

Fragen und Antworten zur Tiefen Geothermie

Frequently Asked Questions – FAQ



Impressum

Herausgeber

Landesforschungszentrum Geothermie
KIT Campus Süd
Adenauerring 20b, Gebäude 50.40
76131 Karlsruhe, Baden-Württemberg

Kontakt, Idee, Konzeption und Redaktion

Landesforschungszentrum Geothermie
Frank Schilling, Ingrid Stober,
Birgit Müller, Ernst Kiefer

Inhaltliche Konzeption und Textausarbeitung

Arbeitskreis „Fragen und Antworten zur
Tiefen Geothermie“

Gestaltung

Landesforschungszentrum Geothermie
Birgit Strauß

Druck

Heinz W. Holler, Druck und Verlag
Killisfeldstraße 51, 76227 Karlsruhe

1. Auflage Juni 2022

Hinweis

Die vorliegende Broschüre kann unter folgen-
der Internet-Adresse abgerufen werden:
www.lfzg.de

Entstanden mit Unterstützung des
Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT



Dogger Sandstein © Stober



Inhalt

| | |
|---|----|
| Vorwort | 5 |
| Mitglieder des Arbeitskreises | 7 |
| 1. Einleitung | 9 |
| 2. Rolle und Chancen der Tiefen Geothermie in der Energiewende | 13 |
| 3. Thermalwasserkreislauf und Schutz des Grundwassers | 17 |
| 4. Hebung und Senkung der Erdoberfläche | 27 |
| 5. Beeinflussung des Wasserdrucks im Untergrund aufgrund von Geothermie-Bohrungen | 35 |
| 6. Seismizität | 41 |
| 7. Wirtschaftlichkeit der Tiefen Geothermie | 51 |
| 8. Auswirkungen von Geothermie-Projekten auf die natürliche und bebaute Umwelt | 55 |
| 9. Versicherungen | 63 |
| 10. Bergrechtliche Genehmigungsverfahren | 67 |
| 11. Information der Öffentlichkeit, Bürgerbeteiligung | 71 |
| 12. Beispiele für aufgetretene Probleme bei Tiefen Geothermie-Projekten | 77 |
| 13. Schriftenverzeichnis | 83 |
| 14. Glossar | 89 |



Die Sonnenhof-Therme Bad Saulgau ist ein Thermalbad mit vier Innenbecken und drei Außenbecken (Außenbecken mit Düsenstraße, Schwimmerbecken und Strömungskanal), einer Saunawelt mit vier unterschiedlich temperierten Saunen und einem Therapie- und Wellnesszentrum. Zur Sonnenhof-Therme gehört auch ein Wohnmobilstellplatz mit 53 Stellplätzen. Das Thermalwasser wird aus einer Tiefe von 650 Metern mit einer Temperatur von 41 °C gewonnen. Sie ist als Heilquelle staatlich anerkannt. © Ingo Rack

Vorwort

Zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen hat die Bundesregierung am 29. Januar 2020 einen Gesetzesentwurf zur Verminderung des CO₂-Ausstoßes vorgelegt, der insbesondere den Ausstieg aus der Kohleverstromung bis zum Jahr 2038 festschreibt. Am 3. Juli 2020 wurde das sogenannte Kohleausstiegsgesetz durch den Bundestag und den Bundesrat beschlossen. Im Klimaschutzgesetz vom Dezember 2019 sind die Treibhausgas-Neutralität bis 2050 als langfristiges Ziel vor allem durch den Ausbau erneuerbarer Energien sowie eine Steigerung der Energieeffizienz verbindlich festgelegt. Mit der Änderung des Klimaschutzgesetzes vom Juli 2021 verschärft die Bundesregierung die Klimaschutzvorgaben und verankert das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045. Bereits bis 2030 sollen die Emissionen um 65 Prozent gegenüber 1990 sinken. Der konsequente Ausstieg Deutschlands aus der Nutzung der Kernenergie ist bis Ende 2022 vorgegeben.

Baden-Württemberg hat sich bereits 2013 als zweites Bundesland mit einem Klimaschutzgesetz ehrgeizige Ziele zur Treibhausgasreduktion vorgegeben. In den Jahren 2020 und 2021 wurde das Klimaschutzgesetz jeweils umfassend novelliert. Mit der jüngsten Novellierung wurden als Klimaschutzziele die Erreichung der Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2040 und als Zwischenziel eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 65 Prozent bis zum Jahr 2030 vorgegeben.

Mit dem Kabinettsbeschluss vom 24. März 2020 unterstützt die Landesregierung von Baden-Württemberg den Ausbau der Tiefen Geothermie im Land und bekräftigt die Rolle der Tiefen Geothermie als wichtigen Baustein insbesondere für die Wärmewende. Um die gesetzten Klimaziele zu erreichen, muss die Nutzung fossiler Energieträger schrittweise abgebaut und durch eine Kombination erneuerbarer Energien ersetzt werden. Die Tiefe Geothermie kann dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Im Vordergrund steht die Wärme-

versorgung und damit kommunale Wärmenetze, die besonders in den Ballungszentren des Oberrheingraben und des Molassebeckens günstige Voraussetzung für eine Nutzung geothermischer Energie vorfinden. So kann eine nachhaltige und versorgungssichere Wärmeversorgung in unserem Land aufgebaut werden.

Die Umsetzung der Energiewende in Baden-Württemberg wird nur mit den Bürgerinnen und Bürgern vor Ort gelingen, wenn sie diese Ziele mittragen und eine breite Mehrheit durch aktive Mitarbeit dies unterstützt. Die Nutzung „erneuerbarer Energien“ hat in Baden-Württemberg eine lange Tradition und ist Teil der Innovationskraft des Bundeslandes.

In Bezug zur Tiefen Geothermie werden oft Informationen gewünscht und ein berechtigtes Interesse zu den Auswirkungen im lokalen Umfeld geäußert. Dazu wurden die Fragen rund um die Tiefe Geothermie auf kommunalen Veranstaltungen und Presseterminen, von Bürgerinitiativen, Versorgern, Parteien, Verbänden und Trägern öffentlicher Belange gesammelt und fachlich fokussiert. Im Rahmen einer Förderung durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg hat das Landesforschungszentrum Geothermie den vorliegenden Fragen- und Antworten-Katalog erstellt.

Dazu wurde ein Arbeitskreis aus Expertinnen und Experten eingerichtet. Ziel des Arbeitskreises ist es, die anstehenden Fragen nach dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik zu beantworten.

Das Ergebnis dieser interdisziplinären Zusammenarbeit ist in der vorliegenden Broschüre zusammengestellt: Häufig gestellte Fragen zur Tiefen Geothermie (Frequently Asked Questions).

Karlsruhe, den 01.05.2022
Frank Schilling, Ingrid Stober,
Birgit Müller, Ernst Kiefer



Mitglieder des Arbeitskreises

Der Leitfaden wurde unter Mitwirkung von Spezialisten aus Ministerien, Behörden, Versicherungen, Umweltverbänden, der Industrie und der Wissenschaft erstellt.

Vielen Dank an Herrn Jürgen Binder (Herrenknecht AG), Herrn Achim Fischer-Erdsiek (NW-Assekuranz), Herrn Stefan Ertle (EnBW), Frau Brigitte Hahn (RPKA), Herrn Dr. Ernst Kiefer (LFZG), Frau Dr. Lena Kölbel (Hydrosion), Herrn Dr. Thomas Kölbel (EnBW), Herrn Bruno Lorinser (LNV), Herrn Dr. Fritz Mielert (BUND), Frau Dr. Andrea Molkenhuth-Kessler (NABU), Frau Dr. Birgit Müller (LFZG), Herrn Ulrich Neff (LUBW), Frau Katharina Schätzler (KIT), Herrn Prof. Frank Schilling (KIT LFZG), Herrn Dr. Wilhelm Schloz (LNV), Frau Dorothee Siefert (EnBW), Herrn Lutz Stahl (DEW), Frau Prof. Ingrid Stober (Uni Freiburg LFZG), Herrn Prof. Friedemann Wenzel (KIT), Herrn Matthias Wolf (MVV), Herrn Ron Zippelius (DEW) und vielen anderen für Ihre Mitwirkung!

Die Mitglieder des Arbeitskreises haben an unterschiedlichen Stellen und in unterschiedlichen Unterarbeitsgruppen mitgewirkt. Der Arbeitskreis setzte sich aus folgenden Institutionen und Einrichtungen zusammen:

AGW – Angewandte Geowissenschaften (Institut) im KIT
BUND – Bund für Naturschutz Deutschland (BUND e.V.)
EnBW – Energie Baden-Württemberg AG
DEW – Deutsche ErdWärme GmbH
Hydrosion – Hydrosion GmbH Beratungsgesellschaft

INE – Institut für Nukleare Entsorgung im KIT
KIT – Karlsruher Institut für Technologie
LBD – Landesbergdirektion, Referat 97 des LGRB im RPF
LFZG – Landesforschungszentrum Geothermie, Geschäftsstelle: KIT
LNV – Landesnaturschutzverband – Baden-Württemberg e.V.
LUBW – Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
NABU – Naturschutzbund Deutschland
NW-Assekuranz – NordWest Assekuranzmakler GmbH & Co. KG
RPF – Regierungspräsidium Freiburg
RPK – Regierungspräsidium Karlsruhe
UM – Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Uni Freiburg – Universität Freiburg als Mitglied im LFZG

Wir bedanken uns bei allen, die zur FAQ-Broschüre und deren Qualitätssicherung beigetragen haben.

Die Endredaktion lag bei Ingrid Stober, Ernst Kiefer, Birgit Müller und Frank Schilling.

Trotz sorgfältigem Arbeiten können sich Fehler einschleichen oder durch die vereinfachten Formulierungen Ungenauigkeit ergeben. Gerne würden wir den FAQ immer aktualisieren und verbessern. Über Anregungen zum FAQ, das Beisteuern von neuen Erkenntnissen oder den Hinweis auf Ungenauigkeiten freuen wir uns. Bitte senden Sie ihre Hinweise an: FAQ@lfzg.de.



Muschelkalk © Stober



Einleitung

Nutzungsmöglichkeiten der Tiefen Geothermie
für die Energiewende

Einleitung

Die Energiegewinnung aus tiefer Geothermie nutzt die im heißen Gestein gespeicherte Wärmeenergie, die permanent aus dem Erdinnern ergänzt wird. Der Untergrund wird dabei als Wärmeübertrager genutzt und die Energie durch die Förderung warmer bis heißer Grundwässer (Tiefenwässer) über eine Förderbohrung nach oben gefördert. Meist werden dazu tiefliegende Grundwasserleiter, so genannte Aquifere genutzt. Diese tiefliegenden Thermalwässer sind in Baden-Württemberg sehr alt, nehmen nicht oder nur sehr geringfügig am natürlichen Wasserkreislauf teil. Sie weisen unterschiedlich hohe Gehalte an gelösten Gasen und Mineralstoffen, insbesondere Salzen auf (z.B. nieder- bis mittelhohe Konzentrationen im Molassebecken Oberschwabens, hohe bis sehr hohe Konzentrationen im Oberrheingraben). Zur Schonung des tiefen Grundwasserhaushalts wird das abgekühlte Wasser wieder in den Untergrund über eine oder mehrere Wasser-Rückführbohrungen verbracht. Damit wird eine Ableitung von war-

men, Gas- und Salz-reichen Wässern in Oberflächengewässer vermieden und das Volumen der Tiefenwässer bleibt nahezu konstant. So entsteht ein übertage geschlossener Kreislauf.

Zur Wärmeabgewinnung konzentriert sich die tiefe Geothermie in Baden-Württemberg auf sogenannte hydrothermale Systeme. Dabei wird mit Hilfe von Förderbohrungen und Injektions- (Wasser-Rückführungs) Bohrungen die thermische Energie (Wärme) eines porösen, meist auch geklüfteten, tiefliegenden Warmwasseraquifers genutzt (Abbildung 1.1, Abschnitt 3, Abbildung 3.1). An der Oberfläche wird die geothermische Energie über Wärmeübertrager (Wärmetauscher) direkt einem Abnehmer oder aber einem Wärmenetz oder einer Kraftwerksturbine zur Stromerzeugung zugeführt. So bleibt übertage der Kreislauf im Betrieb geschlossen, damit kein Tiefenwasser mit oberflächennahem Grundwasser vermischt wird.

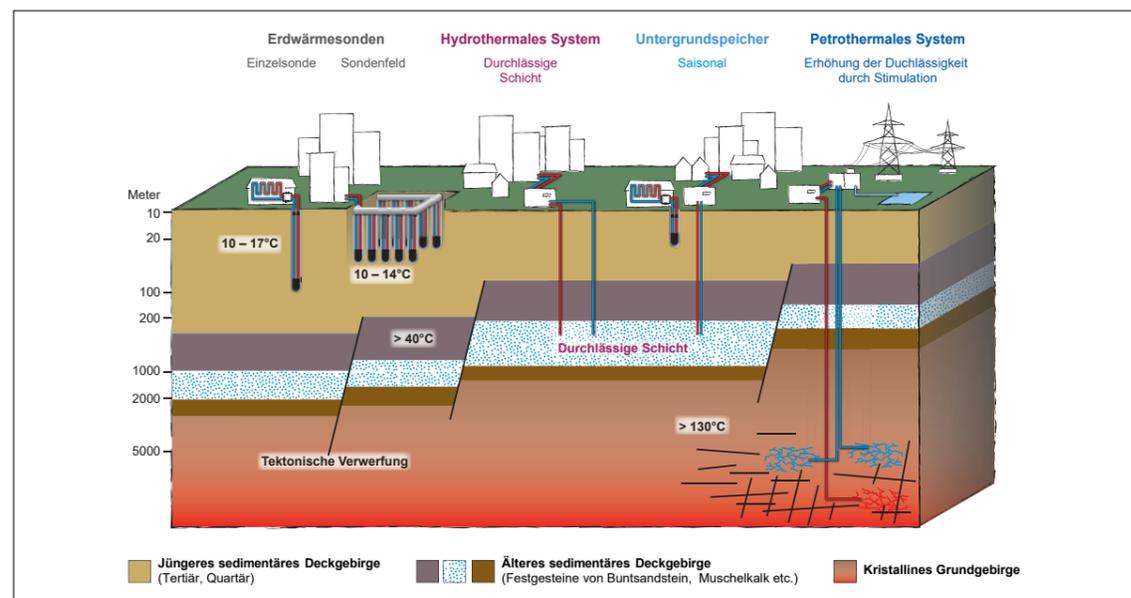


Abbildung 1.1: Häufigste Nutzungssysteme der Geothermie: oberflächennahe Geothermie (links), Tiefe hydrothermale Geothermie (Mitte), Tiefe petrothermale Geothermie (rechts). In der Broschüre befassen wir uns mit der hydrothermalen Geothermie, der hydrothermalen Dublette und mit Aquiferspeichern. „Rote“ Bohrungen: Förderung von heißem Wasser, „blaue“ Bohrungen: Rückführung des abgekühlten Wassers.

Petrothermale Anlagen nutzen Grundgebirgsstockwerke mit geringerer Wasserdurchlässigkeit (Abbildung 1.1). Die Wahrscheinlichkeit von induzierter Seismizität (erzeugte Erdbeben) wird bei diesen Anlagen höher eingestuft, weshalb derzeit in Baden-Württemberg vermieden wird, Geothermiebohrungen bis nahe an die Oberfläche oder in das kristalline Grundgebirge abzuteufen. Der Stand von Wissenschaft und Technik wird weiter beobachtet, um in Zukunft auch diese Ressource ohne Gefährdung nutzen zu können.

Zur Wärmeabgewinnung können auch tiefe Erdwärmesonden genutzt werden. Zudem sind Aquifere in mittleren Tiefen zur Speicherung von Wärme geeignet (Abbildung 1.1).

In dieser Broschüre wollen wir uns auf häufig gestellte Fragen konzentrieren. Für einen Überblick, wie ein Geothermie-Vorhaben entwickelt werden kann, verweisen wir auf den „Handlungsleitfaden Tiefe Geothermie“ des LFZG, der z.B. auf der Homepage (www.LFZG.de) heruntergeladen werden kann.

Bei Projekten der tiefen Geothermie handelt es sich um geotechnische Vorhaben, die nach aktuellem Stand der Technik und mit aktuellen Methoden der Exploration und der Tiefbohrtechnik vorbereitet werden. Um eine Geothermieanlage bauen und den Untergrund nutzen zu dürfen, sind eine Reihe von Genehmigungen notwendig. Die zuständigen Fachbehörden haben dabei im Blick, dass die Umwelt geschützt, die Normen (Lärm, Wasserschutz etc.) eingehalten und die Menschen vor Ort nicht beeinträchtigt werden.

Neben den Genehmigungen, die für die übertägigen Projektbestandteile notwendig sind (bekannt aus dem Haus- und Straßenbau), müssen darüber hinaus die untertägigen Projektbestandteile und die Nutzung des Untergrundes zugelassen werden. Dabei müssen sowohl die Untersuchungen zur Aufsuchung eines geeigneten Aquifers, das Bohren, das Testen und die Nutzung eines Aquifers einzeln

beantragt, durch die zuständige Behörde geprüft und zugelassen werden.

Diese Schritte werden unter Beteiligung weiterer Behörden (z.B. obere/untere Wasserbehörde) und mit Einbindung der Träger öffentlicher Belange und anerkannter Naturschutzverbände (vgl. Abschnitt 11) durchgeführt. Die Zulassung eines Projektschrittes ist kein Automatismus; es kommt nicht selten vor, dass nach Prüfung der Beobachtungen ein Projekt nicht mehr weiterverfolgt werden kann. Da bergrechtliche Zulassungsverfahren nicht allen geläufig sind, haben wir diesem Thema ein eigenes Kapitel (Abschnitt 10) gewidmet.

Viele Fragen zur Geothermie sind standortspezifisch, z.B. die Tiefenlage der Aquifere oder die Zusammensetzung der Tiefenwässer: Wasser mit Trinkwasserqualität, Salzwasser, Wasser mit Wertstoffen (z.B. Lithium) oder mit Schadstoffen (z.B. Arsen) oder mit radioaktivem Gas (z.B. Radon). Deshalb erfolgt immer eine Zulassung im Einzelfall der Vorhaben durch die Behörden und keine pauschale Prüfung. Daher hat die Broschüre nicht den Anspruch, alle Details für alle Standorte zu beschreiben, sondern Antworten zu den wichtigsten Fragen zu geben. Weitergehende Informationen können in Fachbüchern und einer Vielzahl von Publikationen in einschlägigen internationalen Fachzeitschriften gefunden werden.

Wir hoffen, dass es uns gelungen ist, die komplexen Zusammenhänge verständlich zusammenzufassen und aus wissenschaftlich-technischer Sicht so zu erklären, dass Sie sich ein Bild machen können. Das Ergebnis ist der vorliegende FAQ-Katalog (Frequently Asked Questions = die am häufigsten gestellten Fragen).

Damit Sie sich noch eingehender mit den Themen beschäftigen können, haben wir eine Auswahl an Publikationen und verwendete Quellen am Ende der Broschüre zusammengestellt.



2

Rolle und Chancen der Tiefen Geothermie in der Energiewende

Zusammenfassung

- Die Tiefe Geothermie gehört neben der Solar- und Umweltthermie zu den „Erneuerbaren Energien für die Wärmewende“, die in Baden-Württemberg noch ein hohes Ausbaupotenzial besitzen.
- Geothermie ist unabhängig von der Tages- und Jahreszeit und der Witterung – steht also auch in kalten windstillen Nächten zur Verfügung.
- Saisonal anfallende Abwärme oder Überschusswärme anderer Energieerzeuger können an geeigneten Standorten in den Untergrund eingelagert und zu Bedarfszeiten wieder genutzt werden.
- Geothermie ist versorgungssicher, emissionsarm und durch den geringen Landschaftsverbrauch und die Verfügbarkeit für viele Generationen besonders nachhaltig.

Einleitung

Aus der Erde, in der große Wärmemengen gespeichert sind, strömt ein kontinuierlicher Strom von Wärme in Richtung Erdoberfläche. Erdwärme ist daher in historischen Zeiträumen unerschöpflich, steht jederzeit zur Verfügung und ist fast überall nutzbar. Somit stellt Erdwärme eine erneuerbare Energiequelle dar, die nachhaltig genutzt werden kann. Da geothermische Energie in Form von Wärme anfällt, ist die Effizienz von Geothermie-Anlagen sehr hoch, wenn diese für die Wärmeversorgung eingesetzt werden. Die Nutzung geothermischer Energie leistet bereits heute einen wichtigen Beitrag zur Treibhausgasreduktion und besitzt ein großes Ausbaupotenzial.

Anlagen zur tiefen geothermischen Energienutzung liefern in erster Linie Wärmeenergie.

► Frage: Wird Geothermie für die Wärmewende benötigt?

Bei der Energiewende stand bisher der Stromsektor im Fokus. Allerdings macht der Wärmebedarf den Hauptteil unseres Energieverbrauchs im Lande aus. Im Jahr 2020 betrug der Endenergieverbrauch zur Wärmeerzeugung in Baden-Württemberg ca. 136 TWh. Der Bruttostromverbrauch belief sich demgegenüber auf „nur“ rund 71 TWh. Während beim Bruttostromverbrauch in BW schon etwa rund 26 % aus erneuerbaren Energiequellen stammen, sind es im Wärmesektor lediglich knapp 16 %, diese stammen hauptsächlich aus Biomasse (Abbildung 2.1).

Insbesondere im Rheintal und in Oberschwaben, wo tief liegende Grundwasserleiter vorkommen und große geothermische Potentiale

► Frage: Gibt es Beispiele erfolgreicher Tiefen Geothermievorhaben?

Die Nutzung der Tiefen Geothermie ist wirtschaftlich dort besonders interessant, wo große Wärmemengen für Wärmenetze oder industrielle Prozesse genutzt werden können

Das Temperaturniveau solcher Anlagen bewegt sich in Baden-Württemberg je nach Tiefe der Tiefbohrungen (ca. 1.000 m bis 3.500 m) und den örtlichen Gegebenheiten zwischen etwa 60 °C und 170 °C. Mit diesen Temperaturen lassen sich Fern- und Nahwärmenetze zur Gebäudebeheizung betreiben oder für industrielle Zwecke (z.B. als Prozesswärme) nutzen. Parallel dazu erfolgt eine erhebliche industrielle und heimische Wertschöpfung, denn die Nutzung tiefer Geothermie in Verbindung mit Wärmenetzen geschieht lokal. Dies stärkt die Kommunen und die Region durch Schaffung von lokalen Arbeitsplätzen und einer Minimierung der Abhängigkeit von Importen aus anderen Ländern.

bekannt sind, kann die Tiefe Geothermie für die Wärmeversorgung besonders gut genutzt werden. Lokal begrenzt sind noch in anderen Regionen Baden-Württembergs Grundwasserleiter in mittlerer Tiefe vorhanden, die für die direkte Nutzung oder die Einspeicherung von Überschusswärme aus anderen erneuerbaren Energien als so genannte Aquiferspeicher genutzt werden können.

Durch die Nutzung der Tiefen Geothermie kann Wärmeenergie nachhaltig und rund um die Uhr zur Verfügung gestellt werden. Geothermie kann also zum wichtigen Standbein für die Wärmewende werden. Positive Begleiterscheinungen sind zudem die geringe Flächeninanspruchnahme solcher Anlagen.

und gleichzeitig gute geologische Rahmenbedingungen gegeben sind. Bisher liefern die Anlagen zur Tiefen Geothermie in Baden-Württemberg einen sehr geringen Beitrag

Struktur des Endenergieverbrauchs in Baden-Württemberg 2020

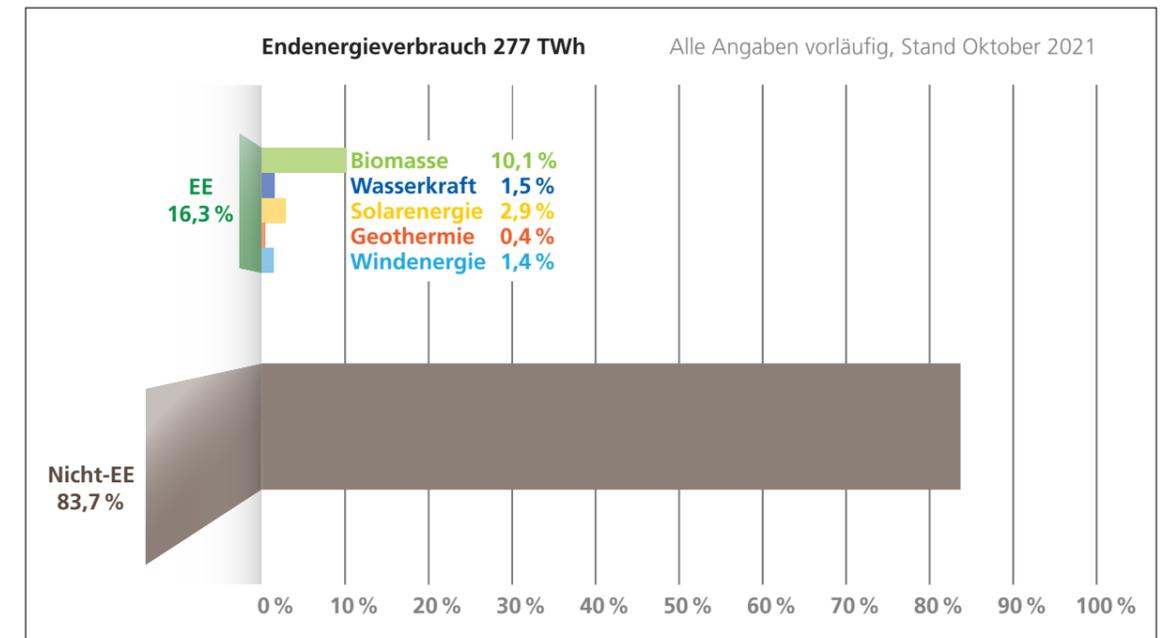


Abbildung 2.1: Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch (UM 2020), Nutzung Erneuerbarer Energie (EE) im Vergleich zu genutzter konventioneller Energien (Nicht-EE).

zur Wärme- und Stromversorgung. Die Anlagen in Baden-Württemberg, z.B. Bruchsal im Oberrheingraben (Stromerzeugung, Wärme), Riehen an der Deutsch Schweizer-Grenze (Wärme) und Pfullendorf in Oberschwaben (Wärme) arbeiten nahezu unbemerkt.

Die anfallende Wärme geothermischer Anlagen kann ab einem Temperaturniveau von etwa 120 °C auch zur Erzeugung von erneuerbarem Strom mit konstanter Leistung, d.h. zur Bereitstellung der Grundlast, genutzt werden. Eine derartige Anlage kann zusätzlich auch für eine Heizwärmebereitstellung genutzt werden und z.B. in den Sommermonaten, in denen weniger Wärme benötigt wird, verstärkt für die Erzeugung erneuerbaren Stroms genutzt werden. Zusätzlich kann im Sommer Kälte durch den Einsatz von Absorptionskältemaschinen generiert werden. Insofern bieten industrielle Kälteanwender eine weitere Absatzperspektive für geothermische Energie (Stober & Bucher 2020).

Da die geothermische Energie rund um die Uhr anfällt, ist auch eine Anwendung in Form industrieller Prozesswärme und der Fernwärme sinnvoll. Dort können jährlich hohe Betriebszeiten realisiert werden.

Die Anlagen mit hydrothermalen Nutzung bilden große Leistungseinheiten und sind so in der Lage über Fernwärmesysteme viele Abnehmer zu versorgen. Für die Abnehmer hat dies zusätzliche Vorteile, z.B. ersetzt ein kleiner Hausanschluss einen Heizkessel (z.B. Heizkessel inkl. ggf. Öltank), und reduziert damit auch entsprechende Wartungskosten. Aufgrund des jahrzehntelangen – auch wirtschaftlichen – Erfolges der Tiefen Geothermie im Großraum Paris, werden die dortigen Systeme erweitert. Auch im Großraum München existieren zahlreiche – auch wirtschaftlich – erfolgreiche Projekte, deshalb bauen die Stadtwerke München die Tiefe Geothermie systematisch aus, um unabhängig von CO₂-emittierenden Wärmequellen zu werden.



3

Thermalwasserkreislauf und Schutz des Grundwassers

Zusammenfassung

- Grundwasser stellt eine wichtige Ressource dar. Bei der Planung, Genehmigung und Überwachung wird deshalb der Schutz dieser wertvollen Ressource berücksichtigt.
- Für den Grundwasserschutz muss z.B. in den oberen, wasserführenden Schichten die Bohrung ohne Wasser-gefährdende Substanzen abgeteuft und das „Förderrohr“ durch ein Multibarrieren-System (Stahl – Zement – Stahl – Zement) in den oberen Schichten abgedichtet, sowie der Bohrplatz versiegelt werden. Hier kann auf einen Stand der Technik von Hunderttausenden von Tiefbohrungen weltweit zurückgegriffen werden.
- Im Genehmigungsprozess liegt ein besonderes Augenmerk auf dem Trinkwasserschutz.
- Die Dichtigkeit des Systems muss überwacht werden (Monitoring).

Einleitung

Tiefengrundwasser können oft nicht für Trink- oder Brauchwasserzwecke genutzt werden, wenn sie z.B. bei hohen Temperaturen einen zu hohen Gehalt an Inhaltsstoffen (z.B. Salzgehalte) aufweisen. Eine Ausnahme stellt der thermale Oberjura-Grundwasserleiter im Molassebecken dar, in dem die Wässer oft Trinkwasserqualität aufweisen. Durch den geschlossenen übertägigen Kreislauf der Anlage und durch die Betriebsführung wird dabei sichergestellt, dass dieser Grundwasserleiter weiter als strategische Reserve zur Verfügung steht. Bei allen anderen tiefen Grundwasserleitern im Oberrheingraben und Molassebe-

cken nimmt der Lösungsinhalt mit der Tiefe so stark zu, so dass eine Nutzung als Trinkwasser nicht möglich ist.

In der Tiefen Geothermie kommt zur Wärmeversorgung am häufigsten eine sogenannte geothermische hydrothermale Dublette zum Einsatz. Diese besteht aus zwei Tiefbohrungen, die einen warmen oder heißen Grundwasserleiter in etwa 1.000 bis 3.500 m Tiefe erschließen (Abbildung 3.1). In diesem thermalen Grundwasserleiter (Aquifer) befinden sich alte Tiefengrundwässer ohne relevante Grundwasserneubildung.

Geothermische Dublette zur Wärmeversorgung

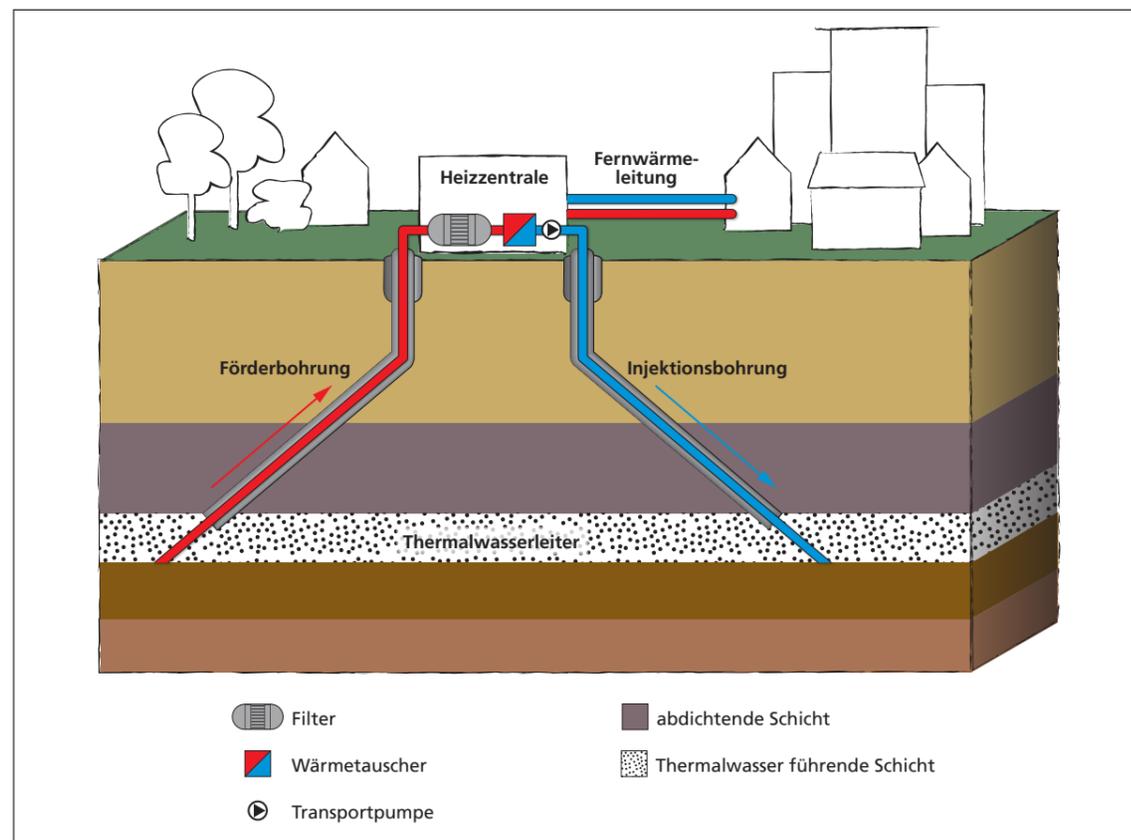


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Thermalwasserkreislaufs einer hydrothermalen Dublette zur Wärmeversorgung. Eine Dublette besteht aus einer Förderbohrung für das heiße Wasser aus dem Untergrund und einer Rückführbohrung (Injektionsbohrung), mit der das abgekühlte Wasser wieder in den Untergrund eingebracht wird.

Aus der Förderbohrung wird das Thermalwasser an die Erdoberfläche gefördert. In der Heizzentrale wird dem Thermalwasser in der Regel mittels Wärmeübertrager (Wärme-

tauscher) Wärmeenergie entzogen und diese Wärme auf eine andere Flüssigkeit übertragen: Bei ausschließlicher Wärmenutzung auf normales Leitungswasser, bzw. auf ein

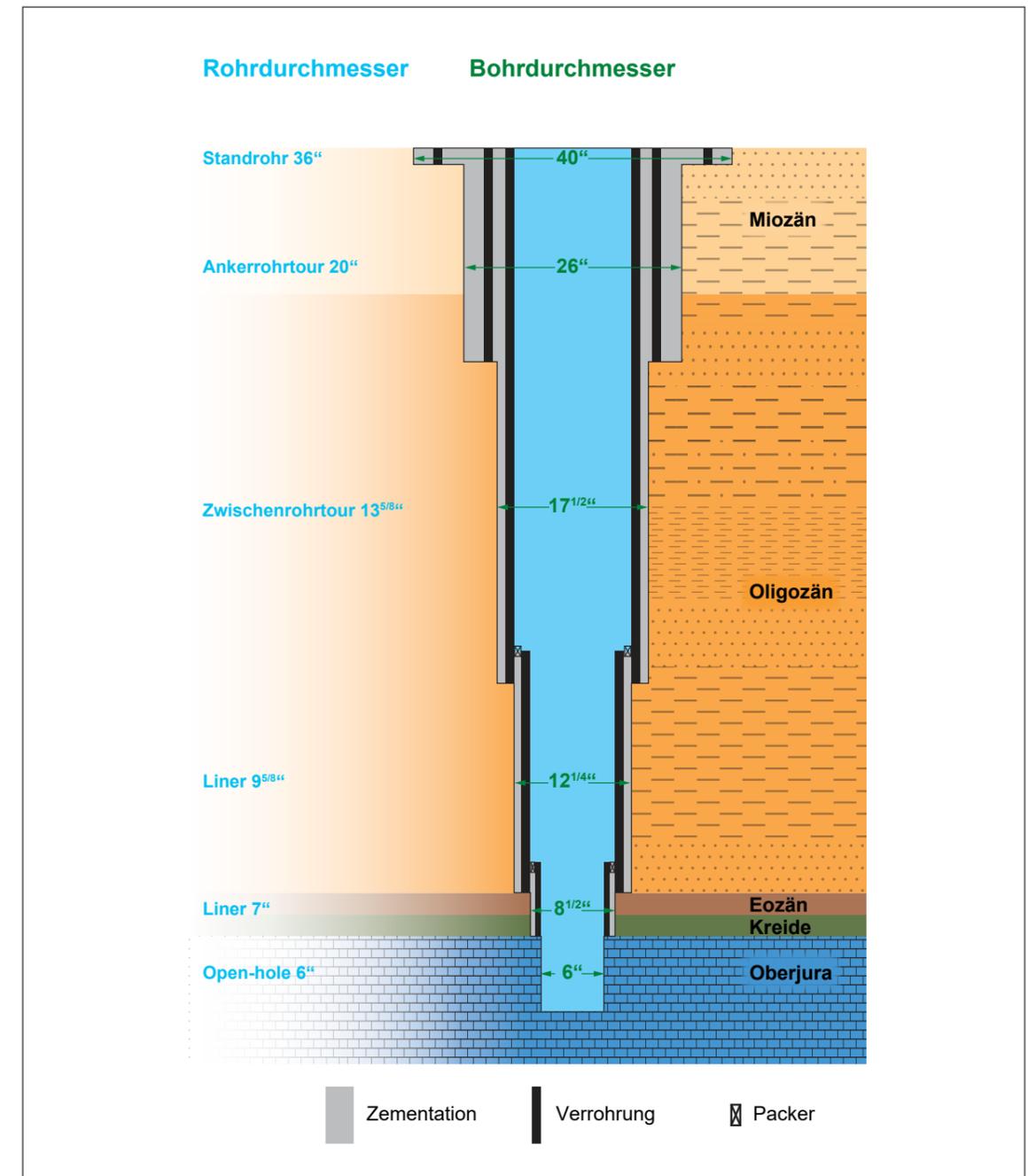


Abbildung 3.2: Schematischer Ausbau einer Tiefen Geothermiebohrung. In der Förderbohrung ist im oberen Bereich eine Pumpe installiert (in der Abbildung nicht dargestellt). Die geologische Abfolge ist schematisch eingetragen. Rohr- und Bohrdurchmesser werden in Zoll angegeben (1" = 2,54 cm).

für Wärmenetze optimiertes Wasser (AGFW FW510), bei Stromproduktion meistens auf eine organische Wärmeträgerflüssigkeit. Das erwärmte Leitungswasser wird in ein Wärmenetz geschickt. Das im Wärmeübertrager abgekühlte Thermalwasser wird über die Wasser-Rückführbohrung wieder zurück in den tiefen Grundwasserleiter verbracht, aus dem es entnommen worden ist (Abbildung 3.1, 3.2). Der übertägige Thermalwasserkreislauf ist im Regelbetrieb außer bei Tests und Revisionen geschlossen. Es gibt auch Anlagen, die über mehrere Bohrungen verfügen (Stober & Bucher 2020).

Nur bei geothermischen Anlagen, bei denen Strom erzeugt wird, wird die Wärme des Thermalwassers übertage auf eine organische Wärmeträgerflüssigkeit (bei sog. ORC-Anlagen, vom englischen: Organic Rankine Cycle) oder auf verdünntes Ammoniak (Kalina-Anlagen) übertragen, wobei ORC das häufigste Verfahren bei den in Deutschland im tieferen Untergrund herrschenden Temperaturen ist.

Die unterirdische hydraulische Verbindung (Abbildung 3.1) zwischen den beiden Bohrungen der geothermischen Dublette ist von ihrer Entfernung im Nutzhorizont abhängig. Die Nachhaltigkeit der Dublette mit ausreichender Fließzeit zwischen Wasser-Rückführung und -Förderung wird im Vorhinein durch Berech-

► **Frage: Wie kann man sich den Thermalwasserkreislauf einer hydrothermalen Geothermieanlage vorstellen? Kann er überhaupt übertägig geschlossen gehalten werden?**

Der Thermalwasserkreislauf einer Geothermieanlage ist im Betrieb übertage vollständig geschlossen. Es gibt also keine Emissionen von flüssigen oder gasförmigen Stoffen aus dem Untergrund. Bei Revisionsarbeiten können Tiefenwässer zeitweise in obertägigen Becken (ohne Abfluss) gelagert werden. Potentielle Emissionen werden überwacht.

nungen (numerische Modellierung) ermittelt und kann nach Fertigstellung der Bohrungen beispielsweise durch Markierungsversuche überprüft werden. Bei Markierungsversuchen wird ein umweltverträglicher Stoff in die Wasser-Rückführbohrung eingebracht und das Auftreten des Stoffes in der Förderbohrung gemessen.

Eine Einleitung von Thermalwasser in Oberflächengewässer stellt keine Option dar, da die zumeist noch hohen Temperaturen und sehr hohen Lösungsinhalte zu schädlichen Veränderungen im Oberflächengewässer führen könnten; dies ist deshalb verboten.

Um die Aquifereigenschaften zu untersuchen, wird bei Fördertests Thermalwasser in dichten Becken aufgefangen und anschließend wieder über die Bohrung in denselben Aquifer verbracht. Sind die Lösungsinhalte im entnommenen Thermalwasser gering, kann unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung auch eine Entsorgung über Klärwerke beantragt werden.

Im Unterschied dazu erfolgt bei Thermalwasserbohrungen für balneologische Zwecke (Heilbäder, Thermalbäder) in der Regel keine Zurückleitung in den Nutzhorizont; hier wird wie bei Mineralwasserbohrungen Wasser dem Untergrund entnommen.

Bei luft- oder wassergekühlten Anlagen zur Stromerzeugung wird nicht das geförderte Thermalwasser verdampft, sondern es wird Leitungswasser verdampft. Geothermische Anlagen ausschließlich zur Wärmeversorgung benötigen im Betrieb keine Kühlanlagen.

► **Frage: Wie kann man nachweisen, dass das abgekühlte Wasser nach der Wasser-Rückführung vollständig und zeitnah in den Entnahmehorizont zurückfließt?**

Da keine Wasserspeicher im geschlossenen Kreislauf eingesetzt werden, wird dieselbe Menge, die gefördert wird, automatisch unmittelbar auch wieder in den Untergrund, normalerweise in dieselbe Gesteinsschicht, verbracht.

Ziele eines Anlagenbetreibers sind ein effizienter und nachhaltiger Betrieb der Geothermieanlage. Daher sollte mit möglichst geringem Druck das Wasser wieder in den Untergrund verbracht werden (Injektionsbohrung). Entscheidend für den Anlagenbetreiber sind die untertägige hydraulische Durchlässigkeit sowie die Güte der Verbindung der beiden Bohrungen miteinander.

Im Vorfeld des Baus der Geothermiebohrungen werden Berechnungen (numerische Modellberechnungen) durchgeführt, die Aufschluss über einen optimalen Abstand der

beiden Bohrungen im Aquifer liefern. Um die Anlagen sicher zu betreiben, werden Druck, Temperatur und weitere Parameter beim Probe- und Dauerbetrieb gemessen (Monitoring) und mit den zugelassenen Betriebsbedingungen verglichen. Bei Abweichungen wird die Förderrate entsprechend geändert. Zur Effizienzsteigerung kann z.B. eine weitere Bohrung oder ein sogenannter Sidetrack (eine seitliche Ablenkung aus einer bereits existierenden Bohrung) abgeteuft werden.

Der vollständige und zeitnahe Rückfluss liegt auch im Interesse des Anlagenbetreibers, da aufgrund der meist hohen Mineralisation mit zunehmender Verweildauer des Thermalwassers im Thermalwasserkreislauf die Wahrscheinlichkeit von ungewollten Mineralausfällungen ansteigt. Diese würden kostenintensive Wartungsarbeiten verursachen.

► **Frage: Wie wird sichergestellt, dass sich die genutzten geologischen Formationen durch den geothermischen Kreislauf nicht verändern? In welchem Umfang wird der Aquifer verändert?**

Durch die Förderung von Thermalwasser kann sich die Durchlässigkeit im Förderbereich des Aquifers (tiefer Grundwasserleiter) verändern. Auch im Wasser-Rückführungsbereich kann sich die Durchlässigkeit je nach Gegebenheiten erhöhen oder reduzieren. Durch regelmäßige Messungen mit Überprüfung

(Monitoring) von Förderrate (Wasser-Rückführungsrate), Druck, Temperatur und den chemischen Eigenschaften des Thermalwassers wird überwacht, dass keine unerwünschten Veränderungen im genutzten tiefen Grundwasserleiter auftreten.

► **Frage: Wie wird die Integrität von Tiefbohrungen zum Schutz des Grund-/Trinkwassers und der Atemluft hergestellt, wie kann man sie überwachen?**

Tiefbohrungen werden etappenweise mit abnehmendem Durchmesser (konzentrisch) erstellt, so dass im oberen Bereich mehrere Rohre (sogenannte Rohrtouren) mit verschiedenen

Durchmessern ineinander stehen und gegeneinander zementiert sind (Abbildung 3.2) und somit einen erhöhten Schutz für oberflächennahe Grundwasserleiter darstellen.

Zwischen den Rohren befinden sich die Ringräume, die entweder mit Zement oder Flüssigkeiten gefüllt sind. Über flüssigkeitsgefüllte Ringräume lassen sich Undichtigkeiten frühzeitig beobachten.

Das Ausbaumaterial der Tiefbohrung (spezielle Stähle, Spezialkunststoffe) wird auf die korrosiven Eigenschaften der Tiefengrundwässer abgestimmt (Prognose des Verhaltens). Tiefbohrungen werden heutzutage so ausgeführt, dass die äußerste Verrohrung der Bohrung mit Hinter-Zementation dicht an das umgebende Gestein angeschlossen ist und keine vertikalen Wegsamkeiten entlang der Bohrung auftreten. Diese so genannte Integrität der Tiefbohrung wird durch Monitoring überwacht. Die „Technische Regel Bohrungsintegrität“ (BVEG) und weitere Standards (NORSKO D-010, 2013) beschreiben dazu

► **Frage: Wird das oberflächennahe Grundwasser durch eine geothermische Tiefbohrung beeinflusst?**

Bei Tiefbohrung ist grundsätzlich sicherzustellen, dass keine nachteilige Veränderung des oberflächennahen Grundwassers, in welchem Benutzungen (Trink- und Brauchwasser) ausgenommen thermale Nutzungen vorkommen, erfolgt und dass verschiedene Grundwasserleiter hydraulisch nicht miteinander verbunden werden. Da Tiefbohrungen im oberen Bereich aus mehreren ineinander gestellten Rohren bestehen, bei denen die Zwischenräume zusätzlich zementiert sind, entsteht ein Multibarriersystem (Abbildung 3.2). Bei derartigen ineinandergreifenden und hinterzementierten Verrohrungen, wie sie in Baden-Württemberg zugelassen werden, ergibt sich dadurch eine hohe Sicherheit für die oberflächennahen, grundwasserführenden Schichten.

Durch Förderung und Wasser-Rückführung von heißem bzw. warmem Tiefengrundwasser kommt es durch Wärmeleitung im Untergrund im Nahbereich der Bohrungen zu Temperaturauswirkungen auf oberflächennahe Grundwässer. Nur im Nahbereich ist mit einem

einen umfangreichen Maßnahmen-Katalog. Dazu zählen u.a. eine Qualitätssicherung der Zementation, eine Drucküberwachung der Ringräume in den Bohrungen zum Nachweis von deren Dichtigkeit sowie eine Abschätzung der Korrosionsrate der Barriere-Elemente (Futterrohre). Bei Bedarf können vor Ort in der Bohrung zudem Wandstärkenmessungen der Rohre vorgenommen und die Korrosion überwacht werden. Durch Vergleich mit den Messergebnissen bei Inbetriebnahme können die Korrosionsrate bestimmt, mit den Prognosen verglichen und Aussagen zur Integrität getroffen werden. Weitere wichtige Informationen zur Bohrungsintegrität liefern die kontinuierliche Aufzeichnung von Druck, Temperatur und Hydrochemie. Werden Undichtigkeiten festgestellt kann und muss der undichte Bereich repariert werden.

Einfluss auf die Grundwasser-Mikrofauna (und ihren Lebensgemeinschaften) zu rechnen. Im Vergleich zu anderen erdverlegten Leitungen (z.B. Wasserleitungen, Abwasserleitungen, erdverlegte Hochspannungskabel) sind der beeinflusste Bereich und damit die Auswirkungen deutlich geringer.

Bereits bei der Geothermie-Planung und über die Genehmigung durch Fachbehörden wird sichergestellt, dass keine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit oberflächennaher Grundwasserleiter zu befürchten ist und dass insbesondere keine vorgesehenen oder bereits genutzten oberflächennahen Grundwasserleiter beeinträchtigt werden. So sind beispielsweise tiefe Geothermiebohrungen in den Trinkwasserschutz zonen I und II verboten und nur unter speziellen geologischen Bedingungen in der Zone III genehmigungsfähig. Entsprechendes gilt für Heilquellenschutzgebiete. Auf diesem Wege wird die Trinkwasser-, Heilwasser- und Thermalwasser-Gewinnung zusätzlich geschützt.

► **Frage: Wie verhält es sich mit der Beeinflussung/Verschmutzung von Grundwasser bei defekten Bohrungen?**

Regelmäßige Überwachungen verschiedener Parameter in der Tiefbohrung helfen frühzeitig Defekte zu erkennen.

Zusätzlich kann ein Messstellennetz im oberflächennahen Grundwasserleiter (in der Nähe der Tiefbohrung) dazu beitragen, dass eine Leckage von Tiefenwasser in oberflächennahe Grundwasserleiter frühzeitig entdeckt werden

kann und geeignete Gegenmaßnahmen getroffen werden können.

Eine chemische Analyse der Tiefenwässer vor Inbetriebnahme erlaubt eine detaillierte Risikobetrachtung. Dadurch kann das Überwachungskonzept entsprechend angepasst werden.

► **Frage: Ausfällungen aus dem Thermalwasser können je nach genutzter Schicht und Tiefe der Schicht mit radioaktiven Stoffen verunreinigt sein. Wie ist die Sicherheit des Personals und der Umwelt gewährleistet?**

Bei der Tiefen Geothermie können natürliche radioaktive Stoffe, die aus dem Gestein stammen und im Wasser gelöst sind, mit dem Thermalwasserkreislauf an die Oberfläche gelangen. Die radioaktiven Stoffe können sich im Inneren von Rohrleitungen ablagern oder als Schlämme anfallen. Dies geschieht im geschlossenen Teil der Anlage. Aus der Analyse der Wässer und Ausfällungen sind die erforderlichen Maßnahmen zu treffen, die gegenüber den zuständigen Behörden anzuzeigen sind. Das Vorkommen der radioaktiven Stoffe ist prozessbedingt und ist mit industriellen und bergbaulichen Anlagen vergleichbar.

Der Umgang mit radioaktiv verunreinigten Schlämmen und Ablagerungen ist im Strahlenschutzrecht geregelt. Abhängig von den

Bedingungen vor Ort sind erforderlichenfalls dauerhafte Schutzmaßnahmen zu treffen, um Mensch und Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung zu schützen. Zu betrachten sind hierbei die prozessbedingt anfallenden radioaktiven Stoffe, die überwacht, gelagert oder zu beseitigen sind.

Bei der Ermittlung der Strahlenexposition von Personen sind jeweils realistische Expositionspfade (Ausbreitungswege) und -annahmen zu Grunde zu legen. Sofern erforderlich werden vom Verantwortlichen Strahlenschutzmaßnahmen zur Dosisminimierung und gezielte Überwachungsmaßnahmen durchgeführt. Die arbeitsschutzrechtlichen Regelungen zu radioaktiven Stoffen werden überwacht und erforderlichenfalls Maßnahmen angeordnet.

► **Frage: Welche Mengen an radioaktiven Stoffen fallen an, um welche Stoffe handelt es sich und gibt es Unterschiede bei den Standorten?**

Ob und in welchem Umfang radioaktive Stoffe im übertägigen, geschlossenen Teil der Geothermie-Anlage entstehen, hängt von standortspezifischen Faktoren ab.

Generell können natürliche radioaktive Stoffe in Abhängigkeit der hydrogeologischen Ge-

gebenheiten durch Wasser-Gesteinswechselwirkungen im Untergrund freigesetzt und im Thermalwasser mittransportiert werden. Hierbei wirken sich hohe Temperaturen, sowie ein hoher Salzgehalt des Thermalwassers begünstigend für die Mobilität der radioaktiven Stoffe aus.

Kommt es bei der geothermischen Nutzung dieser Thermalwässer zur Änderung thermodynamischer Parameter (Temperatur, Druck), kann dies in einigen Komponenten des über-tägigen Anlagensystems zur Bildung von radioaktiven Ablagerungen führen. Hierbei werden vor allem Mischkristalle von Baryt (BaSO₄) und Coelestin (SrSO₄) beobachtet, die aufgrund des chemisch ähnlichen Verhaltens von Radium zu Barium (Strontium) zum Einbau der instabilen Radium-Isotope neigen. Darüber hinaus können an einigen Standorten

► **Frage: Was ist bei der Entsorgung natürlicher radioaktiver Stoffe zu beachten?**

Die Entsorgung von radioaktiven Stoffen unterscheidet sich bei der Tiefen Geothermie nicht von anderen Nutzungsbereichen. Insofern ist die Entsorgung natürlicher radioaktiver Stoffe hier allgemein beschrieben. Inwiefern bei der Tiefen Geothermie Maßnahmen erforderlich sind, hängt von den jeweiligen Örtlichkeiten und der Anlagentechnik ab.

Der Umgang mit radioaktiven Stoffen ist in Deutschland durch das Strahlenschutzgesetz und die Strahlenschutzverordnung geregelt. Im neuen Strahlenschutzgesetz und in der neuen Strahlenschutzverordnung sind für die Entstehung prozessbedingter natürlicher radioaktiver Stoffe, sogenannte „Rückstände“, gezielte Regelungen für die Überwachung, Verwertung und Entlassung aus dem strahlenschutzrechtlichen Regime geschaffen worden. Für die Beurteilung, ob Rückstände in der Überwachung verbleiben, verwertet oder beseitigt werden können, sind sogenannte „Überwachungsgrenzen“ eingeführt worden.

► **Frage: Wie lange erfolgt die Überwachung (Monitoring)? Erfolgt sie bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Rückbaus? Welche Parameter/Sachverhalte werden beobachtet (Grundwasser-, radiochemisches Monitoring (Wasser, Feststoffe))?**

Eine umfassende Thermalwasseranalytik liefert wertvolle Daten vor und während des laufenden Betriebs geothermischer Anlagen. Entscheidend für die langanhaltende Betriebs-

auch Ablagerungen von Bleisulfid (PbS) beobachtet werden, die neben den stabilen Isotopen des natürlich vorkommenden Bleis (Pb) auch das radioaktive Pb-210 enthalten.

Die Bildung von Ablagerungen, sogenannter Scales, ist bereits aus der Erdgas- und Erdöl-industrie bekannt und kann durch den Einsatz geeigneter Inhibitoren (Hemmstoffe) reduziert und teilweise vollständig vermieden werden.

Zur Minimierung der effektiven Dosis pro Kalenderjahr ist für Einzelpersonen der Bevölkerung der Richtwert von 1 Millisievert (Maßeinheit einer Strahlendosis) im Kalenderjahr einzuhalten. Für die Beurteilung, Messung und Festlegung der Überwachungsgrenzen ist vorgesehen, eine fachkundige Person einzubinden. Weiterhin ist geregelt, dass angefallene Rückstände nicht vermischt oder verdünnt werden dürfen, um die Überwachungsgrenzen zu unterschreiten. Die Lagerung von Rückständen ist bei der zuständigen Behörde anzumelden. Eine Entlassung aus der Überwachung ist bei der Behörde anzuzeigen (ggf. ist ein Rückstandskonzept vorzulegen).

Eine geplante Verwertung oder Beseitigung der Rückstände muss entsprechend des Strahlenschutz- und Abfallrechts erfolgen. In Baden-Württemberg ist das Regierungspräsidium Freiburg für die Überwachung von Rückständen nach dem Strahlenschutzrecht zuständig.

fähigkeit ist eine nachhaltige Bewirtschaftung des geothermischen Aquifers. Dafür sind sowohl die Bestimmung des Ausgangszustands direkt nach der Aquifererschließung als auch

ein kontinuierliches und standortspezifisches Monitoring im laufenden Betrieb mindestens bis zum Rückbau notwendig.

Während der Betriebsphase sind die Wasserzusammensetzung, ebenso wie manche physikalischen Parameter, wie beispielsweise Förderrate und Temperatur, keine konstanten Parameter und bedürfen dauernder Beobachtung. Außerdem können Maßnahmen hinsichtlich der Überwachung von Ringraumabdichtung, Leckage, Korrosion, Ausfällungen (Scales) und anfallende Radioaktivität notwendig sein. Das Monitoringkonzept muss daher physikalische, chemische sowie isotopechemi-

sche Untersuchungen von Flüssigkeiten, Gasen und Feststoffen umfassen.

Neben der Analyse von Wasser- und Feststoffproben, umfassen radiochemische Monitoringsysteme zusätzlich die regelmäßige Messung der lokalen Ortsdosisleistung (ODL) des ober-tägigen Anlagensystems. Dieser ganzheitliche Monitoringansatz dient zum einen der Sicherstellung des Arbeiterschutzes und der Anlagensicherheit. Zum anderen können (sofern nötig) Schritte zur vorschriftsmäßigen Entsorgung radioaktiver Abfälle eingeleitet werden.



Thermalwasserstollen Baden-Baden © Stober

4

Hebung und Senkung der Erdoberfläche

Zusammenfassung

- Hebungen und Senkungen der Erdoberfläche sind weit verbreitet. Neben z.B. Bergbauaktivitäten und Baumaßnahmen, gibt es natürliche Prozesse wie z.B. Gezeiten (auch auf dem Festland) und den Einfluss von beispielsweise jahreszeitlich bedingten Grundwasserspiegelschwankungen, die sich auf die Erdoberfläche auswirken.
- Wird – wie in Baden-Württemberg üblich – die Tiefe Geothermie in einem geschlossenen Kreislauf geführt, kann es an der Oberfläche nur zu sehr geringen Auswirkungen kommen. Diese sind in der Regel nicht an der Oberfläche sichtbar (selbst mit modernen, sehr hoch auflösenden Verfahren kaum messbar).
- Natürliche Prozesse wie Schwankungen des Grundwasserspiegels (Sommer, Winter, Dürreperioden) führen zu wesentlich stärkerer Beeinflussung der Erdoberfläche. Der Betrag durch die Tiefe Geothermie kann im Vergleich dazu vernachlässigt werden. Schäden, wie sie in der Vergangenheit bei der Oberflächen-nahen Geothermie (z.B. Erdwärmesonden in Staufen) vereinzelt auftraten oder regelmäßig durch den Steinkohlebergbau auftraten, können bei sachgemäßer Umsetzung der hydrothermalen Tiefen Geothermie vermieden werden.

Einleitung

Entnahme von Stoffen aus der Tiefe führen generell zu Senkungen. Dies ist bekannt aus dem Bergbau (z.B. Ruhrgebiet) sowie bei der Öl- und Gasförderung (z.B. Gasfelder wie Groningen oder die Altmark). Hebungen und Senkungen können z.B. über Satellitenmessungen auch flächenmäßig erfasst werden und sind z.B. im Internet über den „Bodenbewegungsdienst Deutschland“ (<https://bodenbewegungsdienst.bgr.de/>) für jedermann zugänglich.

Hebungen sind bekannt, wenn es zu einem Wasserzutritt zu quellfähigen Mineralen (Anhydrit, Tonminerale) in geringer Tiefe kommt. Beispiele sind aus der Oberflächennahen Geothermie in Staufen oder von Straßen- und Bahntrassen durch den Gipskeuper in Baden-Württemberg bekannt. An dieser Stelle wird auf die Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS) hingewiesen, die vom UM 2011 (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg) verbindend zur Vermeidung weiterer Schadensfälle in der Oberflächennahen Geothermie eingeführt wurden. Bei der Oberflächennahen

Geothermie handelt es sich um eine völlig andere Technologie als bei der hier beschriebenen Tiefen Geothermie.

Ob es zu Schäden kommt, hängt insbesondere vom Verhältnis der Hebung bzw. Senkung zur horizontalen Ausdehnung (Fläche) an der Oberfläche ab. Hebungen und Senkungen der Erdoberfläche sind nichts Ungewöhnliches. Allein die Erdgezeiten lassen Baden-Württemberg jeden Tag um ca. 30 cm in der Höhe variieren, was nicht verspürt wird und auch nicht zu Schäden an Gebäuden führt (starke Vertikalbewegung, große Fläche).

Durch Gesteinslösung (Karsterscheinungen) kommt es in der Natur zu lokalen Erdfällen in Verkarstungsregionen. Dieses natürliche Phänomen ist gut untersucht. Die Zirkulation von Thermalwässern bei der Tiefen Geothermie führt dagegen nicht zu lokalen Erdfällen oder Schäden an der Erdoberfläche.

Großräumige, geringfügige Hebungen und Senkungen (über 10er km Ausdehnung an der Erdoberfläche) haben keine Schadenswirkun-

| | Hebung/Senkung | Zeitraum | Referenz |
|--|--|------------------------------|---|
| Oberflächennahe Geothermie in Staufen | Hebung: ca. 0,6 m | Februar 2008 bis Januar 2020 | LGRB 1. Sachstandsbericht zum Schadensfall Staufen 2010 |
| Wasserhaltung Bergbau im Ruhrgebiet | Senkung: max. ca. 24 m flächendeckend ca. 10 m | ca. 100 Jahre | Harnischmacher & Zepp (2010) |
| Erdgasfeld Groningen Niederlande | Senkung: 0,35-0,40 m | 35 Jahre | Van Thienen-Visser (2015) |
| Grundwasserentnahme zur Bewässerung Iran | Senkung: 11,65 m | 36 cm/Jahr | Mahmoudpour et al. (2013) |

Tabelle 4.1: Beispiele für Hebung und Senkung der Tagesoberfläche aufgrund von Eingriffen in den Untergrund. Von Anlagen der Tiefen Geothermie sind keine derartigen Hebungen und Senkungen bekannt.

Kluftporosität



Matrixporosität

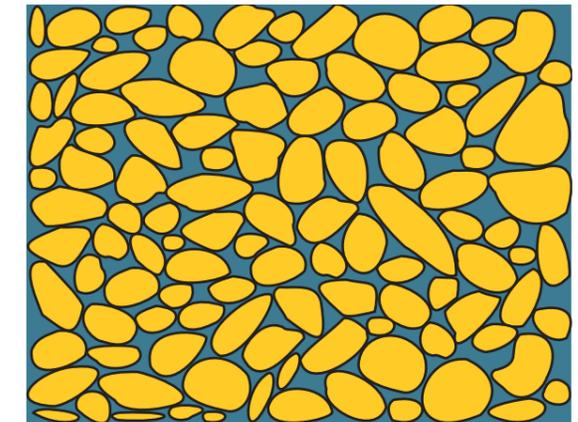


Abbildung 4.1: Beispiele von und Kluft- (links) und Matrixporosität (rechts) in potenziellen Aquifer-Gesteinen schematisch (oben) und in Gesteinsbeispielen (unten).

gen auf Gebäude. Bei lokal stark variierenden Vertikalbewegungen (z.B. Setzung über unterschiedlichem Baugrund) entstehen dagegen Schäden an Gebäuden.

Im Gegensatz zum Bergbau, bei dem Feststoffe entnommen werden und weitverzweigte Stollen erzeugt werden, stammen Gase oder Flüssigkeiten bei der Erdöl-, Erdgas-Förderung und Geothermie aus Hohlräumen (Poren, Klüfte) des Gesteins (Abbildung 4.1). Für die Berechnung von Bodensenkungen durch Entnahme von Stoffen aus dem Untergrund gibt es erprobte analytische und numerische Verfahren.

Die Erfahrung in Baden-Württemberg mit Tiefer Geothermie zeigt, dass selbst nach jahrzehntelanger Entnahme von Wasser bei Thermalbäderbohrungen (z.B. Bad Krozingen, Stuttgart) keine Setzungsschäden an der Oberfläche aufgetreten sind (Abbildung 4.2).

Bei geothermischen Dubletten wird das Wasser zirkuliert und in den Entnahmehorizont zurückgeführt. Aufgrund der Zirkulation werden nur geringe Feststoffmengen aus dem Untergrund entnommen (Abschnitt 3). Durch das Abkühlen des Wassers kommt es zu einer geringfügigen Volumenreduktion. Diese Volumenreduktion ist jedoch so gering, dass es zu keinen beobachteten Senkungen oder gar Schäden an der Erdoberfläche kam.

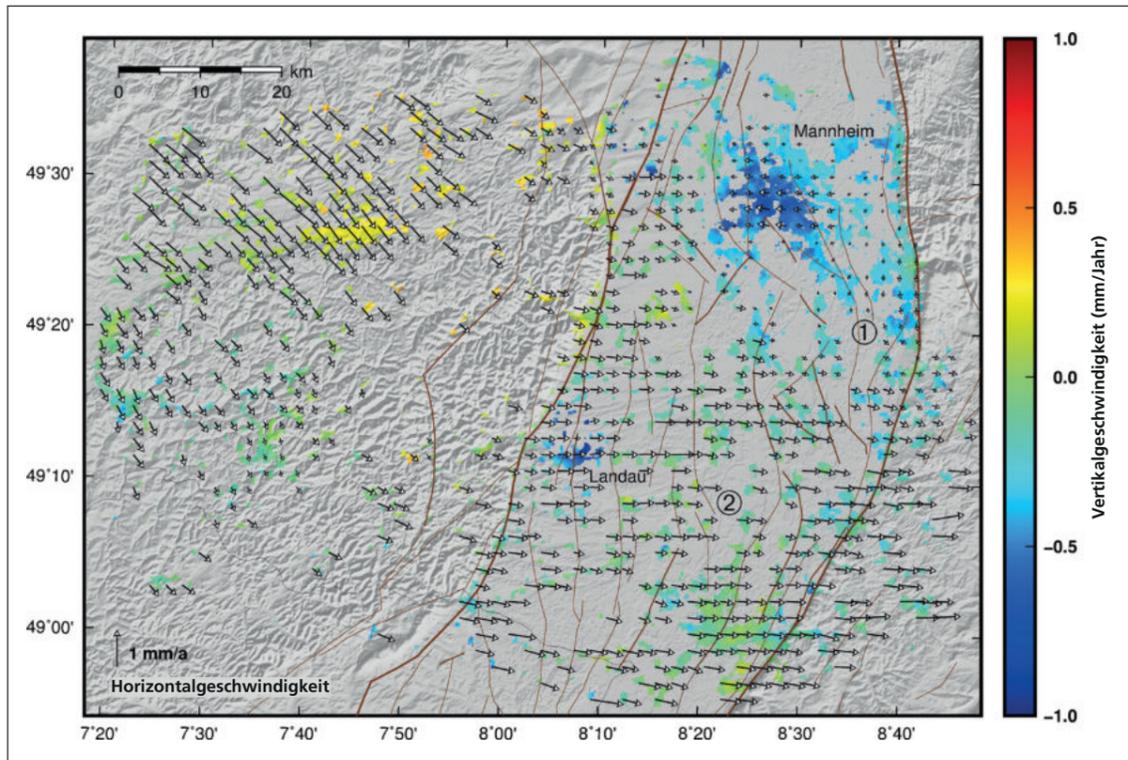


Abbildung 4.2: Bewegung an der Erdoberfläche (oben). Die Pfeile zeigen horizontale Bewegungen an, die Farben die Vertikalbewegungen (Fuhrmann et al. 2015). Blau bedeutet Absenkung und Rot bedeutet Anhebung. Zu erkennen ist eine Absenkung um Landau (vermutlich durch die Entnahme von Erdöl) und Mannheim (vermutlich durch große Wasserentnahmen). Derartige weiträumige geringe Hebungen oder Senkungen sind jedoch für Gebäude unproblematisch.

► **Frage:** Kann es durch große Wasserentnahmen zur Entstehung von Hohlräumen in der Tiefe kommen? Können diese Stellen unter dem Druck des Deckgebirges einstürzen? Wie wird sichergestellt, dass es nicht zu Landabsenkungen wie z.B. beim Kohlebergbau oder bei der Gasförderung kommt?

Bei hydrothormaler Geothermie über Einleitungs- und Förderbohrungen ist die Volumenänderung im Untergrund so gering, dass es zu keinen Schäden an der Oberfläche kommt, zumal das entnommene Wasser wieder in den Untergrund rückgeführt wird. Hohlräume entstehen durch Lösungsvorgänge insbesondere im oberflächennahen Karstgestein (Abschnitt 3). Im bohrlochnahen Bereich kann durch Auflösungen in sehr geringem Umfang im Bereich der Injektionsbohrung zusätzlicher Hohlraum

geschaffen werden. Die Erfahrungen bestätigen die Berechnungen, dass dadurch keine Schäden an der Oberfläche zu erwarten sind.

Wichtig ist, dass das abgekühlte Wasser zurück in den Entnahmehorizont verbracht wird, eine hydraulische Verbindung zwischen Wasser-Rückführbohrung und Förderbohrung im Untergrund ist dafür erforderlich. So können Schäden wie im Kohlebergbau oder bei der Erdöl- und Gasförderung vermieden werden.

► **Frage:** Das geförderte Thermalwasser enthält oft sehr hohe Gesamtlösungsinhalte. Diese „Inhaltsstoffe“ werden teilweise dem Thermalwasser durch die Ausfällungen entzogen und fehlen daher nach der Reinjektion im Untergrund. Dadurch ergibt sich eine Mindermenge an rückgeführten Feststoffen. Welche Auswirkungen hat das?

Aufgrund der Erfahrung bei bestehenden Geothermieanlagen im Rheingraben belüftet sich die jährlich anfallende Feststoffmenge (Ausfällungen, kleine Gesteinsfragmente) in den Filtern und anderen technischen Komponenten der Kraftwerke auf deutlich weniger als 1 m³ pro Anlage und pro Jahr (Abschnitt 3). Damit ergeben sich keine größeren Volumendefizite und Hohlräumbildungen.

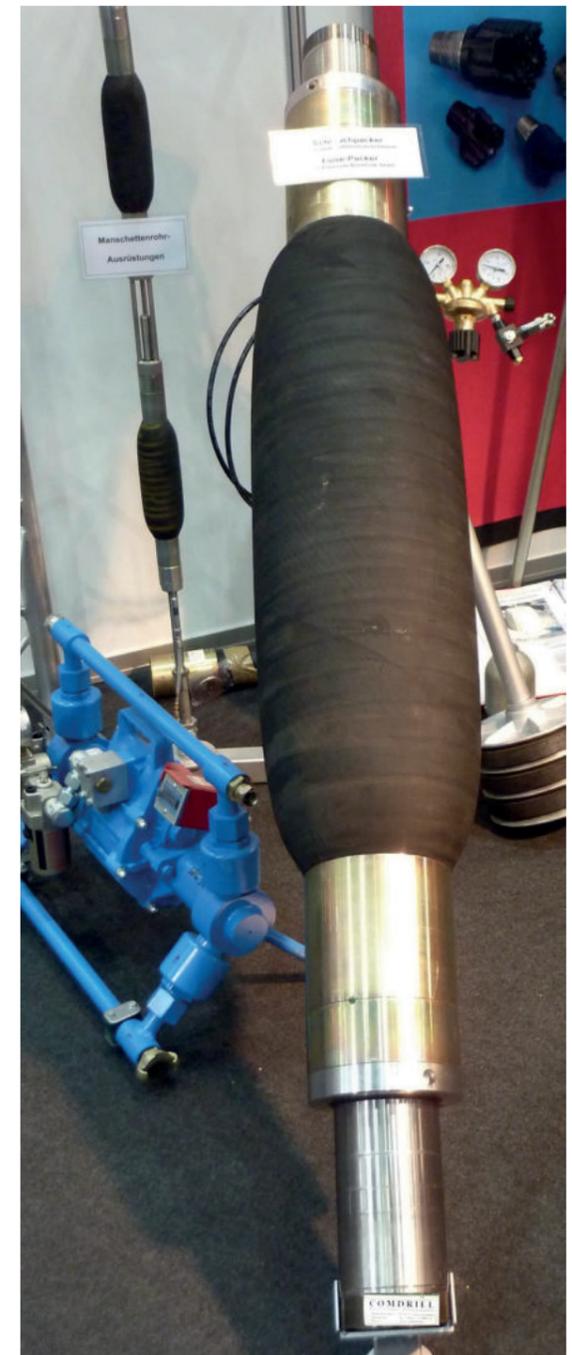
Die Feststoffe müssen ordnungsgemäß entsorgt werden. Dazu gibt es rechtliche Vorgaben (Abschnitt 3).

► **Frage:** Können Gesteinsschichten durch die Thermalwasserzirkulation porös werden bzw. sich in ihrer Konsistenz und hinsichtlich Stabilität verändern?

Veränderungen in Gesteinen durch Thermalwasserzirkulation können im Wesentlichen nur in der unmittelbaren Bohrlochumgebung auftreten. Die chemische Zusammensetzung im Untergrund wird durch die geothermische Zirkulation nicht wesentlich verändert. Es gibt jahrzehntelange Erfahrung durch Thermalwasserbohrungen und auch durch viele Erdöl- und Erdgasbohrungen im Oberrheingraben, die erwartungsgemäß keine Probleme durch solche Prozesse zeigen. Dasselbe gilt für Geothermieanlagen.

► **Frage:** Können bei Tiefer Geothermie Hebungen durch quellfähiges Gestein wie z.B. Anhydrit auftreten?

Anhydrit kann sich bei Wasserzufluss in Gips umwandeln, was mit einer starken Volumenzunahme verbunden ist. Die Tiefenlage des



Packer Tiefbohrungen © Stober

Anhydrits ist dabei entscheidend. Wird bei einer Tiefbohrung Anhydrit in großen Tiefen (> 400m) angetroffen, reicht der Quelldruck des

Gesteins nicht aus, um Hebungen auszulösen, da die Auflast zu groß ist. Dasselbe Prinzip gilt auch für andere quellfähige Substanzen wie Tonminerale. Bei den hohen Temperaturen, wie sie in Tiefbohrungen in größeren Tiefen angetroffen werden, ist außerdem Anhydrit stabil und wandelt sich nicht in Gips um.

Das Durchbohren quellfähiger Schichten (Anhydrit, Tonminerale) wird bei der Bohrplanung

► **Frage: Heißes Wasser wird entnommen, kaltes Wasser wird zurückgeführt. Wie wirken sich die Temperaturunterschiede auf die Gesteins- und Erdschichten im Untergrund aus?**

Im Untergrund kann es durch Abkühlung zu einer Kontraktion des Gesteins im Nahbereich der Wasser-Rückführbohrung kommen. Aufgrund der geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Gesteins ist der Kontraktionseffekt in der hydrothermalen Geothermie sehr gering.

Temperaturänderungen im Untergrund können grundsätzlich zu Spannungsänderungen führen und zur Auslösung von nicht spürbaren

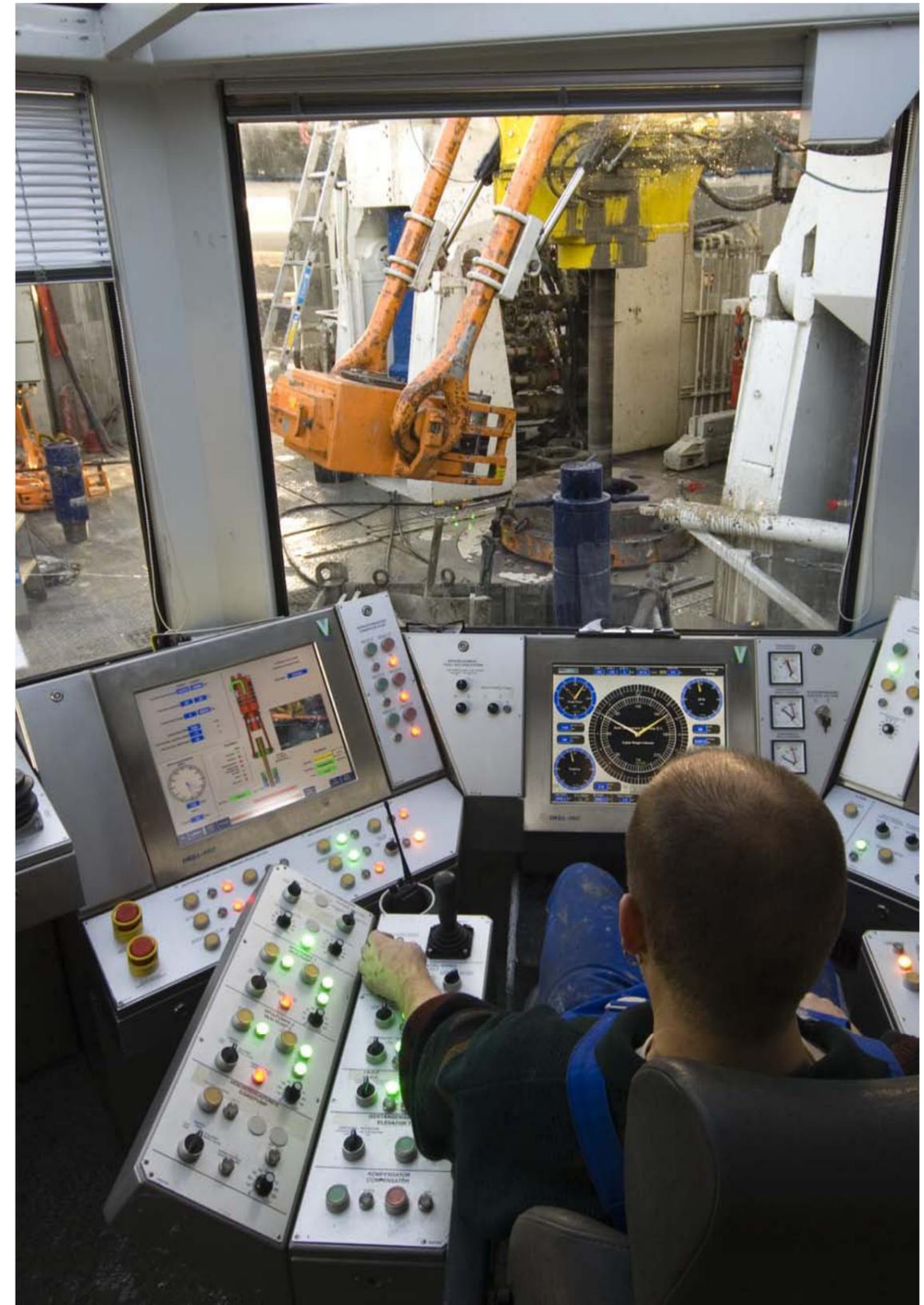
vermieden. Ist ein Durchteufen quellfähiger Schichten notwendig, werden erprobte bohrtechnische Lösungen genutzt, um ein unbeabsichtigtes Quellen zu vermeiden. Dazu gehören rasches Durchteufen und Abdichten der Bohrung, um Zutritt von Wasser in diese Schichten zu vermeiden, sowie die Nutzung einer speziellen Bohrspülung für diesen Bohrabschnitt, die das Quellen hemmt (inhibierende Bohrspülung).

Beben beitragen (Abschnitt 6). Mit modernen numerischen Modellrechnungen können die Auswirkungen der Temperaturänderungen vorab prognostiziert werden.

Durch die Eingabe von abgekühltem Wasser in den Aquifer kann sich die Durchlässigkeit im Nahbereich um die Einleitungsbohrung verändern. Auch dieser Sachverhalt lässt sich bereits im Vorfeld mit numerischen Verfahren feststellen.



Buntsandstein Hauptkonglomerat © Stober



Steuerpult Tiefbohranlage © Herrenknecht AG



Tiefbohranlage © Stober

5

Beeinflussung des Wasserdrucks im Untergrund aufgrund von Geothermie-Bohrungen

Zusammenfassung

- Die Beeinflussung des Wasserdrucks im Untergrund muss bei der Planung und Umsetzung von Geothermievorhaben intensiv beachtet werden (hydraulischen Bedingungen). Deshalb nimmt dieser Punkt in den Genehmigungsverfahren einen sehr großen Stellenwert ein.
- Fehler in der Planung können zum Einstellen der Vorhaben führen.

Einleitung

Durch Druckerhöhungen insbesondere durch das Einleiten von Wasser kann Gestein aufbrechen. Der dafür notwendige Druck wird in diesem FAQ zur leichteren Verständlichkeit als Zerbrechungsdruck bezeichnet (abgeleitet aus dem englischen Fachausdruck „Fracture Pressure“, in der Fachliteratur wird nicht von Zerbrechungsdruck gesprochen). Beim Bohren oder Betrieb einer tiefen Geothermianlage muss sichergestellt werden, dass der Zerbrechungsdruck nicht überschritten wird und dadurch auch keine spürbare Seismizität erzeugt wird. Dazu gibt es standardisierte Verfahren und Vorgehensweisen, die geomechanisch untersucht und hundertausendfach in der Bohrtechnik erprobt sind.

Beim Bohrvorgang wird mit Bohrspülung gearbeitet. In der Tiefengeothermie werden in der Regel Bohrspülungen auf Wasserbasis eingesetzt. Diese haben u.a. die Aufgabe das Bohrloch zu stabilisieren und das Bohrklein (das durch den Bohrvorgang fein gemahlene Material) an die Oberfläche zu transportieren. Daher muss auch der Druck in der Bohrspülung betrachtet werden.

Beim Betrieb der tiefen Geothermianlage wird an der Förderbohrung der Druck durch die Entnahme von Wasser lokal abgesenkt und

► Frage: Mit welchen Drücken darf in einem thermalen Aquifer gearbeitet werden?

Der Zerbrechungsdruck (Höhe des Drucks, der zum Zerschneiden von Gestein führt) muss vor Beginn eines Testbetriebs z.B. durch Tests bestimmt werden bzw. bekannt sein. Der Druck in einem Aquifer muss im Testbetrieb und im späteren Dauerbetrieb unterhalb des Zerbrechungsdrucks insbesondere der überlagernden und unterlagernden Gesteine liegen.

Dauerbetrieb bedeutet ständige Entnahme aus und Rückleitung von Thermalwasser in den Aquifer. Der Druck in der Bohrung beim

bei der Wasser-Rückführungsbohrung durch das Hinzufügen von Wasser lokal erhöht. Zwischen den Bohrungen ist der Druck ausgeglichen. Bei zu hohem Einleitungsdruck (Wasser-Rückführungsdruck) kann es insbesondere im Umfeld der Wiedereinleitungs-Bohrung zum Überschreiten des Zerbrechungsdrucks kommen. Dies muss bei der Auslegung der Anlage berücksichtigt werden. Außerdem muss nachgewiesen werden, wie eine spürbare Seismizität vermieden wird. Im Betrieb der Anlage muss dazu die Druckentwicklung beobachtet werden, damit unkontrollierte Bedingungen vermieden werden können.

Bei gut durchlässigen Gesteinen ist die Druckerhöhung bzw. die Druckabsenkung gering und weniger problematisch als in weniger durchlässigen Gesteinen (z.B. i.d.R. im Grundgebirge), wo bei gleicher Zirkulationsrate höhere Drücke zur Aufrechterhaltung einer Zirkulation benötigt werden. Je nach vorliegendem Spannungszustand größerer Störungszonen kann dadurch eine erhöhte Seismizität auftreten. Aus diesem Grund wird derzeit in Baden-Württemberg vermieden, Geothermiebohrungen bis nahe an die Grenze zum meist weniger durchlässigen kristallinen Grundgebirge oder in das Grundgebirge hinein abzuteufen.

Einleiten des Wassers muss dabei kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet werden. Die Druckverhältnisse in einem Aquifer nähern sich dabei einem Gleichgewicht an. Dadurch wird sichergestellt, dass der Zerbrechungsdruck für den spezifischen Aquifer nicht überschritten wird. So wird ein Aufbrechen des Gebirges vermieden. Damit keine größeren Brüche entstehen (spürbare Seismizität), wird zusätzlich ein seismisches Monitoring genutzt und ggf. der Druck im Aquifer reduziert oder die Anlage abgeschaltet.

Kurzzeitige, für die Entwicklung eines spürbaren Bebens unkritische Druckerhöhungen können gezielt genutzt werden, zum Beispiel zur Freispülung von Klüften oder zur Messung des Spannungszustands in der bohrungsnahen Umgebung.

Hierzu gibt es ein umfangreiches Wissen und Erfahrung aus Hunderttausenden von Förderbohrungen und dem erfolgreichen Betrieb einer Vielzahl von Untertagespeichern.

► Frage: Wovon hängt der Druck des wiedereingeleiteten Wassers ab?

Der Druck des wiedereingeleiteten Wassers hängt von den Aquifereigenschaften, der Menge des wiedereingeleiteten Wassers pro Zeit (Wasser-Rückführungsrate) und der Bohrung ab. Die hierfür wesentliche Eigenschaft des Aquifers ist seine Durchlässigkeit. Die Durchlässigkeit (Permeabilität) eines Aquifers beruht hauptsächlich auf der Poren-/Kluftgröße und der Verbindung der Poren/Klüfte untereinander.

Darüber hinaus besteht eine Abhängigkeit des Drucks vom Bohrl Lochdurchmesser, der Länge der Bohrung im Reservoir, der Temperatur des eingebrachten Wassers und der Durchlässigkeit in der Bohrlochumgebung. Der Druck des wiedereingeleiteten Wassers breitet sich von der Einleitungsbohrung mehr oder weniger radial im Aquifer aus und nimmt nach der Seite stark ab.

Der Druck im Aquifer ist an die Förderrate (die auch der Menge des wiedereingeleiteten Wassers pro Zeit entspricht) gekoppelt. Die maximale Wasser-Rückführungsrate (bzw. der maximale Injektionsdruck) wird durch einen hydraulischen Test vor Inbetriebnahme der Geothermianlage ermittelt, um das Auslösen einer spürbaren Seismizität zu vermeiden (Abschnitt 6).



Richtbohrmeißel © Stober

► **Frage: Was bedeutet eine Druckbeaufschlagung bei der Wasser-Rückführung für die Druckverhältnisse im genutzten Aquifer?**

Der zusätzliche Druck nimmt vom Bohrloch in den Aquifer hinein rasch ab (exponentiell). Dabei spielt die Durchlässigkeit des Gesteins

und das Porenvolumen ebenso eine Rolle wie die hydraulische Verbindung im Aquifer zwischen Injektions- und Förderbohrung.

► **Frage: Beim Bohrvorgang können Bohrspülungsverluste auftreten. Welche Verlustmengen können auftreten?**

Beim Bohrvorgang kann es zu kurzfristigen Bohrspülungsverlusten aber auch zu Zuflüssen von Grundwasser kommen. Dauerhafte Bohrspülungsverluste und Zuflüsse müssen vermieden werden. Zuflüsse und Bohrspülungsverluste werden über die elektronisch überwachten Tankstände der Bohranlage erkannt und ausgeglichen. Bohrspülungsverluste in Aquifere mit sehr geringen Durchlässigkeiten sind in der Regel sehr gering und liegen im Bereich von wenigen Litern pro Minute. Bei geringen Bohrspülungsverlusten versiegelt der Bohrschlamm die Bohrlochwand als Membran (Filterkuchen) und lässt nur Feinmaterial und Flüssigkeiten in das umgebende Gebirge eindringen. Größere Bestandteile werden zurückgehalten, so dass der Bohrschlamm die Bohrlochwand versiegelt und die Bohrspülungsverluste letztendlich gegen Null gehen.

Im sehr stark geklüfteten oder verkarsteten Gebirge können auch höhere Bohrspülungsverluste auftreten. Befindet sich diese Zone nicht im Reservoirbereich, ist es erforderlich, schnellstmöglich chemisch neutrales Verstopfungsmaterial einzuzirkulieren und/oder wenn nötig noch grobe, umwelt-neutrale Partikel (wie Nußschalen, Muschelschalen, Gesteinsfragmente, Textilfasern oder Zellulose) zuzufügen. Diese Materialien reduzieren die offenen Durchlässe soweit, dass sich wieder ein „Filterkuchen“ aus der Bohrspülung aufbauen kann. So kann der Bohrspülungsverlust gestoppt werden. Falls hohe Bohrspülungsverluste im Reservoirbereich auftreten, sind sie ein Zeichen für eine gute Ergiebigkeit des Thermalwasser führenden Aquifers.

► **Frage: Was muss getan werden, wenn die Bohrspülungsverluste nicht dauerhaft gestoppt werden können?**

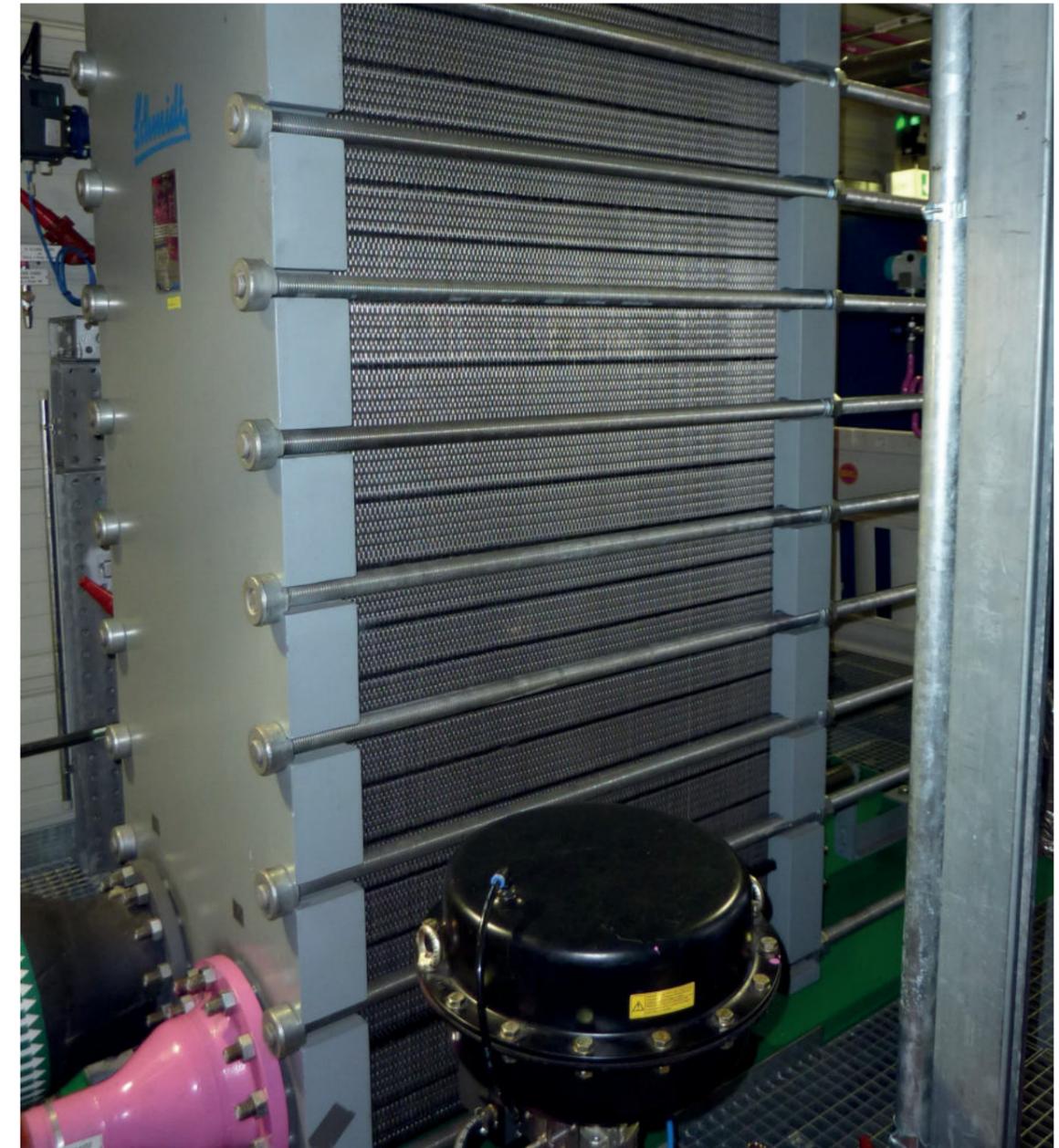
Können Bohrspülungsverluste außerhalb des vorgesehenen Nutzhorizontes trotz Einsatz von Verstopfungsmaterial nicht eingedämmt werden, ist eine Fortsetzung des Bohrvorgangs nicht mehr möglich, da dann z.B. die Bohrlochstabilität und die Förderung des Bohrkleins nicht mehr gewährleistet werden können. In diesem Fall wird die „Verlustzone“ zuzementiert und die zementierte Strecke

später erneut durchbohrt. In extremen Fällen kann es auch notwendig werden, die Bohrung teilweise oder vollständig zu verfüllen (Rückverfüllung). Unter Umständen erfolgt eine Rückzementation mit anschließender Ablenkung des Bohrpfads (sidetrack), um die Problemzone zu umgehen. Voraussetzung ist jedoch, dass das Bohrziel technisch noch erreicht werden kann.

► **Frage: Können Bohrspülungsverluste zu seismischen Ereignissen führen?**

Eine signifikante Druckerhöhung durch Spülungsverluste auf offenen Kluftsystemen kann zu einer Aktivierung einer durch tektonischen Druck vorgespannten Störungsfläche führen. Damit kann das Auftreten seismischer Ereignisse nicht gänzlich ausgeschlossen werden (Abschnitt 6).

Allerdings sind hohe Bohrspülungsverluste aufgrund der hohen Durchlässigkeit des Gesteins nur mit geringer Druckerhöhung verbunden, so dass das seismische Risiko sehr gering ist.



Plattenwärmetauscher © Stober



6

Seismizität

Zusammenfassung

- Erdbeben entstehen, wenn sich Spannungen an geologischen Störungen (Abbildung 6.1) im Untergrund soweit aufbauen, dass sie sich ruckartig lösen. Das ist in seismisch aktiven Regionen ein natürlicher Prozess. Eingriffe in die Spannungsverteilung in der Erde, z.B. durch das Einbringen von Flüssigkeiten unter Druck, können diese Prozesse aber beschleunigen und kleine Erdbeben auslösen (sog. Induzierte Seismizität).
- Ziel der zugelassenen Bohrvorhaben in Baden-Württemberg ist es, die Anlagen so auszulegen und zu betreiben, dass – sollten seismische Ereignisse ausgelöst werden – die Bodenschwinggeschwindigkeiten unterhalb der festgelegten Grenzwerte (der DIN4150-3) liegen, so dass schadensrelevante seismische Ereignisse verhindert werden.
- Treten infolge der Aufsuchung oder Gewinnung der Erdwärme im Rahmen eines Tiefen Geothermieprojekts dennoch Schäden auf, ist für den entstandenen Schaden Ersatz zu leisten.
- Entsteht im Einwirkungsbereich einer Tiefen Geothermiebohrung durch Erschütterungen ein Schaden, der nach seiner Art ein Bergschaden sein kann, wird vermutet, dass der Schaden durch diesen Betrieb verursacht worden ist; das gilt nicht, wenn eindeutig festgestellt werden kann, dass die den Schaden verursachende Erschütterung natürlichen Ursprungs ist (Bergschadensvermutung).

Einleitung

Erdbeben entstehen, wenn sich Spannungen an natürlich vorkommenden geologischen Störungszonen (Abbildung 6.1) im Untergrund soweit aufbauen, dass sie sich ruckartig lösen. Auch die langsamen natürlichen tektonischen Deformationen führen dazu, dass im Spannungsfeld „günstig“ liegende Störungen über lange Zeiten nahe an den „Bruchzustand“ gebracht werden und sich schließlich ruckartig versetzen (natürliche Beben). Dabei werden die Gesteine über die Störung versetzt und in Folge können Bodenerschütterungen gemessen und/oder wahrgenommen werden. Erdbe-

benaktivität (Seismizität), die durch menschliche Eingriffe verursacht wird, bezeichnet man als induzierte (manchmal auch als getriggerte) Seismizität, im Gegensatz zur natürlich auftretenden Seismizität. Wir benutzen im folgenden Text ausschließlich den Begriff „induzierte Seismizität“. Die meisten induzierten Beben können nur instrumentell erfasst werden, d.h. sie werden von Menschen nicht verspürt. Stärkere induzierte Seismizität tritt eher in tektonisch aktiven Gebieten auf, die bereits natürliche Seismizität zeigen (Plenefisch et al. 2015).

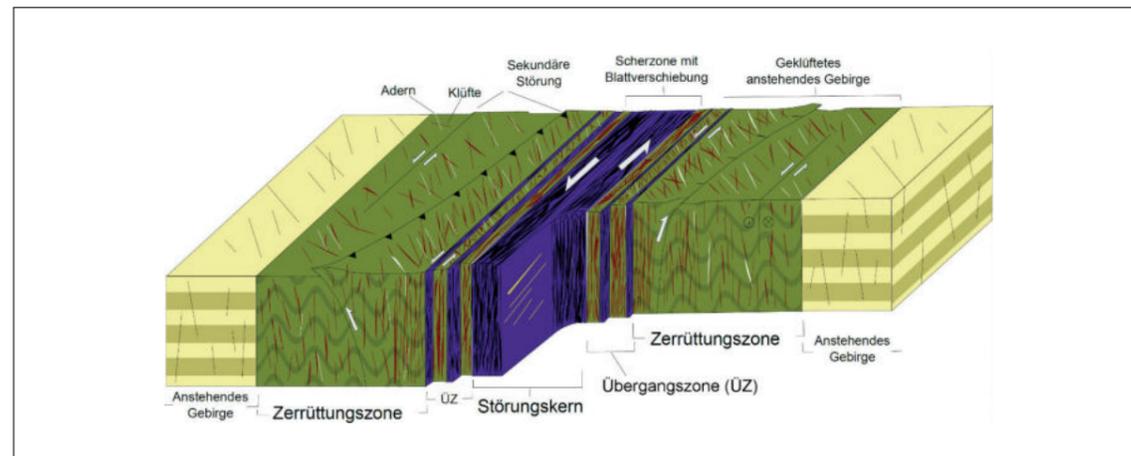


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung einer Störungszone (angelehnt an Agemar et al. 2017, und Choi et al. 2016). Die Zerrüttungszone weist hier die höchste Durchlässigkeit auf, während der Störungskern hier sehr gering durchlässig ist, geringer als das anstehende Gebirge.

Zur Beschreibung eines Erdbebens werden drei Größen verwendet: Magnitude, Intensität und Bodenschwinggeschwindigkeit:

- Die Stärke der Erdbeben (Energiefreisetzung) am Ort ihrer Entstehung, d.h. im tiefen Untergrund, wird mit der Magnitude ausgedrückt. Die Energiefreisetzung eines Magnitude 5 Bebens ist dabei 1000 mal so groß wie bei einem Beben der Magnitude 3.
- Die Auswirkungen der Energiefreisetzung im Untergrund auf die Erdoberfläche beschreibt man mit zwei Größen, der Intensität und der Bodenschwinggeschwindigkeit.
 - Die Intensität beschreibt die Spürbarkeit und Schäden, wie sie gefühlsmäßig und visuell wahrgenommen werden (Risse an Häusern, heruntergefallene Schornsteine etc.). Die Intensitäten in der Region des Bebens werden durch Befragungen und Besichtigungen nach dem Beben bestimmt, also rein durch Beobachtung (empirisch).
 - Die Messung von Bodenschwinggeschwindigkeiten erfordert den Betrieb von Instru-

menten während des Bebens. Die Art der Messungen und Grenzwerte für Bodenschwinggeschwindigkeiten sind in Regelwerken und regionalen technischen Baubestimmungen festgelegt (z.B. DIN 4150).

Mit größerer Entfernung vom Bebenherd nehmen die Auswirkungen auf die Erdoberfläche deutlich ab. Zum Beispiel werden Beben unter Magnitude 2 schon in deren Nähe kaum oder nicht gespürt und führen zu keinen Schäden, weil deren Bodenschwinggeschwindigkeiten sehr gering sind. Wenn z.B. Gebäude erst in mehreren Kilometer Entfernung vorhanden sind, führen auch höhere Magnituden i.d.R. nicht zu Schäden. In anderen Worten, es gibt keine direkte Beziehung zwischen Energiefreisetzung und Schäden, da hierzu auch unter Anderem die Entfernung zur Energiefreisetzung und die Beschaffenheit des Untergrunds mit berücksichtigt werden muss.

Induzierte Erdbeben treten in der Geothermie gelegentlich im Zusammenhang mit der Was-

ser-Rückführung in tiefere Gesteinsschichten auf, insbesondere dann, wenn dies mit einer Druckerhöhung im Untergrund in der Nähe einer Verwerfung (größere Störung, Abbildung 6.1) geschieht. Sehr hohe Drücke (10er MPa) können auch Bruchvorgänge verursachen (induzieren), so dass neue Störungen (Bruchsysteme) entstehenden können. Die Wahrscheinlichkeit von induzierten Beben erhöht sich mit wachsenden Drücken.

Induzierte Seismizität kann auch im Zusammenhang mit der hydrothermalen Tiefen Geothermie auftreten, allerdings tritt sie deutlich öfter und stärker im Zusammenhang mit Tiefer Geothermie in von Natur aus sehr gering durchlässigem Gestein (z.B. Kristallines Grundgebirge) mit ungünstigem Spannungszustand auf. Die hydrothermalen Geothermieprojekte sollten so ausgelegt sein, dass der Druckanstieg bei der Wasser-Rückführungsbohrung gering ist und eine gute Verbindung zur Förderbohrung (Druckabfall, weniger kritisch) besteht.

► Frage: Wie viele Erdbeben gab es in den letzten 25 Jahren in BW? Welches war das stärkste Beben und wie viele davon waren induzierte Beben?

Teile von Baden-Württemberg sind tektonisch aktiv, d.h. dort treten natürliche Erdbeben auf, dies ist insbesondere im Oberrheingraben und in der Albstadt-Scherzone der Fall. Im Untergrund von Baden-Württemberg sind seit 1994 mehr als 3200 natürliche Erdbeben mit Magnituden zwischen 0 und 5,4 (Maximum: Waldkirch – Erdbeben 2004) aufgetreten, viele davon im Oberrheingraben (Abbildung 6.2, 6.3). Das Beben von 1978 am Rand der Schwäbischen Alb war mit Magnitude 5,7 das größte Beben in BW innerhalb der letzten 100 Jahre und hat Schäden hervorgerufen.

Insgesamt sind 16 induzierte Erdbeben für Baden-Württemberg angegeben, die maximale Magnitude lag bei < 2. Das induzierte Beben von Vendenheim in Frankreich, das in Baden-Württemberg verspürt werden konnte, hatte eine Magnitude von ca. 4,0 und ist damit ener-

getisch betrachtet immer noch rund 50 mal geringer als das größte natürlich vorgekommene Erdbeben.

Die meisten induzierten Beben werden im Zusammenhang mit Bergbau und Steinbrucharbeiten beobachtet (Sprengungen). Im Zusammenhang mit Geothermie gab es in Baden-Württemberg beim Forschungsvorhaben Bad Urach eine massive Stimulation, die zu 16 registrierten Erdbeben bis zur Magnitude 1,8 geführt haben (Energiefreisetzung ein Millionstel des Erdbebens am Rand der Schwäbischen Alb von 1978). Keines der induzierten Ereignisse wurde verspürt. Bei dem damaligen Forschungsprojekt in Bad Urach handelte es sich um ein EGS-Projekt (als EGS Systeme werden geothermische Konzepte verstanden, bei denen gezielt die Durchlässigkeit des Zielhorizontes durch z.B. hohe Wasser-

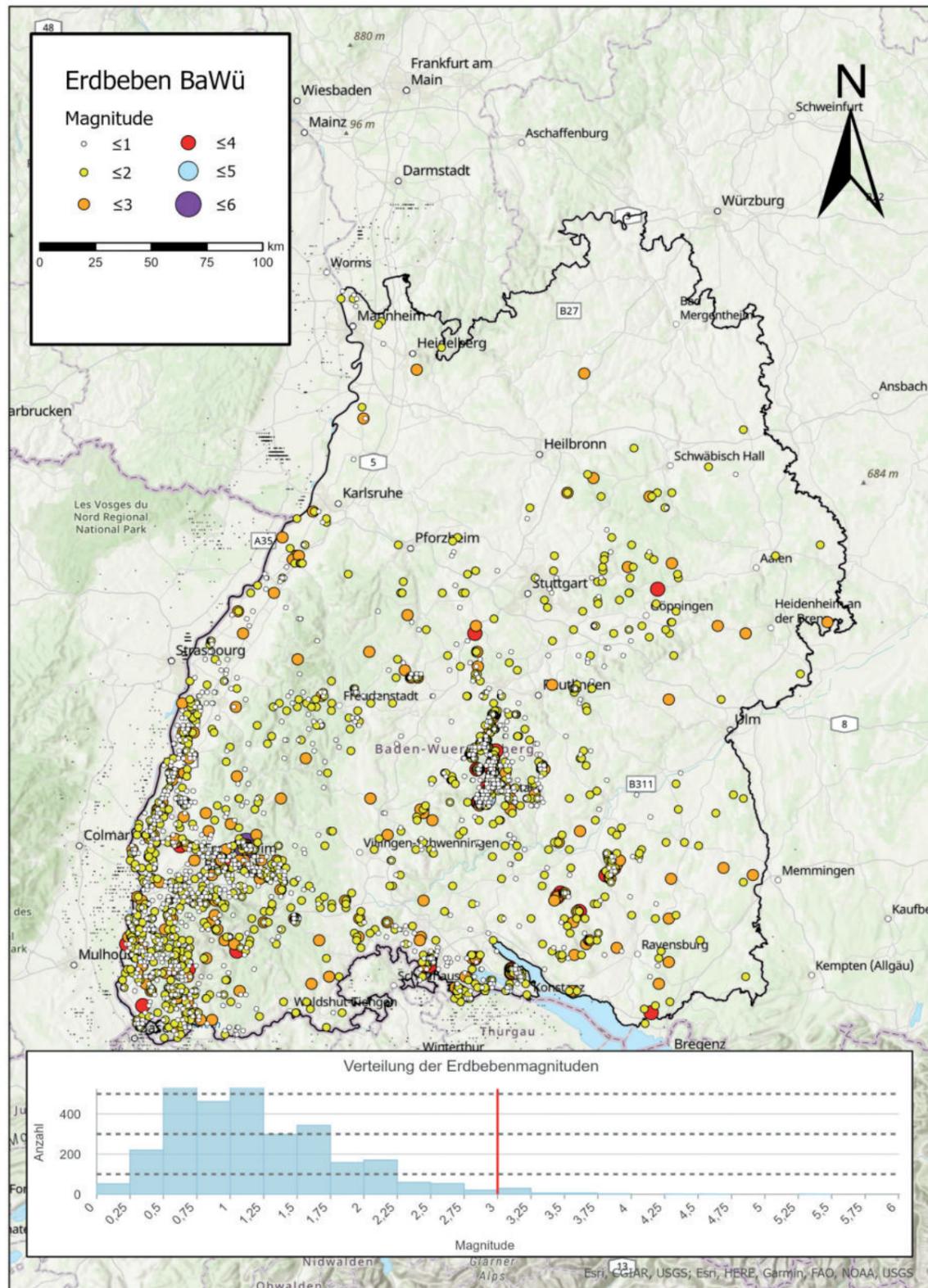


Abbildung 6.2: Karte der beobachteten Erdbeben in Baden-Württemberg mit Beben in den Jahren 1994 bis 2020. Fast alle Beben sind kleiner als Magnitude $M = 1$. (Nicht alle Beben mit Magnituden < 2 werden aufgezeichnet)

drucke künstlich erhöht wird, – Engineered Geothermal Systems. Bei den zugelassenen Vorhaben in Baden-Württemberg handelt es

sich ausschließlich um Projekte in thermalen Aquiferen – Hydrothermale Systeme).

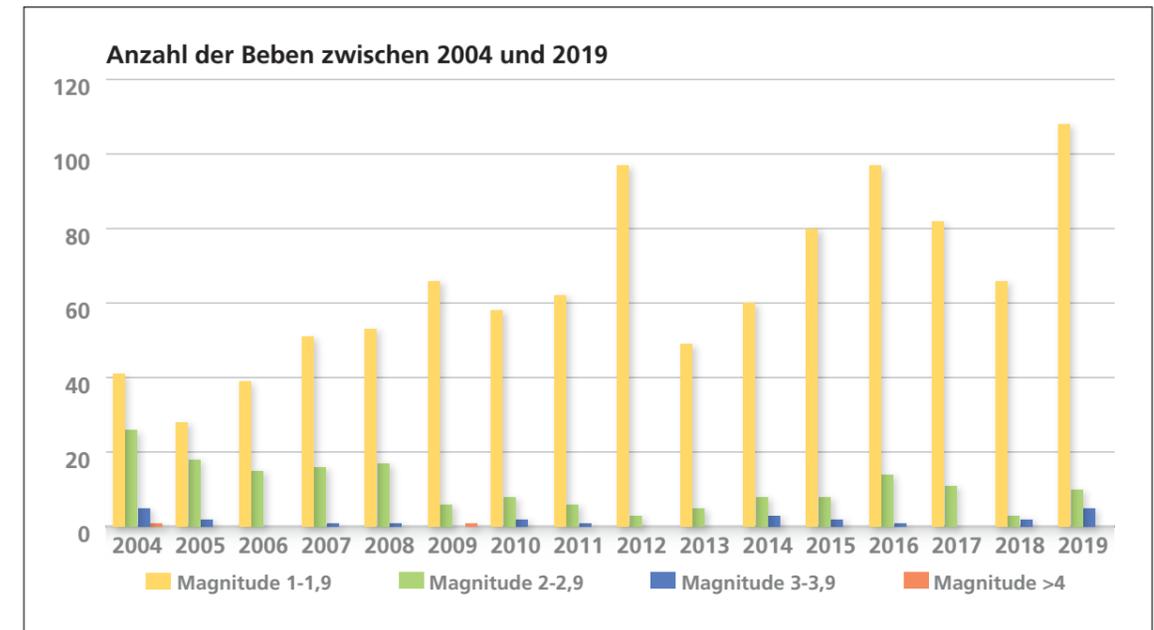


Abbildung 6.3: Übersicht über die Anzahl der Erdbeben in Abhängigkeit von der registrierten Magnitude in Baden-Württemberg für die Jahre 2004 bis 2019 (basierend auf den Daten des Landeserdbebendienstes). Die Statistik zeigt, dass die meisten Beben kaum spürbar sind, da sie mit Magnituden 1 und kleiner nur instrumentell erfasst werden können. Beben mit Magnituden größer als 4 sind im Zeitraum 2004-2019 zweimal aufgetreten.

► **Frage: Wovon hängen die induzierten Erdbeben bei Projekten der Tiefen Geothermie ab?**

Das Auftreten und die Größe von induzierten Erdbeben hängen ab von:

- Eigenschaften des Untergrunds
- Größe der Störungen (Bruchflächen)
- Druck, mit dem Wasser in den Untergrund gepresst wird.

Die beiden ersten Punkte kann man vorab untersuchen. Größere Störungen können in Sediment-Abfolgen im Untergrund mit Hilfe

einer 2D/3D-Seismik identifiziert werden; das Spannungsfeld kann aus Publikationen (z.B. World-Stress-Map, Heidenbach et al., 2018) abgeleitet werden. Geomechanische numerische Modellierungen erlauben daher im Vorfeld eine Abschätzung potentieller Risiken. Anhand der Ergebnisse lässt sich das Risiko minimieren (Vorsorge), z.B. durch Änderung des Bohrpfad.

► **Frage: Wie können die Erdbeben erfasst werden**

Erdbeben, weit unter der Schwelle von Spürbarkeit und Schäden, können mit einem Erdbeben-Monitoringsystem erfasst werden. Es

wird bereits vor der ersten Bohrung eingerichtet, um die Veränderungen gegenüber der natürlichen Seismizität zu erfassen. Mit dem

Monitoringsystem können sehr kleine, nicht spürbare Mikrobeben mit ihrer Magnitude identifiziert und lokalisiert, sowie maximale Schwinggeschwindigkeiten an der Erdoberfläche abgeschätzt werden. Damit verfügt der Betreiber über die Informationen, mit denen er den Betrieb der Anlage auslegen kann, um

zu hohe Bodenschwinggeschwindigkeiten zu vermeiden. Für die Einrichtung der Monitoringstationen und die Messungen gibt es Standards aus den Erfahrungen von Projekten weltweit (DIN 4149, DIN 4150). Zur Messung der tatsächlichen Bodenschwinggeschwindigkeit gibt es ebenfalls Spezialgeräte.

► **Frage: Wer schaltet bei Stimulation und Dauerbetrieb ab, wenn Grenzwerte überschritten sind?**

Für Bohr-, Test- und Betriebsphasen wird ein mit der Behörde abgestimmtes, verbindliches System, z.B. die sogenannte Ampelsteuerung, eingeführt. Diese verfügen über verschiedene Phasen (Grün, Gelb und Rot). Grün liegt vor, wenn die Anlage planmäßig funktioniert. Bei Auftreten von messbaren aber noch nicht unbedingt spürbaren Bodenbewegungen über

festgelegten Schwellenwerten (Gelb oder Rot) sind im Vorfeld festgelegte, verbindliche Maßnahmenabläufe durch den Anlagenbetreiber durchzuführen, die z.B. zu einer kontrollierten Reduzierung des Betriebs (Gelb) und wenn nötig zur Einleitung von Abschaltmaßnahmen führen (Rot), um das Auslösen spürbarer Seismizität zu vermeiden.



Rollenmeißel für Tiefbohrungen © Stober

► **Frage: Welche Geothermieprojekte in Deutschland liefern Fakten und Erfahrungen zu messbarer bzw. spürbarer Seismizität?**

Induzierte Seismizität wurde im Zusammenhang mit einigen Geothermieprojekten (Frankreich, Schweiz, Rheinland-Pfalz) im Oberrheingraben und in der Molasse in Bay-

ern beobachtet. Messdaten liegen den Betreibern vor und ab einer bestimmten Magnitude sind sie auch in den Erdbebenkatalogen der Landeserdbebendienste aufgeführt.

► **Frage: Kann beim Bohrvorgang Seismizität in BW auftreten?**

Tiefe Bohrungen sind in Baden-Württemberg weit verbreitet, es gibt über 500 Bohrungen mit Bohrtiefen größer als 1000 m (Bohrarchiv LGRB). Es wurden dabei keine seismischen Ereignisse beobachtet. Nur unter ganz besonderen Bedingungen können beim Bohrprozess

Erdbeben ausgelöst werden (z.B. massive Spülungsverluste bei schwerer Spülung s.o.). Um auch für diese besonderen Fälle eine spürbare Seismizität zu verhindern, wird dies im Genehmigungsprozess beachtet.

► **Frage: Lässt sich aufgrund der vergleichsweise großen Unsicherheiten bei der Tiefenbestimmung bei einem induzierten Beben das Epizentrum exakt bestimmen?**

Die Genauigkeit in der Ortsbestimmung (Lokalisierung von Erdbeben) hängt von der Stärke des Bebens, der Tiefe, den Gesteinsschichten und dem verwendeten Messnetz ab.

ein Beben im Einflussbereich der Tiefbohrungen aufgetreten ist. Das Epizentrum ist dabei die Projektion des Erdbebenorts an die Erdoberfläche. Obgleich die Tiefenbestimmung mit größeren Unsicherheiten verbunden ist, kann das Beobachtungsnetz so konzipiert werden, dass die Zuordnung von Beben z.B. zu einem Geothermieprojekt möglich ist.

Mit einem nach dem Stand der Technik aufgebauten Messnetz zum seismischen Monitoring können Erdbeben mit ausreichender Genauigkeit lokalisiert werden, um festzustellen, ob

► **Frage: Entstehen induzierte Erdbeben eher im Sediment (z.B. Buntsandstein) oder eher im Kristallingestein (z.B. Granit)?**

Erdbeben können an Störungen sowohl im Sediment als auch im Kristallin auftreten. Die meisten Erdbeben, insbesondere solche mit größeren Magnituden, haben ihren Ursprung im kristallinen Grundgebirge (z.B. Evans et al. 2012, Hincks et al. 2018, Skoumal et al. 2018). Das gilt auch für induzierte Beben durch Geothermie.

ser-Rückführungsdrücke. In Kristallingesteinen ist die Durchlässigkeit i.d.R. niedriger, und die Wiederrückführung des Thermalwassers (Wasser-Rückführung) erfordert deshalb oft höhere Drücke. Zudem sind die Spannungen im Kristallin auf günstig orientierten Störungen oft näher an der Bruchbedingung als in den durchlässigeren stärker porösen oder geklüfteten Sedimenten. Dadurch können dort eher induzierte Beben ausgelöst werden. In Baden-Württemberg wird deshalb zurzeit vermieden, Geothermiebohrungen bis nahe an die Ober-

Die für die hydrothermale Geothermie interessanten Sedimentgesteine sind i.d.R. gut durchlässig und erfordern daher geringe Was-

fläche oder in das kristalline Grundgebirge abzuteufen.

Weltweit werden auch im Kristallingestein erfolgreich Geothermieprojekte durchgeführt, es kommt dabei auf die lokalen geologischen Verhältnisse, das natürliche Spannungsfeld und den Einzelfall an, ob Erdbeben auftreten.

► **Frage: Gibt es Beispiele, dass Beben auch erst nach mehreren Jahren Betriebszeit aufgetreten sind?**

Die Erfahrungen zeigen, dass die bisherigen langfristigen hydrothermalen Nutzungen wie z.B. im Pariser Becken (über 50 Jahre) oder in Riehen b. Basel (über 26 Jahre) meist keine spürbare Seismizität gezeigt haben. Bei diesen Geothermieanlagen handelt es sich ausschließlich um hydrothermale Projekte, die gut

Außerdem lassen sich die hohen Drücke bei der Wiederrückführung des Thermalwassers reduzieren, indem beispielsweise das rückzuführende Wasser in zwei Bohrungen anstelle in nur eine Rückführbohrung gepumpt wird oder in eine Rückführbohrung, die sich untertage in zwei Bohrstränge aufteilt.

durchlässige tiefe Grundwasserleiter erschließen.

In Poing (Bayern) wurde eine spürbare Seismizität nach ca. 7 Jahren Betrieb im Grundgebirge ausgelöst; Schäden sind uns nicht bekannt.

► **Frage: Wie wirkt sich der Aspekt der Abkühlung bei Wasser-Rückführung auf die umliegenden Störungszonen aus?**

Der Bereich der Abkühlung ist auf die Umgebung der Wasser-Rückführbohrung (Injektionsbohrung) beschränkt. Dieser Abkühlungsbereich wächst mit der Zeit an, liegt

aber auch am Ende der Betriebsdauer einer geothermischen Anlage typischerweise im Bereich von wenigen hundert Metern. Im Abkühlungsbereich können zusätzliche Spannungen im Gestein durch die Temperaturänderungen entstehen. Diese zusätzlichen Spannungen durch die Temperaturänderung können an Störungen zum Auftreten von Seismizität führen. Diese Spannungsänderungen aufgrund von Temperaturänderungen wirken auch über den eigentlichen Abkühlungsbereich hinaus, verlieren mit zunehmendem Abstand aber schnell an Intensität.

Geothermische Standorte werden in der Regel so ausgesucht, dass größere Störungen, auf denen durch Spannungsänderung spürbare Erdbeben ausgelöst werden können, im Untergrund nicht in der unmittelbaren Umgebung liegen, um eine spürbare induzierte Seismizität zu vermeiden. (Kleine Bruchflächen → kleine Erdbeben, große Bruchflächen → große Erdbeben).



Sandstein Pfälzer Wald © Kiefer

► **Frage: Welche Bodenschwinggeschwindigkeiten treten auf? Welcher Grenzwert für die Bodenschwinggeschwindigkeit wird zugrunde gelegt, dass Gebäude die zu erwartenden Bodenbewegungen standhalten? Gibt es eindeutige Aussagen hierzu von Gutachten?**

Ähnlich wie bei Bautätigkeiten können bei der Tiefen Geothermie Bodenschwingungen entstehen. Dafür gibt es Vorgaben/Richtwerte in Form von DIN-Normen (z.B. DIN 4149 und DIN 4150 – Erschütterungen im Bauwesen). Diese sind so gewählt, dass keine Schäden an

Gebäuden entstehen sollten. Diese Vorgaben gelten auch für die Errichtung und den Betrieb der Geothermie-Anlagen. Dazu gehört, dass die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit an der Erdoberfläche, die erzeugt wird, die vorgegebenen Richtwerte unterschreitet.

► **Frage: Wie werden mögliche Schäden durch Erschütterungen erfasst und kontrolliert?**

Ein vorgeschriebenes Schadenserfassungssystem existiert nicht. Jeder kann Schäden an den Betreiber melden (ähnlich wie bei einem Straßenbauprojekt). Oft steht dafür ein Ombudsmann vor Ort für die Projekte zur Verfügung

(Anlaufstelle und eine rasche Schadensregulierung).

Die Schäden können durch Sachverständige bezüglich Verursacher geprüft werden.



Vibrator für Seismik © Stober



7

Wirtschaftlichkeit der Tiefen Geothermie

Zusammenfassung

- Tiefe Geothermieanlagen können wirtschaftlich betrieben werden, sonst gäbe es keine Investoren. Tiefe Geothermie weist volkswirtschaftlich sehr vorteilhafte CO₂-Vermeidungskosten auf. Mit zunehmendem CO₂ Preis wird die Wirtschaftlichkeit weiter verbessert.

Einleitung

Der Tiefen Geothermie kommt bei der Energiewende eine große Bedeutung zu, da sie eine der wenigen grundlastfähig erneuerbaren Energiequellen ist. Die Wirtschaftlichkeit beschreibt, dass man mit möglichst geringem Aufwand, also ressourcenschonend, das gesetzte Ziel erreicht.

Mit der aktuellen Einspeisevergütung ist ein wirtschaftlicher Betrieb einer Geothermieanlage mit Stromerzeugung möglich. Es wird

erwartet, dass die CO₂-Abgabe auf Energie, die Wirtschaftlichkeit der Tiefen Geothermie künftig noch weiter, insbesondere auch bei der Wärmeerzeugung, erhöhen wird.

Projektbetreiber prüfen vorab, ob sich an einem gewählten Standort eine Anlage gewinnbringend betreiben lässt. D.h., die Anlagen werden nur gebaut, wenn sie sich wirtschaftlich betreiben lassen.

Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit eines Geothermiekraftwerks beruht grundsätzlich auf mehreren Säulen. Dabei werden mindestens folgenden Themen berücksichtigt:

■ Das lokale geothermische Potenzial:

Besonders günstige Voraussetzungen stehen im Oberrheingraben und im Baden-Württembergischen Teil des voralpinen Molassebeckens (Oberschwaben) zur Verfügung. Die anderen Bereiche in Baden-Württemberg müssen noch genauer untersucht werden, da deren geothermische Potenziale noch wenig bekannt sind. Allerdings sind dort in mittleren Tiefen Aquifere vorhanden, die insbesondere für die Untergrundeinspeicherung für Überschusswärme verschiedener Energieträger saisonal zur Wärmeversorgung genutzt werden können. Vom LFZG wird geschätzt, dass bis zur Hälfte der Landesfläche von Baden-Württemberg technisch für die Nutzung durch Tiefe Geothermie oder geothermische Energiespeicher in mittleren Tiefen bereits heute geeignet sind. Mit einem wissenschaftlich-technischen Fortschritt können in Zukunft ggf. auch die heute noch nicht nutzbaren Bereiche erschlossen werden.

■ Wärme- und/oder Stromerzeugung:

Primäres Ziel der meisten Tiefen Geothermie Projekte in Deutschland ist die Nutzung der geförderten Wärme in kommunalen Wärmenetzen (z.B. Großraum München). Aktuell stehen in Industrieregionen des Oberrheingrabens Wärmenetze zur Verfügung, die zu Quartierslösungen mit Fern-

wärmenetzen weiter ausgebaut werden können. Zusätzlich lassen sich auch regionale Inselnetze zusammenführen. Eine zusätzliche Stromerzeugung ist bei entsprechend hohen Temperaturen (>120 °C) verstärkt in den Sommermonaten, bei niedrigerem Wärmebedarf, wirtschaftlich interessant. Aquifere mit entsprechend hohen Temperaturen kommen insbesondere im Oberrheingraben vor und lassen sich auch ausschließlich zur Stromerzeugung nutzen.

Wirtschaftlichkeitsberechnung:

Entscheidend für den Verbraucher ist der Wärmepreis im Vergleich zu anderen Energieträgern. Wichtige Kennzahlen für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit durch den Energieerzeuger sind:

- Ergiebigkeit der Geothermie-Bohrungen
- Investitionen
- Betriebskosten (fixe und variable Komponenten)
- Wärmeleistung der Gesamtanlage
- Volllaststundenanteil (Grad der Auslastung)
- Reserveleistungen (für Unwägbarkeiten, z.B. bei Ausfall technischer Anlagenteile)
- Transportnetz, Verteilnetz
- Entfernung zu Wohnbebauung/Fernwärmenetz, Art der Wohnbebauung, Abnehmerdichte (ggf. auch Industrie)
- Einspeisetemperatur für den Endverbraucher

- Reine Wärme aus der Tiefen Geothermie oder Energieabgabe in einem Portfolio mit Co-Nutzung andere Energieformen (Solar, Biomasse)
- Zentral sind auch Besiedlungsdichte, Grad der Urbanisierung und Größe der angegliederten Industriegebiete. Sollen reine Industriegebiete beliefert werden? Mittelgroße Anlagen mit ca. 7 MW eignen sich beispielsweise für mittelgroße Städte in Oberschwaben.

Hybride Energieerzeugung:

Es wird erwartet, dass sich die Wirtschaftlichkeit von Geothermieanlagen durch Kopplung mit anderen Energieerzeugern deutlich steigern lässt: Kombination mit Solaranlagen, Biogaserzeugung, etc..

► Frage: Wie verhält sich die Entnahmemenge zur Leistung des Kraftwerks?

Wird die Wärme direkt genutzt stehen 100 % der geförderten Wärme abzüglich der Wasser-Rückführungswärme zur Nutzung zur Verfügung. Die Förderpumpe (ggf. auch die Wasser-Rückführungspumpe) muss dabei elektrisch betrieben werden. Der Strombedarf dafür hängt von den lokalen Gegebenheiten und der Zirkulationsrate ab.

Wird die Geothermie zur Stromerzeugung genutzt, können bis zu 14 % der geförderten Energie in Strom gewandelt werden. Auch hier muss die Leistung der Pumpe abgezogen werden.

► Frage: Wie viele Bohrungen werden benötigt, um z.B. aus 2 km Tiefe hydrothermal 30 MW thermisch zu entnehmen?

Grundsätzlich mindestens zwei – eine Förderbohrung, eine Wasser-Rückführbohrung.

Beispielrechnung: Bei einer Temperatur von 90 °C in 2.000 m Tiefe und einer Temperatur von 40 °C, mit der das Thermalwasser wieder in den Untergrund zurückgeleitet wird, müssten ca. 150 l/s Thermalwasser gefördert werden, um 30 MW thermisch zu generieren.

Die ergiebigsten Tiefbohrungen im Münchner Raum fördern aus dem dortigen Oberjura-Aquifer bis zu ca. 150 l/s, so dass in diesem Fall eine Förder- und eine Wasser-Rückführbohrung ausreichen. Im Oberrheingraben sind die Durchlässigkeiten niedriger, so dass mindestens zwei Förder- und zwei Wasser-Rückführbohrungen erforderlich wären.



Seismische Vermessung © Stober



8

Auswirkungen von Geothermie-Projekten auf die natürliche und bebaute Umwelt

Zusammenfassung

- Jedes Bauwerk stellt einen Eingriff in die natürliche und bebaute Umwelt dar. Der Landschaftsverbrauch und die Sichtbarkeit einer Tiefen Geothermieanlage sind vergleichbar mit einer großen Scheune oder einer Sporthalle. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, sowie Normen, Verordnungen und Gesetze müssen bei der Planung beachtet werden, so dass z.B. Grenzwerte eingehalten werden, wie dies bei allen Industriezweigen Stand der Technik und Genehmigungspraxis ist.

Einleitung

Der Bau und Betrieb einer Tiefen Geothermieanlage ist ein Eingriff in die Natur und Umwelt. Auch wenn der Flächenbedarf und Eingriff vergleichsweise gering ist, gibt es beim Bau und Betrieb einer Anlage immer Auswirkungen auf die natürliche und bebauten Umwelt. Dabei kann zwischen vorübergehenden, zeitlich begrenzten Belastungen und langfristigen Auswirkungen unterschieden werden.

Zu den zeitlich begrenzten Belastungen und Auswirkungen gehören:

- Vorerkundung wie z.B. die seismische Erkundung des Untergrundes
- Bau von Zufahrtstraßen und Lastwagenverkehr beim Bau des Bohrplatzes, Transport

► Frage: Welche Gefährdungen (Gesundheit, [Arbeits-]Sicherheit, Umwelt) hat die Technologie der hydrothermalen Geothermie?

Gefährdung während der Erschließung und der Bauphase:

- **Gesundheitsschutz:** Es gelten auch für den Bau (und Betrieb) von Geothermieanlagen die einschlägigen gesetzlichen und technischen Regelungen wie z.B. Lärmschutz, Arbeitssicherheit, Schutz vor auslaufenden oder flüchtigen Betriebsmitteln (z.B. Diesel). Hier müssen entsprechende Konzepte erstellt, geprüft und umgesetzt werden, erfüllt werden die Maßnahmen behördlich genehmigt. Die Einhaltung der Regeln unterliegt der behördlichen Überwachung.
- **Gefährdung bei der Erschließung in der Nähe einer kritischen Infrastruktur:** Als kritische Infrastruktur gelten: Autobahnen, Bahntrassen, Stromtrassen, Pipelines. Die Eingriffe sind vergleichbar mit dem Bau einer Fabrikhalle. Deshalb gilt auch beim Bau einer Geothermieanlage, dass geeignete Maßnahmen getroffen werden müssen (z.B. Sicherheitsabstände oder bautechnische Maßnahmen), um kritische Infrastrukturen zu schützen und Auswirkungen zu verhindern. Die Notwendigkeit für Maß-

nahmen ergibt sich aus den einschlägigen Regelwerken und muss bei den Planungen verbindlich berücksichtigt werden. Die konkrete Umsetzung wird von den zuständigen Behörden überprüft.

- **Grundwasserschutz:** Damit wassergefährdende Stoffe wie z.B.: Betriebsmittel oder Kraftstoffe nicht in das Trinkwasser gelangen können, ist der Umgang mit diesen nur auf geeigneten Flächen erlaubt. Dazu werden Teilflächen von Bohrplätzen versiegelt und das darauf niedergehende Regenwasser aufgefangen (ähnlich wie bei einer Tankstelle), behandelt und geordnet abgeleitet.
- **Tier- und Pflanzenschutz:** Hier gelten die üblichen Vorkehrungen wie beim Bau anderer größerer Anlagen und sind lokationsabhängig. Dazu wird eine artenschutzrechtliche Prüfung durchgeführt und entsprechende Maßnahmen abgeleitet. In einem landschaftspflegerischen Begleitplan werden die einzuhaltenden Maßnahmen zur Vermeidung und Minimierung von Auswirkungen auf die Flora und Fauna be-

der Materialien und Bau der obertägigen Anlagen

- Bohrphase
 - Änderungen des Landschaftsbilds durch den Bohrturm während der Bohrphase
 - Dampfentwicklung bei der Testphase
- Die langfristigen Änderungen ergeben sich:
- Für das Landschaftsbild durch den Bau eines Betriebsgebäudes und der obertägigen Anlagen
 - bei Stromerzeugung ein Kraftwerk mit Wärmeübertrager und z.B. Luftkühler
 - Erwärmung der höheren Grundwasserleiter im engsten Nahbereich um die Wasser-Rückführungsbohrung (Abschnitt 3)

schrieben, damit z.B. brütende Vögel nicht gestört werden (Zeitpunkt der Fällung von Bäumen), Tiere sich nicht am Bohrplatz verletzen können (Einfriedung des Bohrplatzes), oder bedrohte Tierarten vorab umgesiedelt werden können.

Gefährdung beim Dauerbetrieb der Anlage:

Als Hauptgefährdung beim Dauerbetrieb wird der Austritt von Arbeitsmitteln gesehen, beispielsweise von organischen Flüssigkeiten im ORC-Kreislauf des Kraftwerks (ORC – Organic Rankine Cycle, häufigstes Verfahren für den Betrieb von Niedertemperatur-Dampfturbi-

nen zur Stromerzeugung). Moderne Anlagen werden durch eine mehrkreisige, redundante, elektronische Sensorik überwacht und kritische Zustände über Alarmsysteme gemeldet. Sollten Undichtigkeiten auftreten, werden Gegenmaßnahmen eingeleitet. Die Technik ist vergleichbar mit großen Kühlaggregaten in Lagerhallen, deshalb gelten auch vergleichbare Vorschriften.

Beim Lärmschutz und anderen Belastungen gelten die entsprechenden Richtlinien, Verordnungen und Gesetze.



OCR-Anlage und Luftkühlung © Stober

► Frage: Wie groß ist die Geräuschemission durch eine Geothermieanlage?

Geräuschemissionen während der Erschließung und der Bauphase:

Hauptsächliche Quellen für Geräuschemissionen sind Baumaschinen während der Errich-

tung des Bohrplatzes und die Bohranlage während des Bohrbetriebs. Insbesondere die Bohranlage ist während der Bohrphase 24 Stunden im Dauerbetrieb und kann Geräusche

in verschiedenen Frequenzbereichen verursachen. Nächtlicher Lärm sowie Beleuchtung durch Scheinwerfer werden als besonders

störend empfunden. Deshalb müssen die Geräusche gedämmt bzw. minimiert werden und Scheinwerfer möglichst so ausgerichtet



Nasskühlturm Bruchsal © Stober

werden, dass sie in der Umgebung als weniger störend empfunden werden. Ein bewährtes Mittel sind temporäre Schallschutzwände.

Bei Bohranlagen der 5. Generation werden die Dieselaggregate zum Antrieb und Energieerzeugung zunehmend durch geräuscharme strombetriebene Anlagen ersetzt. In der Nähe von Siedlungen hat sich das Bohren mit Elektroantrieb bewährt. Auch das Einhausen von Dieselaggregaten trägt stark zur Lärmreduktion bei.

Verkehrslärm durch LKWs, die Ausrüstung und Betriebsstoffe liefern und Leergut abfahren, sowie PKW-Verkehr durch den Schichtbetrieb sind weitere Geräuschquellen. Das Verkehrsaufkommen wird in der Regel aufgezeichnet, Emissionen können ggf. durch vorgeschrie-

bene An- und Abfahrwege oder durch eine optimierte Lagerhaltung reduziert werden.

Belastungen durch Dauerbetrieb der Anlage: Eine häufig geäußerte Sorge ist die Lärmbelastung durch Kühlanlagen. In der Planungsphase wird geklärt, ob und bei welchem Anlagentyp eine Kühlung überhaupt notwendig ist. Bei reinen Heizwerken ist i.d.R. keine weitere Kühlung notwendig. Anlagen zur Stromerzeugung benötigen Kühlanlagen (Luftkühlung, Nasskühler). Wo möglich, kann die Wasserkühlung über einen Vorfluter erfolgen. Die Geräuschemissionen der Anlagen müssen die gesetzlichen Grenzwerte einhalten. Bei geeigneten Bedingungen können auch anstelle von Luftkühlern s.g. Nasskühler (z.B. in Bruchsal) eingesetzt werden, die noch weniger Lärm erzeugen.

► **Frage: Wie stark verändert der Bau und Betrieb einer Geothermieanlage das Landschaftsbild?**

Auswirkungen auf das Landschaftsbild: Geothermieanlagen sind Gebäude und verändern das Landschaftsbild. Im Hinblick auf das Landschaftsbild sind Geothermieanlagen wie Insheim oder Bruchsal kaum sichtbar. Mancherorts wissen nicht einmal Menschen im Ort, dass und wo eine Geothermieanlage steht. Die Beeinträchtigung ist deutlich geringer als bei vielen anderen Infrastrukturmaßnahmen. Bei der Wärmenutzung sind es meist kleinere Industriegebäude oder es werden bereits vorhandene Gebäude oder Hallen weiter genutzt (z.B. Stadt München: alte Kraftwerkstandorte werden nachgenutzt, die Geothermie selber benötigt dabei weniger Platz und es wird

innerstädtischer Raum wieder zur Verfügung gestellt, da z.B. keine Kohle und Verbrennungsprodukte gelagert werden müssen.

Kühlanlagen: Geothermieanlagen für die Stromerzeugung benötigen Kühler, jedoch keine großen Kühltürme wie bei Kohle- oder Kernkraftwerken. Eine Schattenwirkung durch Nebelschwaden tritt nur in der Testphase auf. Das Kleinklima wird in der unmittelbaren Nähe einer Geothermieanlage, die Strom erzeugt und eine Luftkühlanlage aufweist, verändert, wie dies auch bei Hausheizungen, Klimageräten oder durch den Straßenverkehr geschieht.

► **Frage: Wird der Wert eines Hauses durch die Nachbarschaft einer Geothermieanlage verändert?**

Verkehrswert von Gebäuden und Grundstücken: Es liegen keine Erkenntnisse vor, ob sich Gebäude- und Grundstückspreise aufgrund der Errichtung einer Anlage der Tiefen Geo-

thermie verändert haben. Eine günstige Wärmeversorgung über ein Fern- oder Nahwärmenetz spart Platz im Haus und macht das Heizen unabhängig von steigenden Öl- und Gaspreisen.

► Frage: Wie beeinflusst eine Geothermieanlage das örtliche Verkehrsaufkommen und die Qualität der genutzten Straßen und Wege?

Bauphase:

In der Bauphase ist mit einem, wie normalerweise bei größeren Baustellen, erhöhten Verkehrsaufkommen zu rechnen (PKW, LKW, Kräne).

Betrieb:

Bei Geothermieanlagen ist im Wesentlichen der Verkehr von Betriebsmannschaften zu erwähnen, der allerdings äußerst gering ist. Bei größeren Revisionen kann auch ein Transport (LKW) und Kran notwendig sein.



OCR-Anlage und Turbine © Stober

► Frage: Wie groß ist die benötigte Grundstücksfläche für die obertägigen Anlagen?

Der Flächenbedarf hängt davon ab, ob es sich um eine Anlage zur Stromerzeugung oder zur Wärmenutzung handelt.

Eine Stromerzeugungsanlage unterscheidet sich von einer Anlage zur reinen Wärmeversorgung durch die Kühlanlagen und das Kraftwerk. Eine kleine bis mittlere Geothermieanlage zur Stromerzeugung nimmt die Fläche einer kleinen Schulsporthalle ein. Geothermieanlagen zum Heizen benötigen nur ca. die Hälfte dieser Fläche.

Werden Flächen früherer Energieerzeugungsanlagen konvertiert (z.B. in München Schäftlarnstraße), kann dies zu einem Netto-Flächengewinn für den Ort führen, da Geothermieanlagen nur einen Bruchteil der Altflächen einnehmen und so ein Teil dieser Flächen neu genutzt werden kann.



Flächenbedarf eines geothermischen Heizkraftwerks, hier: Anlage in Bruchsal
© EnBW, Thomas Kölbl



Injektionspumpe © Stober



9

Versicherungen

Zusammenfassung

- Die Betreiber von Geothermieranlagen sind grundsätzlich für Schäden verantwortlich, die durch und beim Bau, Betrieb, Rückbau aber auch nach dem Rückbau entstehen. Dazu gibt es Haftpflichtversicherungen, die auf das jeweilige Projekt zugeschnitten werden. Versicherungen sehen einen klaren Ablauf für die Schadensregulierung vor.
- Entsteht im Einwirkungsbereich einer tiefen Geothermiebohrung durch Erschütterungen ein Schaden, der nach seiner Art ein Bergschaden sein kann, wird vermutet, dass der Schaden durch diesen Betrieb verursacht worden ist; das gilt nicht, wenn feststeht, dass die Erschütterung natürlichen Ursprungs ist (Bergschadensvermutung).

Einleitung

Häufig werden Befürchtungen geäußert, dass die Errichtung und der Betrieb der Tiefen Geothermie-Anlage Auswirkungen auf die Umgebung haben und somit insbesondere Schäden an Gebäuden hervorrufen könnten. Vor allem besteht Sorge vor Schäden durch induzierte Seismizität (Abschnitt 6). Um solche Schäden zu vermeiden, werden von Projektgesellschaften und Behörden vor der Umsetzung von Projekten umfassende Prüfungen durchgeführt und entsprechende Sicherheitsregeln einschließlich notwendiger Monitoringsysteme verbindlich bestimmt (Abschnitte 3, 6).

Trotzdem ist es für die Anwohnerinnen und Anwohner wichtig zu erfahren, was passieren

► Frage: Werden Haftpflichtversicherungen für Projekte der tiefen Geothermie angeboten?

Ja, solche Versicherungen sind vorhanden und werden von den Versicherern auf das jeweilige Projekt zugeschnitten angeboten.



► Frage: Fordert die zuständige Behörde (Bergbehörde) eine Versicherung für Schäden an privatem Eigentum?

Vorhaben der Tiefen Geothermie dürfen nur nach Maßgabe bergbehördlicher Betriebsplanzulassungen durchgeführt werden. Die gegenwärtige Praxis der Bergbehörde geht dahin,

dass von Unternehmern der Nachweis einer Haftpflichtversicherung für Schadensfälle verlangt wird.

► Frage: Wie hoch sind die Deckungssummen? Wird das im Einzelfall ermittelt?

Das hängt natürlich von der jeweiligen Versicherung ab. In der Regel wird dazu nicht der Einzelfall bewertet, sondern pauschal eine so

hohe Deckungssumme angesetzt, dass es auch für das jeweilige Projekt ausreichend ist.

► Frage: Was gibt es für rasche Methoden, um die Ursache von Risschäden an Gebäuden festzustellen?

Von den Behörden wird ein seismisches Messnetz gefordert. Damit kann nachgewiesen werden, ob es seismische Erschütterungen im

Einwirkungsbereich der Geothermieanlage gegeben hat.

Mit Hilfe eines sogenannten Pollentests kann festgestellt werden, ob ein Riss in einem Gebäude bereits älter ist (also schon vor einer Erschütterung bestand). Dabei wird überprüft, ob sich in dem Riss schon ältere Pollen befinden.

Zur weiteren Klärung des Sachverhalts wird ggf. ein technischer Sachverständiger eingeschaltet.

► Frage: Wie sind die Abläufe im Schadensfall?

Auch hier kommt es natürlich auf die jeweilige Versicherungsgesellschaft und die konkreten Bedingungen an. Daher werden hier nur einige grundlegende Aspekte genannt, die häufig so umgesetzt werden.

Messnetze) und Pollentests kann rasch eine erste Einschätzung gegeben werden, ob das Tiefe Geothermieprojekt für den Schaden verantwortlich ist. Ggf. ist eine rasche Begutachtung des Schadens vor Ort sinnvoll. Häufig beauftragt die Projektgesellschaft auch eine Vertrauensperson der Bevölkerung vor Ort – eine sogenannte Ombudsperson –, die bei der Begutachtung des Schadens bei der potentiell geschädigten Person eingebunden ist. Ggf. kann die Ombudsperson auch als Ansprechperson bei Schäden dienen.

Zunächst geht die Schadensmeldung bei der Projektgesellschaft ein, die dann in Regelfall auch die Versicherung informiert. Es ist dabei Aufgabe der Projektgesellschaft der Bürgerschaft entsprechende Ansprechpersonen zu nennen, die sie im Schadensfall erreichen können. Über Messnetze (wie die seismischen

► Frage: Besteht eine Nachhaftung durch den Versicherer?

Standartmäßig wird bei Abschluss von projektbezogenen Versicherungspolice der Tiefen Geothermie eine Nachhaftung von 5 Jahren vereinbart, die ab Entrichtung der letzten Versicherungsprämie in Kraft tritt und eine

Nachhaftung für versicherte Schäden durch den Versicherer für 5 Jahre garantiert. Da es sich aber jeweils um Einzelvereinbarungen handelt, können abweichende Regelungen in der Versicherungspolice getroffen werden.

► Frage: Gibt es eine Rückversicherung wie bei den Pflichtversicherungen?

Üblicher Weise sind etwa 10 % des Deckungsbetrags durch die Versicherungsgesellschaft direkt abgedeckt. Der Rest wird über Rückversicherungsgesellschaften rückversichert.

Auf Basis Ihrer Zulassung müssen Versicherungen zeigen, dass die Schäden, die sie versichern, auch entsprechend gedeckt sind.

► Frage: Werden die Versicherungsbedingungen den Bürgerinnen und Bürgern erläutert?

Häufig werden die Versicherungsbedingungen von den Versicherungsmaklern bei Veranstaltungen, bei denen über die Projekte informiert wird, der Bürgerschaft erläutert. Hier

können Ansprechpartner bei den Versicherungen oder der/die Ombudsmann/-frau hilfreich sein.



10

Bergrechtliche Genehmigungsverfahren

Zusammenfassung

- Erdwärme ist ein bergfreier Bodenschatz und unterliegt dem Bergrecht (Bundesberggesetz – BBergG). Für die Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme zur tiefeithermischen Nutzung sind mehrere aufeinander aufbauende Verwaltungsverfahren erforderlich, in denen jeweils die Zulassung einzelner Projektschritte beantragt und durch die zuständige Bergbehörde unter Einbeziehung der betroffenen Kommunen und weiterer Fachbehörden geprüft wird, ob eine Zulassung/ Genehmigung ergehen kann. Das Bergrecht erfasst nur Aufsuchung und Gewinnung nicht aber die Nutzung der Erdwärme. Gebäudeteile eines Erdwärmeheiz- oder -kraftwerks, die der Nutzung der Erdwärme dienen, unterliegen deshalb nicht mehr dem Bergrecht.

Vorhaben der Tiefen Geothermie werden mit dem Ziel, Erdwärme aus dem tiefen Untergrund zu gewinnen, geplant und nutzen diese anschließend zur Produktion von Wärme oder Strom. Erdwärme ist nach Bundesberggesetz (BBergG) ein bergfreier Bodenschatz, dessen Aufsuchung (Erkundung) oder Gewinnung im Allgemeinen unter das Bundesberggesetz fällt.

Das Bergrecht erfasst nur Aufsuchung und Gewinnung, nicht aber die Nutzung der Erdwärme zur Produktion von Wärme oder Strom. Für die Errichtung und den Betrieb der Kraftwerkteile werden auch abhängig von der projektierten Kraftwerksleistung ggf. immissionsschutzrechtliche und weitere Genehmigungen erforderlich.

Das Regierungspräsidium Freiburg ist die in Baden-Württemberg zuständige Bergbehörde für Baden-Württemberg, die als zuständige Genehmigungs- und Aufsichtsbehörde Projekte der Tiefen Geothermie im Land zulässt und überwacht.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf den bergrechtlichen Teil von Tiefen Geothermie-Projekten.

Bis zur Gewinnung von Tiefer Erdwärme ist ein umfangreiches und mehrstufiges Verfahren zu durchlaufen, um den Anforderungen an eine umweltgerechte und risikominimierte Nutzung der geothermischen Ressourcen im Untergrund zu entsprechen.

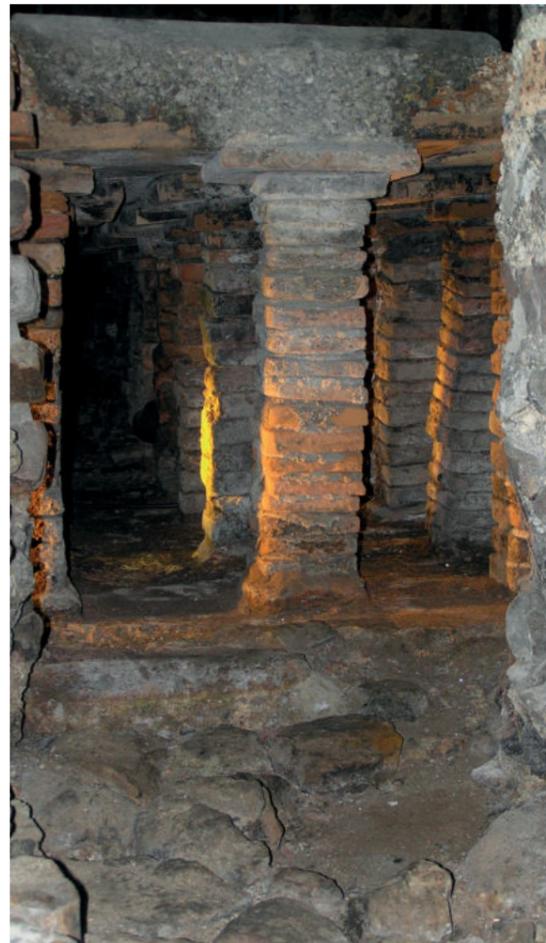
Als bergfreier Bodenschatz gehört Erdwärme nicht zum Grundeigentum. Für die Aufsuchung als auch die Gewinnung benötigt der Vorhabenträger zunächst eine sogenannte Bergbauberechtigung (Konzession). Die Bergbauberechtigung gewährt das ausschließliche Recht zur Erkundung (sogenannte Erlaubnis) bzw. Gewinnung (sogenannte Bewilligung).

Der Vorhabenträger stellt zunächst bei der zuständigen Bergbehörde einen Antrag auf Aufsuchungserlaubnis für Erdwärme im Inte-

ressensgebiet. Dieser Antrag enthält gemäß den gesetzlichen Vorgaben wesentliche Informationen zu den geplanten Aufsuchungstätigkeiten innerhalb der beantragten Konzession, inklusive eines Zeitplans.

Die zuständige Behörde hat vor Entscheidung über den Antrag den Behörden Gelegenheit zur Stellungnahme zu geben, zu deren Aufgabe die Wahrnehmung solcher öffentlichen Interessen gehört, die die Aufsuchung im zuzuteilenden Feld ausschließen. Liegen keine Versagensgründe vor, ist die Erlaubnis durch die zuständige Behörde zu erteilen.

Mit der erteilten Aufsuchungserlaubnis verfügt der Vorhabenträger über das ausschließliche Recht, nach den Vorschriften des BBergG



Baden-Baden, Römerbad, Fußbodenheizung
© Stober

in dem bezeichneten Erlaubnisfeld grundsätzlich alle Arbeiten, die auf Entdeckung oder Feststellung der Ausdehnung (Aufsuchung) von Erdwärme gerichtet sind, durchzuführen. Die Aufsuchungserlaubnis berechtigt noch nicht zu konkreten Tätigkeiten wie Seismiken oder Bohrungen im Aufsuchungsfeld. Die Erteilung der Aufsuchungserlaubnis enthält keine Aussage dazu, ob und wie das konkrete Vorhaben der Tiefen Geothermie durchzuführen ist. Hierzu bedarf es eines zugelassenen Betriebsplans, der festlegt, welche konkreten Tätigkeiten zulässig sind. Die Aufsuchungserlaubnis bestimmt also, wer den bergfreien Bodenschatz (hier die Erdwärme) aufsuchen darf und der Betriebsplan entscheidet darüber, ob und wie die konkreten Aufsuchungsarbeiten erfolgen dürfen.

Betriebspläne sind typischerweise für Seismiken des Untergrunds zu Aufsuchung, Tiefbohrungen, Kurzzeit- und Langzeitfördertests in Tiefbohrungen oder den Dauerbetrieb der Tiefbohrungen sowie den damit zusammenhängenden Tätigkeiten erforderlich.

Bei der Errichtung von Tiefbohrungen ab 1000 m ist vor einem Betriebsplanverfahren mindestens eine Umweltverträglichkeitsvorprüfung durchzuführen. Im Zuge dessen wird nach einer überschlägigen Prüfung anhand von Merkmalen des Vorhabens, des Standortes und der Auswirkungen des Vorhabens eingeschätzt, ob ein Vorhaben erhebliche nachteilige Umweltauswirkungen haben kann, und es wird über die Pflicht zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) des Vorhabens entschieden. Die Pflicht zur Durchführung von UVP-Vorprüfungen bzw. UVPs ergibt sich für bergbauliche Projekte aus der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau) und dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG). Ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich, wird ein Betriebsplan im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens mit Öffentlichkeitsbeteiligung zugelassen.

Andernfalls wird ein bergrechtliches Betriebsplanverfahren unter Beteiligung der betroffenen Kommunen und Fachbehörden durchgeführt, bei dem darüber hinaus regelmäßig auch anerkannte Umwelt- und Naturschutzverbände beteiligt werden.

Der Vorhabenträger hat der Bergbehörde vor Beginn der vorgesehenen Arbeiten Betriebsplanunterlagen vorzulegen, die unter anderem eine Darstellung des Umfangs, der technischen Durchführung und der Dauer des beabsichtigten Vorhabens beschreiben. Der Betriebsplan soll es der Behörde ermöglichen zu prüfen, ob das geplante Vorhaben die Zulassungsvoraussetzungen erfüllt.

Neben den bergrechtlichen Betriebsplänen können weitere Genehmigungen nach anderen Rechtsgebieten erforderlich werden. Z.B. erfordert eine Tiefbohrung im Regelfall eine wasserrechtliche Benutzungserlaubnis. Ist für die Errichtung eines Bohrplatzes die Rodung von Bäumen beabsichtigt, kann eine Waldumwandlungsgenehmigung erforderlich werden.

Sollte die Aufsuchung von Erdwärme für das Unternehmen erfolgreich und die Tiefbohrungen fündig gewesen sein, ist eine Bergbauberechtigung zur Gewinnung von Erdwärme (Bewilligung) zu beantragen.

Erst mit bewilligter Gewinnungsberechtigung ist das Unternehmen zur Gewinnung von Erdwärme berechtigt und kann bei der Bergbehörde die Zulassung eines Betriebsplans zum Dauerbetrieb der Bohrungen und Gewinnung von Erdwärme beantragen. Vor Aufnahme eines Verwaltungsverfahrens ist erneut mindestens eine Umweltverträglichkeitsvorprüfung durchzuführen. Müsste daraufhin eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt werden, ist ein Planfeststellungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung andernfalls ein bergrechtliches Betriebsplanverfahren mit Beteiligung der betroffenen Fachbehörden und Kommunen durchzuführen.



Information der Öffentlichkeit, Bürgerbeteiligung

Zusammenfassung

- Eine umfassende und frühzeitige Information und Beteiligung der Öffentlichkeit ist für das Gelingen eines Projekts von zentraler Bedeutung. Es gibt rechtliche Vorgaben und informelle Möglichkeiten der Information und Beteiligung. Zudem gibt es eine Vielzahl von Anlaufstellen, die Informationen zur Tiefen Geothermie anbieten.

Einleitung

Zur Verbesserung des Informationsstands der Bevölkerung über geothermische Anlagen ist eine breite und frühe Öffentlichkeitsarbeit von zentraler Bedeutung. Durch offene Kommunikation während der gesamten Projektlaufzeit sowie die Transparentmachung des Planungs- und Entscheidungsprozesses wird es für Interessierte erleichtert, sich ein Bild von der Sachlage zu machen, ggf. ergänzende Hinweise zu geben oder auch kritische Anmerkungen vorzubringen.

Im Schwerpunkt einer guten Öffentlichkeitsarbeit können die Vorteile und Nutzen der Technik stehen. Kritische Aspekte sollten aber keineswegs verschwiegen werden, sondern die Möglichkeiten aufgezeigt werden, die nach dem aktuellen Stand von (Wissenschaft und

Technik bestehen, um verbleibende Risiken auf ein sinnvolles Maß zu reduzieren und mit möglichen Folgen angemessen umzugehen.

Nachstehend wird zunächst ein kurzer Überblick über die Rechtslage im Hinblick auf Information und Beteiligung der Öffentlichkeit gegeben sowie Einrichtungen benannt, die von der Öffentlichkeit genutzt werden können. Daneben werden Möglichkeiten für eine informelle Öffentlichkeitsbeteiligung skizziert. Eine informelle Öffentlichkeitsbeteiligung z.B. durch den Projektträger kann den Bürgerinnen und Bürgern eine gute Informationsplattform und darüber hinaus auch die Möglichkeit bieten, Anregungen in das Vorhaben einzubringen.

► Frage: Welche Möglichkeiten zur Information und Beteiligung der Öffentlichkeit sind im Rahmen der rechtlichen Verfahrensschritte vorgesehen?

Die förmliche Öffentlichkeitsbeteiligung im bergrechtlichen Genehmigungsverfahren ist nur bei Geothermie-Vorhaben vorgesehen, für die ein Planfeststellungsverfahren durchzuführen ist. Das ist der Fall bei UVP (Umweltverträglichkeitsprüfung)-pflichtigen Vorhaben.

Bedürfen Projekte keiner Umweltverträglichkeitsprüfung, ist ein bergrechtliches Betriebsplanverfahren unter Beteiligung der betroffenen Kommunen und Fachbehörden durchzuführen, bei dem darüber hinaus regel-

mäßig auch Umwelt- und Naturschutzverbände beteiligt werden.

Davon unabhängig wirkt die zuständige Behörde bei allen Verfahren auf die Durchführung einer frühen Öffentlichkeitsbeteiligung durch den Projektträger hin, um die Bürgerinnen und Bürger bereits bei der Planung eines Projekts so früh wie möglich miteinzubeziehen. Die frühe Öffentlichkeitsbeteiligung ist für den Vorhabenträger jedoch nicht verpflichtend.

► Frage: Welche Möglichkeiten zur Information und Beteiligung der Öffentlichkeit haben sich über die formellen Instrumente hinaus bewährt?

Der Vorhabenträger bzw. der Projektbetreiber ist für die **Information** und ggf. die **Einbindung** der Öffentlichkeit verantwortlich. Auch wenn dazu gesetzlich nur in bestimmten Fällen eine Verpflichtung besteht, hat es sich bewährt, die Öffentlichkeit frühzeitig, umfassend und kontinuierlich über ein geplantes

Vorhaben zu informieren und mit ihr in den Dialog zu treten. Ein Dialog geht über die reine Information hinaus und erleichtert durch einen gemeinsamen Austausch nicht nur das Verständnis der projektrelevanten Aspekte, sondern ermöglicht darüber hinaus mit der Bürgerschaft ins Gespräch über deren Anliegen

zu kommen. Dies kann beispielsweise mit Dialogveranstaltungen, der Einrichtung von Ansprechpartnern/Sprechstunden für Anliegen der Bürgerschaft, verschiedener Online-Formate wie z.B. Fragen-und-Antworten-Chats, mit Hilfe von Geothermie-Workshops oder Arbeitsgruppen mit Sachverständigen, Gemeindevertretern oder Interessensgruppen erfolgversprechend sein. Aber nicht nur der Vorhabenträger, sondern auch die Standortkommune kann einen Informations- und Diskussionsbedarf der Bürgerschaft positiv aufgreifen und beispielsweise eigene Veranstaltungen organisieren. Darin können Bürger und Bürgerinnen mit projektunabhängigen Experten diskutieren und sich ein eigenes Bild über Chancen und Risiken machen. Die Kommune wird für die Bürgerschaft auch als Ansprechpartner zum aktuellen Stand im jeweiligen Erlaubnis- oder Genehmigungsverfahren gesehen.

In vielen Bereichen der Umwelt- und Infrastrukturplanung haben sich vielseitige Methoden und Instrumente zur **Einbindung und Beteiligung** der örtlichen Bevölkerung bewährt. Dabei kann es darum gehen, lokales Wissen, Präferenzen und Anregungen aus der Bürgerschaft in die Projektplanungen oder in die Gestaltung der kommunikativen Aktivitäten einfließen zu lassen. Dialoggruppen, Bürgerforen, Fokusgruppen, Begleitkreise oder Projektbeiräte sind Beispiele dafür.

In einem Projektbegleitkreis können beispielsweise Projektbetreiber, Planer, betroffene Versorgungsunternehmen und Stadtwerke, Vertreter des Gemeinderats, Fachexperten, Natur- und Umweltschutzverbände, Bürgerinitiativen und Interessengruppen ggf. unter Hinzuziehung einer neutralen Moderation

relevante Inhalte und Verfahrensstände des Projekts besprechen. Ein solcher Begleitkreis kann auch Anregungen zur Frage einer angemessenen Information der breiten Öffentlichkeit geben und dabei ggf. besondere Anliegen und Bedürfnisse vor Ort berücksichtigen. Offenheit auf allen Seiten sowohl für die naturgegebenen, technischen und wirtschaftlichen Realitäten, als auch für Anregungen und Sorgen der betroffenen Bevölkerung erhöhen die Wahrscheinlichkeit für einen gelingenden Austausch und für ein besseres Verständnis für die Realisierung des Projekts.

Gegebenenfalls könnte auch eine **wirtschaftliche Beteiligung** der Bürger und Bürgerinnen zum Beispiel im Rahmen eines Genossenschaftsmodells oder Sponsoring in Betracht kommen, um damit z.B. eine lokale Teilhabe an dem Projekt zu ermöglichen.

Angesichts der Komplexität des Themas stehen insbesondere kleinere Kommunen häufig vor erheblichen Herausforderungen, mitunter begleitet von Auseinandersetzungen und Konflikten. Das vom Land finanzierte „Forum Energiedialog“ (www.energiedialog-bw.de) bietet allen Kommunen im Land kostenfrei Unterstützung an, welche von einem allparteilichen Beraterteam mit mehrjährigen Erfahrungen in diesem Kontext umgesetzt wird. Gemeinsam mit der Kommune wird hierbei nach einem Weg gesucht, Raum für ergebnisoffene Dialoge zu schaffen und entstandene Konflikte fair und sachlich auszutragen. Dialogrunden, Informationsveranstaltungen oder Exkursionen sollen Bürgerinnen und Bürger wie auch Mandatsträger dabei unterstützen, verschiedene Argumente besser abwägen und sich eine fundierte Meinung selbst bilden zu können.

► Frage: Welche Einrichtungen stehen der Öffentlichkeit zur Information zur Verfügung?

Bürger und Bürgerinnen haben unterschiedliche Möglichkeiten, sich über die Chancen und Risiken der Tiefen Geothermie zu informieren. Neben zahlreichen Informationsportalen und

Plattformen wie beispielsweise dem „Informationsportal Tiefe Geothermie“ (www.tiefegeothermie.de/news) bieten auch Behörden wie das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und

Bergbau (LGRB, <https://lgrbwissen.lgrb-bw.de>) sowie beispielsweise Ministerien oder das Umweltbundesamt (www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/geothermie) gebündelte Informationen und aktuelle Zahlen.

Auch auf der Internetseite des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft BW finden sich Informationen zur Nutzung geothermischer Energie (<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/geothermie/>).

Auf der Webseite der Landesenergieagentur KEA-BW (www.kea-bw.de/die-kea-bw) finden vor allem Kommunen aber auch Bürger und Bürgerinnen Beratungsmöglichkeiten. Hochschulen und Universitäten, an denen die Fachgebiete Geologie, Geothermie oder verwandte Themen vertreten sind, können ebenso eine Anlaufstelle sein. Insbesondere das vom Land Baden-Württemberg eingerichtete Landesforschungszentrum Geothermie (LFZG, www.lfzg.de) forscht zu Geothermie, liefert Sachwissen und informiert die Öffentlichkeit.

Mit den Kompetenzzentren Energie hat das Land Baden-Württemberg in den vier Regierungspräsidien zentrale Anlaufstellen rund um die Belange aller Akteure zu den Themen Energie und Klimaschutz aufgebaut.

Darüber hinaus bietet der Besuch einer bereits existierenden Geothermieanlage die Gelegenheit, die Technologie vor Ort kennen zu lernen.

Überblick: Informationsmöglichkeiten bieten

Informationsstellen des Landes

- Umweltministerium BW: www.um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau: www.lgrb-bw.de
- Landesenergieagentur KEA-BW (www.kea-bw.de/die-kea-bw)
- Stabsstellen Energiewende, Windenergie und Klimaschutz der Regierungspräsidien: <https://rp.baden-wuerttemberg.de/themen/energie/>

Forschungseinrichtungen

- Landesforschungszentrum Geothermie LFZG (BW): www.lfzg.de
- Geoforschungszentrum Potsdam: www.gfz-potsdam.de
- Forschungsverbund Erneuerbare Energien: www.fvee.de
- Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik: www.leibniz-liag.de

Informationsangebote des Bundes

- Staatliche Geologische Dienste Deutschlands: www.infogeo.de
- Umweltbundesamt: www.umweltbundesamt.de
- Bundesamt für Strahlenschutz: www.bfs.de

Plattformen/Verbände

- Bundesverband Erneuerbare Energien: www.bee-ev.de
- Bundesverband Geothermie: www.geothermie.de
- Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg e.V.: www.erneuerbare-bw.de

(inter)nationale Kooperationen (z.B. mit Bayern, Frankreich)

- Bayern: Geologischer Dienst Bayern: www.lfu.bayern.de/geologie/geothermie/index.htm, Geothermie_Allianz Bayern: Geothermie-Allianz Bayern: <https://www.mse.tum.de/gab/>
- Frankreich: www.geothermies.fr, <http://labex-geothermie.unistra.fr/en/labex-g-eau-thermie-profonde/>
- Deutsch-Dänischer Dialog Wärmenetze Baden-Württemberg: <https://www.kea-bw.de/waermewende/netzwerk/deutsch-daenischer-dialog-waermewende-baden-wuerttemberg>

Verweise auf externe Web-Seiten

Die vorliegende Broschüre des Landesforschungszentrum Geothermie enthält Verweise (Links) zu Informationsangeboten auf Servern, die nicht der Kontrolle und Verantwortlichkeit des Landesforschungszentrum Geothermie unterliegen. Das Landesforschungszentrum Geothermie übernimmt keine Verantwortung und keine Garantie für diese Informationen und billigt oder unterstützt diese auch nicht inhaltlich.



Sonnenhof-Therme Bad Saulgau © Ingo Rack



12

Beispiele für aufgetretene Probleme bei Tiefen Geothermie-Projekten

Zusammenfassung

■ Bei der weltweiten Nutzung geothermischer Energie sind auch Schäden zu beklagen. Dabei sind vor allem seismische Ereignisse (Bsp. Vendenheim, Frankreich) und Einträge von Tiefenwässern in oberflächennahe Grundwässer zu nennen (Bsp. Landau, Rheinland-Pfalz). Bei den beiden Beispielen handelt es sich um Anlagen/Bohrungen bis ins Kristalline Grundgebirge.

Dabei kam es weder zu Personenschäden noch zu Strukturschäden an Gebäuden. Risse, wie sie auch bei anderen Baumaßnahmen (z.B. Straßenbau) auftreten, sind auch bei der Tiefen Geothermie nicht vollständig auszuschließen.

Einleitung

In der Tiefen Geothermie kam es zu einigen wenigen Sachschadensfällen (keine Personenschäden!). Die meisten Geothermieprojekte arbeiten jedoch unauffällig. Oft ist in der Nachbarschaft nicht einmal bekannt, dass dort in einem Gebäude eine Tiefengeothermieanlage existiert. In der Tiefen Geothermie in Europa ist es weder zu Personenschäden in der Bevölkerung gekommen, noch mussten Strukturschäden an Gebäuden beklagt werden. Gebäudeschäden wie in Staufen, BW, sind durch eine andere Technologie, durch Erdwärmesonden entstanden (Staufen in einer Tiefe < 150 m). Allerdings hatten Geothermieprojekte mit verschiedenen geotechnischen Problemen zu kämpfen und mussten zum Teil wieder aufgegeben werden. In einigen Fällen kam es auch zu Sachschäden, welche das Image in diese Form der erneuerbaren Energie belastet haben. Ausführliche Analysen, überwiegend unter Einbeziehung von Experten-Kommissionen, mündeten in öffentlich zugängliche Untersuchungsberichte. Zusätzlich machten wissenschaftliche Publikationen auch die Originaldaten, beispielsweise über induzierte seismische Ereignisse, zugänglich. Dadurch

► **Frage: Warum wurden in einigen Geothermiebohrungen nicht die erwarteten Fördermengen an geothermalen Tiefenwässern erzielt, so dass komplette Vorhaben aufgegeben werden mussten?**

Die Natur gibt den Rahmen vor. Durch umfangreiche geophysikalische Voruntersuchungen wird nach einer günstigen Stelle für die Tiefbohrungen gesucht. Letztlich kann jedoch nur durch eine Bohrung verlässlich festgestellt werden, ob die Durchlässigkeit im geplanten Aquifer ausreichend ist. Wenn sich wegen zu geringer Durchlässigkeit keine ausreichende Förderrate nutzen lässt (fehlende Fündigkeit), kann die Anlage nicht wirtschaftlich betrieben werden. Wenn eine Bohrung nicht fündig ist, muss sie rückgebaut werden oder sie kann anderswertig Verwendung finden (z.B. als Tiefe Erdwärmesonde). Dabei handelt es sich um das unternehmerische Risiko.

war es möglich, dass auch andere Wissenschaftler die Daten auswerten und eigene Schlussfolgerungen ziehen und publizierten konnten. Aufgrund der zahlreichen Untersuchungsergebnisse konnten neue Schlussfolgerungen über mögliche Schadensursachen abgeleitet werden, die dann in die Planung der Nachfolgeprojekte einfließen.

Dennoch muss eingeräumt werden, dass bedauerlicherweise in der Vergangenheit nicht immer nach dem Stand der Technik vorgegangen wurde. In den letzten 15 Jahren wurde in der Geothermie eine außerordentliche Lernkurve und gewaltige Fortschritte erzielt, neue gesetzliche Regelungen erlassen und Monitoringsysteme verpflichtend eingeführt, die insgesamt grundsätzlich zu einer erhöhten Sicherheit beitragen. Hinzu kamen Weiterentwicklung bei der geophysikalischen Untergrunderkundung sowie geomechanische Modellierungen im Vorfeld der Erschließung. Der nachfolgende Fragenkatalog skizziert wichtige Problembereiche und stellt Lösungsmöglichkeiten vor.

Die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Geothermieprojekten hängt bei hydrothermalen Konzepten entscheidend von der Zuflussrate an heißem Thermalwasser aus dem anstehenden Gebirge in die Bohrung ab. Die Größe wird in Liter/Sekunde (oder kg/s) gemessen und integriert eine längere, offene Bohrstrecke mit oder ohne Filterrohr (Abbildung 3.2). Vor Bohrbeginn nehmen die Projektplaner eine Schätzung des Zuflusses vor, wobei oft bekannte Durchlässigkeiten aus Nachbarbohrungen, die denselben Horizont erschließen, herangezogen werden. Werden die Förderraten beim Test wegen zu geringer Durchlässigkeit nicht erzielt, gerät das Projekt wirtschaftlich unter Druck.

In diesem Fall ist vom Betreiber zu entscheiden, ob eine Stimulation (Verbesserung der Anbindung der Bohrung an das Reservoir) des thermalen Aquifers sinnvoll und technisch möglich ist, oder ob eine Verfüllung des Bohrlochs (oder anderswertige Verwendung) letztendlich die wirtschaftlichere Lösung ist.

Soll versucht werden, die Zuflussrate zu erhöhen, kann eine Säurestimulation oder eine thermische Stimulation angewendet werden. Mittels Säurestimulation wird die Auflösung

säurelöslicher Gesteinsanteile und Ablagerungen (z.B. Calciumkarbonat) im Aquifer versucht, um die Durchgängigkeit für die Fluidzirkulation zu erhöhen oder zu reaktivieren. Die Idee der thermischen Stimulation ist, durch Zuführung von kaltem Wasser in einen heißen Aquifer eine Mikroklüftung zu erzeugen, die ebenfalls die Durchlässigkeit erhöhen kann. Eine Stimulation gibt jedoch keine Erfolgsgarantie, sondern ist letztlich ein geotechnischer Versuch, der gelingen oder scheitern kann.

► **Frage: Kam es in der Vergangenheit zu zeitweiligen Austritten von Bohrspülung oder Thermalwasser in andere Tiefenhorizonte zu Schäden an Bauwerken und Verkehrswegen, falls ja – warum?**

Unbeabsichtigte Austritte von Bohrspülung oder Thermalwasser in Tiefenhorizonte außerhalb des Reservoirs sind zu vermeiden. In der Vergangenheit gab es beispielsweise bei

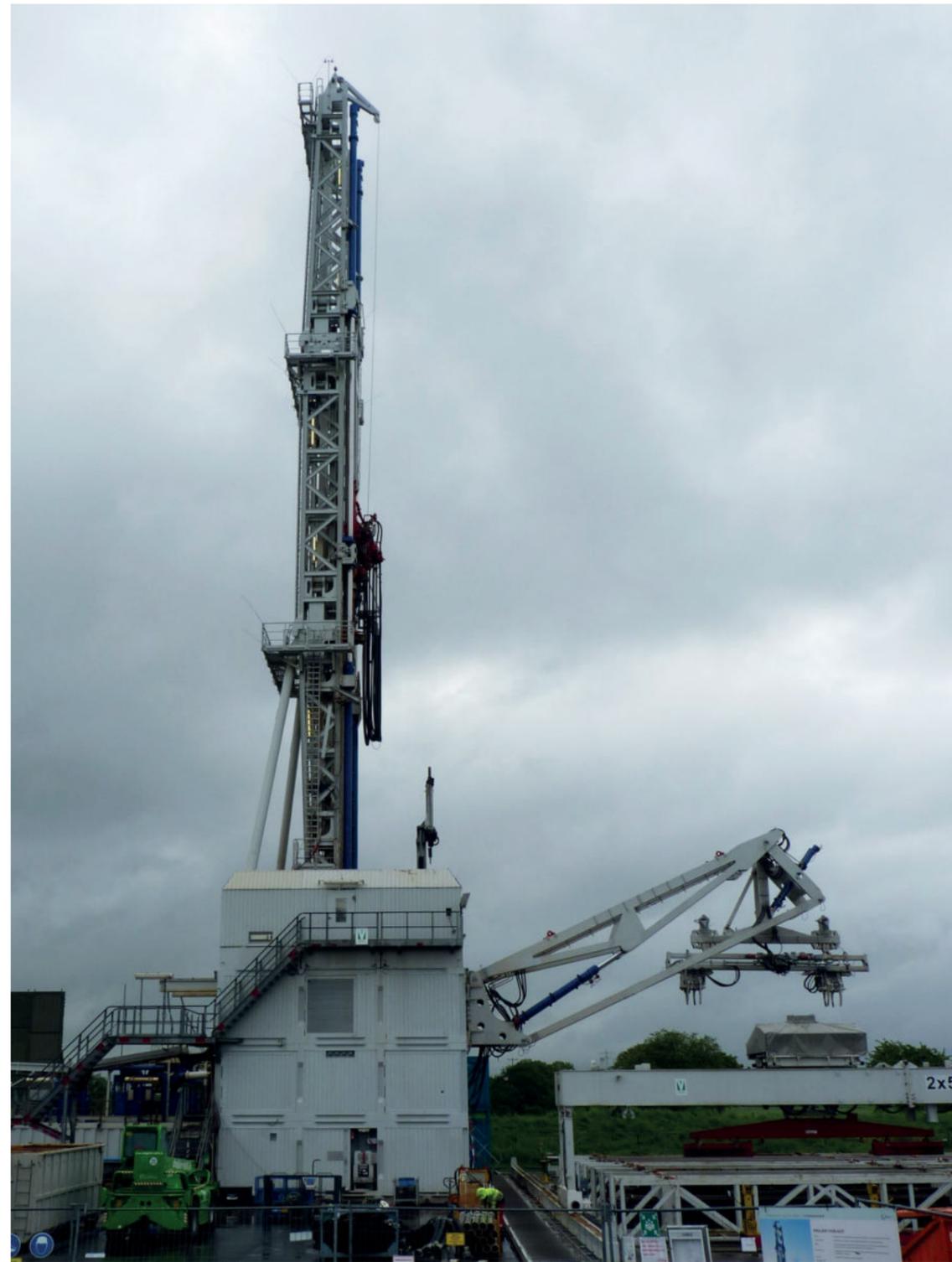
der Anlage in Landau durch unsachgemäßen Ausbau der Bohrung einen unbeabsichtigten Austritt von Thermalwasser, der zu Straßenschäden geführt hat.



Seismik Datenaufnahme © Stober

Um dies zu vermeiden wird in der klassischen Bohrtechnik eine Bohrung „ausgebaut“. D.h.

eine fertig verrohrte und zementiert Tiefbohrung besteht aus einer teleskopartig ineinander



Tiefbohrung Brühl © Stober

dergreifenden Abfolge von Stahlrohren (Rohrtouren/Casing) (Abbildung 3.2). Es ist nicht bekannt, dass Bohrungen, die nach diesem

Standard (API-Standard, BVEG-Richtlinien) ausgebaut waren, zu Schäden geführt haben.

► **Frage: Geothermievorhaben in den Nachbarländern Schweiz und Frankreich lösten kleinere Erdbeben aus, die lokal an der Tagesoberfläche zu spüren waren. Könnte das auch bei den geplanten Vorhaben in Baden-Württemberg eintreten?**

Die Entwicklung Tiefer Geothermieprojekte in den Nachbarländern Schweiz und Frankreich, die zu seismischen Ereignissen geführt haben, beruhen im Wesentlichen auf dem EGS-Konzept (Enhanced Geothermal Systems). Es handelt sich hierbei um Tiefe Geothermieprojekte, die kristallines Grundgebirge mit geringer Primär-Durchlässigkeit durch massive hydraulische Stimulation erschließen (Abbildung 1.1).

Es wird derzeit in Baden-Württemberg vermieden, Geothermiebohrungen bis nahe an die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges und in das kristalline Grundgebirge abzuteufen. Der Stand von Wissenschaft und Technik wird weiter beobachtet, in der Hoffnung in Zukunft auch diese Ressource ohne Gefährdung nutzen zu können.

► **Frage: Von Geothermieanlagen mit langer Betriebsdauer ist bekannt, dass bestimmte Anlagenkomponenten eine radioaktive Kontamination aufweisen und radioaktives Radon-Gas mit dem Thermalwasser aufsteigt. Welche Gefahren bestehen für die Bevölkerung in der direkten Nachbarschaft?**

Durch Abkühlung und Druckentlastung von Tiefenwasser während des Aufstiegs in die oberirdische Geothermieanlage können sich mineralische Ausfällungen wie beispielsweise Kalk oder Baryt in den oberflächennahen Teilen einer Geothermieanlage, insbesondere im Wärmeübertrager oder der Pumpe, bilden und dort ablagern. Primäres Interesse des Anlagenbetreibers ist es, derartige Ausfällungen zu unterbinden oder zumindest so zu minimieren, dass es dadurch zu keinen Anlagenschäden bzw. zu keiner Minderung des Durchflusses kommen kann. Standardmäßig werden daher Geothermieanlagen zur Vermeidung von Ausfällungen (oder zur Vermeidung von Entgasungen im Thermalwasser) über Tage unter Druck gefahren. Zusätzlich können zur Vermeidung oder Minimierung von Ausfällungen auch sog. Inhibitoren eingesetzt werden.

einzuhalten (siehe hierzu die detaillierten Ausführungen in Abschnitt 3). Mit sog. Scales (Ausfällungen) behaftete Installationen müssen regelmäßig durch Fachpersonal gereinigt und erforderlichenfalls ausgetauscht werden. Sollten Gasmessungen Radon nachweisen, das sich möglicherweise aus dem Thermalwasser gelöst hat, muss das radioaktive Gas durch ausreichende Ventilation aus der Betriebsstätte (insbesondere bei Wartungsarbeiten) entfernt werden, um eine Akkumulation und damit eine Gefahr für Personen zu vermeiden. Im Routinebetrieb bei geschlossenen Systemen wird das Radon im Thermalwasser wieder zurückgeführt. Beim Tiefen Geothermie Heizkraftwerk Bruchsal werden beispielsweise die Grenzwerte für gelöstes Radon im Thermalwasser um den Faktor 3 unterschritten.

Die Problematik radioaktiver Kontamination ist in Abschnitt 3 behandelt. Treten radioaktive Kontaminationen auf, sind die Richtlinien der geltenden Strahlenschutzverordnung

Aus Deutschland sind uns bei der Tiefen Geothermie keine Gefährdungen aufgrund des Freiwerdens von radioaktiven Stoffen bekannt.



13

Schriftenverzeichnis

Zusammenfassung

- Rechtliche Vorschriften, Verordnungen, Leitfäden
- Zitierte und weiterführende Literatur

Rechtliche Vorschriften, Verordnungen, Leitfäden

- **AGFW (2013):** Arbeitsblatt FW 510 – Anforderungen an das Kreislaufwasser von Industrie- und Fernwärmeheizungsanlagen sowie Hinweise für deren Betrieb.- AGFW Regelwerk, Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
- **Allgemeine Bundesbergverordnung** – ABBergV, § 22c (1), Bergbauverordnung für alle bergbaulichen Bereiche, zuletzt geändert 2017, Service des Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz sowie des Bundesamts für Justiz.
- **Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV)** Baulärm und Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)
- **API (2005):** API standard 14B (fifth edition), Design, Installation, Repair and Operation of Subsurface Safety Valve System. API Publishing Services, 1220 L Street, N.W., Washington, D.C.
- **API (2006):** API SPEC 5CT/ISO 11960, Specification for Casing and Tubing. API Publishing Services, 1220 L Street, NW, Washington D.C.
- **BVEG (2021):** Leitfaden Bohrungsintegrität.- Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V., 107 S.
- **BauGB,** Baugesetzbuch
- **BbergG,** Bundesberggesetz
- **BBodSchG,** Bundes-Bodenschutzgesetz
- **BimSchG,** Bundesimmissionsschutzgesetz
- **BNatSchG,** Bundesnaturschutzgesetz
- **DIN 4150-3 (1999):** Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Normenausschuss im Bauwesen (NABau), DIN-Ausgabe 1999-02, Berlin.
- **DIN 4149 (2005):** 2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Normenausschuss im Bauwesen (NABau), DIN – April 2005, Berlin.
- **DVGW W101 (2021):** Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; Teil 1: Schutzgebiete für Grundwasser.- DVGW Regelwerk, 27 S., Bonn.
- **EWärmeG,** Erneuerbare-Wärme-Gesetz
- **EEWärmeG,** Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz
- **KrWG,** Kreislaufwirtschaftsgesetz
- **LBO,** Landesbauordnung
- **LplG,** Landesplanungsgesetz
- **LQS EWS (2011):** Leitlinien Qualitätssicherung für Erdwärmesonden des Umweltministeriums Baden-Württemberg, aktualisiert 2019.
- **NatSchG BW,** Naturschutzgesetz des Landes BW NORSOK D-010 (2013): NORSOK standard. Well integrity in drilling and well operations.- Standards Norway.
- **Strahlenschutzgesetz** vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), zuletzt geändert am 23. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2232).
- **Strahlenschutzverordnung** vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036), zuletzt geändert am 20. November 2020 (BGBl. I S. 2502).
- **UVPG,** Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
- **UVP-V** Bergbau
- **UWvG,** Umweltverwaltungsgesetz
- **VAwS,** Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
- **Verwaltungsvorschrift (VwV)** Öffentlichkeitsbeteiligung, und dazu Planungsleitfäden
- **WG,** Wassergesetz des Landes Baden-Württemberg
- **WHG,** Wasserhaushaltsgesetz des Bundes

Zitierte und weiterführende Literatur

- **Agemar, T., Hese, F., Moeck, I., Stober, I. (2017):** Kriterienkatalog für die Erfassung tiefreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland.- Z. Dt. Ges. Geowiss., 168(2), 285-300.
- **Agemar, T., Suchi, E. & Moeck, I. (2018):** Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende.-, Leibniz-Institut für Angewandte

Geophysik, Bericht 0135181m, 14 S.; Hannover.

- **Agemar, T., Weber, J. & Moeck, I.S. (2018):** Assessment and Public Reporting of Geothermal Resources in Germany: Review and Outlook.- *Energies*, 11: 332-349; doi:10.3390/en11020332.
- **Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H. & Neu, T. (2014):** Handbuch Tiefe Geothermie – Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung.- 854 S., Springer Spektrum; Berlin, Heidelberg.
- **Barth, A., Gaucher, E. (2012):** Monitoring geothermaler Felder durch seismische Netzwerke: Vorgaben und Chancen.- *bbr*, 56-61.
- **Bertleff, B., Joachim, H., Kozirowski, G., Leiber, J., Ohmert, W., Prestl, R., Stober, I., Strayle, G., Villinger, E. & Werner, J. (1988):** Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg.- Jahreshefte des Geologischen Landesamts Baden-Württemberg, 30: 27-116; Freiburg im Breisgau.
- **BINE (2016):** Kommunikationskonzept Tiefe Geothermie.- BINE Informationsdienst Projektinfo 17, 4 S., Bonn.
- **BGR (2018):** BGR Energiestudie – Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung.- 178 S.; Hannover.
- **BMWi (2020):** Marktanalyse tiefe Geothermie.- <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/M-O/marktanalyse-tiefe-geothermie.html>, aufgerufen am 01.12.2020.
- **BMU (2007):** Tiefe Geothermie in Deutschland.- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.- 44 S.; Berlin.
- **Bracke, R., Häder, M., Exner, S., Görke, B., Hoffmann, M. & Winkler, K. (2008):** Analyse der Wertschöpfungsquelle Geothermie in der Metropole Ruhr.- Hochschule Bochum, Geothermie-Zentrum.- 100 S.; Bochum.
- **Buijze L, van Bijsterveldt L, Cremer H, Paap B, Veldkamp H, Wassing BBT, et al. (2019):** Review of induced seismicity in geothermal systems worldwide and implications for geothermal systems in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences* ;98, (doi.org/10.1017/njg.2019.6).
- **Bundesverband Geothermie (2017):** Stand und Forschungsbedarf in der Geothermie - P Positionspapier des Bundesverbandes Geothermie e. V. (BVG) zum 7. Energieforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).- 19 S.; Berlin.
- **Choi J-H, Edwards P, Ko K, Kim Y-S (2016):** Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach.- *Earth-Science Reviews*, 152, 70-87.
- **Evans KF, Zappone A, Kraft T, Deichmann N, Moia F. (2012):** A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO2 reservoirs in Europe.- *Geothermics*, 41, 30–54 (doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.08.00).
- **Eyerer, S., Schifflechner, C., Hofbauer, S., Wieland, C., Zosseder, K., Bauer, W., Baumann, T., Heberle, F., Hackl, C., Irl, M. & Spliethoff, H. (2017):** Potenzial der hydrothermalen Geothermie zur Stromerzeugung in Deutschland.- *Geothermie-Allian Bayern*, 52 S.; München.
- **Fuhrmann, T., Cuenca, M.C., Knöpfler, A., van Leijen, F.J., Mayer, M., Westerhaus, M., Hansser, R.F., Heck, B. (2015):** Estimation of small surface displacements in the Upper Rhine Graben area from a combined analysis of PS-InSAR, levelling and GNSS data.- *Geophys. J. Int.*, p. 1-14.
- **Häfner, F., Sames, D. & Voigt, H.-D. (1992):** Wärme- und Stofftransport – Mathematische Methoden.- 626 S., Springer; Berlin, Heidelberg.
- **Harnischmacher, S. & Zepp, H. (2010):** Bergbaubedingte Höhenänderungen im Ruhrgebiet – Eine Analyse auf Basis digitalisierter historischer Karten.- *zfv*, H. 6, 135 Jg., 386-397.
- **Hartmann von, H., Beilecke, T., Buness, H., Musmann, P. & Schulz, R. (2015):** Seismische Exploration für die tiefe Geothermie.- *Geologisches Jahrbuch B*, 104: 271 S., Schweizerbart; Stuttgart, Hannover.
- **Heidenbach, O., M. Rajabi, X. Cui, K. Fuchs, B. Müller, J. Reinecker, K. Reiter, M. Tingay, F. Wenzel, F. Xie, M. O. Ziegler, M.-L. Zoback, and M. D. Zoback. (2018):** The World

Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744, 484-498, (doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007)

- **Heumann, A. & Huenges, E. (2017):** Technologiebericht 1.2 Tiefen Geothermie. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 49 S.; Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- **Hincks T, Aspinall W, Cooke R, Gernon T. (2018):** Oklahoma's induced seismicity strongly linked to wastewater injection depth.- *Science*, 359, 1251-1255. (doi.org/10.1126/science.aap7911).
- **Kaltschmitt, M., Huenges, E., Wolff, H. (1999):** Energie aus Erdwärme.- 265 S., DVG; Stuttgart.
- **Bönnemann, C., Schmidt, B., Ritter, J., Gestermann, N., Plenefisch, T., Wegler, U. (2010):** Das seismische Ereignis bei Landau vom 15. August 2009 - Abschlussbericht der Expertengruppe „Seismisches Risiko bei hydrothermalen Geothermie“.- 55 S.; Hannover.
- **Kohl, T., Blum, P., Mutschler, T., Schilling, F., Müller, B., Gaucher, E., Bucher, K., Joswig, M., Doherr, D., Koenigsdorff, R. (2014):** Verbundvorhaben: Basisdaten für tiefe Geothermievorhaben in Baden-Württemberg: Geothermale Fluide, tektonische Spannungen und Seismizität – Abschlußbericht.- 84 S., KIT; Karlsruhe
- **Lauf, T., Memmler, M., Schneider, S. (2018):** Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermeintlichen Emissionen im Jahr 2018.- *Umwelt-Bundesamt, Climate Change*, 37/2019; Dessau-Roßlau.
- **LGRB (2010):** Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br.- Sachstandsbericht vom 01.03.2010, Az.: 94-4763//10-563
- **LFZG (2017):** Handlungsleitfaden Tiefe Geothermie.-, Landesforschungszentrum Geothermie (LFZG), 87 S., Karlsruhe.
- **Lentsch, D. & Schubert, A. (2014):** Budgeting

and risk assessment for deep geothermal wells.- *OIL GAS European Magazine* 1/2014, 40-42.

- **Mahmoudpour, M., Khomehchiyan, M., Nikudel, M.R., Ghassemi, M.R. (2016):** Numerical simulation and prediction of regional land subsidence Caused by Groundwater Exploitation in the Southwest Plain of Tehran, Iran.- *Engineering Geology*, 201, 6-28.
- **MWKEL (2014):** Tiefe Geothermie Vorderpfalz – Ein vom Land Rheinland-Pfalz initiiertes Verfahren zur Konfliktlösung/Konfliktklärung durch Mediation.- Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung.- 20 S.; Mainz.
- **Plenefisch, T., Brückner, L., Ceranna, L., Gerstermann, N., Houben, G., Tischner, T., Wegler, U., Wellbrink, M., Bönnemann, C. (2015):** Tiefe Geothermie – mögliche Umweltauswirkungen infolge hydraulischer und chemischer Stimulation.- *Umwelt-Bundesamt, Texte* 104/2015, 166 S.; Dessau-Roßlau.
- **Rogge, S. (2004):** Geothermische Stromerzeugung in Deutschland – Ökonomie, Ökologie und Potenziale.- *Dissertation, Technische Universität Berlin, Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften*, 119 S.; Berlin
- **Schellschmidt, R. & Stober, I. (2008):** Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg.- *LGRB-Fachbericht*, 2: 28 S.; Freiburg im Breisgau.
- **Schulz, R. & Knopf, S. (2013):** Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie.- *Endbericht, Leibniz-Institut für Angewandte Geowissenschaften und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*, 111 S.; Hannover.
- **Schulz, R. & Schellschmidt, R. (1991):** Das Temperaturfeld im südlichen Oberrheingraben.- *Geologisches Jahrbuch*, E 48: 153-165; Hannover.
- **Schulz, I., Steiner, U., Schubert, A. (2017):** Erfolgsfaktoren bei Projekten der Tiefen Geothermie – Erfahrungen aus dem Bayerischen Molassebecken.- *Erdöl Erdgas Kohle*, 133: 73-79; Hamburg.

- **Skoumal, R.J., Ries, R., Brudzinski, M.R., Babbour, A.J., Currie, B.S. (2018):** Earthquakes Induced by Hydraulic Fracturing Are Pervasive in Oklahoma.- *J Geophys Res Solid Earth*, 123, (doi.org/10.1029/2018JB01679)
- **Stober, I. & Bucher, K. (2020):** Geothermie.- 3. Auflage, 386 S. Springer Spektrum; Berlin, Heidelberg.
- **Stober, I. & Bucher, K. (2015):** Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary aquifers of the Upper Rhine Graben, Europe.- *Geofluids*, 15, 464-482 (doi: 10.1111/gfl.12122).
- **Stober, I. (2013):** Die thermalen Karbonat-Aquifere Oberjura und Oberer Muschelkalk im Südwestdeutschen Alpenvorland.- *Grundwasser*, 18(4), 259-269, (doi: 10.1007/s00767-013-0236-2).
- **Stober, I., Jodocy, M., Burisch, M. (2013):** Auswirkungen der physikalischen Eigenschaften von Tiefenwässern auf die thermi-

sche Leistung von Geothermieanlagen und die Aquiferparameter.- *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 41: 9-20, Berlin.

- **Van Thienen-Visser, K. (2015):** Induced seismicity in the Groningen gas field: History and recent developments.- *SEG - Society of Exploration Geophysicists*, 34, 6, 664-671.
- **UM (2019):** Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2019.- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 40 S., Stand Oktober 2020, Stuttgart.
- **Vorhoff, S.V. (2018):** Hybridkraftwerk Geothermie mit solarer Überhitzung – Potenzialstudie, Konzeptionierung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.- *Master Thesis, Europa-Universität Flensburg, Interdisziplinäres Institut für Umwelt-, Sozial- und Humanwissenschaften, Department Energie- und Umweltmanagement*.- 119 S.; Flensburg.



Großkalibriges Bohrwerkzeug © Stober



14

Glossar

Umschreibung der Fachwörter

- Die nachstehenden Fachwörter wurden möglichst einfach beschrieben und erklärt, ohne Anspruch auf die oftmals korrekten und fachlich sehr komplizierten Definitionen

| | |
|-----------------------------|---|
| Anhydrit | Mineral (CaSO_4), das kein Kristallwasser besitzt und sich bei Wasserzufuhr in Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) umwandeln kann. Der Vorgang ist mit einer starken Volumenvergrößerung verbunden und kann zu Hebungen führen. |
| Abteufen | Eine Bohrung bohren. |
| Aquifer | Grundwasser führende Gesteinsschicht im geologischen Untergrund (Grundwasserleiter). Nach dem Durchflussmuster werden Porenaquifere und Kluftaquifere unterschieden. |
| Aquiferspeicher | Grundwasser führende, poröse Gesteinsschicht, welcher mit Hilfe von Bohrungen Wärme zugeführt oder entzogen werden kann. Sie dient dann als regenerierbarer Energiespeicher. |
| Bergbauberechtigung | Konzession; gewährt das ausschließliche Recht zur Erkundung (sog. Erlaubnis) bzw. Gewinnung (sog. Bewilligung), aber berechtigt nicht zur Ausführung konkreter Tätigkeiten im Feld. |
| Bergfreier Bodenschatz | Bodenschatz, der nicht zum Grundeigentum gehört (hier: Erdwärme) |
| Biozönose | Lebensgemeinschaft von Organismen verschiedener Tier-, Pflanzen- und Pilzarten (Biotop). |
| Bodenschwinggeschwindigkeit | Die Schwinggeschwindigkeit (Phys.: Schnelle) der Bodenbewegung, oder genauer ihr Maximalwert ist der Messwert mit dem mögliche Schadenswirkungen von Erschütterungen auf Gebäude beurteilt werden müssen. |
| Bohrklein | Das Bohrklein (engl. cuttings) ist das bei einer Bohrung durch den Bohrprozess zertrümmerte Gestein, das mit der Bohrspülung zur Erdoberfläche gebracht wird. |
| Bohrlochverrohrung | Rohrstrecke, mit der das Bohrloch ausgekleidet ist (engl. casing) |
| Bohrspülung | Flüssigkeit, die bei Bohrungen durch das Bohrloch gepumpt wird (Spülungskreislauf). Dadurch wird das Bohrklein zur Erdoberfläche transportiert. |
| Bohrspülungsverlust | Im noch nicht verrohrten Bohrloch kann ein Teil der Bohrspülung unter bestimmten Voraussetzungen in poröses Gestein eindringen und so dem Spülungskreislauf entzogen werden (Verlust). |
| Brauchwasser | Wasser, das nicht als Trinkwasser genutzt werden kann, aber dennoch gewisse Anforderungen an Mindesthygiene erfüllt. |
| Casing | siehe Bohrlochverrohrung |
| Dosimeter | Technisches Gerät zur Messung der Strahlendosis im Rahmen des Strahlenschutzes. |
| Dublette | Gekoppeltes System von mindestens einer Injektions- und einer Produktionsbohrung eines Geothermiekraftwerks zur Gewinnung geothermischer Wärmeenergie. |
| EGS System | Engineered Geothermal Systems (EGS). Als EGS Systeme werden geothermische Konzepte verstanden, bei denen gezielt die Durchlässigkeit des Zielhorizontes erhöht wird, i.d.R. durch Aufbrechen von Gesteinen. |
| Erdfall | Senke an der Erdoberfläche, die durch Einbrechen von Deckschichten über einem natürlichen Hohlraum im Untergrund entsteht. Der Hohlraum entsteht i.d.R. durch Auflösung wasserlöslicher Gesteine. |

| | |
|------------------------|---|
| Erdwärmesonde | Rohrsystem, das in eine Bohrung (meist ca. 100 m tief) eingebaut wird. In dem Rohrsystem zirkuliert eine Flüssigkeit, die dem Erdreich Wärme entzieht (Erdwärmeübertrager). |
| Explorationsmaßnahme | Geotechnische Erkundung des Untergrunds mit verschiedenen geologischen und/oder geophysikalischen Methoden. |
| Expositionspfad | Weg radioaktiver Stoffe von der Ableitung aus einer Anlage oder Einrichtung über einen Ausbreitungs- oder Transportvorgang bis hin zu einer Strahlenexposition des Menschen |
| Gebirgsspannung | Spannungen (Kraft pro Fläche), die durch verschiedene Vorgänge (Bewegung von Erdkrustensegmenten, Hebungen, Senkungen etc.) im Untergrund entstehen (engl. stress). |
| geklüftet | Festgesteine, die von Rissen oder größeren Brüchen durchsetzt sind, werden als geklüftet bezeichnet |
| Gips | Sulfatmineral ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), siehe Anhydrit |
| Grundgebirge | Überwiegend kristalline Gesteine, aus Graniten und Gneisen bestehend. |
| Grundlast | Grundlast ist diejenige Energiemenge, die dauerhaft nachgefragt und die im Tages- bzw. Jahresverlauf nie unterschritten wird. |
| Grundwasser | Wasser im Untergrund, das fließen kann. Trinkwasser ist nun ein sehr kleiner Teil davon und i.d.R. nur in oberflächennahen Horizonten vorhanden. |
| Grundwasserleiter | Grundwasser führende Gesteinsschicht im geologischen Untergrund (siehe Aquifer). |
| Grundwasserspiegel | Ausgleichsfläche zwischen dem Druck des Grundwassers und dem Druck der Atmosphäre. Er ergibt sich durch Interpolation gemessener Grundwasserstände. |
| Grundwasserstand | Der Grundwasserstand wird in Bohrungen als Druck oder Höhe des Wasserstandes gemessen und bezieht sich immer nur auf einen Grundwasserleiter. |
| Heilquelle | Quelle mit heilkräftigem Wasser, wobei es sich um eine natürliche Quelle aber auch um Wasser aus einer Bohrung handeln kann. Das Wasser muss bestimmte Voraussetzungen aufweisen. |
| Hybridanlage | Kraftwerksanlage, deren Energiegewinnung auf mehreren, technisch gekoppelten Gewinnungsformen (z.B. Solar, Biomasse, Geothermie, Windkraft) beruht. |
| hydrothermal | Die hydrothermale Geothermie nutzt warme bis heiße Wässer. Diese werden in tieferen Schichten im Untergrund angetroffen. |
| Induzierte Seismizität | Durch menschliche Aktivitäten verursachte Erdbeben. Es handelt sich dabei um überwiegend kleinere seismische Ereignisse, d.h. kaum oder nicht spürbare Erdbeben. |
| Inhibitor | Stoffe, die Ausfällungen aus dem Thermalwasser verhindern bzw. stark reduzieren. |
| Injektion | Injektion beschreibt das Zurückführen von Flüssigkeiten (i.d.R. Wasser) in den Untergrund. |
| Injektionsbereich | Bohrlochnaher Bereich, in welchem sich die injizierte Flüssigkeit im Untergrund ausbreitet. |
| Injektionsbohrung | Bohrung zum Einbringen (Zurückführen) einer Flüssigkeit in den Untergrund. |

| | |
|------------------------------|--|
| Injektionsdruck | Druck, mit dem die Flüssigkeit in den Untergrund eingebracht wird. Er ist von der Durchlässigkeit und der Flüssigkeits-Rate abhängig. |
| Integrität einer Bohrung | Vollkommene Dichtigkeit einer Bohrung im Verrohrten Bereich oberhalb des Nutzhorizontes durch lückenlose Verbindungen zwischen der Verrohrung, der Zementation und dem Bohrkopfs. |
| Karst | Lösungserscheinungen von wasserlöslichen Gesteinen (z.B. Kalkstein, Gips). Im Untergrund handelt es sich um Hohlräume. |
| Kristallingestein | Gesteine die aus magmatischen oder metamorphen Vorgängen in der Erdkruste hervorgehen (z.B. Granite, Gneise). |
| Lösungsinhalt | Im Grundwasser gelöste positiv und negativ geladene Ionen. Die Hauptinhaltsstoffe sind Kalzium, Magnesium, Natrium, Kalium sowie Hydrogenkarbonat, Chlorid und Sulfat. Hinzu kommen weitere ungeladene Inhaltsstoffe. |
| Magnitude | Magnitude wird in der Seismologie als Maßeinheit für die Stärke eines Erdbebens verwendet. |
| Markierungsversuch | Als Markierungsversuch bezeichnet man die Zugabe eines Markierungsstoffes (Tracer) in ein Grundwasserfließsystem zur Bestimmung von Fließrichtung, Fließgeschwindigkeit und Ausbreitung des eingebrachten Stoffes. |
| Mikroklüftung | Kleine Klüfte |
| Molassebecken | Baden-Württemberg: Bezeichnung für den Raum zwischen Donau und Bodensee, in dem die geologischen Schichten nach Südosten abtauchen. |
| Monitoring | Systematische Erfassung, Messung und Aufzeichnung. |
| Natürliche Seismizität | Durch tektonische (natürliche) Vorgänge in der Erde verursachte Erdbeben, im Gegensatz zur induzierten Seismizität. |
| Porosität | Hohlraumanteil in einem Locker- oder Festgestein. |
| Oberflächennahes Grundwasser | Alle oberflächennahe Grundwasserleiter, in welchen Benutzungen (Trink- und Brauchwasser) ausgenommen thermale Nutzungen vorkommen. |
| Quelldruck | Durch Wasseraufnahme dehnen sich manche Minerale aus. Der Quelldruck gibt dabei an, wieviel Kraft pro Fläche (Druck) durch das Quellen maximal erzeugt werden kann. |
| Radionuklid | Als Radionuklide oder radioaktive Nuklide bezeichnet man instabile Atomsorten, die somit dann radioaktiv sind. |
| Reinjektion | Rückführung des geförderten Thermalwassers nach Wärmeentzug bei einem geothermalen Kreislauf. |
| Ringraum | Begriff aus der Tiefbohrtechnik: Zwischenraum zwischen den Verrohrungen oder zwischen Verrohrung und Gebirge oder zwischen Bohrgestänge und Gebirge. |
| Rohrtour | Siehe Bohrlochverrohrung. Rohrstrecke, mit der das Bohrloch ausgekleidet wird. Bei einer Tiefbohrung besteht sie aus teleskopartig-konzentrisch ineinander steckenden Metallrohren, wobei diese Rohrelemente miteinander verschraubt sind. |
| Sedimentgestein | Sedimentgesteine sind verfestigte Ablagerungen. |
| Seismizität | Gesamtheit aller Erdbebeneerscheinungen eines Gebietes. |

| | |
|-----------------------|---|
| Sidetrack | Nachträgliche Bohrung aus einer bereits existierenden Tiefbohrung heraus in eine andere Richtung. |
| Scale | Ablagerung bzw. Ausfällung aus Wasser, das bezüglich des „Scale-Materials“ übersättigt ist. |
| Sinter | Ablagerung bzw. Ausfällung eines Minerals aus Wasser (engl. scale). |
| Sprengdruck | Druckbeaufschlagung auf den natürlichen Porendruck in einem porösen Gestein, der die Bindungskraft übersteigt und zu einer nicht umkehrbaren Rissbildung führt (engl. frac pressure). |
| Spülung | Vgl. Bohrspülung. |
| Stimulation | Verschiedene Verfahren, um die Durchlässigkeit eines Gesteins zu erhöhen. |
| Störung | Tektonische Verwerfung in einem Gestein. |
| Strahlenexposition | Einwirkung ionisierter Strahlung auf Lebewesen oder Materie. |
| Tracerversuch | Vgl. Markierungsversuch |
| Trinkwasser | Trinkwasser ist nun ein sehr kleiner Teil des Grundwassers und i.d.R. nur in oberflächennahen Horizonten (< 400 m unter Gelände) vorhanden. Es muss spezielle qualitative und chemische Anforderungen erfüllen. |
| Trinkwasserschutzzone | Wasserschutzgebiete sind zum Schutz des Trinkwassers in 3 Schutzzone untergliedert. In Trinkwasserschutzgebieten sind bestimmte Maßnahmen nicht erlaubt oder nur stark eingeschränkt möglich. |
| Umweltthermie | Techniken der Umweltthermie beziehen die Wärme aus der Luft oder dem Wasser. |
| Verkarstung | Hohlräume in kalkigen oder gipshaltigen Gesteinsformationen, die auf Lösungsvorgänge des Gesteins zurückgehen (vgl. Karst). |
| Versatz | Vertikal- und Lateralverschiebung eines gleichalten Gesteinspakets. |
| Volllaststundenanteil | Stundenmäßiger Anteil der Energiegewinnung eines Kraftwerks unter voller Auslastung aller technischen Möglichkeiten. |
| Wärmepumpe | Technische Maschine zur Anhebung der Temperatur zumeist unter Einsatz elektrischer Energie. |
| Wasserschutzgebiet | Theoretischer Einzugsbereich von Grundwasser, das meistens für Trinkwasser genutzt wird (vgl. Trinkwasserschutzzone). |
| Zerbrechungsdruck | Druck, der zum Zerschlagen oder Aufreißen eines Gesteins führt. |



LANDES
FORSCHUNGS
ZENTRUM
GEOTHERMIE

**Landesforschungszentrum Geothermie
KIT Campus Süd
Adenauerring 20b, Gebäude 50.40
76131 Karlsruhe, Baden-Württemberg**