



Hintergrundpapier zur Stimulation geothermischer Reservoire¹

1. Inhaltsverzeichnis

1. Inhaltsverzeichnis	1
2. Einleitung	2
3. Tiefengeothermie in Deutschland	3
3.1 Geothermische Regionen	3
3.2 Geothermiebohrungen und geothermische Dubletten	5
3.3 Stimulationsverfahren	8
3.3.1 Hydraulische Stimulation	8
3.3.2 Chemische Stimulation (Säurestimulation)	10
3.3.3 Stimulation von geothermischen Reservoirs in Deutschland	11
4. Risikobewertung geothermischer Stimulationsmaßnahmen	13
4.1 Bereitstellung und Aufbereitung von Frischwasser	13
4.2 Rissausbreitung	14
4.3 Freisetzen von Gasen aus der Formation	17
4.4 Freisetzen von Formationsfluid, Stimulationsmittel und Zusatzstoffen	18
4.4.1 Formationsfluid	19
4.4.2 Stimulationsmittel	19
4.4.3 Zusatzstoffe	20
4.5 Ausfällung von Festpartikeln aus dem Rücklauf bzw. produziertem Wasser	21
4.6 Geräuschentwicklung	22
4.7 Induzierte Seismizität	22
5. Zusammenfassende Bewertung der Auswirkungen geothermischer Stimulationsmaßnahmen	23
6. Genehmigungen und Kontrolle	25
7. Weiterführende Literatur und Internetseiten	26

¹ **Dieses Hintergrundpapier ist ein Papier des GtV-Bundesverbandes Geothermie.** Die inhaltliche Verantwortung trägt das Präsidium des Bundesverbandes.

Das Hintergrundpapier wurde in einer größeren Arbeitsgruppe, deren Mitglieder zu einem großen Teil auch aus staatlichen Forschungseinrichtungen stammen, erarbeitet mit wesentlichen Beiträgen von Guido Blöcher, Simona Regenspurg, Jörg Baumgärtner, Ernst Huenges, Horst Rüter, Günter Zimmermann, Werner Donke, Christian Hecht.

Dem Arbeitskreis gehörten darüber hinaus die folgenden Personen an: Angela Spalek, Andreas Hübner, Broder Merkel, Reinhard Jung, Frieder Häfner, Marion Schindler, Jan Henniges, Stefan Baisch, Ralf Fritschen; Christina Schrage, Stephanie Frick, Rüdiger Schulz, Rolf Schiffer, Bettina Ostwald.

2. Einleitung

Das Erzeugen (künstlicher) Fließwege bzw. das Erweitern vorhandener Wegsamkeiten in tiefen geologischen Gesteinsschichten wird generell als „Stimulation“² bezeichnet und unter anderem bei der Gewinnung von Schiefer- und Kohleflözgas sowie auch in der Tiefengeothermie verwendet. Stimulationsmaßnahmen erfolgen durch das Einpressen von Wasser unter hohem Druck oder durch das teilweise Auflösen des bohrlochnahen Gesteins mittels Säuren.

Die bei der Stimulation eingesetzten Verfahren werden derzeit kontrovers diskutiert. Kritik und Besorgnis, wie sie derzeit in Bezug auf die Stimulationsmaßnahmen der Tiefengeothermie geäußert werden, können aber auch Ausdruck eines unzureichenden Informationsstandes sein. Daher ist es das Ziel dieses Hintergrundpapiers, die Methoden der Stimulation von Geothermiebohrungen darzustellen und die damit möglicherweise verbundenen Risiken sowie die vorgenommenen Sicherheitsmaßnahmen zu erklären. Gleichzeitig soll das Hintergrundpapier auch als Basis für die Erarbeitung von geeigneten Richtlinien für Betreiber und Behörden dienen.

Dazu wird zunächst ein Überblick über den aktuellen Stand im Bereich der Tiefengeothermienutzung in Deutschland gegeben, wobei auch umfassend auf die beim Bohren und Stimulieren eingesetzten Techniken eingegangen wird. Weiterhin werden die Standorte in Deutschland aufgezeigt, an denen bereits für geothermische Projekte stimuliert wurde. In den abschließenden Kapiteln gehen die Autoren auf die Risiken geothermischer Stimulationsmaßnahmen ein. Dabei geben sie zum einen eine Einschätzung der Risiken. Zum anderen erläutern sie die Sicherheitskonzepte, welche während der Bohrungsniederbringung und Stimulation eingesetzt werden und letztlich dazu führen, dass Stimulationen kontrolliert und verantwortbar durchgeführt werden können.

Obwohl dieses Papier auch auf die Rolle von Chemikalien und Stützmitteln eingeht, ist hervorzuheben, dass auf ihre Beimengung bei hydraulischen Stimulationen in der Geothermie meist verzichtet werden kann und vorwiegend reines Wasser eingesetzt wird. Gelegentlich eingesetzte Zugaben werden hier aber dennoch benannt und die erforderlichen Maßnahmen bzw. Präventionen von Risiken im Falle einer Zugabe erläutert. Bei tiefengeothermischen Stimulationen wurden bislang nur vereinzelt chemische Zusätze und/oder Stützmittel eingesetzt, so dass die damit zusammenhängenden Risiken nur eine untergeordnete Bedeutung haben.

² Zu **Begriffsdefinitionen** verweisen wir auf das Glossar auf der Internetseite www.geothermie.de.

3. Tiefengeothermie in Deutschland

Unter dem Begriff "Tiefengeothermie" versteht man die Gewinnung von Erdwärme aus einer Tiefe von mehr als 400 m. Die Gesteinsschichten, die für die Tiefengeothermie in Deutschland genutzt werden, befinden sich jedoch noch in deutlich größerer Tiefe (> 1000 m).

Bei tiefen geothermischen Formationen können prinzipiell hydrothermale und petrothermale Systeme unterschieden werden (Abbildung 1): Unter einem **hydrothermalen System** versteht man Bereiche, in denen **Formationsfluid** (Thermalwasser) in Karsthohlräumen, Klüften, Störungzonen oder Porengrundwasserleitern fließt. Hydrothermale Reservoirs sind in Deutschland bereits in großer Zahl erschlossen. Unter dem Begriff des **petrothermalen Systems** versteht man heißes Tiefengestein, welches im Wesentlichen frei von zirkulierenden Thermalwässern ist. Dies umfasst alle geringporigen und wenig geklüfteten Kristallin- oder Sedimentgesteine (siehe auch: www.geothermie.de). Hydrothermale und petrothermale Systeme sind in der Realität jedoch nicht eindeutig voneinander abzugrenzen, sondern die Übergänge sind fließend.

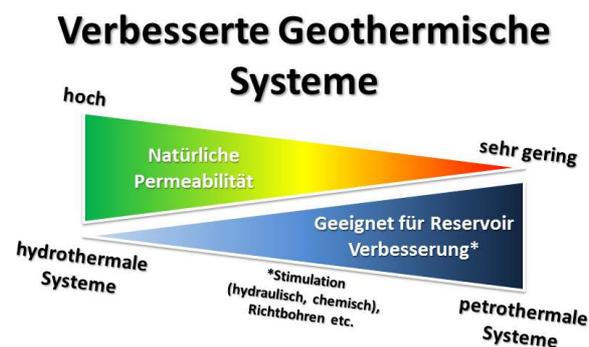


Abbildung 1: Hydrothermale Systeme sind Reservoirs mit ausreichender Wassermenge, um wirtschaftlich Strom zu erzeugen und Wärme zu nutzen. Petrothermale Systeme weisen nur eine geringe oder keine Wasserführung auf u. müssen zur wirtschaftlichen Nutzung durchlässiger gemacht werden.

3.1 Geothermische Regionen

Der weitaus überwiegende Teil der geothermischen Ressourcen Deutschlands ist in den petrothermalen Ressourcen des tiefen Kristallingesteins gespeichert (TAB Studie, 2003). Diese Ressourcen können unter derzeitigen technisch-wirtschaftlichen Bedingungen jedoch nur begrenzt genutzt werden. Die geothermische Energiegewinnung konzentriert sich somit bisher auf hydrothermale Systeme wie Sedimentformationen und hochpermeable Störungzonen. Bei diesen Warm- oder Heißwasseraquiferen lassen sich meist ausreichend hohe Fließraten für einen kommerziellen Betrieb generieren. Diese Bedingungen finden sich in Deutschland in drei unterschiedlichen Regionen: dem Oberrheingraben, dem Molassebecken und dem Norddeutschen Becken (Abbildung 2).

Sehr gute Bedingungen existieren im **Oberrheingraben**. Diese geologisch junge, tektonisch aktive Senkungszone mit einer Ausbreitung von etwa 300 mal 40 Kilometern reicht vom Südrand des Taunus bis in die Region des Schweizer Jura. Sie weist

geothermische Temperaturgradienten von lokal bis über 100° Kelvin je Kilometer Tiefenzunahme auf. In Tiefen von 2.500 bis 4.000 m herrschen Temperaturen bis deutlich über 150 °C. Die heißen Untergrundwässer zirkulieren hier daher bereits in gut erreichbaren Bohrtiefen des Muschelkalks oder in Buntsandsteinformationen sowie in tiefreichenden Störungszonen.

Das **Süddeutsche Molassebecken**, zwischen der Donau und den Alpen gelegen, bietet ebenfalls günstige geologische Voraussetzungen. Die geothermisch relevanten Horizonte liegen im Malm und sind teilweise verkarstet. Die erzielbaren Fließraten des Formationsfluids erreichen Werte von deutlich über 100 l/s. Eine weitere positive Besonderheit stellt der geringe Gesamtsalzgehalt des Formationsfluids dar. Dadurch sind die für die Energienutzung notwendigen Anlagenteile nur einem geringen Korrosionsrisiko ausgesetzt und auch das Problem mineralischer Ausfällungen in Anlagenteilen (=Scaling) ist hier gering. Einzig die lokal auftretenden erhöhten Schwefelwasserstoffgehalte des Thermalfluides müssen berücksichtigt werden, da dieses korrosive Gas metallische Werkstoffe angreifen kann. Die besonders für die Stromerzeugung interessanten, höheren Temperaturbereiche (hier etwa 100 bis 130 °C) sind jedoch nur in wenigen Gebieten wie etwa im südlichen Bayern in Tiefen von weniger als 4.000 m anzutreffen.

Im **Norddeutschen Becken** sind poröse Sandsteinformationen mit großer Flächenausdehnung zum Beispiel im Rotliegenden, im Buntsandstein und im Rätkeuper vorzufinden. In Tiefen zwischen 4.000 und 5.000 m herrschen hier Temperaturen um 130 bis etwa 160 °C. Im Vergleich zum Süddeutschen Molassebecken und zum Oberrheingraben ist die natürlich vorhandene Durchlässigkeit der Gesteine hier tendenziell geringer. Entsprechend befinden sich im Norddeutschen Becken aktuell weniger Geothermievorhaben in der Planungs- oder Umsetzungsphase. Die Tiefenwässer weisen im Norddeutschen Becken die stärkste Mineralisation von bis zu 300 g/l Gesamtsalzgehalt auf. Auch mit erhöhten mineralischen Ausfällungen (=Scaling) muss hier verstärkt gerechnet werden.



Abbildung 2: Übersicht über die wichtigsten Regionen Deutschlands, die für tiefengeothermische Nutzungen in Frage kommen. Dargestellt sind Aquifere mit Temperaturen über 60 °C (orange) und über 100 °C (rot). (BMU-Broschüre 2010 „Nutzungsmöglichkeiten der tiefen Geothermie in Deutschland“)

3.2 Geothermiebohrungen und geothermische Dubletten

Der technische Ausbau von Geothermiebohrungen muss gewährleisten, dass über viele Jahre heißes Formationsfluid sicher gefördert bzw. abgekühltes Formationsfluid wieder gezielt in den Untergrund verpresst werden kann. Zudem muss durch die Gestaltung des Bohrplatzes und durch den Ausbau der Bohrungen sichergestellt werden, dass keine Beeinträchtigung von grundwasserführenden Schichten außerhalb des Nutzaquifers während der Bohr- und Betriebsphase auftreten kann. Die dazu notwendigen technischen Maßnahmen sind aus der Erdöl- und Erdgasindustrie bekannt und bewährt. Daher soll an dieser Stelle auf die hohen Sicherheitsstandards in diesem Bereich eingegangen werden.

Die Bohrarbeiten beginnen mit dem Einbau und der Zementation des sogenannten **Standrohres**. Es dient unter anderem dazu, oberflächennahe grundwasserführende Schichten zu schützen. Diese befinden sich in der Regel nur in den oberen 100 m und können zur Trinkwasserversorgung genutzt werden.

Der **Bohrplatz** wird i. Allg. nach Einbringen des Standrohres eingerichtet und in allen relevanten Bereichen asphaltiert. Er hat neben technischen Funktionen maßgeblich die Aufgabe, den Schutz des Bodens und Grundwassers gegen Kontaminationen von der Oberfläche aus zu gewährleisten. Bereits bei der Gestaltung des Bohrplatzes und dem Ausbau der Bohrungen wird sichergestellt, dass keine Beeinträchtigung des in Anspruch genommenen Bodens und von grundwasserführenden Schichten während der Bohr- oder Betriebsphase auftreten kann. Dieses geschieht nach den regulatorischen Verpflichtungen der unterschiedlichen Gesetze oder Verordnungen zum Berg-, Wasserhaushalt-, Emissions- und Nachbarschaftsrecht sowie zum Sicherheits-, Gesundheits-, Arbeits- und Umweltschutz usw. durch die hier beschriebenen Mittel und Maßnahmen. Demzufolge wird der Bohrplatz so eingerichtet, dass die entscheidenden Anlagenbereiche entsprechend versiegelt werden, so dass der Boden und das darunter befindliche oberflächennahe Grundwasser nach menschlichem Ermessen nicht kontaminiert werden können. Zusätzliche Alarmpläne in evtl. doch auftretenden übertragbaren Schadensfällen sollen helfen, potenziell mögliche Vorfälle im Schadensumfang bestmöglich zu reduzieren. Rinnen, Abfangbehälter und Ölabscheider auf dem Bohrplatz stellen dabei sicher, dass auch im Falle einer Kontamination oder eines Austritts von flüssigen Gefahrstoffen die entsprechenden Verunreinigungen aufgefangen, abgeleitet und entsprechend ordnungsgemäß entsorgt werden können. Weitere Schutzvorrichtungen, wie z. B. Ölbindemittel, Mittel zur Brandbekämpfung oder zur weiteren Gefahreneindämmung wie Gefahrstoffkataster, helfen weiterhin, Risiken nahezu auszuschließen. Die einzelne Erfassung von Menge und Gefährdungspotenzial von Gefahrstoffen, die Beschreibung von Gegenmaßnahmen und das Training der Mitarbeiter im Krisenfall reduzieren das Risiko ebenfalls. Zudem wird mit der jeweiligen örtlichen Feuerwehr ein Alarmplan ausgearbeitet, nach dem entsprechend verfahren werden kann.

Das Abteufen der **Bohrung** erfolgt teleskopartig, so dass sich Bohrdurchmesser und Verrohrungsdurchmesser mit der Tiefe verringern. Durch Zementation der Rohre wird gewährleistet, dass die Rohre dauerhaft fest mit dem umgebenden Gestein verbunden sind und dass keine Flüssigkeiten „hinter“ den Rohren entlang fließen können. Die Zementation der Ringräume wird gas- und druckdicht ausgeführt, die Qualität wird

durch ein CBL (Cement Bond Log) nachgewiesen. Bei allen Tiefbohrungen wird aus dem Vorsichtsprinzip heraus unterstellt, dass druckhafte Flüssigkeiten oder brennbare Stoffe angetroffen werden können. Darauf sind die Bohrmannschaften eingestellt, sie sind hierfür ausgebildet, trainiert und durch Wiederholungslehrgänge regelmäßig kontrolliert, damit so der Nachweis des adäquaten Handelns erbracht werden kann. Die passive Seite der Sicherheitsausrüstung, wie z. B. Explosionsschutz, Gasspürgeräte, Brandbekämpfungsmittel, kombiniert mit der aktiv zu handhabenden Ausrüstung zur Verhütung eines Bohrlochausbruchs (amerikanisch blow out), sind mit unterschiedlich wirkenden Blow-Out-Preventern versehen. Während der Zufluss von artesisch druckhaftem Wasser in den seltensten Fällen 5 bar übersteigt (50 m Wassersäule), müssen bei Öl-Gas-Bohrungen, d. h. hier auch in der Geothermie, Drücke bis max. 700 bar (7.000 m Wassersäule) von Mannschaft, Gerät und Ausrüstung sicher beherrscht werden können. Bei geschlossenem Preventer erzeugen die auftretenden Drücke eine Zugspannung in den Rohren, die von der einzementierten Ankerrohrfahrt sicher an den Untergrund abgeleitet werden muss. Entsprechende Tests und Sicherheitsübungen während des Bohrens weisen die jeweilige Funktionsfähigkeit und Dichtheit des Gesamtsystems nach. Die weiteren technischen Rohrfahrten, bis zu drei, werden ebenso wie die oberen eingebaut und durch Zementationen gesichert.

Beispielhaft ist in Abbildung 3 der Ausbau der GeneSys-Geothermiebohrung in Hannover dargestellt. Sie zeigt, dass grundwasserführende Schichten, die in Hannover nur in den obersten ca. 30 m vorkommen, letztlich durch vier Verrohrungen gegenüber den Flüssigkeiten in der Bohrung geschützt sind. In ähnlicher Weise werden alle Geothermiebohrungen ausgebaut.

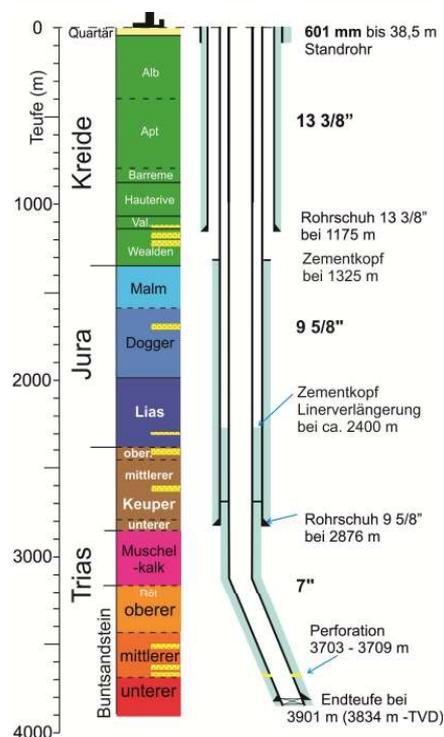


Abbildung 3: Verrohrungsschema und geologisches Profil der GeneSys-Bohrung in Hannover. Schwarz sind die Verrohrungen und blau die zementierten Abschnitte dargestellt. Der Durchmesser der jeweils äußeren Verrohrung ist auf der rechten Seite in Zoll angegeben (fett gedruckte Zahlen). TVD: True Vertical Depth (vertikale Tiefe). Quelle: www.genesys-hannover.de

Der **Zugang zu der Zielformation**, aus der Heißwasser gefördert oder in die abgekühlte Formationsfluid verpresst wird, geschieht z.B. durch Perforation. Dabei werden in einem meist nur wenige Meter langen Abschnitt gezielt Löcher durch die Verrohrung gesprengt. Alternativ kann der Zielbereich von vornherein auch unverrohrt bleiben, sofern sich dieser als standfest erweist. Falls dieses durch Störungen, Klüfte oder allein durch die zuströmende Wassermenge kritisch gesehen wird, wird auch dieser Abschnitt durch Rohre stabilisiert. Diese werden dann jedoch vorab als geschlitzte oder als Filterrohre eingebaut. Wichtig ist zu vermerken, dass der Zugang zum Gestein nur in einem definierten Abschnitt der Bohrung und in großen Tiefen (tiefer als 1.000 m), in denen sich die Zielgesteinsformationen befinden, hergestellt wird. In allen anderen Bereichen wird durch den Ausbau der Bohrung ein Ausströmen des Formationsfluides in oberflächennahe grundwasserführenden Schichten faktisch ausgeschlossen.

In Deutschland werden in der Tiefengeothermie bisher ausschließlich **Dubletten-Systeme** realisiert, wobei eine Dublette aus einer Förder- und einer Reinjektionsbohrung besteht (Abbildung 4). Dubletten werden auch in Zukunft Basisbestandteile größerer Anlagen sein. Hierbei wird heißes Formationsfluid durch eine erste Bohrung aus dem Reservoir gefördert, an der Oberfläche wird ein Teil der geothermischen Wärme durch einen Wärmeübertrager ausgekoppelt und das dadurch abgekühlte Formationsfluid wird über die zweite Bohrung wieder reinjiziert.

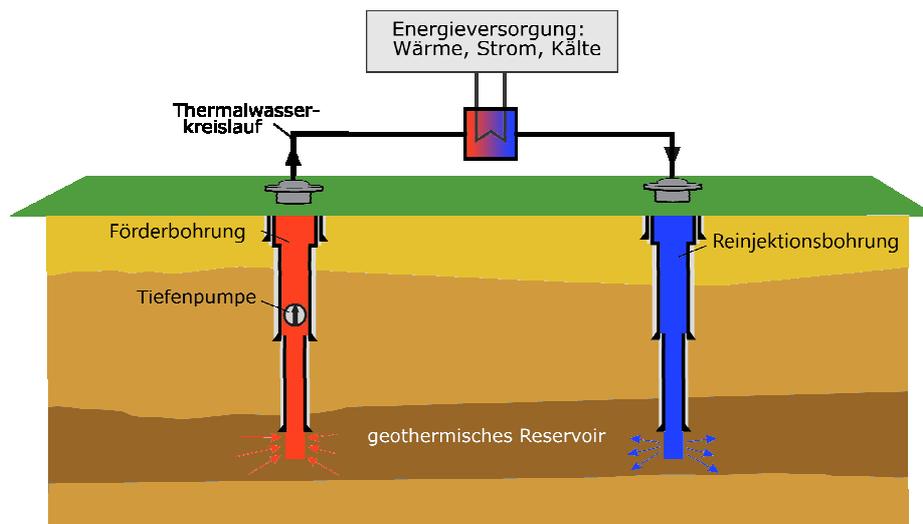


Abbildung 4: Dubletten-System in der Tiefengeothermie bestehend aus einer Förderbohrung (links) und einer Reinjektionsbohrung (rechts).

Während der anschließenden Untergrundpassage des Formationsfluids von der Reinjektions- zurück zur Förderbohrung erwärmt sich das Wasser durch den Kontakt mit dem heißen Gestein erneut. Der untertägige Abstand zwischen der Förderbohrung und der Reinjektionsbohrung beträgt in der Regel einige 100 Meter bis ca. drei Kilometer. Der Abstand zwischen den Bohrungen ist ein Kompromiss zwischen Druckhaltung und Temperaturentwicklung und muss an den jeweiligen Standort angepasst werden (Blöcher, 2010; Legarth, 2003).

Die Reinjektion des abgekühlten Wassers erfolgt maßgeblich aus zwei Gründen:

- Der Druck im Reservoir wird stabil gehalten, so dass über lange Zeit mit konstanter Rate Heißwasser gewonnen werden kann.
- Das Formationsfluid darf aufgrund seines in der Regel höheren Salzgehaltes und der Belastung mit gegebenenfalls umweltgefährdenden Inhaltsstoffen nicht in Kontakt mit der Biosphäre kommen. Das Wasser muss daher im geschlossenen Thermalwasserkreislauf wieder in den Horizont verpresst werden, aus dem es zuvor gefördert wurde.

Das Abteufen von Tiefbohrungen, die Errichtung von Bohrplätzen, die Durchführung von Tests und Stimulationsmaßnahmen sowie der spätere Betrieb von Geothermieanlagen unterliegen der Aufsicht und Genehmigung durch die **Bergbehörden**. Der Schutz von Boden und Grundwasser sowie allgemein die Minimierung von Umweltbeeinträchtigungen sind im bergerechtlichen Genehmigungsverfahren im Rahmen der Beteiligung der Fachbehörden wichtige Zulassungskriterien.

3.3 Stimulationsverfahren

Die Leistungsfähigkeit der erschlossenen geothermischen Reservoirs, hydrothermale oder petrothermale, wird entscheidend von der hydraulischen Durchlässigkeit des Gesteins und von möglichen Fließwegen bestimmt. Ist die natürliche Durchlässigkeit nicht ausreichend, um wirtschaftlich nutzbare Förderraten zu erzielen, kann die Leistungsfähigkeit der Bohrungen durch Stimulationsmaßnahmen gesteigert werden. Für die Tiefengeothermie in Deutschland werden bisher zwei verschiedene Stimulationsverfahren eingesetzt: Hydraulische Stimulationen und Säurestimulationen. In beiden Fällen wird Flüssigkeit, das Stimulationsmittel, in die Bohrung verpresst, um im Zielhorizont der Bohrung bestehende Risse zu erweitern oder in einigen Fällen neue Risse zu erzeugen. Dies führt zu einer Verbesserung der Wegsamkeiten im umgebenden Gestein. In der Tiefengeothermie in Deutschland wird bisher vorrangig das Konzept der so genannten hydraulischen Stimulation angewandt. Dabei wird Frischwasser aus Grund- und Oberflächenwasser oder zuvor gefördertes Formationsfluid als Stimulationsmittel verwendet. Nur vereinzelt kommen dabei auch chemische Zusätze und/oder Stützmittel zum Einsatz.

Vorhaben, in denen Stimulationsmaßnahmen zur Steigerung der Ergiebigkeit der Bohrungen durchgeführt werden, werden auch als **Enhanced Geothermal Systems (EGS)** oder **Verbesserte Geothermische Systeme** bezeichnet.

3.3.1 Hydraulische Stimulation

Bei der hydraulischen Stimulation wird durch Verpressen des Stimulationsmittels mit hoher Fließrate in einer Bohrung Druck aufgebaut, bis sich natürlich vorhandene Klüfte öffnen. Beim Stimulationsmittel kann es sich um Frischwasser oder um zuvor gefördertes Formationsfluid handeln. Im Grenzfall kann es auch Ziel sein, den Druck so lange zu erhöhen bis künstliche, neue Risse erzeugt werden (Abbildung 5). In Abhängigkeit von der natürlichen Durchlässigkeit des Gesteins und dem verpressten Volumen wird mit solch einer Stimulationsmaßnahme die Permeabilität des Gesteins

über eine horizontale Ausdehnung von mehreren hundert Metern Länge verbessert. Die Öffnungsweite der einzelnen Risse/Klüfte liegt hingegen nur im Bereich von einigen Millimetern bis wenigen Zentimetern (siehe Kapitel 4.2).

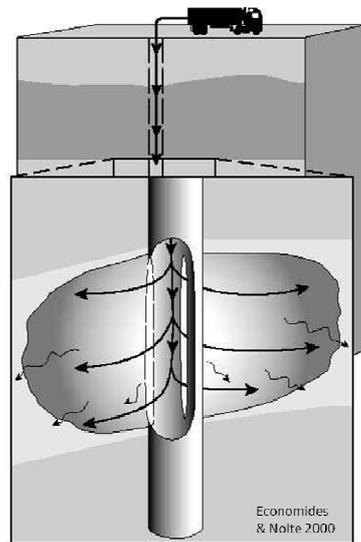


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Rissausbreitung während einer Stimulationsmaßnahme (Economides & Nolte, 2001)

Bei der Öffnung bestehender Klüfte bzw. bei der Entstehung neuer Risse durch hydraulische Stimulation führt die auf den Rissflächen wirkende Scherspannung zu einer Versatzbewegung der Rissflächen gegeneinander. Die raue Beschaffenheit dieser Rissflächen wiederum bewirkt, dass diese nach Ablassen des Injektionsdrucks nicht mehr exakt aufeinander passen („**self-propping Effekt**“). Dadurch wird neuer Hohlraum geschaffen und der Fließwiderstand ohne Verwendung von Stützmitteln nachhaltig verringert. Nach Beendigung der Stimulationsmaßnahme und nach der Druckentlastung verbleiben hochpermeable Rissflächen, die zu einer signifikanten Erhöhung der erzielbaren Förderrate führen. Im hydraulisch dichten Gestein dienen die geschaffenen Rissflächen gleichzeitig als unterirdische Wärmeübertrager, über die der Gesteinsmatrix Wärme entzogen wird.

Wegweisend für die Entwicklung des Wasserstimulations-Konzeptes waren die Experimente im Forschungsprojekt im französischen Soutz-sous-Forêts (Elsass/ Oberrheingraben). Hier konnte gezeigt werden, dass im kristallinen Gestein hochpermeable Risse geschaffen werden können, über die später die Zirkulation zwischen den Tiefbohrungen erfolgt (Tischner et al. 2007). Für die Zirkulation des Formationsfluids sind in diesem Projekt jedoch auch natürlich vorhandene permeable Störungszonen von großer Bedeutung. In welchem Umfang letztlich natürlich vorhandene Störungen stimuliert und künstliche Risse erzeugt wurden, ist derzeit Gegenstand der Untersuchungen.

Bei den bisher durchgeführten hydraulischen Stimulationsmaßnahmen in Deutschland (einschließlich des Forschungsprojekts in Soutz-sous-Forêts) wurden Volumina von mehreren tausend Kubikmetern Wasser mit Fließraten zwischen ca. 30 bis über 150 l/s kontinuierlich verpresst. Der Druck, der hierbei im Bohrlochkopf aufgebaut

werden musste, erreichte in Abhängigkeit von den geologischen und tektonischen Gegebenheiten sowie den Fließraten Werte von unter 100 bis ca. 400 bar.

Als eine Weiterentwicklung des Konzepts der Scherung natürlich vorhandener Risse kann die Erzeugung mehrerer (vergleichsweise kleiner) Risse bei zeitlich aufeinander folgenden Stimulationsvorgängen gesehen werden.

Weist das Gestein nur geringe Scherspannungen auf oder wurden (künstliche) Zugrisse parallel zur Hauptspannung erzeugt, so dass kein Versatz der Rissflächen zu erwarten ist und die Risse sich wieder schließen können, kann der Einsatz von sogenannten **Stützmitteln (Proppants)** zielführend sein. Die Stützmittel werden in den Riss (oder das Rissystem) verpresst, verteilen sich im Riss und verhindern ein Schließen bei Druckverringerung nach der Injektion. Bei diesen Stützmitteln handelt es sich um natürlich vorkommende Sande, beschichtete Sande oder auch um hochfeste Keramiken wie gesintertem Bauxit. Stützmittel müssen in Größe und Form (kugelförmig) gut sortiert sein, um einen möglichst geringen Strömungswiderstand im Spalt zu gewährleisten. Zur gezielten Platzierung der Stützmittel im Riss müssen diese in ein hochviskoses Gel (organische Polymere) eingebettet werden. Nur so kann das frühzeitige Absedimentieren der „schweren“ Partikel verhindert werden. Um die Stabilität des Gels zu erzeugen, werden so genannte „Crosslinker“², eingesetzt. Um seine Viskosität wieder zu verringern und die Rückförderung zu ermöglichen, werden „Breaker“² beigemischt.

Basierend auf den mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Gesteins wird der Stimulationsprozess im Vorfeld mit Modellrechnungen simuliert. Damit kann die konkrete Durchführung der Stimulationsmaßnahme vorausschauend geplant werden. Die Fluidausbreitung wird während der Stimulationsmaßnahme kontinuierlich (durch Druckanalyse und mikroseismisches Monitoring) überwacht. Während durch die Dimensionierung der Stimulationsmaßnahme, das bedeutet Viskosität, Fließrate und Volumina des Fluids, der Öffnungsprozess hinsichtlich seiner Ausdehnung gesteuert wird, ist die Richtung der Fluidausbreitung durch die natürlich vorhandenen Gebirgsspannungen vorgegeben (siehe Kapitel 4.2). Die variierenden Eigenschaften des Untergrundes machen die Ausdehnung der Stimulationsbehandlung jedoch nicht vollständig im Voraus berechenbar. Eine Vermessung während des Vorgangs mit beispielsweise seismo-akustischen Verfahren (d.h. die Ortung und Aufzeichnung einzelner Bruchstellen im Gestein) ist deshalb sehr hilfreich. So wird z.B. auch die optimale Position für ein weiteres Bohrloch bestimmt, falls dies für das gewählte Nutzungsverfahren nötig ist.

Bis heute ist die hydraulische Stimulation die einzige Methode, mit der im weiten Umfeld der Bohrung Wegsamkeiten verbessert oder geschaffen werden können. Durch ihr Verfahren wird Geothermie unabhängig von den geologischen Verhältnissen in ganz Deutschland nutzbar.

3.3.2 Chemische Stimulation (Säurestimulation)

Unter dem Begriff der chemischen Stimulation versteht man das Einleiten von Säure in die geothermische Zielformation, was zu einer Auflösung bestimmter mineralischer Komponenten, z.B. Karbonate, führt und so die Wegsamkeiten im Gestein erhöht. Im

Gegensatz zur hydraulischen Stimulation, bei der Fließwege des Fluids auch in großem Abstand zur Bohrung verbessert/ geschaffen werden, ermöglicht die chemische Stimulation nur eine Reaktion im bohrlochnahen Umfeld (bis einige Meter Entfernung zur Bohrung). Grund ist, dass die Säure in Folge der Reaktion und der hohen Temperatur im Untergrund rasch abgebaut wird. Ausnahmen bilden klüftige Karbonatgesteine, in denen vorhandene Fließwege auch in größerer Entfernung vom Bohrloch erweitert werden können.

Säuerungsmaßnahmen werden auch durchgeführt, um Fließwiderstände in Bohrlochnähe zu beseitigen, die während des Bohrens, der Komplettierung oder beim Betrieb der Anlage (Ablagerungen) entstanden sind (allerdings spricht man in diesem Fall nicht von Stimulation).

Säurestimulationen wurden bislang fast ausschließlich in Karbonatgesteinen, also in Deutschland im Malm des Molassebeckens (siehe Tabelle 1), durchgeführt. In der Regel wird 10-33-prozentige Salzsäure zusammen mit so genannten Korrosionsinhibitoren, die ein Verrosten der mit Säure in Kontakt kommenden Anlagenteile verhindern, gezielt in die Tiefe gepumpt. Zum Teil erfolgt die Injektion der Säure über spezielle Injektionsrohre (z.B. „coil tubing“), so dass die Säure auf dem Weg nach unten nicht mit der obertägigen Ausrüstung und der sonstigen Verrohrung in Kontakt kommt.

Die im Untergrund eingebrachte Säure wird durch die Reaktion mit dem Gestein zu Wasser und Salz abgebaut und stellt somit kein Umweltrisiko dar. Beispielsweise entsteht durch die Reaktion von Salzsäure (HCl) mit Kalk (CaCO₃) nach folgender Reaktion nur Wasser (H₂O), Kohlendioxid (CO₂) und das ungefährliche Kalziumchlorid: $2\text{HCl} + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCl}_2$. Essigsäure (CH₃COOH) und Kohlensäure (H₂CO₃), die als mittelstarke Säuren eine geringere Lösungsgeschwindigkeit haben, wirken langsamer und können daher eher das Fernfeld stimulieren. Sie bieten sich damit als Alternative zu Salzsäure an. Dabei gilt Kohlensäure, als natürlicher Bestandteil von diversen Grundwasserleitern, als besonders umweltverträglich.

3.3.3 Stimulation von geothermischen Reservoiren in Deutschland

Seit längerem werden in Deutschland Wärme und in einigen Projekten auch Strom aus derzeit 19 tiefegeothermischen Anlagen erzeugt. Nur in sechs dieser Geothermieprojekte wurden bislang Stimulationsmaßnahmen zur Steigerung der Produktion durchgeführt (Tabelle 1).

Im Norddeutschen Becken gehören dazu die beiden GeneSys-Projekte der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover und Horstberg (Niedersachsen) (Jung et al. 2005 sowie www.genesys-hannover.de). Bei diesen wurde nur Wasser ohne Zusätze verwendet. Gleiches gilt für das unterbrochene Geothermievorhaben in Bad Urach (Baden-Württemberg). Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ führte in seinem Geothermieprojekt in Groß Schönebeck (Brandenburg) sowohl Stimulationen mit Wasser und Sand als auch mit Gel und Stützmitteln durch (Zimmermann et al. 2010, 2011). Im Oberrheingraben wurden auf französischer Seite in Soultz-sous-Forêts sowie auf deutscher Seite in Landau (Rheinland-Pfalz) hydraulische und chemische Stimulationen eingesetzt (Schindler et al. 2010), während in der baye-



rischen Molasse hydraulische Verfahren im Geothermiebereich bislang nur in den Chattsanden (flache Geothermie) zur Anwendung kamen (Bayerischer Geothermieatlas). Zum Erreichen der angestrebten Schüttungsraten wurden im bayerischen Unterhaching jedoch beide Bohrungen im Malmkarst mit verdünnter Salzsäure stimuliert.

Tabelle 1: Übersicht über im Bau oder Betrieb befindliche Tiefengeothermieprojekte in Deutschland, bei denen Maßnahmen zur Steigerung der Produktion durchgeführt wurden.

Status	Ort/ Projekt	Geologisches Gebiet	Art der Stimulation	max. Temp. [°C]	Teufe [m]	Förderrate [l/s]
unterbrochen	Bad Urach	Oberrhingraben	hydraulisch (Wasser)	170	4445	k.A.
im Bau	Groß Schönebeck	Norddeutsches Becken	hydraulisch (Wasser/Sand, Gel/Stützmittel)	150	4309	21*
im Bau	Hannover/ GeneSys	Norddeutsches Becken	hydraulisch (Wasser)	169	3834	8*
Forschungsbohrung	Horstberg/ GeneSys	Norddeutsches Becken	hydraulisch (Wasser)	158	4120	8
in Betrieb	Landau	Oberrhingraben	hydraulisch-chemisch (Wasser, HCl)	160	3340	70
in Betrieb	Unterhaching	Molassebecken	chemisch (verdünnte HCl)	122,8	3446	120

*geplante Werte

4. Risikobewertung geothermischer Stimulationsmaßnahmen

Obwohl bei den in Deutschland angewandten Stimulationsmaßnahmen vorwiegend Wasser oder ökologisch unbedenklichen Stoffe eingesetzt werden, sind mögliche Auswirkungen auf die Umwelt zu berücksichtigen. Diese ergeben sich durch die Bereitstellung und Aufbereitung von Frischwasser, die Rissausbreitung, das Freisetzen von Gasen, Fluiden und Feststoffen, Geräuschbelästigungen und visuelle Beeinträchtigungen sowie durch induzierte Seismizität. Um sie beherrschen zu können und einen verantwortungsvollen Umgang mit der Technologie zu ermöglichen, werden diese Punkte im Folgenden detailliert eingeschätzt und erläutert. Damit wird deutlich, dass für alle bestehenden Risiken ausreichende und bewährte Regelungen vorliegen, so dass entsprechende Vorsichtsmaßnahmen vorgenommen werden, die den Eintritt von Gefahren wirksam verhindern.

4.1 Bereitstellung und Aufbereitung von Frischwasser

Einschätzung:

Die Bereitstellung und Aufbereitung von Frischwasser beinhaltet keine grundsätzlichen Risiken. Lediglich im Fall einer direkten Entnahme aus dem Grundwasser kann es zu kurzfristigen sowie minimalen und daher unbedenklichen Absenkungen des Grundwasserspiegels kommen.

Erläuterung:

Im Rahmen der Stimulationsmaßnahmen können mehrere 10.000 m³ Frischwasser benötigt werden, wobei selten mehr als 50.000 m³ entnommen werden. Steht dafür kein Anschluss an die öffentliche Wasserversorgung zur Verfügung, muss dieses Frischwasser aus Oberflächengewässern oder dem Grundwasser gewonnen werden. Eine wasserrechtliche Genehmigung zur Entnahme muss bei Entnahmemengen >50.000 m³ vorher bei der zuständigen Bergbehörde unter Beteiligung der Wasserbehörde eingeholt werden. Durch die Entnahme kann es zu einem zeitlich befristeten geringfügigen Absinken des Wasserspiegels kommen. Letztlich kann dieses vorübergehende Absinken zwar nicht vollständig vermieden, wohl aber minimiert werden. Durch genaue Kenntnis der hydrogeologischen Situation, z.B. durch ein dynamisches Grundwassermodell, kann die speicherschonendste Wasserförderung bestimmt werden.

Zur Bereitstellung des Stimulationswassers muss ggf. noch ein Zwischenspeicher (Aushub, Becken, Tank, Container) zur Verfügung gestellt werden (Abbildung 6). Das zwischengespeicherte Wasser wird kurzfristig für die Stimulation aufbereitet. Für Gel/Stützmittel-Maßnahmen wird es innerhalb von Stunden verwendet, bei chemischen Stimulationen werden die Zusätze (z.B. Säuren, KCl) erst während der Injektion zugeführt. Die Lagerung aller Zusatzstoffe, die am Standort für die Stimulationsarbeiten benötigt werden, muss detailliert im Haupt-/bzw. Sonderbetriebsplan beschrieben werden. Wenn es sich um Stoffe handelt, die die Umwelt negativ beeinflussen können, muss die Lagerfläche entsprechend vorbereitet, z.B. zementiert bzw. isoliert, werden



Abbildung 6: Rückhaltebecken für das Geothermieprojekt Groß Schönebeck. Quelle: www.bgr.bund.de.

4.2 Rissausbreitung

Einschätzung:

Die Rissausbreitung im Untergrund wird durch Berechnungen im Voraus sowie durch Überwachung während der Stimulation kontrolliert. Es kann mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass Risse sich bis in Trinkwasserhorizonte oder gar bis zur Oberfläche ausbreiten.

Erläuterung:

Im Vorfeld jeder hydraulischen Stimulationsmaßnahme erfolgt grundsätzlich eine Prognose bzw. Modellierung der Rissausbreitung (Abbildung 7). Diese Prognose dient primär dazu, die Stimulationsmaßnahme geeignet auszulegen, so dass die gewünschte Rissausdehnung sowie die Steigerung der Ergiebigkeit der Bohrung tatsächlich erreicht werden. Technische Parameter, die auf der Berechnung basierend festgelegt werden, sind insbesondere das Volumen des Stimulationsmittels, die Rate und die Dauer der Stimulationsmaßnahme sowie die Auswahl der Zusammensetzung des Stimulationsmittels bzw. gegebenenfalls notwendige Zusatzstoffe.

Für die Prognose der Rissausbreitung sind die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften der Gesteinsformation von wesentlicher Bedeutung. So bestimmt die hydraulische Durchlässigkeit (Permeabilität) des Gesteins maßgeblich die erzielbare Rissausbreitung, während die Gebirgsspannungen über den notwendigen Druck bei der hydraulischen Stimulation und die Richtung der Rissausbreitung entscheiden. Für die Bestimmung der Permeabilität dienen Untersuchungen an vorhandenen Gesteinsproben (insbesondere Bohrkerne) sowie die Auswertung von Bohrlochmessungen (z.B. Porositätsmessung). Die Richtungen und Stärke der Gebirgsspannungen werden aus Indikationen in der Bohrung (z.B. Bohrlochwandausbrüche), Bohrlochmessungen (Schallausbreitungsmessung - „Sonic Log“) aber auch aus regional bereits bekannten Ergebnissen (z.B. Verlauf natürlicher Störungszonen, Herdflächenlösungen von Erdbeben) abgeleitet.

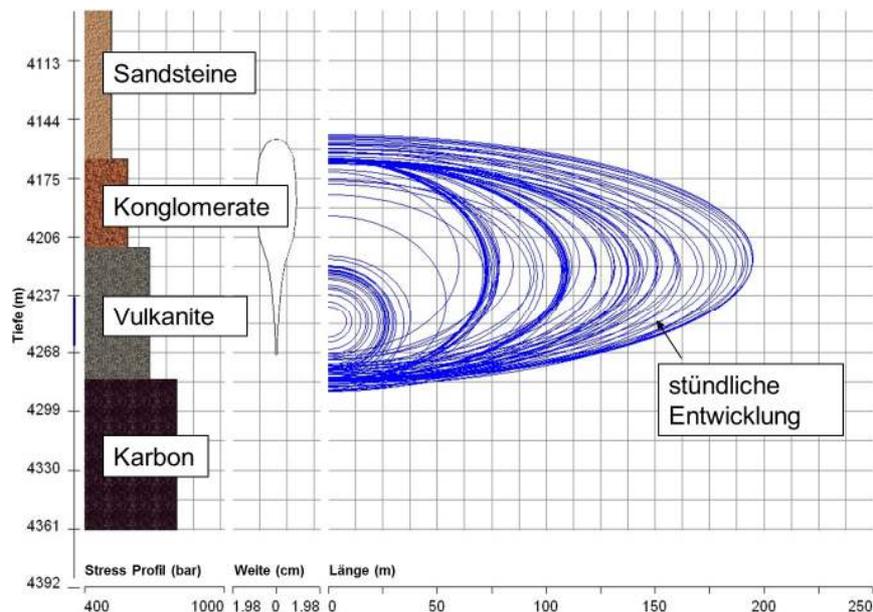


Abbildung 7: Modellierte Rissgeometrie für die hydraulische Stimulation der vulkanischen Gesteine in Groß Schönebeck. Die Ringe zeigen die stündliche Entwicklung des Risswachstums. Hier können die Längenentwicklung und die Rissöffnungsweite abgelesen werden.

Im Vorfeld einer Stimulationsmaßnahme wird durch diese Auswertungen eine verlässliche Datenbasis für die Prognose der Rissausbreitung geschaffen. Nicht zuletzt aus ökonomischer Sicht ist eine fundierte Prognose der Stimulationsmaßnahme für jedes Geothermievorhaben unerlässlich.

In der Regel unmittelbar vor jeder hydraulischen Stimulation werden so genannte „Minifrac“ durchgeführt. Dabei werden nur wenige Kubikmeter Stimulationsmittel verpresst, um insbesondere den für die Rissausbreitung notwendigen Druck zu ermitteln. Basierend auf den oben erläuterten hydraulischen und mechanischen Parametern sowie auf den Ergebnissen von Minifrac erfolgen die abschließende Prognose bzw. Modellierung der Rissausbreitung sowie die Festlegung des genauen Ablaufs der hydraulischen Stimulation.

Während der Durchführung der hydraulischen Stimulation wird der Druckverlauf kontinuierlich beobachtet und interpretiert. Aus dem Druckverlauf kann auf den Charakter der Rissausbreitung geschlossen werden. So ist insbesondere eine dominant vertikale Rissausbreitung (das bedeutet, der Riss wächst bevorzugt nach „oben“) eindeutig im Druckverlauf erkennbar. Der Vergleich zwischen dem prognostizierten Druckverlauf und dem tatsächlich beobachteten erlaubt eine detaillierte Beurteilung des Rissausbreitungsprozesses.

Bei allen hydraulischen Stimulationen in der Tiefengeothermie wird die Rissausbreitung zusätzlich durch ein mikroseismisches Monitoring überwacht (Abbildung 8). Im kristallinen Gestein gelingt diese Überwachung von der Erdoberfläche aus. In den Sedimentgesteinen des Norddeutschen Beckens (dies betrifft die Standorte Horstberg, Hannover, Groß Schönebeck) konnten durch das seismische Netzwerk an der Oberfläche jedoch faktisch keine mikroseismischen Ereignisse registriert werden.

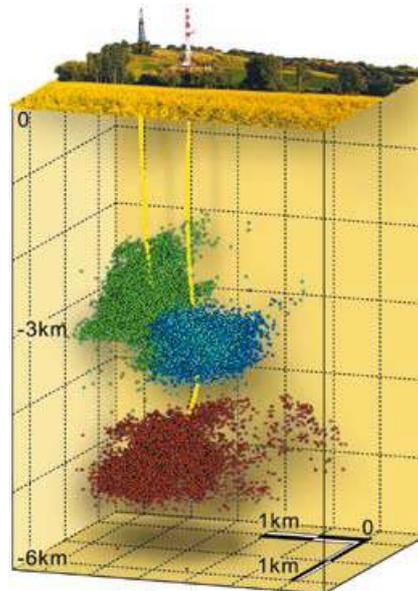


Abbildung 8: Hydraulische Stimulation in den Tiefbohrungen des Geothermieprojektes Soultz-sous-Forêts (Weidler et al. 2002). Jeder Punkt kennzeichnet ein mikroseismisches Ereignis, verursacht durch das Einpressen von Wasser. Die Punktwolken zeigen die künstlich erzeugten Wärmetauschflächen.

Im Zusammenhang mit der Kontrolle der Rissausbreitung ist die Wirkung von Barrieregesteinen von großer Bedeutung. Salzschiefer und Tonsteine weisen aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften höhere Gebirgsspannungen auf als z.B. Sandsteinschiefer und bilden so eine Spannungsbarriere. Beispielhaft befinden sich im Norddeutschen Becken oberhalb der Zielformationen für die geothermische Nutzung mehrere mächtige Lagen von Barrieregesteinen, die eine Rissausbreitung bis in die obersten Gesteinsschichten und in Grundwasserleiter wirksam verhindern.

Zudem sei auf den großen vertikalen Abstand zwischen den potenziellen Zielhorizonten für die Tiefengeothermie und den grundwasserführenden Schichten verwiesen. Die vertikale Distanz von i. d. R. mehreren tausend Metern macht es nach heutigem Stand der Wissenschaft unmöglich, dass es zu einer Beeinträchtigung grundwasserführender Schichten in Folge unkontrollierter Rissausbreitung kommen kann.

Im Zusammenhang mit Geothermievorhaben ist es bisher noch nie zu einer unkontrollierten Rissausbreitung bis in grundwasserführende Schichten gekommen. Dies ist auch zukünftig faktisch ausgeschlossen, da wie oben erläutert

- im Vorfeld jeder hydraulischen Stimulationsmaßnahme umfangreiche Untersuchungen und Minifrac durchgeföhrt werden, die eine verlässliche Prognose der Rissausbreitung erlauben,
- durch das Monitoring während der Stimulation (Druck, Seismoakustik) eine wirksame Kontrolle der Rissausbreitung möglich ist und die hydraulische Stimulation ggf. rechtzeitig unterbrochen oder gar abgebrochen werden kann,
- Spannungsbarrieren in Verbindung mit dem großen vertikalen Abstand zwischen dem Zielhorizont und grundwasserführenden Schichten in natürlicher Weise die Rissausbreitung auf die Zielhorizonte geothermischer Nutzung begrenzen.

4.3 Freisetzen von Gasen aus der Formation

Einschätzung:

Das Risiko einer Freisetzung von im Formationsfluid gelösten Gasen während der Stimulation wird durch umfassende technische Vorkehrungen kontrolliert bzw. verhindert. Die bestehenden, gesetzlich vorgeschriebenen Regelungen zum Vorgehen sind aus dem Bergbau bekannt, erprobt und daher angemessen.

Erläuterung:

Das Formationsfluid besteht in der Regel nicht nur aus Wasser, sondern kann auch Gase enthalten. Die häufigsten Gase geothermischer Standorte sind Stickstoff (N₂), Methan (CH₄), Kohlendioxid (CO₂), Schwefelwasserstoff (H₂S) und gelegentlich Wasserstoff (H₂). Gasvolumina und Zusammensetzung hängen von den geologischen Randbedingungen des geothermischen Standortes bzw. des Reservoirs ab (Regenspurg et al., 2010 b). Tabelle 2 zeigt die Gaszusammensetzung unterschiedlicher Geothermiestandorte in Deutschland. Da die Gaslösung druck- und temperaturabhängig ist, können diese Gase bei Stimulationsarbeiten freigesetzt werden. Die Fließwege des Gases verlaufen wie die des Fluids entlang der Poren und Klüfte des Gesteins bzw. in der Bohrung. Je nach Art des Gases ist das Risiko unterschiedlich zu bewerten. Als besonders toxisches Gas gilt H₂S, das z.B. in der Malmformation des Molassebeckens vereinzelt auftreten kann. Doch auch weniger toxische Gase, wie N₂ oder CO₂, sind in einer Risikobewertung zu berücksichtigen, da sie bei einem plötzlichen Austreten die Umgebungsluft verdrängen und so zur Erstickungsgefahr führen können.

Bei der Planung einer Stimulationsmaßnahme muss daher die örtliche Geologie mit einbezogen werden. Zum Beispiel liegen im Norddeutschen Becken hochporöse Sandsteinformationen (Rotliegend) unter einer etwa zwei Kilometer mächtigen und hydraulisch dichten Zechsteinablagerung. Bei einer Stimulation dieser Sandsteine werden die darüber befindlichen Zechsteinsedimente nicht durchschlagen und es kann keine Verbindung zwischen dem stimulierten Reservoir und hangenden Grundwasserleitern hergestellt werden. Die Barrierewirkung dieser Schichten wird im Voraus durch Computersimulation modelliert (Spannungsbarriere) und messtechnisch (seismo-akustisch) kontrolliert. Generell kann ein künstlich erzeugter Riss, der von einer kilometertiefen Bohrung bis in den oberflächennahen Grundwasserleiter oder gar bis Übertage reicht, ausgeschlossen werden (siehe Kapitel 4.2).

Während der Säurestimulation in Karbonaten kann es auch zur Neubildung von Gas (CO₂) entsprechend folgender Reaktion kommen: $2\text{HCl} + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCl}_2$. Die gebildeten Gasmengen sind aber vergleichsweise gering und stellen kein erhöhtes Risiko der Klimaschädigung dar.

Das Risiko einer Leckage der Bohrung wird durch die vorgeschriebene sorgfältige Verrohrung und Zementation des Bohrlochs im Bereich der Grundwasserleiter (siehe Kapitel 3.2) gewährleistet. Zusätzlich ist jede Förderung mit einer Gasüberwachung verbunden. Sollte ein kontrollierter Gasaustritt zu erwarten sein, sind entsprechende Sicherheitsvorkehrungen zu treffen, die entsprechend der Gas- und Risikoanalyse zu adäquatem Handeln führen.

Bergamtlich wird zudem während der Bohr- und Stimulationsarbeiten vom Betreiber die Verhinderung von Gasaustritten gefordert und überwacht. Dazu dienen dann Absperrvorrichtungen wie „Blowout-Preventer“. Dabei handelt es sich um eine Reihe von Absperrventilen, die bei einer Bohrung direkt über der Bohrung angebracht werden und den unkontrollierten Gasaustritt verhindern.

Tabelle 2: Mögliche Freisetzung umweltgefährdender Stoffe und Gase durch Reaktionen von Stimulationsmittel mit der Formation.

Gebiet	Geologische Formation	Potentielle Gasfreisetzung	aus der Formation gelöste Gefahrstoffe
Norddeutsches Becken	• Rotliegendesandstein (z.B. Groß Schönebeck)	CH ₄ , N ₂ , (H ₂ S im Hangenden des Zechsteins)	<ul style="list-style-type: none"> • Salz* (Na-Ca-Cl oder Na-Cl), • Schwermetalle (Pb, Zn, Cd) + As • Radionuklide (²¹⁰Pb, ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²³⁰Th) • Erdöl
	• Keuper (z.B. Neustadt Glewe)	CO ₂	
Oberrheingraben	• Sandstein (Buntsandstein, Muschelkalk)	(CH ₄), CO ₂	
	• Kristallin (Granit) z.B. Soultz - sous Foret	CO ₂	
Molassebecken	• Malmkarbonate	H ₂ S	Schwermetalle, Erdöl

*Risiko der Versalzung

4.4 Freisetzen von Formationsfluid, Stimulationsmittel und Zusatzstoffen

Allgemeine Einschätzung:

Durch den unsachgemäßen Umgang mit Formationsfluid, Stimulationsmittel, Stimulationsmittelzusätzen und Säuren vor, während und nach der Stimulation kann es zu Umweltkontaminationen kommen. Es bestehen jedoch umfassende Regelungen zum Umgang mit diesen Stoffen, wodurch Gefahren wirksam verhindert werden. Im Rahmen der Haupt- und Sonderbetriebspläne, die für alle Stimulationsmaßnahmen zu erstellen und durch die zuständige Bergbehörde zu genehmigen sind, sind alle Gefahrstoffe und sonstigen Arbeitsmittel anzugeben. Auf sicherheits- und arbeitsschutztechnische Aspekte wird bei der Zulassung besonders geachtet. Im Folgenden wird auf die einzelnen Stoffe und den Umgang mit ihnen im Einzelnen eingegangen.

4.4.1 Formationsfluid

Einschätzung:

Durch fest vorgeschriebene technische Maßnahmen werden Leckagen des Bohrlochausbaus zuverlässig vermieden. Ein Eintritt von Formationsfluid in das oberflächennahe Grundwasser wird so verhindert.

Erläuterung:

Das Stimulationsmittel (Frischwasser) kann sich in der geologischen Zielformation mit dem Formationsfluid vermischen und die dort enthaltenen Salze und eventuell toxischen oder radioaktiven Komponenten und ggfs. auch Erdöl mit an die Oberfläche transportieren. So könnte es beispielsweise im Norddeutschen Becken oder dem Oberrheingraben zur Versalzung und zur Mobilisierung von Schwermetallen kommen (Tabelle 2). In den Malmkarbonaten und Rotliegendesandsteinen wurden außerdem gelegentlich Erdöl und andere aromatische Kohlenwasserstoffe beobachtet. Aufgrund dieser natürlichen Inhaltsstoffe darf das an die Oberfläche geförderte Wasser nicht versickert werden, da es sonst zur Boden- und Grundwasserverunreinigung kommen kann. Sollte das Formationswasser nicht wieder reinjiziert werden, sind doppellagige Auffangbecken mit Überwachung auszuführen. Vor einer Entleerung dieser Becken muss die Wasserqualität anhand des Abfallschlüssels (Abfallverzeichnis-Verordnung, 2001) bewertet werden, um es dann fachgerecht zu entsorgen.

Wie schon beim Umgang mit Gasen bzw. mit Stimulationsmittel erläutert, verhindert die Verrohrung und Zementation auch ein Umströmen des Bohrlochs mit Formationsfluid. Dadurch wird ein hydraulischer Kurzschluss an der Bohrung vorbei zwischen Reservoir und hangenden Grundwasserleitern vermieden. Sollte sich dennoch ein Leck in der Verrohrung bilden, kann es während der Stimulationsmaßnahme, während des Rücklaufes oder bei der Förderung zu einem Austritt von Stimulationsmittel, Mischwasser oder Formationsfluid kommen. Im Bereich der Grundwasserleiter sind (vergleiche Kapitel 3.2) Mehrfachverrohrungen und Zementationen vorgesehen, wodurch das Risiko einer Leckage nahezu ausgeschlossen wird. Auch eine zusätzliche innere, nicht zementierte Arbeitsrohrtour ist zu empfehlen, bei der der Ringraum permanent drucküberwacht wird. Identifizierte Leckagen in den Verrohrungen können durch so genannte „casing-patches“ (Pflaster) rasch und zuverlässig wieder versiegelt werden.

4.4.2 Stimulationsmittel

Einschätzung:

Durch Einhaltung der vorgeschriebenen Sicherheitsmaßnahmen beim Personen- und Umweltschutz sind auch bei der Stimulation mit Säure als Stimulationsmittel die Risiken als gering zu bewerten.

Erläuterung:

Wie erwähnt wird als Mittel für die hydraulische Stimulation im allgemeinen Wasser verwendet. Nur wenn es sich mit dem Formationsfluid vermischt oder mit Zusätzen versehen wird, müssen Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden (siehe Kapitel 4.4.1 oder 4.4.3).

Bei der chemischen Stimulation hingegen dient Säure als Stimulationsmittel, wobei folgende Punkte im Umgang zu beachten sind:

- Verletzungen bzw. Verätzung im Umgang mit der Säure: Hier betreffen die Sicherheitsmaßnahmen vorwiegend das mit den Stimulationsmaßnahmen befasste Personal. Grundsätzlich gilt: je höher die Konzentration der Säure, desto gefährlicher ist sie. Beim Einsatz von Säuren muss ein geeigneter Körper- und Atemschutz getragen werden.
- Umweltbeeinträchtigungen: Chemische Reaktionen sind stets stark pH-Wert-abhängig. Eine Verringerung des pH-Wertes von Grundwasser und Boden können z.B. zur Mobilisierung von Schwermetallen führen. Beim obertägigen Umgang mit Säuren ist daher darauf zu achten, dass die Säuren nicht austreten und das oberflächennahe Grundwasser und den Boden kontaminieren können. Auch hier bestehen bewährte und in vielen Bereichen der Industrie täglich angewandte Vorsichtsmaßnahmen, wie z.B. Versiegeln des Bohrplatzes, Drainage sowie der Einsatz säureresistenter (gummierter) Behälter, Leitungen etc.
- Schäden können bei Säurestimulationen auch durch verstärkte Korrosion an der Verrohrung der Bohrung entstehen, was dann in Folge zum Verschleiß und zu Leckagen führen kann. Hier können Messungen in den Bohrungen, im Anschluss an die Säurestimulation, als vorbeugende Maßnahmen die Sicherheit erhöhen. Grundsätzlich wird ein Kontakt von Säure mit der Verrohrung technisch unterbunden.
- Im Untergrund selbst ist die Säure unbedenklich, da sie sich durch Reaktion mit dem umgebenden Gestein zersetzt und ihre Aggressivität schon im bohrloch-nahen Bereich abbaut. Allerdings kann es dabei auch zur Mobilisierung von im Gestein enthaltenen Schwermetallen kommen, die bei einer Förderung des Formationsfluids wieder an die Oberfläche gebracht werden können.

4.4.3 Zusatzstoffe

Einschätzung:

Die Menge und Zusammensetzung der Zusatzstoffe hängt von der technischen Aufgabenstellung ab, welche gegenüber den autorisierten Überwachungsbehörden (Bergamt) im Rahmen der Genehmigungsplanung offengelegt wird. Beim obertägigen Handling dieser Stoffe werden Vorsichtsmaßnahmen ergriffen, damit diese Lösungen nicht mit dem Boden in Kontakt kommen.

Erläuterung:

Im Regelfall besteht das Stimulationsmittel aus Wasser sowie falls notwendig den Stützmitteln und Zusatzstoffen, welche zur Erzeugung der gewünschten Viskosität der Trägerflüssigkeit (sowie der Reduktion der Viskosität nach der Stimulation), zur Kontrolle des pH-Wertes, zur Bakterienbekämpfung etc. eingesetzt werden. Die qualitativen Zusammensetzungen dieser Zusätze finden sich in den Sicherheitsdatenblättern der Hersteller- bzw. Servicefirmen. Die absoluten Mengen hängen jedoch von der Anwendung ab und können beträchtlich variieren. Die genauen Rezepturen müssen gegenüber den autorisierten Überwachungsbehörden im Rahmen der Genehmigungsplanung offengelegt werden.

Die von den Servicefirmen angebotenen Zusätze, z.B. Biozide, Korrosionsinhibitoren, Säure, Stabilisierungsgele und Keramik-Stützmittel, können ggf. toxisch sein. Beim obertägigen Handling dieser Stoffe müssen daher Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden, damit diese Lösungen nicht mit dem Boden in Kontakt kommen. Eine Versalzung der Formation ist für das Norddeutsche Becken und den Oberrheingraben nicht von Bedeutung, da diese selbst meist hohe Salzgehalte aufweisen. In den Malmkarbonaten des Molassebeckens sind die Fließwege und die Verweilzeiten der Fluide im Untergrund durch die Verkarstung jedoch teilweise noch unbekannt und eine Kontamination könnte hier weitreichende Folgen haben. Bislang wurden aber keine Zusatzstoffe in diesen Regionen in das Stimulationsmittel gegeben. In den Bewilligungen der Bergämter sollten hier als Stimulationszusätze nur ökologisch völlig unbedenkliche Stoffe gestattet werden. Säuren wie HCl, H₂SO₄ oder H₂CO₃ sind im Malmkarst jedoch weitgehend unproblematisch, da sie durch Reaktion mit den Karbonaten vollständig neutralisiert werden.

4.5 Ausfällung von Festpartikeln aus dem Rücklauf bzw. produziertem Wasser

Einschätzung:

Sofern die aus dem Rücklauf oder produziertem Wasser ausfallenden Festpartikel nach gängigen Methoden gefiltert und fachgerecht entsorgt werden, stellen die anfallenden Feststoffe kein Risiko dar.

Erläuterung:

Nach einer Stimulation können aus dem Rücklauf bzw. dem produzierten Wasser Partikel ausfallen, die mit Schwermetallen oder Radionukliden angereichert sein können (Regenspurg et al., 2010 a). Durch Anbringung von Filtern, wie sie ohnehin in Geothermieanlage oft verwendet werden, werden diese abgetrennt und sind fachgerecht zu entsorgen. Bei den gelegentlich vorkommenden schwachen Radioaktivitäten in Festphasen, die aus den Tiefenfluiden ausgefallen sind, handelt es sich um natürliche Radionuklide (Tabelle 2). Die Ortsdosisleistung (ODL) sollte daher an den Filterrückständen ermittelt werden und ist, sofern sie bestimmte Grenzwerte überschreitet, bei der Entsorgung zu berücksichtigen.

4.6 Geräuscentwicklung

Einschätzung:

Akustische Beeinträchtigungen können durch verschiedene technische Maßnahmen so weit reduziert werden, dass die Richtlinien der TA-Lärm problemlos eingehalten werden können.

Erläuterung:

Geothermische Projekte führen während der Bohrphase und der Stimulation zu Geräuschemissionen. Sie sind je nach Lage zur Wohnbebauung nach den Verwaltungsvorschriften der TA-Lärm (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm) zu beurteilen. Zu hohe akustische Beeinträchtigungen können daraufhin beispielsweise durch Schallschutzwände minimiert werden. Dafür ist bereits im Voraus der Maßnahme in einem Schallschutzgutachten die maximale Geräuschbelastungen abzuschätzen, so dass entsprechend entgegengewirkt werden kann. Es ist jedoch zu betonen, dass diese Beeinträchtigungen nur auf die relativ kurzen Zeiten der Stimulationsmaßnahmen (in der Regel wenige Wochen oder Tage) beschränkt sind und nicht den Betrieb der geothermischen Anlage betreffen.

4.7 Induzierte Seismizität

Einschätzung:

Durch eine messtechnische Überwachung in Kombination mit einem Reaktionsschema wird ein kontrollierter Betrieb der Anlage in allen Betriebsphasen (Erstellung bis Rückbau) sichergestellt. Schadensereignisse werden statistisch sicher und selbst fühlbare Ereignisse mit großer Wahrscheinlichkeit vermieden.

Erläuterung:

Eine ausführliche Darstellung der induzierten Seismizität im Zusammenhang mit Geothermieprojekten findet sich im Positionspapier des GtV-BV: Induzierte Seismizität, Position des GtV-BV Geothermie e.V., 2010.

Alle größeren Eingriffe in den Untergrund haben eine Änderung des lokalen Spannungsfeldes zur Folge und haben somit das Potenzial, seismische Ereignisse auszulösen. Seismische Ereignisse wurden daher nicht nur in Zusammenhang mit Geothermieprojekten berichtet sondern auch mit:

- der Errichtung von Staudämmen
- Bergbauarbeiten
- dem Bau von Verkehrstunneln
- Ausgrabungen
- Öl-/Gasförderung
- dem Bau von Unterspeichern (Gas, Druckluft)
- Flüssigkeitsverpressungen
- Niederbringung von Mineralwasserbrunnen
- Hydraulischer Stimulation von Öl-/Gaslagerstätten

Induzierte Seismizität bei geothermisch bedingten Stimulationsmaßnahmen hat den gleichen physikalischen Grund wie andere Fluidinjektionen. Der Hauptmechanismus ist, dass der zusätzlich aufgebrachte Porendruck die Normalspannung und somit die Reibungskräfte auf einer Störung zwischen zwei Gesteinsblöcken reduziert. Folge kann eine plötzliche Scherbewegung entlang dieser Störung sein. Dabei werden generell natürliche Scherspannungen, welche auf den Störungsflächen wirken, reduziert. Darüber hinaus können auch thermo-elastische Effekte die Reibungskräfte auf Störungsflächen reduzieren. Diese Effekte sind meist auf sehr kleine Gesteinsvolumina begrenzt.

Über seismische Effekte bei geothermischen Projekten wurde weltweit berichtet (Majer, Protokoll, 2011). Nirgendwo wurden Beben registriert, die die Tragstruktur von Gebäuden beeinträchtigt, die Infrastruktur geschädigt oder gar eine Gefahr für Menschen dargestellt hätten. Kleinere bzw. kosmetische Schäden wurden in der Regel ohne nähere Ermittlung der Verursachungszusammenhänge auf dem Kulanzweg reguliert oder es wurde eine einvernehmliche Schadensabwicklung angestrebt. Das Einwirken induzierter Seismizität auf den Menschen bzw. auf Gebäude wird durch DIN 4150 geregelt.

Jeder Stimulationsmaßnahme sollten eine strukturgeologische Charakterisierung des Untergrundes und eine detaillierte Spannungsfeldanalyse vorangestellt sein. Alle Schritte einer Stimulation sollten messtechnisch durch ein seismisches Monitoring begleitet werden. Die Messungen werden kontinuierlich statistisch und bezüglich ihrer räumlichen Verteilung ausgewertet. Auch deterministische Abschätzungen können einfließen. Das Ergebnis der einer Stimulationsmaßnahme vorausgehenden Betrachtungen ist ein Überwachungskonzept der natürlichen und induzierten Seismizität inklusive eines Reaktionsschemas. Überwachung und Reaktionsschema gewährleisten gemeinsam einen kontrollierten Betrieb der Anlage.

5. Zusammenfassende Bewertung der Auswirkungen geothermischer Stimulationsmaßnahmen

Alle in diesem Papier genannten Informationen beziehen sich auf die Stimulation von geothermischen Reservoirs bzw. können aus dem Vergleich zur Fracking-Technologie der Schiefer- und Kohleflözgasförderung gezogen werden. Zusammenfassend lassen die Fakten den Schluss zu, dass die Stimulation geothermischer Reservoirs nur mit Wasser oder unter Einsatz ökologisch unbedenklicher Stoffe durchgeführt werden sollte. Für alle weiterhin bestehenden Risiken liegen ausreichende und bewährte Regelungen vor, so dass entsprechende Vorsichtsmaßnahmen vorgenommen werden, die den Eintritt von Gefahren wirksam verhindern.

Bei der Gestaltung des Bohrplatzes und dem Ausbau der Bohrungen wird sichergestellt, dass keine Beeinträchtigung von grundwasserführenden Schichten während der Bohr- und Betriebsphase auftreten kann. Das so genannte Standrohr dient u.a. dazu, oberflächennahe grundwasserführende Schichten, die in der Regel nur in den oberen 100 m auftreten, zu schützen. Der Bohrplatz wird so eingerichtet und in den entscheidenden Bereichen versiegelt, dass der Schutz des Bodens und Grundwassers gegen Kontaminationen von der Oberfläche aus gewährleistet wird. Rinnen und Auffanggruben auf dem Bohrplatz stellen sicher, dass auch im Falle einer obertägigen

Kontamination die entsprechenden Verunreinigungen aufgefangen und ordnungsgemäß entsorgt werden können. Durch Zementation der Rohre wird gewährleistet, dass die Rohre dauerhaft fest mit dem umgebenden Gestein verbunden sind und dass keine Flüssigkeiten „hinter“ den Rohren entlang fließen können. Das Standrohr im Bereich der Grundwasserleiter dichtet diese zusätzlich ab. Nur im Bereich des Zielhorizontes steht die Bohrung durch Perforation (Löcher oder Schlitze) bzw. Open-Hole-Bereiche im direkten Kontakt zum Gestein. Geologische Schichten oberhalb des Zielhorizontes werden durch die Verrohrung isoliert und gegen Verunreinigung geschützt. Der Schutz von Boden und Grundwasser sowie generell die Minimierung von Umweltbeeinträchtigungen sind im bergrechtlichen Genehmigungsverfahren wichtige Zulassungskriterien.

Für Stimulationsmaßnahmen wird Frischwasser benötigt, das aus Oberflächengewässern oder Grundwasser gewonnen werden kann. Die Wasserentnahme muss bei Entnahmemengen $> 50.000 \text{ m}^3$, die nur selten benötigt werden, vorher bei der zuständigen Bergbehörde im Einvernehmen mit der Wasserbehörde beantragt und genehmigt werden. Durch die Entnahme kann es zu einem zeitlich befristeten Absinken des Wasserspiegels bzw. Grundwasserspiegels kommen. Durch genaue Kenntnis der hydrogeologischen Situation kann die Absenkung minimiert werden.

Das zur Stimulation vorgesehene Wasser wird kurzfristig aufbereitet. Für Gel-/Stützmittel-Maßnahmen wird es innerhalb von Stunden verwendet, bei hydraulischen und chemischen Stimulationen werden mögliche Zusätze während der Injektion zugeführt. Die Lagerung aller Zusatzstoffe am Standort der Stimulation muss genau im Hauptbetriebsplan angegeben werden.

Die Rissausbreitung im Untergrund und die natürliche Barrierewirkung geologischer Schichten werden durch Berechnungen im Voraus sowie durch seismo-akustisches Monitoring und Druckmessung während der Stimulation kontrolliert. Es kann ausgeschlossen werden, dass Risse sich bis in das oberflächennahe Grundwasser oder gar bis zur Oberfläche ausbreiten.

Die Freisetzung von im Formationsfluid gelösten Gasen wird durch umfassende technische Vorkehrungen kontrolliert bzw. verhindert. Es muss gewährleistet werden, dass das Gas nur kontrolliert durch die Bohrung selbst austreten kann. Das Risiko einer Leckage der Bohrung wird durch die vorgeschriebene Verrohrung und Zementation des Bohrlochs wirksam verhindert, so dass das oberflächennahe Grundwasser nicht verunreinigt werden kann.

Zu Verunreinigungen des Grundwassers oder des Bodens mit Formationsfluid, Stimulationsmittel oder Stimulationsmittelzusätzen und Säuren kann es nur bei unsachgemäßem Umgang kommen. Zu ihrer Vermeidung wurden bereits umfassende Regelungen entwickelt. Durch gesetzlich vorgeschriebene technische Maßnahmen (z.B. Ausbau des Bohrlochs) wird der Kontakt von Formationsfluid sowie Stimulationsmittel mit dem oberflächennahen Grundwasser vermieden. An der Oberfläche wird das Stimulationsmittel bzw. das geförderte Formationsfluid, falls es nicht wieder in den Untergrund einbracht werden kann, fachgerecht entsorgt. Somit besteht auch hier keine Gefahr für Boden und Grundwasser.

Die Menge und Zusammensetzung der Zusatzstoffe hängt von der technischen Aufgabenstellung ab. Beim obertägigen Handling dieser Stoffe werden Vorsichtsmaßnahmen ergriffen, damit diese Lösungen nicht mit dem Boden in Kontakt kommen. Schließlich sind die meisten Stimulationszusätze ökologisch unbedenklich, so dass diese vornehmlich zum Einsatz kommen.

Aus dem Rücklauf bzw. dem produzierten Wasser können Festpartikel ausfallen, die mit Schwermetallen angereichert sein können. Durch Anbringung von Filtern werden diese abgetrennt und die so angefallenen festen Rückstände müssen fachgerecht entsorgt werden.

Zur Quantifizierung der induzierten Seismizität sollten alle Schritte einer hydrothermalen Stimulationsmaßnahme messtechnisch durch ein seismisches Monitoring begleitet werden. Die Messungen werden kontinuierlich statistisch und bezüglich ihrer räumlichen Verteilung ausgewertet. Durch die messtechnische Überwachung in Kombination mit einem Reaktionsschema wird ein kontrollierter Betrieb der Anlage sichergestellt.

6. Genehmigungen und Kontrolle

Hydraulische Stimulationen gehören zu den bergbaulichen Tätigkeiten und werden gemäß Bundesberggesetz (§50ff BBergG) genehmigt. Der Unternehmer wird darin verpflichtet, alle Tätigkeiten im Betriebsplanverfahren genau zu beschreiben und der zuständigen Bergbehörde rechtzeitig zur Genehmigung vorzulegen. Im Fall der hier behandelten hydraulischen Stimulation sind das sämtliche Angaben zu Art und Zweck der Maßnahme (Stimulationsart, Tiefe, Speicherzustand, Durchlässigkeit, Erfolgsprognose), die Spezifikationen der vorgesehenen Technologie (Fluide, Volumen, Drücke, zeitlicher Ablauf, Speicher) und der Überwachung (Druckkontrolle, seismisches Monitoring, Reaktionsschema) sowie die ordnungsgemäße Entsorgung aller angefallenen Reststoffe.

Ebenso werden gemäß §58ff BBergG auch die für die Tätigkeit verantwortlichen Personen und die ausführenden Unternehmen benannt. So sind die Zuständigkeiten von vornherein klar und die Personalstruktur sowie die fachliche Eignung und Erfahrung der Beteiligten können im Vorfeld beurteilt werden.

Schließlich unterliegt jede Bergbautätigkeit der Bergaufsicht gemäß §69ff BBergG, die dafür sorgt, dass zu keiner Zeit von einem Betrieb Gefahren für Leben oder Gesundheit Dritter oder gemeinschädliche Einwirkungen ausgehen. Darin geregelt sind die Pflichten der Unternehmer sowie die Kontroll- und Eingriffsrechte der Bergbehörde.

7. Weiterführende Literatur und Internetseiten

Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I S. 3379), die zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1619) geändert wurde.

Blöcher, G.; Zimmermann, G.; Moeck, I.; Brandt, W.; Hassanzadegan, A.; Magri, F. (2010): 3D numerical modeling of hydrothermal processes during the lifetime of a deep geothermal reservoir. *Geofluids*, 10, 3, 406-421.

BMU-Broschüre (2010): Nutzungsmöglichkeiten der tiefen Geothermie in Deutschland
http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/44058.php

GtV-BV: Induzierte Seismizität, Position des GtV-BV Geothermie e.V., 2010.

Jung, R., Orzol, J., Tischner, T., Jatho, R., Kehrer, P. (2005): The geothermal project GeneSys - Results of massive waterfrac-tests in the Bunter sandstone formation in the Northern German Basin. In: *Proceedings, 30th Stanford University workshop Geothermal Reservoir*, 31.01.- 02.02.05, Stanford, USA.

Legarth, B., A. (2003): Erschließung sedimentärer Speichergesteine für eine geothermische Stromerzeugung, Dissertation, TU Berlin, Deutschland.

Majer Protokoll (2011):
http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/aktuelles/Aktuelles/Dateien_zu_News/EGS_Induced_Seismicity_Protocol_Final_Draft_110422-1_jam-1finalelm.pdf

Regensburg, S.; Banks, J.; Zimmermann, G. (2010A): Mineral precipitation from geothermal brines during reservoir activities - Example Gross Schönebeck (Germany). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 12, Suppl. 1, A856.

Regensburg, S.; Wiersberg, T.; Brandt, W.; Huenges, E.; Saadat, A.; Schmidt, K.; Zimmermann, G. (2010B): Geochemical properties of saline geothermal fluids from the in-situ geothermal laboratory Groß Schönebeck (Germany). *Chemie der Erde - Geochemistry*, 70, Suppl. 3, 3-12.

Schindler, S. et al. (2010): Successful Hydraulic Stimulation Techniques for Electric Power Production in the Upper Rhine Graben, Central Europe; *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia*, 25-29 April 2010.

TAB-Studie 2003: <http://www.geothermie.de/wissenswelt/glossar-lexikon/t/tab-studie-2003.html>.

Tischner, T., Schindler, M., Jung, R., Nami, P. (2007): HDR project Soultz: Hydraulic and seismic observations during stimulation of the 3 deep wells by massive water injections. *Proceedings, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 22-24.

Weidler, R., Gérard, A., Baria, R., Baumgärtner, J. & Jung, R. (2002): Hydraulic and microseismic results of a massive stimulation test at 5 km depth at the european hotdry- rock test site Soultz, France. In: Proceedings of the 27th workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University; Stanford, California: 28-30.

www.geothermie.de

www.bgr.bund.de

Zimmermann, G.; Blöcher, G.; Reinicke, A.; Brandt, W. (2011): Rock specific hydraulic fracturing and matrix acidizing to enhance a geothermal system - Concepts and field results. *Tectonophysics*, 503, 1-2, 146-154.

Zimmermann, G.; Moeck, I.; Blöcher, G. (2010): Cyclic waterfrac stimulation to develop an enhanced geothermal system (EGS): Conceptual design and experimental results. *Geothermics*, 39, 1, 59-69.