

Entwurf

Bericht

Expertenkommission Fracking

2021

Mitglieder der Expertenkommission Fracking (ExpKom)

Dr. Lilian Busse

Umweltbundesamt (UBA)
Leiterin Fachbereich Gesundheitlicher
Umweltschutz und Schutz der Ökosysteme
Dessau-Roßlau

Prof. Dr. Thomas Himmelsbach

Bundesanstalt für Geowissenschaften und
Rohstoffe (BGR)
Abteilungsleiter Grundwasser und Boden
Hannover

Prof. Dr. Charlotte Krawczyk (Vorsitzende)

Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches
GeoForschungsZentrum (GFZ)
Direktorin Department Geophysik
Potsdam

Sabine Rosenbaum

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-
Holstein (LLUR)
Leiterin Abteilung Geologie und Boden
Flintbek

Angelika Seidemann

Landesamt für Bergbau, Geologie und
Rohstoffe des Landes Brandenburg (LBGR)
Leiterin Abteilung Geologie
Cottbus

Prof. Dr. Holger Weiß

(stellvertretender Vorsitzender)
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
GmbH (UFZ)
AG-Leiter Department Umweltinformatik
Leipzig

Mitarbeitende der Geschäftsstelle der Expertenkommission Fracking

Dr. Jan Globig

Henning Kraudzun

Dr. Ute Münch (Leitung)

Berichtsentwurf

Expertenkommission Fracking

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Zusammenfassung	3
Wesentliche Erkenntnisse der 2020/2021 durchgeführten Studien	5
Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer	5
Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Methanemissionen und Szenarien	7
Mikroseismizität bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten	10
In den Studien 2020/2021 identifizierter Forschungsbedarf	14
Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer	14
Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Methanemissionen und Szenarien	14
Mikroseismizität bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten	15

In den Studien 2020/2021 abgeleitete Handlungsempfehlungen	17
Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer	17
Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Methanemissionen und Szenarien	18
Mikroseismizität bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten	19
Bewertung der Studienergebnisse.....	21
Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer	21
Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Methanemissionen und Szenarien	22
Mikroseismizität bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten	23
Studienübergreifende Empfehlungen	24
Fazit	25
Internetauftritt.....	26
Beteiligung der Öffentlichkeit	26
Erprobungsmaßnahmen	26
Referenzen zu den Studien	27
Kontakt.....	28

Vorwort

Im vergangenen Jahr haben wir drei Studien durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung beauftragen lassen, um den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten zusammenfassen zu können. Als unkonventionelle Lagerstätten gelten solche, in denen Erdöl bzw. Erdgas in den Muttergesteinen Schiefer-, Mergel-, Ton- und Kohleflözgestein in kleinen Poren eingeschlossen ist.

Für alle drei Studien wurden internationale Publikationen zu Fracking-Maßnahmen in unkonventionellen Lagerstätten ausgewertet. Insbesondere Erfahrungen anderer Länder wie den USA, Kanada und Australien in denen Kohlenwasserstoffe durch die Fracking-Methode aus unkonventionellen Lagerstätten gewonnen werden, sind in den Studien dokumentiert. Aber auch Beispiele aus China und Europa werden herangezogen. Dabei werden nicht nur Unterschiede bzw. Ähnlichkeiten der geologischen Gesteinsformationen und Strukturen herausgearbeitet, sondern auch technische Standards und rechtliche Rahmenbedingungen, sofern möglich, betrachtet. Da die USA fast 80 % ihres Erdgases aus unkonventionellen Lagerstätten durch die Fracking-Methode gewinnen, dominiert hier die Fachliteratur.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Literaturrecherchen werden jeweils Handlungsoptionen und Empfehlungen sowie der Forschungsbedarf für den Einsatz der Technik in Deutschland abgeleitet.

In den Studien werden insbesondere die folgenden Aspekte betrachtet, die auch in aktuellen Diskussionen thematisch im Vordergrund stehen:

1. Monitoringkonzepte für Grundwasser und Oberflächengewässer,
2. Methanemissionen,
3. mögliche Risiken durch induzierte Seismizität.

Die Studien sind auf unserer Webseite veröffentlicht. Unsere Zusammenfassung und Bewertung der Studienergebnisse sind in diesem Bericht dargelegt. Mit der Übergabe des dritten Berichtes an den Deutschen Bundestag Ende Juni 2021 sehen wir unsere Aufgabe im Hinblick auf die Beratung der Politik zum Stand von Wissenschaft und Technik als erfüllt an.

Der Deutsche Bundestag überprüft nun auf der Grundlage des vorliegenden Standes von Wissenschaft und Technik die Angemessenheit des Verbots für Fracking in unkonventionellen Lagerstätten.

Prof. Dr. Charlotte Krawczyk

(Vorsitzende der
Expertenkommission Fracking)

Zusammenfassung

Dieser Bericht zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik beim Aufbrechen von Schiefer-, Ton-, Mergelgestein oder Kohleflözgestein zur Aufsuchung oder Gewinnung von Erdgas oder Erdöl beruht ausschließlich auf internationalen Erfahrungen und hypothetischen Szenarien für Deutschland, da in Deutschland keine Erprobungsmaßnahmen stattfanden. Drei potentielle Risikobereiche werden beleuchtet: Methanemissionen, Grundwasser und Oberflächengewässer sowie induzierte Seismizität.

Aus den drei dazu beauftragten Studien leitet die Expertenkommission Fracking (ExpKom) folgende Kernaussagen und Bewertungen ab: Die Studien zeigen, dass sich die Umweltrisiken aufgrund von Fracking unkonventioneller Lagerstätten durch eine angepasste Steuerung und Überwachung der Maßnahmen minimieren lassen. Eine Erkundung des lokalen Geosystems im Zuge der Standortauswahl sowie ein so genanntes „Baseline Monitoring“ im Vorfeld potentieller Fracking-Vorhaben wird international in sehr unterschiedlichem Umfang durchgeführt. Die ExpKom hält ein ausführliches Baseline Monitoring jedoch für zwingend erforderlich, um den Ausgangszustand eines Gebietes im Hinblick auf die zuvor genannten Aspekte systematisch zu erfassen und auf dieser Grundlage Ausschlussgebiete zu ermitteln und den Umfang und das Design von Schutzmaßnahmen zu konzipieren.

Die Kommission betont, dass darüber hinaus zur Risikoabschätzung und -minderung auch spezifische Gefährdungspfade und die

Vulnerabilität der lokalen Schutzgüter zu betrachten sind. Da Deutschland dichter besiedelt ist als z. B. die USA, muss die Vulnerabilität grundsätzlich höher eingeschätzt werden.

Mit Hilfe von numerischen Simulationen können standortspezifische Parameter verwendet, Szenarien abgeleitet und Schwellenschwerte definiert werden. Sobald festgelegte Grenzwerte überschritten werden, sind umgehend geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um das Gefährdungspotential zu minimieren. Dies kann auch eine Unterbrechung oder den vollständigen Abbruch einer Maßnahme bedeuten.

Für den Umgang mit Produktions- und Lagerstättenwässern müssen im Vorfeld eines Fracking-Vorhabens Konzepte zur Aufbereitung, Lagerung und Entsorgung vorgelegt werden. Dabei muss der Fokus auf der Aufbereitung und Wiederverwendung liegen, um den Wasserverbrauch zu reduzieren. Für die Nachbetriebsphase sind verbindliche Regelungen mit den Betreibern zu treffen.

Als selbstverständlich erachtet die ExpKom die Verwendung modernster Technik und Materialien. Insbesondere bezüglich Methanemissionen sind so bei allen Produktionsschritten erhebliche Reduzierungen zu erreichen. In den Antragsunterlagen für Genehmigungsverfahren müssen alle zum Einsatz kommenden Technologien und die Materialien, die verwendet werden sollen, dargelegt werden.

Mit dieser fachlichen Grundlage kann nach Einschätzung der ExpKom die Prüfung des Deutschen Bundestages zur Angemessenheit

des Verbots für Fracking in unkonventionellen Lagerstätten (nach § 13a Wasserhaushaltsgesetz, WHG Absatz 1) vorgenommen werden.

Hierbei bedarf es schließlich eines gesellschafts-, wirtschafts- und klimapolitischen Abwägungs- und Entscheidungsprozesses, ob die Option von Fracking in unkonventionellen Lagerstätten in Betracht gezogen wird.

Wesentliche Erkenntnisse der 2020/2021 durchgeführten Studien

Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer

In der von *ahu GmbH Wasser · Boden · Geomatik* (Denneborg et al., 2021) erarbeiteten Studie werden die Ergebnisse einer internationalen Literaturrecherche zum Grundwassermonitoring im Zusammenhang mit der Förderung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten (Definition siehe Vorwort) zusammengefasst und dahingehend bewertet, inwieweit diese internationalen Erfahrungswerte auf deutsche Standorte übertragbar sind. In der Studie wurde insbesondere Literatur zu amerikanischen Lagerstätten ausgewertet, da in den USA bis zum Jahr 2020 ungefähr zwei Millionen Fracs durchgeführt wurden.

Die Studie fasst Erkenntnisse zu den gewässerbezogenen Risiken aus der internationalen Literatur zusammen und leitet daraus ab, welche Gefährdungspfade vorrangig in einem Monitoring zu berücksichtigen sind.

Hierbei sind vier Pfadgruppen zu unterscheiden:

- (0) Stoffeinträge unmittelbar an der Erdoberfläche (Transport, Lagerung und Bohrplatz);
- (1) Künstliche Wegsamkeiten entlang von Bohrungen;

(2) Natürliche Wegsamkeiten, die auf Störungen beruhen und

(3) Diffuse Ausbreitung von Fluiden unabhängig von bevorzugten Wegsamkeiten.

Die Auswertung internationaler Fachliteratur hat ergeben, dass die größten negativen Auswirkungen und Risiken für das Grundwasser und die Oberflächengewässer vom Umgang mit wassergefährdenden Stoffen an der Erdoberfläche ausgehen.

Die Studie erläutert methodische Ansätze sowie gesetzliche Anforderungen an das Monitoring von Fracking-Maßnahmen in unkonventionellen Lagerstätten. Hierzu werden bedeutende globale Geosysteme, in denen solche Lagerstätten durch Fracking-Maßnahmen erschlossen werden, dargestellt und mit entsprechenden Geosystemen in Deutschland verglichen.

Geosysteme mit Schiefergas-Vorkommen in den USA, Australien und Kanada sind ähnlich denen in Deutschland aufgebaut. Es handelt sich überwiegend um große Sedimentbecken mit unterschiedlichen Deckgebirgsaufbauten. Die Lagerstätten liegen in Tiefen von wenigen Hundert bis mehreren Tausend Metern. Für Deutschland kann allerdings in bestimmten Bereichen eine höhere tektonische Beanspruchung und das Auftreten von tiefgreifenden Störungen angenommen werden, so z. B. für die potentiellen Schiefergas-Vorkommen im Rheinischen Schiefergebirge.

In Hinblick auf die Planung und Voreingriffsuntersuchung eines Vorhabens wurden für die USA, Australien und Kanada keine Regelungen in der Fachliteratur gefunden, die mit dem Vorgehen der EU und damit auch für

Deutschland im Rahmen einer Strategischen Umweltprüfung (SUP) vergleichbar sind.

Dies betrifft die Festlegung von Ausschlussgebieten bei der Standortwahl sowie Modelle zur Standorterkundung und späteren Begleitung des operativen Monitorings. Ebenso gibt es in den USA keine gesetzlich geregelten Mindestabstände zwischen den Bohrplätzen, Förderbohrungen und Schutzgütern.

Bei der Standorterkundung stehen die Erfassung der hydrogeologischen Wirkungszusammenhänge mit den möglichen Gefährdungspfaden und die Beschreibung des Ausgangszustands (Baseline Monitoring) auf der Grundlage örtlicher Erkundungen und numerischer Standortmodelle im Vordergrund.

In den USA, Australien und Kanada existieren in der Regel keine oder nur unzureichende gesetzliche Anforderungen an ein Baseline Monitoring. Dieses beschränkt sich z. B. in den USA in der Regel auf wenige Untersuchungen im Nahbereich einer Bohrung in Bezug auf Hausbrunnen, Oberflächengewässer sowie ggf. auf Messungen in oberflächennah auftretenden Grundwasserleitern. Somit ist nach mehreren Millionen Bohrungen und fast zwei Millionen Fracs der Voreingriffszustand nicht mehr überall darstellbar. So wurden hydrochemische Charakterisierungen von Grundwasser und Oberflächengewässern in Hausbrunnen und Quellen für die öffentliche Wasserversorgung erst nach Beginn der Fracking-Aktivitäten vorgenommen.

Das bislang umfangreichste Baseline Monitoring wurde innerhalb einer Umweltverträglichkeitsstudie für einen Fracking-Standort in Lancashire (Großbritannien) durchgeführt.

Allerdings wurden regionale Fließsysteme und Austauschprozesse zwischen unterschiedlichen Grundwasserstockwerken nicht näher betrachtet.

Für die Betriebsphase existieren mittlerweile weltweit zahlreiche Erfahrungen und Regelwerke zum Bohrplatzdesign, zur betrieblichen Überwachung, zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen sowie zur Überwachung der Bohrlochintegrität.

Um die aufgetretenen negativen Umweltauswirkungen zu minimieren, wurden viele dieser Regelwerke inzwischen auch von der Öl- und Gasindustrie beim Fracking in unkonventionellen Lagerstätten weiterentwickelt. Folgende Punkte sind hierbei wichtig:

- Beteiligung aller Stakeholder auf allen Planungsebenen;
- Baseline Erhebungen und Monitoring aller relevanten Umweltindikatoren;
- Veröffentlichung aller Daten (u. a. Wasserverbrauch, Fluidzusammensetzungen, Fluidbilanzen, Methanemissionen);
- Risikomanagement;
- Frac-Kontrolle;
- Einhaltung von Mindestabständen zu Grundwasserleitern;
- Maßnahmen zur Verhinderung und Begrenzung von Unfällen und Verunreinigungen;
- Minimierung von Frac-Fluiden und Wasser sowie der Luftbelastungen durch Fahrzeuge und Aggregate;

- Verringerung des Risikos von Erdbeben durch sorgfältige Standortauswahl und Frac-Design;
- Geordnete Entsorgung des Flowbacks, der Prozesswässer und Bohrschlämme.

Die technologischen Verfahren zur Erschließung unkonventioneller Lagerstätten haben sich international in den vergangenen Jahren deutlich weiterentwickelt. An aktuellen Bohrplätzen werden mitunter 30 horizontale Bohrungen in einer Länge von bis zu zehn Kilometern eingebracht. Der Fracking-Vorgang ist heute weitgehend automatisiert und wird mit einer Vielzahl von Sensoren und Parametern überwacht, so dass die Entwicklung eines Fracs genau vorhergesagt und gesteuert werden kann. Die horizontale und vertikale Frac-Ausbreitung ist auf ca. 600 m begrenzt, so dass die erforderlichen Mindestabstände zu Schutzgütern und Wegsamkeiten wie Altbohrungen und durchlässigen Störungen festgelegt werden können. Zudem werden bei den Fluiden seit einigen Jahren weniger toxische Zusätze und insgesamt geringere Mengen verwendet. Die eingesetzten Stoffe werden erfasst und überwacht.

Für die Aufbereitung des Flowbacks und der Lagerstättenwässer werden in der Literatur eine Reihe technischer Möglichkeiten zur Wiederverwendung und Entsorgung genannt. International ist mittlerweile das Recyceln von Frac-Fluiden aus Kostengründen Standard; verbleibende Fluide werden beispielsweise in den USA nach Abschluss der Förderung in die ausgeförderte Lagerstätte verpresst.

In Bezug auf die Verpflichtungen nach der Stilllegung (Nachsorge) insbesondere von konventionellen Öl- und Gasbohrungen fehlten in den USA in der Vergangenheit Anforderungen an den Verschluss, die Überwachung und Dokumentation stillgelegter Bohrungen. Daher existiert dort heute eine große Anzahl unzureichend verschlossener und nicht dokumentierter Altbohrungen.

So kam es im Bereich von Altbohrungen immer wieder zu Fluidausbrüchen und unkontrollierten Entweichungen großer Mengen an Methan. Mittlerweile unternehmen einige US-Bundesstaaten (u. a. Pennsylvania, Texas, North Dakota) große Anstrengungen, die bislang nicht dokumentierten Altbohrungen aufzuspüren und zu sanieren.

Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Methanemissionen und Szenarien

Methan hat bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren eine um den Faktor 25 ([Umweltbundesamt](#)) höhere Treibhausgaswirkung als Kohlendioxid. Der Faktor der Klimawirksamkeit hängt allerdings von den betrachteten Zeitskalen ab. Wird beispielsweise ein kürzerer Zeitraum (20 Jahre) angesetzt, erhöht sich der Faktor auf 86. Um dem Klimawandel zu begegnen, wird deshalb eine deutliche Verringerung der anthropogen verursachten Methanemissionen angestrebt.

Durch die Förderung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten (Definition siehe Vorwort) wird jedoch die Freisetzung klimaschädlicher Methanemissionen befürchtet.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse zu Methanemissionen, die bei der Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten freigesetzt werden, sind in der Studie der *G.E.O.S. Ingenieur-Gesellschaft GmbH* zusammengefasst (Kahnt et al., 2021). Ausgewertet wurden hierfür zahlreiche internationale Fachpublikationen und Behörden-daten. Darüber hinaus wurde geprüft, inwieweit die gewonnenen Ergebnisse sich auf Deutschland übertragen lassen.

Die Auswertung der internationalen Fachliteratur zeigt, dass keine repräsentativen Daten für diffuse Methanaustritte über natürliche und künstlich geschaffene Wegsamkeiten in Bezug auf unkonventionelle Erdgaslagerstätten existieren. Auch bleibt offen, mit welchen Emissionsraten nach Beendigung der Förderung und vor allem nach Ende der gesetzlichen Nachsorge- und Überwachungs-pflicht in den derzeitigen Hauptfördergebieten gerechnet werden muss.

Fast 80 % der derzeitigen Gesamtfördermenge an Erdgas in den USA werden aus unkonventionellen Lagerstätten durch Fracking gewonnen. Seit 1990 erfasst die amerikanische Umweltschutzbehörde (Environmental Protection Agency, EPA) kontinuierlich Emissionsdaten zu Methanaustritten bei der Erdgasförderung aus unkonventionellen Lagerstätten.

Zu diffusen Methanemissionen über natürliche Wegsamkeiten wie tektonische Störungen und Klüfte vor einer Fördermaßnahme lassen sich in der Fachliteratur keine Angaben finden. Vermutlich sind sie jedoch ohnehin zu vernachlässigen und nicht messbar, da ansonsten die Lagerstätten über geologische Zeiträume hinweg ausgegast wären. Außerdem befinden sich unkonventionelle und konventionelle Lagerstätten oftmals zwar in unterschiedlichen Teufenlagen (Tiefe), aber in denselben Fördergebieten, so dass etwaige Emissionen von thermogenem Methan aus unkonventionellen Lagerstätten messtechnisch nicht von solchen aus konventionellen Lagerstätten zu unterscheiden sind.

Ebenfalls wurden bislang keine repräsentativen und direkt zuzuordnenden Messdaten zu Emissionen über künstliche Wegsamkeiten während der Produktion nachgewiesen. Potentielle Austritte von Methan scheinen oft diffus und über größere Flächen verteilt zu sein und sind daher nur schwer einer konkreten aktiven Bohrung zuzuordnen.

Der Gas- und Fluiddruck wird während der Förderung gegenüber dem natürlichen Lagerstättendruck signifikant abgesenkt. In dieser Phase kann das Gas nicht in das geologische Umfeld migrieren. Dies ändert sich, wenn sich der Lagerstättendruck nach Beendigung der Förderung aufgrund der Spannungs-umlagerung im ausgeförderten Speichergestein wieder erhöht.

Aufgrund der hohen Erschließungskosten werden Förderbohrungen in unkonventionellen Lagerstätten zumeist 20 bis 30 Jahre betrieben. Daher gibt es bisher

nur wenige Bohrungen in unkonventionellen Lagerstätten, die bereits außer Betrieb genommen worden sind. Eine Unterscheidung von diffusen Methanemissionen aus stillgelegten sowie aus den noch im Betrieb befindlichen Bohrungen ist somit nicht möglich.

Massive und kurzfristige Methanfreisetzungen, die temporär die Gesamtemissionen in einer Region dominieren können, werden als Superemitter bezeichnet. Diese Ereignisse sind in erster Linie auf stillgelegte und auf schlecht abgedichtete alte Bohrlöcher, Leckagen in Kompressoren oder Rohrleitungen sowie defekte Anlagenteile zurückzuführen. Auch Probleme bei Wartungsarbeiten können Methanemissionen verursachen. Technologisch bedingte Superemitter wurden in der Vergangenheit bereits vereinzelt identifiziert. Aufgrund kontinuierlich weiterentwickelter gesetzlicher und regulatorischer Vorgaben wurden entsprechende Lösungen zur Reduzierung der Methanemissionen entwickelt. Diese Maßnahmen werden vorrangig bei neuen, kaum jedoch bei älteren bestehenden Bohrungen umgesetzt. Die in der Fachliteratur genannten Emissionsraten bilden hingegen die Beiträge älterer und neuerer Anlagen gleichermaßen und unterschiedslos ab. Da die Zahl der Anlagen im Laufe der Zeit angestiegen ist, sind die in der Fachliteratur aufgeführten unterschiedlichen Angaben zu Methanemissionen und Emissionsraten nur eingeschränkt vergleichbar. Dies wird zusätzlich durch die Tatsache erschwert, dass es kaum vergleichbare und standardisierte Messverfahren gibt.

Die Daten zu Methanemissionen, die bei der Förderung, Verarbeitung und dem Transport des Gases auftreten, basieren auf langjährigen Datenreihen, die in der Erdgasindustrie erhoben wurden. Diese werden überwiegend mit Hilfe von standortbezogenen Messungen (*Bottom-Up-Ansatz*) und nur untergeordnet durch Fernerkundung (Satelliten, Flugzeuge, Drohnen, hohe Türme; sog. *Top-Down-Ansatz*) und Isotopenbestimmungen ermittelt.

Messungen nach dem *Top-Down-Ansatz* erfassen die Methan-Konzentration in der Atmosphäre und damit die Gesamtemissionen aller Emissionspfade. Das globale Budget kann so gut abgeschätzt werden. Eine Zuordnung zu einzelnen Pfaden ist auf diese Weise jedoch nicht möglich.

Messungen nach dem *Bottom-Up-Ansatz* erfassen die örtlichen Methanemissionen auch in geringen Konzentrationen, sofern Sensoren dicht genug an der Emissionsquelle installiert sind. Um einen Gesamtwert zu erhalten, müssen bei dieser Methode viele Einzelprozesse betrachtet, bewertet und gewichtet aufsummiert werden. So ist zum Beispiel darauf zu achten, dass nicht zwei Sensoren dieselbe Emissionsquelle messen, da ansonsten durch Doppelzählungen fehlerhafte Emissionsraten ermittelt würden.

Der Beitrag über einzelne Emissionspfade zur Gesamtemission an Methan ist mit den verfügbaren Methoden daher nur mit extrem hohem Messaufwand zu bestimmen. Zudem existieren starke räumliche Schwankungen, die auf folgende Randbedingungen zurückzuführen sind:

- fluktuierende Hintergrundkonzentrationen (natürliche Emissionen, Emissionen durch Landwirtschaft, etc.);
- klimatische und witterungsbedingte Schwankungen z. B. Starkwindphasen und Niederschläge;
- Zusammensetzung und Flüssigkeitsanteil des Lagerstättengases;
- Überschneidungen mit gleichzeitiger Ölgewinnung;
- unterschiedliche behördliche Anforderungen;
- zeitliche Schwankungen z. B. durch Störfälle/Superemitter und unterschiedlichen Stand der Technik.

Störfälle können mit dem *Bottom-up-Ansatz* somit nur erfasst werden, wenn sich die Sensoren in unmittelbarer Nähe zur Emissionsquelle befinden.

In der Fachliteratur sind sehr unterschiedliche Emissionsraten in einer Spannweite von 0,1 % und bis zu 17 % dokumentiert. Diese können durch die zuvor genannten unterschiedlichen Bestimmungsmethoden sowie durch das Fehlen standardisierter Bezugszeiträume erklärt werden. Außergewöhnlich hohe Emissionsraten beruhen jedoch meist auf Störfällen und sind damit nicht repräsentativ für eine mittlere Methanemissionsrate während des Normalbetriebs. Sie fließen aber in die Betrachtung mit ein und bedingen die Variabilität der Angaben zu Methanemissionen.

In der Studie wird auf Basis der vorliegenden Daten für das Jahr 2015 für die USA eine Methanemissionsrate, die alle Emissions-

pfade umfasst, aus der gesamten Erdgasproduktion (konventionelle und unkonventionelle Lagerstätten) in Höhe von 2-4 % der gesamt geförderten Methanmenge entsprechend des *Top-Down-Ansatzes* abgeleitet. Da mittlerweile durch Aufgabe alter Gasfelder mit konventioneller Förderung überwiegend nur noch aus unkonventionellen Lagerstätten gefördert wird, kann dieser Anteil an den Emissionen daher als repräsentativ für unkonventionelle Lagerstätten angesehen werden.

Die höchsten Emissionsraten werden bei der Verarbeitung und während des Transportes des geförderten Gases gemessen. Schwachstellen sind unter anderem Kompressoren und Ventile. Da 99 % der Emissionen während der Produktion und der Verteilung unabhängig von den Fördermethoden entstehen, lässt sich schlussfolgern, dass die in der vorliegenden Studie ermittelte Methanemissionsrate von ca. 2-4 % der gesamt geförderten Methanmenge für das Jahr 2015 als realistisch anzusehen ist.

Mikroseismizität bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten

Bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten (Definition siehe Vorwort) kann es zu induzierter Seismizität kommen. Die Höhe des Risikos sowie die Möglichkeiten der Risikoüberwachung und der Risikominderung

wurden in der von der *Q-con GmbH* erarbeiteten Studie dargelegt (Baisch et al., 2021). Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden Empfehlungen ausgesprochen, wie diese Risiken bei einer möglichen Erschließung einer unkonventionellen Lagerstätte in Deutschland zu bewerten sind, welche Maßnahmen zur Risikominderung getroffen werden können und in welcher Form eine seismische Überwachung erfolgen sollte.

Da in Deutschland unkonventionelle Lagerstätten nicht in ausreichendem Maße untersucht sind, wurden auch in dieser Studie Erfahrungswerte aus anderen Ländern mit Hilfe von Literaturrecherchen und Experteninterviews zum Prozessverständnis herangezogen. Auf dieser Grundlage wurden Faktoren identifiziert, die mit dem Auftreten von induzierter Seismizität bei der Erschließung unkonventioneller Lagerstätten assoziiert sind.

Beim Vergleich der Erfahrungen mit anderen Regionen der Welt ist einschränkend darauf hinzuweisen, dass Deutschland eine wesentliche höhere Besiedlungsdichte als genannte internationale Standorte aufweist, so dass das seismische Risiko an einem potentiellen Standort in Deutschland generell höher einzuschätzen ist. Dies wird bei den Maßnahmenempfehlungen der Studie berücksichtigt.

Faktoren, die das Auftreten induzierter Seismizität beeinflussen können, sind die Existenz kritisch gespannter Störungen im Grundgebirge und der Spannungszustand der jeweiligen Lagerstätten. Das Auftreten induzierter Seismizität mit

Schadenspotential kann durch diese Faktoren und einen geringen Abstand zum Grundgebirge begünstigt werden. Insbesondere die Rückführung von Produktionswässern scheint das Risiko der induzierten Seismizität zu erhöhen.

Gemessen an der Anzahl an Fracking-Bohrungen, die insbesondere in den USA, aber auch in Kanada und China in unkonventionellen Lagerstätten abgeteuft worden sind, ist die damit in Zusammenhang gebrachte induzierte Seismizität selten. Induzierte Seismizität wird insbesondere durch Spannungsveränderungen auf bereits existierenden Rissen oder Störungen verursacht. Dabei spielen Druckerhöhung durch Fluideinbringung und mechanische Spannungen aufgrund von Rissöffnungen die zentrale Rolle.

Lange Zeit ging man davon aus, dass die induzierte Seismizität fast ausnahmslos unterhalb der menschlichen Spürbarkeitsgrenze liegt. Allerdings werden in jüngster Zeit auch Erdbeben mit erheblicher Schadenswirkung mit dem Einsatz von Fracking in Verbindung gebracht: Beben im Sichuan Becken in China, in Kanada, Argentinien und den USA mit Magnituden zwischen $M_L 3,8$ und $5,8$ sind prominente Beispiele. In anderen Regionen der Welt wurde Fracking unkonventioneller Lagerstätten bisher jedoch nicht mit Schadensbeben assoziiert. Bei der Gewinnung von Flözgas in Australien wurde beispielsweise keine induzierte Seismizität verzeichnet.

Das seismische Risiko wird zusätzlich zur potentiellen Stärke eines Erdbebens durch

weitere Faktoren bestimmt, die die Ausbreitung der Erdbebenwellen, die resultierende Bodenerschütterung, die Existenz von zu schützenden Gütern und deren Vulnerabilität beinhalten.

Eine Aussage zur Wahrscheinlichkeit, mit der ein Erdbeben einer bestimmten Stärke induziert werden könnte, ist mit dem heutigen Kenntnisstand nicht möglich. Daher fokussieren Risikostudien häufig auf eine theoretische Obergrenze der Erdbebenstärke, ohne die Auftretenswahrscheinlichkeit eines solchen Erdbebens zu bestimmen. Die meisten Ansätze zur Abschätzung einer Obergrenze basieren auf dem injizierten Fluidvolumen oder auf der räumlichen Erstreckung der existierenden Bruchflächen. Zumeist sind die so ermittelten Obergrenzen zutreffend. Allerdings kann bei einer unkontrollierten Bruchausbreitung auf einer besonders kritisch gespannten Störung die tatsächliche Erdbebenstärke auch unterschätzt werden.

Inwieweit Schäden durch Erschütterungen einer bestimmten Stärke hervorgerufen werden, hängt stark von der Bebauungsstruktur und der Bausubstanz ab. Auch soziologische Aspekte können bei der Schadensbemessung von Bedeutung sein.

Ein weit verbreitetes Instrument zur Minderung des Risikos von induzierter Seismizität ist eine seismologische Überwachung in Kombination mit einem Reaktionsprotokoll.

Die sogenannte Ampelsteuerung reagiert auf gemessene Seismizität, indem operative Maßnahmen reduziert oder eingestellt

werden. Zielsetzung dabei ist die Vermeidung einer bestimmten Konsequenz, wie z. B. spürbare Erschütterungen oder erschütterungsbedingte Gebäudeschäden. Dazu werden im Vorfeld Grenzwerte definiert, bei deren Überschreitung operativ reagiert wird.

Die Effizienz einer Ampelsteuerung wird allerdings durch verschiedene Faktoren limitiert. Einerseits treten die stärksten induzierten Erdbeben häufig als Nachläufer nach Beendigung operativer Maßnahmen auf. Andererseits kann ein abrupter Anstieg der Erdbebenstärke dazu führen, dass Grenzwerte übersprungen werden und Reaktionsmaßnahmen zu spät eingeleitet werden. Diese Effekte müssen über einen Sicherheitspuffer bei der Konzeption eines Reaktionsprotokolls berücksichtigt werden. Im Falle einer unkontrollierten Bruchausbreitung ist die Wirksamkeit einer Ampelsteuerung begrenzt.

In einigen Bundesstaaten der USA und in Kanada sind Ampelsteuerungen bei Fracking und bei der Rückführung von Lagerstättenwässern vorgeschrieben. Ähnliche Vorgaben galten für Großbritannien. Die in den genannten Ländern verwendeten Reaktionspläne basieren meist auf einem einfachen Schwellenwert bezüglich der lokalen Erdbebenmagnitude M_L . Tritt ein Erdbeben mit einer Magnitude oberhalb des Schwellenwertes auf, so werden die untertägigen Arbeiten für einen bestimmten Zeitraum unterbrochen oder endgültig beendet. Die angesetzten Schwellenwerte variieren dabei beträchtlich und lagen zum Beispiel bei $M_L=0,5$ für Fracking-Aktivitäten in England und bei $M_L=5$ für Fluidinjektionen in Illinois, USA. Für die große Spannweite können sowohl regionale Faktoren wie typische

Erdbebentiefe und Signaldämpfung als auch ein unterschiedliches Akzeptanzniveau von Erschütterungen ursächlich sein.

Die modellierte Risikobewertung für ein hypothetisches Erschließungsprojekt in Deutschland zeigt, dass die Definition von Grenzwerten für eine Steuerung der Fracking-Aktivitäten möglich ist.

Um die globalen Erfahrungswerte auf den Standort Deutschland zu übertragen, wurden Regionen mit Potential für Kohlenwasserstoffe aus unkonventionellen Lagerstätten in Deutschland hinsichtlich geologisch-tektonischer Faktoren charakterisiert. Sowohl die Einstufung der Potentialgebiete als auch deren Charakterisierung erfolgte in enger Anlehnung an eine vorangegangene Potentialstudie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Für ein hypothetisches Projekt zur Erschließung unkonventioneller Kohlenwasserstoffe werden Spannungsveränderungen im Untergrund modellhaft abgebildet. Das hypothetische Erschließungsprojekt beinhaltet den Einsatz der Fracking-Technologie in 48 Intervallen in einer Horizontalbohrung, jeweils mit einem Fluidvolumen von 800 m³. Der relevante Beeinflussungsbereich von Spannungsveränderungen wird mit 500 m um die Injektionspunkte abgeschätzt. Darauf aufbauend werden Handlungsempfehlungen ausgesprochen, einen Sicherheitsabstand zwischen Bohrung und potentiell kritisch gespannten Störungen einzuhalten.

Um die durch ein Erdbeben hervorgerufenen Erschütterungen an der Erdoberfläche zu

bestimmen, wird auf eine empirische Beziehung zur Vorhersage von Bodenschwingungsgeschwindigkeiten in Kombination mit oberflächennahen Verstärkungsfaktoren zurückgegriffen. Die Schadensrelevanz der Erschütterungen wird anhand der [Norm DIN4150-3](#) bewertet.

Zur Minderung des Risikos wurde eine Ampelsteuerung entworfen, um spürbare Seismizität zu vermeiden und Schäden nahezu auszuschließen. Anders als die Magnituden-basierte Steuerung in anderen Ländern wird für Deutschland vorgeschlagen, die Bodenschwingungsgeschwindigkeit (PGV) als Schwellwertparameter heranzuziehen, da dieser besser mit Erdbebenschäden korreliert. Der PGV-basierte Ansatz setzt allerdings voraus, dass PGV-Messungen lokaler Messstationen vorhanden sind. Da dies in Deutschland vorausgesetzt werden kann, ist eine Steuerung über diese Messgröße gegenüber der Magnitude zu bevorzugen.

Die vorgeschlagene Ampelsteuerung beinhaltet eine Unterbrechung bzw. einen Abbruch operativer Maßnahmen beim Auftreten eines Ereignisses, welches Erschütterungen mit einer Bodenschwingungsgeschwindigkeit von 0,2 mm/s oder mehr verursacht. Das Abbruchkriterium liegt damit unterhalb der Spürbarkeitsgrenze.

In den Studien 2020/2021 identifizierter Forschungsbedarf

Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer

Forschungsbedarf gibt es bei der Entwicklung (über)regionaler hydrodynamischer numerischer Simulationen, die auch eine hydraulisch-chemische Modellkopplung beinhalten sollten.

Neben der Abbildung von Wechselwirkungen beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen an der Oberfläche und den Auswirkungen auf Grundwasser und Oberflächengewässer sind Durchlässigkeiten im Gestein und Transportprozesse noch nicht vollständig numerisch simulierbar.

Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Methanemissionen und Szenarien

Forschungsbedarf wird im Zusammenhang mit dem Nachweis und der Quantifizierung von Methanemissionen insbesondere bei der

Produktion, Aufbereitung und Verteilung des Gases gesehen.

Die Entwicklung von kontinuierlich arbeitenden *Top-Down*-Messsystemen zur Erfassung größerer Gebiete zur Identifikation von Störfällen ist erstrebenswert. Je nachdem, welche Trägersysteme (Satelliten, Flugzeuge oder Drohnen) dazu am besten geeignet sind, ist zusätzlich eine Miniaturisierung der Messtechnik, d. h. der multispektralen Sensoren und automatischen Systeme zur Probenahme für Isotopenanalysen notwendig.

Im Bereich der *Bottom-Up*-Messverfahren muss die Automatisierung vorangetrieben werden, um Messungen auch in schwer zugänglichen Bereichen zu ermöglichen. Optimal wäre die Entwicklung fest installierter Messsysteme in definierten räumlichen Abständen, die in der Lage sind, neben dauerhaften Methanmessungen auch Betriebsstörungen, Störfälle und ungewöhnliche Betriebszustände in Echtzeit zu erfassen und zu melden. Um Emissionen umgehend zu erkennen und die erforderlichen Informationen in Echtzeit zur Verfügung stellen zu können, müssen geeignete Auswertungsalgorithmen und Meldesysteme entwickelt werden.

Grundsätzlich kann schon seit ungefähr zehn Jahren biogenes von thermogenem Methan durch die Messung von stabilen Kohlenstoffisotopen ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{12}\text{C}$) eindeutig unterschieden werden. Dies gilt sowohl für die Gasphase als auch für im Grundwasser gelöstes Methan. Beim Übertritt von Methan ins Grundwasser werden zudem fast immer mikrobiologische Prozesse ausgelöst, die nicht nur die hydro-chemische

Zusammensetzung beeinflussen, sondern sich in Form einer vergleichsweise einfach messbaren Fraktionierung der stabilen Wasserisotope ($\delta^2\text{H}$, $\delta^1\text{H}$) als auch der stabilen Kohlenstoffisotope ausdrückt. Um diese Methode für die Unterscheidung von biogenem und thermogenem Methan zur Quantifizierung von Stoffflüssen nutzen zu können, sind weitere umfangreiche Forschungen notwendig. Dies erfordert weiterführende Messreihen und Vergleiche.

Forschungsbedarf besteht auch bei der Entwicklung von Strategien und Methoden, um Fernerkundungsdaten mit hoher Datendichte effektiver auswerten zu können. Diese Datensätze müssen gemeinsam mit Zusatzinformationen z. B. aus der Meteorologie und zur Kalibrierung von Passpunkten zusammengebracht werden. Die Herausforderung besteht darin, dass Datensätze unterschiedlicher Rasterung und Inhalte gemeinsam bewertet werden müssen. Langfristig sind hier außerdem Netzwerke gekoppelter Sensoren (Prozessüberwachung, Methandetektion) zu entwickeln.

Gegenwärtig können mit den aktuellen Erkundungsmethoden in Tiefen von 3.000 m oder mehr nur Störungen mit einem Versatz von einigen zehner Metern detektiert werden. Da auch Störungen mit geringerem Versatz Schwächezonen darstellen können, bleibt eine Unsicherheit bezüglich der Integrität von Barrieren. Deshalb besteht in der Verbesserung der Auflösung geophysikalischer Erkundungsmethoden Forschungsbedarf.

Derzeitig ist es nicht möglich, mit den vorhandenen Erkundungsmethoden ohne das

Niederbringen von Bohrungen die räumliche Verteilung der Permeabilität zu ermitteln. Diese Kenntnis ist jedoch wichtig, um die mögliche Migration von Methan über geologische Wegsamkeiten wie beispielsweise Störungszonen ermitteln zu können. Die räumliche Bestimmung der Porosität und Permeabilität aufgrund von Änderungen in der Gesteinscharakteristik (z. B. Fazieswechsel) mit Hilfe seismischer Attribute ist ebenfalls unsicher. Eine gute Datenqualität ist Voraussetzung, um mit numerischen Simulationen belastbare Prognosen liefern zu können.

Prinzipiell ist es darüber hinaus notwendig, die Messmethoden zur Erfassung von Methanemissionen weltweit zu standardisieren, um Daten besser miteinander vergleichen zu können.

Mikroseismizität bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten

Aufgrund des breiten Einsatzes der Fracking-Technologie zur Erschließung von unkonventionellen Lagerstätten außerhalb Deutschlands gab es in den letzten zehn Jahren einen großen Erkenntnisgewinn bezüglich der Risiken durch induzierte Seismizität. Insofern besteht aktuell ein konzeptionelles physikalisches Verständnis der verursachenden Prozesse, wenngleich die Relevanz einzelner Prozesse nicht vollständig verstanden ist.

Eine weitere Differenzierung der Ursachen und ein besseres Verständnis der dominierenden Prozesse könnten aus systematischen Überwachungsdaten einer Region abgeleitet werden. Mit Hilfe dieser Daten könnten Wissenslücken hinsichtlich

- der Relevanz der Kompaktion der unkonventionellen Lagerstätten und
- des Einflusses thermo-elastischer und chemischer Effekte in unkonventionellen Lagerstätten

auf die induzierte Seismizität adressiert werden.

Neben dem Verständnis der verursachenden Prozesse ist die Kenntnis der untertägigen Verhältnisse für eine Abschätzung der Risiken induzierter Seismizität erforderlich. Durch eine systematische Erfassung aller Eingriffe in den Untergrund in einer bestimmten Region und eine seismologische Überwachung könnten folgende Aspekte noch näher beleuchtet werden:

- Die Bedeutung der Nähe einer Fluidinjektion zum Grundgebirge und die hydraulische Verbindung durch eine Störung ist nicht vollständig verstanden. Wie groß sollte der Sicherheitsabstand sein, um eine seismische Aktivierung im Grundgebirge ausschließen zu können?
- Welche Gesteine können durch eine Fluidinjektion seismisch aktiviert werden?
- Mit welchen Methoden lassen sich kritisch gespannte Störungen besser identifizieren?
- Kann die maximale Erdbebenmagnitude im Vorfeld untertägiger Eingriffe bestimmt werden?

- Gibt es weitere geologisch-tektonische Parameter, die das Auftreten induzierter Seismizität begünstigen könnten?
- Ist die beobachtete Korrelation induzierter Seismizität mit der rezenten tektonischen Deformationsrate, der Lage fossiler Riffe oder verkarsteten Strukturen genereller Natur?

Für eine Ampelsteuerung zur Begrenzung der induzierten Seismizität gibt es zwar projekt- oder regionspezifische Grenzwerte und Reaktionspläne (z. B. bei Geothermievorhaben), eine Dokumentation der Erfahrungen der Effizienz der Maßnahmen liegt aber nur für wenige Projekte vor. Diese zeigen, dass eine Begrenzung der Seismizität erreicht werden konnte. Eine systematische Auswertung der realisierten Ampelsteuerungen findet sich in der Fachliteratur jedoch nicht. Insofern gibt es hinsichtlich der Effizienz von Ampelsteuerungen und Reaktionsmaßnahmen noch offene Fragen:

- Ist es möglich, anhand induzierter Seismizitätsbeobachtungen zwischen kontrollierbarer und unkontrollierbarer Bruchausbreitung zu unterscheiden?
- Können adaptive Ampelsteuerungen einen Vorteil gegenüber Ampelsteuerungen mit statischen Schwellenwerten bieten?

In den Studien 2020/2021 abgeleitete Handlungsempfehlungen

Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer

Ein Grundwasser- und Oberflächengewässer-Monitoring als ein systematisches und alle Projektphasen übergreifendes Überwachungs- und Steuerungsinstrument muss zwingend bei jedem Vorhaben eingesetzt werden. Des Weiteren ist das Monitoring immer wieder neuen Erkenntnissen und Anforderungen anzupassen. Die Systemerkundung und -kenntnis ist eine wichtige Grundlage für die Risikoanalyse, da anhand dieser die Wirkungspfade im Ist-Zustand und nach einem Eingriff beschrieben, quantifiziert und bewertet werden.

Es ist erforderlich, den Voreingriffszustand durch ein Baseline Monitoring genau zu ermitteln (Systemerkundung) und eine hinreichende Datenbasis zum Aufbau und Fortschreibung numerischer Simulationen zu schaffen, mit deren Hilfe potentielle Auswirkungen quantifiziert werden können.

In Deutschland ist die Verwendung von wassergefährdenden Frac-Zusätzen verboten. Alle eingesetzten Stoffe müssen benannt werden und mit ihren Eigenschaften bekannt sein, damit diese bei einem Monitoring entsprechend berücksichtigt werden können.

Vor jeder potentiellen Fracking-Maßnahme muss der Verbleib des Flowbacks verbindlich geregelt werden. Der Flowback ist vorrangig wiederzuverwenden und, soweit das nicht möglich ist, zu entsorgen.

Im betrieblichen Monitoring ist der Fokus insbesondere auf das Risiko der Übertritte von hochsalinaren Formationswässern bzw. Tiefengrundwässern in oberflächennahe Grundwasserleiter zu legen. Das Monitoring darf sich in dieser Phase nicht nur auf den Nahbereich und auf oberflächennahe, genutzte Grundwasserressourcen beschränken, da Wirkungszusammenhänge zwischen den tiefen und oberflächennahen Grundwasserfließsystemen außerhalb der Fracking-Zone grundsätzlich nicht auszuschließen sind. Dabei ist das Auftreten von Formationswässern in Kohleflöz-lagerstätten wahrscheinlicher als in Schiefergaslagerstätten.

Numerische Standortmodelle sind bei der Bewertung von tiefgreifenden Störungen als mögliche Aufstiegsbahnen notwendig.

In der Nachsorgephase muss ein angepasstes Monitoring der relevanten Gefährdungspfade und der Summen- und Langzeitwirkungen stattfinden.

Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Methanemissionen und Szenarien

Für eine mögliche Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten wie Schiefer, Ton-, Mergel- und Kohleflözformationen sind die im Folgenden aufgeführten Empfehlungen zu berücksichtigen.

Erkundungen sollten aus einer Kombination von *Top-Down*- und *Bottom-Up*-Messungen bestehen. Die Überwachung sollte bereits deutlich vor Beginn der Maßnahmen beginnen, damit die vorhandenen Ausgangs- und Hintergrundwerte sicher ermittelt werden können.

Die *Top-Down*-Messungen sollten in regelmäßigen Abständen, entweder mit Hilfe hochauflösender Satelliten oder durch regelmäßige Befliegungen mit Flugzeugen oder Drohnen erfolgen.

Zusätzlich muss ein regelmäßiges und langfristiges, d. h. auch die Nachbetriebsphase einschließendes Monitoring der stabilen Wasserstoff- und Kohlenstoffisotope durchgeführt werden. Nur hieraus lassen sich später belastbare Aussagen über etwaige Umwelteinflüsse durch Gasfreisetzung durch Fracking-Maßnahmen belegen. Dies betrifft gleichermaßen die Hydro-(Geo)-Chemie im Grundwasser im direkten und weiteren Umfeld der geplanten Fracking-Maßnahme.

Besonders wichtig ist das frühzeitige Erkennen von Leckagen und Störfällen in der

gesamten Prozesskette, beginnend mit der Produktion, der Aufbereitung und zum Schluss der Verteilung des Gases zum Endkunden. Entsprechende Reaktionspläne und Interventionsmaßnahmen sind hierfür vorzuhalten, damit hohe Emissionsraten ausgeschlossen werden können.

Um insbesondere aus den *Top-Down*-Messungen entsprechende Emissionsraten zu ermitteln, müssen Wetterdaten am Standort kontinuierlich aufgezeichnet werden. Zudem sind standardisierte Algorithmen zur Berechnung von Emissionsraten aus gemessenen Wetterdaten und Konzentrationen zu implementieren. Es ist dafür zu sorgen, dass die Ergebnisse zeitnah, d. h. innerhalb weniger Stunden nach der Messung, zur Verfügung stehen, um bei Bedarf umgehend reagieren zu können.

Durch eine detaillierte geowissenschaftliche Erkundung des Gebietes einer geplanten Maßnahme bei gleichzeitigen Sicherheitsvorkehrungen für den Erhalt der geologischen Strukturen (Integrität von Barrieren) können Emissionen über geologische Wegsamkeiten weitgehend ausgeschlossen werden. Die entsprechende Planung und Optimierung muss standortspezifisch durchgeführt werden. Nur so können die erforderlichen Daten für belastbare numerische und ggf. Mehrphasen-Simulationen bereitgestellt werden.

Bei einer Förderung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten durch Fracking sind umfangreiche prozessbegleitende Erfassungen der Methanemissionen notwendig.

Zur Reduzierung von Methanemissionen sind dichte Rohrleitungen und Aggregate

unerlässlich. Deshalb sollten emissionsarme Kompressoren und Ventile eingesetzt werden, da diese einen bedeutenden Anteil an der Methanemission im bestimmungsgemäßen Betrieb bei der Produktion aus unkonventionellen Lagerstätten ausmachen.

Grundsätzlich ist im Zusammenhang mit Fracking-Maßnahmen sowohl für die Überwachung als auch für die Technologie zur Förderung, Prozessierung und Verteilung die beste verfügbare Technologie (BVT) mit nachweislich geringen Emissionsraten einzusetzen.

Mikroseismizität bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten

Eine Projektregion sollte über eine 3D Seismik im Vorfeld strukturell erkundet werden, falls solche Daten nicht vorliegen. Diese Empfehlung ist für viele Erschließungsmaßnahmen zutreffend und auch teilweise bereits in Regelwerken vorhanden.

Die Erkenntnisse aus der seismischen Erkundung tragen dazu bei, die folgenden Empfehlungen zu Abständen, sicher umsetzen zu können:

- Ein Mindestabstand von 500 m sollte zwischen Bohrung(en) und natürlichen Störungen mit $ST \geq 0,6$ eingehalten werden. (ST – Slip Tendency, ist ein Maß für das Versagen an einer Störung).

- Ein Mindestabstand von 500 m sollte zwischen Bohrung(en) und dem Grundgebirge eingehalten werden.
- Die Mächtigkeit der Zielformation sollte im Beeinflussungsbereich nicht mehr als 150 m betragen.

Neben den risikomindernden Maßnahmen durch die Standortauswahl stellt die seismologische Überwachung in Kombination mit einer Ampelsteuerung das wichtigste Instrument zur Risikominderung in allen operativen und nachbetrieblichen Phasen dar.

Zunächst sollte im Vorfeld einer Projektentwicklung die natürliche Erdbebenaktivität durch ein lokales Messnetz beginnend mindestens sechs Monate vor dem Start der Bohrmaßnahmen erfasst werden.

Um die Ampelsteuerung eines Projektes realisieren zu können, ist die induzierte Seismizität in allen Projektphasen mit lokalen Oberflächenseismometern in Echtzeit zu überwachen. Während der Fracking-Operation kann zusätzlich eine Überwachung mittels Bohrlochgeophonen erforderlich sein.

Es wird empfohlen, die Ampelsteuerung über Schwellenwerte der Bodenschwinggeschwindigkeit (PGV) zu definieren. Das Abbruchkriterium soll bei $PGV = 0,2$ mm/s festgesetzt werden.

- Unter Betrachtung eines hypothetischen und sehr unwahrscheinlichen Extremszenarios, bei dem das vorgeschlagene Abbruchkriterium der Ampelsteuerung um zwei Magnitudeneinheiten überschritten wird, wird ein Schadensperimeter abgeschätzt. Dieser

Schadensumkreis ist von der Reservoirtiefe abhängig und muss umso größer sein, je tiefer das Reservoir ist.

- Als weitere Maßnahme zur Risikominderung wird empfohlen, den Projektstandort so zu wählen, dass sich keine kritische Infrastruktur innerhalb des Schadensperimeters befindet.
- Falls eins oder mehrere der Kriterien an einem Standort nicht erfüllbar sein sollten, wird eine seismische Überwachung mit erhöhter Empfindlichkeit empfohlen.

Bewertung der Studienergebnisse

In diesem Kapitel werden zunächst Bewertungen zu den Aussagen der einzelnen Studien gegeben, um danach studienübergreifende Handlungsempfehlungen zu diskutieren.

Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer

Die Ergebnisse der Studie stellen einen guten Überblick zum Stand der Technik in Bezug auf die Monitoringkonzepte für Grundwasser und Oberflächengewässer dar. Die internationale Fachliteratur wurde umfassend ausgewertet.

Monitoring von Grundwasser und Oberflächengewässern wird in einem Kreislaufprozess als ein systematisches und in allen Projektphasen übergreifendes Überwachungs- und Steuerungsinstrument verstanden. Der Kreislaufprozess umfasst vier Kernelemente: Ziele, Indikatoren, Bewertungssystem und Handlungsoptionen. Monitoring wird als ein dynamisches System gesehen, das fortlaufend neuen Erkenntnissen und Anforderungen angepasst werden muss. Dadurch sollen Auswirkungen und Risiken rechtzeitig erkannt und Steuerungsmaßnahmen eingeleitet werden können.

Dem in der Studie dargestellten Erfordernis einer Systemerkundung zur Ermittlung von

Ausschlussgebieten im Rahmen der Standortauswahl sowie den für die verschiedenen Projektphasen vorgeschlagenen Überwachungs- und Schutzmaßnahmen schließt sich die Expertenkommission an. Unter der Voraussetzung, dass diese Vorschläge vollumfänglich umgesetzt und fortlaufend an neue Erkenntnisse angepasst werden, wird das Risiko von Fracking in unkonventionellen Lagerstätten in Deutschland in Bezug auf den Schutz von Grundwasser und Oberflächengewässern von der Expertenkommission als gering eingeschätzt.

Der Begriff Flowback wird in der internationalen Literatur anders verwendet als in den rechtlichen Vorschriften in Deutschland. International werden Fluide, die während und bis zu etwa einen Monat nach dem Frac-Vorgang am Bohrloch oberflächennah austreten, insgesamt als Flowback bezeichnet. Die in Deutschland für Bergbauvorhaben maßgebliche *Allgemeine Bergverordnung* unterscheidet dagegen zwischen der zurückgeförderten Flüssigkeit, die zum Aufbrechen der Gesteine genutzt wird (Frac-Fluid), und dem Lagerstättenwasser. Die Verpressung des Frac-Fluids ist in Deutschland nicht zulässig. Eingeschränkt zugelassen ist lediglich die Rückführung des Lagerstättenwassers. Insofern sind die Ergebnisse der internationalen Literaturrecherche in diesem Punkt nicht auf Deutschland übertragbar.

Generell stellt die Studie fest, dass der Aufstieg von hochsalinaren Lösungen in darüber liegende süßwasserführende Schichten prinzipiell nicht ausgeschlossen werden kann. Über die Aussagen der Studie hinaus gibt die

Expertenkommission daher zu bedenken, dass hochsaline Lösungen differenziert betrachtet werden müssen. Sie besitzen ein deutlich höheres und somit auch hydraulisch bedeutsameres spezifisches Gewicht als Süßwasser. Bei Fracking-Maßnahmen reduziert diese Eigenschaft den vertikalen Aufstieg von Frac-Fluiden in Störungen. In flachliegenden Zielhorizonten liegen generell geringere Salzkonzentrationen und somit auch ein geringeres spezifisches Gewicht der Grundwässer vor. Beim Übertritt von Frac-Fluiden in diese Horizonte ist ein weiteres Aufsteigen der salinaren Wässer entlang von Störungs- und Schwächezonen zu befürchten.

Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Methanemissionen und Szenarien

Die Studie belegt eindeutig, dass für die Auftrennung der thermogenen und biogenen Methanemissionen deutlich mehr Messungen der stabilen Kohlenstoffisotope ($\delta^{12}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}$) in der Gas- als auch Wasserphase erforderlich sind. Für die Detektion etwaiger geochemischer Veränderungen im Grundwasser durch Freisetzung und Eintrag von Methan konstatiert die vorliegende Studie ebenfalls die Notwendigkeit aufwendiger Monitoringkonzepte. Dies wird von der Expertenkommission Fracking unterstützt.

Darüber hinaus sollte die Messgenauigkeit von LIDAR-Instrumenten gesteigert werden,

um beispielsweise Methan auch in kleineren Konzentrationen über entsprechend kleinräumigen Erdgasfeldern messen zu können. Satellitensensoren sollten zur Erfassung von Treibhausgasen wie Methan daher über eine dichte räumliche Abtastung verfügen, um genügend Messungen pro Region liefern können. Zum Nachweis lokaler Hotspots ist eine hohe räumliche Auflösung ($< 2 \text{ km}$) notwendig. Sensoren, die unabhängig von der Tageszeit und Witterungsbedingungen messen, sind hierfür zu verbessern.

Hinsichtlich der zu erwartenden Methanemissionen beim Einsatz der Fracking-Technologie in unkonventionellen Lagerstätten kommt die Studie zu dem Schluss, dass die im internationalen Vergleich bekannten Raten 2-4 % sich auf 1 % verringern lassen. Dieser Schlussfolgerung schließt sich die Expertenkommission nicht an. In Deutschland werden bei Zugrundelegung der gleichen technischen Standards auch vergleichbare Emissionsraten zwischen 2-4 % zu erwarten sein.

Bereits heute ermöglichen vorhandene gekoppelte numerische Simulationen, die physikalisch relevanten Prozesse für die Methanfreisetzung über künstliche und geologische Wegsamkeiten näherungsweise abzubilden. Allerdings beruhen diese allesamt auf Annahmen, die nicht durch entsprechende Messungen vor Ort evident belegt werden, da es derzeit keine verfügbaren *in-situ* Methoden gibt. Auch stellt die Quantifizierung von geomechanischen Schwäche- oder Störungszone in stauenden Gesteinsschichten im Hinblick auf Strömungs-

und Transportprozesse eine zentrale und unbeantwortete Problematik dar.

In Ergänzung zur vorliegenden Studie ist auf folgendes, grundlegendes Problem hinzuweisen: um auch höhere Breitengrade messtechnisch erfassen zu können, kann ein- und derselbe Satellit aufgrund der Neigung der Satellitenbahn gegenüber der Erdachse nur etwa alle 14 Tage erneut das zu messende Gebiet überfliegen. Es bleibt festzuhalten, dass derartige *Top-Down* Methoden über längere Zeiträume sehr kostenintensiv sind und bleiben werden, da die bereits vorhandenen Satelliten sehr stark ausgelastet sind.

Mikroseismizität bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten

Die Studie ist unter Berücksichtigung von fachlich neuester Literatur zum Thema eine fundierte Ausarbeitung; eigene Kenntnisse wurden durch die Abfrage internationaler Experten untermauert.

Das Lagerstättenpotential in Deutschland wird ausführlich charakterisiert. Daraus wird ein hypothetisches Referenzprojekt für Deutschland abgeleitet und generisch modelliert. Damit werden die Risikobewertung und die Ableitung von Maßnahmen zur Risikominderung für Projekte in Deutschland ermöglicht. Diese Herangehensweise ist zielführend, und das Referenzmodell stellt eine wertvolle

Grundlage auch für andere Erschließungsmaßnahmen im Untergrund dar. Besonders herauszustellen ist, dass das Modell bewusst konservativ ausgelegt ist, d. h., dass die Risiken also tendenziell überschätzt werden.

Nicht weiter ausgeführt wird das Design für ein grundlegendes Monitoring der natürlichen Seismizität im Vorfeld einer Maßnahme, da auf Grundlagenpapiere dazu verwiesen werden kann. Der Schwerpunkt der Studie liegt vielmehr auf den Empfehlungen zur Ausgestaltung einer seismologischen Überwachung aller Maßnahmen in Kombination mit einer Steuerung mittels eines Ampelsystems.

Für Deutschland wird vorgeschlagen, diese Steuerung auf Basis von Bodenschwinggeschwindigkeiten (PGV) zu konzipieren. Als Schwellenwert für den Abbruch operativer Maßnahmen wird ein PGV von 0,2 mm/s empfohlen. Die Wahl dieses Parameters und dessen Begrenzung auf einen Wert unterhalb der Spürbarkeitsgrenze hält die Expertenkommission unter Berücksichtigung der Besiedlungsdichte in Deutschland für angemessen.

Die in der Studie getroffenen Aussagen zur Risikobewertung sind bedeutend. Unter der Annahme, dass alle in der Studie empfohlenen Maßnahmen zur Risikominderung eingehalten werden, bleibt ein Restrisiko der unkontrollierten Bruchausbreitung. Dennoch wird das Risiko, ein Erdbeben mit mehr als geringfügig schädigender Auswirkung durch Fracking zu induzieren, als äußerst gering eingeschätzt.

Dieser zentralen Aussage schließt sich die Expertenkommission an.

Die in der Studie benannten Handlungsempfehlungen sind ausnahmslos notwendig, hinreichend und überschreiten den Rahmen des Machbaren nicht. Die Erfüllung stellt eine zwingende Voraussetzung für die Gültigkeit der getroffenen Aussagen zur Risikobewertung dar.

Ergänzend zur vorgelegten Studie empfiehlt die Expertenkommission, dass die Modellierung von Störungen (Retrodeformation) sowie Modellierungen im Zusammenhang mit dem Stressfeld (Nah- und Fernfeld) ergänzt werden können. Dies ist von Bedeutung, wenn dies in einem Gebiet kritische Größen sind.

Die sich derzeit entwickelnde Messmethode der ortsverteilten faseroptischen Messungen (distributed acoustic sensing, DAS) ist noch nicht berücksichtigt. Wenn diese sich bewährt, liefert sie eine technisch nachhaltige und kostengünstigere Option für das seismische Monitoring. An den getroffenen Aussagen und Handlungsempfehlungen zur Risikominderung und Steuerung ändert sich durch dieses neue Messverfahren jedoch nichts.

Studienübergreifende Empfehlungen

Die in den drei Studien untersuchten Inhalte weisen gleichermaßen folgende, obligatorischen Handlungsempfehlungen aus,

denen sich die Expertenkommission vollumfänglich anschließt.

Es gibt in Deutschland Gebiete oder Regionen, die für die Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten aufgrund ihres Störungsinventars schon bei der Vorauswahl ausscheiden. Sind zum Beispiel gebündelte Störungszonen bereits in Satellitenbildern sichtbar, so sind diese Gebiete trotz Höflichkeit auszuschließen. Die tektonische Situation in den USA unterscheidet sich von der in Deutschland, wo tiefgreifende Störungen bis ins Grundgebirge hinein vorhanden sind. Deshalb müssen Abstände zu Störungen bei einer Standortauswahl kritisch hinterfragt werden.

Generell geht die Expertenkommission davon aus, dass immer die beste verfügbare Technologie (BVT) eingesetzt wird. In Bedarfsfällen muss aber die kontinuierliche Weiterentwicklung der Sensorik zur Risikominderung und Überwachung die lokalen Randbedingungen zusätzlich berücksichtigen.

Numerische Simulationen werden genutzt, um Entwicklungsszenarien und Schwellenwerte für Überwachungsflächen und -maßnahmen herleiten zu können. Als Eingangsparameter werden hier insbesondere die Basisdaten zur Charakterisierung von Störungen und Wegsamkeiten als essentiell angesehen. Deren Qualität muss dem aktuellen Stand der Technik entsprechen und standortspezifisch aufgearbeitet werden.

Ein umfassendes Baseline Monitoring muss vor jeder Maßnahme erfolgen, das den Ausgangszustand eines Gebietes erfasst.

Nur auf dieser Grundlage kann ein Verständnis des Geosystems erreicht und Überwachungsmaßnahmen bei und nach dem Eingriff gesteuert werden. Der Umfang und die Ausdehnung einer Messfläche ist von den lokalen Gegebenheiten abhängig. Die zeitliche Dauer der Vorerkundung sollte aber mindestens ein Jahr betragen, um den Einfluss von Jahreszeiten insbesondere für die Methanemissionen und das Gewässerverhalten abschätzen zu können.

Zur Risikoabschätzung und -minderung sind nicht nur die lokalen Gegebenheiten des Geosystems, in das eingegriffen wird, von Bedeutung, sondern auch Vulnerabilitäten wie Besiedlungsdichte und Infrastrukturen.

Die Überwachung/Monitoring aller Betriebs- und Nachsorgephasen erfolgt nicht statisch, sondern sollte mit der Steuerung einer Maßnahme gekoppelt sein.

Fazit

Der hier vorgelegte Berichtsentwurf fasst den aktuellen Kenntnisstand anhand der vergebenen Studien, basierend auf den Erfahrungen anderer Länder, zusammen und bewertet diese abschließend. Wie ersichtlich wird, wurde in der letzten Dekade insgesamt sehr umfangreiches Wissen zum Thema erzeugt. Auf diesem Wissen basieren die vorgestellten Handlungsempfehlungen zusammen mit den hier entwickelten Szenarien.

In diese Empfehlung gehen keine lokalen oder regionalen Informationen für Deutschland ein. Diese haben das Potential, zu einem zusätzlichen Erkenntnisgewinn beizutragen. Die größere Bedeutung lokaler Informationen liegt jedoch darin, die Überwachungs- und Steuerungssysteme standortspezifisch zu konfigurieren. Deren Berücksichtigung wird daher für zwingend erforderlich gehalten.

Somit sind die wichtigen geowissenschaftlich-technischen Grundlagen vorhanden, eine Entscheidung zum Fracking unkonventioneller Lagerstätten auf Basis gemäß § 13a des Wasserhaushaltsgesetzes im politischen Raum treffen zu können.

Die Expertenkommission empfiehlt den zuständigen politischen Gremien, eine solche Entscheidung umgehend zu treffen. Forschung und Erprobungsmaßnahmen nach § 13a des Wasserhaushaltsgesetzes können dazu beitragen, die technische Machbarkeit der Handlungsempfehlungen und Reduktion der Risiken bei der Anwendung von Fracking in unkonventionellen Lagerstätten zu verbessern. Ein Restrisiko wird allerdings immer bestehen.

Schließlich bedarf es eines gesellschafts-, wirtschafts- und klimapolitischen Abwägungs- und Entscheidungsprozesses, ob die Option von Fracking in unkonventionellen Lagerstätten in Betracht gezogen wird.

Internetauftritt

Seit Mitte Mai 2019 informiert die Webseite (www.expkom-fracking-whg.de) über die Arbeit der Expertenkommission Fracking. Fast 4.000 Besucherinnen und Besucher nutzten bislang dieses Informationsangebot.

Die meisten haben sich die Berichtsentwürfe bzw. die Berichte heruntergeladen. Darüber hinaus interessierten sich die Leserinnen und Leser für die Zusammensetzung der Expertenkommission und die in 2021 veröffentlichten Studien.

Die Webseite der Expertenkommission Fracking ist seit Oktober 2020 barrierefrei.

Beteiligung der Öffentlichkeit

Die in diesem Berichtsentwurf zusammengefassten Studien sind vollständig auf der Webseite der Expertenkommission veröffentlicht. Die öffentliche Bereitstellung erfolgte sukzessive ab Anfang 2021. Über die Veröffentlichung der Studien wurde jeweils in einer über *news aktuell*, ein Unternehmen der dpa-Gruppe, herausgegebenen Pressemitteilung der Expertenkommission Fracking bundesweit informiert.

Die Kommission berichtet über ihre Tätigkeit jeweils zum 30. Juni an den Deutschen Bundestag. Ein Berichtsentwurf wird zuvor im Internet veröffentlicht.

Um über die Veröffentlichung des Berichtsentwurfs bzw. des Berichtes im Internet zu informieren, gibt die Expertenkommission Fracking über *news aktuell* gleichzeitig eine

Pressemitteilung heraus, so dass die Öffentlichkeit die Möglichkeit zur Stellungnahme hat. Hierzu steht ein Kontaktformular auf der Webseite zur Verfügung.

Der Berichtsentwurf ist im Internet auf der Webseite der Expertenkommission Fracking veröffentlicht. Für die Öffentlichkeit besteht die Möglichkeit der Stellungnahme bis zum Redaktionsschluss am 14.06.2021 um 10 Uhr vormittags, bevor der Bericht zum 30. Juni 2021 an den Deutschen Bundestag übermittelt wird. Konstruktive Hinweise, Anfragen und Kommentare werden entweder im Bericht aufgenommen oder auf der Webseite unter FAQ anonymisiert aufgeführt und beantwortet. Deren Veröffentlichung auf der Webseite erfolgt schrittweise ab Juli 2021.

Erprobungsmaßnahmen

Bis zum Zeitpunkt dieser Berichterstattung lagen keine Anträge für Erprobungsmaßnahmen vor.

Referenzen zu den Studien

Baisch, S., Vörös, R., Carstens, P., Koch, C., Stang, H., Rothert, E. (2021): Gutachten zur Mikroseismizität bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten. Q-con GmbH; 200 Seiten.

Denneborg, M., Feseker, T., Müller, F. (2021): Gutachten zu Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Monitoringkonzepte Grundwasser und Oberflächengewässer. ahu GmbH Wasser - Boden – Geomatik; 118 Seiten.

Kahnt, R., Abbenseth, A. Aubel, T., Demmler, V., Helbig, M., Martin, M. Mayer, R., Pinka, J. (2021): Gutachten zu Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus unkonventionellen Lagerstätten: Methanemissionen und Szenarien. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft GmbH; 81 Seiten, 4 Anhänge.

Kontakt

Geschäftsstelle Expertenkommission Fracking
Projektträger Jülich, Forschungszentrum
Jülich GmbH
Mail: ptj-expkom-fracking@fz-juelich.de