in den Oberen Muschelkalk ist ein Wasserfluss entlang der Bohrung nicht einfach zu kontrollieren und ein Aufsteigen von Wasser in den Gipskeuper möglich. Aber auch wenn der Gipskeuper nicht durchfahren wird, können Quellerscheinungen nicht ausgeschlossen werden. Grundwassergeringleiter sind nicht immer „trocken“, sondern können Formationswasser enthalten. Die Prozesse, die zum Gebirgsquellen führen, sind noch wenig verstanden. Wird das hydraulische Potenzial im Untergrund durch eine EWS-Bohrung verändert, sind die Auswirkungen schwer vorhersehbar. Ob durch eine EWS-Bohrung ein Zutritt von Wasser zu quellfähigen Gesteinen möglich wird, ist – wenn überhaupt – nur bei einer Kenntnis der geologischen-hydrogeologischen Verhältnisse und einem Monitoring zu beurteilen, bei welchem Zeitreihen hydraulischer Parameter und ihre mögliche Veränderung durch den Bohrvorgang erfasst werden. Doch selbst wenn genaue regionale und lokale hydrogeologische Kenntnisse vorhanden sind ist unklar, wie das Quellrisiko beurteilt werden soll.

Ein derzeit aktuelles Beispiel für das Phänomen des Gebirgsquellens ist die Stadt Staufen, in der die historische



**Abb. 3** In der historischen Altstadt Staufens wurden über 250 Häuser durch Hebungen des Untergrunds beschädigt. Die Hebungen wurden ausgelöst durch die Installation von Erdwärmesonden, welche zu Gebirgsquellen im darunterliegenden Gipskeuper geführt hat

Altstadt durch Hebungen des Untergrunds stark beschädigt wurde (Abb. 3). Die Hebungen wurden mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit durch den Bau einer EWS-Anlage ausgelöst (LGRB 2010, Goldscheider & Bechtel 2009). Es handelt sich um den derzeit einzigen bekannt gewordenen Fall, bei dem es in Zusammenhang mit einer Installation von EWS zu größeren Schäden durch Gebirgsquellen kam. Dem gegenüber stehen beispielsweise über 600 EWS-Bohrungen im Gipskeuper in Baden-Württemberg ohne Schäden durch Gebirgsquellen. In Staufen sind sicherlich mehrere ungünstige Situationen aufeinander getroffen (anhydritführende Gesteine; Anbohren von gespanntem Grundwasser; unsachgemäße Bohrlochhinterfüllung; Lage in einer historischen Altstadt, in der die wenigsten Häuser ein modernes Fundament aufweisen). Um jedoch beurteilen zu können, ob Staufen ein Einzelfall bleiben wird, reicht die Erfahrung von erst wenigen Jahren, in denen EWS-Bohrungen mit einer gewissen Häufigkeit durchgeführt werden, noch nicht aus. Dies gilt insbesondere, weil die beim Gebirgsquellen stattfindenden Prozesse bisher noch nicht verstanden sind (Hauber et al. 2005, Anagnostou 2007).

Entsprechend des Erdwärmenutzungskonzepts Basel-Landschaft darf wegen der Risiken des Gebirgsquellens und der Subrosion nicht in sulfat- oder salzhaltige geologische Schichten hineingebohrt werden. Da Sulfatanteile im Bohrklein oftmals schwer zu erkennen sind, betrifft die Regelung in Basel-Landschaft die geamtete Gipskeuperformation und die Sulfatschichten des Mittleren Muschelkalks (Anhydritgruppe) (vgl. Abb. 1).

Gewässerschutzbereich  $A_U$

Der Gewässerschutzbereich  $A_U$  in der Schweiz ist bezüglich seiner Ausdehnung vergleichbar der Schutzzone III B in Deutschland, die dort das gesamte Einzugsgebiet einer Wasserfassung umfasst. Im Gegensatz zu einer Schutzzone ist der Gewässerschutzbereich  $A_U$  aber unabhängig von einer Trinkwassernutzung. Er dient nicht dem Schutz einer bestimmten Wasserfassung, sondern dem flächendeckenden und nachhaltigen Schutz der Ressource Grundwasser. Der Gewässerschutzbereich  $A_U$  ist in der Schweiz definiert als Gebiet mit zur Trinkwassergewinnung nutzbarem unterirdischen Gewässer sowie die zu dessen Schutz notwendigen Randgebiete (Abb. 4).

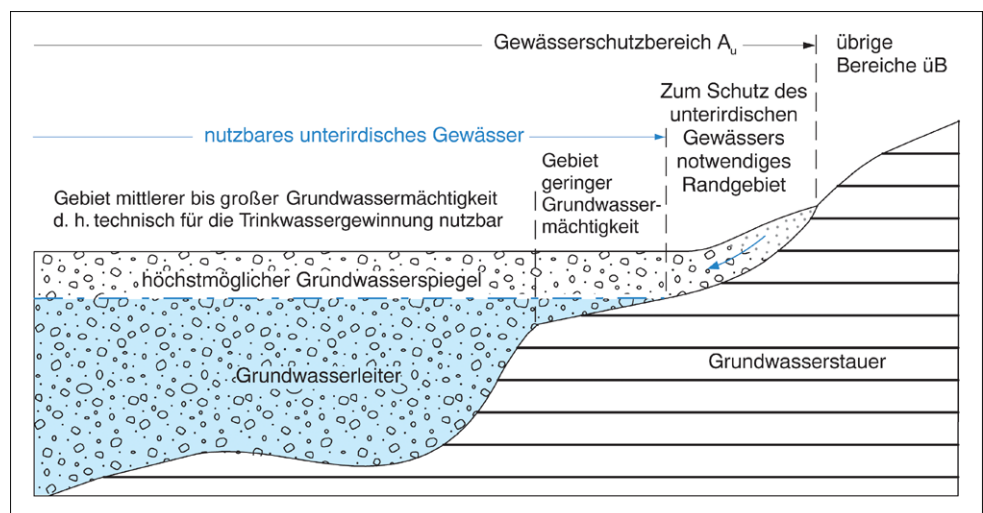
Im  $A_U$  besteht die Gefahr der Verschmutzung des geschützten Grundwassers. Es ist möglich, dass Schadstoffe durch den Bohrvorgang beim Sondenbau oder, im Falle eines Defekts, beim Betrieb der Anlage in das Grundwasser gelangen. Beispielsweise haben chemische Zusätze im Zement der Bohrlochhinterfüllung (Eiswirth et al. 1999, Ruckstuhl et al. 2002, 2003) und in der Wärmeträgerflüssigkeit (Klotzbücher et al. 2007) ein grundwassergefährdendes Potenzial. Beim Bohren verwendetes Spülwasser muss Trinkwasserqualität haben, damit keine Keime in das Grundwasser gelangen. Es ist außerdem möglich, dass die Wiederherstellung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung

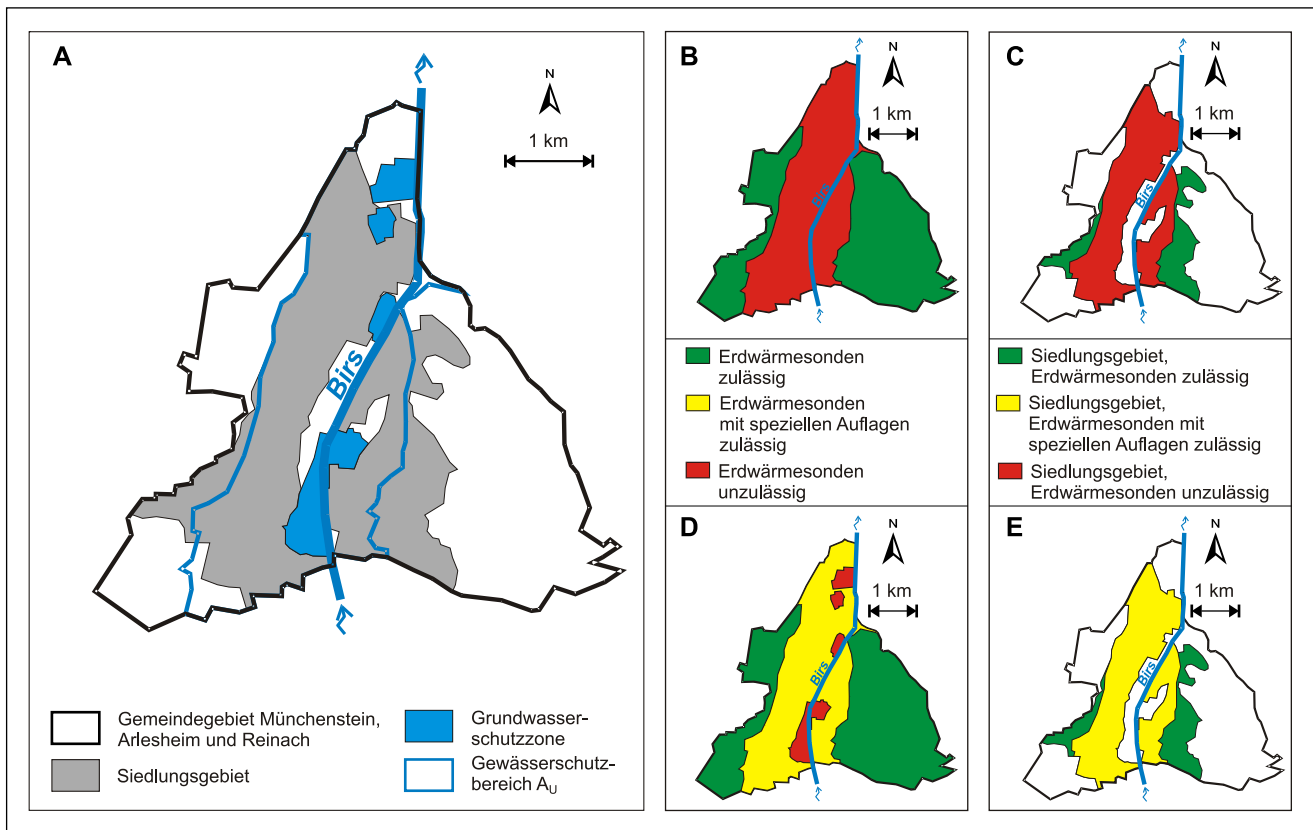
nach dem Sondenbau mangelhaft ist (durch die Auflockerungszone um das Bohrloch, durch nicht vollständig hinterfüllte Bohrlochwände). Dadurch kann eine dauerhafte Verbindung von der Oberfläche in das Grundwasser geschaffen werden, wodurch bei oberflächennahen Kontaminationen Schadstoffe ins Grundwasser gelangen können.

Da der Gewässerschutzbereich  $A_U$  vor allem in Flusstälern vorkommt, wo häufig auch die größten Siedlungsgebiete liegen, könnten die meisten EWS-Vorhaben nicht realisiert werden, wenn sie dort generell unzulässig wären. Am Beispiel des unteren Birstals südlich von Basel kann veranschaulicht werden, wie sich eine Bewilligung von EWS (mit speziellen Auflagen) innerhalb des Gewässerschutzbereichs  $A_U$  auf eine mögliche Verbreitung von EWS auswirkt. Die Besiedlung des Birstals konzentriert sich auf die Flussebene der Birs, welche sich ungefähr mit dem Gewässerschutzbereich  $A_U$  deckt (Abb. 5A). Diese Situation ist typisch für viele Flusstäler in dicht besiedelten Gebieten. Ohne eine Bewilligung von EWS mit speziellen Auflagen im Gewässerschutzbereich  $A_U$  könnten in den meisten besiedelten Gebieten im Kanton Basel-Landschaft keine EWS-Vorhaben bewilligt werden (Abb. 5C).

Im Kanton Basel-Landschaft sind EWS innerhalb  $A_U$  zulässig, wenn keine tatsächlich vorhandene Trinkwassernutzung gefährdet wird (also außerhalb von Grundwasserschutzzonen). Um das Risiko einer Grundwasserverschmutzung jedoch zu minimieren, gelten für die Bewilligung von EWS innerhalb  $A_U$  spezielle Auflagen. Dazu gehören besondere Anforderungen an die Wärmeträgerflüssigkeit, Meldepflicht einer Leckage und eine dauerhafte Verrohrung von Teilstrecken oder Einbringen von textilen Packern im Bereich der Lockergesteinsstrecke bis in den Grundwasserstauer. Die speziellen Auflagen umfassen bei großen Anlagen (EWS-Felder) außerdem Berechnungen oder Simulationen zur thermischen Beeinflussung des Grundwassers (z. B. Hähnlein et al. 2010, Pannike et al. 2006).

Abb. 4 Schematische Darstellung des Gewässerschutzbereichs  $A_U$  (aus BUWAL 2004)





**Abb. 5** Nutzungsmöglichkeiten geothermischer Energie im Gewässerschutzbereich  $A_U$  am Beispiel des unteren Birstals. Der Gewässerschutzbereich  $A_U$  entspricht ungefähr der Flussebene. Dort befinden sich auch die meisten Siedlungsgebiete (A). Bei einem generellen Verbot von Erdwärmesonden innerhalb  $A_U$  ist zwar weniger als das halbe Gemeindegebiet vom Verbot betroffen (B), jedoch der Großteil des

Siedlungsgebiets (C). Bei einer Bewilligung mit speziellen Auflagen kann die Nutzung geothermischer Energie durch Erdwärmesonden fast im gesamten Gebiet der Gemeinden, und im gesamten Siedlungsgebiet genutzt werden (D und E). Nicht berücksichtigt sind andere Kriterien als Gewässerschutzbereiche und Grundwasserschutzzonen

## Grundwasserstockwerksbau

Oftmals werden nur die oberflächennahen Grundwasserleiter genutzt. In tieferen Stockwerken ist die Qualität des Grundwassers meist unbekannt, und salinares Grundwasser ist dort häufiger zu erwarten. Bei einer Verbindung der Grundwasserstockwerke durch Bohrungen kann sich die Qualität im oberen Stockwerk verschlechtern (Zaporozec 1981). Umgekehrt kann ein verschmutzter oberflächennaher Aquifer einen geschützten tieferen beeinträchtigen, wenn diese Aquifere durch Bohrungen verbunden werden (La Vigna et al. 2010). Außerdem können sich durch die Verbindung von Grundwasserstockwerken die hydraulischen Verhältnisse im Untergrund ändern (Zaporozec 1981) mit nur schwer abschätzbaren Folgen. Eine Änderung des Fließfelds kann zum Beispiel zur Mobilisierung von Schadstoffen im Untergrund führen (Huggenberger et al. 2010). Weitere potenzielle Risiken beinhalten das Zuführen von Wasser zu leicht löslichen oder quellfähigen Schichten (Epting et al. 2009, vgl. auch Abschnitt zum Gebirgsquellen und Subrosion) oder die Minderung der Ergiebigkeit von

Grundwasserbrunnen (wie im Fall Schorndorf). Aus diesen Gründen ist eine Verbindung von Grundwasserstockwerken durch EWS-Bohrungen unbedingt zu vermeiden.

Moderne Bohrtechniken (z. B. die Verwendung spezieller Packer) und ein angepasster Ausbau der Bohrung (z. B. dauerhaft einzementierte Sperrrohre) können die Verbindung von Grundwasserstockwerken durch Bohrungen verhindern. Jedoch wird der Aufwand bei der Erstellung des Bohrlochs dadurch deutlich erhöht, sodass die Höhe der Investitionskosten die Wirtschaftlichkeit der Anlage in Frage stellen kann. Darüber hinaus haben Bewilligungsbehörden wenig Möglichkeit, die Qualität der technischen Ausführung zu kontrollieren. Aus diesen Gründen wird in Basel-Landschaft als spezielle Auflage die Bohrtiefe so begrenzt, dass in Gebieten mit Grundwasserstockwerksbau ein Abstand von 10 % der Bohrtiefe, mindestens aber 10 m zum unteren Grundwasserstockwerk eingehalten werden muss. Dies ist durch eine angepasste geologische Begleitung der Bohrung sicherzustellen.



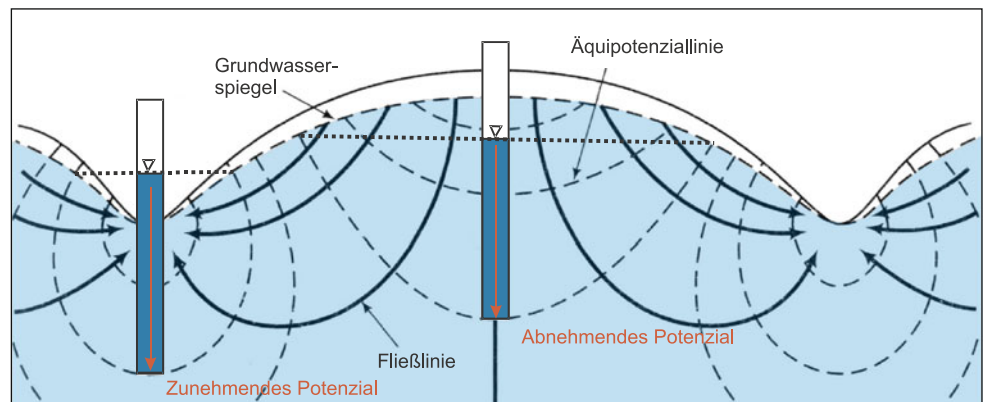
Gespanntes Grundwasser

Der Austritt von artesisch gespanntem Grundwasser (Abb. 6) führt im Bereich der Bohrstelle vorübergehend zu Verschmutzungen und, wenn das Wasser nicht schnell abgeleitet werden kann, möglicherweise auch zu Schäden. In manchen Situationen kann auch ein nahegelegener Vorfluter von Verschmutzungen betroffen sein, denn oft treten mit dem Wasser auch die Spülflüssigkeit sowie der zur Abdich-



Abb. 6 Der Austritt artesisch gespannten Grundwassers führt zu Verschmutzungen und kann Schäden verursachen. Foto: Wolfgang Engesser

Abb. 7 Bohrungen mit Wasserspiegel im Bohrloch bei Vollverrohrung. Während in Höhenlagen das hydraulische Potenzial mit der Tiefe abnimmt, nimmt dieses in den Tälern mit der Tiefe zu. Dies begünstigt das Auftreten artesisch gespannten Grundwassers in Tallagen, wenn der Grundwasserleiter nach oben von einer undurchlässigen Schicht begrenzt wird. Ergänzt nach Hubbert (1940) mit Zustimmung University of Chicago Press, © 1940



tung verwendete Zement aus. Das Anbohren von „nur“ gespanntem Grundwasser kann ebenfalls problematisch sein und bleibt häufig unbemerkt. Wohin das Grundwasser fließt, und welche Folgen das für die Umwelt hat, ist in der Regel nicht ersichtlich.

In Gebieten mit ausgeprägter Topographie ist in Tallagen das Risiko, dass bei einer EWS-Bohrung artesisch gespanntes Grundwasser angetroffen wird, besonders hoch. Abbildung 7 zeigt schematisch die Zunahme des hydraulischen Potenzials mit der Tiefe in Tallagen. Dies führt zu artesisch gespannten Verhältnissen, sobald ein Grundwasserleiter nach oben von einer geringdurchlässigen Schicht begrenzt wird.

Gespräche mit erfahrenen Geologen, die viele tiefer gehende Bohrprojekte begleiten, haben verdeutlicht, dass sich Schäden beim Antreffen artesisch gespannten Grundwassers durchaus vermeiden lassen. Voraussetzungen dazu sind ein gut geschultes Bohrpersoneel und die Bereithaltung von geeignetem Material zur Abdichtung des Bohrlochs an jeder Bohrstelle. Letzteres ließe sich durch Kontrollen seitens der Bewilligungsbehörden überprüfen.

Anfang November 2009 ging der Fall von Wiesbaden durch die Medien, wo bei einer Geothermiebohrung in 130 m Tiefe ein artesisch gespannter Grundwasserleiter angefahren wurde. Es traten bis zu 6.000 l/min Wasser an der Oberfläche aus, und es dauerte zwei Tage, bis der Wasserfluss gestoppt werden konnte. Dies ist sicher ein extremer Sonderfall. Eine telefonische Umfrage unter Bewilligungsbehörden, Geologen und Bohrunternehmen hat jedoch ergeben, dass Schäden durch Arteser immer wieder auftreten und kein Einzelfall sind. Eine Quantifizierung des Risikos ist aber nicht möglich, weil systematische Untersuchungen hierzu fehlen. In der Schweiz bieten Versicherer seit einigen Jahren eine „Arteserversicherung“ für Bohrfirmen an, jedoch sind die Statistiken der Versicherungsunternehmen nicht zugänglich.

Im Kanton Basel-Landschaft ist eine Bewilligung von EWS in Gebieten mit gespanntem Grundwasser mit speziellen Auflagen verbunden. Die speziellen Auflagen schreiben

eine Begrenzung der Bohrtiefe vor, sodass das Anbohren des gespannten Grundwasserleiters verhindert wird. Dies erfordert genaue Kenntnisse der Schichten im Untergrund sowie der lokalen und regionalen Fließsysteme. Außerdem muss an der Bohrstelle immer Material zur Abdichtung des Bohrlochs vorhanden, und das Bohrpersoneel entsprechend ausgebildet sein. Eine gewisse Absicherung, dass diese Standards eingehalten werden, wird dadurch zu erreichen versucht, dass nur Bohrfirmen mit FWS-Gütesiegel (FWS 2007) für EWS-Bohrungen zugelassen sind.

## Diskussion und Schlussfolgerungen

In den meisten urbanen Gebieten Europas nimmt der Anspruch auf die Nutzung des Untergrundes zu. Raum- und Ressourcennutzungen kommen insbesondere in den dicht besiedelten und industriell intensiv genutzten Flussebenen „übereinander gestapelt“ in beinahe beliebigen Kombinationen vor. Daraus ergeben sich gegenseitige Beeinflussungen und Gefährdungen (Epting et al. 2008). Weil aber Vorgaben für die Nutzung des Untergrundes oftmals ebenso wie die dazu notwendigen dreidimensionalen geologischen Grundlagen fehlen, sind Nutzungskonflikte vorprogrammiert. Für die Wahrung der öffentlichen Interessen ist eine Koordination der Nutzung des Untergrundes erforderlich (Ferguson 2009). Das Ziel dabei ist, sowohl den Bau von geothermischen Anlagen zu fördern, als auch die Quantität und Qualität der Grundwasserressourcen langfristig zu sichern und mögliche Risiken zu reduzieren. Das vorgestellte Erdwärmenutzungskonzept kann mit seinen Vorgaben diesem Ziel dienen und damit zu einer Versachlichung von Nutzungskonflikten beitragen.

Geothermiebohrungen haben in jüngster Zeit in Siedlungsgebieten erhebliche Gebäudeschäden verursacht und entsprechend eine große mediale Aufmerksamkeit erhalten. Auch wenn die meisten EWS-Projekte ohne Probleme realisiert werden, können die Folgen einer unsachgemäßen Ausführung von EWS-Bohrungen dramatisch sein. Ob angesichts der immer häufigeren Installation von EWS (Sanner et al. 2003) die bekannt gewordenen Fälle in Staufen, Wiesbaden und Schorndorf Einzelfälle bleiben werden, ist derzeit schwer abschätzbar. Eine systematische Erfassung und Quantifizierung von Schäden, die durch eine Installation von EWS hervorgerufen wurden, fehlt bis heute.

Die in der Vergangenheit bei EWS-Bohrungen aufgetretenen Probleme zeigen, dass bei geologischen Planungsbüros und Bohrunternehmern hydrogeologische Aspekte bisher zu wenig Berücksichtigung finden. Risiken in Zusammenhang mit Grundwasser werden meist nur gesehen, sofern dieses als Trinkwasser genutzt wird. Den Wasserzirkulationssystemen im Festgestein des tieferen Untergrundes wird wenig Beachtung geschenkt. Dabei spielen diese nicht nur in regional bedeutsamen Aquiferen, sondern

auch bei kleineren Vorkommen und in vermeintlich „trockenen“ geringleitenden Formationen eine Rolle. Insbesondere die Kenntnisse der Gesteins-Wasserwechselwirkungen in Gebieten mit quellfähigen und löslichen Einheiten im Untergrund sind noch gering und müssen erweitert werden. Dies zeigen beispielhaft die großen Probleme in Zusammenhang mit dem Quellen von anhydritführenden Tonsteinen, die vor allem im Tunnelbau auftreten (Hauber et al. 2005, Anagnostou 2007).

In der Bewilligungspraxis gilt es, den zu erwartenden Nutzen gegen mögliche Risiken sowie private und öffentliche Interessen gegeneinander abzuwägen. Je differenzierter diese Abwägungen ausfallen sollen, desto mehr Kenntnisse über die geologischen Verhältnisse am Standort und in dessen weiterer Umgebung sowie die dort stattfindenden hydrogeologischen Prozesse sind erforderlich. Bei einer liberalen Haltung im Bereich des Vollzugs der Umweltgesetzgebung besteht die Gefahr von negativen Auswirkungen von geothermischen Anlagen für die Umwelt und für die künftige Nutzung des Untergrundes für andere Zwecke wie z. B. Verkehr. Im Fall einer großen Anzahl von EWS-Bohrungen in Siedlungsgebieten sind Veränderungen der hydrogeologischen Verhältnisse ohne geeignete Monitoringsysteme (hydraulisches Potenzial, tiefenabhängige Temperatur; Epting et al. 2010) nur schwierig vorherseh- oder quantifizierbar. Es macht wenig Sinn in Gebieten mit geogenen Risiken in unmittelbarer Nähe von Siedlungsgebieten, Hochleistungsstrassen oder Bahnlinien Infrastruktureinrichtungen mit einzelnen Projekten zu gefährden.

Bei einer sorgfältigen Erkundung und Planung sind in vielen Fällen differenzierte, ortsspezifische Lösungen möglich. Da der Aufwand für die Betreiber einer EWS-Anlage jedoch in einem „vernünftigen“ Rahmen bleiben soll, sind die geologisch-hydrogeologischen Gutachten, die von den Bauherren finanziert werden müssen, insbesondere in geologisch unbekanntem Gebieten oder in komplexen Situationen für eine fundierte Entscheidung oftmals ungenügend. Deshalb kommt staatlichen Stellen, welche die öffentlichen gegen private Interessen sichern, eine wichtige Rolle zu. Die staatlichen geologischen Dienste haben die Aufgabe, die Planung zu unterstützen, indem sie geologische Informationen bereitstellen und Konzepte für die Wärmenutzung des Untergrundes entwickeln. Je spezifischer vorhandene Daten aufbereitet sind, desto größer ist ihr Nutzen. Indem die geologischen Dienste Planungshilfsmittel zur Verfügung stellen, können sie eine Erdwärmenutzung entscheidend fördern und gleichzeitig den Schutz der Ressource Grundwasser verbessern, und konkurrierende oder sich ausschließende Nutzungen verhindern. Solche Hilfsmittel sind Web-basierte geothermische Karten oder Informationssysteme, die auf dreidimensionalen geologischen Modellen und raumplanerischer Information basieren (Panteleit & Reichling 2006, Ondreka et al. 2007), und numerische Simulationen zur Wärmebewirtschaftung (Hähnlein et al. 2010,

Hecht-Méndez et al. 2010, Pannike et al. 2006). Ihre Inhalte können nach Bedarf mit dem aktuellen Kenntnisstand der Risiken abgeglichen werden.

Für die Beurteilung von Risiken von Geothermieanlagen sind gute Kenntnisse der lokalen Geologie und Hydrogeologie notwendig. Je besser die Datenlage, desto differenzierter können Randbedingungen bei Bewilligungen formuliert werden. Beim Fehlen von guten geologisch-hydrogeologischen Kenntnissen ist eine restriktivere Bewilligung solcher Anlagen erforderlich. Neben geologischen Kenntnissen kommt jedoch auch der Bohr- und Ausbautechnik eine große Bedeutung zu. Die Bewilligungsbehörden müssen verbindliche Standards bei der Erstellung von EWS-Anlagen bezüglich Qualitätssicherung, technischen Anforderungen und Know-how des Personals festlegen, wie sie beispielsweise die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz empfiehlt (FWS 2007). Die bestehende Technik kann bezüglich einer Minimierung von Risiken sicher noch weiter entwickelt werden. Bei einer sorgfältigen Planung und entsprechender Wahl der Technik können in gewissen Fällen Geothermievorhaben auch in problematischeren Gebieten sicher durchführbar sein.

Konkrete Regeln können helfen, viele Risiken zu vermeiden. Eine hundertprozentige Sicherheit gibt es auch bei dieser Energiequelle nicht. Jedoch gilt es, die Risiken mit dem Nutzen in Bezug zu setzen und mit anderen Energiequellen zu vergleichen. Die Regeln können aber nicht ein Prozessverständnis und eine Kenntnis der lokalen geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse ersetzen. Im Gegenteil, die Beurteilung der Kriterien des Erdwärmekonzepts machen diese Kenntnisse zu einer notwendigen Voraussetzung. Hier kommt der Hydrogeologie in Zukunft eine wichtige Rolle zu.

**Danksagung** Wir danken Dr. Wolfgang Engesser (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, LGRB) für die Bereitstellung des Fotos in Abbildung 6.

## Literatur

- Anagnostou, G.: Design uncertainties in tunneling through anhydritic swelling rocks. *Felsbau* **25**(4), 48–54 (2007)
- AUE: Erdwärmekonzept Basel-Landschaft. Konzept für die Nutzung der Erdwärme zu Heiz- und/oder Kühlzwecken durch Erdwärmesonden, Erdregister, Wärmekörbe, Energiepfähle und Grundwasserwärmepumpen im Kanton Basel-Landschaft. Februar 2010. Herausgegeben vom Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Landschaft, Liestal (2010). Erhältlich unter [www.bl.ch/erdwaerme](http://www.bl.ch/erdwaerme)
- BAFU: Vollzugshilfe Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern (2009)
- BBergG: Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2833) (1980)
- Blum, P., Campillo, G., Münch, W., Köbel, T.: CO<sub>2</sub> savings of ground source heat pump systems—a regional analysis. *Renew. Energy* **35**(1), 122–127 (2010)
- BUWAL: Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (heute Bundesamt für Umwelt BAFU), Bern (2004)
- Eiswirth, M., Hötzel, H., Ohlenbusch, R., Schnell, K.: Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit von Baustoffen im Grundwasser. *WasserAbwasserPraxis* **2**, 33–38 (1999)
- Epting, J., Huggenberger, P., Butscher, C.: Thermal groundwater use in urban areas—spatiotemporal scales and concepts. In: Abstract book Groundwater Quality 2010, the 7th International IAHS Groundwater Quality Conference, Zurich, Switzerland, 13–18 June 2010
- Epting, J., Huggenberger, P., Rauber, M.: Integrated methods and scenario development for urban groundwater management and protection during tunnel road construction: a case study of urban hydrogeology in the city of Basel. Switzerland. *Hydrogeol. J.* **16**, 575–591 (2008)
- Epting, J., Romanov, D., Huggenberger, P., Kaufmann, G.: Integrating field and numerical modeling methods for applied urban karst hydrogeology. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **13**, 1163–1184 (2009)
- Ferguson, G.: Unfinished business in geothermal energy. *Ground Water* **47**(2), 167 (2009)
- Fischer, H.: Übersichtstabelle zur Geologie der weiteren Umgebung von Basel (südlicher Sundgau, östliche Ajoie, Delsberger Becken, Basler und Aargauer Tafeljura bis Fricktal, Dinkelberg). Geographisch-ethnologische Gesellschaft, Basel (1969)
- FWS: Gütesiegel für Erdwärmesonden-Bohrfirmen – Regelement. Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS), Bern (2007)
- Goldscheider, N., Bechtel, T.D.: Editors' message: The housing crisis from underground—damage to a historic town by geothermal drillings through anhydrite. Staufen, Germany. *Hydrogeol. J.* **17**, 491–493 (2009)
- GschG: Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991. Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, Bern (1991)
- GschV: Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998. Schweizerischer Bundesrat, Bern (1998)
- Guerrero, J., Gutiérrez-Santolalla, F., Lucha, P.: Paleosubidence and active subsidence due to evaporite dissolution in Zaragoza area (Huerva River valley, NE Spain): processes, spatial distribution and protection measures for transport routes. *Eng. Geol.* **72**(3–4), 309–329 (2004)
- Hähnlein, S., Kübert, M., Walker-Hertkorn, S., Bayer, P., Blum, P.: Rechtliche Rahmenbedingungen bei der thermischen Grundwasserbewirtschaftung. *bbr Sonderheft Geothermie*, 14–20 (2009)
- Hähnlein, S., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., Grathwohl, P.: Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden. *Grundwasser* **15**(2), 123–133 (2010)
- Hauber, L., Jordan, P., Madsen, F., Nüesch, R., Vöggtli, B.: Tonminerale und Sulfate als Ursache für deuckhafteres Verhalten von Gesteinen. Bericht Forschungsauftrag 55/92 und 52/96 auf Antrag des Bundesamtes für Straßenbau (ASTRA), Bern (2005)
- Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P.: Evaluating MT3DMS for heat Transport simulation of closed geothermal systems. *Ground Water* (2010). doi:[10.1111/j.1745-6584.2010.00678.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00678.x) (in Druck)
- Hubbert, M.K.: The theory of ground-water motion. *J. Geol.* **48**(8), 785–944 (1940)
- Huggenberger, P., Epting, J., Affolter, A., Zechner, E.: Concepts for transboundary groundwater management in a region of extensive groundwater use and numerous contaminated sites. In: International Conference “Transboundary Aquifers: Challenges and New Directions” (ISARM2010), akzeptierter Konferenzbeitrag, 6.–8. Dezember 2010, Paris (2010)
- Klotzbücher, T., Kappler, A., Straub, K.L., Haderlein, S.B.: Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. *Geothermics* **36**(4), 348–361 (2007)

- Kübert, M., Walker-Hertkorn, S., Blum, P., Bayer, P., Hähnlein, S.: Praktische Hinweise zur Genehmigungspraxis der thermischen Nutzung des Untergrundes. *bbr Sonderheft Geothermie*, 8–13 (2009)
- Kutzner, C.: *Injektionen im Baugrund*. Enke Verlag, Stuttgart (1991)
- La Vigna, F., Ciadamidaro, S., Mazza, R., Mancini, L.: Water quality and relationship between superficial and ground water in Rome (Aniene River basin, central Italy). *Environ. Earth Sci.* **60**(6), 1267–1279 (2010)
- LGRB: Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. 4. überarbeitete Neuaufl., Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart (2005)
- LGRB: Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Sachstandsbericht des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB), Freiburg i. Br. (2010)
- Ondreka, J., Rüsgen, M.I., Stober, I., Czurda, K.: GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany—Possibilities and limitations. *Renew. Energy* **32**, 2186–2200 (2007)
- Pannike, S., Kölling, M., Panteleit, B., Reichling, J., Scheps, V., Schulz, H.D.: Auswirkung hydrogeologischer Kenngrößen auf die Kältefahnen von Erdwärmesondenanlagen in Lockersedimenten. *Grundwasser* **11**(1), 6–18 (2006)
- Panteleit, B., Reichling, J.: Automatisierte Attribuierung von Bohrungsdaten mit Parametern zur Optimierung von Erdwärmesondenanlagen. *Grundwasser* **11**(1), 19–26 (2006)
- Ruckstuhl, S., Suter, M.J.-F., Giger, W.: Sorption and mass fluxes of sulfonated naphthalene formaldehyde condensates in aquifers. *J. Contam. Hydrol.* **67**, 1–12 (2003)
- Ruckstuhl, S., Suter, M.J.-F., Kohler, H.-P.E., Giger, W.: Leaching and primary biodegradation of sulfonated naphthalenes and their formaldehyde condensates from concrete superplasticizers in groundwater affected by tunnel construction. *Environ. Sci. Technol.* **36**(15), 3284–3289 (2002)
- Saner, D., Juraske, R., Kübert, M., Blum, P., Hellweg, S., Bayer, P.: Is it only CO<sub>2</sub> that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **14**, 1798–1813 (2010)
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinis, D., Rybach, L.: Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics* **32**(4–6), 579–588 (2003)
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA): SIA-Norm 384/6 Erdwärmesonden; Zürich (2010)
- Signorelli, S., Andenmatten Bertoud, N., Kohl, T., Rybach, L.: Statistik geothermische Nutzung der Schweiz für die Jahre 2002 und 2003. Schlussbericht, Bundesamt für Energie, Bern (2004)
- Tsang, C.F., Bernier, F., Davies, C.: Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays—in the context of radioactive waste disposal. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* **42**(1), 109–125 (2005)
- Verein deutscher Ingenieure (VDI): VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrundes; Düsseldorf (2000)
- WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG). Stand: BGBl. I 2010, Nr. 34, S. 823–846, ausgegeben am 30.06.2010 (2010)
- White, W.B.: Groundwater flow in karstic aquifers. In: Delleur, J.W. (Hrsg.) *The Handbook of Groundwater Engineering*, S. 18–1–18–6. CRC Press/Springer, Boca Raton/Heidelberg (1999)
- Wyss, R.: Eine Erdgasbohrung in Rothrist? *Umwelt Aargau* **44**, 31–34 (2009)
- Zaporozec, A.: Ground-water pollution and its sources. *GeoJournal* **5**(5), 457–471 (1981)