

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Geologie

Informationen
aus den
Bund/Länder-
Arbeitsgruppen
der Staatlichen
Geologischen Dienste

Informationen aus den Bund/Länderarbeitsgruppen
der Staatlichen Geologischen Dienste

PERSONENKREIS GEOTHERMIE
DER AD-HOC-ARBEITSGRUPPE GEOLOGIE

**FACHBERICHT ZU BISHER BEKANNTEN AUSWIRKUNGEN
GEOTHERMISCHER VORHABEN IN DEN BUNDESLÄNDERN**

erarbeitet für den Bund/Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO)
durch die Staatlichen Geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer (SGD)
und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
sowie des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik (LIAG)
mit der Mitwirkung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft
Klima, Energie, Mobilität und Nachhaltigkeit (BLAG KliNa),
und der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)

WIESBADEN, IM SEPTEMBER 2010

Inhalt

1	Vorwort	4
2	Auftrag	4
3	Organisation des Personenkreises Geothermie	5
4	Definitionen.....	7
5	Oberflächennahe Geothermie	8
5.1	Gefahrenpotenziale	8
5.1.1	Hydrogeologische Gefahrenpotenziale.....	9
5.1.2	Geologische Gefahrenpotenziale	10
5.1.3	Geotechnische Gefahrenpotenziale	12
5.1.4	Technische / anthropogene Gefahrenpotenziale	13
5.2	Auswirkungen auf das Grundwasser	14
5.2.1	Geohydraulische Auswirkungen	14
5.2.1.1	Absenkung des Grundwassers	14
5.2.1.2	Anhebung des Grundwasserspiegels	15
5.2.1.3	Artesischer Austritt von Grundwasser.....	16
5.2.2	Hydrochemische Auswirkungen	18
5.2.2.1	Mischung und Ausfällungen in Wässern.....	18
5.2.2.2	Lösung/Mobilisierung.....	19
5.2.2.3	Stoffeintrag (z.B. bei/von Schadenfällen).....	20
5.2.3	Thermische Auswirkungen	22
5.2.3.1	Erwärmung.....	22
5.2.3.2	Abkühlung.....	22
5.2.4	Biologische Auswirkungen.....	23
5.3	Auswirkungen auf den Untergrund	25
5.3.1	Hebungen	25
5.3.1.1	Hebungen infolge Quellvorgängen, Mineralbildung	25
5.3.1.2	Hebung infolge Vereisung.....	26
5.3.2	Suffosion, Verbruch, Einbruch, Setzung.....	27
5.4	Auswirkungen auf die Umwelt	32
5.4.1	Verschmutzungen von Oberflächengewässern	32
5.4.2	Verschmutzungen von Grundstücken.....	33
5.4.3	Ausgasung.....	35
5.5	Auswirkung auf Anlagentechnik	36
5.5.1	Gasdiffusion in PE-Sonde.....	36
5.5.2	Verockerung bei Schluckbrunnen.....	37
5.6	Häufigkeit der Auswirkungen.....	38
6	Auswirkungen tiefegeothermischer Anlagen	39
6.1	Risiken durch unerwartete geologische Verhältnisse	39
6.2	Fündigkeitsrisiko	40
6.3	Bohrrisiko.....	40
6.4	Betriebsrisiko (Dauerhaftigkeit).....	41
6.5	Betriebstechnisches Risiko.....	41
6.6	Risiken für die Umwelt.....	42

6.7	Seismisches Risiko	42
7	Zusammenfassung und Fazit	45
7.1	Erkenntnisse aus der Aufgabenstellung	45
7.2	Bislang bekannte Auswirkungen.....	45
7.3	Nutzen von Synergien	46
7.4	Die Rolle der SGD	47
8	Literatur	48
9	Abbildungsverzeichnis.....	50
10	Anlagenverzeichnis	50

1 Vorwort

Der Bund/Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) ist ein von der Wirtschaftsministerkonferenz eingesetztes Beratergremium. Ihm gehören Vertreter derjenigen Ministerien von Bund und Ländern an, denen die Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) unterstehen. Er tagt regelmäßig in halbjährlichen Abständen. Der BLA-GEO behandelt geowissenschaftliche Fragestellungen, die länderübergreifender Natur sind oder den Bund und die Länder in gleicher Weise berühren. Er berät das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) und arbeitet den Umweltminister- und den Wirtschaftsministerkonferenzen sowie den entsprechenden Amtschefkonferenzen (Staatssekretärkonferenzen) zu. Der BLA-GEO beauftragt Ad-hoc-Arbeitsgemeinschaften in den Bereichen Geologie, Boden, Hydrogeologie, Rohstoffe und Bodeninformationssysteme.

1.1 Sachverhalt und Problematik

Durch die in der Vergangenheit bekannt gewordenen Probleme und Schäden im Zusammenhang mit der Erschließung geothermischer Ressourcen sind Zweifel an der sicheren Nutzung der oberflächennahen und tiefen Geothermie aufgekommen. Ein Vertrauen in eine heute wie zukünftig sichere Erdwärmenutzung wird daher nur erreicht werden, wenn die Probleme, Auswirkungen und Schäden sowie die hierfür verantwortlichen Ursachen/Gefahrenpotenziale bekannt sind und Lösungswege aufgezeigt werden.

Die Staatlichen Geologischen Dienste sind Partner beim weiteren Ausbau der Geothermie, sie leisten einen wichtigen Beitrag zur sicheren Erschließung des erneuerbaren Energiepotenzials, zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung. Damit diese Absicht auch weiterhin offensiv vertreten werden kann, wurde aus den Landesverwaltungen heraus angeregt, auch diesbezügliche Erfahrungen aus allen Bundesländern aufzugreifen, um Anforderungen und Maßgaben an das künftige Handeln zur Schadensvermeidung noch besser ausrichten zu können.

2 Auftrag

Der BLA-GEO fasste im Herbst 2009 den Beschluss, einen Personenkreis Geothermie in der Zuordnung der Ad-hoc-AG Geologie einzusetzen, der bis September 2010 einen Fachbericht zu den bislang bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben vorlegen soll.

Das Vorsitzland des BLA-GEO, zum Zeitraum der Berichtserstellung das Bundesland Sachsen, wurde gebeten, den Beschluss ressortübergreifend zu kommunizieren und den Vorsitzenden der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft „Klima, Energie, Mobilität - Nachhaltigkeit“ (BLAG KliNa) und der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) zu übermitteln und eine Mitwirkung am Fachbericht anzubieten.

Im Nachgang zu den Beschlüssen des Bund-Länderausschusses Bodenforschung (BLA-GEO) wurde der Ad-hoc-AG Geologie der Auftrag erteilt, bei den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) die Erkenntnisse über die bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern zusammenzutragen. Die bundesweite Umfrage hatte ferner das Ziel, zum einen die bisherigen Erkenntnisse abzufragen, gleichzeitig sollten Fachleute für die Mitarbeit in einem Personenkreis Geothermie gewonnen werden.

3 Organisation des Personenkreises Geothermie

Nach der Erteilung des Auftrages hat die Ad-hoc-AG Geologie die Länder angeschrieben und einen Fragebogen versandt. Ferner wurden die Direktoren der SGD gebeten, Fachleute in den zu konstituierenden Personenkreis (PK) Geothermie zu entsenden. Die Rückmeldungen gingen aus allen SGD der Bundesrepublik ein. Der PK Geothermie konnte mit Fachleuten aus allen Bundesländern besetzt werden.

Der PK Geothermie der Ad-hoc-AG Geologie wurde aufgefordert zur Frühjahrssitzung im Februar 2010 einen Rahmenentwurf eines Fachberichtes zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben auf der Basis der Rückläufe des Fragebogens einzureichen. Der Beschluss zur Erstellung eines Fachberichtes wurde den Vorsitzenden der BLAG KliNa und der LAWA übermittelt und eine Mitwirkung am Fachbericht angeboten. Jeweils zwei Mitglieder aus den Bund/Länderarbeitsgemeinschaften waren benannt worden, um an den Beratungen teilzunehmen.

Der aufgestellte Fragenkatalog zu bislang bekannten Auswirkungen und Gefahrenpotenzialen fußt auf Vorarbeiten vorangegangener länderübergreifender Personenkreise für die oberflächennahe und tiefe Geothermie sowie auf Erkenntnissen aus den Staatlichen Geologischen Diensten, die bei der fachlichen Beratungen zur Erdwärmenutzung gewonnen wurden. Weiterhin basiert der Fragenkatalog auf den Rücklauf von Informationen aus Normenausschüssen, von Bauherren, Planern und Bohrunternehmen, auf Erkenntnissen behördenübergreifender Fachgremien und Genehmigungsbehörden (Umweltämter, Wasser- und Bergbehörden), sowie auf Meldungen aus den Medien. Alle SGD haben sich an der Beantwortung der Abfrage intensiv beteiligt, der Rücklauf betrug 100%. Der Fragenkatalog umfasste mehr als 40 Fachfragen zur Erdwärmenutzung, die sich auf die Geologie, Hydrogeologie, Geotechnik und auf die SGD-Beteiligungen im Rahmen der Genehmigungsverfahren bezogen.

In der konstituierenden Sitzung in Frankfurt am Main wurden die Ergebnisse der Umfrage diskutiert und ein Ablaufplan der zu erledigenden Aufgaben abgestimmt. In den darauf folgenden Wochen und Monaten wurden die Arbeitsergebnisse gegliedert, nach Sachebenen strukturiert und im E-Mail-Umlauf-Verfahren inhaltlich verfeinert. Der Projektleitung des Personenkreises war es ein dringendes Anliegen, die Aufgabe praxisorientiert zu konkretisieren und im Detail zu präzisieren. Besonderer Wert wurde auf die gemeinsam erarbeitete Feststellung gelegt, dass Eingriffe in den Untergrund immer „Auswirkungen“ besitzen.

Jede Bohrung, jede Baugrube, jeder Tunnel ist ein Eingriff in den geologischen Körper. In der konkreten Beauftragung aber sollen geothermische Anlagen und ihre bislang bekannten Auswirkungen beschrieben werden und nicht alle theoretisch erdenklichen oder möglichen Gefahrenmomente.

Größere Havarien sind bei der Errichtung der Anlagen äußerst selten. Trotzdem ist den Geologischen Diensten im Laufe der letzten Jahre eine Anzahl von Bohrungshavarien bekannt geworden. Ihre Bearbeitung fällt meistens in die Zuständigkeit der Wasserbehörden. Die Gesamtzahl kleinerer Havarien ist jedoch nicht bekannt. Möglicherweise werden weitere Havariefälle erst zu einem späteren Zeitpunkt einem konkreten Bohrpunkt oder einer Anlage zugeordnet oder überhaupt erkannt.

Je mehr Bohrungen abgeteuft werden, desto höher sind das Gefahrenpotenzial und die Anzahl möglicher realer Unfälle. Das ist kein Problem der Erdwärmenutzung, sondern trifft auf jede Bohrtätigkeit, wie zum Beispiel auch auf die Rohstoffwirtschaft und die Baugrunduntersuchungen zu. Mit jeder zusätzlichen Bohrung vergrößert sich das Risiko, eine unerwartete Auswirkung oder Havarie zu erleiden.

Dieser Bericht wird die Ursachen von bekannten Auswirkungen beleuchten. In dem engen zeitlichen Rahmen konnten nur der Status erhoben und die kausalen Zusammenhänge herausgestellt werden.

Besetzung des länderübergreifenden Personenkreises Geothermie (sortiert n. BL):

Kürzel	Klartext	Bundesland
BSU	Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt	Hamburg
UVM	Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr	Baden-Württemberg (BLAG KliNa)
GDfB	Geologischer Dienst für Bremen	Bremen
GD NRW	Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen	Nordrhein-Westfalen
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie	Hessen (Sprecher des PK)
LAGB	Landesamt für Geologie und Bergwesen	Sachsen-Anhalt
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie	Niedersachsen
LBGR	Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe	Brandenburg
LfU	Landesamt für Umwelt	Bayern
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie	Sachsen
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie	Sachsen (LAWA)
LGB	Landesamt für Geologie und Bergbau	Rheinland-Pfalz
LLUR	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume	Schleswig-Holstein
LUA	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz	Saarland
LUNG	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie	Mecklenburg-Vorpommern
MUFV	Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz	Rheinland-Pfalz (BLAG KliNa)
RPF/LGRB	Regierungspräsidium Freiburg/Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau	Baden-Württemberg
SENGUV	Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz	Berlin
SUBVE	Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa	Bremen (LAWA)
TLUG	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie	Thüringen
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	Bund
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik	Bund/Länder

An der Studie haben mitgewirkt: Dr. Christian Bönemann, Dr. Hans-Gerhard Fritsche, Dr. Thomas Fritzer, Tatjana Häntze, Ulrike Hörmann, Karina Hofmann, Holger Jensen, Lothar Moosmann, Dr. Karsten Obst, Dr. Björn Panteleit, Michael Pawlitzky, Annett Peters, Dr. Ivo Rappsilber, Lina Reinheimer, Dr. Sven Rumohr (Sprecher des PK), Ingo Schäfer, Dr. Rüdiger Schulz, Marcellus Schulze, Klaus Steuerwald, Roman Storz, Claudia Thomsen, Dr. Christian Trapp, Dr. Ulrich Wegler, Bruno Werle, Wolfgang Wirth.

Die Bund/Länderarbeitsgruppen BLAG KliNa und LAWA wurden vertreten durch: Werner Robrecht, Dirk Schröder, Karin Kuhn, Elzbieta Maahs.

4 Definitionen

Zur einheitlichen Begriffsbestimmung wurden durch den Personenkreis für diesen Fachbericht die nachfolgenden Begriffe näher definiert.

Oberflächennahe und tiefe Geothermie

In Abhängigkeit von der Erschließungstiefe der Erdwärme unterscheidet man zwischen oberflächennaher und tiefer Geothermie. Bei der oberflächennahen Geothermie wird die Wärmeenergie des Untergrundes bis max. 400 m, meist jedoch nur bis 150 m z.B. über Erdwärmekollektoren, Erdwärmesonden, Grundwasserbohrungen oder Energiepfähle genutzt.

Die tiefe Geothermie umfasst Systeme, bei denen die geothermische Energie aus Tiefen über 400 m über Tiefbohrungen erschlossen wird und deren Energie direkt (d. h. ohne Niveauanhebung) genutzt werden kann. Die Übergänge zur Nutzung der tiefen Geothermie sind fließend.

Gefahrenpotenzial

Eine Gefahr stellt eine Situation oder ein Sachverhalt dar, der zu einer negativen Auswirkung führen kann. Diese negative Auswirkung einer Gefährdung bedeutet die Möglichkeit, dass ein Schutzgut (Person, Tier, Sache oder natürliche Lebensgrundlage) räumlich und/oder zeitlich mit einer Gefahrenquelle zusammentreffen kann und negative Auswirkungen bewirkt.

Auswirkungen

Jedes geothermische Vorhaben hat Auswirkungen, wobei zu unterscheiden ist zwischen denen, die als Folge des Vorhabens erwartet und akzeptiert werden und solchen die unerwartet eintreten.

Eine unerwartete Auswirkung beruht in der Regel auf der Abweichung eines erreichten Zustandes vom angestrebten Zustand, welcher z.B. nach dem Stand von Wissenschaft und Technik oder nach sonstigen Vereinbarungen festgelegt ist.

Eine unerwartete Auswirkung kann einen temporären oder dauerhaften Schaden zur Folge haben.

Im vorliegenden Fachbericht werden vorrangig die unerwarteten Auswirkungen betrachtet. Erwartete und akzeptierte Folgen sind eine geringe thermische Beeinflussung des Untergrundes, die sich weitestgehend auf den Nahbereich geothermischer Anlagen beschränkt und zu keiner Beeinflussung anderer Nutzer des Untergrundes oder des Grundwassers führt.

Bei offenen geothermischen Anlagen (Brunnendublettenanlagen) wird zudem eine Auswirkung durch die von Entnahme und Einleitung beeinflusste Grundwasserströmung im näheren Umfeld der Anlagen erwartet und akzeptiert.

5 Oberflächennahe Geothermie

Bei Anlagen der oberflächennahen Geothermie zu Heiz- und Kühlzwecken konnte in den vergangenen Jahren ein stetiger Zuwachs aufgewiesen werden. Es sind drei grundsätzlich verschiedene Nutzungsformen zu unterscheiden:

- **Erdwärmesondenanlagen** mit einem Marktanteil von bundesweit ca. 80%,
- **Erdwärmekollektoranlagen** mit einem Marktanteil von bundesweit ca. 10-15%
- **Brunnendublettenanlagen** (Wasser / Wasser-Anlagen) mit einem Marktanteil von ca. 5-10%.

In die nachfolgenden Betrachtungen sind aufgrund des hohen Anteils insbesondere Auswirkungen von Erdwärmesondenanlagen eingeflossen. Die Gesamtanzahl in Deutschland liegt bei geschätzten 70.000 Anlagen. Die Zahl beruht auf Abschätzungen der Bundesländer zu den in den SGD und zuständigen Vollzugsbehörden angezeigten Anlagen.

Zunächst werden in Kapitel 5.1 die Gefahrenpotenziale erläutert. In den Kapiteln 5.2 bis 5.5 werden die bisher bekannten unerwarteten Auswirkungen geothermischer Vorhaben beschrieben und deren Ursachen anhand der existierenden Gefahrenpotenziale erläutert. Es ist voranzustellen, dass oftmals eine Kombination von mehreren Gefahrenpotenzialen zu einer unerwarteten Auswirkung führen kann (siehe Anlage 2).

Mithilfe von Beispielen werden in den folgenden Kapiteln die bekannten Auswirkungen erläutert. Weiterhin werden Empfehlungen zur Vermeidung der beschriebenen Auswirkung aus den Erfahrungen der SGD gegeben.

5.1 Gefahrenpotenziale

Bei den Gefahrenpotenzialen in Verbindung mit dem Einbau und Betrieb von Erdwärmeanlagen werden verschiedene Bereiche unterschieden.

Zum einen gibt es Gefahrenpotenziale, die maßgeblich durch **geogene, geologische und hydrogeologische** Verhältnisse bedingt werden. Zu diesen standortbezogenen, nicht beeinflussbaren und risikobehafteten Untergrundverhältnissen gehören die Beispiele: Schichtkomplexe mit stark wechselnden lithologischen Eigenschaften, GW-Stockwerksbau, Verkarstung, geologische Störungszonen, natürliche Gasvorkommen, artesischen Verhältnisse und Altbergbau.

Zum anderen gibt es Gefahrenpotenziale **technischer und/oder anthropogener** Art, welche beispielsweise während der Planung, des Bohrvorgangs oder beim Einbau oder Bau von Erdwärmesonden oder -brunnen auftreten können. Diese können Auswirkungen verursachen, die meist durch eine nicht an die Untergrundverhältnisse angepasste Technik oder Arbeitsweise bedingt sind. Gefahrenpotenziale dieser Art sind z. B. der Betrieb nicht korrekt dimensionierter Erdwärmeanlagen, mangelhafte Verpresstechniken oder falsch gewählte Bohrverfahren. Hierbei sind z. B. ungewollte Temperaturänderungen im Untergrund und die Verbindung zweier Grundwasserleiter zu nennen.

Neben den **geologisch/technischen** Gefahrenpotenzialen können auch Fehleinschätzungen und/oder menschliches Versagen sowohl auf Seiten der Planer und ausführenden Bohrfirmen aber auch auf Seiten der Genehmigungsbehörden ursächlich für unerwartete Auswirkungen sein. Auf der bauausführenden Seite kann unzureichende Qualifikation oder nicht fachgerechte Bauausführung nach dem Stand der Technik zu Gefahrenpotenzialen führen.

Die genannten Gefahrenpotenziale werden als einzelne Themen aufgezählt, eine Überschneidung der einzelnen Bereiche ist jedoch unumgänglich.

5.1.1 Hydrogeologische Gefahrenpotenziale

Beim Bau von geothermischen Anlagen sind verschiedene hydrogeologische Verhältnisse bzw. Gefahrenpotenziale zu berücksichtigen, da sie direkte Auswirkungen, z. B. auf das Grundwasser und auf den Untergrund, haben können. Dabei kann zwischen hydraulischen und hydrochemischen Ursachen differenziert werden.

Wirksame Trennschichten zwischen Grundwasserstockwerken (**Stockwerksbau**) können zu vertikal unterschiedlichen Druckpotenzialen führen (**gespannte Grundwässer**) (s. Abbildung 5-1). Diese **Druckpotenzialunterschiede** zwischen Grundwasserleitern können die Ursache für Komplikationen beim Bau von Erdwärmesonden sein. Bohrungen für Erdwärmesondenanlagen können zu hydraulischen Verbindungen vormals getrennter Grundwasserstockwerke führen. Aufsteigende Grundwässer können die Bohrarbeiten bzw. die Bohrlochabdichtung/Bohrlochverpressung nach Einbau der Sonde beeinträchtigen. Liegt das Druckpotenzial eines gespannten Grundwasserstockwerks über der Geländeoberfläche kommt es zu oberflächlichen bzw. artesischen Grundwasseraustritten (**Artesik**). Diese können bei nicht fachgerechten Bohrarbeiten dazu führen, dass erhebliche Grundwassermengen oberflächlich austreten.

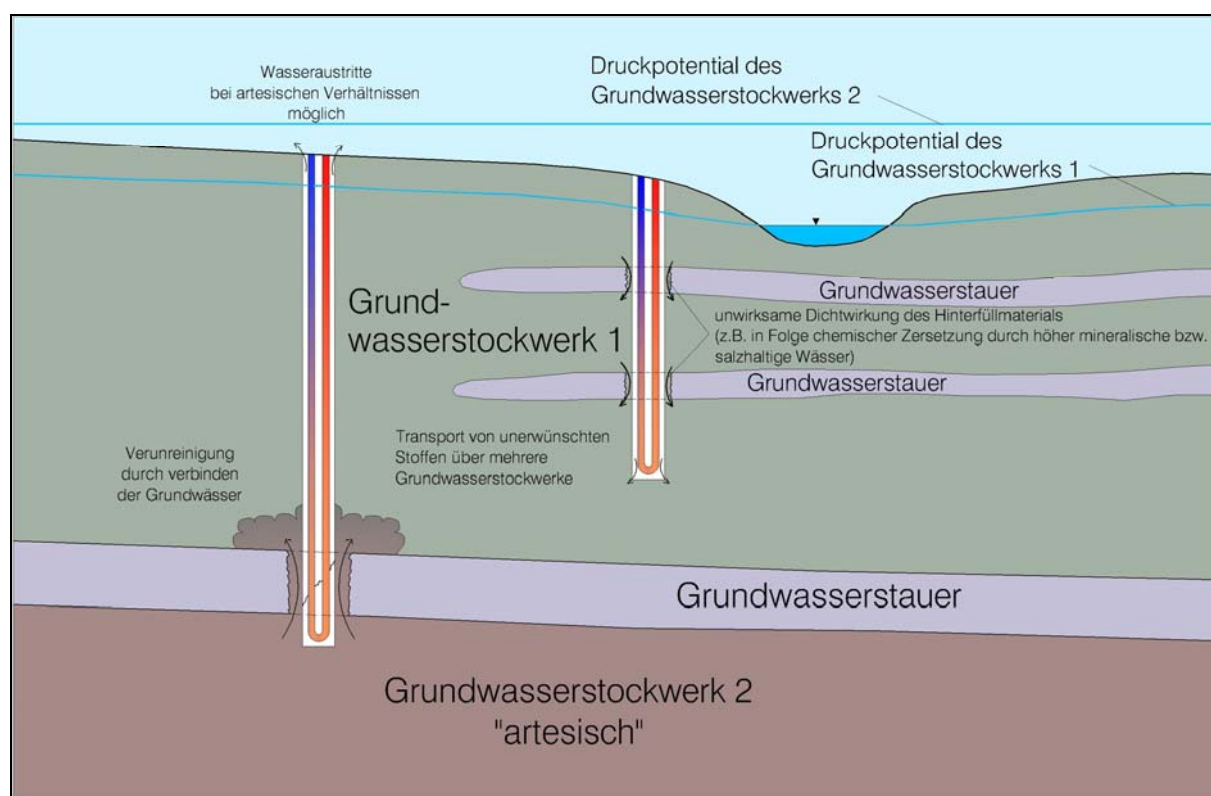


Abbildung 5-1: Gefahrenpotenzial Grundwasserstockwerksbau und Artesik (LBEG).

Durch die hydraulische Verbindung von Grundwasserstockwerken kann es zur Vermischung von hydrochemisch unterschiedlichen Grundwässern kommen. Dies kann nachhaltig die Qualität des Grundwassers beeinträchtigen. Auch eine nach Einbau und Abbindung dichte physikalisch und chemisch stabile Hinterfüllung kann durch die hydrochemische Zusammensetzung des Grundwassers gefährdet sein. Sie kann durch chemische Zersetzung, in Folge von **höher mineralisierten bzw. sulfathaltigen Wässern** oder durch **freie Kohlensäure**, unwirksam werden. Neben der Mischung von Grundwässern kann die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung herabgesetzt werden. Die vertikale Fließbewegung und damit der Transport von unerwünschten Stoffen über mehrere Grundwasserstockwerke werden möglich.

5.1.2 Geologische Gefahrenpotenziale

Für den Bau und Betrieb einer geothermischen Anlage sind die geologischen Bedingungen am Standort von großer Bedeutung. In vielen geologischen Einheiten ist die Installation einer Anlage unproblematisch. Von einigen geologischen Einheiten bzw. Gesteinseinheiten geht allerdings ein gewisses Gefahrenpotenzial aus.

Die wesentlichen Prozesse, die zu einem Gefahrenpotenzial führen können sind:

- Lösungserscheinungen / Wegsamkeiten durch Störungs- und Kluftsysteme, z.B. bei Karbonat-, Sulfat- oder Salzgesteinen
- Fließbewegungen z.B. Fließeisande
- Mineralumbildungen / Quellungen (Anhydrit/Gips, Tonminerale)
- Ausgasungen

Diese werden nachfolgend kurz erläutert.

Lösungserscheinungen/ Wegsamkeiten durch Störungs- und Kluftsysteme

Wenn **Karbonat- und Sulfatgesteine** in Kontakt mit der Atmosphäre und Regenwasser treten, beginnt der Prozess der Karstverwitterung. Die damit verbundenen Lösungs-, und Umkristallisationserscheinungen führen entlang von Trennflächen zur Bildung von Dolinen, Ponoren, Höhlen und Hohlräumen. Häufig werden verschiedene Karstsysteme auf unterschiedlichen Niveaus ausgebildet.

Während des Bohrvorgangs besteht die Möglichkeit, dass in verkarsteten Gesteinen Hohlräume angefahren werden und das Bohrgestänge und / oder die Bohrspülung verloren geht. Darauf anschließend stellt die Verpressung der Hohlräume ein Problem dar. Meistens sind große Mengen an Verpressmaterial zur Abdichtung des Hohlraums notwendig oder der Hohlraum kann nicht abgedichtet werden. Im Fall fehlender Abdichtung besteht kein thermischer Kontakt zwischen Gebirge und Wärmetauscher.

Salzgesteine unterscheiden sich zunächst durch ihre große Wasserlöslichkeit, hohe Plastizität und ihre relativ geringe Dichte von übrigen Sedimenten. Aufgrund der großen Wasserlöslichkeit geht von Salzgesteinen ein hohes Gefahrenpotenzial aus. Das Eindringen von Wasser in ein Salzvorkommen ist mit größten Veränderungen bis hin zu ihrem völligen Verschwinden verbunden. Die durch Wasserzufluss (auch während eines Bohrvorgangs) ausgelösten Prozesse werden als Ablaugung oder Subrosion bezeichnet. Die unterirdische Ablaugung und Abfuhr des Salzes führt zu einem Massendefizit und der Entstehung von Hohlräumen. Bei geringer Überdeckung und wenig kompetenten Gesteinen in der Überlagerung brechen diese Hohlräume ein und an der Erdoberfläche entstehen kleinräumige Subrosionssenken. Der Bau von Erdwärmesonden in Salzgesteinseinheiten ist aufgrund von Wasserzutritten (Spülung, Grundwasser aus anderen Stockwerken) im Verlauf der Bohrung problematisch.

Störungs-/ Kluftzonen sind relativ lange, schmale Bereiche im Gestein, in denen der Gesteinsverband infolge tektonischer Vorgänge häufig mechanisch zerlegt (zerrüttet) ist und eine Vielzahl unterschiedlich geöffneter Trennflächen auftreten. In solchen „Auflockerungszonen“ sind große Gebirgsdurchlässigkeiten möglich. Aufgrund von Ausfällungen zirkulierender mineralisierter Wässer sind die vorhandenen Wegsamkeiten manchmal sekundär partiell oder auch völlig geschlossen.

Störungs-/Kluftzonen können ein Gefahrenpotenzial aufweisen, wenn beim Anbohren dieser Zonen unter Druck stehende Kluftwässer angetroffen werden. Dies kann zum Aufstieg salinarer Wässer aus tieferen Bereichen in oberflächennahe Grundwasserleiter führen, welche dadurch kontaminiert und für eine Trinkwassergewinnung unbrauchbar werden. Im Falle des Antreffens von „trockenen“ Klüften oder Rissen kann es andererseits zu plötzlichen Spülungsverlusten oder sogar zur raschen Absenkung des Grundwassers in einem darüber befindlichen Grundwasserleiter führen (hydraulischer Kurzschluss). In Verbindung mit einer Auswaschung des Feinkornanteils können dadurch Setzungen auftreten, die Erdfälle oder Gebäudeschäden verursachen.

Fließbewegung, z. B. Fließsande

Mit dem Begriff „**Fließsande**“ werden gut sortierte Feinsande oder feinsandige Schluffe angesprochen, die bei Wasserübersättigung und unter bestimmten Strömungsbedingungen einen Festigkeitsverlust erleiden und ein Fließverhalten aufzeigen. Die als „Fließsande“ bezeichneten lithologischen Einheiten umfassen überwiegend quartäre fluviatile Ablagerungen. Bautechnische Probleme mit „Fließsanden“ sind aus dem Berg- und Kanalbau und der Gründung von Gebäuden bekannt. Für das Ausheben von Baugruben im Verbreitungsgebiet von „Fließsanden“ ist ein entsprechender Verbau zur Abstützung der Baugrubenböschungen und eine Wasserhaltung notwendig. Beim Niederbringen von unverrohrten Bohrungen kann Material aus einem durchteuften Fließsandvorkommen in das Bohrloch verfrachtet werden. Das entstehende Massendefizit wird durch Nachbrechen des überlagernden Gesteins ausgeglichen und durch einen Absenktrichter an der Erdoberfläche sichtbar.

Mineralumbildungen-Quellungen (Anhydrit/Gips, Tonminerale)

Durch den Zutritt von Wasser kann es zu **Mineralumbildungen und -neubildungen** sowie zu **Quellungen** kommen. **Anhydrit** (CaSO_4) kann durch Wasserzutritt gelöst und unter Volumenzunahme als Gips ($\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) rekristallisieren.

Künstliche Wasserzutritte zu Anhydritvorkommen können z.B. durch einen hydraulischen Kurzschluss bei Bohrarbeiten und/oder durch Ringraumumläufigkeiten erfolgen.

Mit der Umwandlung des Anhydrits zu Gips erfolgt eine Volumenzunahme, die eine Hebung der Geländeoberfläche zur Folge haben kann. Der Umwandlungsprozess zeigt sich als exotherme Reaktion mit erhöhten Temperaturen im Umfeld (Abgabe von Reaktionswärme).

Voraussetzungen für eine Hebung der Geländeoberfläche sind:

- auflastender Gebirgsdruck ist geringer als der Quelldruck,
- Drucksteigerung durch Quellung bestimmter Tonminerale bzw. Kristallisation von Kalziumsulfaten,
- keine überlagernden Schichten, die Volumenzuwachs aufnehmen könnten (Fehlen bereits stark verkarsteter Bereiche),
- Schaffung neuer Wegsamkeiten und ggf. Veränderung des hydraulischen Regimes durch Volumenzunahme und Hebung,
- Drucksteigerung durch zusätzliche Quellung bestimmter Tonminerale.

Grundsätzlich sind sowohl die Mächtigkeit der Überdeckung als auch die Ausbildung des Vorkommens maßgebend für die Einschätzung des Gefahrenpotenzials. Bei geringer Überdeckung (siehe Abbildung 5-2) und hoher hydraulischer Durchlässigkeit erfolgt durch die Zusickeung von Oberflächenwasser eine Umwandlung von Anhydrit in Gips. Durch die Wegführung des gelösten CaSO_4 findet hier oft eine Setzung des Geländes infolge von Gips-Laugung („Gips-Karst“) statt. Mächtige überlagernde und abdichtende Schichten bedingen einen Erhalt des Anhydrit-Vorkommens (siehe Abbildung 5-3).

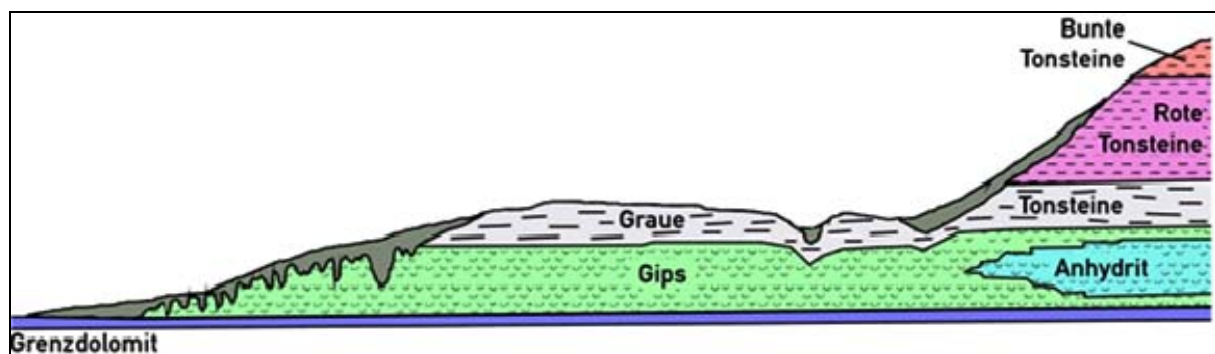


Abbildung 5-2: Gips- und Anhydritvorkommen im Gips-Keuper.

Bei geringer Überdeckung erfolgte eine vollständige Umwandlung von Anhydrit zu Gips. Hier besteht ein Gefahrenpotenzial durch Auslaugung von Gips und eine nachfolgende Geländesetzung (Quelle: LfU Bayern).

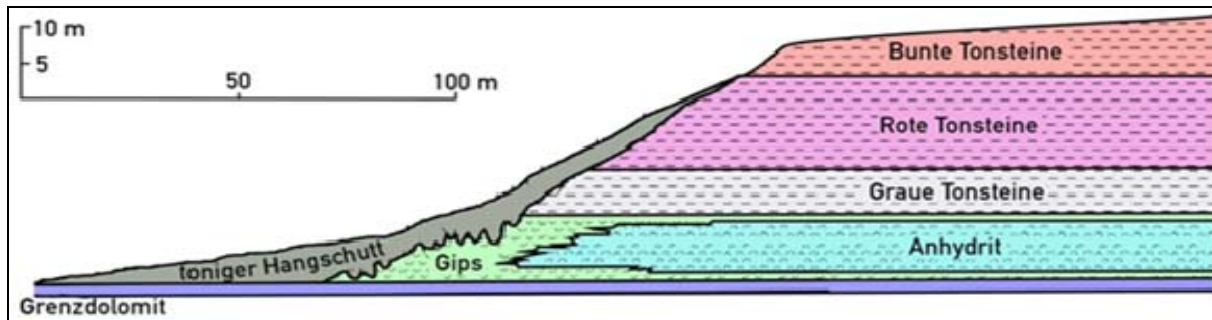


Abbildung 5-3: Gips- und Anhydrit-Vorkommen im Gips-Keuper.

Aufgrund mächtiger Überdeckung (größer 20 Meter) bleibt Anhydrit erhalten. Hier geht ein Gefahrenpotenzial durch Volumenzunahme nach Wasserzutritt z. B. durch eine Bohrung oder Ringraum-Umläufigkeiten von den Anhydrit-Körpern aus (Quelle: LfU Bayern).

Hebungsprozesse werden auch durch **quellfähige Tonminerale** ausgelöst. Besonders Dreischichttonminerale (Montmorillonit, Illit und Vermiculit) können Wasser aufnehmen, speichern und wieder abgeben. Sie sind damit quellfähig oder aufweitbar.

Eine Wasserzufuhr ergibt eine Volumenzunahme (Quellung). Wasserentzug führt zu einem Schrumpfprozess. Je nach den vorliegenden Randbedingungen können damit Hebungen und Senkungen der Erdoberflächen einschließlich der darauf befindlichen Bauwerke verbunden sein. Die Setzungen und Hebungen verlaufen in Abhängigkeit der Wasserführung im Untergrund und der Belastungen durch Gebäude überwiegend ungleichmäßig.

Ausgasungen

Unter bestimmten geologischen und tektonischen Gegebenheiten können bei Bohrungen **Gasvorkommen** angetroffen werden. Dabei gehen von den verschiedenen Gasbestandteilen unterschiedliche Gefahren aus. Die brennbaren Kohlenwasserstoffkomponenten im natürlichen Erdgas wie Methan, Ethan, Propan und Butan besitzen eine Explosions- und Brandgefahr. Stickstoff und Kohlendioxid können zur Vergiftung und zum Erstickten infolge von Sauerstoffmangel führen. Bei Bohrungen in der Umgebung von potenziellen Speichergesteinen wie porösen Sand- und Kalksteinen oder gasführenden Grundwässern sind Gasaustritte an der Erdoberfläche möglich.

5.1.3 Geotechnische Gefahrenpotenziale

Neben den zuvor beschriebenen natürlichen untergrundbedingten Gefahrenpotenzialen können durch menschliche Eingriffe neue Gefahrenpotenziale entstehen, die als geotechnische Gefahrenpotenziale bezeichnet werden. Hierzu gehören Hohlräume und Stoffe, die in diesen deponiert wurden.

Unterirdische **Hohlräume** bilden sich durch natürliche Prozesse (z. B. in Karstgebieten) oder werden durch bergbauliche Tätigkeit (z. B. Schächte, Stollen, Kavernen, Alter Mann) hervorgerufen.

Das Gefahrenpotenzial in Gebieten mit **Altbergbau** besteht darin, dass der geologische Körper Hohlräume aufweist. Beim Anbohren dieser Hohlräume kann es zu Grundwasserabsenkungen, Setzungen, Spülungsverlusten oder Verlust des Bohrwerkzeuges kommen. Wasserzufuhr in mit Laugen gefüllten Hohlräumen kann unter bestimmten Randbedingungen auch eine erneute Lösung von Evaporitgesteinen verursachen, die ebenfalls zur Senkenbildung (Erdfälle) im oberflächennahen Bereich führt.

Unter **Altlasten** versteht man Ablagerungen bzw. Altstandorte, von denen eine Gefährdung für die Umwelt, insbesondere für die menschliche Gesundheit, ausgehen kann. Altablagerungen sind z. B. verlassene oder stillgelegte Deponien oder nicht genehmigte Ablagerungen, Aufhaldungen (Kippen) und Verfüllungen mit Produktionsrückständen oder auch Bauschutt.

Altstandorte sind Grundstücke stillgelegter Industrieanlagen, teilweise mit Hohlräumen von nicht mehr verwendeten Leitungs- und Kanalsystemen oder sonstige Betriebsflächen, auf denen mit einer Mobilisierung von umweltgefährdenden Stoffen bei Bohrungen gerechnet werden muss.

Unbekannte Deponien oder im Untergrund verborgene Altlasten können beim Durchbohren zur Kontamination von Grundwasserleitern führen. Weiterhin können unter Druck befindliche giftige Gase und/oder Flüssigkeiten an der Oberfläche austreten und die Umwelt schädigen.

5.1.4 Technische / anthropogene Gefahrenpotenziale

Zu den technischen / anthropogenen Gefahrenpotenzialen zählen unerwartete Temperaturänderungen im Untergrund bzw. Grundwasser, unzureichende und nicht beständige Abdichtungen, unsachgemäß gewählte oder falsch eingesetzte Bohrverfahren, Materialschäden und mangelnde Qualifikation von Planern und Bohrtrupps bis hin zur grob fahrlässigen Planung und Ausführung einer Anlage.

Durch eine **Temperaturänderung** im Untergrund entsteht, je nach Entzugsleistung und -dauer, ein mehr oder weniger stark ausgeprägter thermischer Entzugstrichter. Der Temperaturabsenktrichter erzeugt einen horizontalen Temperaturgradienten und somit einen lateralen Wärmefluss.

Nachteilige Temperaturänderungen bei Erdwärmeanlagen liegen vor, wenn die natürliche Regenerierungsfähigkeit des Erdreichs in der betriebsfreien Zeit (innerhalb der Betriebsjahre) nicht ausreicht, um die ungestörte natürliche Untergrundtemperatur wieder zu erlangen. Dabei handelt es sich entweder um eine deutliche Abkühlung bis hin zur Vereisung durch eine übermäßige Wärmenutzung der Anlage oder um eine signifikante Aufheizung des Untergrundes im Falle einer nicht angepassten Klimatisierung von Gebäuden und des damit einhergehenden Wärmeeintrages in den Untergrund.

Die Bedeutung von Temperaturveränderungen sowie die tatsächlichen nachteiligen Folgen und die daraus resultierenden maximal akzeptierbaren Temperaturgrenzen, insbesondere bei Wärmespeicherung, sind noch nicht hinreichend erforscht und werden in der Vielzahl der Regelwerke, Leitfäden und Genehmigungen nicht ausreichend berücksichtigt.

In Abhängigkeit von der Höhe der Überbeanspruchung kann es in unterschiedlichem Maße zu nachteiligen chemischen, biologischen und physikalischen Veränderungen des Grundwassers kommen, welche wiederum unterschiedliche Auswirkungen auf das Ausbaumaterial und das Erdreich haben können.

Temperaturabsenkungen führen bei Erdwärmesonden z. B. bei häufigen Frost-Tau-Wechseln zur Beschädigung des Verpressmaterials. Ebenso können Unterdimensionierungen von Einzelsonden oder Sondenfeldern im Grundwasser Vereisungen verursachen, die bis in das Gebirge reichen können.

Ein wichtiger Bestandteil beim Einbau und Betrieb von Erdwärmesonden ist das Verpress- oder Verfüllmaterial. Die Verpressung des Ringraumes muss nach dem Aushärten eine dichte und dauerhafte, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Erdwärmesonde in das umgebende Gestein gewährleisten und für die jeweilige Einsatztemperatur geeignet sein.

Eine **unzureichende Abdichtung** des Ringraumes einer Erdwärmesonde liegt vor, z. B. bei:

- nicht vollständiger Ummantelung der Sondenrohre zum Schutz vor Punktlasten und zum Schutz des Grundwassers bei Leckagen,
- mangelnde Abdichtung der durch die Bohrung entstandenen möglichen vertikalen Wegsamkeiten,
- mangelnde thermische Anbindung der Sonde an den Untergrund sowie
- Verwendung von Verpressmaterial, welches z. B. nicht dauerhaft beständig ist, keine ausreichende Dichte besitzt oder auch bei einem nicht materialgerechtem Anmischen.

Die richtige Wahl des **Bohrverfahrens** ist grundlegend für die fachgerechte Errichtung einer Erdwärmesondenanlage. Die Wahl des Bohrverfahrens und der Einsatz der Bohrgeräte ist gemäß DIN 18301 Sache des Auftragnehmers.

Materialschäden mit Relevanz für den Untergrund sind auf die erdseitig verbauten Materialien wie Sonde und Verfüllmaterial zu beziehen.

Beschädigungen durch Einkerbungen oder Riefen können bei PE-Sonden zur Rissbildung führen. Eine UV-Bestrahlung während der Lagerung und eine Missachtung der Temperaturbeständigkeit des Sondenmaterials insbesondere bei Wärmespeicherung können zur Alterung des Materials führen. Missachtung von Biegeradien und Druckbelastung können ein Abknicken der Rohre verursachen. Ein Nichtbeachten der einschlägigen Schweißvorschriften kann Beschädigungen oder unzureichende Verbindungen von PE-Rohren hervorrufen.

Da die Energiegewinnung mittels Erdwärmesonden relativ jung ist und die Betriebsdauer i. d. R. auf mindestens 20 bis 30 Jahre ausgelegt wird, gibt es hinsichtlich Beständigkeit, Materialschäden und Rückbau bzw. Außerbetriebnahme noch wenig Erfahrungswerte.

Als problematisch sind Erdwärmesonden zu betrachten, die später schlecht bis gar nicht mehr zugänglich sind, zum Beispiel, wenn die Sonden unter der Bodenplatte eines Gebäudes liegen oder aber ein Zugang für etwaige Arbeiten nicht mehr vorhanden ist. Die Auswirkungen von Materialschäden (Sonden, Abdichtungsmaterial) auf das Grundwasser umfassen vor allem geohydraulische und geochemische Bereiche (siehe 5.1.1).

Anthropogene Gefahrenpotenziale beruhen im wesentlichen auf einer nicht die möglichen (technischen) Risiken berücksichtigenden Planung und Ausführung geothermischer Anlagen. Problematisch ist in diesem Zusammenhang, dass durch die anhaltend große Nachfrage nach Erdwärmesondenanlagen die Zahl unzureichend qualifizierter Planer und Bohrfirmen zugenommen hat.

5.2 Auswirkungen auf das Grundwasser

5.2.1 Geohydraulische Auswirkungen

5.2.1.1 Absenkung des Grundwassers

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Wird durch eine Erdwärmebohrung eine hydraulische Verbindung zweier ansonsten getrennter Grundwasserstockwerke verursacht, so kann dies bei unterschiedlichen hydraulischen Druckhöhen und einer unzureichenden Abdichtung des Bohrlochs zu einem Übertritt von Wasser aus einem in das andere Stockwerk führen.

Beispiel

Etwa zwei Wochen nach Beginn der Bohrarbeiten für eine Erdwärmesonde wurde ein Sinken des Grundwasserspiegels in einer nur rund 200 m entfernten Messstelle des Landesgrundwassermessdienstes Hessen beobachtet. Die Absenkung erfolgte deutlich bis unter die seit 1960 wöchentlich gemessenen Grundwasserstände und führte schließlich ab sechs Wochen nach Beginn der Bohrarbeiten zu einem Trockenfallen der Messstelle. Die Landesgrundwassermessstelle wurde daher Mitte 2009 aufgegeben. Aufgrund der räumlichen Nähe der Erdwärmesondenbohrung und des zeitlich kurz daraufhin stattfindenden Trockenfallens der nahegelegenen Landesgrundwassermessstelle, wird vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie von einem kausalen Zusammenhang ausgegangen.

Empfehlungen zur Vermeidung

Durch eine Begrenzung der Bohrtiefe einer Erdwärmesondenanlage auf das jeweils oberste Grundwasserstockwerk können hydraulische Verbindungen zu tieferen Stockwerken sicher vermieden werden.

Erfolgen Eingriffe bis in das zweite oder tiefere Stockwerk, können durch eine sachgerechte Abdichtung (Verpressung) der Erdwärmesondenbohrungen nach Einbau der Sonden hydraulische Verbindungen zweier oder mehrerer Grundwasserstockwerke in der Regel ausgeschlossen werden. Da der Stockwerksbau nicht immer sicher erkannt werden kann, sollten Erdwärmesondenbohrungen grundsätzlich vollständig verpresst werden.

Die Erfahrung zeigt jedoch, dass es insbesondere in Gebieten mit deutlicher Verkarstung oder Zerklüftung des Untergrundes oder beim Vorkommen stark gespannter (= unter Druck stehender) Grundwässer zu einer unzureichenden Verpressung von Bohrlöchern kommen kann.

5.2.1.2 Anhebung des Grundwasserspiegels

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Eine Erhöhung bzw. ein Anstieg von Grundwässern kann als eine Auswirkung bei der Erschließung der Geothermie mit Erdwärmesonden und bei der Nutzung mit Brunnenanlagen (Wasser / Wasser-Anlagen) auftreten.

Bei der Errichtung von Erdwärmesondenanlagen ist eine Ursache für einen Grundwasseranstieg das Durchteufen von hydraulisch getrennten Grundwasserstockwerken während des Bohrvorganges. Die durch den Stockwerksbau herrschenden unterschiedlichen Druckpotenziale bedingen oftmals gespannte Grundwässer im liegenden Grundwasserleiter. Das Anbohren der gespannten Grundwässer führt zu einer Druckentlastung und kann somit einen Anstieg des Grundwasserspiegels im hangenden Grundwasserleiter bzw. eine Nivellierung der unterschiedlichen Druckpotenziale verursachen. Beim Anbohren von hydraulisch wirksamen Störungs- bzw. Kluftzonen oder von Hohlräumen (z. B. Karst, Altbergbau) kann bei gespannten Grundwasserverhältnissen ebenfalls ein Anstieg des Grundwasserspiegels erfolgen. Die beschriebenen Phänomene sind in der Regel nur temporär während des Bohrens zu beobachten.

Dauerhafte Grundwasseranstiege sind dann zu erwarten, wenn der Ausbau der Erdwärmesonden fehlerhaft durchgeführt wird. Ursachen für eine Erhöhung des Grundwasserspiegels können z. B. unzureichend abgedichtete Ringräume von Erdwärmesonden insbesondere im Bereich von stockwerkstrennenden Schichten bzw. wasserwegsamem Trennflächen und Hohlräumen sein. Dies kann zum einen durch eine unvollständige oder gar fehlende Verpressung oder zum anderen durch den Einsatz nicht beständiger (z. B. gegen Sulfatwässer) Verpressmaterialien bedingt sein. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass das Verpressmaterial wegen fehlender Frost-Tau-Wechsel-Beständigkeit und einer Unterdimensionierung der Anlage zerstört wird und seine Funktion als Abdichtmaterial zwischen Grundwasser führenden Schichten unterschiedlicher Druckpotenziale verliert. Durch die hydraulische Verbindung von Grundwasserstockwerken kann es zur Vermischung von hydrochemisch unterschiedlichen Grundwässern kommen. Dies kann nachhaltig die Grundwasserqualität der Grundwasserleiter beeinträchtigen. Ebenso können aufsteigende Grundwässer die Bohrarbeiten bzw. die Bohrlochverpressung nach dem Einbau der Sonde beeinträchtigen.

Bei Wasser / Wasser-Nutzungen (Förder- und Schluckbrunnen) kann es bei unzureichender Wasseraufnahmefähigkeit des Untergrundes im Bereich des Schluckbrunnens zum Aufstau von Grundwasser kommen. Ursachen dafür sind z.B. unterdimensionierte Schluckbrunnen oder die Unkenntnis bzw. Nichtbeachtung der herrschenden Grundwasserpotenziale.

Beispiel

In Baden-Württemberg wurde durch eine unzureichende bzw. fehlende Abdichtung des Ringraums von zwei Erdwärmesondenbohrungen ein Grundwasserstockwerk im Keuper mit dem liegenden Grundwasserstockwerk des Muschelkalks verbunden und ein stockwerksübergreifender Grundwasserfluss ermöglicht. Die Druckspiegelhöhe des Grundwassers im tieferen Grundwasserstockwerk (Oberer Muschelkalk) stieg um mehr als 2,5 m an, wodurch es, neben den durch die Absenkung bedingten Schäden (Gebäudeschäden), u.a. auch zu Durchmischungen und einer Veränderung der Grundwasserfließrichtung kam.

Empfehlungen zur Vermeidung

Erdwärmesonden

Bereits zu Beginn der Planung der Erdwärmesondenanlage sind Informationen zur geologischen und hydrogeologischen Standortsituation einzuholen, um Grundlagen für die Auswahl des Bohrverfahrens und der zu verwendenden Verpressmaterialien zu erhalten und um die standortspezifischen Verhältnisse zu berücksichtigen. Dies ist erforderlich, damit das Bohrunternehmen mit der entsprechenden technischen Ausrüstung in der Lage ist, z. B. gespannte oder artesisch gespannte Verhältnisse sicher beherrschen zu können.

Weiterhin muss das Verpressmaterial an die geologische und hydrogeologische Situation angepasst sein, um z. B. durch Einsatz von geeignetem Material eine dauerhafte Abdichtung unterschiedlicher Grundwasserkörper und/oder von Artesern zu gewährleisten. Um diese dauerhafte Dichtheit des Verpressmaterials zu garantieren, muss dieses zudem an den Grundwasserchemismus angepasst sein (saure Grundwässer, Sulfatbeständigkeit etc.).

Ebenso ist die ausreichende Dimensionierung der Erdwärmesondenanlage eine Grundvoraussetzung, um die dauerhafte Dichtheit der Ringraumverpressung zu erhalten. Da bislang kein allgemein anerkanntes Prüfverfahren zum Nachweis der Frost-Tauwechselbeständigkeit der Verpressmaterialien vorliegt, kann der Nachweis einer Frost-Tauwechselbeständigkeit noch nicht erbracht werden. Anlagen sind somit so zu dimensionieren, dass ein dauerhaftes Durchfrieren der Ringraumverpressung vermieden wird.

Bei bekanntem Grundwasserstockwerksbau kann mit einer Bohrteufenbegrenzung auf den oberen Grundwasserleiter eine Verbindung mehrerer Grundwasserleiter vermieden werden.

Brunnendublettenanlagen

Bei der Planung von geothermischen Wasser / Wasser-Anlagen (Förder- und Schluckbrunnen) ist die Kenntnis der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse eine Grundvoraussetzung. Mit entsprechenden hydrogeologischen Voruntersuchungen sind sowohl die Gewinnbarkeit wie auch die Wiedereinleitung des geförderten Grundwassers zu testen. Mit diesen Testergebnissen ist dann eine Dimensionierung der Anlage so durchzuführen, dass durch die Grundwassernutzung keine dauerhaft schädlichen Auswirkungen zu besorgen sind.

5.2.1.3 Artesischer Austritt von Grundwasser

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Artesisch gespanntes Grundwasser tritt auf, wenn das hydrostatische Druckniveau des gespannten Grundwassers über dem Höhenniveau der Erdoberfläche liegt. Dies kann, bei unerwartetem Antreffen und/oder bohrtechnisch nicht beherrschtem Austritt, zu nachteiligen Auswirkungen führen, die ggf. auch dauerhaft sind. Der Austritt artesisch gespannten Grundwassers kann, im Vergleich zu möglichen nachteiligen Auswirkungen beim Erbohren von „nur“ gespanntem Grundwasser, nicht nur die hydraulischen und hydrochemischen Verhältnisse negativ beeinflussen, sondern, durch den oberflächigen Wasseraustritt, auch größere Schäden für das Bauvorhaben und sein Umfeld zur Folge haben. Diese können sowohl bauzeitlich kurz, aber auch langfristig auftreten. Wie zahlreiche Beispiele aus den Erhebungen der Staatlichen Geologischen Dienste zeigen, erfolgt das Antreffen von artesisch gespanntem Grundwasser oft überraschend und unvorbereitet.

Als Hauptprobleme, die infolge artesischer Druckverhältnisse resultieren können, sind das unkontrollierte oberflächige Austreten von Grundwasser beim Abteufen der Bohrung sowie eine nicht ausreichende Abdichtung des Ringraumes des Bohrlochs zu nennen. Beobachtbare nachteilige Auswirkungen sind von verschiedenen Fällen bekannt, wobei hier nur die originär „artesisch“ bedingten, d.h. an der Geländeoberfläche auftretenden Auswirkungen genannt werden.

Besonders problematisch sind sogenannte „verwilderte“ Arteser, bei denen es zu Grundwasseraustritten abseits des eigentlichen Bohransatzpunkts kommt. Der Grundwasseraustritt erfolgt hierbei aufgrund von Schwächezonen im Gebirge in der Umgebung und z. T. auch auf benachbarten Grundstücken.

Beispiele

Ein verwilderter Arteser ist im November 2009 in Wiesbaden aufgetreten (siehe Abbildung 5-6). Ein weiterer artesischer Austritt wurde, bisher einmalig, bedingt durch eine unzureichende, nicht stabile Abdichtung, erst mehrere Jahre nach Abschluss der Baumaßnahme beobachtet. Die noch nicht abschließend geklärte Ursache liegt vermutlich in einer frost-/tauwechselbedingten Schwächung der Abdichtung nach einem sehr kalten Winter mit einer nicht ausreichend dimensionierten Erdwärmesonde. In vereinzelten Fällen kam es mit dem aufsteigenden Grundwasser auch zum Austrag von Feinanteilen der Sedimente des Untergrundes, was z. T. zu erheblichen Verschmutzungen führte (Abbildung 5-4). Aufgrund des Materialaustrags besteht die Gefahr von Setzungen des Untergrundes, bzw. von Einbrüchen an der Geländeoberfläche.



Abbildung 5-4: Artesischer Grundwasseraustritt mit Ausspülung von Feinmaterial.



Abbildung 5-5: Artesischer Grundwasseraustritt einige Meter neben einer EWS-Bohrung.



Abbildung 5-6: Verwilderter Arteser in Wiesbaden.

Empfehlungen zur Vermeidung

Bei einer sorgfältigen Planung und einer vorzeitigen Information über die geologischen / hydrogeologischen Verhältnisse am Standort lässt sich diese Auswirkung verringern. Durch das Vorhalten einer entsprechenden bohrtechnischen Ausrüstung kann der Arteser „beherrscht“ werden, so dass keine nachteiligen Auswirkungen auftreten. Um einen vorhandenen Arteser während des Bohrvorgangs überhaupt erkennen zu können, ist der Einsatz eines geeigneten Bohrverfahrens, ggf. bei zu erwartendem Auftreten der Einbau eines Sperrrohres, das Vorhalten geeigneter schwerer Spülgzusätze und eines geeigneten Packersystems oder eines Preventers zum verlässlichen Absperren erforderlich.

5.2.2 Hydrochemische Auswirkungen

5.2.2.1 Mischung und Ausfällungen in Wässern

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Wichtig für einen effizienten Betrieb von Wasser / Wasser-Wärmepumpenanlagen sind die Grundwasserbeschaffenheitsdaten des genutzten Grundwasserleiters am Planungsstandort. Neben der Grundwassertemperatur sind dies die hydrochemischen Daten und der geologische Aufbau des Grundwasserleiters.

Publikationen und Leitfäden betonen zwar, dass die hydrochemischen Verhältnisse zu überprüfen sind. Als Grenzwerte werden z. B. für Mangan $> 0,2 \text{ mg/l}$ und für Eisen $> 0,5 \text{ mg/l}$ genannt. Wird wie empfohlen eine durch längeres Pumpen gewonnene Wasserprobe genommen, handelt es sich in der Regel um eine Mischwasserprobe aus der gesamten Mächtigkeit des Grundwasserleiters. Diese Probendaten sind lediglich dann repräsentativ, wenn das gesamte grundwassererfüllte obere Stockwerk einheitliche Redoxverhältnisse aufweist. Aus Altlastenuntersuchungen und Daten des Geologischen Dienstes NRW ist jedoch bekannt, dass das obere Grundwasserstockwerk in den quartären sandig-kiesigen Ablagerungen des Rheins oft in wenigen Kilometern Abstand vom Rhein eine deutliche hydrochemische Schichtung mit unterschiedlichen Redoxverhältnissen aufweist. Meist unterhalb einer geringer durchlässigen Fein- bis Mittelsandschicht im mittleren Abschnitt des Grundwasserleiters wird häufig ein sauerstoffarmes, fast nitratfreies Grundwasser mit einer deutlich reduzierten Redoxspannung angetroffen, das in der Regel hohe Anteile an gelösten Mangan und Eisen (bis zu mehr als 20 mg/l Eisen) führen kann. Bei einer Mischung dieser unterschiedlichen Wässer erfolgt spontan die Oxidation des gelösten Eisen und Mangans. In Folge dessen bilden sich Verockerungsbeläge in den Leitungen, am Wärmetauscher und besonders im Einleitbrunnen, wenn sauerstoffhaltiges Wasser mit den dort vorhandenen gelösten Eisen und Mangananteilen in Kontakt kommt.

In der Vergangenheit sind diese chemischen Milieubedingungen im Grundwasserkörper bei der Planung von Wasser / Wasser-Anlagen teilweise nicht beachtet worden. Neben Korrosionsproblemen ist es in vielen Fällen zu einer schnellen Verockerung der Anlage gekommen, die hohe Sanierungskosten verursachte und oft zu einer frühzeitigen Aufgabe der Anlage führte.

Beispiel

Abbildung 5-7 zeigt den Zustand eines Schluckbrunnens in Dessau (Sachsen-Anhalt). Bereits drei Monate nach Inbetriebnahme war der Brunnen nicht mehr funktionstüchtig. Neben einer Verockerung kam es hier auch zu Versinterung, so dass der Brunnen trotz Bemühungen einer Regenerierung aufgegeben werden musste.

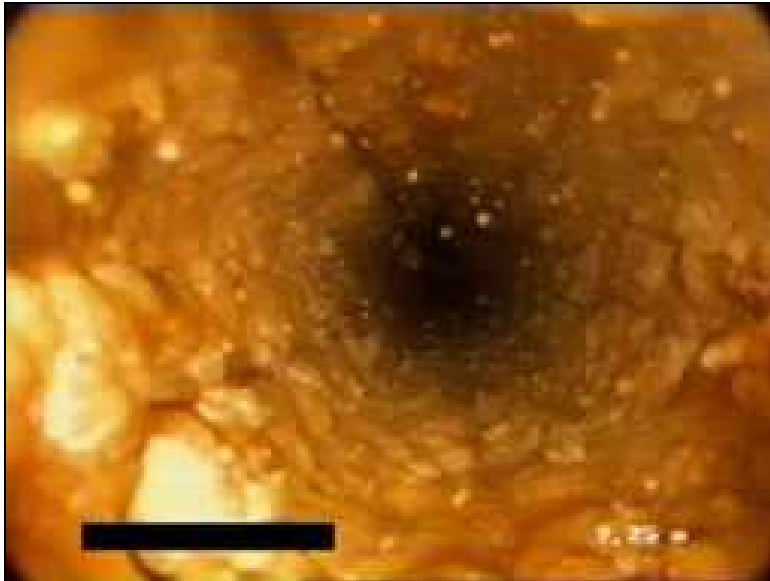


Abbildung 5-7: Verockerung in einem Schluckbrunnen (Quelle – LAGB LSA).

Gegenmaßnahmen zur Vermeidung

Vor Planung einer Wasser / Wasser-Anlage sollte der Chemismus des Grundwassers abgefragt werden und bei erhöhten Konzentrationen ggf. von der Errichtung solch einer Anlage abgesehen werden.

Bei der technischen Ausführung ist auf einen unbedingten Abschluss des Wasserkreislaufes gegenüber Sauerstoff zu achten.

5.2.2.2 Lösung/Mobilisierung

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Bei Erdwärmesonden, Spiralrohren, CO₂-Pipes etc. mit größeren Tiefen als ca. 10 m ist vor allem der Ausbau in Bezug zur Geologie bzw. hydrostratigrafischen Abfolge entscheidend für eine mögliche Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit. Werden Grundwasserstockwerke mit unterschiedlicher natürlicher Beschaffenheit und unterschiedlichen Druckniveaus miteinander verbunden, kommt es zu einem Austausch verschiedener Wässer. Damit verbunden sein kann einerseits z. B. eine Erhöhung der Mineralisation beim Aufstieg tiefer Grundwässer, andererseits eine Verlagerung von anthropogen eingebrachten Stoffen aus oberflächennahen Grundwasserstockwerken in tiefere Grundwasserstockwerke (Erhöhung der Nitratkonzentrationen, Eintrag von Pestiziden, Verkeimung, Eintrag von organischen Lösungsmitteln). Indirekt kann es durch unterschiedliche Redoxpotenziale, pH-Werte und Puffereigenschaften des Grundwassers zu einer Vielzahl von Reaktionen, wie Stoffausfällungen, Adsorptionsvorgängen etc. kommen, die die Grundwasserbeschaffenheit verändern können. Auch beim Betrieb fachgerecht eingebauter Erdwärmesonden kommt es zu Beeinflussungen der Hydrochemie. Insbesondere wenn Erdwärmesondenanlagen zur Gebäudekühlung auf großen Flächen eingesetzt werden, kann es durch die Temperaturerhöhung zur

Erhöhung der bakteriellen Aktivität im Untergrund kommen, die durch weitergehende Abbau- und Umwandlungsprozesse im Grundwasserraum eine Veränderung der Hydrochemie bewirken kann.

Bei geothermischen Brunnenanlagen ist durch die Entnahme und Rückführung aus bzw. in den Grundwasserleiter eine Vielzahl von Änderungen der Grundwasserbeschaffenheit möglich. Dabei wird vorausgesetzt, dass Förderung und Wiedereinspeisung des Grundwassers in den gleichen (meist oberflächennahen) Grundwasserleiter erfolgen.

Meist erfolgt eine Sauerstoffanreicherung (Belüftung), die einerseits zu verstärkter mikrobiologischer Aktivität mit der Folge von Biofilmbildungen in den Anlagen, andererseits zur Ausfällung von Eisen und Mangan (Verockerung) in den Brunnen führen kann. Diese Erscheinungen können auch den Grundwasserleiter selbst im Bereich zwischen Einleit- und Entnahmebrunnen mehr oder weniger stark betreffen. Werden die Anlagen auch zur Kühlung eingesetzt, wird eine Erhöhung der mikrobiologischen Aktivität wahrscheinlicher.

Bei falschem Ausbau von Förder- und Versickerungsbrunnen können durch eine aktive örtliche Verlagerung von Grundwässern mit unterschiedlichen Beschaffenheiten unerwünschte Veränderungen der Wasserqualitäten ausgelöst werden.

Empfehlungen zur Vermeidung

Als Konsequenz ergibt sich für Wasser / Wasser-Anlagen die dringende Forderung nach positiver Klärung der grundwasserhydraulischen Randbedingungen. Eine Probebohrung sollte vorgenommen werden, bei der die geologischen Schichtdaten sorgfältig erfasst werden. Eine Wasserprobe ist aus der oberen Hälfte des Grundwasserleiters zu entnehmen und schon vor Ort auf Leitfähigkeit, Temperatur, Sauerstoffgehalt und Redoxwert zu überprüfen. Hierbei darf nur kurz angepumpt werden (max. 10 l), um eine Vermischung des Grundwassers zu vermeiden. Danach sollte der Bohrvorgang unter Schutzverrohrung fortgesetzt werden, um die untere Hälfte des Grundwasserleiters wie zuvor vor Ort zu beproben.

Erst wenn Kenntnis darüber besteht, wie sich die Milieuindikatoren über die grundwassererfüllte Mächtigkeit verteilen, kann im Falle von geothermischen Brunnenanlagen entschieden werden, in welchem Teufenbereich des Grundwasserleiters die Filterstrecken des Entnahme- und Einleitbrunnen gelegt werden können. Die Filterstrecken der Entnahme- und Einleitbrunnen müssen in Grundwasserabschnitten mit den gleichen Milieubedingungen liegen, um die Mischung unterschiedlicher Grundwässer soweit wie möglich zu vermeiden und teure Wartungskosten der Anlage zu reduzieren.

5.2.2.3 Stoffeintrag (z.B. bei/von Schadenfällen)

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Durch einen Stoffeintrag von der Geländeoberfläche z. B. beim Bohren, einen Eintrag durch Verschleppung oder eine Leckage einer Sonde im Untergrund können Schadstoffe in das Grundwasser gelangen. Der Eintrag kann über folgende Wege erfolgen:

- Eintrag beim Bohrprozess,
- Eintrag über Umläufigkeiten nach Errichten der Erdwärmesonde,
- Eintrag von Wärmeträgerflüssigkeit aus der Erdwärmesonde.

Während des Bohrprozesses ist der Eintrag von Schadstoffen aus der Bohrspülung heraus oder über das Verschleppen möglich. Eine fehlende oder fehlerhafte Abdichtung der Sonden kann zu Zutritten von Schadstoffen von oben in den Grundwasserleiter, bzw. zu einem Übertritt über die natürlich trennende Schicht hinweg zwischen zwei Grundwasserleitern führen. Erdwärmesonden sind mit einer Wärmeträgerflüssigkeit gefüllt, welche bei Leckage der Sonde und gleichzeitig fehlerhafter Hinterfüllung austreten und in das Grundwasser gelangen kann.

Bei dem heute gebräuchlichen Einsatz von HD-PE-Rohren als Sondenmaterial und dem Fehlen von Abstandshaltern kann es beim Einbau zu irreversiblen Beschädigungen der Rohrwand kommen, die spätere Leckagen nach sich ziehen können [DVWG (2008)]. In allen Fällen kann eine Verschlechterung des chemischen Zustandes des Grundwassers lokal erfolgen.

Sowohl Wärmeträgerflüssigkeit als auch Zusätze beim Bohrverfahren stehen in einem begrenzten Umfang zur Verfügung. Sie führen deshalb auch auf Grund der Verdünnung und mikrobieller Abbauprozesse zu einem begrenzten Schadensbild.

Ein Schaden kann durch einen anthropogenen Schadstoff, aber auch durch eine geogen bedingte abweichende Konzentration (meist Versalzung) des Grundwassers erfolgen. Der Eintrag von Schadstoffen (anthropogen bzw. geogen) über Umläufigkeiten kann oft erst nach Jahren eintreten und ist meist nicht sofort feststellbar. Zudem können die Schadstoffquellen zeitlich und mengenmäßig unbegrenzt zur Verfügung stehen. Bei nichtordnungsgemäßer Abdichtung können Schadstoffe aus einer Altlast in den bisher nicht kontaminierten Grundwasserleiter gelangen (siehe Abbildung 5-8).

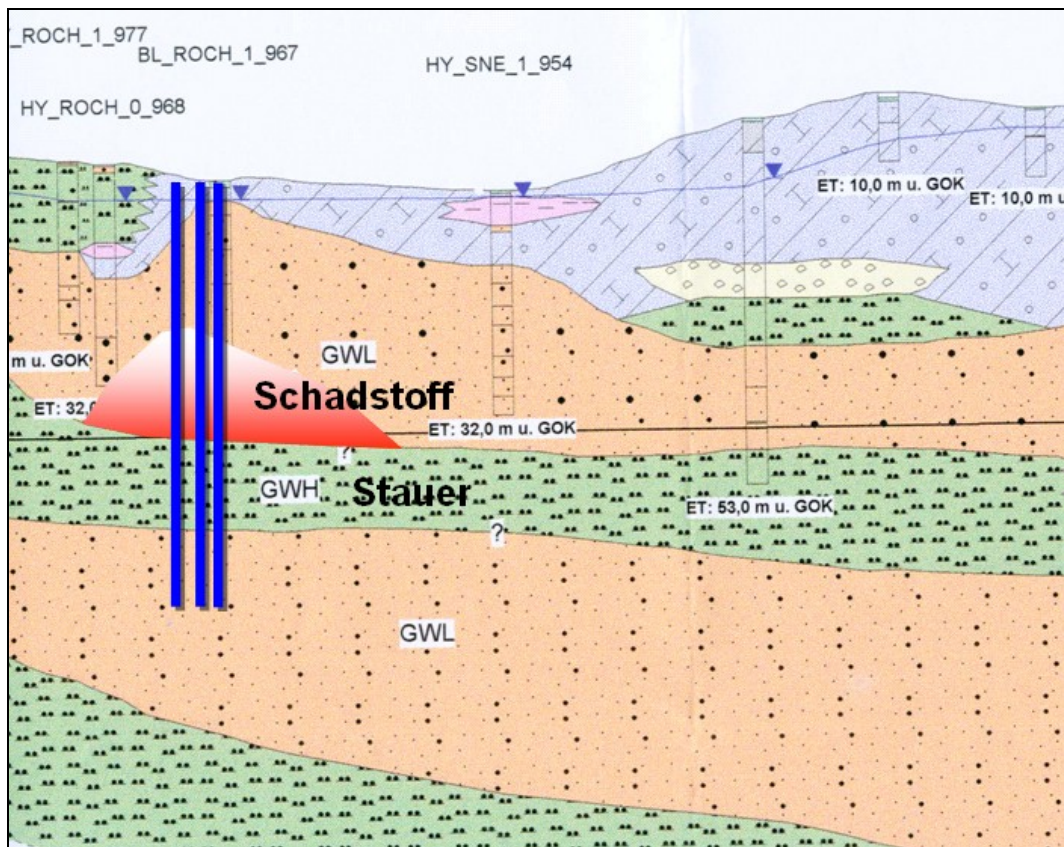


Abbildung 5-8: Reale geologische Situation in Sachsen-Anhalt – Verschleppung eines Schadstoffs in den GWL durch den Bohrvorgang (Quelle - LAGB).

Beispiel

Im Bereich eines Parkplatzes wurden Absenkungen an der Oberfläche beobachtet. Kontrollen ergaben, dass die Hinterfüllung für ein Erdsondenfeld mit mehreren Sonden nur über eine Kiesschüttung realisiert wurde. Es kam zum Zutritt von Öl in den Grundwasserleiter.

Empfehlungen zur Vermeidung

Nach Möglichkeit sollte das Durchteufen von bedeutsamen grundwasserschützenden Stauern nicht erfolgen. Im Bereich von Schadstoffherden sollten Erdwärmesonden nicht errichtet werden.

Der Bohrlochringraum um die Sonde sowie der Bereich zwischen den Sondenrohren sind vollständig und hohlraumfrei zu verfüllen. Für geothermische Zwecke entwickelte Hinterfüllbaustoffe, die ein verbessertes Verhalten bei Frost-Tauwechseln und Beständigkeit gegen Sulfatwasser aufweisen, sollten standardmäßig zum Einsatz kommen.

Das Wärmeträgermedium ist so zu wählen, dass im Fall einer Sondenleckage eine Grundwasser- und Bodenverschmutzung möglichst gering gehalten wird. Die meisten Richtlinien und Leitfäden enthalten deshalb eine Auflistung von erlaubten Stoffen, die entsprechend der VAWS einer Wassergefährdungsklasse von maximal 1 angehören. Für Erdwärmesondenanlagen in Trinkwasserschutzgebieten kann ein Betrieb mit dem Wärmeträgermedium „Trinkwasser“ eine Option sein, um eine Gefährdung, die vom Wärmeträgermedium ausgeht, zu vermeiden. Nach Sondeneinbau ist die Dichtheit der Sonden zu prüfen und nachzuweisen.

5.2.3 Thermische Auswirkungen

Die thermische Beeinflussung (Abkühlung, Erwärmung) des Untergrundes bzw. des Grundwassers ist eine direkte Folge geothermischer Nutzungen. In welcher Größenordnung bzw. Reichweite diese Beeinflussung akzeptiert wird, ergibt sich einerseits aus anlagentechnischen/planerischen Vorgaben (z.B. VDI-Richtlinie 4640), aus den Beständigkeiten der eingesetzten Materialien und aus wasser- und bergrechtlichen Vorgaben.

Während die Abkühlung des Untergrundes bzw. Grundwassers von Seiten des Grundwasserschutzes in der Regel als weniger problematisch als die Erwärmung angesehen wird, führt insbesondere eine zu starke Abkühlung und die damit verbundene Eisbildung im Untergrund zu unerwarteten Auswirkungen. Grund ist die mit der Eisbildung verbundene Volumenänderung, die zu einer mechanischen Verdrängungsbeanspruchung der Bohrlochverfüllung und des Gebirges führen kann.

Bei geothermischen Brunnenanlagen können Vereisungen nur in der Wärmepumpe auftreten, was zum Abschalten der Anlage führt.

5.2.3.1 Erwärmung

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Durch nicht fachgerechte Auslegung der Erdwärmeanlage kann es zu einer dauerhaften Erwärmung des Grundwassers kommen, wenn ein höherer Wärmeeintrag als Wärmeentzug aus dem Untergrund erfolgt. Die Reichweite der Untergrund- bzw. Grundwassererwärmung ist im Falle von geothermischen Brunnenanlagen höher als bei Erdwärmesonden.

Auswirkungen auf das Lösungsgleichgewicht auf Inhaltsstoffe des GW sind aufgrund der i.d.R. geringen Temperaturen nicht zu erwarten. Ein Einfluss auf die mikrobiologische Aktivität ist möglich.

Beispiele

Dem HLUG sind verschiedene geothermische Anlagen bekannt, bei denen entgegen der Planung und der Genehmigung mehr Wärme in den Untergrund abgeführt wird, als im gleichen Betrachtungszeitraum (z. B. ein Jahr) entnommen wird. Ursächlich sind bei diesen Fällen Fehler in der Heiz- bzw. Kältebedarfsermittlung.

Empfehlungen zur Vermeidung

Vorgabe eines thermisch ausgeglichenen Betriebs.

5.2.3.2 Abkühlung

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Der Grund für eine übermäßige Abkühlung des Untergrundes ist in der Regel eine unterdimensionierte, nicht an den Wärmebedarf des Nutzers/ des Gebäudes angepasste geothermische Anlage.

Der Entzug von Wärme aus dem Untergrund bzw. Grundwasser führt zu deren Abkühlung. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen der (a) geplanten, zeitlich begrenzten und wiederkeh-

renden Abkühlung im Regelheizbetrieb und der (b) nicht geplanten, übermäßig starken und/oder lang anhaltenden Abkühlung.

Im Regelfall (a) beträgt die mittlere Abkühlung des Untergrundes bzw. des Grundwassers an der Bohrlochwand bei einer nach der VDI-Richtlinie 4640 ausgelegten Erdwärmesondenanlage nach rund 25-jährigem Betrieb wenige Kelvin. Die messbare Reichweite der Abkühlung beträgt kaum mehr als 10 – 20 m. Während die Auswirkungen des Regelfalls auf den Untergrund grundsätzlich unproblematisch sind, sind Auswirkungen auf die Bohrlochverfüllung möglich, wenn diese nicht frost-tauwechselbeständig ist.

Die übermäßige Abkühlung (b) führt zu einer entsprechend starken Abkühlung des Untergrundes bzw. Grundwassers mit größeren Reichweiten. LENARDUZZI et al. (2000) berichten über Funktionsprobleme und die Schädigung von Erdwärmesonden infolge Quetschung durch das Gefrieren des Untergrundes mit Eislinnenbildung.

Bei geothermischen Brunnenanlagen ist die Abkühlung des Grundwassers insgesamt kleiner, jedoch ist ihre Reichweite größer, als bei Erdwärmesonden.

Auswirkungen auf das Lösungsgleichgewicht sind aufgrund der im Falle der oberflächennahen Erdwärmenutzung in der Regel geringen Temperaturen nicht zu erwarten.

Änderungen der Temperaturverhältnisse im Grundwasser führen zu veränderten geochemischen Gleichgewichten (ARNING et al. 2006). Ein wesentlicher negativer Einfluss von Erdwärmesondenanlagen auf Mikroorganismen konnte von SCHIPPERS & REICHLING (2006) nicht bestätigt werden.

Beispiele

Aufgrund fehlender Messungen / Messstellen existieren bisher keine Daten, die eine übermäßige Abkühlung außerhalb einer geothermischen Anlage aufzeigen. Es gibt aber zahlreiche belegte Fälle unterdimensionierter Anlagen (insbesondere Erdwärmesonden), bei denen innerhalb der Sonden deutlich tiefere Temperaturen auftreten als geplant. Diese wiederum verursachen auch im Untergrund eine stärkere Abkühlung als im Rahmen der Planung angenommen.

Den SGD sind verschiedene Erdwärmesondenanlagen bekannt, die aufgrund einer Unterdimensionierung nachträglich durch weitere Erdwärmesonden erweitert wurden. Es ist zudem eine Anlage mit einer deutlichen Eisbildung im Untergrund bekannt (entspricht Beispiel 5.3.1.2 Hebung infolge Vereisung).

Im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) der Schweiz haben BASSETTI et al. (2006) in einer Dokumentation eine Reihe von Vorhaben zusammengestellt, bei denen es aufgrund zu geringer Temperaturen in Erdwärmesonden zu Schäden an der Anlage bis hin zu Hebungen kam.

Empfehlungen zur Vermeidung

Durch eine sachgerechte, auf den Bedarf abgestimmte und die geothermische Situation berücksichtigende Planung, Ausführung und Betrieb einer geothermischen Anlage kann eine zu starke Abkühlung im Untergrund vermieden werden. Weitere Hinweise aufgrund der Auswertung von Schadensfällen geben BASSETTI et al. (2006).

5.2.4 Biologische Auswirkungen

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Geogen und hydrochemisch verursachte natürliche Prozesse im Grundwasser sowie die durch Bergbautätigkeit herbeigeführte oftmals hohe Mineralisation von Grubenwässern stehen in Wechselwirkung mit biologischen Prozessen. Diese biologischen Auswirkungen im Grundwasser und Grubenwasser können als Verunreinigungen, das sog. Fouling bezeichnet werden. Die als Fouling charakterisierten Prozesse werden in verschiedene Typen unterteilt: Die Ausbildung von Biofilmen durch Bakterien und Algen (Biofouling), die Auskristallisation schwerlöslicher Salze (Scaling) sowie die Sedimentation von Sand und Schlamm. Eisen- und Manganausfällungen (Verockerungen) werden ebenso durch biologische, mikrobielle Pro-

zesse gesteuert. Die meisten der Prozesse treten häufig in Kombination auf. Auswirkungen des biologischen Fouling können bei der Geothermienutzung vor allem in offenen Systemen auftreten. Hierbei sind besonders die Grundwassergewinnung über Brunnensysteme sowie die Grubenwassernutzung zu nennen.

Durch lokale Veränderungen der hydrochemischen und geogenen Gegebenheiten können die Konzentration an gelösten organischen und anorganischen Stoffen und damit auch eine Wachstumskomponente für Mikroorganismen erhöht sein. Weiterhin begünstigt die Rückführung von erwärmten Wässern in den natürlichen Kreislauf im Grund- oder Grubenwasser durch einen Temperaturanstieg bei angewandter geothermischer Kühlnutzung das mikrobielle Wachstum. Zusätzlich dazu erhöht sich bei einer geringen Fließgeschwindigkeit des Wassers die Schlammmenge durch die Sedimentation der Schwebfracht und somit die Nahrungsquelle für Mikroorganismen. Diese können feste Oberflächen besiedeln und zum Wachstum gelangen. Vor allem hochmineralisierte milieuhabhängige Grubenwässer weichen meist signifikant in ihrem Chemismus von bergbaulich unbeeinflussten Grundwässern ab. Bei einer Förderung dieses Wassers nach Übertage kann es zu temperatur- und sauerstoffbedingten Ausfällungsprozessen kommen, welche meist mikrobiell gesteuert sind (s. Kapitel 5.5.2). Bei einer Nutzung mittels in das Grubensystem eingebetteten Plattenwärmetauschern können ebenfalls durch Redoxpotenzial-, pH-Wert- und Temperaturänderungen sowie mikrobielle Prozesse Fouling auftreten.

Die genannten Auswirkungen des Biofouling können an technischen, vor allem wärmeübertragenden Anlagenteilen zu Verschmutzungen und somit zu einer Reduzierung der Anlageneffizienz führen. Durch Ausfällungen z.B. in Förderbrunnen muss der benötigte Druck erhöht werden, um die Fließrate im Wärmetauscher aufrecht zu erhalten.

Weiterhin kann eine biologische Verkeimung von Brunnenfiltern bei der Grundwassernutzung zur Verminderung der Anlagenleistung führen. Wenn sich Bakterienfilme auf Rohr- oder Sondenmaterialien ausgedehnt haben, können diese die Wärmeübertragung und den -transport verringern (BELL & MUELLER, 2001). Dies kann insbesondere bei Plattenwärmetauschern auftreten, welche zur Grubenwassernutzung als Matten innerhalb des Grubengebäudes verlegt werden.

Das biologische Fouling im Grundwasser sowie in Grubenwässern als Auswirkung von geothermischer Nutzung (Bildung von Biofilmen, Verkeimung) kann als gering im Vergleich zu physikalisch-chemischen Foulingprozessen (Kristallisation, Verockerung, Korrosion) eingeschätzt werden. Allerdings spielen mikrobielle Prozesse eine ausschlaggebende Rolle bei Lösungs- und Fällungsreaktionen im Grund- und Grubenwasser (z.B. Verockerung) (s. Kapitel 5.2.2.1, 5.2.2.2).

Empfehlungen zur Vermeidung

Bei der Planung einer geothermischen Grubenwasseranlage oder bei Nutzung von Grundwasser über Brunnen sollte vorab eine Analyse der hydrochemischen Parameter sowie der organischen Fracht erfolgen. Weiterhin kann mit Berechnungen von Löslichkeits-Fällungs-Beziehungen der im genutzten Wasser vorkommenden Elementen abgeschätzt werden, mit welchen Temperaturgradienten die Anlage betrieben werden kann.

Ein turbulenter Fluss des Wärmeträgermediums verringert die Sedimentationen von Schwebstoffen und damit das Nahrungsdargebot für Bakterien.

Um eine im wesentlichen durch mikrobielle Prozesse gesteuerte Verockerung der Wärmetauscher zu vermindern, kann das Grubenwasser in einem geschlossenen Kreislauf ohne Sauerstoffzutritt und Druckentlastung geführt werden. Dies beugt der Ausfällung von Eisenhydroxid vor.

Bei der Auswahl der Materialien des Wärmetauschers ist darauf zu achten, dass sie den physiko-chemischen Beanspruchungen durch die warmen und korrosiv wirkenden Grubenwässer standhalten und zudem eine Adsorption von Ausfällungen an den Wandungen weitestgehend verhindern. Hierdurch können die Wartungs- und Unterhaltungskosten erheblich vermindert werden (OFNER & WIEBER, 2008).

5.3 Auswirkungen auf den Untergrund

5.3.1 Hebungen

5.3.1.1 Hebungen infolge Quellvorgängen, Mineralbildung

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Die durch Quellung und Hebung in sulfatführenden Gesteinen verursachten spektakulären Gebirgsverformungen sind, insbesondere im Wirkungsbereich von Tunnelbauwerken, seit mehreren Jahrzehnten bekannt.

Die Ursachen und Mechanismen zum Quellverhalten von Anhydrit und Tongesteinen, die häufig zu Bauverzögerungen als auch zu erheblichen Kostensteigerungen und Folgekosten geführt haben, sind Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (HENKE et al. (1975); REIMANN (1991); ANAGNOSTOU (1992), HAUBER et al. (2005); WITTKE et al. (2007); RAUH (2009)). Die hiermit verbundenen Gefahrenpotentiale sind beschrieben in 5.1.2.

Beispiel

Gegen Ende des Jahres 2007 wurden erstmalig als Folge von Bohrungen für ein geplantes geothermisches Vorhaben Schäden an Gebäuden im historischen Altstadtbereich der Stadt Staufen beobachtet. Nach dem Kenntnisstand ist es der einzige bisher bekannte Schadensfall, der auf Quellungen und Hebungen des Untergrundes als Folge eines Bohrvorhabens zurückzuführen ist.

Die Stadt Staufen i. Br. beabsichtigte, das denkmalgeschützte Rathaus mit einer Erdwärmesonden gekoppelten Wärmepumpenanlage zu heizen und zu kühlen. Hierzu wurden im September 2007 hinter dem Rathaus sieben bis zu 140 m tiefe Erdwärmesonden eingerichtet. Wenige Wochen nach dem Abteufen der Erdwärmesondenbohrungen wurden Risse im renovierten Rathaus beobachtet. Mit geodätischen Messungen wurde ein elliptischer Hebungsbereich nachgewiesen. Er hat eine Länge von ca. 280 m und eine Breite von ca. 180 m. Die Hebung verläuft seit Beginn der Messungen weitgehend linear. Die maximale vertikale Hebungsrate im Hebungszentrum beträgt bis zu 11 mm/Monat.

Der Untergrund im Bereich des Erdwärmesondenfeldes wird unter einer geringmächtigen Quartärüberdeckung von der Schichtenfolge des Mittleren Keupers (Schilfsandstein und Gipskeuper) und des Unterkeupers aufgebaut. Der Gipskeuper enthält Gips und Anhydrit sowie quellfähige Tonminerale. Anhand der Temperaturverteilung in einer der Erdwärmesonden wurde ein Grundwasseraufstieg im Ringraum der Erdwärmesondenbohrung nachgewiesen. Durch die Wasserzutritte in einen ehemals trockenen Gebirgsabschnitt wird eine Umwandlung von Anhydrit in Gips verursacht. Sie ist mit einer erheblichen Volumenzunahme verbunden. Während tonfreie Anhydritgesteine kaum quellen, führen quellende Tonminerale zur Aufweitung des dichten Anhydritgesteins, erhöhen die Wasserwegsamkeit und damit die Sulfatlösung. Weiterhin begünstigen sie mit der weiteren Retardation und Absorption des Wassers zudem die Gipsfällung.



Abbildung 5-9: Hebungsrisse an Gebäuden in Staufen i. Br.

Empfehlung zur Vermeidung

Um die Quellungsvorgänge zu stoppen ist es erforderlich, den Zufluss von Grundwasser in die quellfähigen Gesteine zu unterbinden. Dies erfolgt durch ergänzende Abdichtungen der Ringräume und durch hydraulische Maßnahmen (Absenkung des Grundwasserspiegels). Durch eine Tiefenbegrenzung der Bohrung können Wegsamkeiten in Anhydritgesteinen vermieden werden. Weiterhin ist das Erstellen einer dauerhaft dichten, sulfatbeständigen Abdichtung sicher zu stellen.

5.3.1.2 Hebung infolge Vereisung

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Die Bildung eines Eis- bzw. Frostkörpers führt durch die Volumenzunahme gefrierenden Wassers zu einer mechanischen Verdrängungsbeanspruchung der Bohrlochverfüllung und des Gebirges. An der Erdoberfläche kann sich dies oberhalb der Sonden sowie oberhalb der Anbindeleitungen in Form einer Hebung bemerkbar machen. In der Regel schließt sich an die Hebung eine Setzung an (siehe Kapitel 5.3.2).

Die Bildung von Eis- bzw. Frostkörpern ist bei Erdwärmesondenbohrungen ein Hinweis auf eine Unterdimensionierung.

Beispiele

Eine in Hessen im Juni 2006 in Betrieb genommene Erdwärmesondenanlage des Einfamilienhauses lief nahezu drei Jahre zur vollen Zufriedenheit der Eigentümer, bis sich im Februar 2009 das Pflaster über den rund 5 m voneinander entfernten zwei Erdwärmesonden um bis zu 10 cm hob. Die nachfolgend einsetzende Senkung des Pflasters ging so weit, dass es schließlich ab März zur Bildung einer Vertiefung und der nachfolgenden Ausbildung eines Trichters kam.



Abbildung 5-10: Senkungen und Hebungen verursacht durch eingefrorene Zuleitungen einer Erdwärmesondenanlage (Bassetti et al. 2006).

Empfehlungen zur Vermeidung

Allein durch eine ausreichende, d.h. an die Anforderung der Wärmepumpenanlage und die geothermische Situation angepasste Dimensionierung kann die Bildung von Frostkörpern in der Erdwärmesondenbohrung vermieden werden.

Da die mittlere Soletemperatur (Mittelwert von Sondenvor- und Sondenrücklauf) im Wochenmittel nicht unter 0°C sinken darf, ist die Entstehung einer über den Bohrlochradius hinausgehenden Vereisung bei einer ausreichenden Bemessung auszuschließen.

Zuleitungen sollten unterhalb der Frostgrenze mit einer entsprechenden Einbettung verlegt werden, um Hebungen und Senkungen wie im genannten Beispiel zu vermeiden.

Durch die Bereitstellung von geothermischen Planungsgrößen kann dazu beigetragen werden, dass die Anlagenplanung die standörtliche geologisch-geothermische Situation besser berücksichtigt. Die Forderung nach einer VDI 4640-konformen Planung oder auch die Forderung nach einem frostfreien Anlagenbetrieb sind weitere Maßnahmen zur Verhinderung von über den Bohrlochradius hinausgehenden Vereisungen.

5.3.2 Suffosion, Verbruch, Einbruch, Setzung

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Als Verbruchprozess wird in der Ingenieurgeologie und der Geotechnik das schrittweise Übertragen bzw. „Hocharbeiten“ eines Volumen- und damit gleichzeitig Massendefizits im Untergrund in Richtung der Tagesoberfläche bezeichnet. Der bei diesem Prozess entstehende geometrische Körper wird als Verbruch bezeichnet.

Die Ursache für einen natürlichen Einbruch bzw. Erdfall sind Auslaugungen von Salz, Kalk und Gips im tieferen Untergrund. Wenn die Hohlräume zu groß werden, brechen sie zusammen und an der Erdoberfläche sackt der Boden nach (siehe Abbildung 5-11).

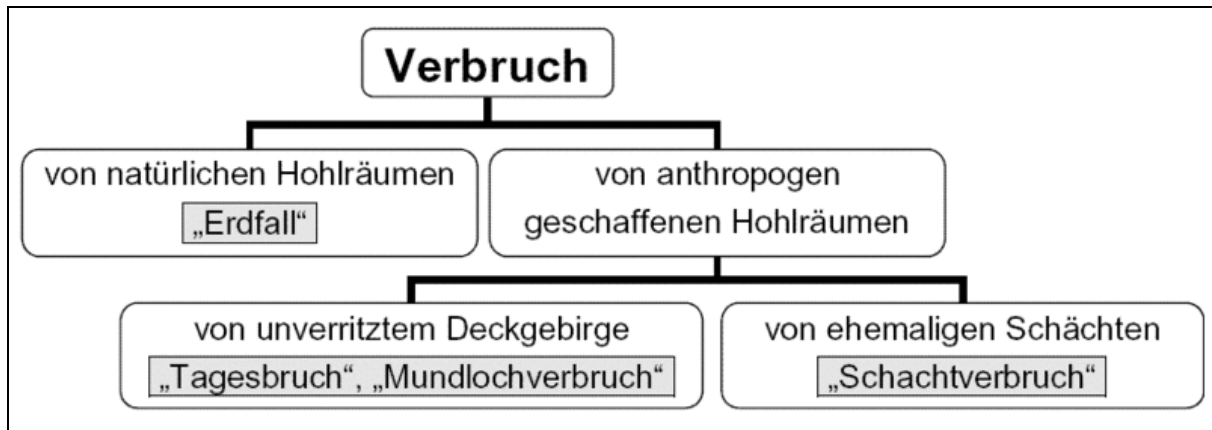


Abbildung 5-11: Übersicht Verbrauchsmöglichkeiten.

Unter Suffosion versteht man die Materialverlagerungen bzw. den Abtransport feiner Bodenteilchen im Untergrund durch Wasser. Dabei werden feine Körner eines ungleichförmigen, nichtbindigen Bodens von der Strömungskraft des Wassers aus dem Boden gelöst und durch den vorhandenen Porenraum bzw. durch künstlich geschaffene Hohlräume transportiert. Je nach Umlagerungsgeschwindigkeit bleiben das Volumen und die Struktur des Bodens zunächst erhalten. Aufgrund des zunehmenden Porenraumes, nimmt die Porosität und somit die Durchlässigkeit für Wasser zu. Die Stabilität kann plötzlich abnehmen, und es besteht die Gefahr eines Zusammenbruches und einer Sackung an der Erdoberfläche.

Die Ursachen für einen Verbrauch / Einbruch hängen in der Regel mit natürlichen oder künstlichen Hohlräumen und einem unerwarteten Materialtransport zusammen. Natürliche Hohlräume entstehen durch Verkarstungsvorgänge, starke Klüftung oder Störungszonen. Künstliche Hohlräume treten in der Regel im Zusammenhang mit bergbaulicher Tätigkeit auf. Dies kann sowohl Altbergbau als auch rezenter Bergbau sein. Die Hohlräume wirken sich zum einen durch ein gegenüber den natürlichen Verhältnissen verändertes hydrodynamisches Regime und zum anderen durch Auflockerungsbereiche in deren Umgebung aus. Hohlräume können direkt angebohrt werden und damit zu Spülungsverlusten mit Materialtransport führen (siehe Abbildungen 5-11, 5-12).

Nachsackendes bzw. einstürzendes Material kann an der Erdoberfläche zu Bodensackungen bis hin zu Kraterbildungen führen. Besteht zwischen tiefer liegenden Hohlräumen eine hydraulische Verbindung zu einem der hangenden geologischen Einheiten, in denen gebohrt wird, kann dies zu schleichendem Materialtransport von oben nach unten führen. Bemerkenswert ist dies in der Regel nur anhand von Spülungsverlusten.

Eine weitere Form künstlicher Hohlräume entsteht durch das Nichtverpressen bzw. unsachgemäße Verpressen von Ringräumen. Diese Hohlräume füllen sich entweder mit Material aus dem umgebenden Gestein oder aber bleiben als permanente Wegsamkeit für Feinmaterial bestehen. Im ersten Fall kommt es zu einer kurzzeitigen und begrenzten Sackung an der Oberfläche, im zweiten Fall kann es zu einer stetigen Suffosionserscheinung an der Oberfläche führen.

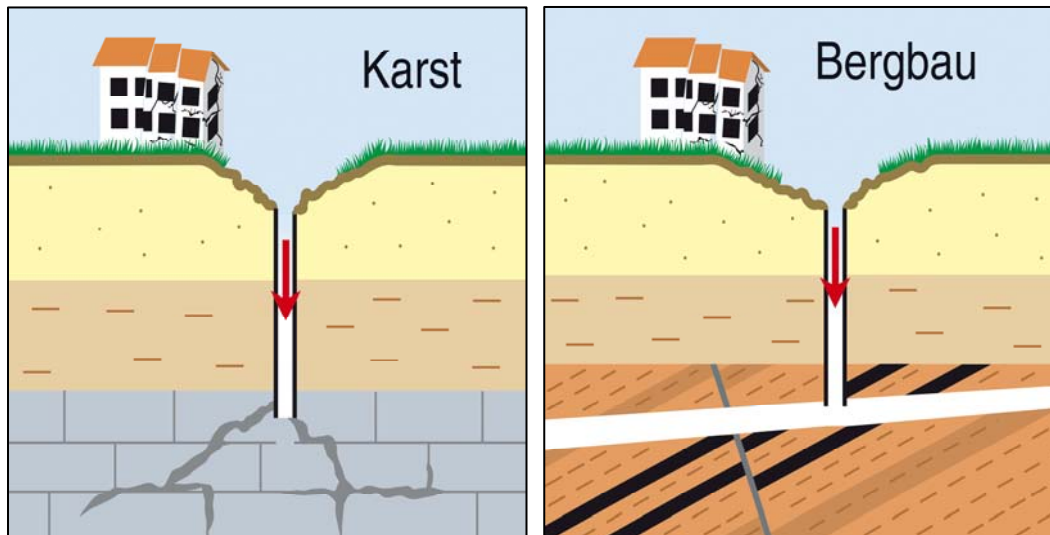


Abbildung 5-12: Schema Verbruch durch Karst- und Bergbauvorkommen.

Mit einer Suffosion oder einem Verbruch gehen häufig auch Setzungen einher. Setzungen sind zum einen auf eine Zusatzbelastung des Korngerüsts durch fehlenden Auftrieb (z. B. Grundwasserabsenkung in nichtbindigen Sedimenten wie Sanden etc.) und zum anderen auf das Schrumpfen bindiger Böden (Ton, Schluff etc.) durch die eine mit abnehmendem Wassergehalt zunehmende Kapillarspannung zurückzuführen.

Die Ursachen einer Grundwasserabsenkung im Zusammenhang mit einer geothermischen Bohrung sind in 5.2.1.1 beschrieben. Das Schrumpfen bindiger Böden bzw. von Verfüllmaterial kann durch häufige Frost-/Tauwechsel und nicht frostbeständiges Verfüllmaterial bedingt werden (siehe 5.2.3.2). Die Folge ist eine Setzungserscheinung. Nachrutschendes Material kann zur Ausbildung eines Setzungstrichters im Bereich des Bohrlochs gegebenenfalls im unmittelbaren Bohrungsumfeld führen.

Durch eine Entwässerung von Sedimenten können Setzungen entstehen, wenn in Folge eines hydraulischen Kurzschlusses (Ringraum-Umläufigkeiten) Grundwasser in andere grundwasserleitenden Schichten abströmt und das zuvor grundwassererfüllte Porenvolumen durch den Druck der überlagernden Schichten verringert wird. Dadurch findet eine Reduzierung der Schichtmächtigkeiten statt, die sich an der Erdoberfläche durch eine langsame Absenkung der Geländeoberfläche bemerkbar machen kann.

Setzungen können auch im Nachgang zu einem Verbruch im Umfeld der Verbruchzone auftreten. Die Massenbewegungen in der Verbruchzone wirken sich bedingt auf die Sedimente im Umfeld des Verbruchs aus, und bewirken eine Änderung des Korngerüsts.

Beispiele

In Kamen-Methler (Nordrhein-Westfalen) wurde im Jahr 2009 eine Bohrung zur Erdwärmennutzung für ein Einfamilienhaus niedergebracht, in deren Verlauf es zu einem gravierenden Havarieereignis kam. Am Abend des 9. Juli 2009 kam es in der unmittelbaren Umgebung der Bohrstelle zu Bodenabsackungen, die innerhalb weniger Stunden zur Bildung eines Kraters von rund 50 – 60 m³ Volumen führten. Das Bohrgerät stürzte dabei in den Krater und das im Bohrloch verbliebene Bohrgestänge riss ab.

Es kam zu einer sichtbaren Schiefstellung des angrenzenden Rohbaus (Senkung der NW-Ecke des Hauses um 86 mm; Hebung der SE-Ecke um 8 mm). Um den Einbruchskrater herum bildete sich ein +/- konzentrisches System von Bodenrissen, die auch die Nachbargrundstücke betrafen und z. T. auch durch Gebäude bzw. Gebäudeteile hindurch aufrissen. Es bestand bei einzelnen Häusern akute Einsturzgefahr. Die betroffenen Bewohner wurden evakuiert und die Gebäude provisorisch gesichert.

Im Verlauf der folgenden Tage nach dem Havarieereignis senkte sich der Boden bis zu einer Entfernung von ca. 200 m von der Havariestelle mit Beträgen bis > 10 cm. Auf zahlreichen Grundstücken wurden tiefe Rissbildungen im Boden beobachtet. An insgesamt ca. 20 Ge-

bäuden in der Umgebung traten im Laufe der nächsten Tage und Wochen z. T. Schäden auf, die in einigen Fällen eine akute Einsturzgefahr hervorriefen. Vier Häuser müssen als Totalverluste angesehen werden. Beim westlich an die Unglücksstelle angrenzenden Anwesen waren Wellenbildungen in der Hopfpflasterung zu erkennen, die auf beträchtliche Horizontalbewegungen des Bodens hindeuten.

Wie ein umfangreiches Grundwassermonitoring nach Eintritt des Havariefalls gezeigt hat, flossen durch das offene Bohrloch Grundwasser und erhebliche Mengen Sediment aus dem ersten Grundwasserstockwerk in den Untergrund ab. Um die Schadensbohrung herum bildete sich ein erheblicher Grundwasserabsenkungstrichter aus.

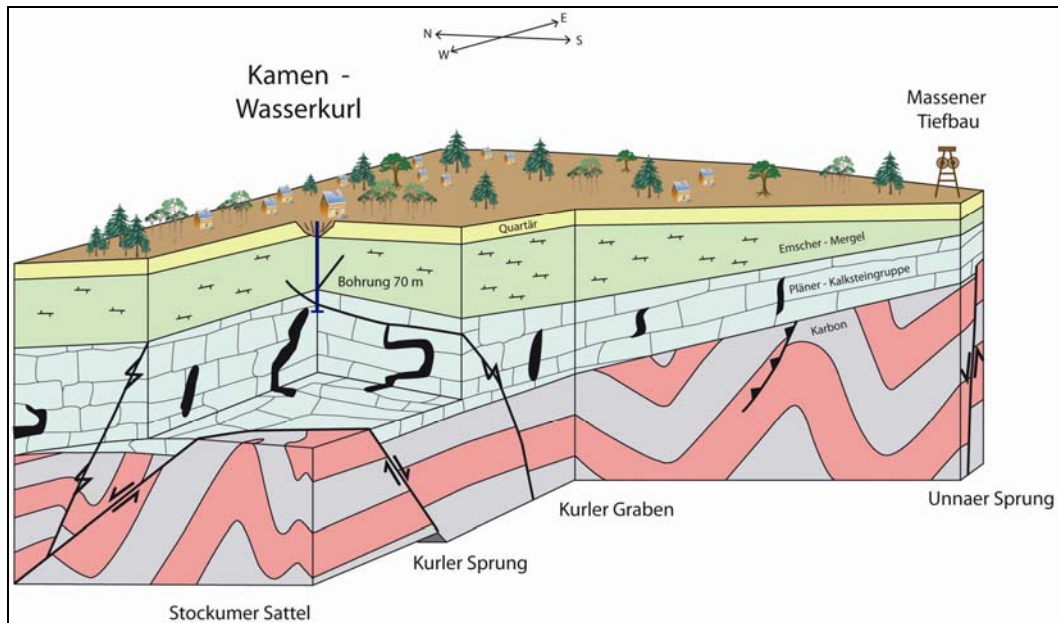


Abbildung 5-13: Blockdiagramm Kamen.

Aus den vorgefundenen geologischen Verhältnissen (Abbildung 5-13) und den Darstellungen des Schadensablaufs lässt sich folgender Verlauf des Havarieereignisses rekonstruieren: Die verunglückte Geothermiebohrung hatte bei ihrer Endteufe von 70 m bereits den Übergang vom Emscher-Mergel zu den Gesteinen der Plänerkalk-Gruppe erreicht. Da bereits die Emscher-Mergel, besonders aber die Plänergesteine wasserwegsame Klüfte aufweisen, die mit großvolumigen Karsthohlräumen innerhalb der Plänerkalk-Gruppe in Verbindung stehen, dürfte es bereits während des Bohrvorgangs zu einem schleichenden Verlust an Bohrspülung in den Untergrund gekommen sein. Hierfür spricht die auffallend geringe Menge an Bohrklein, die im Spülcontainer der Bohrung vorgefunden wurde. Dieser Verlust an Bohrspülung wurde durch ständigen Zulauf aus dem quartären Grundwasserleiter ausgeglichen. Dies konnte geschehen, weil das Bohrloch gegenüber dem quartären Grundwasserleiter nicht abgedichtet war. An Stelle eines Standrohrs war versucht worden, das Bohrloch durch entsprechende Spülungszusätze (CMC) zu stabilisieren. Durch diesen ständigen Zulauf wurden die Spülungszusätze unbemerkt sukzessive verdünnt, so dass die Stabilität des Bohrlochs immer geringer wurde.

Solange sich das Bohrgestänge während der Bohrarbeiten im Bohrloch befand, begrenzte der zur Verfügung stehende Ringraum den Wasserabfluss. Durch das weitgehende Ziehen des Bohrgestänges bei Unterbrechung der Bohrarbeiten (bis auf einen Rest von 16 Metern Länge) wurde der für den Wasserabfluss zur Verfügung stehende Raum stark vergrößert. Das Wasser konnte nun unter Mitnahme von erheblichen Sedimentvolumina in großen Mengen schnell in das Bohrloch einfließen und von da aus über das angebohrte Kluftsystem in die offenbar sehr aufnahmefähigen Karsthohlräume der Gesteine der Plänerkalk-Gruppe gelangen. Der Wasser- und Sedimentabfluss in das Bohrloch führte zunächst zur Trichterbil-

dung im unmittelbaren Bohrlochbereich. Das dabei entstehende Massendefizit löste dann einen lateralen Zustrom aus, durch den es zu erheblichen Bodenbewegungen an der Erdoberfläche kam, die letztlich für die aufgetretenen Gebäudeschäden verantwortlich sind. Die auffällige Orientierung der Schadensverteilung in (nord-)westlicher Richtung lässt einen durch eine tektonisch vorgezeichnete Kluftzone gesteuerten Materialtransport vermuten.

Vergleichsweise geringere Schadensbilder entstehen bei Setzungen infolge von Frostbildungen in Erdwärmesondenbohrungen, wie z.B. in Hessen beobachtet (siehe Abbildung 5-14).



Abbildung 5-14: Setzung infolge Frostbildung in der Erdwärmesondenbohrung (Quelle: HLUG).

Empfehlungen zur Vermeidung

Um einen Verbruch / Einbruch zu vermeiden, sind in erster Linie die Kenntnis der geologischen und hydrogeologischen sowie der bergbaulichen Situation unabdingbar. Wird in Bereichen gebohrt, in denen mit Hohlräumen zu rechnen ist, sollte eine angepasste Tiefenbegrenzung eingehalten werden. Die Tiefenbegrenzung muss in jedem Fall den Auflockerungsbereich im Umfeld von Hohlräumen berücksichtigen und somit einen Sicherheitspuffer beinhalten. Durch Hohlräume bedingte hydraulische Veränderungen im Untergrund sind häufig nicht bekannt. Um diese dennoch zeitig zu bemerken, ist es seitens der ausführenden Bohrmannschaft notwendig, dass die Spülmengen kontrolliert und nachgehalten werden. Ebenso erscheint es sinnvoll im oberen Lockergesteins- bzw. Auflockerungsbereich mit Schutzverrohrungen zu arbeiten. Dies verhindert einen unkontrollierten Massentransport in tiefere Hohlräume.

Eine fachgerechte Dimensionierung der Erdwärmesondenanlage, bei der eine Durchfrostung des Füllmaterials vermieden wird sowie der fehlerfreie Einbau von Füllmaterial, welches widerstandsfähiger auf Frost-/Tauwechsel reagiert, sollte zur Vermeidung von Setzungen infolge von Erdwärmesondenbohrungen beachtet werden.

Ein hydraulischer Kurzschluss von verschiedenen Grundwasserleitern sollte vermieden werden. Nur mit einer vollständigen und dauerhaften Abdichtung des Ringraums bzw. Bohrloches können vertikale Grundwasserbewegungen, Materialverlagerungen und Änderungen der hydraulischen Druckbedingungen in den erbohrten Schichten unterbunden werden, die zu Suffosionsprozessen, Verbrüchen oder Setzungen führen können.

5.4 Auswirkungen auf die Umwelt

5.4.1 Verschmutzungen von Oberflächengewässern

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Verschmutzungen von Oberflächengewässern werden durch Bohrspülungen verursacht. Sie zeichnen sich insbesondere durch die Eintrübung bzw. Verfärbung des Wassers durch das Bohrklein und / oder Spülzusätze aus.

Die Eintrübung bzw. Verfärbung von Oberflächengewässern ist in der Regel gut sichtbar und führt dazu, dass diese Auswirkung häufiger beobachtet wird. Die Bohrspülungen können bemerkt oder unbemerkt in die Gewässer eingetragen werden. Sind z. B. Spülwannen aufgrund eines großen Wasserzutritts in die Bohrung nicht ausreichend, so laufen diese über. Dies kann neben der Verschmutzung von Grundstücken (siehe hierzu Kapitel 5.4.2) auch zu einer Verschmutzung von Oberflächengewässern führen, wenn das überlaufende Wasser einem solchen zufließt (Abbildungen 5-15 und 5-16).

Beispiele

Abbildung 5-15 zeigt eine überlaufende Spülwanne infolge eines unerwartet hohen Wasserzutritts in die Bohrung. Das überlaufende verschmutzte Wasser strömt dem unmittelbar am Grundstück entlanglaufenden Bach zu.



Abbildung 5-15: Verschmutzung eines Oberflächengewässers infolge einer überlaufenden Spülwanne (Foto: Rumohr).

Ein von der Bohrfirma unbemerkter Eintrag der Bohrspülung in Oberflächengewässer ist auch über einen ausschließlich unterirdischen Transport der Bohrspülung möglich. Ein solcher Fall ist aus Hessen bekannt, bei dem ein rund 500 m von der Bohrung (Geologie: Rotliegend) entferntes Fließgewässer aufgrund effluenter Verhältnisse eingefärbt wurde (siehe Abb. 5-16). Diese Auswirkung ist insbesondere an Grundwasserleiter mit hohen Fließgeschwindigkeiten und geringer Filterwirkung und somit an Kluft- und Karstgrundwasserleiter gebunden.



Abbildung 5-16: Eintrübung eines Oberflächengewässers.
(Foto: Wasserbehörde, Main-Kinzig-Kreis).

Empfehlungen zur Vermeidung

Eine Gegenmaßnahme gegen eine solche in der Regel bemerkte Auswirkung ist das Bereitstellen weiterer Spülwannen bzw. die (genehmigte) Ableitung in die Kanalisation. Durch das Mitführen eines Schutzrohres können Spülverluste vermieden werden, die zu einem unterirdischen Transport / Eintrag einer Verunreinigung in ein Oberflächengewässer führen.

5.4.2 Verschmutzungen von Grundstücken

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Verschmutzungen von Grundstücken infolge von Bohrungen sind in einem gewissen Umfang kaum bis nicht vermeidbar, jedoch häufig umfangreicher als von den Kunden / Bauherren erwartet. Typisch sind das Verschlammen des Bohrplatzes, die Bildung von Fahrspuren und das Verschmutzen bestehender Gebäude durch verspritzende Bohrspülung. Bei unerwartet hohem Wasseranfall führt die ablaufende Bohrspülung auch zu Verschmutzungen außerhalb des Bohrplatzes bis hin zum öffentlichen Raum (Straße).

Bei Bohrungen und anderen Tiefbauarbeiten innerhalb bebauter Ortslagen besteht generell die Gefahr, dass Ver- und Entsorgungsleitungen beschädigt werden. Das Anbohren von Abwasserrohren sowie deren teilweise Verfüllung mit Verfüllsuspension sind dokumentiert. Die Ursache dafür ist, dass die Lage der Ver- und Entsorgungsleitungen nicht bekannt ist, weil diese entweder nicht erfragt wurde, ihr Verlauf nicht korrekt übertragen wurde bzw. deren tatsächliche Lage nicht mit der in Lageplänen dokumentierten Lage übereinstimmt. Die Verschmutzungen sind durch das gemeinsame Auftreten von Wasser, Spülung und Bohrgut bedingt. Das Arbeiten mit schwerem Gerät auf feuchten bis durchnässten Untergrund führt zudem zur Schlamm- und Schlickbildung und Beanspruchung der Grundstücksoberfläche.

Umfangreichere Verschmutzungen sind auf das Austreten von Spülung in einem unerwartet großen Umfang (Spülwanne nicht ausreichend), dem Austreten (Ausblasen) von Druckluft mit Bohrklein oder dem Austreten artesisch gespannten Wassers mit Materialaustrag zurück zu führen.

Das Austreten von Druckluft ist an das Lufthebeverfahren gebunden, dass in der Regel bei Verwendung eines Imlochhammers nur im Festgesteinsbereich angewandt wird.

Verschmutzungen auf Grundstücken treten im Vergleich zu Verschmutzungen von Kanaleinflüssen / Kanälen sehr häufig auf.

Beispiele:

Es sind Einzelfälle bekannt, bei denen Abwasserleitungen angebohrt und teilweise zunächst unbemerkt mit Verfüllsuspension verfüllt wurden.

Durch Überlaufen und unkontrolliertes Ableiten von Bohrungsspülwasser wurden Grundstücke verschmutzt (siehe Abbildung 5-17). Weiterhin ist ein Fall von austretendem Maschinenöl eines Bohrgerätes bekannt, welches das Grundstück verunreinigte (Abbildung 5-18). Verschmutzungen im Bereich der Straße können zudem zu Verschmutzungen von Kanaleinläufen bzw. der Kanalisation führen.



Abbildung 5-17: Verschmutzung eines Grundstücks durch unkontrolliertes Ableiten von Bohrspülungswasser inkl. bohrlochstabilisierender schäumungsaktiver Substanzen (Quelle: TLUG).



Abbildung 5-18: Verschmutzung von Grundstücken durch das Austreten wassergefährdender Stoffe (Maschinenöl) durch das Bohrgerät (Quelle TLUG).

Empfehlung zur Vermeidung

Durch das Vorhalten und den Einsatz der richtigen Gerätschaft, das Schottern des Bohrplatzes bis hin zum Abdecken von Gebäudeteilen können Verschmutzungen von Grundstücken und Gebäuden auf das nicht vermeidbare Maß reduziert werden.

Die Notwendigkeit, die Lage und den Verlauf von Ver- und Entsorgungsleitungen zu erkunden zeigt, dass die Dokumentation der Lage von Anbindeleitungen von geothermischen Anlagen unbedingt erforderlich ist.

5.4.3 Ausgasung

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Bei entsprechenden Konditionen des Untergrundes können in Bohrungen Gase auftreten, meist als Methan oder als Kohlendioxid. Beide Gase können zu Gefährdungen und Schäden führen, sowohl beim Abteufen der Bohrungen als auch beim Betrieb der Anlage.

Methangasaustritte sind bekannt aus dem Kohle führenden Karbon im Saarland, aber auch aus anderen Gesteinsschichten, so aus dem Opalinuston in Baden-Württemberg oder aus dem Jungtertiär im Oberrheingraben. Methanaustritte in Bohrungen können bei Volumengehalten von 5 - 14 % zu Explosionen führen, höhere Gehalte bei entsprechendem Nachschub zu länger anhaltenden Bränden. Ausgasende Bohrungen können Methan in abgeschlossene Räume leiten. Durch eine Zündung, z.B. durch Betätigung eines Lichtschalters, kann eine Explosion ausgelöst werden.

Kohlendioxid kann über nicht fachgerecht ausgeführte Ringraumverfüllungen und defekte Sonden aufsteigen und zum Totalschaden einer Anlage führen.

Beispiele

In mehreren Bereichen des Saarlandes, mit besonderer Brisanz im Stadtteil Alt-Saarbrücken der Landeshauptstadt Saarbrücken, treten Methanausgasungen auf, die die Gefahr von Explosionen und Bränden mit sich bringen.

Bisher wurden innerhalb des betroffenen Gebietes sechs Anfragen und drei Anträge zum Bau einer Erdwärmanlage gestellt. Es wurden Auflagen erteilt und die Bohrarbeiten überwacht. Im Allgemeinen lagen die gemessenen Gasgehalte in einem niedrigen Bereich mit 0 bis 2,8 Vol-%. Lediglich in einer Bohrung wurde mit 20,9 Vol-% eine hohe Konzentration angetroffen, die aber schnell abnahm und leer zog.

Aus Baden-Württemberg sind zwei Fälle bekannt:

In einem Fall kam es im Bereich der Rottenburger Flexur über den Ringraum und zwei defekte Sondenschläuche zum Aufstieg und Austritt von CO₂ aus Gesteinen des Muschelkalks. Die Anlage musste aufgegeben werden und wurde rückgebaut.

Im zweiten Fall wurde am nördlichen Rand der Alb, völlig überraschend in rd. 100 m Teufe im Opalinuston ein CH₄-Vorkommen mit einer Erdwärmesondenbohrung erbohrt. Der Gasaustritt erfolgt mit ca. 90 m³/h und rd. 300 mbar Überdruck. Die Bohrung wurde verschlossen.

Empfehlungen zur Vermeidung

In gefährdeten Gebieten können über den Genehmigungsbescheid nachfolgend beschriebene Auflagen erteilt werden, um der Gefahr durch Gasaustritte zu begegnen:

- die Bohrarbeiten sind von einer erfahrenen Bohrfirma auszuführen,
- während der Bohrarbeiten sind begleitende CH₄-Messungen durchzuführen,
- die obersten 10 m des Bohrlochs sind mit einer gasdichten Tondichtung zu versehen, der Nachweis ist zu führen.
- die Bohrungen sind möglichst weit vom Gebäude entfernt niederzubringen,
- die Gräben zum Verteiler sind entgasend und die Zuleitungen in das Gebäude gasdicht herzustellen,
- die Bohrungen dürfen nicht überbaut werden.

Bei hohen permanenten Gasströmen können Bohrungen gegebenenfalls nicht ausgebaut werden und müssen fachgerecht wieder verschlossen werden.

Bei bekannten, zur Ausgasung neigenden Gesteinen wird in der Regel von den SGD bei allen Erdwärmesondenbohrungen auf mögliche Gasaustritte hingewiesen.

5.5 Auswirkung auf Anlagentechnik

5.5.1 Gasdiffusion in PE-Sonde

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

In Deutschland können Grundwässer lokal einen stark erhöhten Gehalt an gelösten Gasen aufweisen.

Erdwärmesondenrohre bestehen in der Regel aus PE- Material. Dieses Material hat allerdings ein für Gase durchlässiges Gefüge. Insbesondere die Kohlendioxidmoleküle können aufgrund ihrer Größe und Struktur besonders gut durch die Wandung der PE-Rohre diffundieren.

Werden Erdwärmesondenanlagen ausschließlich zur Beheizung verwandt, so wird die Anlage in der Regel über die Sommermonate ohne Betrieb der Umwälzpumpe abgestellt. In dem nicht mehr zirkulierenden Wärmeträgermedium stellt sich am Sondenfuß aufgrund der hydrostatischen Auflast ein erhöhter Druck ein. Die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten steigt direkt proportional mit dem Druck. Das Gas diffundiert in die Sondenrohre und löst sich so lange, bis der Sättigungszustand erreicht ist.

Wird nach längerer Stillstandszeit zu Beginn der Heizzeit die Zirkulationspumpe des Primärkreislaufes wieder eingeschaltet, so wird die Sole mit dem gelösten Gas nach oben gepumpt, wo es lediglich unter dem geringeren Vordruck des Ausdehnungsgefäßes steht. Dementsprechend nimmt die Löslichkeit des Gases ab. Es kommt zu einer Entgasung, wobei bei einer schnellen Entgasung eine Schaumbildung auftreten kann.

Residuale vulkanische Aktivitäten führen zu teilweise deutlich erhöhten Konzentrationen an gelöstem CO₂ im Grundwasser. Aufgrund des allgemein lokal begrenzten Auftretens stark erhöhter CO₂- Gehalte im Grundwasser sind bisher nur wenige Schadensfälle in Deutschland (Eifel) bekannt.

Abgesehen von der schädigenden Wirkung CO₂-haltiger Wässer auf ein Hinterfüllmaterial ohne CO₂- Resistenz führen erhöhte Gasgehalte zu keiner unmittelbaren Gefährdung des Grundwassers. Erhöhte Gasvorkommen können allerdings zu ernsthaften Problemen beim Betrieb von Erdwärmesondenanlagen führen.

Herkömmliche Luftabscheider in der Soleeintrittsleitung können die ausgasenden Gasemissionen nicht immer vollständig abscheiden. Der entstehende Schaum gelangt in den Verdampfer der Wärmepumpe, reduziert dort erheblich die Entzugsleistung und kann bereits nach kurzer Zeit zu einer Störabschaltung der Wärmepumpe führen.

Darüber hinaus entfaltet die Sole durch die Lösung von Kohlendioxid eine korrosive Wirkung, was zu Korrosionsschäden an dem Wärmetauscher des Verdampfers der Wärmepumpe führen kann.

Empfehlungen zur Vermeidung

Abhilfe kann im konkreten Fall durch eine Entlüftung des Solekreislaufes erfolgen. Vorkehrend erscheint es sinnvoll, die Anlage in den Sommermonaten nicht vollständig außer Betrieb zu nehmen. Stattdessen sollte zumindest periodisch die Zirkulationspumpe in Betrieb gesetzt werden. Konstruktiv kann die Ausgasung dadurch gering gehalten werden, indem der Druck an der höchsten Stelle der Anlage möglichst hoch gehalten wird. In kritischen Bereichen mit bekannten Kohlendioxidvorkommen ist es ratsam, diffusionsbeständiges Sondenmaterial (z. B. Mehrschichtmaterial mit zwischengelagerter Metallfolie) zu verwenden.

5.5.2 Verockerung bei Schluckbrunnen

Beschreibung der Auswirkung und deren Ursachen

Ursachen für Verockerungen sind erhöhte Konzentrationen von im Grundwasser gelösten Eisen- und Mangan-Ionen in Verbindung mit einer bei der geothermischen Nutzung einhergehenden Veränderung der Redoxverhältnisse.

Im sauerstoffarmen anaeroben Grundwasser können große Mengen zweiwertige Eisen-Ionen (Fe^{2+}) gelöst sein. Tritt dieses Grundwasser mit Sauerstoff in Kontakt (z. B. durch Absenkung des Grundwasserspiegels durch Überbeanspruchung des Brunnens oder durch undichte Rohrleitungen), fällt dunkelbrauner Eisenocker (Eisen(III)-oxidhydrat, $\text{FeO}(\text{OH})$) aus. Der ausfallende Eisenocker ist meist weich und verringert bzw. blockiert die Durchströmungskanäle von Wärmetauschern und Filterrohren.

Gelegentlich können auch im Grundwasser gelöste Mangan-Ionen als schwarzes Mangan-oxid ausfallen. Mit der Verockerung geht oft eine Verkalkung des Brunnens (Versinterung) einher (5.2.2.1 und 5.2.4).

Betroffen sind dabei alle Anlagenteile, vom Brunnen, über die Brunnenpumpe, die Rohrleitungen, Filteranlagen sowie die Versickerungsanlage, der Grundwasserleiter selbst und die Wärmepumpe. Diese Prozesse können sowohl im Förderbrunnen als auch im Schluckbrunnen stattfinden. Insbesondere in letzterem ist die Gewährleistung eines vollständigen Abchlusses von Sauerstoff technisch schwer zu realisieren.

Genannte Auswirkungen können zum Leistungsabfall bis zum Ausfall der Anlage führen. Weiterhin besteht die Gefahr der Verunreinigung des Grundwasserleiters.

Beispiel

Abbildung 5-7 in Abschnitt 5.2.2.1 zeigt den verockerten Zustand eines Schluckbrunnens in Dessau (Sachsen-Anhalt). Bereits drei Monate nach Inbetriebnahme war der Brunnen nicht mehr funktionstüchtig. Neben Verockerung kam es hier auch zu Versinterung, so dass der Brunnen trotz Bemühungen einer Regenerierung aufgegeben werden musste.

Empfehlungen zur Vermeidung

Im Vorfeld der Brunnenbohrungen sollten vorhandene hydrochemische Daten des Grundwasserleiters recherchiert werden.

Nach Errichten einer Erstbohrung können Pumpversuche und chemische Analysen des gefördert Grundwassers auf Hauptionen und Vor-Ort-Parameter durchgeführt werden. Die damit erhaltenen Kenntnisse zur Förderleistung sowie zur Konzentration an z.B. Eisen- und Mangan-Ionen bzw. zu Redoxverhältnissen können zur Entscheidungsgrundlage dienen, welche Brunnenausbaumaterialien und ggf. Reinigungsintervalle beim Betrieb der Anlage notwendig werden.

Eine Anlagendimensionierung sollte anhand der benötigten und der verfügbaren Förderleistung erfolgen.

5.6 Häufigkeit der Auswirkungen

Dieser Bericht soll dazu dienen, bekannte und unerwartete Auswirkungen von Erdwärmeverhaben zu erfassen. Hierzu gehört neben einer systematischen Nomenklatur und strukturierter Beschreibung auch eine Bezifferung der Häufigkeit des Auftretens von unerwarteten Auswirkungen.

Eine vollständige und verlässliche Quantifizierung der bekannten Auswirkungen ist im Rahmen dieses Berichtes jedoch nicht möglich. Alle beim Bohren und Einbau auftretenden Besonderheiten müssen in der Regel bei den Genehmigungsbehörden und nicht bei den Fachbehörden (SGD) gemeldet werden. Die SGD erhalten somit meistens keinen automatischen und detaillierten Rückfluss über Einbau und Betrieb sowie über unerwartete Ereignisse während oder nach dem Einbau von Erdwärmesondenanlagen. Nur in einigen Bundesländern erfolgt ein automatischer direkter Informationsaustausch von den Genehmigungs- zu den Fachbehörden (SGD) bezüglich der bekannten Auswirkungen.

In dem engen Zeitrahmen, der zur Bearbeitung des Berichtes zur Verfügung stand, war es nicht allen SGD möglich, die Anzahl der aufgetretenen Auswirkungen bei allen Genehmigungsbehörden flächendeckend abzufragen. Es ist zudem davon auszugehen, dass nicht bei allen Genehmigungsbehörden die Auswirkungen dokumentiert und archiviert werden.

Die Anzeigen von Bohrungen nach Lagerstättengesetz sowie die Übermittlung der Aufschlussergebnisse nach Beendigung der Bohrarbeiten ermöglichen keine verlässliche Aussage über die Anzahl der unerwarteten Auswirkungen. Die von den Bohrunternehmen eingereichten Dokumentationen beschreiben nur die Untergrundverhältnisse und in der Regel keine besonderen Vorkommnisse während des Bohrens oder Auswirkungen durch den Betrieb einer Anlage.

Es ist jedoch festzustellen, dass die Häufigkeiten des Auftretens von Auswirkungen unmittelbar mit der Art der Auswirkungen zusammenhängen. Während Auswirkungen, die an der Oberfläche stattfinden, fast vollzählig erfasst werden können, werden Auswirkungen, die nicht an Erdoberfläche sichtbar sind, z. B. im Grundwasserleiter, nicht automatisch erkannt. Sie werden oft erst mit einer langen zeitlichen Verzögerung erkannt. So sind Arteser aufgrund ihrer augenscheinlichen und oft spektakulären Erscheinungen an der Geländeoberfläche häufiger zu beobachten und damit zu beziffern, als z. B. eine Mischung von unterschiedlichen Wässern innerhalb eines Grundwasserleiters. Jedoch ist eine Mischung von Wässern aufgrund der Häufigkeit von Druckpotenzialunterschieden im Vergleich zur Artesik wahrscheinlicher.

Die Tabelle „Gefahrenpotenziale-Auswirkungen“ (s. Anlage 2 im Anhang) soll den Zusammenhang von Gefahrenpotenzialen zu bekannten Auswirkungen verdeutlichen. Dabei ist zu erkennen, dass z. B. eine bekannte Auswirkung durch mehrere Gefahrenpotenziale verursacht werden kann. Jedoch können damit nur Tendenzen aufgezeigt werden.

Die bisher am häufigsten beobachteten Auswirkungen sind: Wasseraustritte (oft in Verbindung mit Artesik), Korrosionsprobleme an Wärmetauschern (in der Regel bei Wasser/Wasser Wärmepumpenanlagen) und Vereisungen (in der Regel verursacht durch Dimensionierungsfehler).

In Anlage 3 wird tabellarisch aufgezeigt, welche Auswirkungen bei welchen Anlagentypen bekannt geworden sind.

6 Auswirkungen tiefengeothermischer Anlagen

Jedes geothermische Vorhaben hat Auswirkungen, wobei zu unterscheiden ist zwischen denen, die als Folge des Vorhabens erwartet und akzeptiert werden, und solchen, die unerwartet eintreten oder nicht akzeptiert werden. Eine unerwartete Auswirkung beruht in der Regel auf der Abweichung eines erreichten Zustandes vom angestrebten Zustand, welcher z. B. nach dem Stand von Wissenschaft und Technik oder nach sonstigen Vereinbarungen festgelegt ist.

Im vorliegenden Kapitel werden bei den bekannten Auswirkungen nur diejenigen aufgeführt, die bei der Nutzung der Tiefengeothermie in Deutschland aufgetreten sind.

Das Risiko ist das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses und dessen negative Auswirkungen (Abweichung von gesteckten Zielen). Die negativen Auswirkungen einer Tätigkeit können mit einem (wirtschaftlichen) Schaden verbunden sein. Ein Teil der in diesem Kapitel genannten Risiken treffen auf jede Tiefbohrung zu.

Das Kapitel Auswirkungen tiefengeothermischer Anlagen ist im Vergleich zur Thematik oberflächennahe Geothermie dahingehend strukturiert, dass aufgrund der geringeren Anzahl vorhandener Beispiele alle bekannten Auswirkungen aufgelistet und ggf. Gegenmaßnahmen vorgeschlagen werden. Neben den Auswirkungen auf Dritte (Umwelt, Personen etc.) werden in diesem Kapitel auch Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage betrachtet.

6.1 Risiken durch unerwartete geologische Verhältnisse

Beschreibung:

Dieser Begriff wird besonders im Bereich der Kohlenwasserstoff-Exploration verwendet. Er beinhaltet die Frage, ob bestimmte geologische Untergrundstrukturen und -verhältnisse, die in der Regel aus seismischen Untersuchungen bzw. benachbarten Bohrungen abgeleitet worden sind, tatsächlich existieren. Das Fündigkeitsrisiko (siehe Kapitel 6.2) wird von manchen Autoren als Teil der unerwarteten geologischen Verhältnisse betrachtet.

Beispiele:

Zum geologischen Risiko beim Bohren gehört z. B. das Auftreten von unerwarteten

- Schichten / Gesteinen / Fazies / Störungen,
- Temperaturen / Gebirgsdrücken oder
- Gasen / Fluiden.

Bekannte Auswirkungen:

Als bekannte Auswirkungen sind Ausspülungen und Setzungen beim Setzen der Ankerrohrtour zu nennen. Weiterhin können Spülungsverluste und Verdriftungen Setzungen und Verunreinigung des Grundwassers hervorrufen. Ein falsches Einschätzen von überhydrostatischen Drücken kann zum Festwerden der Bohrung führen. Als weitere Auswirkung ist das Zufallen des (offenen) Bohrlochs nach Fertigstellung der Bohrung bekannt. Unerwartete geologische Verhältnisse führen bei falscher Behandlung meist auch zu bohrtechnischen Problemen.

Gefahren:

Kohlenwasserstoffe (Gasausbruch, Ölausbruch bzw. CO₂, H₂S); verringerte Standsicherheit.

Maßnahmen:

Gründliche geologische und seismische Vorplanung und Exploration.

6.2 Fündigkeitsrisiko

Beschreibung:

Das **Fündigkeitsrisiko** bei geothermischen Bohrungen ist das Risiko, ein geothermisches Reservoir mit einer (oder mehreren) Bohrung(en) in nicht ausreichender Quantität oder Qualität zu erschließen.

Die **Quantität** wird über die (thermische) Leistung definiert, die mit Hilfe einer oder mehrerer Bohrungen erreicht werden kann.

Unter **Qualität** versteht man im Wesentlichen die Zusammensetzung (Chemismus) des Fluids. Es könnten Bestandteile im Fluid auftreten (Gase, Salinität, o. ä.), die bei einem Überschreiten von Grenzwerten eine geothermische Nutzung ausschließen oder erschweren. Alle bisher bei geothermischen Bohrungen in Deutschland angetroffenen Wässer galten hinsichtlich ihrer Zusammensetzung für geothermische Nutzung, zwar mit unterschiedlichem technischen Aufwand, als beherrschbar.

Ab welchem Wert die Quantität (und Qualität) **nicht ausreichend** (ökonomisch nicht akzeptabel) ist, wird durch den Projektentwickler / Investor festgelegt; hierbei spielen vor allem betriebswirtschaftliche Überlegungen eine Rolle.

Beispiele:

Nicht fündige „trockene“ Bohrungen. Es werden Horizonte angetroffen, die aufgrund der Fazies / Diagenese eine zu geringe Produktivität aufweisen (kann sekundär durch Stimulation wieder erhöht werden).

Bekannte Auswirkungen:

Auswirkungen nur wirtschaftlicher Art für den Betreiber, nicht auf andere Nutzungen oder Schutzgüter.

Gefahren:

Keine; aber finanzieller Schaden für den Betreiber.

Maßnahmen:

Es gibt in Deutschland die Möglichkeit, das Fündigkeitsrisiko privatwirtschaftlich abzusichern.

6.3 Bohrrisiko

Beschreibung:

Unter dem Bohrrisiko werden alle **technischen** Risiken, die der Bohranlage und dem Bohrprozess zugeordnet werden können, zusammengefasst.

Beispiele:

- Durchspüler, Verbinderbruch: kann zum Verlust des Bottom Hole Assembly (BHA) führen, was Fangarbeiten oder einen Sidetrack zur Folge hat,
- Absturz Liner (Linerhanger falsch gesetzt/belastet),
- Verrohrungsschäden (doglegs, Casings unzureichend in Spannung gezogen, Casingcollapse durch Temperatúrausdehnung, falsch geschnittene und undichte Gewinde, fehlerhafte Zementation),
- Sondenverluste bei Wireline-Messungen,
- Beschädigung einer benachbarten Bohrung durch Perforationsarbeiten.

Bekannte Auswirkungen:

Auswirkungen nur wirtschaftlicher Art.

Gefahren:

Keine; aber finanzieller Schaden für den Betreiber.

Maßnahmen:

Bohrrisiken treffen auf jede Tiefbohrung zu. Sie sind grundsätzlich Risiken des Auftraggebers, hierfür existieren entsprechende Versicherungen.

6.4 Betriebsrisiko (Dauerhaftigkeit)

Beschreibung:

Unter den Begriff Betriebsrisiko fallen alle Veränderungen der Quantität (Förderrate, Temperatur) und Qualität (Zusammensetzung) des Fluids während der geothermischen Nutzung der Bohrung. Dazu zählen auch Veränderungen an den technischen Anlagen im geothermischen Kreislauf, die durch das Fluid direkt oder indirekt verursacht werden. Zum Betriebsrisiko gehört auch, dass die Energiebereitstellung sich wesentlich verändert. Während der Betriebsdauer sollen die Förderrate und die Fördertemperatur nicht wesentlich absinken. Eine Voraussetzung hierfür ist ein hinlänglich ausgedehntes Reservoir und ein Ausschluss einer Beeinträchtigung durch Nachbaranlagen.

Beispiele:

Korrosion; Ausfällungen (Scaling).

Bekannte Auswirkungen:

Die Verschlechterung des Injektionsverhaltens (insbesondere durch Ausfällungen / Zementation, aber auch durch Temperaturabnahme möglich) bis zur Aufgabe der Förderbohrung (Ersatz durch neue Förderbohrung bzw. Umrüstung zur tiefen Erdwärmesonde) und ein Zusetzen des Filters führte dazu, dass die Wärmetauscherplatten nicht vom Hersteller im Ausland erneuert werden konnten, da vom Zoll eine zu hohe Radioaktivität festgestellt und eine Ausfuhr untersagt wurde. Diese Verschlechterung hatte wirtschaftliche Risiken zur Folge.

Gefahren:

Anfall radioaktiv belasteter Anlagenteile, Scales, die möglicherweise gesondert entsorgt werden müssen.

Maßnahmen:

Einsatz von Inhibitoren, Abschluss von Sauerstoff, Druckbeaufschlagung, Monitoring.

6.5 Betriebstechnisches Risiko

Beschreibung:

Zusätzlich zu den geogen bedingten Risiken während des Betriebes können rein technisch bedingte Risiken vorhanden sein. (Eine eindeutige Trennung ist oft nicht möglich.)

Beispiele:

- Umwälzpumpenausfall, Absturz der Umwälzpumpe (Entschrauben der GFK-Steigrohre durch das hohe Pumpendrehmoment beim Anfahren),
- Undichtigkeiten im Primärkreislauf bzw. in den Wärmetauschern,
- Gasgefährdung (erhöhte H₂S-Gehalte),
- Abriss der Schutzrohrtour.

Bekannte Auswirkungen:

Die zeitweilige Stilllegung der Anlage sowie betriebstechnische Schäden haben i.d.R. wirtschaftliche Schäden zur Folge.

Gefahren:

Keine; aber finanzieller Schaden für den Betreiber.

6.6 Risiken für die Umwelt

Es wird auf eine in FRICK et.al (2007) veröffentlichte ausführliche Untersuchung verwiesen, die im Auftrag des Umweltbundesamt (UBA) durchgeführt wurde.

Beispiele:

- Entsorgung von Bohrspülung (mit hohen organischen Anteilen), von Pumpversuchswässern und von Kühlwasser (mit Enthärtern, Bioziden und Antikorrosionsmitteln etc.);
- Kühlwasserbedarf bei geothermischer Stromerzeugung.

Bekannte Auswirkungen:

Belastung des Abwassersystems.

6.7 Seismisches Risiko

In Deutschland sind ca. 200 Anlagen in Betrieb, die im weiteren Sinne tiefe geothermische Energie nutzen (www.geotis.de). Davon haben 29 Anlagen eine installierte Leistung von mehr als 1 MW_{th} (Anlagen zur Nah- und Fernwärme- und zur Stromproduktion). Davon sind bisher bei 3 Anlagen (Landau, Insheim, Unterhaching) an der Oberfläche spürbare mikro-seismische Ereignisse gemessen worden (siehe Anlage 4). Darüber hinaus hat die hydraulische Stimulation in Basel (Schweiz) zu Erschütterungen geführt, die auch in Deutschland gespürt wurden.

Beschreibung:

Unter Umständen können besonders in Gebieten mit natürlicher Seismizität, wie z. B. im Oberrheingraben, bei Stimulationsmaßnahmen induzierte seismische Ereignisse ungewollter Stärke auftreten. Es besteht die Möglichkeit, dass die entstehenden Erschütterungen die Wahrnehmbarkeitsschwelle an der Erdoberfläche überschreiten.

Die induzierte Seismizität hängt von der Bruch- bzw. Scherfestigkeit des Untergrundes (Kristallin oder Sediment), den tektonischen Spannungen, regionalen seismotektonischen Charakteristika, der Größe des stimulierten Rissystems und in der Praxis auch von Injektionsdrücken und Fließraten ab. Auch beim Betrieb geothermischer Anlagen sind mikro-seismische Ereignisse gemessen worden.

Beispiele:

Basel (nicht in Deutschland, aber in Deutschland gespürt), Insheim, Landau, Unterhaching. Eine Zusammenstellung der Erdbeben in der Nähe tiefer geothermischer Bohrungen, bei denen Erschütterungen an der Erdoberfläche verspürt wurden, ist als Anlage 4 im Anhang beigelegt.

Bekannte Auswirkungen:

Kurzzeitig spürbare Erschütterungen; manchmal verbunden mit einem Knallgeräusch.

Gefahren:

DIN 4150 Teil 1 bis 3 beschreibt Erschütterungen im Bauwesen in Bezug auf die Vorermittlung von Schwingungsgrößen, Einwirkungen auf den Menschen sowie auf die bauliche Anlage. Eine Gefahr für Wohngebäude besteht nach DIN 4150 nur dann, wenn die Bodengeschwindigkeit über 5 mm/s liegt (und damit die Spürbarkeitsschwelle um etwa das 10fache überschritten wird).

Maßnahmen:

In Deutschland wird die Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme durch das Bundesberggesetz geregelt. Bau und Betrieb der Geothermiekraftwerke unterliegen nicht dem Bergrecht.

Für die Zulässigkeit der Aufsuchung und Gewinnung sind die §§ 55 i.V.m. 48 Bundesberggesetz maßgeblich, die auch den Schutz Dritter regeln. Schäden im Sinne des Bergrechtes sind nach jetzigem Kenntnisstand nur beim seismischen Risiko zu erwarten.

Aussagen zum seismischen Risiko werden bis zum Vorliegen fundierter Erkenntnisse der seismologischen Fachwelt zurückgestellt.

Nach dem Stand von Wissenschaft und Technik können spürbare seismische Ereignisse bei tiefengeothermischen Anlagen auftreten.

Es wurden zwei Forschungsprojekte mit einzelnen Teilprojekten zur Untersuchung der induzierten Seismizität aufgenommen, die nachfolgend zur Übersicht mit ihren Einzelprojekten genannt werden:

- **Mikroseismische Aktivität Geothermischer Systeme (MAGS)**, koordiniert durch die BGR und gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):
 - Einzelprojekt 1: Quantifizierung und Charakterisierung des induzierten seismischen Volumens im Bereich Landau, Südpfalz, PD Dr. Joachim Ritter, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Geophysikalisches Institut.
 - Einzelprojekt 2: Untersuchung von Mikro-Erdbeben in der bayerischen Molasse im Umfeld geothermischer Reservoirs, Dr. Joachim Wassermann, Ludwig-Maximilians Universität München, Department für Geo- & Umweltwissenschaften, Geophysik.
 - Einzelprojekt 3: Echtzeitauswertung induzierter Erdbeben und Gefährdungsabschätzung bei hydraulischen Stimulationen geothermischer Reservoirs, Dr. Ulrich Wegler und Dr. Christian Bönnemann, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Fachbereich B4.3: Seismologisches Zentralobservatorium, Kernwaffenteststopp.
 - Einzelprojekt 4: Untersuchung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung, Dr. Thomas Spies und Dr. Jörg Schlittenhardt, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Fachbereich B4.4: Gefährdungsanalysen, Fernerkundung.
 - Einzelprojekt 5: Modellierung der Auftretswahrscheinlichkeiten fluidinduzierter Erdbeben mit einer gegebenen Magnitude bei der Stimulation geothermischer Systeme, Prof. Dr. Serge A. Shapiro, Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Fachrichtung Geophysik.
 - Einzelprojekt 6: THMC gekoppelte Untersuchungen zu Mechanismen und freigesetzten Deformationsenergien der seismischen Ereignisse in der Reservoirstimulations- und Betriebsphase, Prof. Dr. Michael Z. Hou, Technische Universität Clausthal, Institut für Erdöl- und Erdgastechnik.
 - Nachträglich eingereichtes Einzelprojekt 7 (beantragt): Prognose der möglichen induzierten /getriggerten Seismizität im Kristallin in Auswertung der flutungsbedingten seismischen Ereignisse im Bergbaurevier Aue/Schlema (tiefengeothermisches Vorzugsgebiet Aue), Prof. Dr. Heinz Konietzky, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl Felsmechanik.

- **Geothermal Engineering Integrating Mitigation of Induced Seismicity in Reservoirs (GEISER)** unter Federführung des Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) und gefördert durch die EU.

Das von der Europäischen Kommission geförderte Projekt GEISER wird vom Internationalen GeothermieZentrum am GFZ koordiniert. Die Ziele des Projektes sind: Analyse induzierter Seismizität geothermischer Reservoirs verteilt über ganz Europa, Verständnis der Geomechanik und der Prozesse bei induzierter Seismizität, eine Einschätzung der Konsequenzen induzierter Seismizität und die Entwicklung von Strategien zur Handhabung induzierter Seismizität. Die Abschwächung induzierter Seismizität auf ein akzeptables Niveau ist die wesentliche Absicht der Projektbeteiligten (aus GFZ 2010, Internet).

- WP1: Project Management. GFZ.
- WP2: Compilation of induced seismicity data from geothermal sites. ISOR.
- WP3: Analysis of Induced Seismicity. GFZ.
- WP4: Understanding the Geomechanical Causes and Processes of Induced Seismicity. BRGM.
- WP5: Seismic Hazard Assessment. ETHZ.
- WP6: Strategies for EGS operations with respect to Induced Seismicity (Mitigation). TNO.
- WP7: Dissemination. BRGM.

Im Rahmen dieser Vorhaben sollen u. a. Verfahren entwickelt werden, durch die beim Betrieb geothermischer Anlagen spürbare seismische Ereignisse minimiert werden können.

7 Zusammenfassung und Fazit

7.1 Erkenntnisse aus der Aufgabenstellung

Nach einer Umfrage bei den Staatlichen Geologischen Diensten in der Bundesrepublik Deutschland (SGD), nach mehreren Beratungen und sorgfältigen Bewertungen der Sachverhalte hat der Personenkreis Geothermie den vorliegenden Sachstandsbericht verfasst. Dieser Bericht beleuchtet die bislang bekannten Auswirkungen und deren Ursachen. In dem engen zeitlichen Bearbeitungszeitraum konnten der Status erhoben und die kausalen Zusammenhänge von den bekannten Auswirkungen herausgestellt werden.

Beginnend mit der Beantwortung der bundesweiten Umfrage haben sich alle SGD intensiv an der Bearbeitung beteiligt, der Rücklauf betrug 100%. Der Fragenkatalog (siehe Anlage 1) umfasste mehr als 40 Fachfragen zum Themenkreis der Erdwärmennutzung und ihren bislang bekannten Auswirkungen, die sich auf die Sachgebiete der Geologie, Hydrogeologie, Geotechnik und auf die Kenntnisnahme sowie auf Beteiligung der SGD im Rahmen der Genehmigungsverfahren bezogen.

Die Umfrage hatte das Ziel, die bisherigen Erkenntnisse abzufragen und gleichzeitig Fachleute für die Mitarbeit in einem Personenkreis Geothermie zu gewinnen. Alle SGD haben Fachleute in den PK Geothermie entsandt. Um Erfahrungen und Informationen gleichzeitig ressortübergreifend auszutauschen, waren bei den Beratungen Vertretungen des BLAG KLINA und LAWA anwesend.

7.2 Bislang bekannte Auswirkungen

Den SGD ist ein Spektrum an Auswirkungen, die durch den Einbau oder/und Betrieb geothermischer Anlagen verursacht bzw. ausgelöst werden, zur Kenntnis gelangt oder bei eigenen Arbeiten bekannt geworden.

Alle Bohrungen, dazu gehören auch Bohrungen zum Zweck der Erdwärmennutzung, sind Eingriffe in den geologischen Körper, deren Auswirkungen im Vorfeld abgeschätzt und die von den zuständigen Behörden genehmigt werden. Bohrungen können zu temporären, manchmal auch zu irreversiblen Veränderungen des ursprünglichen Zustandes führen. Mit steigender Anzahl an Bohrungen wächst die Gefahr einer negativen, unerwarteten Auswirkung und ggf. eines Schadensfalls.

Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl von Anlagen im oberflächennahen Bereich und in der Tiefengeothermie sowie der unterschiedlichen Dimensionen von Auswirkungen ist es notwendig, die Gefahrenpotenziale „oberflächennaher“ und „tiefer“ Erdwärmennutzungen getrennt zu beschreiben. Details sind in den Fachkapiteln nachzulesen.

Die Auswirkungen von oberflächennahen Anlagen betreffen in den meisten Fällen das Schutzgut Grundwasser. Das Ausmaß der Auswirkungen auf das Grundwasser sowie die dadurch verursachten Beeinträchtigungen sind regional sehr unterschiedlich, in ihrer Gesamtheit schwer abschätzbar oder gar bezifferbar.

Neben nachteiligen Auswirkungen auf das Grundwasser können auch nachteilige Auswirkungen an der Erdoberfläche auftreten. Diese können, wie z. B. Arteser, eine beherrschbare und damit zeitlich begrenzt nachteilige Auswirkung darstellen. Vereinzelt sind aber auch durch Vorarbeiten und beim Betrieb geothermischer Anlagen Auswirkungen größeren Ausmaßes aufgetreten. Hier sind Vorhaben in den Orten Staufen (BW) und Kamen (NW) zu nennen.

Die kausalen Zusammenhänge, weshalb es zu nachteiligen Auswirkungen kommt, sind vielschichtig. Sie reichen von komplexen geologischen Verhältnissen bis hin zu mangelnden Qualifikationen der ausführenden Unternehmen. Die Analyse der bislang bekannten Auswirkungen durch den PK Geothermie zeigt, dass in den meisten Fällen eine Kombination mehrerer Gefahrenpotenziale zu unerwarteten Auswirkungen führen. Hierbei spielen häufig menschliche Komponenten eine Rolle, wie z.B. eine nicht angepasste Planung an die geologischen Verhältnisse oder eine unsachgemäße Ausführung.

Zu den standortbezogenen, nicht beeinflussbaren und risikobehafteten Untergrundverhältnissen gehören u. a. die Beispiele: Schichtkomplexe mit stark wechselnden lithologischen Eigenschaften, Grundwasser-Stockwerksbau, Verkarstung, geologische Störungszonen, natürliche Gasvorkommen, artesischen Verhältnisse und Altbergbau.

Die Ursache für eine mangelnde Beachtung der geologischen Verhältnisse liegt unter anderem in der Unwissenheit von Planern und Bohrunternehmen, wie sie an Daten zum Untergrund gelangen sowie an den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, Erdwärmebohrungen immer günstiger und schneller anzubieten.

Im Kapitel „Auswirkungen tiefegeothermischer Anlagen“ wird auf laufende und umfangreiche Forschungsprojekte verwiesen („MAGS - Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund“ und „Geothermal Engineering Integrating Mitigation of Induced Seismicity in Reservoirs“). Der PK Geothermie geht davon aus, dass die Ergebnisse und Folgerungen aus den Forschungsprojekten Auswirkungen auf die Planung und den Betrieb tiefegeothermischer Vorhaben zeigen werden. Dies könnte insbesondere auch die Bereitstellung von interpretierten Daten für den tieferen Untergrund sowie die Optimierung des Zusammenspiels der staatlichen Überwachung, die Verbesserung der Berichtspflichten durch die Betreiber und eine Konkretisierung der Aufgaben der Erdbebendienste und der Zuständigkeiten der Staatlichen Geologischen Dienste betreffen.

7.3 Nutzen von Synergien

In einigen Ländern wurden bereits „Bewertungskarten“ für den Einbau und Betrieb von Erdwärmeanlagen unter hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Aspekten erarbeitet. Hier besteht die Möglichkeit Erfahrungen auszutauschen und Vorsorge zu treffen. Die SGD können Synergien nutzen, um relevante Daten, z. B. in Form von Themenkarten, aufzubereiten und vorzuhalten. Eine homogene Vorgehensweise bei der Bewertung und Darstellung solcher Themenkarten bewirkt eine breitere Akzeptanz.

Einen großen Informationsgewinn versprechen auch der Aufbau und die Pflege von „Erdwärmeanlagenkatastern“. Sie können in Kombination mit dem Auftrag zur Bohrungserfassung im Rahmen der staatlichen Aufträge zum Führen von Bohrungsarchiven mit geringem Mehraufwand erstellt werden. Inhaltsumfang und Strukturen der „Erdwärmeanlagenkataster“ hängen daher mit den Strukturen der bereits installierten Bohrungsdatenbanken in den jeweiligen Ländern zusammen. Empfehlenswert sind hierbei der strukturierte und auf ein Mindestmaß reduzierte Datenfluss von den Genehmigungsbehörden an die SGD sowie die strikte Anwendung des Lagerstättengesetzes.

In fast allen Ländern existieren bereits Leitfäden für die Erdwärmenutzung, in denen aus meist wasserwirtschaftlicher Sicht die wichtigsten Vorgehensweisen einer richtigen Planung, eines sicheren Einbaus sowie ein unschädlicher Betrieb von Erdwärmeanlagen beschrieben und empfohlen werden. Leitfäden haben in einigen Ländern bereits durch eine konsequente Gesetzgebung Rechtskraft erhalten. Hier könnten bundesweit noch Fortschritte erzielt werden.

Aus diesem Grund erscheint es dem PK Geothermie wichtig, dass die Leitfäden regelmäßig an den Stand der Technik und die Bewertungskarten dem Wissensstand der SGD angepasst werden.

Eine kompetente und geowissenschaftliche fundierte Beratung für die Nutzung von Erdwärmesonden bedarf auch für den tieferen Untergrund bis deutlich über 100 m Tiefe einer dichten Datenbasis. Daher ist von den SGD immer Sorge zu tragen, dass neue Untergrunddaten von den ausführenden Unternehmen eingefordert und in die jeweiligen Informationssysteme eingepflegt werden. Um einen annähernd vollständigen Datenfluss zu erreichen, sollten alle behördlichen Möglichkeiten ausgeschöpft werden, die das Lagerstättengesetz bietet. Eine enge Zusammenarbeit und Absprache mit den Bergbehörden als vollziehende Kraft kann diese Forderung erleichtern.

7.4 Die Rolle der SGD

Die SGD stehen maßgeblich in der Verantwortung, die Bereitstellung von aufbereiteten Untergrunddaten voranzutreiben, um Gefahrenpotenziale durch Erdwärmennutzungen zu vermeiden, aber auch um ausgelöste Auswirkungen durch Beratung zu mindern. Dazu führen die SGD im Rahmen ihres staatlichen Auftrages die umfangreichsten geologischen und hydrogeologischen Datenbestände in den Ländern. Nur die SGD sind in der Lage, diese oft heterogenen Daten in Bezug auf die in dem Bericht dargestellten Gefahrenpotenziale zu bewerten und Lösungen anzubieten.

Durch ihre kompetente Beratung leisten die SGD einen wichtigen Beitrag zur Förderung eines umweltbewussten und sicheren Umganges der Erdwärmennutzung und dadurch zum Klimaschutz. Zukunftsorientiert wäre eine länderübergreifend abgestimmte, einheitliche und geowissenschaftliche begründbare Beratungspraxis, eine noch engere Zusammenarbeit der betroffenen Behörden und zur Wahrung der Nachhaltigkeit bei konkurrierenden Nutzungen ein unterirdisches Raumordnungsverfahren zu empfehlen.

Das Fachwissen der Staatlichen Geologischen Dienste trägt schon heute erfolgreich dazu bei, das Gefahrenpotenzial von Geothermie- (und anderen) Bohrungen in den Bundesländern zu mindern. Daher erscheint es sinnvoll, dass sich die Fachleute in den SGD im Bereich der Erdwärmennutzung fortbilden. Fachkompetenz über den Untergrund und Know how zu neuen Techniken wirken sich positiv auf die Sicherheit der Erdwärmennutzung und daher auch auf die Schutzgüter Grundwasser, Untergrund, Umwelt und Eigentum aus.

8 Literatur

- Anagnostou, G. (1992): Untersuchungen zur Statik des Tunnelbaus in quelfähigem Gebirge. – Veröffentlichung des Instituts für Geotechnik der ETH Zürich, Band 201, August 1992.
- Arning, E., Kölling, M., Panteleit, B., Reichling, J., Schulz, H. (2006): Einfluss oberflächennaher Wärmegegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. In: Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 1/2006 S. 27-39.
- Bassetti, S., Rohner, E., Signorelli, S. & Matthea, B. (2006): Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden – Schlussbericht 2006. (Download: www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/index.html?lang=de&project=99995)
- Bell, K.J., Mueller A.C. 2001: Wolverine Engineering Data Book II, Chapter 1.6: Fouling in Heat Exchangers S. 46-57, Wolverine Tube Inc.
- DVWG (2008) :DVWG – Positionspapier „Erdwärmennutzung in Trinkwassereinzugsgebieten, Stand 10.11.2008.
- Frick, S., Schröder, G., Rychtyk, M., Bohnenschäfer, W., Kaltschmitt, M. (2007): Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung – Analyse und Bewertung der klein- und großräumigen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung. - Endbericht, Forschungsprojekt FKZ 205 42 110 im Auftrag des Umweltbundesamtes; Leipzig.
- Hauber, L., Jordan, P., Madsen, F., Nüesch, R., Vögtli, B. (2005): Tonminerale und Sulfate als Ursache für druckhaftes Verhalten von Gesteinen; Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Straßen.
- Henke, K. F., Krause, H., Müller, L., Kirchmayer, M., Einfalt, Lippmann, F. (1975): Sohlhebungen beim Tunnelbau im Gipskeuper. – Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr Baden-Württemberg.
- Lenarduzzi, F. J.; Radhakrishna, H. S. & Cragg, C. B. H. (2000): The Importance of Grouting to Enhance the Performance of Earth Energy Systems. - Technical and Symposium Papers of the ASHRAE, 106, 1: 424-434.
- Müller-Ruhe, W. (2010): Risikovorsorge und Beherrschung – Mittel und Maßnahmen. - Schr.-R. GDMB, 123: 93 – 100; Clausthal-Zellerfeld.
- Ofner, C., Wieber, G. (2008): Geothermisches Potenzial gefluteter Bergwerke. In: bbr Jahresmagazin 12/2008, S. 72-77.
- PK Oberflächennahe Geothermie (2008): Sachstandsbericht für einen bundeseinheitlichen Produktkatalog zur wirtschaftlichen Anwendung oberflächennaher geothermischer Daten. - Bericht des Personenkreises Oberflächennahe Geothermie (PK OG) der Ad-hoc-AG Hydrogeologie an den Direktorenkreis der Staatlichen Geologischen Dienste und den Bund-Länder-Ausschuss-Bodenforschung, 44 S. - Informationen aus den Bund-/ Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste. - Wiesbaden; unveröff. Bericht].
- PK Tiefe Geothermie (2008): Nutzungen der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie) – geowissenschaftliche Parameter und Untersuchungsverfahren. - Bericht des Personenkreises Tiefe Geothermie (PK TG) der Ad-hoc-AG Geologie an den Direktorenkreis der Staatlichen Geologischen Dienste und den Bund-Länder-Ausschuss-Bodenforschung, 38 S. - Informationen aus den Bund-/ Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste.- Freiburg; unveröff. Bericht].
- Rauh, F. (2009): Untersuchungen zum Quellverhalten von Anhydrit und Tongesteinen im Tunnelbau. – Münchner Geowiss. Abh., 11, S. 1-110, München.

- Reimann, M. (1991): Geologisch-lagerstättenkundliche und mineralogische Untersuchungen zur Vergipsung und Volumenzunahme der Anhydrite verschiedener geologischer Formationen unter natürlichen und labormäßigen Bedingungen. –Geologisches Jahrbuch, Reihe D, Heft 97, Hrsg. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland.
- Schippers, A., Reichling, J. (2006): Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. Grundwasser 11(1), 40–45.
- Steuerwald, K., Rumohr, S. (2010): Länderübergreifende Risikoanalyse geothermischer Projekte – eine Erhebung im Auftrag des Bund-/Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA-Geo). – Schr.-R. GDMB, 123: 69 – 78, 3 Abb., 1 Tab.; Clausthal-Zellerfeld.
- Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (Anlagenverordnung – VAwS).
- Wittke, M., Wittke-Gattermann, P., Wahlen, R.(2007): Möglichkeiten der Optimierung des Tunnelbaus im quellfähigen Gipskeuper durch Berücksichtigung der Selbstabdichtung. – Zeitschrift Geotechnik 4/2007.
- Wrede, V.; Steuerwald, K.; Dölling, M.; Lenz, A.; Hiß, M.; Schäfer I.; Heuser, H.; Lehmann, K. (2010): Die Bohrungshavarie Kamen-Wasserkurl aus geowissenschaftlicher Sicht. – Schr.-R. GDMB, 123: 53 – 67, 4 Bilder, 2 Abb.; Clausthal-Zellerfeld.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-1: Gefahrenpotenzial Grundwasserstockwerksbau und Artesik (LBEG).	9
Abbildung 5-2: Gips- und Anhydritvorkommen im Gips-Keuper.	11
Abbildung 5-3: Gips- und Anhydrit-Vorkommen im Gips-Keuper.	12
Abbildung 5-4: Artesischer Grundwasseraustritt mit Ausspülung von Feinmaterial.	17
Abbildung 5-5: Artesischer Grundwasseraustritt einige Meter neben einer EWS-Bohrung.	17
Abbildung 5-6: Verwilderter Arteser in Wiesbaden.	18
Abbildung 5-7: Verockerung einem Schluckbrunnen (Quelle – LAGB LSA).	19
Abbildung 5-8: Reale geologische Situation in Sachsen-Anhalt – Verschleppung eines Schadstoffs in den GWL durch den Bohrvorgang (Quelle - LAGB).	21
Abbildung 5-9: Hebungsrisse an Gebäuden in Stauf en i. Br.	26
Abbildung 5-10: Senkungen und Hebungen verursacht durch eingefrorene Zuleitungen einer Erdwärmesondenanlage (Bassetti et al. 2006).	27
Abbildung 5-11: Übersicht Verbruchmöglichkeiten.	28
Abbildung 5-12: Schema Verbruch durch Karst- und Bergbauvorkommen.	29
Abbildung 5-13: Blockdiagramm Kamen.	30
Abbildung 5-14: Setzung infolge Frostbildung in der Erdwärmesondenbohrung (Quelle: HLUG).	31
Abbildung 5-15: Verschmutzung eines Oberflächengewässers infolge einer überlaufenden Spülwanne (Foto: Rumohr).	32
Abbildung 5-16: Eintrübung eines Oberflächengewässers.	33
Abbildung 5-17: Verschmutzung eines Grundstücks durch unkontrolliertes Ableiten von Bohrspülungswasser inkl. bohrlochstabilisierender schäumungsaktiver Substanzen (Quelle: TLUG).	34
Abbildung 5-18: Verschmutzung von Grundstücken durch das Austreten wassergefährdender Stoffe (Maschinenöl) durch das Bohrgerät (Quelle TLUG).	34

10 Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Auswertung der Umfrage bei den SGD	51
Anlage 2: Gefahrenpotenziale und bekannte Auswirkungen geothermischer Vorhaben.	58
Anlage 3: bekannte Auswirkungen bei verschiedenen Anlagetypen	59
Anlage 4: Erdbeben in der Nähe tiefer geothermischer Bohrungen, bei denen Erschütterungen an der Erdoberfläche verspürt wurden	60

Anlage 1: Auswertung der Umfrage bei den SGD

Nr.	Frage	Antwort-möglichkeit	Anzahl der Rückmeldungen
1	Sind dem SGD Unregelmäßigkeiten, Vorkommnisse oder Unfälle bei Geothermiebohrungen bekannt?	Ja	13
		nein	1
		keine Angabe / nicht bekannt	2

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 1 und 2

2	Kann der SGD auch auf weitere Informationen anderer Behörden zurückgreifen?	ja	15
		nein	0
		keine Angabe / nicht bekannt	1

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 1, 2, 3

3	Wenn ja, welche Behörden/Einrichtungen? Klartext
---	---

Auflistung der Rückmeldungen aus den Ländern (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

Wasserbehörden, Wasserwirtschaftsverwaltung, Landesumweltämter, Umweltämter, Staatliche Ämter für Umwelt und Naturschutz, Landratsämter, Bergdirektion, Bergbehörde, Bergaufsicht, Intranet-Netze der Landesverwaltung, Bezirksregierungen, Vollzugsbehörden, Brunnenbaufirmen, Ingenieurbüros, Universitäten, Medien

4	Sind dem SGD landestypische Gefahrenpotenziale bekannt?	ja	15
		nein	
		keine Angabe / nicht bekannt	1

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5 und 6

5	Wenn ja, welche? Klartext
---	---------------------------

Auflistung der Rückmeldungen aus den Ländern (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

Artesik, artesische und stark gespannte Grundwasserleiter, bes. hydrostatische Druckverhältnisse, Versalzung des Hauptgrundwasserleiters, Salzwasserintrusionen, Salzstöcke mit Gipshut, Salinartektonik, Salzwasser mit Einfluss auf Spülung und Zementation, Anhydrit- und Gipsvorkommen und Tonmineralquellung, Quelltone (Bentonite, montmorillonithaltige Tone), Fliessande, Störungszonen, geogene Ausgasungen, Antreffen von Gas, CO₂-Aufstieg, Methanausgasung, Karsthohlräume, Verkarstung, Hohlräume im Kalk-/Sulfatgestein, Stockwerksbau, Altlasten, GW-Verunreinigungen, Ökologische Großprojekte - vorhandene GW-Kontamination, Hangrutsch-Risiko, Seismizität, Bergbau / Altbergbau, verfüllte Restlöcher (Tagebaue) bzw. Kippenflächen, ehem. Erzbergbauggebiete

Nr.	Frage	Antwort-möglichkeit	Anzahl der Rückmeldungen
6	Geogene Gefahrenpotenziale besonderer Schichtfolgen?	ja	13
		nein	2
		keine Angabe / nicht bekannt	1

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 4 und Kap. 5.1

7	Wenn ja, welche stratigraphischen Abschnitte (Aufzählung / Abk. erlaubt)? Klartext
---	--

Auflistung der Rückmeldungen aus den Ländern (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

Quartär: Salzwasserführung oder Artesik, Stabilität des Elbhanges, Fliesssande, Quelltone, seismisch aktive Störungsbereiche

Tertiär: Salzwasserführung oder Artesik im Rupel (Unter-Oligozän), schwebende Grundwasserstockwerke in der Molasse, Auftreten von Quelltonen, Braunkohlenflöze, gleichförmige Sande, Tone, Störungszönen

Kreide: Schreibkreide und Kalksteine, Erdfälle, artesisches GW-Verhältnisse, Verkarstung, Schichtverstellungen an Störungen, Soleaufstieg,

Jura: im Malm, örtlich Gips-/Anhydrit und Salz; Kalk- und Mergelsteine (Erdfälle, artesisches GW-Verhältnisse, Verkarstung, Lösung, Ausfällung), Störungen, im Lias, der Posidonien-schiefer enthält wie die Ölschiefer bituminöse Bestandteile und kann bei Wärmezufuhr „Schieferöl“ freisetzen.

Trias: In der alpinen Obertrias Raibler Schichten (Verkarstung und Auslaugung der Kalk- und Dolomitsteine mit Salz- und Gipseinschlüssen, z. T. aber auch Stau- und Quellhorizonte), In der germanischen Trias im Unteren und Oberen Gipskeuper, besonders im Gipskeuper (km1) (Grundgips, z. T. im Sandsteinkeuper; im Muschelkalk: Muschelkalksteine (z.T.mu, mm-mo) Sulfat- bzw. Gipsführung, Verkarstung; im Buntsandstein: Gips- und Anhydritsteine im Ob. Buntsandstein (Röt)

Perm: In der Zeit des Skythium entstand im Alpenraum das Haselgebirge aus einem Mischgestein, das aus Tonmineralen, Sandstein, Anhydrit, Steinsalz und Nebensalzen besteht. Im norddeutschen Becken entstanden im Zechstein Wechsellagerungen aus Stein-, z.T. Kali-Salz, Gips- und Anhydrit-, Kalk- und Tonstein sowie Plattendolomit, z. T. sind in Norddeutschland Salzdiapire (oberflächennah)

Karbon: im Unterkarbon Kohlenkalkstein, Verkarstung, Störungen, Steinkohle im Oberkarbon, Methan, oberflächennaher Bergbau

Devon: Kalksteine des Devons, Riffkarbonatgesteine als Linsenkörper mit Verkarstung, Störungen

Silur: Keine Meldungen

Ordovizium-Zeit: Gießbach-Formation (Karbonatgesteine), Herold-Formation Phyllite mit Karbonatgesteinen,

Kambrium-Zeit: Raschau-Formation (Karbonatgesteine und Dolomitmarmor)

Präkambrium-Zeit: Marmore des Präkambriums

Nr.	Frage	Antwort-möglichkeit	Anzahl der Rückmeldungen
-----	-------	---------------------	--------------------------

8	Wurden nicht beabsichtigt größere Störungen und/oder Hohlräume erbohrt?	Ja	8
		nein	4
		keine Angabe / nicht bekannt	4

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.1

9	Kam es zu unvorhergesehenen Ausgasungen, Ausbläser, Verpuffungen (CO ₂ , H ₂ S, CH ₄ , andere KW)?	ja	4
		nein	6
		keine Angabe / nicht bekannt	6

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.4

10	Gab es Vorkommnisse durch nicht erwartete Schichtenfolgen und/oder Mineralbildungen?	ja	3
		nein	6
		keine Angabe / nicht bekannt	7

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.3

11	Wurde induzierte Seismizität erzeugt?	ja	2
		nein	12
		keine Angabe / nicht bekannt	2

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 6

12	Sind weitere nicht genannte geogene Gefahrenpotenziale bekannt? Klartext
----	--

Auflistung der Rückmeldungen aus den Ländern (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

lokale Verkarstung; setzungsempfindliche Sedimente; rutschgefährdete Gebiete; bes. hydrostatische Druckverhältnisse im südl. Molassebecken; lokale hydrochemische Grundwasser-Beschaffenheit; Aufstieg von Sole oder Thermalwasser

13	Kam es zu "Kurzschlüssen" zwischen einem oder mehreren Grundwasserleitern oder Grundwasser-Stockwerken?	ja	8
		nein	0
		keine Angabe / nicht bekannt	8

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.2

Nr.	Frage	Antwort- möglichkeit	Anzahl der Rückmeldungen
-----	-------	-------------------------	-----------------------------

14	Traten nicht erwartete artesische Druckverhältnisse, besondere Druckgradienten, hydrodynamische Vorkommnisse (Karst / Stockwerksbau) auf?	ja	12
		nein	2
		keine Angabe / nicht bekannt	2

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.2

15	Kam es zu Veränderungen des Grundwasser-Chemismus (z. B. Versalzung, Mineral- und Salzwasseraufstieg)?	ja	3
		nein	1
		keine Angabe / nicht bekannt	12

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.2

16	Traten bei Geothermiebohrungen Veränderungen der Permeabilität oder der Gebirgstemperatur auf?	ja	1
		nein	3
		keine Angabe / nicht bekannt	12

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.3

17	Sind Ihnen Beeinträchtigungen an Grundwassermess- und Entnahmestellen bekannt (Trübung, Verkarstung, Verkeimung, etc.)?	ja	3
		nein	6
		keine Angabe / nicht bekannt	7

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.2

18	Gab es Beeinträchtigungen in Einzugsgebieten von Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebieten, in Mineral- und Thermalwasserbrunnen?	ja	1
		nein	4
		keine Angabe / nicht bekannt	11

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.2

19	Wurden Hohlräume wegen nicht bekannten, nicht dokumentierten, oder wegen "wildem Altbergbau" erbohrt?	ja	2
		nein	7
		keine Angabe / nicht bekannt	7

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.1

20	Kam es zu Geländeänderungen oder Baumängeln im Umfeld von Geothermiebohrungen (Hebungen / Senkungen / Risse)?	ja	7
		nein	4
		keine Angabe / nicht bekannt	5

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.4

Nr.	Frage	Antwort- möglichkeit	Anzahl der Rückmeldungen
-----	-------	-------------------------	-----------------------------

21	Sind weitere nicht genannte geologische / hydrogeologische Gefahrenpotenziale bekannt? Klartext
----	---

Eintrübung von Oberflächen-Gewässern durch Bohrspülung

22	Gab es Schadensfälle beim Bohrvorgang bis zur Aufgabe der Bohrung (Materialermüdung, Werkzeugverlust, Bohrlocheinbruch)?	ja	11
		nein	1
		keine Angabe / nicht bekannt	5

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.4

23	Kam es zu Schadensfällen nach dem Bohren und vor der Inbetriebnahme von Geothermieranlagen (Beanstandungen durch Auftraggeber)?	ja	7
		nein	0
		keine Angabe / nicht bekannt	9

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.5

24	Sind Ihnen Schadensfälle während des Betriebs von Geothermieranlagen bekannt geworden?	ja	4
		nein	5
		keine Angabe / nicht bekannt	7

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.5

25	Sind Projekte mit nicht ausgeglichenen Wärmebilanzen der Anlagen bekannt (Heizung im Verhältnis zur Kühlung)?	ja	7
		nein	0
		keine Angabe / nicht bekannt	9

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.5

26	Kam es zu nicht ausreichenden Ergiebigkeiten / zu Planungsfehlern?	ja	11
		nein	0
		keine Angabe / nicht bekannt	5

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.5

27	Sind Leckagen an Erdwärmesonden bekannt?	ja	4
		nein	4
		keine Angabe / nicht bekannt	8

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.5

Nr.	Frage	Antwort- möglichkeit	Anzahl der Rückmeldungen
-----	-------	-------------------------	-----------------------------

28	Sind Ihnen Abschaltungen wegen Gasdif- fusionen bekannt?	ja	3
		nein	5
		keine Angabe / nicht bekannt	8

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 5.5

29	Wurden Anlagen außer Betrieb gesetzt oder rückgebaut?	ja	9
		nein	2
		keine Angabe / nicht bekannt	5

30	Sind Ihnen weitere, nicht genannte, technisch bedingte Gefahrenpotenziale bekannt? Klartext
----	---

Auflistung der Rückmeldungen aus den Ländern (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

Fehlende o. unsachgemäße Verpressung der Bohrung führen zu hydrogeol. Kurzschlüssen; fehlerhafte Leistung von Bohrfirma, unvollständige Verpressung; Beständigkeit der Abdichtung u. des Sondenmaterials, Flur- und Umweltauswirkungen (Ein-, Ableitung von Bohrspülungen); Frost-Tauwechsel-Unbeständigkeit; ungeeignetes Verpressmaterial, schlecht ausgebildete/nicht zertifizierte Bohrmannschaft, nicht werkseitig verschweißte Sonden, keine fachgerechte Planung/Auslegung von EWA, gegenseitige Beeinflussung bei Großanlagen v.a. in grundwasserdurchströmten Bereichen (Heizen + Kühlen); Aufgabe der Sondenbohrung wegen starker Artesik, z. B. verwildernde Austritte.

31	Erhalten Sie im Vorfeld Informationen zu geplanten Geothermie-Projekten?	ja	15
		nein	0
		keine Angabe / nicht bekannt	1

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 7

32	Sind Sie im behördlichen Verfahren grundsätzlich beteiligt?	ja	10
		nein	5
		keine Angabe / nicht bekannt	1

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 7

33	Erhalten Sie Kenntnis über den Beginn der Geothermie-Bohrarbeiten?	ja	14
		nein	1
		keine Angabe / nicht bekannt	1

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 7

Nr.	Frage	Antwort- möglichkeit	Anzahl der Rückmeldungen
-----	-------	-------------------------	-----------------------------

34	Erhalten Sie Kenntnis von Erlaubnisbe- scheiden?	ja	14
		nein	1
		keine Angabe / nicht bekannt	1

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 7

35	Erhalten Sie Schichtenverzeichnisse von Geothermie-Bohrungen?	ja	15
		nein	0
		keine Angabe / nicht bekannt	1

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 7

36	Haben Sie Einfluss auf die Nebenbestim- mungen der Genehmigung in Form einer Stellungnahme?	ja	15
		nein	0
		keine Angabe / nicht bekannt	1

Anm. der Redaktionsgruppe: siehe Kap. 7

37	Sind Ihnen weitere, in dem Fragebogen noch nicht benannte Gefahrenpotenziale bekannt?	ja	2
		nein	11
		keine Angabe / nicht bekannt	3

38	Hat der SGD Maßnahmen ergriffen, um Gefahrenpotenziale im Bundesland be- kannt zu machen? (z. B. Ampelkarte für Standortbeurteilung)	ja	14
		nein	1
		keine Angabe / nicht bekannt	1

39	Gibt es in Ihrem SGD bereits Vorschläge, die Gefahrenpotenziale bei GT-Bohrungen zu minimieren?	ja	11
		nein	2
		keine Angabe / nicht bekannt	3

40	Sind Ihnen weitere nicht genannte Verfah- rensbeitilgungen bekannt? Klartext
----	--

Keine weitere Meldung aus den Bundesländern

41	Sind Sie bereit eine/n Fachkollegen/in in den PK Geothermie zu entsenden?	ja	14
		nein	1
		keine Angabe / nicht bekannt	1

Anlage 2: Gefahrenpotenziale und bekannte Auswirkungen geothermischer Vorhaben

				hydrogeologisch / geologisch												geotechnisch / technisch / anthropogen												
<div>Gefahrenpotenzial</div> <div>Auswirkungen</div>			Anzahl der bekannten Auswirkungen*		Druckpotenzialunterschiede	Artesik	Stockwerksbau	Sulfathaltige Wässer	höher mineralisierte Wässer	Anhydrit	quellfähige Tone	Fließeande	Steinsalz	Karbonat-/ Sulfatkarst	Gasvorkommen		Störungs-/ Klüftzonen	Altbergbau / Hohlräume	Rutschungen, gefährdete Hänge	Kippen, Altlasten	Dimensionierungsfehler	unzureichende Abdichtung	nicht dauerhaft beständige Abdichtung	Bohrverfahren	Bohrausrüstung	Materialschäden	Mangelnde Qualifikation	
1 Auswirkungen auf das Grundwasser																												
1.1	geohydraulisch																											
1.1.1	Absenkung		11		X	X	X	0	0	0	0	0	0	X	0		X	X	0	0	0	X	X	X	X	0	X	
1.1.2	Aufhöhung / Anstieg		7		X	X	X	0	0	0	0	0	0	X	0		X	0	0	0	0	X	X	X	0	0	X	
1.1.3	Wasseraustritt		49		X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	X	X	X	X	0	X	
1.2 hydrochemisch																												
1.2.1	Mischung von Wässern		13		X	X	X	X	X	0	0	0	0	X	0		X	0	X	0	X	X	X	X	X	0	X	
1.2.2	Ausfällungen		1		0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.2.3	Lösung / Mobilisierung		1		0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.2.4	Stoffeintrag (z.B. von Schadstoffen)		17		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X		0	0	0	X	0	X	0	0	X	X	X	
1.3 thermisch																												
1.3.1	Erwärmung		1		0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	X	
1.3.2	Abkühlung		9		0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	X	X	X	0	0	0	X	
1.4	biologisch		0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2 Auswirkungen auf den Untergrund																												
2.1 Hebungen																												
2.1.1	Quellvorgänge, Mineralbildung		2		X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0		0	0	0	0	0	X	X	X	0	0	0	
2.1.2	Vereisung		38		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	X	
2.2	Setzungen		15		X	0	X	0	0	0	0	X	0	X	0		X	0	0	0	X	X	X	X	0	0	X	
2.3	Suffosion		2		0	X	X	0	0	0	0	X	0	0	0		0	0	0	0	0	X	X	X	0	0	X	
2.4	Rutschungen		0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.5	Verbruch / Einbruch		5		0	0	X	0	0	0	0	X	0	X	0		0	0	0	0	X	X	X	X	0	0	X	
2.6	Ausgasung		7		0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	
3 Auswirkungen auf die Umwelt																												
3.1	Verschmutzung von Oberflächengewässern		16		0	X	0	0	0	0	0	0	0	X	0		0	0	0	0	0	0	0	X	X	0	X	
3.2	Verschmutzung von Grundstücken		24		0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	X	0	0	X	0	X	
4 Auswirkungen auf Anlagentechnik																												
4.1	Gasdiffusion in Pe-Sonde		2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.2	Verockerung (des Schluckbrunnens)		17		0	0	X	X	X	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	X	
4.3	Korrosion (z.B. Wärmetauscher)		42		0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	
Zusatz	Querschnittsverengung der Sonde		1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	

* die Anzahl der bekannten Auswirkungen ergibt sich aus der im Berichtszeitraum stattgefundenen Länderabfrage der SGD und Genehmigungsbehörden.

Anlage 3: bekannte Auswirkungen bei verschiedenen Anlagentypen

Auswirkungen		Anlagentypen			
		Sonden	Brunnen	Kollektoren	Grubenwasser ((Alt-)Bergbau)
1	Auswirkungen auf das Grundwasser				
1.1	geohydraulisch				
1.1.1	Absenkung	x	x		x
1.1.2	Aufhöhung	x	x	(x)	x
1.1.3	Wasseraustritt	x	x		
1.2	hydrochemisch				
1.2.1	Mischung von Wässern	x	x		x
1.2.2	Ausfällungen		x		x
1.2.3	Lösung / Mobilisierung	(x)	x		x
1.2.4	Stoffeintrag (z.B. von Schadstoffen)	x	x	x	x
1.3	thermisch				
1.3.1	Erwärmung	x	x	x	x
1.3.2	Abkühlung	x	x	x	x
1.4.1	Biofouling		x		x
2	Auswirkungen auf den Untergrund				
2.1	Hebungen				
2.1.1	Quellvorgänge, Mineralbildung	x			
2.1.2	Vereisung	x		x	
2.2	Setzungen				
2.3	Suffosion				
2.4	Rutschungen				
2.5	Verbruch / Einbruch				
2.6	Ausgasung				
3	Auswirkungen auf die Umwelt				
3.1	Verschmutzung von Oberfl.-gewässern	x	x		
3.2	Verschmutzung von Grundstücken	x	x		
4	Auswirkungen auf Anlagentechnik				
4.1	Gasdiffusion in Pe-Sonde				
4.2	Verockerung (des Schluckbrunnens)		x		
4.3	Korrosion (z.B. Wärmetauscher)		x		

Anlage 4: Erdbeben in der Nähe tiefer geothermischer Bohrungen, bei denen Erschütterungen an der Erdoberfläche verspürt wurden

Standort	Datum des stärksten Erdbebens	größte aufgetretene Magnitude M_I	Erschütterungen verspürt?	Quelle
Basel (Schweiz)	08.12.2006	3,4	ja (auch in Deutschland verspürt)	Schweizerischer Erdbebedienst
Insheim	09.04.2010	2,4	ja	Landeserdbebedienst Rheinland-Pfalz
Landau	15.08.2009	2,7	ja	Landeserdbebedienst Rheinland-Pfalz
Unterhaching	03.07.2008	2,5	ja	Erdbebedienst Bayern