

# WASSER <sup>UND</sup> ABFALL

BODEN · ALTLASTEN · UMWELTSCHUTZ

**BWK** Bund der Ingenieure  
für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft  
und Kulturbau (BWK) e.V.



## Risiken im Geologischen System bei der Fracking-Technologie

Sonderdruck

aus WASSER UND ABFALL 06.2012 | Springer Vieweg | Springer DE | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Martin Sauter, Rainer Helmig und Johannes Klünker

# Risiken im Geologischen System bei der Fracking-Technologie

## Abschätzung der Auswirkungen auf Grundwasservorkommen

Die Fluidverpressung im Rahmen von Fracking-Maßnahmen für die Erdgasgewinnung aus unkonventionellen Lagerstätten ist auf Grund der potenziellen Beeinträchtigung der Grundwasserqualität auch in Deutschland Teil der öffentlichen Debatte.

### 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Die Erdgasgewinnung aus unkonventionellen Lagerstätten wird derzeit in Deutschland intensiv diskutiert. Ein wichtiger Streitpunkt ist hierbei die Frage, inwieweit die Grundwasserqualität durch die während des Fracking-Prozesses freigesetzten Fluide und chemischen Additive beeinträchtigt werden kann [1]. Darüber hinaus wird nachgefragt, ob die Klimabilanz von Schiefergas und Flözgas durch beim Fracking freigesetztes Methangas deutlich verschlechtert werden könnte. Die Studie konzentriert sich regi-

onal auf die potenziellen Flözgaslagerstätten im Münsterländer Kreidebecken und die Schiefergaslagerstätten im Niedersächsischen Becken.

Die Analyse umfasst die hydraulischen und Transportprozesse im Deckgebirge über dem Fracking-Horizont, verschiedene operationelle Randbedingungen sowie unterschiedliche hydrogeologische Standortbedingungen, wobei die Deckgebirgsmächtigkeit, die Durchlässigkeit des Deckgebirges sowie die potenzielle Präsenz von Wegsamkeiten und Barrieren berücksichtigt werden. Grundlegende Szenarien umfassen dabei den kurzfristigen vertikalen Fluidtransport unter hohen

Drücken während der Hochdruck-Fracking-Maßnahme selbst und den langfristigen großkaligen Transport in einem Tiefengrundwasserleiter unter einem mäßigen regionalen hydraulischen Gradienten. Dieser Tiefengrundwasserleiter wurde für das Münsterland identifiziert. Schließlich wird noch der mögliche Aufstieg von Methan aus der Lagerstätte in oberflächennahe Grundwasserleiter bzw. in die Atmosphäre mit numerischen Simulationen der stark dichteabhängigen Mehrphasenströmung untersucht.

Diese Analyse erforderte die Beschreibung der geologisch-geometrischen Verhältnisse und die Charakterisierung der hydrogeologischen Kenngrößen am jeweiligen Standort (Setting). Hierzu gehören die Beschreibung des Einflusses von Barrierestenen und höher permeablen Wegsamkeiten (z. B. Störungszonen) für den vertikalen und den horizontalen Stofftransport sowie die Spezifizierung der Randbedingungen.

Anhand dieser Ergebnisse werden Empfehlungen zum Schutz des Grundwassers formuliert.

Fragen der Bohrlochintegrität (Umläufigkeiten etc.) und den daraus abgeleiteten erhöhten Gaskonzentrationen im weiteren Umfeld von Gasbohrungen im Barnett-Shale von Pennsylvania [8] werden in [9] behandelt.

### 2. Generelle Vorgehensweise und Methodik

Zur Beurteilung der mit der Erschließung von unkonventionellen Lagerstätten verbundenen Risiken können *probabilistische* oder *deterministische* Ansätze

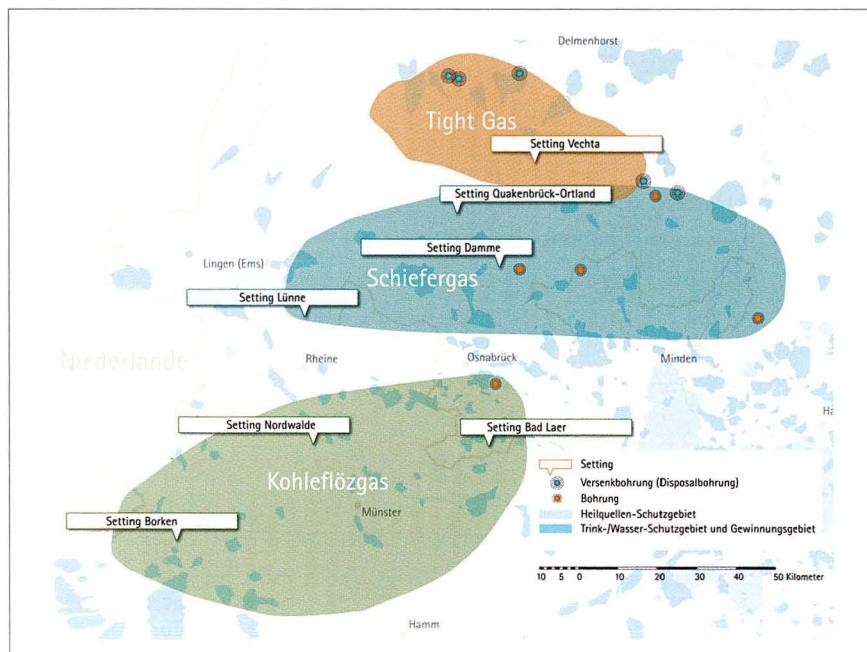


Bild 1: Untersuchungsgebiet und Lokation der gewählten Settings (Typ-Standorte) in Bezug zur Verbreitung der verschiedenen Erdgaslagerstättentypen

gewählt werden. Da erstere einer Erhebung umfassender Datensätze bedürfen, die bisher im erforderlichen Umfang nicht existieren, wird ein *deterministischer*, d. h. physikalisch prozess-basierter Ansatz verfolgt. Dieser Ansatz erfordert ein grundlegendes Prozessverständnis sowie hinreichende Kenntnis der Systemgeometrien und der erforderlichen Kenngrößen. Die Vorteile eines deterministischen Ansatzes liegen vor allem in dessen Transparenz und seiner hohen Prognosefähigkeit.

Zur Abschätzung potenzieller Risiken wurde eine konsequent konservative Strategie verfolgt, die im Wesentlichen auf der kumulativen Wirkung ungünstiger Faktoren auf Ebene der beteiligten Prozesse, der Systemgeometrien und Parameterverteilungen sowie der Randbedingungen basiert. Aus diesem Grund blieben (1) neben der gerechneten advektiven Transportkomponente, Prozesse, die die Stoffausbreitung verlangsamen bzw. behindern, z. B. Matrixdiffusion, Sorptions- und Abbauprozesse, unberücksichtigt, wurden (2) permeable Störungszonen, die von der Lagerstätte bis zum Lockergesteinsgrundwasserleiter durchgehen, angenommen, und der Startpunkt für die Stoffausbreitung wurde direkt am Top der Lagerstätte angesetzt. Es wurden (3) unter Beachtung konservativer aber noch plausibler Werte, Kombinationen höchster hydraulischer Leitfähigkeiten und kleiner effektiver Porositäten der Barriere-Gesteine und Störungszonen angenommen und (4) maximal mögliche, vertikale Druckpotenzialunterschiede (aufwärtsgerichtete Strömung) für die Simulation des regionalen Stofftransports im Münsterland verwendet. Operationale Randbedingungen wurden (5) in der Weise angenom-

men, dass trotz eines erheblichen Fluid-Verlustes in hochdurchlässige Strukturen maximale Drücke über den geplanten Maßnahmenzeitraum aufrechterhalten werden (was unter gängigen operationalen Bedingungen durch diverse Kontrollmechanismen unterbunden wird).

Einen wesentlichen Einfluss auf die Fluidmigration hat die Frack-Höhe. Die Pinnacle-Halliburton-Studie [3] basiert auf der mikroseismischen Erfassung der Frack-Höhen von über 3000 einzelnen Frack-Maßnahmen (unterschiedliche Gebiete, unterschiedliche operationale Bedingungen). Die Studie zeigt, dass die hydraulisch erzeugten Frack-Höhen ca. 1500 ft (ca. 500 m) nicht übersteigen; sie liegen in der Regel deutlich unter diesem Wert. Wir sehen deshalb nicht die Notwendigkeit einer Vorwärtsmodellierung der gekoppelten hydraulisch-geomechanischen Prozesse der vertikalen Frack-Ausbreitung, da der vorhandene Datensatz als wesentlich höher signifikant einzuschätzen ist als eine begrenzte Anzahl von Modellrechnungen.

Der Effekt aus der beschriebenen Kummulation ungünstiger Faktoren und der daraus abgeleiteten Modellergebnisse der Stoffausbreitung sind, obwohl physikalisch möglich, theoretisch denkbare Extremfälle: sie stellen damit den oberen Grenzbereich potenziell negativer Auswirkungen der Frack-Maßnahmen dar. Es wurde weiterhin mit Sensitivitätsstudien der Parameter die Bandbreite möglicher Transportweiten im jeweiligen System untersucht.

Die vorstehenden konzeptionellen Überlegungen wurden in mathematische Modelle umgesetzt. Dabei wurden für typische Standorte (Settings; **Bild 1**) verschiedene Transportszenarien (lokale, regionale Fluidströmung und Methan-

gastransport) definiert und modelliert. Zu den Auswahlkriterien der Settings (**Tabelle 1**) gehörten die Mächtigkeit des Deckgebirges sowie die Präsenz von Störungen (potenzielle Migrationswege) und mächtigeren Salzhorizonten (maximale Barriere-Effektivität). Die Definition von Settings verfolgte das Ziel einerseits standortspezifische und andererseits verallgemeinerbare Modellergebnisse zu erzeugen.

### 3. Bestandsaufnahme der Untersuchungsgebiete und Festlegung der Systemgeometrien

Die Risikostudie Fracking bezieht sich auf drei von ExxonMobil präferierte Untersuchungsgebiete bzw. Explorationsgebiete (Bild 1). Diese entsprechen gleichzeitig den Hauptverbreitungsgebieten von Flözgas-Lagerstätten (Coal Bed Methane) im Münsterländer Kreidebecken sowie von Schiefer-Gas- (Shale Gas) und Tight Gas-Lagerstätten im Niedersächsischen Becken.

Als erster Arbeitsschritt wurde eine umfassende Bestandsaufnahme der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten in den Untersuchungsgebieten vorgenommen. Dabei wurden auch wasserwirtschaftliche Aspekte, wie z. B. Wasserschutzgebiete oder Heilquellschutzgebiete und regional bedeutsame Grundwasserleiter, wie die Halterner Sande und die Münsterländer Kiessandrinne, einbezogen. Eine besondere Herausforderung der Studie bestand darin, die Heterogenität der natürlichen Geologie in ihren wesentlichen Eigenschaften darzustellen. So wurden einerseits durch Profilschnitte die großräumigen geologisch-tektonischen Verhältnisse beschrieben und andererseits durch Settings charakteristische geologische Verhältnisse von Einzelgebieten zusammengefasst.

Auch gebietsspezifische Besonderheiten, wie die im zentralen Münsterländer Kreidebecken verbreiteten Strontianitgänge, auf denen man bis 1945 Bergbau betrieb, wurden in die Untersuchungen einbezogen. Ebenfalls für das Münsterland charakteristisch ist die Verbreitung des tiefen, salzwasserhaltigen Cenoman-Turon-Aquifers, der durch den mächtigen Emscher Mergel von den genutzten oberflächennahen Grundwasservorkommen getrennt ist.

**Tab. 1 | Auswahlkriterien für die gewählten geologischen Settings**

Münsterländer Kreidebecken		
	Mit Störungszone	Ohne Störungszone
Hohe Deckgebirgsmächtigkeit		Nordwalde
Geringe Deckgebirgsmächtigkeit	Bad Laer	Borken
Niedersächsisches Becken		
	Mit Salzhorizonten	Ohne Salzhorizonte
Hohe Deckgebirgsmächtigkeit	Quakenbrück-Ortland, Vechta	
Geringe Deckgebirgsmächtigkeit	Lünne	Damme

## 4. Ermittlung der Systemparameter

Für den advektiven Stofftransport der Fracking-Fluiden sind als relevante Größen die effektiven hydraulischen Parameter (hydraulische Leitfähigkeit bzw. Permeabilität) und die effektive Porosität der einzelnen lithologischen Einheiten des Deckgebirges oberhalb des Frack-Horizontes sowie die Präsenz potenziell durchlässiger Störungszonen entscheidend.

Auf der Basis umfangreicher Literaturrecherchen wurden den unterschiedlichen Gesteinstypen hydraulische Parameter zugeordnet. Gemäß dem Prinzip des konservativen Vorgehens wurde jeweils der höchste noch plausible Wert für die Gebirgsparameter ausgewählt.

Im Niedersächsischen Becken kommt besonders den Salzhorizonten als geologische Barriere für die Fluidmigration eine große Bedeutung zu, während im Münsterländer Kreidebecken primär die Faktoren Mächtigkeit des Emscher Mergels sowie die spezifischen lithologischen Eigenschaften von Ton- und Mergelgesteinen (s. u.) als bedeutend identifiziert wurden.

Die Abschätzung der hydraulischen Effektivität von Störungszonen ist generell schwierig auf Grund ihrer diskreten Natur und komplexen, internen Struktur. Letztere zeigt sich in der ausgeprägten Anisotropie und Heterogenität der hydraulischen Parameter [2]. Aber auch die unterschiedliche Lithologie der gegeneinander versetzten Einheiten sowie die Teufe üben erheblichen Einfluss auf die lokalen hydraulischen Eigenschaften einer Störungszone aus [7]. Während Tiefen oberhalb 300 m als geologisch deutlich entlastet anzunehmen sind und damit einen Auflockerungsbereich darstellen, ist davon auszugehen, dass darunter auf Grund der hohen Vertikalspannung offene Klüfte und Störungszonen in der Regel nicht existieren bzw. geschlossen sind. Ferner wird auf Grund von Tonmigration eine Kolmation von Störungszonen, insbesondere in Ton- und Mergelsteinen beschrieben [4].

Im Sinne der Definition von potenziellen Risiken wurden hydraulisch aktive Störungen für das Münsterländer Kreidebecken angenommen und auf der Basis einer Chlorid-Massenbilanz maximale, integrale Transmissivitäten abgeschätzt (Gl. 1 und 2). Diese basieren auf der konservativen Annahme, dass die gegenüber unbeeinflussten Wässern im quartären Grundwasserleiter beobachteten erhöhten

Salinitäten auf den Aufstieg von hochsalinen Wässern aus dem tiefen Cenoman-Turon-Aquifer zurückzuführen sind. Weiterhin wird ein regionaler hydraulischer Gradient zwischen Cenoman-Turon-Aquifer und oberflächennahem Grundwasserleiter angenommen. Um alle Terme der Gleichung 1 bis auf den Abfluss in der potenziellen Störungszone  $Q_{\text{Störung}}$  besetzen zu können, wurden aus den amtlichen hydrogeologischen Karten 1:50.000 (z. B. [5]) für den lokalen quartären Grundwasserleiter im Bereich der Settings effektive gesättigte Mächtigkeiten und das Spektrum hydraulischer Leitfähigkeiten entnommen und spezifische Volumenströme bestimmt. Die integrale, maximale Transmissivität der angenommenen Störungszone ergibt sich dann aus Gleichung 2:

$$(Q_{\text{Quartär}} + Q_{\text{Störung}}) * C_{\text{mix}} = \quad (\text{Gl. 1}) \\ Q_{\text{Quartär}} * C_{\text{Quartär}} + Q_{\text{Störung}} * C_{\text{Störung}}$$

$$T_{\text{Störung}} = Q_{\text{Störung}} / \text{grad}_h_{\text{Störung}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Während  $Q$  der Volumenstrom im jeweiligen Modellkompartiment ist, bezeichnet  $C$  die Stoff- bzw. Chlorid-Konzentration,  $T_{\text{Störung}}$  ist die Transmissivität der Störungszone und  $\text{grad}_h_{\text{Störung}}$  bezeichnet den vertikalen hydraulischen Gradienten in der Störung.

Der geschilderte Ansatz folgt konsequent dem oben beschriebenen konservativen Ansatz zur Abschätzung des Risikos. Im Detail ist die Problematik der Herkunft erhöhter Salinitäten im oberflächennahen Grundwasser der zentralen

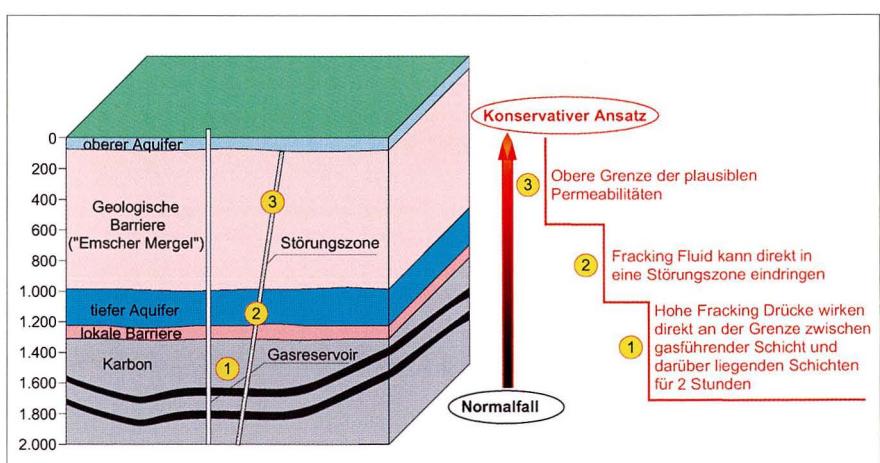
Bereiche des Münsterländer Kreidebeckens deutlich komplexer [6].

## 5. Modellierung der Ausbreitung von Frack-Fluiden und Migration von Methan

Für die Modellierungen der Stoffausbreitung im Untergrund wurden auf der Basis des geologischen Inventars drei grundätzliche Szenarien unterschieden.

In **Szenario 1** ist die kurzfristige Ausbreitung (12 Stunden) des Frack-Fluids entlang eines durch den Frack-Vorgang verursachten hydraulischen Gradienten simuliert. Es wurde für jedes der gewählten Settings angenommen, dass der vollständige Frack-Überdruck für die gesamte Frack-Dauer von 2 Stunden an der oberen Begrenzung des Frack-Risses ansteht. Zu dieser ungünstigen und eher unrealistischen (konservativen) Randbedingung wurde zusätzlich die Existenz einer höher durchlässigen Störungszone an der Spitze des Fracks mit hoher, aber noch plausibler Permeabilität angenommen. In **Bild 2** ist diese Kumulation ungünstiger Annahmen grafisch für einen Standort im Münsterländer Kreidebecken dargestellt.

Die Modellrechnungen ergaben selbst für diese extrem konservativen Bedingungen an keinem der sieben Settings einen Fluidtransport während der Druckphase über 50 m hinaus. Nach Beendigung der Frack-Maßnahme ist auf Grund der fehlenden Triebkraft durch einen hydraulischen Gradienten keine Migration von Frack-Fluiden möglich, sofern nicht (arte-



**Bild 2:** Kumulativer Effekt ungünstiger Bedingungen auf den Stofftransport im Münsterländer Kreidebecken für Szenario 1.

sisch) gespannte Grundwasserdruckverhältnisse bestehen.

Das Ergebnis der Modellierungen für **Szenario 1** in allen sieben Settings stellt eine wesentliche Grundlage für die Festlegung von Mindestabständen zwischen Geländeoberfläche (bzw. nutzbarem Grundwasser) und möglichen Frack-Positionen dar.

**Szenario 2** basierte darauf, dass nach einer Fracking-Maßnahme Fluide in den tiefen, Salzwasser führenden Cenoman-Turon-Aquifer eingedrungen sind und nunmehr dem regionalen Stofftransport im Münsterland unterliegen. Die Sole des an den Rändern des Münsterländer Kreidebeckens ausstreichenden Aquifers versorgt eine Anzahl von Heilbädern. Im Gegensatz zu Szenario 1 wird auf Grund der regionalen Modellskala ein längerer Zeitraum (30 Jahre) zu Grunde gelegt. Der im gespannten Cenoman-Turon-Aquifer vorherrschende schwache hydraulische Gradient ist von Nordost nach Südwest gerichtet. In das Modellgebiet wurde eine exemplarische Störungszone eingebaut, welche sich vom Cenoman-Turon-Aquifer bis in die quartären Schichten erstreckt. Tiefenwässer und Frack-Fluide könnten so auf Grund gespannter Verhältnisse entlang der Störungszone vertikal in oberflächennahe Grundwasserleiter aufsteigen.

Durch die Modellrechnungen wurde gezeigt, dass ein Aufstieg von mit Frack-Fluiden belastetem Grundwasser nur durch die Kombination mehrerer ungünstiger Annahmen, d. h. bei hoher Durchlässigkeit der Störungszone sowie hohem vertikalen Gradienten erfolgen kann. Auf Grund des Risiko-Schwerpunktes der Studie wurden in der Realität wirkende Effekte wie Sorption oder Schadstoffabbau nicht berücksichtigt (s. o.). Deren Wirksamkeit führt über längere Zeiträume zu einer starken Reduktion der Konzentrationen der Inhaltsstoffe (hohe Anteile an organischem Material als Nährstoffe, günstige Temperaturen z. B. für mikrobielle Reaktionen). Auf Grund fehlender topografischer Ausdifferenzierung und demzufolge sehr kleiner hydraulischer Gradienten ist die regionale, tiefe Grundwasserströmung im Niedersächsischen Becken von untergeordneter Bedeutung und damit für eine Betrachtung im Rahmen der Studie von geringer Relevanz.

**Szenario 3** befasste sich mit der Freisetzung und der Migration von Methan über einen längeren Zeitraum (100 Jahre). Es wurde davon ausgegangen, dass nach dem Ende der Förderaktivitäten (im Modell

nach 10 Jahren) das im Gestein verbliebene Restgas noch über weitere sieben Jahre aus der Lagerstätte ausgast und über Störungszonen im Untergrund an die Oberfläche migriert. Abgesehen von ungewollten Methanübertritten in das Grundwasser bzw. in Trinkwasserbrunnen bestünde durch die Freisetzung des Treibhausgases Methan eine erhebliche Klimarelevanz.

Die Modellberechnungen zum Szenario 3 gingen von der ebenfalls wieder konservativen Annahme aus, dass das gesamte nach 10 Jahren noch nicht geförderte Methan eines gefrackten Bereiches an der Oberkante der gasführenden Schicht ansteht und in das System migrieren muss (Neumann-Randbedingung). Weiterhin wurde eine durchgängige Störungszone bis zur Geländeoberfläche angenommen. Außerdem wurde für einen Teil der Szenarien eine sehr geringe Methan-Speicherfähigkeit (residuale Sättigung) zu Grunde gelegt. Unter diesen geologisch sehr unwahrscheinlichen Randbedingungen wurde für eines der Settings mit vergleichsweise geringer Deckgebirgsmächtigkeit von rund 1.200 m eine erhebliche Methan-Migration nach Einstellung der Förderaktivitäten berechnet, die auch merkliche Klimarelevanz aufweisen würde.

## 6. Gesamtergebnisse und Empfehlungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Fluidmigration während eines Frackpulses auch für sehr ungünstige Bedingungen (vorhandene Störungszone, hohe Durchlässigkeit, hohe transportwirksame Porositäten) nur wenige Zehnermeter beträgt. Der regionale Transport wurde auf wenige Zehnermeter pro Jahr abgeschätzt, wobei hier weder biologischer Abbau, Sorption noch Matrixdiffusion, d. h. die Stoffmenge reduzierende Prozesse angenommen wurden. Entsprechende Empfehlungen beinhalten, dass (a) zunächst eine Minimaldistanz zwischen Perforation in der Verrohrung im Zielhorizont und der Geländeoberfläche von 1000 m nicht unterschritten werden soll. Sind (b) nutzbare, tiefe Aquifere vorhanden, wird zu diesen die Einhaltung eines Mindestabstandes von 600 m empfohlen. Während sich die unteren 500 m der genannten Distanzen aus der maximalen Frack-Höhe ableiten, sind, abhängig von den jeweiligen Migrationsbedingungen und basierend auf hydrogeologischer Plausibilität, individuell

für beide Fälle (a und b) die weiteren Wegstrecken definiert. Für (a) setzen sie sich zusammen aus der modellierten, maximalen Transportdistanz des Frack-Fluids von 50 m, die sich durch eine mögliche erneute Druckbeaufschlagung während einer weiteren Frack-Operation sowie unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 2 zu 200 m summiert (**Bild 3**).

Die weiteren 300 m (oberflächennaher Entspannungs-/Auflockerungsbereich) gewähren einen zusätzlichen Sicherheitsabstand zum oberflächennahen Grundwasserleiter (in der Regel maximal 100 m Mächtigkeit). Im Fall (b) entfällt der oberflächennahe Anteil von 300 m und die maximale Transportdistanz für das Frack-Fluid wird basierend auf den Modellergebnissen bei einfacher Druckbeaufschlagung mit maximal 25 m angesetzt. In Analogie zu (a) ergibt sich für eine mögliche, wiederholte Druckbeaufschlagung und die Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 2 eine maximale vertikale Migration von 100 m.

Auf Grund der fehlenden Information zu den Freisetzungsprozessen des Methans aus der Gesteinsmatrix können keine detaillierten Empfehlungen zur Methanmigration formuliert werden. Es zeigt sich jedoch, dass die Barrierefunktion von mächtigen Ton- und Mergelsteinabfolgen sowie Evaporithorizonten (Salz, Anhydrit) einen Schlüsselfaktor für die Stoffausbreitung darstellen.

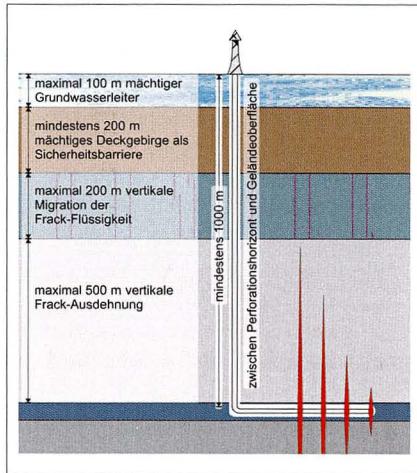
Werden für das geologisch-hydrogeologische System die genannten Empfehlungen und Faktoren bei der Standortanalyse berücksichtigt, ergibt sich ein höher zu bewertendes Risiko durch mögliche Unfälle oder Leckagen im technischen System. Dieser Befund manifestiert sich in weitergehenden Empfehlungen für eine Minimierung des Risikos von oberflächigen Schadstoffeinträgen in das oberflächennahe Grundwasser. So wird u. a. empfohlen, auf die Anwendung der Frack-Technologie in Trinkwasserschutzgebieten der Zonen I und II sowie in Heilquellschutzgebieten zu verzichten.

Die Fracking-Technologie sollte in tektonisch kritisch gespannten sowie in tektonisch stark zerrütteten Gebieten oder in der Nähe alter Bohrungen/Schächte nicht angewendet werden, insbesondere dann nicht, wenn das tiefe Grundwasser (artesisch) gespannt ist bzw. einen Druckspiegel im Niveau des oberflächennahen Grundwassers aufweist. Die Einhaltung dieser geologisch-tektonischen Vorgaben

muss im Rahmen standortspezifischer Vorerkundungen jeweils durch den Vorhabensträger nachgewiesen werden.

Grundsätzlich ist an allen Fracking-Standorten ein auf die lokalen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse angepasstes Monitoring erforderlich.

Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit des Neutralen Expertenkreises sowie alle Empfehlungen wurden anlässlich einer Abschlusskonferenz am 25.04.2012 in Osnabrück der Öffentlichkeit und dem Fachpublikum vorgestellt. Weiterhin werden alle umfangreichen Gutachten sowie eine Übersichtsfassung der Studie im Internet unter <http://dialog-erdgasundfrac.de/> hinterlegt. In diesen Gutachten finden sich auch weitere Literaturhinweise (vgl. [1]).



**Bild 3:** Empfehlungen für Sicherheitsabstände zwischen Perforation der Verrohrung und der Oberfläche während des Frackings für erste Demonstrationsvorhaben.

## Danksagung

Studie und Publikation wurden unter Mitwirkung von Karolin Brosig, Torsten Lange, Wiebke Jahnke, Alexander Kissinger, Michael Heitfeld und Kurt Schetelig erstellt.

## Autoren

### Prof. Dr. Martin Sauter

E-Mail: Martin.Sauter@geo.uni-goettingen.de

### Karolin Brosig

E-Mail: kbrosig@uni-goettingen.de

### Torsten Lange

E-Mail: tlange@gwdg.de

### Wiebke Jahnke

E-Mail: wiebkejahnke@googlemail.com

Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen  
Abteilung Angewandte Geologie  
Goldschmidtstraße 3  
37077 Göttingen

### Prof. Dr. Rainer Helmig

E-Mail: rainer.helmig@iws.uni-stuttgart.de

### Alexander Kissinger

E-Mail: alexander.kissinger@iws.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart  
Lehrstuhl für Hydromechanik und  
Hydrosystemmodellierung  
Pfaffenwaldring 61  
70569 Stuttgart

### Dr.-Ing. Michael Heitfeld

E-Mail: m.heitfeld@ihs-online.de

### Dr. Johannes Klünker

E-Mail: j.kluenker@ihs-online.de

### Prof. Dr. Kurt Schetelig

E-Mail: k.schetelig@ihs-online.de

Ingenieurbüro Heitfeld-Schelting GmbH  
Preusweg 74, 52074 Aachen

## Literatur

- [1] BORCHARDT, D.; CH. EWEN; S. RICHTER & R. HAMMERBACHER (2012): Informations- und Dialogprozess zur Sicherheit und Umweltverträglichkeit der Fracking-Technologie. In: Wasser und Abfall, Heft 6/12, Seite 10-14.
- [2] CAINE, S.C., J.P. EVANS & C.B. FORSTER (1996): Fault zone architecture and permeability structure. – Geology, 24: 1025-1028.
- [3] FISHER, K., N. WARPINSKI (2011): Hydraulic Fracture-Height Growth: Real Data. – Society of Petroleum Engineers, SPE 145949.
- [4] GAUTSCHI, A. (2001): Hydrogeology of a fractured shale (Opalinus Clay): Implications for deep geological disposal of radioactive wastes. – Hydrogeology Journal, 9: 97-107.
- [5] Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen (1997): Hydrogeologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:50 000, Blatt L3910 Steinfurt, Karten und Erläuterungen.
- [6] GROBE, M. & H. MACHEL (2002): Saline groundwater in the Münsterland Cretaceous Basin, Germany: clues to its origin and evolution Marine and Petroleum Geology. – 19: 307-322.
- [7] JOLLEY, S. J., H. DIJK; J.H. LAMENS; Q. J. FISCHER; T. MAMZOCCHI; H. EIKMANS & Y. HUANG (2007): Faulting and fault sealing in production simulation models : Brent Province , northern North Sea. – Petroleum Geoscience, 13: 321-340.
- [8] OSBORN, S. G.; A. VENGOSH; N. R. WARNER & R. B. JACKSON (2011): Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. – Proceedings of the National Academy of Sciences, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1100682108, 5 p.
- [9] UTH, H.-J. (2012): Gutachten „Technische Sicherheit von Anlagen und Verfahren zur Erkundung und Förderung von Erdgas aus nichtkonventionellen Lagerstätten“. – <http://dialog-erdgasundfrac.de/gutachten>, 113 p.

Die Verwendung des Titelbilds erfolgt mit der freundlichen Genehmigung der ExxonMobil Production Deutschland GmbH.