



Sachstand

Hydraulische Stimulation zur Erschließung geothermaler Ressourcen Zur Frage der Zusammensetzung und Bedeutung von Frack-Fluiden

Hydraulische Stimulation zur Erschließung geothermaler Ressourcen

Zur Frage der Zusammensetzung und Bedeutung von Frack-Fluiden

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 034/22
Abschluss der Arbeit: 13. Juni 2022
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung
und Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Hydraulische Stimulation zur Erschließung unterirdischer Ressourcen	4
2.	Hydraulische Stimulation für die Nutzung geothermaler Ressourcen	4
3.	Hydraulische Stimulation für die Gewinnung von Erdgas	5
4.	Zusammensetzung von Frack-Fluiden für die hydraulische Simulation	6
5.	Nutzung von Stimulationsverfahren in der Tiefen Geothermie in Deutschland	8
6.	Fazit	9
7.	Literatur- und Quellenhinweise	10

1. Hydraulische Stimulation zur Erschließung unterirdischer Ressourcen

Im Untergrund befinden sich verschiedene werthaltige Ressourcen, die abhängig von den geologischen Gegebenheiten nicht immer direkt mittels Bohrung effektiv erschlossen werden können. Dabei kann es sich um Trink- oder Grundwasser, um Erdgas oder Erdöl, aber auch um Erdwärme handeln. Sind Gesteinsschichten nicht ausreichend durchlässig und beinhalten nicht ausreichend natürliche Wegsamkeiten, um die Ressource optimal zu nutzen, nutzen Ingenieure das Verfahren der hydraulischen Stimulation um Gesteinsschichten gezielt aufzubrechen und in horizontaler Ausdehnung zugänglich zu machen. Die hydraulische Stimulation erhöht in der Folge die Durchlässigkeit von geologischen Schichten und intensiviert auf diese Weise die Förderung von Erdgas, Erdöl und geothermischer Energie oder ermöglicht sie in manchen Fällen überhaupt erst. Sie wird auch zur Erschließung von Grundwasservorkommen genutzt (BGR 2013: 1).

Für die hydraulische Stimulation wird in eine vorhandene Bohrung unter hohem Druck ein **Frack-Fluid** in Mengen von mehreren tausend Kubikmetern vertikal in den Untergrund eingepresst. Hauptbestandteil des Fluids ist Wasser, dem Stützmittel und weitere Zusätze und Chemikalien zugesetzt sein können. In Kapitel 4 wird die Zusammensetzung von Frack-Fluiden allgemein erläutert und auf die Funktion von Additiven eingegangen.

Bei der Erschließung von unkonventionellen Erdgaslagerstätten kommt das Verfahren der hydraulischen Stimulation ebenfalls zum Zug und wird in diesem Kontext außerhalb ingenieurwissenschaftlicher Literatur häufig als „**Fracking**“ bezeichnet (siehe Kapitel 3). In diesem Zusammenhang wurden in den vergangenen Jahren eine Reihe von Übersichtsarbeiten zur Frage der ökologischen Auswirkungen des Frackings auf Boden, Wasser und Bebensicherheit (induzierte Seismizität) erstellt.

Dem gegenüber ist zur Relevanz und Ausführung der hydraulischen Stimulation bei der Nutzung von Geothermie vergleichsweise wenig Fachliteratur verfügbar. Das Verfahren scheint vereinzelt, jedoch nicht generell angewandt zu werden, ohne dass es systematische Erfassungen für den deutschen Raum hierzu gäbe (siehe Kapitel 5). Zu der hier aufgeworfenen Frage der Umweltauswirkungen von hydraulischen Stimulationsverfahren an Geothermiestandorten wurden keine spezifischen Erhebungen identifiziert.

2. Hydraulische Stimulation für die Nutzung geothermaler Ressourcen

Die Geothermie macht sich zunutze, dass die Temperatur mit zunehmender Tiefe tendenziell steigt. Unter Ausnutzung des Temperaturgradienten zwischen Erdoberfläche und tiefen geologischen Schichten können in geothermischen Anlagen Wärme oder Strom erzeugt werden. Dafür wird eine unterirdische Verbindung zwischen zwei oder mehr Bohrungen genutzt. Über die eine Bohrung wird ein Wärmemedium z. B. Wasser in den Untergrund gepresst, über die zweite Bohrung wird das erwärmte Fluid entnommen und zur Energiegewinnung herangezogen.

Je nach Standort und Beschaffenheit des Untergrundes kann es erforderlich sein, Fließwege in der Tiefe zu eröffnen, zu erweitern oder zu stabilisieren, insbesondere bei der „Tiefen Geothermie“, bei der Tiefen von mehr als 400 Metern erschlossen werden.

Bei der **Tiefen Geothermie** wird zwischen hydrothermalen und petrothermalen Ressourcen unterschieden. In hydrothermalen Lagerstätten befinden sich bereits förderbare Thermalwässer. An diesen Standorten können in der Regel bestehende Risse als Querverbindungen zwischen der Einpressbohrung und der Entnahmebohrung im Untergrund genutzt werden, um einen Kreislauf für das Wärmefluid zu schließen. In einem solchen Fall wäre keine hydraulische Stimulation vonnöten. Dem gegenüber sind bei petrothermalen Ressourcen zwar heiße Gesteinsschichten, aber mangels Permeabilität keine Wässer vorhanden. Petrothermale Standorte können nur durch hydraulische Stimulation (=Fracking) erschlossen werden. Bei wenig durchlässigen hydrothermalen Systemen kann Fracking eine Steigerung der Produktivität bewirken (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2013: 1-2).

In Deutschland sind derzeit 42 Tiefe Geothermie-Anlagen in Betrieb, die circa 1,3 Terrawattstunden klimaneutrale Wärme pro Jahr erzeugen. Das Potenzial der hydrothermalen Ressourcen wird auf insgesamt 100 Terrawattstunden pro Jahr geschätzt. Anlagen, die petrothermale Ressourcen nutzen, sind bisher in Deutschland nicht im kommerziellen Betrieb (Bundesverband Geothermie 2022). Die Erschließung petrothermaler Ressourcen unter Nutzung von Stimulationsverfahren ist aber Gegenstand der Forschung. In der „Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland“, die sechs Forschungseinrichtungen 2022 als Handlungsempfehlung vorgestellt haben, gehen die Autoren davon aus, dass die geologischen Verhältnisse in vielen Regionen Deutschlands petrothermale Systeme zulassen würden (Bracke, Huenges 2022: 9).

3. Hydraulische Stimulation für die Gewinnung von Erdgas

Wenn ein Frack-Fluid unter hohem Druck in gasführende Gesteinsschichten gepresst wird, kann das die geförderte Menge an Gas erhöhen oder die Entnahme des fossilen Energieträgers überhaupt erst ermöglichen. Nachdem vor rund zehn Jahren eine Diskussion über die ökologischen Folgen des Frackings einsetzte, wurde im Laiensprachgebrauch und schließlich auch juristisch zwischen „konventionellen Fracking“ vor allem im Sandstein und „unkonventionellem Fracking“ in Schiefer-, Ton-, Mergel- und Kohleflözgestein unterschieden. Die Unterscheidung wird unter Geologen nunmehr an der Permeabilität und Porosität des Untergrundes festgemacht.

Konventionelles Fracking wurde in Deutschland über 50 Jahren bei Erdgaslagerstätten eingesetzt, um die Gasgewinnung anzuregen (Meiners 2012: A10f). Rund 320 Fracks sollen durchgeführt worden sein. Seit 2011 werde die Methode hierzulande jedoch nicht mehr angewandt (Exxon Mobil (unbekanntes Jahr)). In Deutschland hat die Erdgasförderung 1980 ihren Höhepunkt erreicht und ist seither rückläufig.

Im Zusammenhang mit dem Ausbau der Schiefergasgewinnung in den USA setzte vor knapp zehn Jahren eine kontroverse Debatte über die möglichen ökologischen Folgen der Frackings bei unkonventionellen Lagerstätten ein. Im Mittelpunkt stehen dabei die Fragen, ob Grund- und Trinkwasser durch Frack-Fluide und aufsteigende Lagerstättenwässer verunreinigt werden können. Auch weiträumige Verunreinigungen von Böden und die Frage der induzierten Beben wurden in diesem Zusammenhang in der Fachwelt kontrovers diskutiert. Da Schiefergas in sehr wenig durchlässigen Gesteinen vorkommt, erfordert es ein Mehrfaches an Bohrungen und hydraulischen Stimulationen (BGR 2016: 10) – und unterscheidet sich in dieser Hinsicht von der bisherigen Anwendung hydraulischer Stimulationen an Geothermiestandorten. Der damit verbundene

enorme Wasserverbrauch und die immensen Mengen an behandlungsbedürftigen Lagerstättenwässern (Flowback) sind Gegenstand der Auseinandersetzung - auch in den USA. Die Zerstörung von Naturräumen, Schadstoffemissionen durch Maschinen und Verkehr können gegen die Erschließung solcher Lagerstätten ins Feld geführt werden. Übersichtsarbeiten zur den Umweltauswirkungen des unkonventionellen Frackings folgen theoretischen Erwägungen und ziehen unter anderem Daten etwa zur Häufigkeit der Fracks und den eingesetzten Frackfluiden heran. Empirische Studien zur Frage der Auswirkung von Fracks sind dem gegenüber deutlich in der Minderzahl; die erschließenden Unternehmen wären hierfür einzubeziehen. Während Hydrogeologen und Ökologen die Risiken des unkonventionellen Frackings im Vordergrund sehen, heben Geowissenschaftler und Geologen die Potenziale der so erschließbaren Ressourcen und deren wirtschaftliche Bedeutung hervor (vgl. BGR 2016, Meiners 2012).

Das im Februar 2017 in Kraft getretene „Regelungspaket Fracking“ bewirkte eine Neuregelung des Frackings im Berg- und Wasserrecht in Deutschland, wobei ein Fokus auf den Schutz des Trinkwassers gelegt wurde. Die Erdgasgewinnung in Schiefer-, Ton-, Mergel- und Kohleflözgestein (= unkonventionelles Fracking) ist demnach in Deutschland grundsätzlich verboten. Lediglich zu wissenschaftlichen Zwecken können die Bundesländer bundesweit maximal vier Erprobungsmaßnahmen im Schiefer-, Ton-, Mergel- oder Kohleflözgestein zulassen. Die Regelungen für das sogenannte konventionelle Fracking in anderen Gesteinen wurden ebenfalls angepasst. Für Fracking zum Zweck der Gas und Ölgewinnung besteht neben anderem eine Pflicht zur Umweltverträglichkeitsprüfung (BMUV 2017).

4. Zusammensetzung von Frack-Fluiden für die hydraulische Simulation

Die lokalen geologischen Gegebenheiten und das Nutzungsziel entscheiden über die konkret angewandte Stimulationstechnik und die Frage, ob und welche Chemikalien dem Frack-Fluid zugesetzt werden. Über vorausgehende Simulationen wird ermittelt, welches Fluid mit welchem Druck eingepresst werden muss und wie sich dieses im Untergrund voraussichtlich verhält. Die angewandte Strategie – auch die Zusammensetzung des Fluids - wird im Verlauf der geologischen Arbeiten angepasst.

Hydraulische Stimulationen werden von **hochspezialisierten Dienstleistern** vorgenommen, die in der Regel international tätig sind (Meiners 2012: A61f). Die Frack-Flüssigkeit besteht ganz überwiegend aus Wasser, dem bei Bedarf Stützmittel und chemische Begleitstoffe hinzugefügt werden können (BGR 2013: 1). Die verwendeten **Frack-Fluide werden vor Ort vermischt und bereitgestellt**.

Frack-Fluide werden nach dem verwendeten Trägerfluid in vier Gruppen unterteilt:

1. Wasserbasierte Systeme. Wasserbasierte Frack-Fluide sind Gemische, die zu 80 bis über 95 Prozent aus Wasser bestehen und mit Additiven versetzt werden. Meist enthalten sie einen Gelbildner (siehe unten) zur Erhöhung der Viskosität und um Stützmittel wie Quarzsand in die gebildeten Risse zu transportieren, damit diese sich nicht wieder verschließen. Slickwater-Fluide sind ebenfalls wasserbasiert. Sie sind aber daraufhin optimiert, dass die Reibung bei hohen Pumpraten nicht zu sehr zunimmt und enthalten hierfür als Additive Reibungsminderer, die die Viskosität absenken.

2. Schaumbasierte Systeme, die aus einer Wasser-Gas-Emulsion bestehen. Als Gas wird Stickstoff oder Kohlendioxid verwendet, das mit Wasser und Schaumbildnern vermischt wird.
3. Ölbasierte Systeme (im Wesentlichen auf Basis von Dieselöl mit Additiven) können in wasserempfindlichen Erdschichten etwa mit quellfähigen Tonmineralen verwendet werden.
4. Säurebasierte Systeme (im Wesentlichen mit Salzsäure) zur Stimulation in schwer durchlässigen, säurelöslichen Formationen aus Kalkstein oder Dolomit.

Dieser Einteilung folgend können dem Frack-Fluid folglich eine Reihe unterschiedlicher Zusätze in Form von handelsüblichen Chemikalien zugesetzt werden. Diese erfüllen folgende Funktionen:

Stützmittel können die erzeugten Risse offen halten, indem sie als Partikel in die Risse eindringen und diese in loser Anordnung auffüllen. Stützmittel werden dem Frack-Fluid dafür mit fünf bis über dreißig Gewichtsprozent zugesetzt. Ein typisches Stützmittel ist Quarzsand in verschiedenen Körnungen; des Weiteren werden auch keramische Produkte oder gesinterter Bauxit verwendet. Damit die Stützmittel tatsächlich in den Rissen an Ort und Stelle verbleiben, können auch Kunststoffe wie Epoxid- und Phenolharze zugesetzt sein (Bundesverband Geothermie 2012: 10).

Zusätzlich zu den Stützmitteln können Additive eingesetzt werden. Der Anteil der Additive liegt im Bereich zwischen 0,2 bis zu mehr als 10 Gewichtsprozent.

Ablagerungshemmer sollen etwa das Ausfallen von schwer löslichen Salzen im Untergrund verhindern. Hierfür werden beispielsweise Ammoniumchlorid, Ethylenglykol, Polycarbonate oder Phosphonate verwendet.

Biozide dienen der Unterdrückung des Wachstums von Bakterien und Algen in den genutzten Wässern. Bestimmte Mikroorganismen könnten zur Produktion toxischen und korrosiven Schwefelwasserstoffs beitragen. Bei den verwendeten Wirkstoffen kann es sich um Glutaraldehyd oder andere biozide Wirkstoffe handeln.

Um die Ausfällung von Eisensalzen zu verhindern, können Zitronensäure oder Ethylendiamintetraacetat zugegeben werden.

Als Gelbildner zur Gewährleistung des Stützmitteltransports in die Risse werden Polysaccharide wie Guarkernderivate sowie zum anderen Celluloseether wie Methylcellulose, Carboxymethylcellulose und Hydroxyethylcellulose verwendet. Auch Kunststoffe wie Acrylamidcopolymere und Vinylsulfonate können genutzt werden.

Um die Gelstruktur zu zerstören und das Stützmittel in den Rissen zu halten, können sogenannte Kettenbrecher eingesetzt werden. Es kann sich beispielsweise um Stoffe wie Ammonium- oder Natriumperoxodisulfat, Natriumbromat oder Enzyme handeln.

Korrosionsschutzmittel verhindern das Rosten der Anlagenteile aus Stahl. Verwendet werden könnten Methanol, Isopropanol, Propargylalkohol oder auch Ammoniumsalze.

Reibungsminderer dienen der Verringerung der Reibung innerhalb der Frack-Fluide und vermindern so den Energieeinsatz bei der Druckbeaufschlagung. Hierzu werden Polyacrylamide, Glycolerether oder auch Erdöldestillate eingesetzt.

Diese nicht abschließende Übersicht verdeutlicht: Es können theoretisch sehr viele unterschiedliche Stützmittel und Additive, auch Säuren verwendet werden. Das genau verwendete Gemisch ist vom Einzelfall abhängig und nicht öffentlich bekannt (Fink 2013).

Abzugrenzen von Chemikalien, die eventuell bei der hydraulischen Stimulation eingesetzt werden könnten, sind **Wärmeträgerfluide**, die bei der Nutzung der Geothermie als Alternative zu Wasser eingesetzt werden können, um den Energieertrag zu optimieren. Dabei handelt es sich um kommerziell erhältliche Mischungen von Chemikalien, deren Zusammensetzung nicht immer abschließend bekannt ist. Mit der Frage der Umweltverträglichkeit solcher Substanzen befasste sich ein Forschungsprojekt des Technologiezentrums Wasser (vgl. Schmidt 2012).

5. Nutzung von Stimulationsverfahren in der Tiefen Geothermie in Deutschland

Es gibt weder ein Kataster zur Stimulation des Untergrundes zur Erschließung von geothermischen Ressourcen hierzulande noch aktuelle Veröffentlichungen zur genannten Fragestellung. Einen ungefähren Überblick gibt eine Übersicht des Bundesverbands Geothermie, die bereits 2011 erstellt wurde und daher nicht mehr aktuell ist (Bundesverband Geothermie 2012). Darin heißt es: In sechs der damals 19 existierenden Geothermieprojekte seien Stimulationsverfahren zur Steigerung des Energieertrags eingesetzt worden. An den Standorten Hannover und Horstberg sei dabei nur Wasser zum Zug gekommen. Das Deutsche GeoForschungszentrum nutzte am Standort Groß Schönebeck ein typisches Frack-Fluid aus Wasser, Sand in Form eines Gels und Stützmitteln – letztere werden nicht konkret benannt. Im Oberrheingraben seien sowohl Fracks mit dem primären Medium Wasser als auch solche mit Salzsäure vorgenommen worden. Ob ggf. weitere Zusätze enthalten waren, wird nicht angegeben und auch nicht ausgeschlossen (Bundesverband Geothermie 2012: 11).

Zur Frage, wann Stützmittel bei der Erschließung geothermaler Ressourcen vonnöten sein könnten, äußern sich Blöcher et al.. Wenn sich kein selbst-abstützender Effekt der unterirdischen Wegsamkeiten ergebe, könne die Zugabe von mineralischen Additiven, wie Quarzsand oder keramischer Materialien, wie Bauxit das Schließen der Risse verhindern. Diese seien mithilfe von Polymeren zu einem hochviskosen Gel vermennt (siehe Kapitel 2). Durch weitere Additive wird dafür gesorgt, dass die mineralischen Partikel schließlich an Ort und Stelle bleiben (Blöcher 2016: 6).

Für den Standort Unterhaching wird eine Stimulation mit verdünnter Salzsäure angegeben (Bundesverband Geothermie 2012: 12). Säure wird in der Regel bei Carbonatgesteinen angewandt, um diese aufzulösen. Mitunter ist in der Literatur dann auch vom „Säure-Fracking“ die Rede. Dafür könne 10- bis 33-prozentige Salzsäure zusammen mit einem Korrosionsinhibitor verwendet werden, der das Rosten von metallenen Anlagenteilen verhindern soll. Essigsäure und Kohlensäure werden als langsamer wirkende Alternativen zu Salzsäure benannt (Bundesverband Geothermie 2012: 11). In Sandsteinformationen könne eine Mischung aus Flußsäure und Salzsäure verwendet werden (Blöcher 2016: 9).

Immer wieder findet sich auch die Aussage, für die hydraulische Stimulation in Geothermieprojekten würde nur „Wasser ohne chemische Zusätze“ verwendet (Bundesverband Geothermie 2020). Diese Aussage wird durch obige Publikationen, unter anderem desselben Bundesverbands Geothermie, zumindest partiell in Frage gestellt. Grundsätzlich scheint es aber auch Geothermievorhaben zu geben, in denen ausdrücklich und ausschließlich Wasser verwendet wurde: „Der Riss im tiefen Untergrund von Groß Buchholz ist ein reiner Wasser-Frac(k), der ohne Stützmittel und Zusatzstoffe erzeugt wurde.“ Dieser dauerte fünf Tage (BGR 2013: 4).

Als neuere Verfahren führt die Literatur die zyklische Stimulation sowie auch die thermische Stimulation an. Im ersten Fall erfolgt das Einpressen des Frack-Fluids gepulst, im zweiten wird kaltes Wasser genutzt, welches das Gestein aufgrund des Temperaturunterschiedes zusätzlich unter Spannung setzen soll (Blöcher 2016). Es waren keine Informationen ersichtlich, die auf die Frage der Additive bei diesen neuen Stimulationsverfahren eingehen.

6. Fazit

Im Licht der spärlichen Fachliteratur zur Frage der Zusammensetzung von Frack-Fluiden bei der Erschließung geothermischer Ressourcen entsteht der Eindruck, dass an Standorten der Tiefen Geothermie hierzulande bisher nur in wenigen Fällen Stimulationsverfahren angewandt wurden. Die Informationstiefe zu den eingesetzten Frack-Fluiden ist wenig detailliert; die Quellenlage mit nur einer Quelle mehr als dürftig. Ausweislich jener Quelle hat es sich bei den bisherigen Geothermie-Fracks je nach Standort um Wasser oder um säurehaltige Medien gehandelt, wobei zur Frage der Additive keine weiteren Angaben gemacht wurden. In einem Fall wird ein typisches Frack-Fluid auf Basis von Wasser, Stützmitteln und Gelbildnern beschrieben, auch hier ohne detaillierte Angabe der Zusammensetzung. Wenn Stimulationsverfahren genutzt werden, wird oft pauschal Wasser als Medium angegeben. Wasser ist aber generell ein gebräuchliches Medium für hydraulische Stimulationen (siehe Kapitel 2). Da die Zusammensetzung von eventuell verwendeten Frack-Fluiden zur Erschließung geothermaler Ressourcen in vielen Aspekten fraglich erscheint, ließe sich die gestellte Frage nach möglichen Auswirkungen auf die Umwelt nur äußerst spekulativ erörtern. Im Übrigen konnte hierzu keine spezifische Fachliteratur identifiziert werden. Dem gegenüber stehen zahlreiche Übersichtsarbeiten zur Frage der Umweltauswirkungen der hydraulischen Stimulation bei der Erschließung unkonventioneller Gaslagerstätten zur Verfügung (vgl. Umweltbundesamt 2013, Meiners et al. 2012).

7. Literatur- und Quellenhinweise

Blöcher, Guido et al. (2016). Report on Stimulation Technologies for Geothermal Reservoirs, 14. September 2016, online abrufbar unter: https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_5001971_2/component/file_5001979/content

Bracke, Rolf; Huenges, Ernst (2022). Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland, Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende, Strategiepapier von sechs Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft, 2.2.2022, online abrufbar unter: <https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FhG%20HGF%2002022022.pdf>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz - BMUV (2017): Fracking - Risiken für die Umwelt, 24. März 2017, <https://www.bmuv.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/binnengewasser/grundwasser/grundwasserrisiken-hydraulic-fracturing>

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - BGR (2013). Fracking – was ist das, online abrufbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Downloads/Fracking.pdf?blob=publicationFile&v=5

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – BGR (2016). Schieferöl und Schiefergas in Deutschland. Potenziale und Umweltaspekte. Hannover, Januar 2016, online abrufbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Abschlussbericht_13MB_Schieferoel-gaspotenzial_Deutschland_2016.pdf?blob=publicationFile&v=5

Bundesverband Geothermie (2012). Hintergrundpapier zur Stimulation geothermischer Reservoirs. Online abrufbar unter: <http://www.cif-ev.de/pdf/2012fracking4.pdf>

Bundesverband Geothermie (2022). Verbände fordern bessere Bedingungen für Tiefe, 2. Juni 2022, online abrufbar unter: <https://www.solarserver.de/2022/06/02/verbaende-bedingungen-tiefe-geothermie/>

Bundesverband Geothermie 2020. Hydraulische Stimulation. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/h/hydraulische-stimulation.html>

Exxon Mobil (2011). Wie funktioniert Fracking? <https://corporate.exxonmobil.de/Energie-und-Umwelt/Erdgas/Fracking>

Fink, Johannes, Karl (2013). Hydraulic Fracturing Chemicals and Fluid Technology. Elsevier.

Holst, Frauke (2017). Zusammensetzung und Gefährdungspotenziale der Frack-Fluide, der Formationswässer und des Flowback.

Meiners, Georg et al. (2012). Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten. August 2012, in: UBA Texte 61/2012 <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4346.pdf>

Schmidt, Kathrin et al. (2012). Wärmeträgerfluide in der Geothermie - Exemplarische Gefährdungsabschätzung anhand von Strukturaufklärung, Abbaubarkeit und Toxizität. 2. März 2012, Kurzbericht, online abrufbar unter: <https://www.badenova.de/downloads/unternehmen/engagement/innovationsfonds-downloads/unternehmensbereiche/stab/innovationsfonds/abschlussberichte/2010/2010-3-abwaermetraegerfluide-kurz.pdf>
