

## Schlussbericht

WB 04/2015      LH<sup>2</sup> 23

Mehrstufige und regionale Charakterisierung potentieller  
CO<sub>2</sub>-Speicherformationen unter besonderer Berücksichtigung  
von Soleaufstiegsrisiken - ein integrierter natur- und  
sozialwissenschaftlicher Ansatz



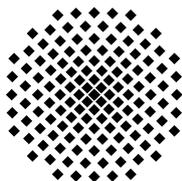
Holger Class<sup>a</sup>, Alexander Kissinger<sup>a</sup>, Stefan Knopf<sup>b</sup>, Wilfried Konrad<sup>c</sup>,  
Vera Noack<sup>b</sup> und Dirk Scheer<sup>c</sup>

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des  
Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter den  
Förderkennzeichen 03G0802A, 03G0803A und 03G0802B gefördert. Die  
Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

<sup>a</sup>Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung, Universität Stuttgart,  
Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart

<sup>b</sup>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, 30655 Hannover

<sup>c</sup>DIALOGIK gGmbH, Lerchenstraße 22, 70174 Stuttgart



## Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b>	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht
<b>3. Titel</b> Mehrstufige und regionale Charakterisierung potentieller CO <sub>2</sub> -Speicherformationen unter besonderer Berücksichtigung von Soleaufstiegsrisiken - ein integrierter natur- und sozialwissenschaftlicher Ansatz	
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Holger Class, Alexander Kissinger, Stefan Knopf, Wilfried Konrad, Vera Noack, Dirk Scheer	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 28.02.2015
	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b>
	<b>7. Form der Publikation</b> Schlussbericht
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> - Universität Stuttgart - Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung - Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung (LH2) Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Stilleweg 2, 30655 Hannover - DIALOGIK gGmbH, Lerchenstraße 22, 70174 Stuttgart	<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b> WB 04/2015 LH2 23
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 03G0802A
	<b>11. Seitenzahl</b> 60
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	<b>13. Literaturangaben</b> 71
	<b>14. Tabellen</b> 9
	<b>15. Abbildungen</b> 19
<b>16. Zusätzliche Angaben</b> weitere Förderkennzeichen: 03G0803A und 03G0802B	
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b>	
<b>18. Kurzfassung</b> Die national und international betriebene Forschung auf dem Gebiet der CO <sub>2</sub> -Speicherung war zur Zeit der Planung des CO <sub>2</sub> BRIM-Projekts an einer Stufe angelangt, die einen nächsten großen Schritt in Richtung weiterer großskaliger Demonstrationsprojekte notwendig gemacht hätte. Für ein solches Unterfangen müssen viele Experten und Stakeholder einbezogen werden, damit die Kriterien zur Auswahl geeigneter Standorte sowie die Bewertung von möglichen Risiken für Mensch und Umwelt transparent dargestellt, bewertet und kommuniziert werden können und somit die öffentliche Akzeptanz erhöht werden kann. Daher ist die Grundidee des Projekts, diese Problematik in einem integrierten technisch-sozialwissenschaftlichen Ansatz zu behandeln, wobei partizipatives Modellieren als eine Methode getestet wurde, die zur Untersuchung von Risiken die Bedenken von verschiedenen Stakeholdern aus Behörden, Wasserversorgern, Industrie und Wissenschaft miteinbezieht.	
<b>19. Schlagwörter</b> CCS, Partizipative Modellierung, Speicher-Effizienz, Gravitationszahl, Norddeutsches Becken	
<b>20. Verlag</b>	<b>21. Preis</b>

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 270943-2

## Zusammenfassung

Die national und international betriebene Forschung auf dem Gebiet der CO<sub>2</sub>-Speicherung war zur Zeit der Planung des CO<sub>2</sub>BRIM-Projekts an einer Stufe angelangt, die einen nächsten großen Schritt in Richtung weiterer großskaliger Demonstrationsprojekte notwendig gemacht hätte. Für ein solches Unterfangen müssen viele Experten und Stakeholder einbezogen werden, damit die Kriterien zur Auswahl geeigneter Standorte sowie die Bewertung von möglichen Risiken für Mensch und Umwelt transparent dargestellt, bewertet und kommuniziert werden können und somit die öffentliche Akzeptanz erhöht werden kann. Daher ist die Grundidee des Projekts, diese Problematik in einem integrierten technisch-sozialwissenschaftlichen Ansatz zu behandeln, wobei partizipatives Modellieren als eine Methode getestet wurde, die zur Untersuchung von Risiken die Bedenken von verschiedenen Stakeholdern aus Behörden, Wasserversorgern, Industrie und Wissenschaft miteinbezieht.

Ein zentrales Element bei der Modellierung von Strömungsvorgängen im Untergrund ist die Verknüpfung zu realen Daten. Aus diesem Grund wurde dieses Vorhaben in einem Projektverbund der Partner LH2 (Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung, Universität Stuttgart) und BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) bearbeitet. Die Dialogik gGmbH übernahm den sozial-wissenschaftlichen Teil, der die Ziele hatte die technischen Aspekte dieses Projekts früh und transparent an Stakeholder zu kommunizieren, die angewandte Methodik bewerten zu lassen, sowie externes Expertenwissen in die Modellierung einfließen zu lassen. Die Auswahl potenziell geeigneter Regionen, in denen große Mengen an CO<sub>2</sub> sicher im Untergrund gespeichert werden können, erfordert die Prüfung einer Reihe von Kriterien. Ausreichende Speicherkapazität, Speichereffizienz, technische und ökonomische Machbarkeit, Risiko der CO<sub>2</sub>- und Salzwassermigration in flacher gelegene Schichten, und weitere Aspekte müssen berücksichtigt werden.

In diesem Projekt wurden zwei wesentliche Aspekte der Standortcharakterisierung herausgegriffen, auf welche die partizipative Modellierung angewandt wurde:

- Eine Screening-Methode basierend auf der dimensionslosen Gravitationszahl zur qualitativen Bewertung von Speicherformationen auf regionaler Skala.
- Die Untersuchung von Solemigration entlang einer Salzstockflanke, als Folge der Injektion von CO<sub>2</sub> in einem für das Norddeutsche Becken exemplarischen geologischen Modell.

Die Bearbeitung des ersten Aspekts erfolgte auf Basis des Speicher-Katasters Deutschland (Müller und Reinhold, 2011). Die Screening-Methode wurde auf untersuchungswürdige Gebiete des Speicherkomplexes Mittlerer Buntsandstein im Norddeutschen Becken angewendet. Hierzu wurden von der BGR interne GIS-Datensätze des tieferen Untergrundes von Norddeutschland (Tiefenraster) sowie regionalgeologische Informationen zur Tiefentemperaturverteilung und zur Salinität von Formationswässern bereitgestellt. Mit diesen Daten war es möglich, die initialen thermodynamischen Bedingungen auf regionaler Ebene zu bestimmen, wodurch vom LH2 die Fluideigenschaften Viskosität und Dichte von CO<sub>2</sub> und Wasser berechnet werden konnten, welche einen großen Einfluss auf die Speichereffizienz von CO<sub>2</sub> haben. Mit Hilfe der daraus berechneten dimensionslosen Gravitationszahl lässt sich dann die Speichereffizienz verschiedener Regionen vergleichen. Im November 2012 wurde von DIALOGIK ein Delphi-Workshop organisiert, bei dem sich verschiedene Experten mit der Gravitationszahl als Screening-Kriterium befassten und schließlich die Methodik und deren Relevanz bewerteten. Die Ergebnisse aus dem Workshop wurden von BGR und LH2 aufgegriffen, um die Methodik tiefergehend zu prüfen und erneut zu evaluieren.

Die Untersuchung der Solemigration wurde anhand eines virtuellen Speicherstandorts mit einer für das Norddeutsche Becken realistischen Geologie verwirklicht. Das geologische Modell wurde von Seiten der BGR erstellt. Im Vorfeld der Simulationen durch das LH2 wurden von DIALOGIK Experteninterviews mit verschiedenen Stakeholdern durchgeführt. Die Experten wurden dabei zu verschiedenen anthropogenen und geologischen Migrationswegen für Sole in flacher gelegene und möglicherweise schützenswerte Aquifere befragt. Ziel war zu überprüfen, wo die Experten die größten Risiken sehen, und welche nach ihrer Einschätzung die relevanten Mechanismen der Salzwassermigration sind. Das gewonnene Wissen wurde bei der Gestaltung der Simulationsszenarien berücksichtigt. In einem weiteren von DIALOGIK durchgeführten Workshop im September 2014 wurden erste Ergebnisse der Simulationen vorgestellt und im Rahmen eines World-Cafe Formats diskutiert. Anwesend waren wiederum verschiedene Stakeholder aus den bereits oben genannten Gruppen. Die technische Seite des Projekts profitierte von vielen Anregungen zur Erweiterung des geologischen und numerischen Modells.

Mit dem in CO2BRIM angewandten integrierten technisch-sozialwissenschaftlichem Ansatz wurde Neuland bei der Forschung auf dem Gebiet der CO<sub>2</sub>-Speicherung betreten. Es zeigt sich, dass der Transfer von wissenschaftlichen Konzepten in die praktische Anwendung von der frühen Einbindung von Stakeholdern profitieren kann. Dies liegt am iterativen Charakter dieses Prozesses, der darauf beruht, Konzepte und Ergebnisse in einem frühen Stadium einem kritischen Publikum vorzustellen und diese durch den daraus entstehenden Wissenstransfer neu zu evaluieren und zu verbessern.

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Kurze Darstellung</b>	<b>6</b>
I.1	Aufgabenstellung . . . . .	6
I.2	Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens . . . . .	6
I.3	Planung und Verlauf des Vorhabens . . . . .	8
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde . . . . .	11
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen . . . . .	12
<b>II</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>14</b>
II.1	Durchgeführte Arbeiten und wesentliche Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele . . . . .	14
II.1.1	Die Gravitationszahl als qualitativer Screening-Indikator für Speichereffizienz . . . . .	14
II.1.2	Die Untersuchung von Solemigrationsszenarien entlang einer Salzstockflanke durch die Injektion von CO <sub>2</sub> . . . . .	28
II.2	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises . . . . .	47
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit . . . . .	47
II.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse . . . . .	48
II.5	Fortschritt des Vorhabens bei anderen Stellen . . . . .	50
II.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen . . . . .	50

# Teil I

## Kurze Darstellung

### I.1 Aufgabenstellung

CO2BRIM beruht auf einem integrierten technisch-sozialwissenschaftlichen Ansatz. Ziel ist es, partizipative Modellierung für verschiedene technische Fragestellungen bei der Charakterisierung von Gebieten für die CO<sub>2</sub> Speicherung zu testen.

Bei der partizipativen Modellierung handelt es sich um eine Methode, die Stakeholder in den Modellierungs- und Entscheidungsprozess frühzeitig einbindet. Die in CO2BRIM beteiligten Stakeholder kamen aus Behörden, Wasserversorgern, Industrie und Wissenschaft. In diesem Projekt wurden zwei wesentliche technische Aspekte der Standortcharakterisierung herausgegriffen, auf welche die partizipative Modellierung angewandt wurde:

- Testen einer Screening-Methode basierend auf der dimensionslosen Gravitationszahl zur qualitativen Bewertung von Speicherformationen auf regionaler Skala.
- Die Untersuchung von Solemigration entlang einer Salzstockflanke, als Folge der Injektion von CO<sub>2</sub> in einem für das Norddeutsche Becken repräsentativen geologischen Modell.

### I.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

#### Teilprojekt 1 - LH2

Die Hauptexpertise der Arbeitsgruppe des LH2 ist die Entwicklung von Modellkonzepten für Strömungsprozesse in porösen Medien, insbesondere für komplexe Mehrphasen-Mehrkomponenten-Prozesse. Die CO<sub>2</sub>-Speicherung ist dabei ein wichtiges Anwendungsgebiet solcher Modelle und die Arbeitsgruppe ist auf diesem Gebiet durch einige wichtige Publikationen in Fachzeitschriften international anerkannt. LH2 entwickelt eigene Modelle zur Simulation der Prozesse während der CO<sub>2</sub>-Speicherung (Bielinski et al., 2008; Darcis et al., 2011; Darcis, 2012). Die vom LH2 entwickelten Modelle, die in den Simulatoren MUFTE (bis 2008) und DuMu<sup>x</sup> (seit 2008) implementiert werden, erwiesen sich im Rahmen einer internationalen Code- und Modellvergleichsstudie (Class et al., 2009; Ebigbo et al., 2010) als dem Stand der Wissenschaft entsprechend. Dies war Hauptvoraussetzung für die Durchführung der numerischen Simulationen.

## **Teilprojekt 2 - BGR**

Die BGR stellte die geologische Expertise und den Zugang zu Daten potenzieller Speicherregionen in Deutschland zur Verfügung. Die der BGR vorliegenden geowissenschaftlichen Daten und Informationen zum tieferen Untergrund des Norddeutschen Beckens waren eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung der Gravitationszahl-Methode sowie für die Erstellung und Parametrisierung des geologischen 3D-Modells. Für die Berechnung der Gr-Zahl waren die Ergebnisse des Projektes Speicher-Kataster Deutschland (Müller und Reinhold, 2011) eine wichtige Basis. Eine weitere wesentliche Grundlage für die Durchführung der Aufgaben waren interne GIS-Datensätze des tieferen Untergrundes von Norddeutschland (Tiefenraster) sowie regionalgeologische Informationen zur Tiefentemperatur (LIAG, 2012) und zur Salinität von Formationswässern (Brasser et al., 2001; Wolfgramm und Seibt, 2008). Für die Zusammenstellung, Verarbeitung und Darstellung dieser Daten wurde die Software ArcGIS 10.2 von ESRI genutzt. Für den Bau des geologischen 3D-Modells war der Datensatz des Geotektonischen Atlas 3D (Bombien et al., 2012) eine wesentliche Grundlage. Diese wurde ergänzt durch Horizontflächen, die im Rahmen des Projektes Geopotenzial Deutsche Nordsee erstellt wurden (Kaufmann et al., 2014; Wolf et al., 2014; Asprien et al., 2013). Die lithologische Zusammensetzung und die korrespondierenden geophysikalischen Parameter des 3D-Modells wurden von Daten aus regionalgeologischer Literatur abgeleitet (Larue, 2010; Reutter, 2011; Schäfer et al., 2011; Noack et al., 2013). Für die Erstellung des 3D-Modells wurde die Reservoir Software Petrel 2012.1 von Schlumberger Information Solutions genutzt.

## **Teilprojekt 3 - DIALOGIK**

Chancen und Herausforderungen der partizipativen Modellierung (PM) verweisen auf den Charakter von PM als einem konstitutiv auf Kooperation und Austausch basierenden Forschungsansatz. Bei PM-Projekten, für die Computersimulationen zentral sind - wie dies bei CO2BRIM der Fall war - bringt PM drei unterschiedliche Akteursgruppen zusammen. Zunächst sind vornehmlich aus den Natur- und Technikwissenschaften Modellierungsexperten beteiligt, die die Simulation konzeptionell und technisch auf- und umsetzen. Sie verfügen über detailliertes Fachwissen zur Abbildung der Problemstellung in eine virtuelle Computerumgebung. Ihr Expertenwissen über fachbezogene Problemstellungen und Wirkungszusammenhänge sowie deren Umsetzbarkeit in eine technische Modellierung verleiht ihnen eine herausgehobene Entscheidungsbefugnis in der Akteurskonstellation. Als zweite Akteursgruppe lassen sich die über die Partizipation eingebundenen externen Schlüsselakteure identifizieren. Ein wichtiges Charakteristikum dieser Akteursgruppe ist ihre rollen- und wissensspezifische Heterogenität. Die eingebundenen Akteure entstammen unterschiedlichen gesellschaftlichen Subsystemen, Organisationen und Interessensgruppen und verfügen über sehr heterogene Wissensbestände und Rollenverständnisse. Zwar ist in transdisziplinären, hochgradig komplexen Problemstellungen gerade die Integration dieser Heterogenität notwendig und erwünscht, es stellt aber auch eine Herausforderung für die Projektkoordination dar, diese Heterogenität zu bündeln und zu synthetisieren. Als vermittelnde Instanz zwischen Externen und Modellierern fungieren Verantwortliche für Konzeption und

Umsetzung des Partizipations- und Integrationsprozesses. Die von DIALOGIK übernommene Aufgabe beinhaltete drei grundlegende Funktionen: Gestaltung, Kommunikation und Synthese. Bei diesen Funktionen müssen inhaltliche Frage- und Problemstellungen identifiziert werden, mit denen sich die Partizipation befassen soll. Im CO2BRIM-Projekt war dies z. B. die Bewertung der Gr-Methode sowie beim Analysefokus Solemigration die Konzentration auf alle szenarienbezogenen Schritte bezüglich potentieller Aufstiegswege, Interpretation der Simulationsergebnisse sowie Bewertung von Unsicherheit und Risikoeinschätzung. Eine enge Vernetzung und Anbahnung von Kooperationen im Vorfeld eines PM-Projektes ist Voraussetzung für ein Vorhaben. Im Vorfeld der durchgeführten Partizipationsansätze im CO2BRIM-Projekt wurde daher die Kooperationsbereitschaft von Schlüsselakteuren wie dem Umweltbundesamt und dem Forschungsprojekt BRINE sichergestellt.

### I.3 Planung und Verlauf des Vorhabens

Das Projekt verlief im Wesentlichen nach Plan. Alle geplanten Meilensteine (siehe unten) konnten erreicht werden. Aufgrund neuer Erkenntnisse, der ergebnisoffenen Herangehensweise im Partizipationsprozess und der politischen Entwicklung (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG)) mussten inhaltliche Anpassungen vorgenommen werden, die sich insgesamt aber nicht nachteilig auf den Projektverlauf und die gewonnen Erkenntnisse auswirkten.

Speziell der Verzug im KSpG, dessen Inhalt und die fehlende öffentliche Akzeptanz haben die CO<sub>2</sub>-Speicherung für die Industrie unattraktiv gemacht. Dies spiegelte sich auch bei den diversen Stakeholdern wieder, da bei vielen kein stärkeres Interesse an der Debatte mehr vorhanden war. Die Beteiligung von Stakeholdern am partizipativen Prozess war schwieriger als ursprünglich angenommen. Trotz dieser nachteiligen Umstände war es im Rahmen von CO2BRIM möglich Stakeholder zu involvieren, auch wenn die Beteiligung oft nicht aus deren Eigeninitiative zustande kam, sondern durch persönliche Anfragen der Projektpartner.

CO2BRIM war in drei Teilprojekte untergliedert die jeweils den drei beteiligten Institutionen zugeordnet waren:

- Teilprojekt 1 (Koordinator: Holger Class, LH2, Universität Stuttgart): Reservoir Charakterisierung und Modellierung der Fluidströmung
- Teilprojekt 2 (Koordinator: Stefan Knopf, BGR, Hannover): Geologische Modellierung
- Teilprojekt 3 (Koordinator: Dirk Scheer, Dialogik gGmbH, Stuttgart): Die Förderung von Transparenz und Verantwortlichkeit: Potenziale und Grenzen partizipativer Modellierung im Bereich CCS-Simulation

Um einen besseren Überblick zu gewähren, werden den technischen und nicht-technischen Teilen untenstehend eine jeweils separate Beschreibung gegeben. Die Verknüpfung beider Teile ist vorwiegend vom technischen zum nicht-technischen Teil. Gleichwohl hatte das Teilprojekt 3 wichtige Rückkopplungen zu den technischen Teilprojekten in der Umsetzung der partizipativen Modellierung.

## **Technische Meilensteine**

### **Meilenstein 1 (BGR und LH2): Überblick der zu untersuchenden Regionen**

Dieser Schritt beinhaltete die Sichtung und Analyse regionaler Daten im Norddeutschen Becken, auf der Basis des Speicher-Katasters. Es wurde beschlossen die Datensichtung und die darauffolgende Charakterisierung für den Speicherkomplex Mittlerer Buntsandstein durchzuführen. Zur Berechnung der dimensionslosen Gravitationszahl durch das LH2 wurden von Seiten der BGR Daten zu der Tiefe des Speicherkomplexes, den geothermischen Gradienten und der tiefenabhängigen Salzkonzentration ermittelt und bereitgestellt.

### **Meilenstein 2 (LH2 und BGR): Erstellung des Gr-Rasters für den Mittleren Buntsandstein zur Differenzierung verschiedener Regionen bezüglich Speichereffizienz**

Die von der BGR bereitgestellten Daten wurden vom LH2 zur Bestimmung der Gravitationszahl verwendet. Hierfür wurden die Fluidparameter Dichte und dynamische Viskosität von jeweils Sole und CO<sub>2</sub> für jeden Datenpunkt berechnet. Diese Werte wurden wiederum an die BGR übergeben, die daraus das Gravitationszahl-Raster erstellte.

### **Meilenstein 3 (LH2, BGR, DIALOGIK): Auswahl von drei Subregionen, anhand derer nachfolgend detailliertere Untersuchungen durchgeführt wurden unter Einbeziehung zusätzlicher Daten zu Porosität und Reservoirmächtigkeit**

Aus dem Gravitationszahl-Raster wurden drei Regionen mit einem niedrigen, mittleren und hohen Wert der Gravitationszahl ausgewählt, für die zusätzliche Daten zu Porosität und Reservoirmächtigkeit von der BGR ermittelt werden konnten. Für die drei Regionen wurden vom LH2 numerische Simulationen durchgeführt mit dem Ziel, die Signifikanz der Gravitationszahl als Screening-Kriterium zu testen. In einem Gruppen-Delphi Workshop im November 2012 wurde die Gravitationszahl-Methodik von Experten bewertet.

### **Meilenstein 4 (BGR, LH2 und DIALOGIK): Regionales geologisches Modell**

Die BGR erstellte ausgehend von einer realistischen Geometrie des tieferen Untergrundes im Südwesten des deutschen Nordsee-Sektors ein geologisches Modell, welches neben einer sehr großen lateralen Ausdehnung (58 km x 39 km) auch in der vertikalen alle Schichten von der Injektionsschicht bis zu den oberflächennahen potentiellen Grundwasserleitern beinhaltet. Weiterhin enthält das geologische Modell eine Salzmauer. Vom LH2 wurden numerische Simulationen auf diesem geologischen Modell durchgeführt. Es wurden verschiedene Sole Aufstiegszenarien simuliert und Modellvereinfachungen getestet. Es wurden Experten-Interviews im Vorfeld und ein Stakeholder Workshop im September 2014 durchgeführt.

## **Meilenstein 5 (BGR, LH2 und DIALOGIK): Publikationen**

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden zwei Publikationen in begutachteten Fachzeitschriften veröffentlicht (Kissinger et al., 2014; Scheer et al., 2015). Weiterhin wurde ein Buch-Kapitel im Geotechnologien Band zur CO<sub>2</sub> Speicherung veröffentlicht (Class et al., 2015) sowie ein Buchbeitrag über partizipative Modellierung in einem sozialwissenschaftlichen Sammelband über Experten- und Stakeholdereinbindung (Dreyer et al., 2015) und ein Buchbeitrag über partizipative Modellierung im Rahmen des CO2BRIM-Projekts in einem DIALOGIK Sammelband veröffentlicht (Scheer und Konrad, 2014).

## **Sozialwissenschaftliche Meilensteine**

### **Meilenstein 6: Konzeptstudie über Potenzial und Grenzen der partizipativen Modellierung im Bereich der CCS-Technologie**

Über eine intensive Literaturrecherche wurde eine Konzeptstudie verfasst, die zentrale Elemente einer partizipativen Modellierung auswertete und zusammenführte. Die Auswertung bezog sowohl konzeptionelle wie empirisch fallstudienbezogene Aspekte mit ein. Damit waren die grundlegenden Bausteine für die Erstellung des projektbezogenen Partizipationsansatzes vorhanden.

### **Meilenstein 7: Umsetzungsfähiges Konzept zur partizipativen Modellierung, gebilligt durch alle Projektpartner**

Auf Basis der Konzeptstudie wurde im Verlauf des Forschungsprojektes in enger Zusammenarbeit mit den naturwissenschaftlichen Kolleginnen und Kollegen ein umsetzungsfähiges Konzept zur partizipativen Modellierung entwickelt und umgesetzt. Dieses Konzept war im Sinne eines „living document“ zu verstehen, welches im Projektverlauf sukzessive weiterentwickelt und verfeinert wurde.

### **Meilenstein 8: Bericht über Potenziale und Grenzen der partizipativen Modellierung im Rahmen der Fallstudie**

Die Fallstudien des CO2BRIM-Projekts wurden hinsichtlich ihrer Potenziale und Grenzen von partizipativer Modellierung analysiert und kritisch reflektiert. Ergebnisse dieser Auswertung wurden inzwischen in mehreren Veröffentlichungen publiziert.

### **Meilenstein 9: Leitfaden zur partizipativen Modellierung und CCS**

Die in der Konzeptstudie zusammengetragenen Erkenntnisse und in der Umsetzung gemachten Erfahrungen zu PM wurden in einer bündigen Orientierungshilfe synthetisiert, um zentrale Elemente, Herangehensweisen und Herausforderungen herauszustellen. Die Orientierungshilfe soll dem interessierten Leser eine schnelle Einstiegshilfe in Kernpunkte einer PM aus sozialwissenschaftlicher Sicht liefern.

## I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die BGR stellte die geologische Expertise und den bestmöglichen Zugang zu Daten potentieller Speicherregionen in Deutschland zur Verfügung (siehe zum Beispiel Projekt “Speicher-Kataster Deutschland”). Die Arbeitsgruppe LH2 hat substanzielle Erfahrung in der Entwicklung von Modellkonzepten für großskalige Simulationen, vor allem auch im Bereich der CO<sub>2</sub>-Speicherung (Class et al., 2009; Darcis, 2012; Kopp et al., 2009a). Der Simulator DuMu<sup>x</sup> (Flemisch et al., 2011) stand für das Projekt zur Verfügung.

Für eine mehrstufige Charakterisierung soll eine Bandbreite unterschiedlicher Methoden verwendet werden, die sowohl einfache analytische Ansätze mit dimensionslosen Kennzahlen als auch komplexe numerische Simulationsprogramme und Hochleistungsrechnen umfassen kann. Dimensionslose Kennzahlen wie die Gravitationszahl oder die Kapillarzahl können verwendet werden, um Kräfteverhältnisse auszudrücken, die einen Einfluss auf das Speichersystem haben (Kopp et al., 2009b). Als Beispiel setzt die Gravitationszahl viskose Kräfte, verursacht durch injektionsbedingte Druckgradienten, ins Verhältnis zu Auftriebskräften, welche vorwiegend durch die Dichtedifferenz zwischen CO<sub>2</sub> und Wasser bedingt sind. Anhand der Gravitationszahl kann ein schnelles Ranking einer Anzahl potentieller Speicherregionen z.B. hinsichtlich der möglichen Nutzbarmachung vorhandenen Porenraums erreicht werden (Kopp et al., 2009a). Ebenso kann eine grobe Abwägung der Risiken, dass CO<sub>2</sub> durch Störungzonen oder Bohrungen aus dem Speicher entweicht, erfolgen (Kopp et al., 2010). Die Verwendung dieser dimensionslosen Kennzahlen für die Selektion von Speicherregionen erfordert nur wenige Informationen wie die Formationstiefe sowie Abschätzungen des geothermischen Gradienten, der Permeabilität, der Porosität.

In einer vorausgehenden Kooperation zwischen den Antragstellern BGR und LH2 wurden bereits vereinfachte und schematisierte Untersuchungen zur Druckentwicklung in einer typischen Formation des Norddeutschen Beckens durchgeführt (Schäfer et al., 2011). Eines der wesentlichen Ergebnisse dieser Studie war, dass die Fluiddrücke im Untergrund noch für Jahrzehnte nach Abschluss einer Injektion erhöht sind, wobei natürlich die hydrogeologischen Randbedingungen eine sehr wichtige Rolle spielen. Aus Zeitgründen und mangels vorhandener Finanzierung musste die Studie aber auf eine recht vereinfachte Darstellung zweier benachbarter Strukturen beschränkt werden. Um darüber hinaus eine besser fundierte Aussage über den Einfluss des beobachtbaren Druckanstiegs auf vertikale Solemigration und damit auch allgemein über den Einfluss auf die Umgebung machen zu können, müssen eine Menge zusätzlicher Details berücksichtigt werden. Parallel wurden auch an anderer Stelle Studien durchgeführt, die zum Ziel hatten die laterale und vertikale Druckentwicklung im Umfeld einer (Birkholzer et al., 2009) und mehrerer CO<sub>2</sub>-Injektionsstellen (Birkholzer und Zhou, 2009) zu beschreiben. Auch hier wurde deutlich, dass der Druckanstieg und die daraus folgende Solemigration einen viel größeren Einflussbereich hat, als die Ausbreitung des CO<sub>2</sub> im Reservoir.

Modellierungsvorhaben, die unter Mitwirkung von betroffenen Bürgern oder gesellschaftli-

chen Anspruchsgruppen stattfinden, werden als partizipative Modellierung (PM) bezeichnet. Analog zur „extended peer community“ im Kontext unübersichtlicher Governance-Situationen öffnet PM den Modellierungsprozess für Personen, die nicht wie die Modellierungsexperten selbst über Ausbildung und Erfahrung in der Analyse und formalen Repräsentation von Systemen verfügen (Bots und Daalen (2008), S. 396). Unter PM ist allerdings kein eindeutig definiertes Konzept zu verstehen, das aus einem in der Literatur dokumentierten Standard-Set von Regeln, Formaten und Vorgehensweisen besteht. Vielmehr existiert weder eine allgemein anerkannte Definition von partizipativer Modellierung noch gibt es eine Übereinkunft bezüglich einer am besten geeigneten Methode zur Durchführung von PM-Projekten (Dreyer et al., 2009). Die von Dreyer und Renn (2011b) geäußerte Einschätzung, PM sei bislang „foremost an object of research“ (S. 3), unterstreicht den offenen Bedeutungsgehalt partizipativer Modellierung. Angesichts der Vielfalt möglicher Anwendungskontexte gibt es auch Stimmen, die die Herausbildung einer allgemeinen PM-Strategie nahezu für ausgeschlossen halten (Voinov und Bousquet, 2010). Der „rather generic term“ (Voinov und Bousquet (2010), S. 1269) partizipative Modellierung verweist so auf eine flexible Methode, die auf verschiedene Techniken und Verfahren der Stakeholder-Beteiligung bei sowohl konzeptioneller (z.B. mentale Modellierung) als auch formaler, computergestützter Modellierung zurückgreift (Dreyer et al., 2009). Die aktuelle PM-Praxis ist überwiegend auf die Forschung zum Management natürlicher Ressourcen konzentriert. PM-Projekte zur Untersuchung des komplexen Zusammenspiels menschlicher Einwirkungen und Nutzungsformen mit Landschaftsräumen und deren natürlichen Ressourcen finden sich schwerpunktmäßig in den Bereichen Wasser- und Fischereimanagement, darüber hinaus etwa in den Gebieten Bodennutzungs- und Forstmanagement, Verkehr und Luftreinhaltung oder Management von Erholungsgebieten (vgl. z.B. Dreyer und Renn (2011a); Edwards und Smith (2011); Hare (2011); Johnson (2008); Korfmacher (2001); Röckmann et al. (2012); Stave (2003); Videira et al. (2009)).

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die für den PM-Prozess aktivierten Teilnehmer repräsentierten im CCS-Bereich engagierte oder fachkundige Unternehmen und Verbände der Strom- und Wasserwirtschaft, geowissenschaftliche Institute sowie Regulierungsbehörden wie zum Beispiel die Staatlichen Geologischen Dienste der Bundesländer. Diese Teilnehmersauswahl reflektierte die Fokussierung von CO2BRIM auf die Erzeugung generischen Wissens, welches bei Bedarf als Teil des hydrogeologischen Kenntnisstandes in umfassendere sozio-technische Bewertungsprozesse konkreter potentieller Speicherstandorte eingebracht werden kann. Analysen und numerische Simulationen im Zusammenhang mit der Erkundung und Auswahl eines realen CO<sub>2</sub>-Speichers waren dagegen explizit nicht Gegenstand des Untersuchungsspektrums von CO2BRIM, so dass keine Bürger oder lokalen Akteure in den Kreis der PM-Beteiligten aufgenommen wurden. Mit der Einbindung von Stakeholdern in das Verbundprojekt wurden hauptsächlich zwei Ziele verfolgt. Erstens sollten Annahmen, Vorgehensweisen und Ergebnisse der Modellierungsprozesse auf ihre Nachvollziehbarkeit geprüft und einer kritischen Bewertung unterzogen werden. Zweitens zielte die Integration externer Akteure

auf die Erschließung weiterer Wissensressourcen. Folgende Partizipationsmaßnahmen wurden im Einzelnen unternommen:

- **Auftakt-Workshop:** Am 5. Juni 2012 erfolgte der Auftakt-Workshop des CO2BRIM-Projekts in Berlin mit insgesamt 56 Teilnehmerinnen und Teilnehmern. Ziel dieser Veranstaltung war, den Forschungsansatz und die Zielsetzung des CO2BRIM-Projektes unter Entscheidungsträgern und der interessierten Öffentlichkeit bekannt zu machen.
- **Gruppendelphi-Workshop:** Der Partizipationsansatz im Kontext der Untersuchung des Gr-Kriteriums zielte auf die Einbindung von Stakeholdern zur Eruierung von Verständnis und Bewertung der Gravitationszahl-Methode sowie der Berechnungs- und Simulationsergebnisse. Als Beteiligungsformat wurde das Gruppendelphi ausgewählt. Der Gruppendelphi-Workshop zur Gravitationszahl fand am 28. November 2012 mit 14 Teilnehmern statt. Vertreten waren Unternehmen der Energiewirtschaft und Geotechnik, Bundes- und Landesbehörden sowie (außer-)universitäre Einrichtungen der Geowissenschaften und Wasserforschung.
- **Stakeholder-Interviews:** Die Integration von Stakeholdern in den Szenarienerstellungsprozess zur Analyse der Solemigration geschah im ersten Schritt in der Form von offenen, leitfaden-gestützten Interviews, in denen diejenigen Strukturen und Mechanismen des CO<sub>2</sub>-induzierten Salzwasseraufstiegs thematisiert wurden, die für die Befragten die höchste Priorität hatten. Insgesamt wurden im Frühjahr und Sommer 2013 zehn Vor-Ort-Gespräche mit Behörden- und Unternehmensvertretern, Geowissenschaftlern und unabhängigen Sachverständigen geführt.
- **Stakeholder-Workshop:** Als weiterer Schritt der Integration von Stakeholdern in die Modellierung und Szenarienbildung zur Solemigration wurde am 19. September 2014 der Workshop „Zu Risiken und Nebenwirkungen der Salzwasserverdrängung: Partizipative Modellierung im Rahmen des CO2BRIM -Projekts“ veranstaltet. Über den Workshop wurde von einem teilnehmenden Journalisten ein ausführlicher Bericht in der Süddeutschen Zeitung am 13. Oktober 2014 veröffentlicht.

Darüber hinaus wurden Erfahrungen mit dem Geotechnologien Projekt BRINE ausgetauscht, welches schon 2010 startete. Hierzu gab es ein gemeinsames Treffen im Februar 2013, bei dem der aktuelle Stand der Ergebnisse des BRINE-Projekts diskutiert wurde. Durch CO<sub>2</sub>-Speicherung verursachte Solemigration entlang von Störungszonen wurde bereits vom BRINE-Projekt untersucht. Daher wurde in CO2BRIM beschlossen, den Fokus der Solemigrationsszenarien auf Migration entlang einer Salzstockflanke zu lenken. Salzstöcke sind exemplarisch für die Geologie des Norddeutschen Beckens und ihr Einfluss auf die Speicherung von CO<sub>2</sub> bis jetzt weitgehend unerforscht.

## Teil II

# Eingehende Darstellung

### II.1 Durchgeführte Arbeiten und wesentliche Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die folgende Sektion ist in zwei Teile gegliedert, nach den zwei wesentlichen im Projekt bearbeiteten technischen Aspekten: Gravitationszahl-Screening und Solemigrationsszenarien. Für jedes der Themen werden die Arbeiten aller Teilprojekte beschrieben.

#### II.1.1 Die Gravitationszahl als qualitativer Screening-Indikator für Speichereffizienz

Die Gravitationszahl (Gr-Zahl) beschreibt das Verhältnis von viskosen Kräften zu Auftriebskräften während der Ausbreitung von CO<sub>2</sub> im Reservoir und kann somit als Indikator für die Speichereffizienz herangezogen werden. Nachfolgend wird ein Überblick über den theoretischen Hintergrund der Gr-Zahl und die Datenverfügbarkeit im Norddeutschen Becken gegeben. Die Ergebnisse der Studie werden anschließend kurz dargestellt. Dabei wird erläutert, wie sich der partizipative Modellierungsansatz im Rahmen eines Gruppendelphi ausgewirkt hat. Ausführliche Erklärungen hierzu beinhalten Kissinger et al. (2014) und Scheer et al. (2015).

##### II.1.1.1 Hintergrund zur Gr-Zahl

Die folgende Definition der Gr-Zahl wird hier verwendet:

$$Gr = \frac{(\varrho_B - \varrho_{CO_2})gk}{\mu_{CO_2} \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\varrho_{CO_2}}} = \frac{\text{Auftriebskräfte}}{\text{Advektive Kräfte}} \quad (\text{II.1})$$

$\varrho_B$  ist die Dichte des Salzwassers in [kg/m<sup>3</sup>],  $\varrho_{CO_2}$  ist die Dichte des CO<sub>2</sub> in [kg/m<sup>3</sup>],  $k$  ist hier die skalare Permeabilität in [m<sup>2</sup>],  $g$  ist die Gravitationsbeschleunigung in [m/s<sup>2</sup>],  $\mu_{CO_2}$  ist die dynamische Viskosität von CO<sub>2</sub> in [Pa s] und  $\dot{m}_{CO_2}$  ist die spezifische Masseninjektionsrate von CO<sub>2</sub> in [kg/s/m<sup>2</sup>]. In der Literatur finden sich viele unterschiedliche Definitionen der Gr-Zahl, die hier verwendete Definition ist angelehnt an die Definition in Kopp et al. (2009b). Eine

ausführlichere Diskussion zu der Thematik findet sich in Kissinger et al. (2014). Der Dichteunterschied ist die treibende Kraft für den vertikalen CO<sub>2</sub>-Fluss. Je größer die Auftriebskräfte in Bezug zur horizontalen CO<sub>2</sub>-Ausbreitung (advective oder viskose Kräfte) sind, desto mehr dominiert die dichtebedingte Auftrennung die Ausbreitung des CO<sub>2</sub> im Reservoir und das leichtere CO<sub>2</sub> sammelt sich im Reservoir unter der Barrierschicht. Mit steigender Distanz vom Injektionsbrunnen (Annahme hier: Ein vertikaler Injektionsbrunnen) dominieren die Auftriebskräfte gegenüber den advektiven Kräften. Eine frühzeitige Auftrennung, also in Nähe des Injektionsbrunnens, verhindert eine effiziente Nutzung des verfügbaren Porenraumes. Kleine Gr-Zahlen, bei denen die Advektionskraft größer ist und die Auftrennung der Phasen somit erst bei einer größeren Distanz vom Injektionsbrunnen einsetzt, sind also von Vorteil für die Speichereffizienz.

Bei der praktischen Anwendung stellt sich folgende Frage: Welche Faktoren beeinflussen die Gr-Zahl maßgeblich und wie groß ist die Spannbreite der Gr-Zahlen innerhalb eines Untersuchungsgebietes für ein Speicherprojekt (der Fokus liegt hier auf dem Speicherkomplex des Mittleren Buntsandstein im Norddeutschen Becken). Tatsächlich hängen die Fluideigenschaften Dichte und Viskosität von den lokalen thermodynamischen Bedingungen, d.h. von Druck und Temperatur und der Salinität ab. Die Tiefe der Formation, der geothermische Gradient und die Salinitätsverteilung sind also relevante Eingangsparameter für die Abschätzung der Gr-Zahl. Des Weiteren taucht die Permeabilität in der Definition der Gr-Zahl auf. Allerdings sind für das Norddeutsche Becken keine regionalisierten Daten zur Permeabilität vorhanden/verfügbar. Aus diesem Grund beschränkt sich diese Studie auf die Einflüsse von Tiefe, geothermischem Gradienten und Salinität auf die Gr-Zahl. Die so erstellte regionale Gr-Verteilung kann als Indikator für die Speichereffizienz mit Bezug zu den initialen Fluideigenschaften interpretiert werden.

### **II.1.1.2 Zusammenstellung von Daten für die Gr-Zahl Berechnung**

In Absprache mit den Projektpartnern wurde vereinbart, die Gr-Zahl für die im Projekt Speicher-Kataster Deutschland (Müller und Reinhold, 2011) ausgewiesenen untersuchungswürdigen Gebiete des Speicherkomplexes Mittlerer Buntsandstein im Norddeutschen Becken zu berechnen. Über die Verbreitung der untersuchungswürdigen Gebiete war für jeden Quadratkilometer die entsprechende Gr-Zahl zu berechnen und in ArcGIS in Form eines Rasters (Zellengröße jeweils 1 x 1 km) darzustellen.

Für die Berechnung der Gr-Zahl waren von Seiten der BGR für jede Rasterzelle folgende Informationen, bezogen auf das Top des Speicherkomplexes Mittlerer Buntsandstein, zusammenzustellen: Die Permeabilität des Speichergesteins, die Tiefe, die Temperatur sowie die Salinität des Formationswassers.

Aufgrund geringer und heterogener Datendichte konnten die Werte für den Parameter Permeabilität nicht flächendeckend zusammengestellt werden. Die Suche nach Angaben zum Speicherparameter Permeabilität in zahlreichen Literaturquellen zeigte, dass Quantität und Verteilung von Permeabilitätsdaten eine Aufbereitung für flächendeckende Rasterzellen über das gesamte Gebiet des Norddeutschen Beckens nicht erlauben. Die Berechnung der Gr-Zahl erfolgte deshalb unter der Annahme einer konstanten Permeabilität.

Um die Tiefe am Top des Mittleren Buntsandstein zu erhalten, wurde ein Tiefenraster verwendet, das die Basisfläche des Oberen Buntsandstein für das Gebiet des Südlichen Permbeckes darstellt (siehe Abb. II.1). Das verwendete Raster ist Teil eines Arbeitsdatensatzes, der an der BGR im Verlauf der Arbeiten für das Projekt "Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area" (Doornenbal und Stevenson, 2010) erstellt wurde. Nach Anpassung der Zellengröße des verwendeten Rasters auf die gewünschte Größe (1 x 1 km) konnte die Tiefe (in Meter, bezogen auf NN) am Top des Speicherkomplexes für jede Rasterzelle direkt übernommen werden. Um die erforderlichen Temperaturinformationen zu erhalten, diente eine vom Leibniz-

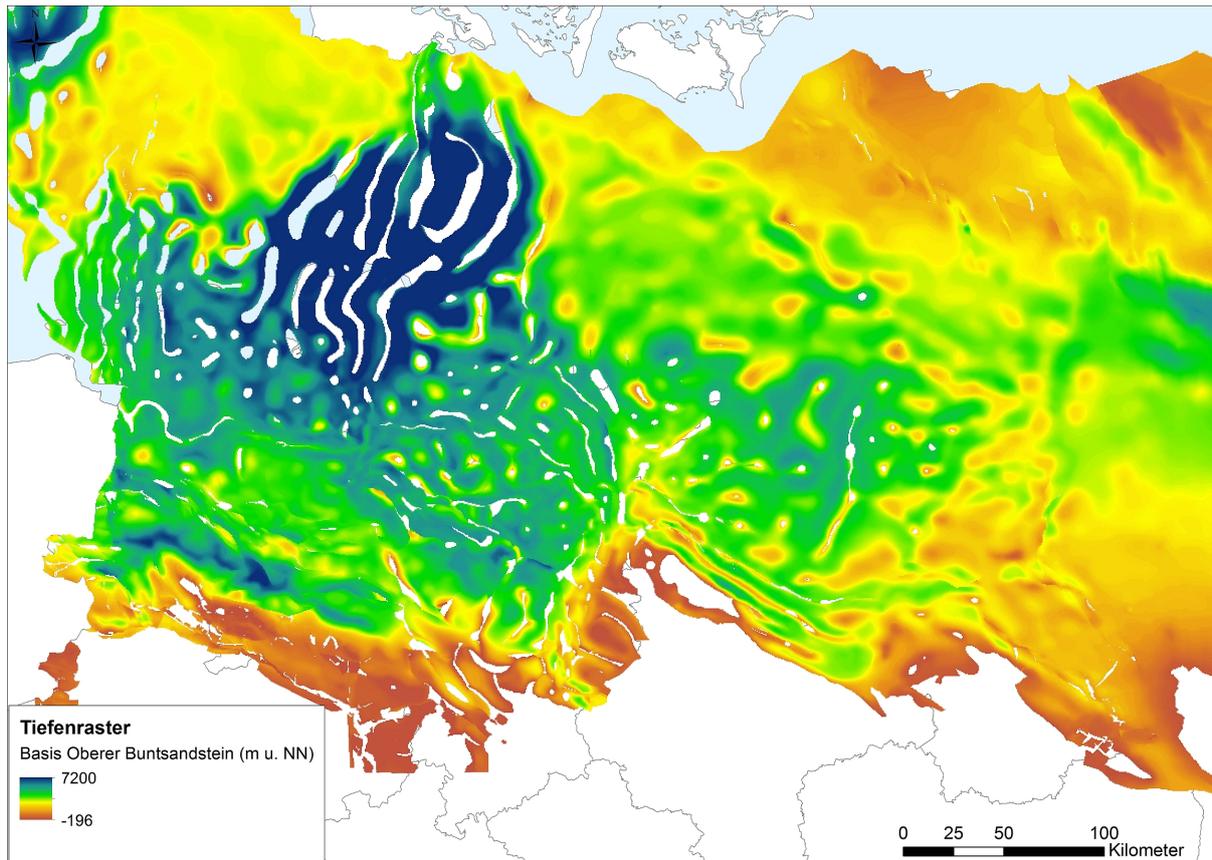


Abbildung II.1: Das verwendete Tiefenraster der Basisfläche des Oberen Buntsandstein. Modifiziert nach Kissinger et al. (2014).

Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) veröffentlichte Deutschlandkarte des geothermischen Gradienten (LIAG, 2012) als Datengrundlage. In dieser grobskaligen Karte ist die regionale Verteilung des mittleren Tiefentemperaturgradienten für ausgewählte Regionen in Deutschland dargestellt, darunter auch das Norddeutsche Becken. Basierend auf dieser digitalen Karte wurde ein ArcGIS-Raster (Zellengröße 1 x 1 km) interpoliert, das für jede Rasterzelle den Wert des interpolierten mittleren Tiefentemperaturgradienten enthält (Abb. II.2). Unter Einbeziehung des für jede Rasterzelle bereits vorliegenden Tiefenwertes wurde dann die tiefenabhängige Temperatur für jede Zelle berechnet.

Da keine Angaben über die regionale Verteilung des Salinitätsgradienten der Buntsandstein-

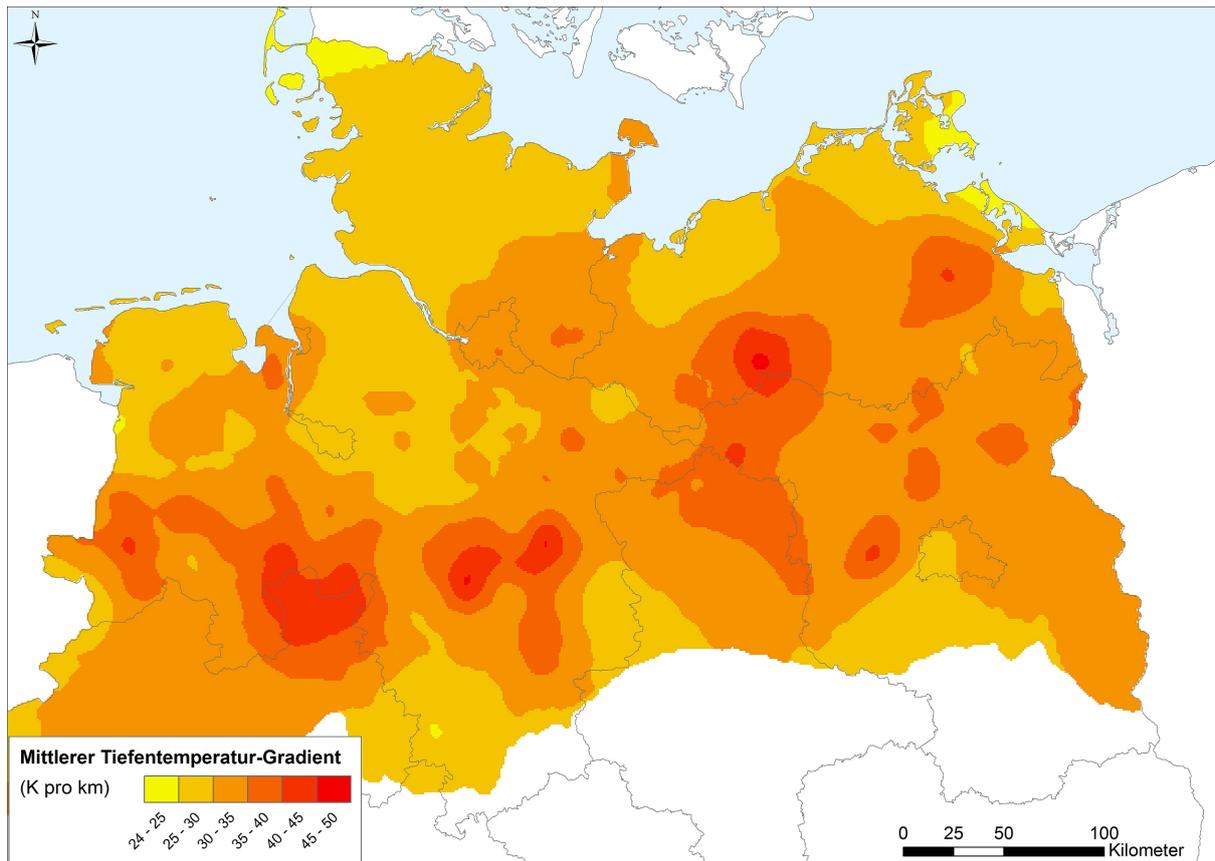


Abbildung II.2: Das interpolierte ArcGIS-Raster des mittleren geothermischen Gradienten im Norddeutschen Becken (auf Basis von LIAG (2012)). Modifiziert nach Kissinger et al. (2014).

Formationswässer im Norddeutsche Becken vorlagen, wurde über das gesamte Arbeitsgebiet nach Wolfgramm und Seibt (2008) ein konstanter Wert von 15 g/l pro 100 m für den Salinitätsgradienten angenommen. Unter Einbeziehung des für jede Rasterzelle vorliegenden Tiefenwertes wurde dann die tiefenabhängige Salinität für jede Zelle berechnet.

Basierend auf den von der BGR zusammengestellten Daten (Tiefe, Temperatur und Salzkonzentration) wurde schließlich die Gr-Zahl vom LH2 nach Gl. II.1 für jede Rasterzelle berechnet. Aus dem Tiefenwert jeder Rasterzelle wurde der Druck unter Annahme hydrostatischer Bedingungen berechnet. Die für die Berechnung der Dichte und der dynamischen Viskosität verwendeten Zustandsgleichungen sind in Tb. II.1 gegeben. Die regionale Verteilung der Gr-Zahl für die untersuchungswürdigen Gebiete des Speicherkomplexes Mittlerer Buntsandstein ist in Abb. II.3 dargestellt. An dieser Stelle soll noch einmal betont werden, dass die Variabilität der Permeabilität nicht berücksichtigt wird. Weiterhin wird eine konstante spezifische Injektionsrate angenommen (siehe Gl. II.1). Die Werte von Permeabilität und Injektionsrate wurden auf 1 festgelegt.

Die Werte der Gr-Zahl variieren insgesamt von ca.  $4 \cdot 10^{10}$  bis ca.  $10 \cdot 10^{10}$ . Abbildung II.3 zeigt die Einteilung der Gr-Zahlen in 6 Werteklassen. Gebiete mit geringen Gr-Zahlen (ca.  $4 - 5 \cdot 10^{10}$ ) sind ein Indikator für eine relativ hohe Speichereffizienz und sind in der Abbil-

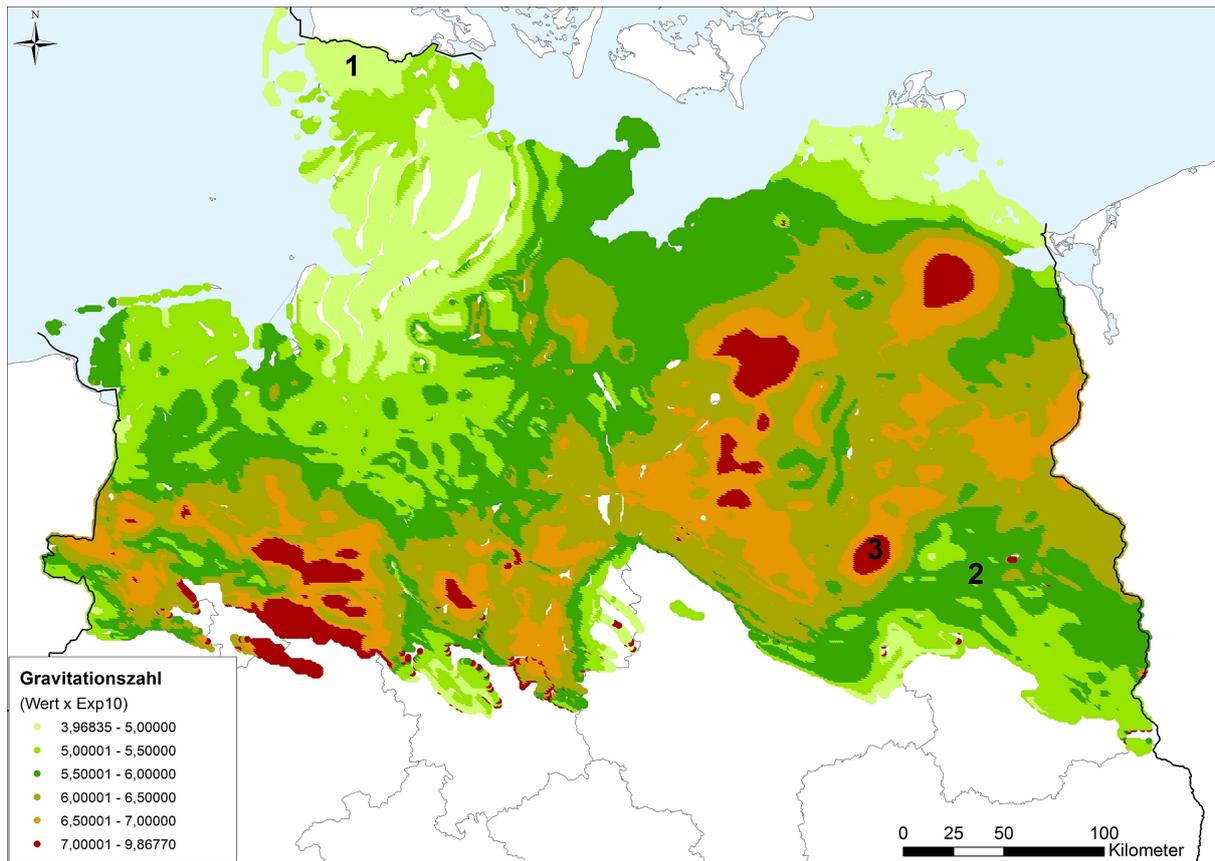


Abbildung II.3: GIS-Raster mit den berechneten Gr-Zahlen für die untersuchungswürdigen Gebiete des Speicherkomplexes Mittlerer Buntsandstein (Zellengröße 1 x 1 km; 106.763 Zellen). Die Zahlen kennzeichnen die drei ausgewählten Gebiete für die Prinzip-Simulationen. Modifiziert nach Kissinger et al. (2014).

hellgrün dargestellt. Gebiete mit hohen Gr-Zahlen von  $> 7 \cdot 10^{10}$  sind ein Indikator für eine relativ geringe Speichereffizienz und sind in der Abbildung rot dargestellt.

### II.1.1.3 Ausführung numerischer Simulationen zur Überprüfung der Relevanz der Gr-Zahl als Screening Indikator

Die Gr-Zahl-Verteilung in Abb. II.3 gibt bloße Zahlenwerte für die Gr-Zahl an, ohne diese in Relation mit realistischen Werten für die Speichereffizienz zu setzen. Aus diesem Grund wurde im Folgendem mittels numerischer Simulationen geprüft,

- ob es eine Tendenz zu größerer Speichereffizienz bei kleiner Gr-Zahl gibt,
- ob es eine Tendenz zu einem größeren Anteil an residual eingeschlossenem  $\text{CO}_2$  bei kleiner Gr-Zahl gibt und
- wie sich Änderungen der Gr-Zahl im Vergleich zu Änderungen in Porosität und Nettomächtigkeit auf die Speichereffizienz auswirken.

Tabelle II.1: Auflistung der Zustandsgleichungen für die Berechnung der Fluid-Eigenschaften von CO<sub>2</sub> und Salzwasser, sowie die Bandbreite der jeweiligen Werte im Mittleren Buntsandstein.

	Einheit	Funktion von ...	Referenz	Bandbreite
Dichte CO <sub>2</sub>	$kg/m^3$	$f(p, T)$	Span und Wagner (1996)	85 - 764
Dynamische Viskosität CO <sub>2</sub>	$Pa \cdot s$	$f(p, T)$	Fenghour et al. (1998)	$1.55 \cdot 10^{-5}$ - $6.59 \cdot 10^{-5}$
Dichte Salzwasser	$kg/m^3$	$f(p, T, X_{Salz})$	Batzle und Wang (1992) Adams und Bachu (2002)	1035 - 1210
Dynamische Viskosität Salzwasser	$Pa \cdot s$	$f(T, X_{Salz})$	Batzle und Wang (1992) Adams und Bachu (2002)	$2.39 \cdot 10^{-4}$ - $11.21 \cdot 10^{-4}$

Die numerischen Simulationen wurden vom LH2 mit dem Open-Source-Simulator DuMu<sup>x</sup> (Flemisch et al., 2011) durchgeführt. Es wurde ein isothermes Zwei-Phasen Modell (Salzwasser und CO<sub>2</sub>) verwendet, ohne Berücksichtigung der Lösung von CO<sub>2</sub> im Salzwasser. Als Maß für die Speichereffizienz dient hier die Masse an CO<sub>2</sub>, die in einen homogenen, radialsymmetrischen Speicher injiziert wird, bis das CO<sub>2</sub> einen sog. „Spillpoint“ erreicht (siehe Abb. II.4):

$$\text{Speichereffizienz [kg/m}^2\text{]} = \frac{\text{Masse CO}_2 \text{ im Reservoir}}{\pi \cdot (\text{Radius bis Spill Point})^2}. \quad (\text{II.2})$$

Der Spillpoint in Gl. II.2 kann als maximal zulässige Ausdehnung des CO<sub>2</sub> betrachtet werden (hier: 1 km). Die Injektionsrate ist konstant und beträgt 0.1 MT/Jahr. Der Reservoiraufbau wird dabei so einfach wie möglich gehalten. Wie in Abb. II.4 dargestellt, besteht er aus einem radialsymmetrischen Gebiet mit dem CO<sub>2</sub>-Injektionsbrunnen in der Mitte. Das Reservoir be-

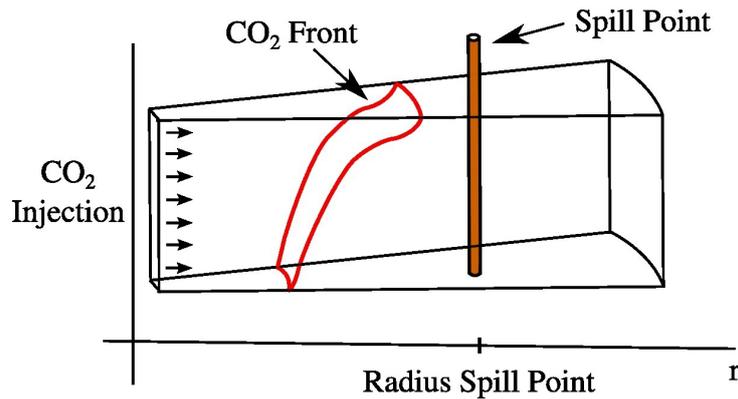


Abbildung II.4: Aufbau des radialsymmetrischen Simulationsgebiets mit Injektionsbrunnen und „Spill Point“. Abbildung aus Kissinger et al. (2014) entnommen.

sitzt eine Mächtigkeit von 25 m. Die effektive Porosität beträgt 0.2, die Permeabilität  $10^{-13}m^2$ . Detailliertere Informationen zum Reservoiraufbau können aus Kissinger et al. (2014) entnommen werden. Aus der Gr-Zahl-Verteilung wurden verschiedene repräsentative Rasterzellen für

die numerischen Simulationen ausgewählt, welche die Bandbreite der Gr-Zahlen abdecken. Sieben dieser Rasterzellen sind in Tb. II.2 aufgelistet. Die Menge an residual eingeschlossenem CO<sub>2</sub> wurde über das Modell von Land (1968) bestimmt.

Tabelle II.2: Die initialen Fluideigenschaften von sieben repräsentativen Rasterzellen aus der Gr-Zahl-Verteilung, sowie die errechnete Speichereffizienz.

	Tiefe [mbmsl]	$\varrho_B$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\varrho_{CO_2}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu_B/\mu_{CO_2}$ [-]	Gr [-] · 10 <sup>10</sup>	Speichereffizienz [kg/m <sup>2</sup> ]
1	1492	1140	757	10.4	4.44	381
2	1735	1154	668	15.2	6.01	315
3	2304	1187	611	11.8	7.19	299
4	1865	1150	521	14.5	8.05	230
5	906	1083	371	32.3	9.60	165
6	1776	1161	734	15.2	5.05	362
7	3305	1200	758	9.1	4.98	450

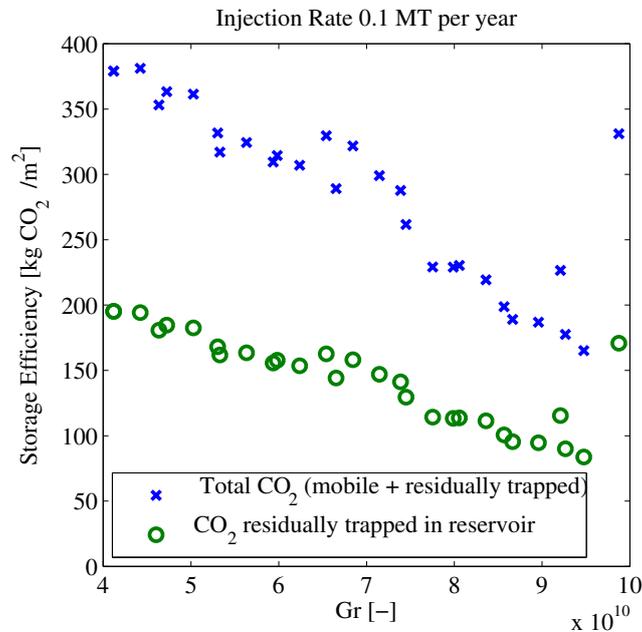


Abbildung II.5: Korrelation zwischen der Speichereffizienz und der residual eingeschlossenen CO<sub>2</sub>-Masse (in der gleichen Einheit kg/m<sup>2</sup>) mit der Gr-Zahl. Abbildung aus Kissinger et al. (2014) entnommen.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abb. II.5 dargestellt. Hier wird die Korrelation zwischen der Speichereffizienz sowie der Menge an residual eingeschlossenem CO<sub>2</sub> mit der Gr-Zahl gezeigt. Jedes Kreuz entspricht der Speichereffizienz an einer der repräsentativen Rasterzellen aus der Gr-Zahl-Verteilung. Die Menge an residual eingeschlossenem CO<sub>2</sub> (in Abb. II.5 als Kreise gekennzeichnet) zeigt, wie die Speichereffizienz, einen umgekehrt proportionalen Trend, wengleich etwas schwächer ausgeprägt. Somit kann die Tendenz zu einer größeren Speichereffizienz bzw. einem größeren Anteil an residual eingeschlossenem CO<sub>2</sub> bei kleiner Gr-Zahl durch

die Simulation bestätigt werden. Weiterhin lässt sich beobachten, dass die Änderungen in der Speichereffizienz, welche durch unterschiedliche initiale Fluideigenschaften hervorgerufen werden nicht unerheblich sind.

Wie bereits erwähnt sind die Einflüsse von veränderlicher Permeabilität, Nettomächtigkeit und Porosität hier nicht berücksichtigt. Eine Analyse zur Bedeutung und Relevanz des Gr-Zahl-Kriteriums sollte aus diesem Grund auch eine Studie zur Auswirkung eben dieser Parameter beinhalten. Dafür waren von der BGR drei Gebiete mit jeweils unterschiedlicher Gr-Zahl-Werteklasse (hohe, mittlere und niedrige Gr-Zahl) auszuwählen und zu charakterisieren. Bei der Auswahl dieser Gebiete war ein wichtiges Kriterium, dass ausreichende und frei verfügbare Informationen zu den Parametern Porosität und Nettomächtigkeit eines Speicherhorizontes bezogen auf den Speicherkomplex Mittlerer Buntsandstein vorliegen. Der Parameter Permeabilität konnte auch in dieser Analyse nicht berücksichtigt werden, da nicht genug Daten für die drei Gebiete vorhanden sind. Unter diesem Aspekt wurden, basierend auf den Gravitationszahl-Werteklassen, ein Gebiet in Schleswig-Holstein (Gebiet 1 mit niedriger Gr-Zahl) und zwei Gebiete in Brandenburg (Gebiet 2 mit mittlerer und Gebiet 3 mit hoher Gr-Zahl) ausgewählt. Die Gebiete 1 bis 3 sind durch eine unterschiedliche Flächengröße gekennzeichnet (siehe Abb. II.3). Nach einer umfassenden Literaturrecherche wurden die drei Gebiete anhand der Parameter Porosität und Nettomächtigkeit charakterisiert:

**Gebiet 1** (Gr-Werte: ca.  $4 - 5 \cdot 10^{10}$ ) umfasst eine Fläche in Schleswig-Holstein und ist Teil des Westschleswig-Blocks. Für dieses Gebiet werden in der Literatur Durchschnittswerte angegeben. Nach Röhling (1999) und Hable et al. (2011) variiert die Nettomächtigkeit des Volpriehausen-Sandstein und des Quickborn-Sandstein zwischen 6 m und 20 m, die Porositäten liegen zwischen 10,5 % und 30 %.

**Gebiet 2** (Gr-Werte:  $5.5 - 6 \cdot 10^{10}$ ) ist in Südost-Brandenburg gelegen und erstreckt sich über einen weiten Bereich von der Flechtingen-Rosslauer Scholle im Westen bis nach Osten zur Fürstenwalde-Gubener Störungszone im deutsch-polnischen Grenzgebiet. Auf Basis der vorliegenden Daten konnten Messwerte von neun Bohrungen erhoben werden (Diener et al., 1990, 1991, 1992). Danach variiert die Nettomächtigkeit des basalen Volpriehausen-Sandstein in diesem Gebiet zwischen 5 m und 20 m, die Porositäten variieren zwischen 6 % und 25 %.

**Gebiet 3** (Gr-Werte:  $> 7 \cdot 10^{10}$ ) befindet sich westlich von Berlin im Bereich der Salzstruktur Roskow-Ketzin. Nach Diener et al. (1991) beträgt die Nettomächtigkeit des basalen Volpriehausen-Sandstein 10 m, die Porositäten variieren zwischen 4 % und 8 %.

Die Parameter der drei Gebiete sind in Tb. II.3 aufgelistet.

Für alle Gebiete wurden Simulationen unter Berücksichtigung veränderlicher effektiver Porosität und Nettomächtigkeit ausgeführt. Auf diese Simulationsergebnisse wird auch im sozial-

Tabelle II.3: Charakterisierung der drei Gebiete für die Prinzip-Simulationen (die Lage der Gebiete wird in Abb. II.3 gezeigt). Für Gebiet 1 und 3 ist nur eine Bandbreite (Min/Max Wert) von Werten für die effektive Porosität und die Nettomächtigkeit gegeben. Für Gebiet 2 gibt es neun Datenpaare für effektive Porosität und Nettomächtigkeit. Die Werte für Druck, Temperatur, Salinität und Gr-Zahl sind Mittelwerte für das jeweilige Gebiet und wurden für die Simulationen als Initialbedingungen angesetzt.

	Gebiet 1	Gebiet 2	Gebiet 3
Datenart	Bandbreite	9 Datenpaare	Bandbreite
Effektive Porosität [-]	0.11 - 0.30	0.06 - 0.25	0.04 - 0.08
Nettomächtigkeit [m]	6 - 20	5 - 20	10
Gr-Zahl [-] $\cdot 10^{10}$	4.85	5.73	7.27
Druck [MPa]	21.4	18.9	19.0
Temperatur [K]	331	335	351
Salinität [ $\frac{\text{kgNaCl}}{\text{kgSole}}$ ]	0.25	0.23	0.23

wissenschaftlichen Teil (siehe II.1.1.4) eingegangen, sie werden dort als Prinzipsimulationen bezeichnet und wurden im Gruppendelphi-Workshop vorgestellt. Die Simulationsergebnisse sind in Abb. II.6 dargestellt. In der linken Graphik ist die mittlere Speichereffizienz und ihre Standardabweichung für jedes Gebiet über der mittleren Gr-Zahl des jeweiligen Gebietes aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist hier der negative Trend der Speichereffizienz bei zunehmender Gr-Zahl. Die Standardabweichungen von Gebiet 1 (kleine Gr-Zahl) und Gebiet 2 (mittlere Gr-Zahl) sind größer als die des Gebiets 3 (große Gr-Zahl). Dies liegt an der kleinen Bandbreite an Porositäten (4-8 %) und der konstanten Mächtigkeit in Gebiet 3. Die berechnete Speichereffizienz hängt nun von der Gravitationszahl und der multivariaten Verteilungsfunktionen von Porosität und Nettomächtigkeit des jeweiligen Gebietes ab. Es ist nicht eindeutig, ob die Gr-Zahl oder die unterschiedlichen gebietsspezifischen Verteilungsfunktionen von Porosität und Nettomächtigkeit den größeren Einfluss auf die Speichereffizienz ausüben. Deswegen wurden zusätzliche Simulationen mit ein und derselben Gr-Zahl für alle drei Gebiete durchgeführt. Dabei wurde die Gr-Zahl von Gebiet 2 verwendet. In der rechten Graphik von Abb. II.6 werden die Mittelwerte der Speichereffizienz für den Fall "konstante Gr-Zahl" (schwarze Linie) mit den vorherigen Simulationsergebnissen der gebietsspezifischen Gr-Zahl (rote Linie) verglichen. Diese Ergebnisse belegen, dass vor allem die unterschiedlichen effektiven Porositäten und Nettomächtigkeiten der drei Gebiete den Trend vorgeben. Er wird durch die gebietsspezifische Gravitationszahl "nur" versträkt, d.h. eine kleine Gravitationszahl führt zu größerer Speichereffizienz und eine große Gravitationszahl führt zu einer Abnahme der Speichereffizienz verglichen mit dem Fall "konstanter Gr-Zahl". In Gebiet 1 ist der Beitrag der Gravitationszahl zur Speichereffizienz deutlich größer als in Gebiet 3.

Der erwartete qualitative Einfluss des Gr-Zahl-Kriteriums auf die Speichereffizienz wird durch die Simulationsergebnisse bestätigt. Allerdings ist der Verlauf der Speichereffizienz, wie in Abb. II.6 dargestellt, hauptsächlich von der Porositäts- und Nettomächtigkeitsverteilung bestimmt. Nur zwischen den Gebieten 1 und 2 kann ein signifikanter Anteil des Anstiegs auf die

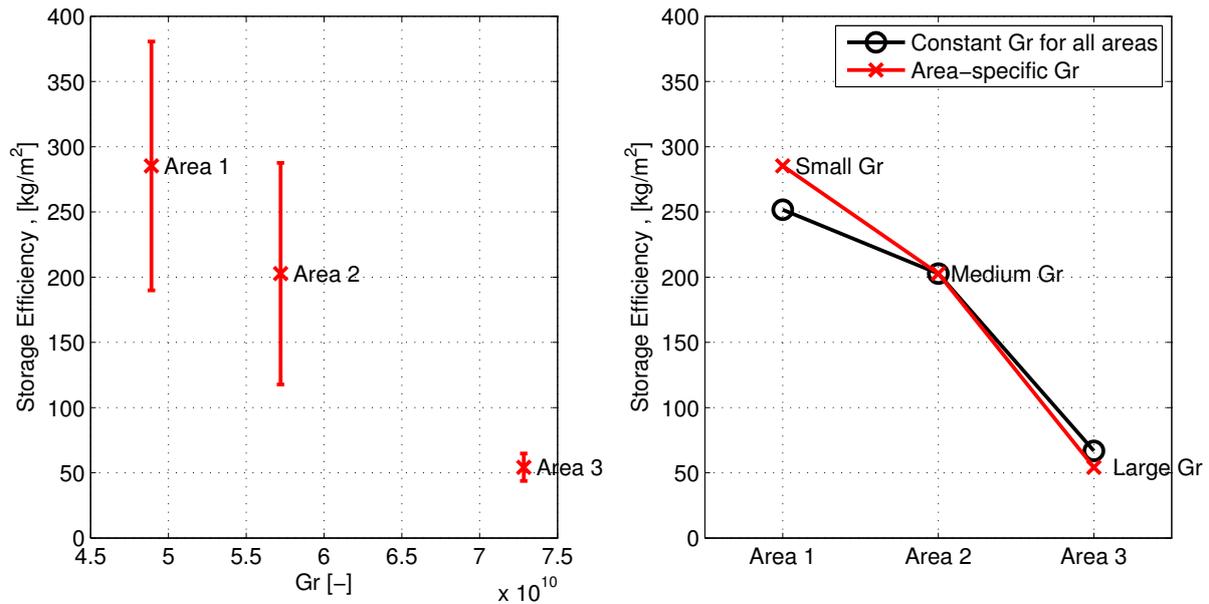


Abbildung II.6: **Links:** Die Speichereffizienz aufgetragen über der Gr-Zahl. Die roten Kreuze stellen die mittlere Speichereffizienz dar. Die Fehlerbalken die dazugehörige Standardabweichung. **Rechts:** Mittlere Speichereffizienz der drei Gebiete für den Fall “konstante Gr-Zahl” (schwarze Linie) und den Fall “gebietspezifische Gr-Zahl” (rote Linie). Die drei Mittelwerte für den Fall “gebietspezifische Gr-Zahl” in der rechten Abbildung (Kreuze) sind identisch mit den drei Mittelwerten in der linken Abbildung (Kreuze). Abbildung aus Kissinger et al. (2014) entnommen.

unterschiedlichen Gr-Zahlen in den Gebieten zurückgeführt werden.

Aus technischer Sicht lassen sich aus dieser Studie über die Gr-Zahl als Kriterium für die Speichereffizienz verschiedene Schlüsse ziehen. Tiefe, Druck und Temperatur einer geologischen Formation spielen eine wichtige Rolle. Ihr Einfluss ist jedoch im Vergleich zu den Parametern Porosität und Nettomächtigkeit untergeordnet, kann aber auch von der gleichen Größenordnung sein. Grundsätzlich lässt sich mit der Gr-Zahl darstellen, wo geeignete Fluideigenschaften für eine effiziente Nutzung des verfügbaren Porenraums vorliegen. Die numerischen Studien werden in Kissinger et al. (2014) durch einen Vergleich mit einer analytischen Abschätzung der Speichereffizienz gemäß Okwen et al. (2010) ergänzt.

#### II.1.1.4 Partizipation zur Analyse der Gravitationszahl

Der Partizipationsansatz im Kontext der Untersuchung des Gr-Kriteriums zielte auf die Einbindung von Stakeholdern zur Eruiierung von Verständnis und Bewertung der Gr-Methode sowie der Berechnungs- und Simulationsergebnisse. Als Beteiligungsformat wurde das Gruppendelphi ausgewählt. Mit diesem diskursiven Verfahren können existierende Meinungsverteilungen im Sinne von Konsens über Bereiche übereinstimmender oder abweichender Bewertungen erkennbar gemacht und die hierfür maßgeblichen inhaltlichen Begründungen erfasst werden. Der Gruppendelphi-Workshop zur Gr-Zahl fand am 28. November 2012 mit 14 Teilnehmern statt. Vertreten waren Unternehmen der Energiewirtschaft und Geotechnik, Bundes- und Landesbehörden.

den sowie (außer-)universitäre Einrichtungen der Geowissenschaften und Wasserforschung. Den Teilnehmern des Gruppendelphis wurde im Vorfeld der Veranstaltung ein elfseitiges Hintergrund- und Ergebnispapier als Informations- und Diskussionsgrundlage zur Verfügung gestellt. Nachfolgend werden die Ergebnisse des Gruppendelphi -Workshops dargestellt.

### **Verständnis Gr-Zahl**

Der erste Fragenkomplex war darauf gerichtet, inwieweit die Methode der Gravitationszahl und ihre Ergebnisse auf der Grundlage des Hintergrundpapiers von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern verstanden worden sind. Da mit einer Ausnahme alle Dimensionen über dem Mittelwert von 3,5 bewertet wurden, kann von einem guten bis sehr guten Verständnis des Gr-Ansatzes ausgegangen werden, wobei die am besten verstandenen Aspekte die „Definition der Gravitationszahl“ und die „Ergebnisse der Gravitationszahl-Berechnung“ waren (Mittelwert je 6,3). Lediglich die „Beispielhaften Ergebnisse der Prinzip -Simulationen für Gebiet 2“ konnten mit einem Mittelwert von 2,5 (1. Delphi-Runde) bzw. 3,5 (2. Delphi-Runde) nicht vollständig nachvollzogen werden.

Angesichts des weitreichenden Verständnisses des Gr-Ansatzes war in der ersten Delphi-Runde nur vereinzelt Dissens zwischen den Gruppenbewertungen festzustellen. Eine kontroverse Einschätzung zeigte sich bei den Aspekten „Bedeutung der Gravitationszahl“, „Prinzip-Simulationen zur Überprüfung der Gr-Aussagekraft“ und „Beispielhafte Ergebnisse der Prinzip-Simulationen für Gebiet 2“. Die zweite Delphi-Runde bestätigte den Dissens für die ersten beiden Aspekte, während sich für letzteren ein Konsens herausbildete mit einem leicht verbesserten Verständnis unter den einzelnen Gruppen. Mit Blick auf die „Bedeutung der Gravitationszahl“ waren die Experten im Plenum zwar der einhelligen Meinung, dass deren Informationsgehalt z.B. aufgrund fehlender Permeabilitätswerte begrenzt ist. Diese Einsicht führte jedoch zu gegensätzlichen Schlussfolgerungen: einige Teilnehmer waren der Ansicht, schlechte Informationen seien besser als gar keine Informationen, während für andere die Besorgnis um Fehlinformationen und Fehlinterpretationen bei Nicht-Experten und der allgemeinen Öffentlichkeit im Vordergrund standen. Die Kritik an den Prinzipsimulationen umfasste eine Reihe von Argumenten: unter anderem wurde bemängelt, diese seien unvollständig, ihr Zweck werde nicht deutlich oder sie fokussierten auf den Normalfall, so dass lediglich erwartbare Ergebnisse herauskommen.

### **Differenzierungskriterien untersuchungswürdiger Speicherformationen**

Beim zweiten thematischen Fragebogenschwerpunkt wurden die Teilnehmer zunächst danach gefragt, welche Kriterien sie in welcher Rangfolge zur Charakterisierung untersuchungswürdiger Gebiete für die CO<sub>2</sub>-Speicherung heranziehen würden. Im Ergebnis wiesen alle Gruppen Sicherheitskriterien die höchste Priorität zu, gefolgt von Kriterien mit Bezug zur Speicherkapazität. Die daran anschließende Frage nach dem Stellenwert des Kriteriums Speichereffizienz zeigte eindeutig, dass dieses als nachrangig zu den zuvor genannten Kriterien eingestuft wurde.

Im Plenum wurde ein Ranking von Kriterien kritisch gesehen, da es weniger um Bedeutungsunterschiede als um eine notwendige Sequenz zu testender und kontrollierender Aspek-

te gehe. Des Weiteren war die Einbeziehung von nicht-technischen Kriterien wie öffentliche Akzeptanz oder Bevölkerungsdichte Gegenstand einer kontroversen Diskussion. Befürchtungen, durch Berücksichtigung von sozialen Kriterien (bspw. der Bevölkerungsdichte) würde der CCS-Technologie von vorneherein ein riskantes Image verliehen, stand das Argument gegenüber, dass in dicht besiedelten Regionen kein CCS-Speicher genehmigt werden würde.

### **Aussagefähigkeit und Design der Methode**

Die Auswertung der acht Statements zu diesem Punkt zeigt, dass die Experten eine Kontextualisierung der Gr-Methode für notwendig und die Implementation der Prinzipsimulationen für überzeugend halten, während ihre Reichweite sowie weitgehende Schlussfolgerungen und Verallgemeinerungen als sehr kritisch betrachtet werden. So wurde im Konsens den Aussagen zugestimmt, dass zum einen auf der Gr-Zahl basierende Resultate alleine nicht aussagekräftig sind und einer Überprüfung durch Geowissenschaftler bedürfen, und zum anderen die Flächenauswahl für die Prinzipsimulationen gut begründet ist. Darüber hinaus wurde übereinstimmend festgestellt, dass Aussagen wie „Die Gr-Zahl macht wertvolle Aussagen zur Speichersicherheit“ oder „Die der Gr-Zahl und den Prinzip-Simulationen zugrunde liegenden Annahmen und Daten schränken die Aussagekraft der Ergebnisse nicht ein“ kaum haltbar sind.

Die Plenumsdiskussionen fokussierten auf kontrovers bewertete Statements. In zwei Fällen konnte der ursprüngliche Dissens auch in der zweiten Plenumsrunde nicht aufgelöst werden. Dies betraf erstens die Aussage „Die Speichereffizienz ist über die Gr-Methode sehr gut darstellbar“. Dies wurde von einer großen Mehrheit bezweifelt, während eine Gruppe die Ansicht vertrat, dass wertvolle Erkenntnisse aufgrund der präzisen Definition der Gr-Zahl zu erwarten sind. Zum anderen wurde mehrheitlich bestritten, dass die Gr-Methode generell für sämtliche geologische Rahmenbedingungen sinnvoll ist. Der Versuch einiger Teilnehmer, diese Behauptung durch die Einschränkung „von Fall zu Fall“ (statt „generell“) zustimmungsfähig zu machen, fand keine weitreichende Unterstützung. Das beide Gesprächsrunden dominierende Thema war allerdings eindeutig die Frage nach der Rolle des Faktors Permeabilität. Hier standen sich zwei Meinungen gegenüber: drei Gruppen argumentierten, dass der Gr-Zahl ohne Permeabilitätswerte keinerlei erkenntnisfördernde Bedeutung zukommen würde, während eine Gruppe die Position vertrat, dass in frühen Projektphasen, wenn diese Daten noch nicht verfügbar sind, die Gr-Methode trotz dieser Schwäche sinnvoll sei. Auch wenn diese unterschiedlichen Perspektiven letztlich in der Diskussion nicht aufgehoben werden konnten, bildete sich in der zweiten Fragebogenrunde dennoch ein Konsens zur Zurückweisung der folgenden Aussage heraus: „Die Permeabilität wurde nicht berücksichtigt, obwohl sie direkt in die Gr-Zahl eigentlich eingeht – die Aussagekraft der Gr-Zahl ist dennoch gut“.

### **Abschließende Bewertungen**

Bei der abschließenden Bewertung sollten die Teilnehmer die wichtigsten Vor- und Nachteile der Gr-Methode benennen. Mit Blick auf die Vorteile wurden die Aspekte Vergleichbarkeit sowie schnelle und einfache Anwendbarkeit hervorgehoben. Der Vorteil der Einfachheit wurde von

einigen allerdings auch als wesentliches Defizit gesehen: aufgrund des Fehlens wichtiger Kriterien bzw. der Verkürzung komplexer Zusammenhänge vereinfache die Gr-Methode zu stark. Des Weiteren sollten die Teilnehmer dazu Stellung nehmen, ob die Gr-Zahl aussagekräftig genug ist, um als weiteres Differenzierungskriterium im Speicher-Kataster veröffentlicht zu werden. Wenig überraschend angesichts der bisherigen Bewertungen wurde dies einheitlich – zumindest in der zweiten Delphi-Runde – abgelehnt. Die finale Frage war schließlich darauf fokussiert, inwieweit die Speichereffizienz an weitere Kriterien gebunden werden kann, die zusammen mit der Gr-Zahl (noch) mehr Aussagekraft haben. Die hierzu gemachten Vorschläge reichen von der Berücksichtigung der Struktur und der Abdichtung über Permeabilität und Transmissivität bis hin zu Porosität und Mächtigkeit.

### **Re-Design und Neubewertung der Gr-Methode aufgrund von Stakeholder-Urteilen**

Die frühe Integration von Expertenbewertungen und -wissen ist noch nicht sehr verbreitet in den Geowissenschaften und der Modellierung geologischer Systeme. Auch die CO2BRIM-Wissenschaftler hatten bislang keine Erfahrungen mit der Methode des Gruppendelphis. Vor diesem Hintergrund war es wichtig, zunächst ihre allgemeinen Eindrücke zu diesem Partizipationsansatz und der Diskursqualität zu eruieren.

Die CO2BRIM-Wissenschaftler äußerten sich positiv über die breite Palette von Kompetenzen der beteiligten Stakeholder, die ein breites Spektrum von verschiedenen Expertensichten, -meinungen und -urteile zu Tage gebracht habe. Darüber hinaus betonten sie den Umstand, dass das Gruppendelphi-Format die Teilnehmer dazu ermutigte, sich ernsthaft mit dem Gr-Ansatz auseinanderzusetzen. Jenseits konstruktiver Kritik zu Einzelaspekten hätten die Experten generell das Potential der Gr-Zahl anerkannt, als zusätzliches frühes Screening-Kriterium für mögliche CO<sub>2</sub>-Speicherreservoirs zu dienen. Insgesamt kamen die Entwickler der Gr-Methode zu dem Schluss, dass ein Gruppendelphi ein wertvolles Instrument zur Überprüfung des Mehrwerts neuer methodischer Konzepte sein kann.

In Bezug auf Nachteile kritisierten die CO2BRIM-Wissenschaftler erstens, dass individuelle Überzeugungen einzelner Teilnehmer gelegentlich die Meinungsbildung der Gruppe stark beeinflusst hätten. Es sei nicht immer klar gewesen, wie individuelle Meinungen und Bewertungen unter den Teilnehmern verteilt gewesen seien. Zweitens habe die Diskussion in der Gruppe nur selten die wissenschaftlichen Details, die zugrundeliegende Theorie sowie wesentliche Annahmen des Gr-Ansatzes aufgegriffen. Die Methodenentwickler folgerten daraus, dass die große Mehrheit der Teilnehmer nicht in vollem Umfang alle Details des Screening-Tools verstanden habe. Vor diesem Hintergrund sei es keine Überraschung gewesen, dass die Diskussion sich oft von der Bewertung der Methode abwandte, um stattdessen den praktischen Nutzen der Gr-Zahl zu beleuchten. Letztlich seien in den Diskussionen die wissenschaftlich-analytischen Aspekte nicht klar von den politisch-praktischen Dimensionen des Gr-Ansatzes getrennt worden.

Trotz dieser Kritik an Dynamik und Inhalt der Gruppendelphi-Gespräche erachteten die CO2BRIM-Wissenschaftler den Input der Stakeholder als so wertvoll, dass sie sich zu beträchtlichen Anpassungen der Gr-Methode veranlasst sahen. Eine Modifikation betrifft die Gr-Zahl

und ihre Implikationen für die Speichersicherheit. Der Gr-Ansatz bietet Wissen und substantielle Evidenz zur Speichereffizienz. Aus der Perspektive der Methodenentwickler ist die Gr-Zahl gleichzeitig dazu in der Lage, Aussagen zur Speichersicherheit zu machen. Nach ihrer Überzeugung weisen niedrige Gr-Zahlen sowohl auf eine höhere Speichereffizienz als auch eine höhere Speichersicherheit hin. Vor dem Workshop wurde diese doppelte Bedeutung lediglich postuliert, während die Methodenentwickler nach dem Workshop Simulationen durchführten, um hierfür eindeutige Belege zu generieren, wie dies von den Workshop-Teilnehmern verlangt worden war. Die Simulationsergebnisse indizieren für geringe Gr-Zahlen höhere Mengen residual gefangenes CO<sub>2</sub>, d.h. das CO<sub>2</sub> ist in den Gesteinsporen gefangen und kann nicht aus dem Reservoir entweichen, was einen positiven Effekt auf die Speichersicherheit hat.

Ein weiterer Aspekt der Überprüfung der Gr-Zahl betrifft die Spezifikation der Begrenzungen der Methode mit Blick auf den Parameter Tiefe. Der klare Zusammenhang von niedrigen Gr-Zahlen mit hoher Speichereffizienz gilt nicht für alle Tiefen im Untersuchungsgebiet. Solche Trendabweichungen wurden zunächst nur für den Fall geringer Tiefen mit Reservoirbedingungen nahe des kritischen Punktes von CO<sub>2</sub> demonstriert. Angesichts des Stakeholder-Feedbacks unternahmen die Methodenentwickler zusätzliche Simulationen, um den Tiefenbereich genauer zu lokalisieren, für den der oben genannte Trend gültig ist. Die Simulationsergebnisse bestätigten günstige Reservoirbedingungen, die zu höheren Speichereffizienzen führen, für Schichten tiefer als 2.000 m.

Wesentliche Teile der Workshop-Diskussionen waren dem Thema der Datenunsicherheit und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Gültigkeit und Zuverlässigkeit des Gr-Ansatzes gewidmet. Erst durch das Gruppendelphi wurde den CO<sub>2</sub>BRIM-Wissenschaftlern vollständig die Notwendigkeit bewusst, im Kontext von Entscheidungen über Parameterwerte für die Gr-Berechnung ausführlich zum Problem der Datenunsicherheit Stellung zu nehmen. Zum Beispiel erlaubt die vorhandene Datengrundlage für die Berechnung des geothermischen Gradienten keine präzise Bestimmung der ortsspezifischen Reservoirtemperaturen. Das gleiche gilt für die Salzgehalte. Die Gr-Berechnungen basieren auf der Annahme, dass der Salzgehalt konstant mit der Tiefe zunimmt, da Datenquellen mit Angaben zur lateralen Variation des Salzgradienten nicht existieren. Einerseits räumten die Gr-Entwickler ein, dass die Datenunsicherheit in Bezug auf Temperatur und Salinität zu einem gewissen Grad die Gültigkeit der Gr-Zahl begrenzt. Auf der anderen Seite sind sie davon überzeugt, dass die Trends, die sie für den untersuchten Bereich festgestellt haben, eine Differenzierung der Speichereffizienz im Hinblick auf die initialen Fluideigenschaften ermöglichen. Andere Aspekte der Datenunsicherheit betreffen die Porosität und den Mangel an Permeabilitätsdaten. Von den Workshop-Teilnehmern wurde eindringlich darauf hingewiesen, dass Permeabilität ein Schlüsselfaktor in der Gr-Gleichung ist. Jedoch wird für die Gr-Berechnungen mit einem konstanten Durchlässigkeitswert gearbeitet, da empirische Daten nicht vorhanden sind. Diese konzeptionelle Entscheidung sorgte auf dem Workshop für intensive Diskussionen. Angezweifelt wurden sowohl die Aussagekraft einer auf diese Weise berechneten Gravitationszahl als auch die Aussage, regionale Permeabilitätsdaten stünden nicht flächendeckend zur Verfügung. Die CO<sub>2</sub>BRIM-Wissenschaftler nahmen dies zum Anlass zur Durchführung

weiterer Literaturrecherchen, die im Ergebnis die Aussage bestätigten, dass Permeabilitätsdaten für die Speichergesteine des Mittleren Buntsandsteins im Norddeutschen Becken nicht flächen-deckend verfügbar sind.

Schließlich schlägt sich die Diskussion der Gr-Zahl durch die Teilnehmer des Gruppendelphi nieder in einer deutlichen Neubewertung der Relevanz des Kriteriums Speichereffizienz bei der Differenzierung von Speicherregionen. Vor dem Workshop wurde die Gr-Zahl als mehr oder weniger gleichberechtigtes Screening-Kriterium betrachtet, vergleichbar z.B. mit Tiefe oder Undurchlässigkeit des Deckgebirges. Nach dem Gruppendelphi wurde diese Einschätzung revidiert und die Gr-Zahl mit dem Status eines nachrangigen Kriteriums zur weiteren Differenzierung untersuchungswürdiger Regionen versehen. Diese Bedeutungsverschiebung spiegelt den skeptischen Stakeholder-Blick auf die Aussagekraft der Gr-Zahl angesichts ernsthafter Datenunsicherheiten wider. Insgesamt wurde auf dem Workshop deutlich hervorgehoben, den Gr-Ansatz mit Vorsicht zu behandeln und die Gravitationszahl nicht als Ausschlusskriterium bei der Auswahl von Speicherstätten zu verwenden.

### **II.1.2 Die Untersuchung von Solemigrationsszenarien entlang einer Salzstockflanke durch die Injektion von CO<sub>2</sub>**

Die Injektion von CO<sub>2</sub> in den tieferen geologischen Untergrund verursacht eine Verdrängung residenter salinärer Wässer während des laufenden Injektionsprozesses. Kritische Situationen könnten entstehen, wenn im Laufe des Injektionsprozesses aus dem Speicher verdrängte salinare Formationswässer in höher gelegene Trinkwasser-Aquifere aufsteigen würden. So ein Szenario wäre in einigen Bereichen des Norddeutschen Beckens dann vorstellbar, wenn zum Beispiel salinare Formationswässer der tiefen mesozoischen Aquifere durch Fehlstellen in der Barriere des Rupelton in den Aquiferkomplex der Trinkwasserhorizonte gelangen würden. Eine Reihe von Szenarien, die die Fluidmigration über kommunizierende Migrationswege zwischen beiden Aquiferkomplexen ermöglichen, ist vorstellbar. Die Migration von Fluiden über ein System von Störungszonen in den quartären Aquifer wurde bereits durch das Geotechnologien Projekt BRINE untersucht (Kempka, 2013).

Zunehmend in Diskussion kam in den letzten Jahren die Möglichkeit der Salzwasserverdrängung entlang der Flanke von Salzdiapiren. Nach LBEG (2012) sei “der Kontaktbereich von Salzstöcken mit dem Einlagerungshorizont ebenso wie Gebirgsstörungen als mögliche Schwäche-zonen im Deckgebirge zu unterstellen”. Salzdiapire sind über weite Bereiche des Norddeutschen Beckens verteilt und können lokal die Barriere des Rupelton durchbrochen haben. Der Fokus des Projektes CO2BRIM ist deshalb auf mögliche permeable Bereiche in der Nähe von Diapiren gerichtet. Schwerpunktmäßig sollte im Projekt die Druckentwicklung innerhalb des Speichers und in der Umgebung simuliert werden, um abschätzen zu können unter welchen Bedingungen die ermittelten hydraulischen Drücke und Wasserbewegungen zu einem Aufstieg von Formationswässern an Schwäche-zonen, wie z. B. im Bereich der Flanken von Salzdiapiren, und damit in Trinkwasserbereiche führen könnte. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, mussten sowohl das geologische Modell als auch die zu wählenden Speicherszenarien eine Berechnung der

Solemigrationsszenarien ermöglichen.

### II.1.2.1 Geologie und geologisches Modell

Als Datenbasis für die Konstruktion des geologischen 3D-Modells dienten Horizontflächen bereits existierender 3D-Modelle einer Region im Süden des zentralen deutschen Nordsee-Sektors (Bombien et al., 2012; Asprion et al., 2013; Kaufmann et al., 2014; Wolf et al., 2014). Der tiefere Untergrund dieser Region ist charakterisiert durch eine Antiklinalstruktur oberhalb eines Salzkissens (Perm, Zechsteinsalz), bestehend aus überlagernden Sedimenten des Mesozoikum und Känozoikum. Diese strukturelle Konfiguration zwischen Salzkissen und überlagerndem Deckgebirge ist typisch für große Bereiche im Norddeutschen Becken. Die Antiklinalstruktur über dem Salzkissen im Modellgebiet geht mit leichtem Einfallen in eine strukturelle Senke (Synklinale) über, die begrenzt wird durch einen langgestreckten steil ansteigenden Salzwall (Diapir).

Die für den Bau des geologischen Modells genutzten Daten stammen zum größten Teil aus dem Datensatz des GTA 3D (Geotektonischer Atlas 3D, Bombien et al. (2012)). Von diesen Daten wurden folgende Horizontflächen für den Bau des geologischen Modells von der Basis bis zur Obergrenze genutzt: die Tiefenlage der Basis des Zechstein, die Tiefenlage des Top des Zechstein, die Tiefenlage der Basis des Oberen Buntsandstein, die Tiefenlage der Basis des Oberpaläozän und die Tiefenlage der Basis des Oligozän (Abb. II.7). Diese fünf Horizontflächen wurden ergänzt durch die Horizontflächen der Basis des Mittleren Buntsandstein (Kaufmann et al., 2014), des Top des Buntsandstein (Wolf et al., 2014) und der Basis des Quartär (Asprion et al., 2013). Die Tiefenlinien dieser drei Horizontflächen wurden im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes „Geopotential Deutsche Nordsee“ (GPDN) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), des niedersächsischen Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) konstruiert.

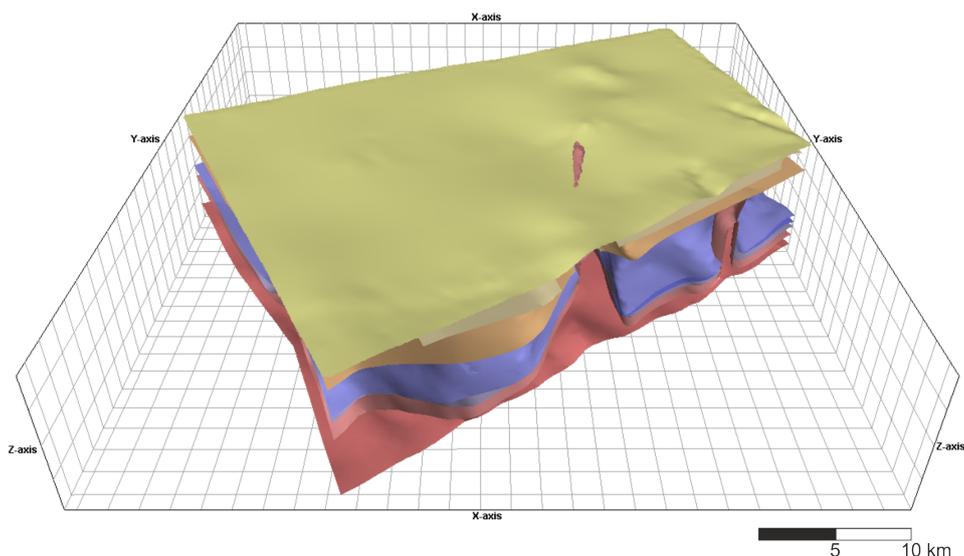


Abbildung II.7: Visualisierte Datenbasis der Horizontflächen für den Bau des geologischen Modells. Vertikale Überhöhung 3 : 1.

Die Horizontflächen wurden in Petrel 2012.1 (Schlumberger Information Solutions®) importiert und zu konsistenten Horizontflächen interpoliert. Um in den Solemigrationszenarien die Auswirkungen des Druckaufbaus im Speicher und einer damit verbundenen möglichen Fluidverdrängung bis in den oberflächennahen Bereich bewerten zu können, wurden zusätzlich virtuelle Horizontflächen typischer geologischer Schichten des mesozoischen und känozoischen Deckgebirges des Norddeutschen Beckens im geologischen Modell eingefügt und Horizontflächen teilweise modifiziert. Diese Modellmodifikationen betreffen hauptsächlich den Mittleren Buntsandstein und das Tertiär. So entspricht der für den Mittleren Buntsandstein modellierte Speicherhorizont dem Solling-Sandstein, der im Norddeutschen Becken lokal gute Speichergesteinseigenschaften aufweist und für das Modell im Bereich der Antiklinalstruktur als Injektionshorizont dienen soll (Abb. II.8).

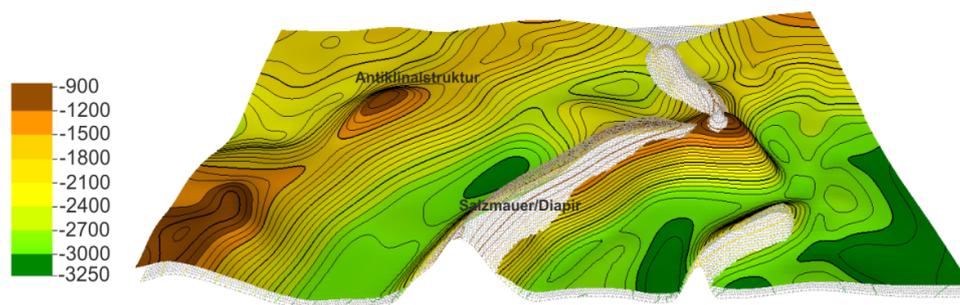


Abbildung II.8: Horizontfläche des Top des Speicherhorizontes Solling. Die Oberfläche des Top Zechsteinsalz ist als Gitter visualisiert. Vertikale Überhöhung 2 : 1.

Für das Tertiär wurde zur Tiefenlage der Basis des Rupelton, die hier mit der Basis des Oligozän gleichgesetzt wurde, eine virtuelle Rupeloberfläche in das Modell eingefügt. Beide Flächen wurden so modifiziert, dass der Diapir und die seitlich am Diapir anliegenden Deckschichten oberhalb des Buntsandstein die Rupelbarriere durchstoßen (Rupelfehlstelle). Eine weitere Diskontinuität in der Rupelbarriere wurde oberhalb der Antiklinalstruktur im Nahfeld der fiktiven CO<sub>2</sub>-Injektionsstelle geschaffen, sodass auch hier eine hydraulische Verbindung zwischen den tiefen mesozoischen Aquiferen und den höher gelegenen Trinkwasser-Aquiferen für die Simulation von Solemigrationszenarien besteht. Um den Grundwasserfluss in flachen känozoischen Aquiferen des Norddeutschen Beckens simulieren zu können, wurde ein Datensatz aus Grundwasserisohypsen (Linien gleicher hydraulischer Druckhöhe) des oberen genutzt Grundwasserleiters eines Gebietes in Brandenburg genutzt (LUGV, 2011). Dieser Datensatz aus Grundwasserisohypsen bildet den oberen Abschluss im Horizontmodell. Für die Konstruktion des geologischen 3D Modells standen nach den erfolgten Modifikationen und Flächenintegrationen von der Modellbasis bis zur Oberfläche insgesamt 12 Horizontflächen zur Verfügung: Basis des Zechstein, Top des Zechstein, Basis des Mittleren Buntsandstein, Basis des Solling-Sandstein, Top des Solling-Sandstein, Top des Mittleren Buntsandstein, Top des Buntsandstein, Basis des Paläozän, Basis des Rupelton, Top des Rupelton, Basis des Quartär und die Grundwasserisolinien des obersten Grundwasserleiters.

Die interpolierten Horizontflächen wurden in Petrel in ein 3D geologisches Modell überführt.

Aufgrund der Flächenintegrationen und -modifikationen repräsentiert das geologische Modell keinen realen Standort, gibt aber eine realistische räumliche Konfiguration, wie sie in einigen Bereichen des Norddeutschen Beckens typisch ist, wieder.

Das finale 3D geologische Modell umfasst ein Gebiet von 58 km x 39 km mit einer horizontalen Gitterauflösung von 300 m. Die vertikale Auflösung im Modellgitter entspricht der Mächtigkeit der 11 im Modell aufgelösten geologischen Horizonte. Das sind von oben nach unten im Modell: Das Quartär, die tertiären Horizonte des Post-Rupelium, des Rupelton und des Prä-Rupelium, die Kreide, der Obere Buntsandstein, die Wechselfolgen des Mittleren Buntsandstein oberhalb vom Speicherhorizont, der Solling-Sandstein des Mittleren Buntsandstein (Speicherhorizont), die Wechselfolgen des unteren Mittleren Buntsandstein, der Untere Buntsandstein und der Zechstein.

Die Basis des Zechstein verläuft im geologischen Modell vergleichsweise flach und variiert in Tiefen zwischen 3300 m und 4000 m. Im Gegensatz dazu ist die Tiefenlage der Zechsteinoberfläche stark differenziert (Abb. II.9). Diese strukturelle Situation beeinflusst die überlagernden mesozoischen und känozoischen Horizonte und ist wichtig für die Temperatur- und Druckbedingungen im Speicherhorizont Solling-Sandstein.

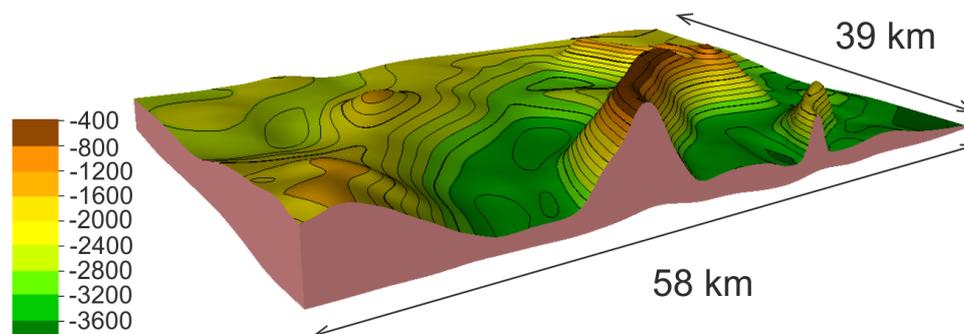


Abbildung II.9: 3D Visualisierung des Zechsteinsalzkörpers mit Blick auf die Oberfläche des Zechsteinsalz. Vertikale Überhöhung 2 : 1.

Für die numerischen Fluidmigrationsszenarien wurde basierend auf dem 3D geologischen Modell ein dreidimensionales Volumengitter entwickelt. Um die Geometrien der einzelnen Horizonte abzubilden und gleichzeitig eine adäquate Rechenleistung in den Simulationen zu gewährleisten, wurde eine horizontale Auflösung des Modellvolumengitters von 300 x 300 m für das Modell gewählt. Da die Horizonte sehr unterschiedliche Mächtigkeiten aufweisen, wurde das Volumengitter in der Vertikalen durch das Einfügen von zusätzlichen Horizonten in jedem geologischen Horizont feiner unterteilt (Abb. II.10).

Jedem geologischen Horizont wurden in Abhängigkeit von seiner lithologischen Zusammensetzung geophysikalische Parameter zugewiesen (siehe Tb. II.4). Die lithologischen Zusammensetzungen und die korrespondierenden geophysikalischen Parameter wurden von Daten aus regionalgeologischer Literatur abgeleitet und wurden zum Teil schon in numerischen Simulationsstudien getestet (Larue, 2010; Reutter, 2011; Schäfer et al., 2011; Noack et al., 2013). Tabelle II.4 zeigt die Hauptlithologien, die durchschnittlichen Mächtigkeiten, Porositäten und Permeabilitäten der geologischen Horizonte und der Störungszone (Salzdiapir-Flanke) im Modell.

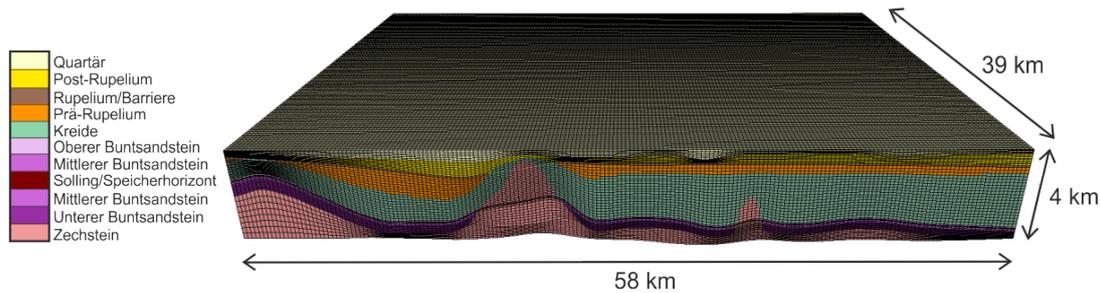


Abbildung II.10: 3D Visualisierung des Volumengitters des geologischen Modells. Vertikale Überhöhung 2 : 1.

Die Mächtigkeit des Zechsteinsalzes zeigt dabei durch die Anlage der Salzstrukturen die größten Schwankungen (Abb. II.9). Die durchschnittlichen Mächtigkeiten der geologischen Horizonte über dem Salz erhöhen sich als Folge der strukturellen Konfiguration in Richtung Synklinale. Das 3D Volumengitter wird für die numerischen Simulationen mit dem Simulator DuMu<sup>x</sup> genutzt. Die Eigenschaften der Störungszone an der Flanke des Diapirs werden in DuMu<sup>x</sup> zugewiesen.

Tabelle II.4: Geologische Parameter der geologischen Horizonte und der Störungszone im Modell. Porosität und Permeabilität nach Reutter (2011); Schäfer et al. (2011); Noack et al. (2013).

Geologische Horizonte	Lithologie	Mächtigkeit [m]	Porosität [%]	Permeabilität [m <sup>2</sup> ]
Quartär	Sand, Kies	300	20	10 <sup>-12</sup>
Tertiär Post-Rupelium	Sand, Silt, Ton	400	15	10 <sup>-13</sup>
Rupelium/Barriere	Ton	80	10	10 <sup>-18</sup>
Tertiär Prä-Rupelium	Sand, Sandstein	350	10	10 <sup>-13</sup>
Kreide	Kalk- und Tonstein	900	7	10 <sup>-14</sup>
Oberer Buntsandstein	Salz, Anhydrit, Tonstein	50	4	10 <sup>-18</sup>
Mittlerer Buntsandstein	Siltstein, Tonstein	20	4	10 <sup>-16</sup>
Solling/Speicherhorizont	Sandstein	20	20	1.1 · 10 <sup>-13</sup>
Mittlerer Buntsandstein	Siltstein, Tonstein	110	4	10 <sup>-16</sup>
Unterer Buntsandstein	Siltstein, Tonstein	350	4	10 <sup>-16</sup>
Zechstein	Steinsalz	1200	0	0
Störungszone/Salzdiapir-Flanke		50	30	10 <sup>-12</sup>

### II.1.2.2 Partizipation zur Analyse der Solemigration

#### Experten Interviews

Die Integration von Stakeholdern in den Szenarienerstellungsprozess geschah im ersten Schritt in der Form von offenen, leitfaden-gestützten Interviews, in denen diejenigen Strukturen und Mechanismen des CO<sub>2</sub>-induzierten Salzwasseraufstiegs thematisiert wurden, die für die Befragten die höchste Priorität hatten. Um die Reflektionen der Gesprächspartner auf das geologische Modell zu fokussieren und diese zugleich durch eine Visualisierung von dessen Struktur zu un-

terstützen, wurde in den Interviews eine graphische Modellskizze verwendet, in der auch Ideen für Szenarien zeichnerisch festgehalten werden konnten. Die Nutzung dieses Schemas gab den Stakeholdern außerdem die Möglichkeit, durch modellkritische Anmerkungen einen Beitrag zur Modellkonstruktion zu leisten, d.h. in der Terminologie von Hare (2011) als Co-Constructors zu wirken. Auch wurde die ursprüngliche Modellskizze auf der Grundlage von zwei Pretest-Gesprächen teilweise überarbeitet, um von den Gesprächspartnern bemerkte zeichnerische Unstimmigkeiten zu beheben. In den folgenden Interviews kam dann diese korrigierte Skizze zum Einsatz. Insgesamt wurden im Frühjahr und Sommer 2013 zehn Gespräche mit Behörden- und Unternehmensvertretern, Geowissenschaftlern und unabhängigen Sachverständigen geführt. Folgende Themen wurden in den Interviews angesprochen:

- Risikoeinschätzung und Szenarien der Solemigrationsrisiken
- Schlüsselparameter und -prozesse der Solemigrationsrisiken
- Priorisierung der Solemigrationszenarien
- Spezifikation der Solemigrationszenarien unter Zuhilfenahme der Skizze des geologischen Modells

Eine erste Schlussfolgerung aus der Auswertung der Interviews bezieht sich auf die Konzeption von Schaden im Falle eines Kontaktes von Sole mit Trinkwasser. Dieses Problem wird von zwei Seiten beurteilt. Einige Stakeholder befürworten ein „absolutes“ Verständnis und betonen, dass sobald Salzwasser in einen Grundwasserleiter eindringt, von einem Schaden auszugehen ist. Die anderen sind der Meinung, dass das Problem der Versalzung des Grundwassers in einer „relativen“ Perspektive betrachtet werden muss. Für Verfechter dieser Sichtweise ist Schaden in erster Linie keine Konsequenz des Umstandes, ob Sole mit Grundwasser in Kontakt gekommen ist oder nicht. Vielmehr ist ihrer Meinung nach Schaden mit Blick auf Grenzwerte zu bewerten, d.h. die Solemenge sowie deren Salinität sind entscheidend für die Risikoeinschätzung. Dieses Problem blieb zwischen den Stakeholdern während der Interviews und bezüglich der Hinweise zur Konzeptualisierung von Risiken der Solemigration weitgehend ungelöst. Dies umfasst die Auswahl und Interpretation dessen was als Risiko angesehen wird, wobei dies zwischen verschiedenen Akteursgruppen aufgrund variierender Werte und Interessen sehr unterschiedlich ausfallen kann. Vor diesem Hintergrund wird eine angemessene Analyse verschiedener Framing-Konzepte benötigt sowie die Durchführung deliberativer Verfahren unter Beteiligung aller relevanten Stakeholder, um eine gemeinsame Grundlage für Risikomanagementstrategien zu identifizieren.

Mit Blick auf die Vorschläge für mögliche Solemigrationspfade wurde deutlich, dass die Experten klar zwischen anthropogen und geologisch induzierten Risiken unterscheiden. Erstere umfassen Einrichtungen wie alte und neue Bohrungen, Trinkwasserbrunnen oder Tagebaue. Beispiele für letztere sind Risse und Störungen, Salzdiapir-Flanken, dünne oder undichte Deckschichten und Fehlstellen im Rupelton. Diese klare Differenzierung zwischen technischen und geologischen Migrationspfaden geht einher mit einer klaren Risikopriorisierung. Die Beteiligten stimmen darin überein, dass geologisch induzierte Risiken bei weitem relevanter einzuschätzen

sind als anthropogen verursachte Risiken. Sie argumentierten zum Beispiel, dass fehlerhafte alte Bohrlöcher den Weg nur für kleinere Solemengen öffnen und zudem leicht durch technische Maßnahmen wieder verschlossen werden können.

Jenseits von Einschätzungen zu den Risiken der Solemigration erbrachte die Auswertung der Stakeholder-Interviews eine breite Palette an Schlüsselementen für die Szenarientwicklung. Die wichtigsten Vorschläge sind in der folgenden Tb II.5 zusammengefasst.

Tabelle II.5: Wichtige Elemente der Gestaltung von Szenarien der Solemigration.

Element	Erläuterung
Variable Randbedingungen	Unterschiedliche Auswirkungen der Mechanismen Solemigration: Verdrängung, Druckanstieg
Variable Geologie	Unterschiedliche Auswirkungen (Verdrängung, Druckanstieg) abhängig von variabler Geologie
Variable Raumbetrachtung	Unterschiedliche Raumgrößen sollten in Szenarios betrachtet werden (evtl. Großszenario mit 100 km)
Anthropogene Migrationswege	Bohrungen in Szenarios einbauen: zu erwartendes Ergebnis ist geringe Verdrängung, Druckanstieg
Variable Parameterwerte	Heterogene Poro-Perm-Werte (Gesteine) und Druck/Dichte-Werte (Fluide) in Modell/Szenarios berücksichtigen
Variable Injektion	Unterschiedliche Injektionspunkte simulieren
Variable Injektionsmenge	Unterschiedliche Injektionsmengen simulieren
Variable Salzwasserentnahme	Unterschiedliche (Mengen) Salzwasserentnahme simulieren
Variable Diskretisierung	Bei geologischen Schwachpunkten feiner diskretisieren; im großen Raum sehr grob diskretisieren

### Stakeholder-Workshop

Als weiterer Schritt der Integration von Stakeholdern in die Modellierung und Szenarienburgung zur Solemigration wurde am 19. September 2014 der Workshop „Zu Risiken und Nebenwirkungen der Salzwasserdrängung: Partizipative Modellierung im Rahmen des CO2BRIM-Projekts“ veranstaltet. Zunächst wurden den Teilnehmern im Rahmen einer Plenumsession das geologische Strukturmodell sowie die ersten Ergebnisse der Simulationsrechnung vorgestellt. Das Ziel dieser Präsentationen war es, Kommentare und Hinweise zu stimulieren, um zusätzlich zu den bereits berücksichtigten Stakeholder-Bewertungen auf weitere Anregungen externer Akteure zurückgreifen zu können. In der Diskussion wurden die folgenden Punkte aus dem Teilnehmerkreis geäußert:

- Mehrere Teilnehmer stellten den unrealistischen Charakter der Modellierung und Simulationsszenarien heraus, da nach ihrer Ansicht verschiedene Aspekte so nicht in der Realität vorkämen, wie z.B. eine durchlässige Salzstockflanke.
- Mit dem Szenario offene Salzflanke ist auch gleich das Szenario offene Störung abgehandelt.

- Modellierungsszenarien ersetzen kein Standortmodell, tragen aber zur Methodenentwicklung und zum Prozessverständnis bei.
- Von mehreren Teilnehmern wurde angeregt, statt “Risiko” den Begriff “Auswirkung” zu verwenden; außerdem sollte umsichtiger kommuniziert werden, z.B. transportiere „Worst case-Szenario“ nicht das, was gesagt werden soll.
- Über verschiedene Szenarien verschiedene Auswirkungen thematisieren.
- Szenarienvergleich zwischen hoher Permeabilität und jeweils verringerten Permeabilitäten der Salzflanke wird als sinnvoll angesehen.
- Injektion von Salzwasser anstelle CO<sub>2</sub> wurde als sinnvoll angesehen, Salztransport soll aber simuliert werden.
- Lösungsprozesse an der Salzflanke werden als unrealistisch angesehen, da Umfeld gesättigt ist.
- Dynamische Effekte während Verpressungsphase; Erkenntnisse wo sind lokale Durchflüsse am größten wenn die Kompressibilität von Wasser und Gestein ausgereizt sind.
- Massenfluss durch Injektionsrate ja, aber Neubildungsrate oben ansetzen.

Der zweite Teil des Workshops bestand aus einem World Café, auf dem die Teilnehmer in verschiedenen, mehrmals neu zusammengesetzten Kleingruppen (“Tische”) drei Fragen beantworten sollten. Die Inhalte der Fragen sowie die hierzu erzielten Diskussionsergebnisse (siehe Tb. II.6, II.7 und II.8) werden im Folgenden aufgezeigt.

**Frage 1)** Zu den grundlegenden Annahmen des CO<sub>2</sub>BRIM-Modells zählen die Raumgröße von 58 x 39 km sowie die hydraulische Durchlässigkeit der Salzstockflanke. Wie beurteilen Sie diese Annahmen:

- Ist die Größenordnung ausreichend zur Untersuchung von Druckeffekten im Fernfeld der CO<sub>2</sub>-Injektionsstelle? (Raumbetrachtung)
- Ist eine Migration von Sole entlang einer Salzstockflanke bis hoch zum Scheitelpunkt des Salzstocks realistisch? (Durchlässigkeit Salzstockflanke)

Tabelle II.6: Antworten zu Frage 1 des World Cafés (wörtliche Meinungswiedergabe).

Tisch 1	Tisch 2	Tisch 3
<p><b>Raumbetrachtung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- bei einem einzigen Injektionspunkt ist die räumliche Betrachtung ausreichend</li> <li>- bei mehreren Injektionspunkten muss wegen der Überlagerung ein größerer Raum betrachtet werden</li> </ul>	<p><b>Raumbetrachtung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Größe ausreichend</li> <li>- Parameter machen es flexibel</li> </ul>	<p><b>Raumbetrachtung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Größe akzeptabel bei Rechnung unterschiedlicher Szenarien (offen/geschlossen)</li> <li>- ähnlich wie vergleichbare Projekte</li> <li>- primär Reaktion nach oben, geringe Relevanz der lateralen Komponente</li> </ul>
<p><b>Durchlässigkeit Salzstockflanke:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- für einen Teilnehmer ist Salzstockflanke durchlässig; für andere eher nicht</li> </ul>	<p><b>Durchlässigkeit Salzstockflanke:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Szenario, dass Leckage am Salzstock noch offen ist, ist nicht plausibel</li> <li>- Auflockerung nicht im Salz, sondern daneben</li> </ul>	<p><b>Durchlässigkeit Salzstockflanke:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- grundsätzlich denkbar</li> <li>- auch dichte Anschlüsse bekannt</li> <li>- keine Berührung</li> <li>- es wird sich kein Salz an der Flanke lösen, da das anliegende Wasser schon mit Salz gesättigt ist; Löslichkeit wegen Sättigung</li> <li>- Vorschlag: Erkundung</li> </ul>

**Frage 2)** CO2BRIM arbeitet mit einem realistischen, jedoch nicht mit einem standortspezifischen Modell. Ist dies Ihrer Meinung nach eine geeignete Grundlage, um über Szenarienmodellierung verallgemeinerbare Erkenntnisse zur Salzwasserverdrängung zu gewinnen?

Tabelle II.7: Antworten zu Frage 2 des World Cafés (wörtliche Meinungswiedergabe).

Tisch 1	Tisch 2	Tisch 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ausgiebige Diskussion über "realistisch"</li> <li>- Antwort: ja, es lassen sich verallgemeinerbare Ergebnisse erzielen; keine Exploration liefert Ansätze für Probleme. Es lassen sich vor einer Exploration schon mögliche Probleme identifizieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nein, bei diesen Ansprüchen genügt die Physik</li> <li>- ja, manche grundsätzlichen Prozesse im Prinzip verstehen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- idealisierter Modellstandort</li> <li>- Permeabilität hoch</li> <li>- grundsätzlich in Ordnung: Prozessverständnis, Methodenentwicklung, wichtige Strukturen vorhanden</li> <li>- ersetzt keine standortspezifische Erkundung</li> <li>- Trinkwasser-Brunnentiefe in Norddeutschland (Upconing?) bzw. wo ist der Zielhorizont?</li> <li>- an einem solchen Standort würde man CCS nicht machen</li> </ul>

**Frage 3)** Wie beurteilen Sie generell die Idee, den Modellierungsprozess für Nicht-Modellierer zu öffnen, um gesellschaftliche Anforderungen berücksichtigen zu können? Was sind aus Ihrer Sicht Vorteile, was sind Nachteile?

Tabelle II.8: Antworten zu Frage 3 des World Cafés (wörtliche Meinungswiedergabe).

Tisch 1	Tisch 2	Tisch 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>- eine Öffnung gegenüber Stakeholdern bei Fragestellung und Ergebnissen ist wichtig</li> <li>- das eigentliche Modellieren sollte dann den Fachleuten überlassen bleiben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ja, Fragestellung relevant(er)</li> <li>- gesellschaftliche Anforderungen: Konflikte mit Basis in Realität</li> <li>- Einbindung vor allem bei Problemdefinition und Ergebnisdiskussion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- schwierig: Chance und Risiko</li> <li>- Zeitpunkt: Ergebnis vs. frühzeitig; Akzeptanz; was ist Beitrag?; Zeit</li> <li>- Schulung "Risikobegriff"</li> <li>- Begründung für Annahmen wichtig und zum Sammeln für Fragestellung/Ängste</li> <li>- Trennung Laie/Experte; gut für Experten/schlecht für Laien</li> <li>- schwierig bei „Worst case“-Techniken; gut bei realistischen Szenarien</li> <li>- Ausgewogenheit; Kommunikation; Förderung Verständnis</li> </ul>

### II.1.2.3 Durchführung numerischer Simulationen zur Solemigration

Basierend auf den gesammelten Szenario-Elementen in Tb. II.5 wurden verschiedene Szenarien konzipiert und berechnet. Grundlage für die numerische Simulation war das in Sektion II.1.2.1 beschriebene geologische Volumengitter, welches im numerischen Simulator DuMu<sup>x</sup> (Flemisch et al., 2011) eingelesen werden konnte. Die vorläufigen Ergebnisse zu den Szenarien wurden schon im zuvor beschriebenen Stakeholder-Workshop (siehe Sektion II.1.2.2) vorgestellt und liegen hier nun in überarbeiteter Version vor.

#### Methodik und Szenariogestaltung

Zur Berechnung der Sole-Migration wurden zwei verschiedene Modelle verwendet und miteinander verglichen. Zum einen wurde ein isothermes Zwei-Phasen Modell (Wasser und CO<sub>2</sub>), ohne Berücksichtigung der Mischbarkeit der Phasen herangezogen, wie es auch schon in Sektion II.1.1.3 eingesetzt wurde. Zum anderen wurde ein isothermes Ein-Phasen Modell (Wasser) eingesetzt, d.h. es wurde eine dem CO<sub>2</sub> äquivalente Menge an Wasser in den Speicherhorizont Solling injiziert. Ziel des Vergleichs war es zu zeigen, dass für diese Problemstellung auf der regionalen Skala ein Ein-Phasen Modell, bei weniger Rechenaufwand ähnliche Ergebnisse wie das komplexere Zwei-Phasen Modell erzeugen kann. Beide Modelle berücksichtigen die Kompressibilität über die Zustandsgleichungen der jeweiligen Fluide und eine konstante Kompressibilität der Gesteinsmatrix ( $C = 4.5 \cdot 10^{-10} \frac{1}{\text{Pa}}$ ), wie sie auch in Schäfer et al. (2011) und Birkholzer et al. (2009) angesetzt wurde.

Die realisierten Szenarien sind in Tb. II.9 aufgelistet, sie basieren auf den Erkenntnissen der Experten Interviews (siehe Tb. II.5). Es konnten jedoch nicht alle Elemente aus Tb. II.5 berücksichtigt werden, da dies den Rahmen des Projektes überschritten hätte. Alle Parameter des hydrogeologischen Systems sind in Tb. II.4 gegeben und wurden für die jeweiligen Szenarien, nach Tb. II.9 angepasst. Weiterhin gilt für alle Szenarien eine Injektionsrate von 0,5 MT CO<sub>2</sub> pro Jahr

Tabelle II.9: Berechnete Szenarien zur Sole-Migration.

Szenario	Beschreibung	Veränderter Wert
1. Modellvergleich	Vergleich zwischen Ein- und Zwei-Phasenmodell	Modelltyp
2. Störungzone	Variation der Störungszonen Permeabilität	$K = 10^{-11} - 10^{-19} \text{m}^2$
3. Erste Barriere	Variation der Permeabilität des Oberen Buntsandsteins (erste Barriere)	$K = 10^{-17} - 10^{-20} \text{m}^2$
4. Solling	Variation der Permeabilität der Solling-Formation	$K = 10^{-12} - 10^{-14} \text{m}^2$
5. Randbedingungen	Offene (Dirichlet) und geschlossene (Neumann) laterale Randbedingungen	Randbedingungsart

über eine Injektionsdauer von 50 Jahren. Injiziert wird in die Solling-Formation an der Flanke der Antiklinalstruktur (siehe Abb. II.8). Der Injektionspunkt liegt bei ca. 1650 m unter GOK. Die seitlichen Randbedingungen sind vom Typ Dirichlet (Festpotentialränder, hydrostatische

Druckverteilung), wie auch die obere Randbedingung im Quartär (Atmosphärendruck). Die untere Randbedingung im Zechstein ist vom Typ Neumann (Flussrandbedingung) und geschlossen. Eine Abbildung der Störungszone (Salzflanke) mit Salzmauer und der Solling-Formation ist in II.11 gegeben. Da die Störungszone (Mächtigkeit ca. 50 m) nicht in dem groben Gitter (horizontal: 300 x 300 m) aufgelöst werden kann, ohne eine starke Verfeinerung mit einem erheblichen zusätzlichen Rechenaufwand in Kauf zu nehmen, wurde, zur Ermittlung der Permeabilität und Porosität der Störungszonenelemente, eine gewichtete arithmetische Mittlung zwischen Störungszone und umgebenden Gestein durchgeführt.

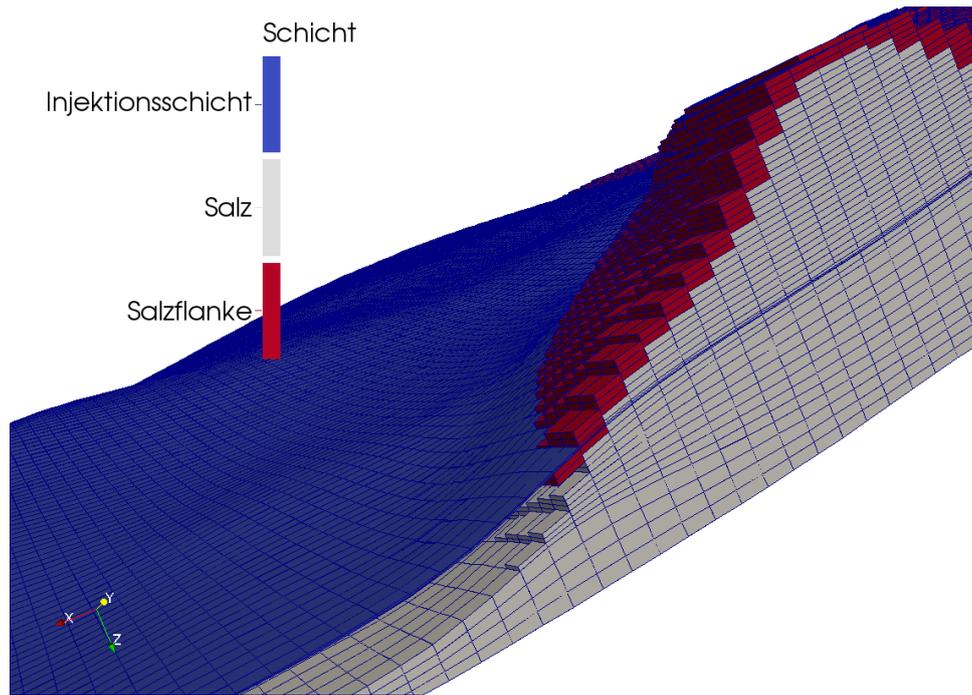


Abbildung II.11: Übergang von Solling-Formation (blau) in Störungszone (rot) und Salzmauer (grau) im Volumengitter.

Die Simulationen sollen den Einfluss der  $\text{CO}_2$ -Injektion auf die oberflächennahen potentiellen Trinkwasser-Aquifere beschreiben (Quartär und tertiäres Post-Rupelium in Tb. II.4). Diese werden im Folgendem als "Ziel-Aquifere" bezeichnet. Hierfür wurden zwei Zielvariablen betrachtet, zum einen der verdrängte Fluss über (i) Salzflanke (Störungszone + aufgeschleppte Kreide), (ii) die Fehlstellen im tertiären Rupelium und (iii) über die komplette Barriere des tertiären Rupeliums. Zum anderen wurde für eines der Szenarien die Verteilung der lokal verdrängten Flüsse betrachtet, um ein Bild von der örtlichen Verteilung und Größenordnung eines möglichen Schadens zu erhalten.

## Ergebnisse

Abbildung II.12 zeigt die Ausdehnung der  $\text{CO}_2$ -Fahne in der Solling-Formation nach 50 Jahren Injektion bei einer Injektionsrate von 0.5 MT pro Jahr. Die Ausbreitung der  $\text{CO}_2$ -Fahne ist klein im Vergleich zu dem Gebiet in dem ein Druckanstieg zu verzeichnen ist. Aus diesem Grund



Abbildung II.12: Blick auf die Oberfläche der Injektionsschicht Solling. Zu sehen ist die Ausbreitung des CO<sub>2</sub> nach 50 Jahren Injektion, sowie zwei Isobaren. Der Salzstock ist in grau dargestellt. Die Injektionsrate beträgt 0.5 MT CO<sub>2</sub> pro Jahr.

muss, um Auswirkungen der Ränder/Randbedingungen zu vermeiden, das Simulationsgebiet ausreichend groß gewählt werden. CO<sub>2</sub> wird in die Flanke einer Antiklinale injiziert. Die CO<sub>2</sub>-Fahne bildet sich nicht symmetrisch um den Injektionsbrunnen aus, sondern steigt aufgrund der Auftriebskraft entlang der Antiklinale auf (weg von der Salzmauer). In Abb. II.13 wird der Vergleich zwischen der Injektion von CO<sub>2</sub> und der Injektion von einem äquivalenten Volumen an Wasser gezeigt (Szenario 1 in Tb. II.9). Es wird jeweils der Fluss, bezogen auf die äquivalente Wasser-Injektionsrate, von der Salzflanke in die Ziel-Aquifere über der Zeit aufgetragen. Die Störungszone hat die in Tb. II.4 angegebenen Eigenschaften. In die Flussberechnung über die Salzflanke wird zusätzlich zu dem Fluss über die Störungszone auch der Fluss über die aufgeschleppte Kreide-Formation an der Salzmauer (siehe Abb. II.15, oben) einbezogen. Dies gilt auch für alle folgenden Ergebnisse, die den Fluss über die Salzflanke beinhalten. Beide Modelle zeigen einen starken und sehr ähnlichen Anstieg des Flusses über die Salzflanke in den ersten 20 Jahren. Danach flacht der Anstieg bei der Wasserinjektion ab, während er bei der CO<sub>2</sub>-Injektion abfällt. Nach 50 Jahren (Injektionsstopp) fallen beide Kurven rapide ab. Während der Fluss bei der Wasserinjektion monoton fällt, bis er fast den Ausgangswert erreicht nach 100 Jahren, fällt er bei der CO<sub>2</sub>-Injektion weiter ab (Umkehr der Fließrichtung), steigt wieder an und tendiert schließlich gegen den Ausgangszustand. Bei der CO<sub>2</sub>-Injektion lassen sich sowohl die Abnahme des Flusses während der Injektion, als auch die Umkehr der Fließrichtung nach der Injektion mit dem Aufstieg des CO<sub>2</sub> entlang der Antiklinal-Struktur weg von der Salzmauer und somit der Störungszone erklären. Die Ergebnisse zeigen, dass der Verlauf der beiden Kurven trotz der Unterschiede vergleichbar ist. In Anbetracht der sehr großen Unsicherheit der hydrogeologischen Eingangsparameter ist der Fehler, welcher durch die vereinfachte Modellannahme durch die Wasserinjektion gemacht wird, als tolerierbar einzustufen. Diese Einschätzung wird gestützt

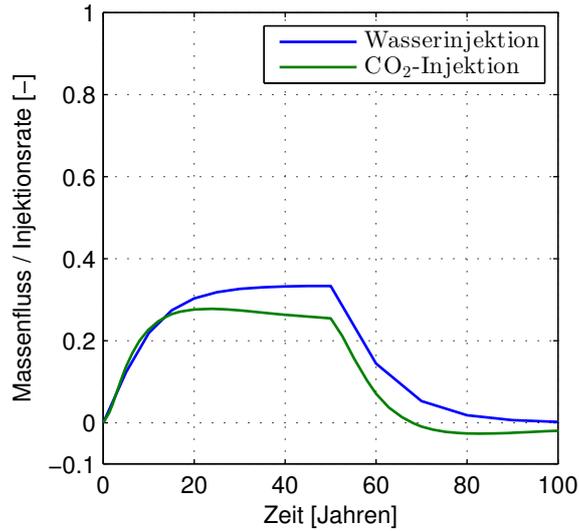


Abbildung II.13: Massenfluss (bezogen auf Wasserinjektionsrate) in Ziel-Aquifere über die Störungszone.

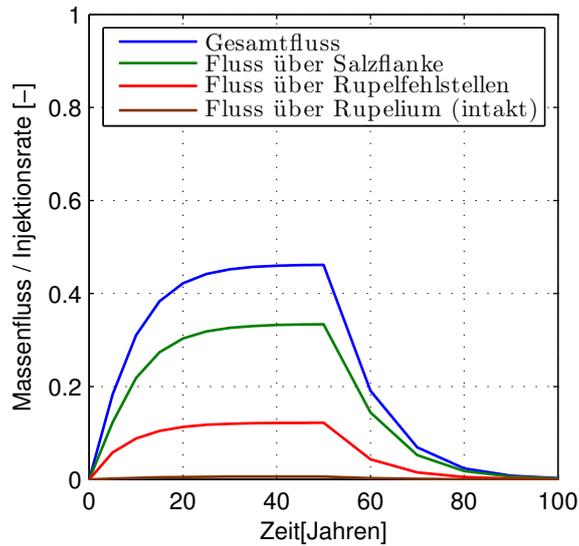


Abbildung II.14: Massenfluss (bezogen auf Salzwasserinjektionsrate) in Ziel-Aquifere über verschiedene Migrationspfade. Der Gesamtfluss ist die Summe aller Flüsse.

durch den Umstand, dass der Fluss über die Salzflanke bei der Injektion von Wasser größer ist als bei der Injektion von CO<sub>2</sub>. Das Modell ist somit konservativ im Sinne einer Überschätzung des möglichen Schadens. Im Folgendem wird daher das Ein-Phasen Modell weiterverwendet.

Abbildung II.14 zeigt den Fluss (bezogen auf die äquivalente Wasser-Injektionsrate) über die Salzflanke, die Rupelstellen sowie den Gesamtfluss in die Ziel-Aquifere. Die Ergebnisse beziehen sich auf die hydrogeologische Parametrisierung, wie in Tb. II.4 gegeben. Es wird deutlich, dass der Großteil des verdrängten Salzwassers über die durchlässige Störungszone an der Salzmauer verdrängt wird. Weiterhin wird ein wesentlicher, aber geringerer Anteil auch über die

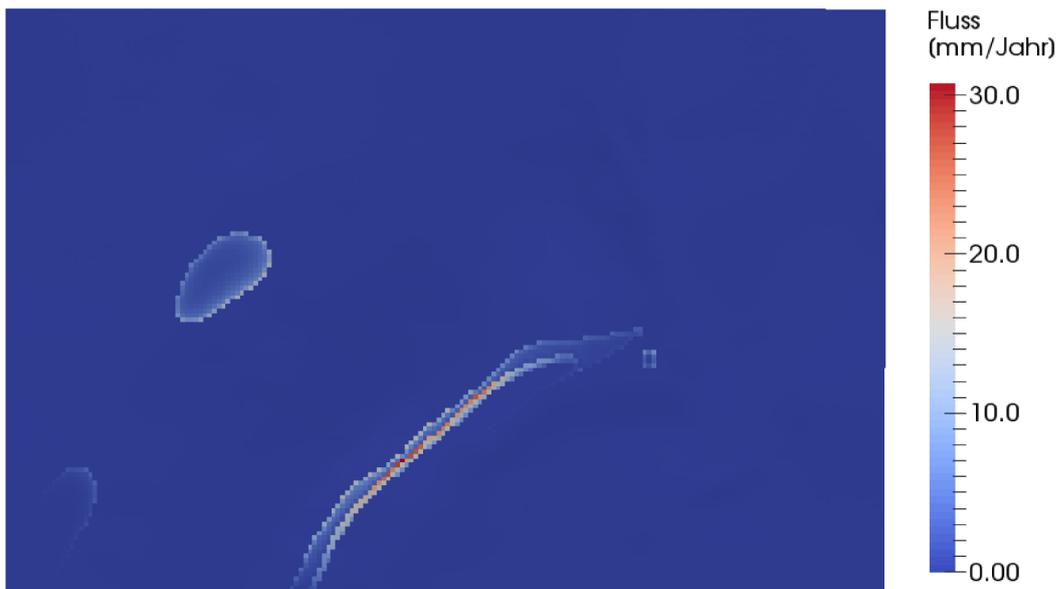


Abbildung II.15: Ansicht des Grenzbereichs zwischen Rupelium und den Ziel-Aquiferen. **Oben:** Die verschiedenen Diskontinuitäten im Rupelium; in der linken Hälfte die zwei Fehlstellen im Rupelium; in der Mitte der Durchbruch der Salzmauer, sowie die Störungszone und die aufgeschleppte Kreide. **Unten:** Der injektionsbedingte Zufluss von Salzwasser aus tieferen Schichten in die Ziel-Aquifere umgerechnet in mm/Jahr.

Rupelfehlstellen verdrängt. Der Gesamtfluss setzt sich hauptsächlich aus diesen beiden Anteilen zusammen. Über die intakte zweite Barrierschicht (Rupelium) wird nur ein vernachlässigbarer Anteil verdrängt. In Abb. II.15 wird dies nochmal deutlicher gemacht. Hier ist die Verteilung

der lokal verdrängten Flüsse dargestellt. Die Flüsse wurden in mm pro Jahr umgerechnet, um leichter einen Vergleich z.B. zu Grundwasser-Neubildungsraten ermöglichen zu können. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die Flüsse über eine Bezugsfläche gemittelt wurden, welche der horizontalen Diskretisierungsweite entspricht (300 m x 300 m). Dies ist zulässig unter der Annahme, dass sich die hydrogeologischen Eigenschaften in einem Element nicht ändern. Im Falle der Störungszone, wo eine Mittlung zwischen Störungszone-Eigenschaften und den Eigenschaften der angrenzenden Schichten vorgenommen wurde, führt dies jedoch zu kleineren maximalen Werten für den Fluss. Diese Art der Darstellung ist somit stark von der Diskretisierungsweite abhängig. Trotzdem soll diese Darstellung hier verwendet werden, um die örtliche Verteilung der Flüsse zu zeigen. In Abb. II.15 ist erkennbar, dass die größten Flüsse im Bereich der Störungszone auftreten. Weiterhin ist zu sehen, dass auch ein gewisser Anteil über die an der Salzmauer aufgeschleppte Kreide, welche hydraulischen Kontakt mit den Ziel-Aquifere hat, verdrängt wird. Auch an den Rändern der Rupelfehlstellen wird Salzwasser verdrängt.

In Abb. II.16 ist der maximale erreichte Fluss während der 50 Jahre Injektion über die Salzflanke in die Ziel-Aquifere aufgetragen für Simulationen mit verschiedenen Störungszone-Permeabilitäten (Szenario 2 in Tb. II.9). Es lässt sich erkennen, dass der Fluss mit steigender Störungszone-Permeabilität zunimmt. Der aufgetragene Fluss beinhaltet auch den Fluss, welcher über die aufgeschleppte Kreide-Formation an der Salzmauer in die Ziel-Aquifere eingetragen wird. Darum nähert sich der Fluss bei sehr kleinen Störungszone-Permeabilitäten einem Wert größer Null an. In diesem Fall wird das Salzwasser großflächig über die erste Barriere (Oberer Buntsandstein) in den Kreide-Horizont verdrängt und von dort über die aufgeschleppten Bereiche in die Ziel-Aquifere.

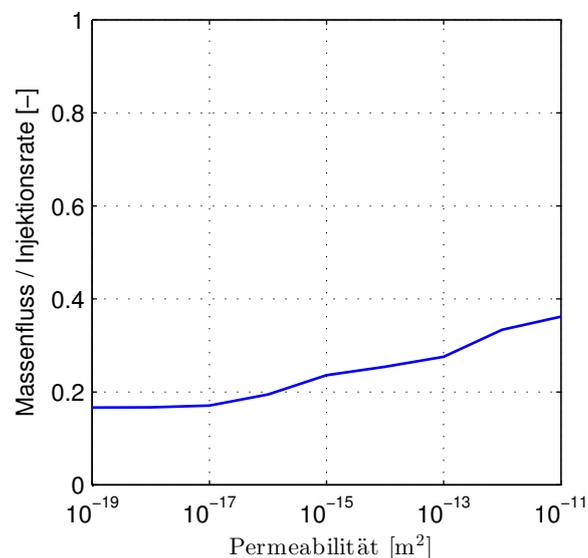


Abbildung II.16: Massenfluss (bezogen auf Wasserinjektionsrate) in Ziel-Aquifere über die Salzflanke für verschiedene Störungszone-Permeabilitäten.

Abbildung II.17 zeigt die Ergebnisse der Variation der Werte für die Permeabilität der ersten Barriere (Oberer Buntsandstein, Szenario 3 in Tb. II.9). Wie zuvor ist der Fluss über die

Salzflanke, die Rupelfehlstellen und der Gesamtfluss in die Ziel-Aquifere aufgetragen für alle vier Simulationen. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass mit sinkender Barriere Permeabilität der Gesamtfluss in die Ziel-Aquifere abnimmt. Weiterhin nimmt mit sinkender Barriere Permeabilität der Anteil am Gesamtfluss, welcher über die Salzflanke verdrängt wird zu. Dies liegt daran, dass bei niedriger Barriere Permeabilität der Weg des geringsten Widerstandes für das verdrängte Salzwasser über die Salzflanke geht.

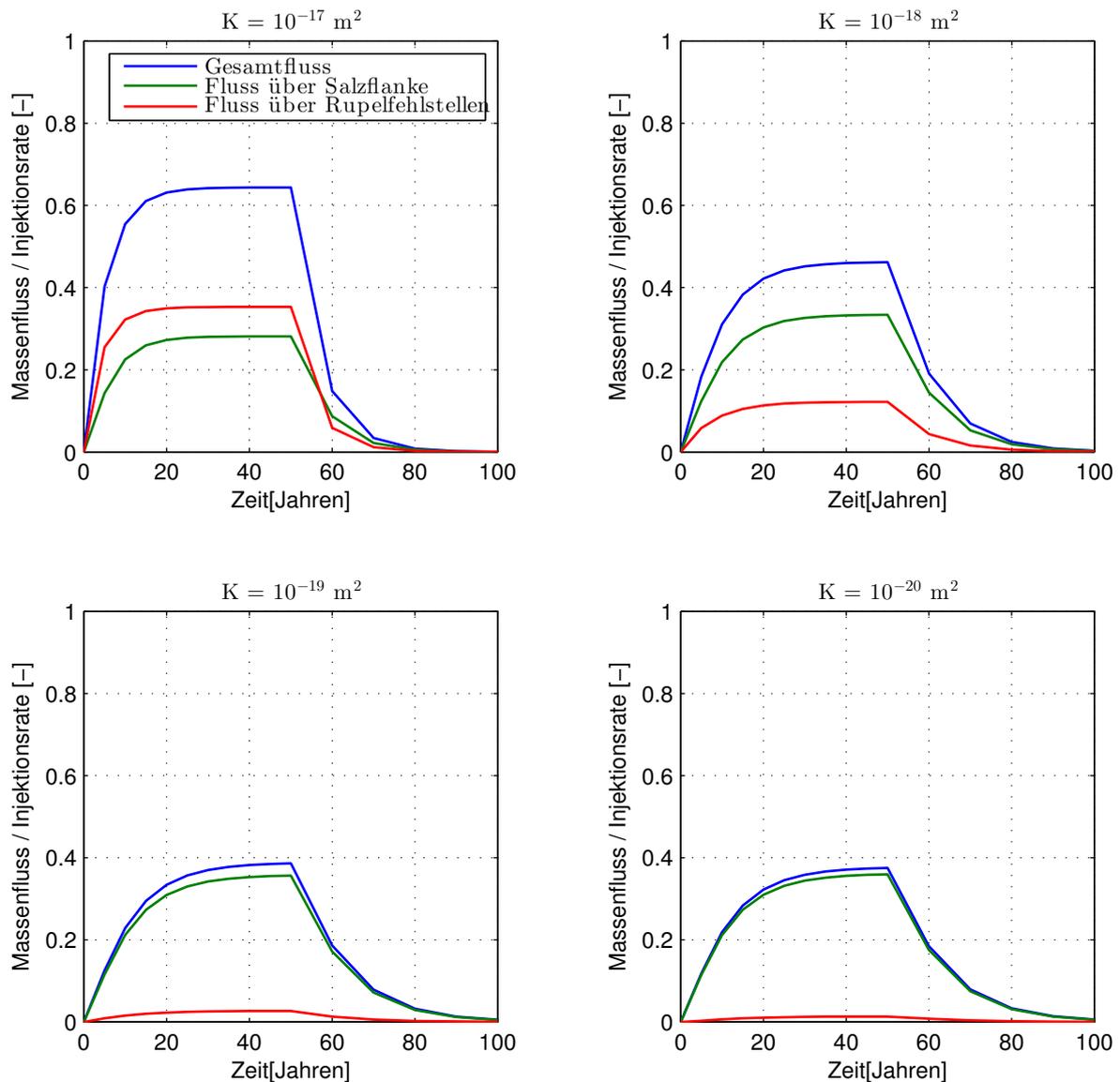


Abbildung II.17: Massenfluss (bezogen auf Wasserinjektionsrate) in Ziel-Aquifere über verschiedene Migrationspfade für variierende Permeabilitäten des Oberen Buntsandstein (erste Barriere).

In Abb. II.18 sind die Ergebnisse für die Variation der Permeabilität der Solling-Formation illustriert (Szenario 3 in Tb. II.9). Dieser Parameter beeinflusst vor allem das zeitliche Verhalten des Systems. In der Abbildung ist nur der Fluss über die Salzflanke in die Ziel-Aquifere dargestellt. Mit sinkender Permeabilität dauert es länger bis der maximale Fluss in die Ziel-

Aquifere erreicht wird. Dieses Verhalten lässt sich darauf zurückführen, dass bei abnehmender Permeabilität gleichzeitig die Diffusivität ( $\propto \frac{K}{\phi}$ ) im System abnimmt, wenn die Porosität ( $\phi$ ) dabei konstant bleibt.

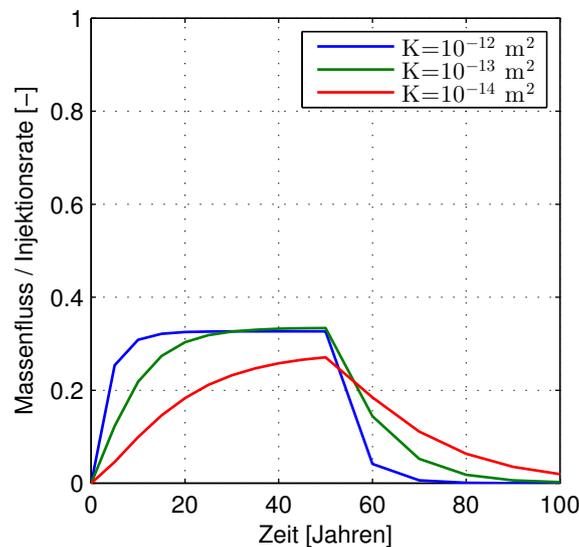


Abbildung II.18: Massenfluss (bezogen auf Wasserinjektionsrate) in Ziel-Aquifere über die Salzflanke für variierende Permeabilitäten der Solling-Formation (Injektionsschicht).

Schließlich zeigt Abb. II.19 den Einfluss von geschlossenen (No-Flow) und offenen seitlichen Randbedingungen (Dirchlet Randbedingung), entsprechend Szenario 4 in Tb. II.9. In der Abbildung ist sowohl der Fluss über die Salzflanke als auch der Gesamtfluss in die Ziel-Aquifere für beide Fälle dargestellt. Die hydrogeologischen Parameter sind in Tb II.4 gegeben. Es ist zu sehen, dass bei geschlossenen Randbedingungen der Fluss in die Ziel-Aquifere stark zunimmt, bis am Ende der 50 Jahre der Fluss bei ca. 90% der Wasserinjektionsrate liegt. Dies ist ein extremes Szenario, da rundum geschlossene Randbedingungen in der Natur nicht zu erwarten sind. Andererseits zeigt dieses Szenario, welcher Effekt im theoretisch ungünstigsten Fall zu erwarten ist. Die Wahl von offenen Randbedingungen hingegen unterschätzt den Fluss in die Ziel-Aquifere, da der Fluss über die seitlichen Ränder erleichtert wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unter den getroffenen Annahmen

- hohe Störungzonenpermeabilität  $K = 10^{-12} \text{m}^2$ ,
- Barriere Oberer Buntsandstein relativ durchlässig ( $K = 10^{-18} \text{m}^2$ ) und
- Diskontinuitäten im Rupelium,

für fast alle hier betrachteten Szenarien ein nicht zu vernachlässigender Teil des injizierten Fluids in die Ziel-Aquifere verdrängt wird. Die Verdrängung erfolgt großflächig über die erste Barriere (Oberer Buntsandstein) und danach über die Rupelfehlstellen und/oder die Salzflanke oder direkt über die Solling-Formation in die Salzflanke. Ein großflächiger Schaden in den Ziel-Aquiferen

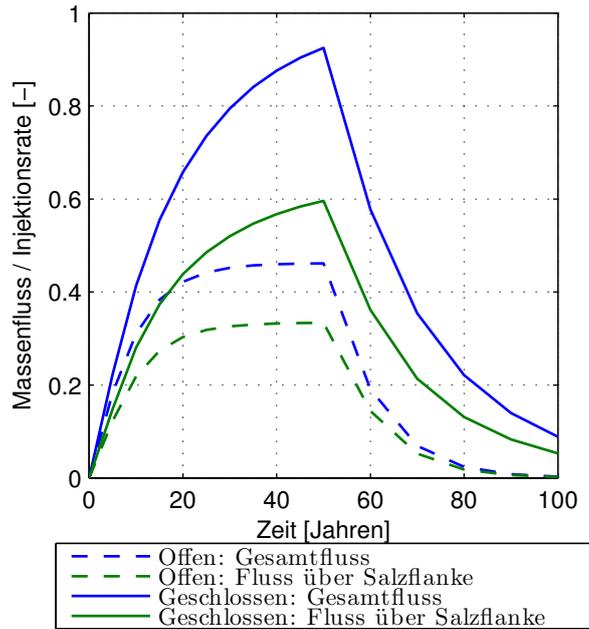


Abbildung II.19: Massenfluss (bezogen auf Wasserinjektionsrate) in Ziel-Aquifere über die Salzflanke, sowie Gesamtfluss für offene und geschlossene seitliche Ränder.

ist dabei nicht zu erwarten, sondern eher lokal begrenzt an den Stellen, wo das Rupelium nicht intakt ist (Rupelfehlstellen, z.B. im Scheitelbereich). Um ein besseres Verständnis des möglichen Schadens zu erhalten, sollte in zukünftigen Arbeiten einerseits der Transport von Salz in den Simulationen berücksichtigt werden, andererseits sollten auch die natürlicherweise auftretenden Flüsse, verursacht durch Grundwasserneubildung im Modellgebiet vor allem in den oberflächennahen Schichten berücksichtigt werden.

## II.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die meisten Mittel im Projekt waren für wissenschaftliches Personal.

## II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für den Bereich der CCS-Forschung wurde mit dem Konzept einer partizipativen Modellierung unter Einbezug von Stakeholdern Neuland betreten. Zwar lässt sich auf Partizipationskonzepte aus anderen Forschungsbereichen rekurrieren, die passgenaue Konzeptionierung und Ausgestaltung für die CO<sub>2</sub>-Speicherung musste aber auf die Spezifika der geowissenschaftlichen Forschung zugeschnitten werden. Charakteristisch für CO2BRIM ist der Ansatz, partizipative Praktiken als konstitutives Element der auf disziplinärer und modellierungstechnischer Expertise basierenden Bearbeitung der naturwissenschaftlichen Fragestellungen aufzufassen. Der Forschungsprozess bestand so aus einer Reihe von Teilaufgaben, für die jeweils ein integriertes Arbeitsprogramm aus beispielsweise geologischen und hydrosystemischen Analysemethoden und

sozialwissenschaftlichen Beteiligungsformaten entwickelt wurde. Federführend für die Konzipierung von letzteren waren die Sozialwissenschaftler (DIALOGIK), wobei dies mit Blick auf die adäquate Berücksichtigung etwa von zeitlichen Anforderungen oder fachlichen Zusammenhängen in enger Abstimmung mit den naturwissenschaftlichen Projektpartnern geschah. Grundlegend für die Rolle von DIALOGIK war eine strikt neutrale Haltung, die sich in der Konzentration auf die methodischen Herausforderungen der partizipativen Modellierung ausdrückt. Diese Selbstverpflichtung zur Indifferenz erstreckte sich sowohl auf die CCS-Technologie als auch auf die von den Projektpartnern und Stakeholdern vertretenen Inhalte, Ergebnisse und Bewertungen. Sie war eine wesentliche Voraussetzung für die Mitwirkungsbereitschaft gesellschaftlicher Akteure und die Anerkennung von deren Beiträgen durch die Naturwissenschaftler und Modellierer in CO2BRIM.

## II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das erstellte Gr-Raster für den Mittleren Buntsandstein macht eine Differenzierung verschiedener Regionen hinsichtlich ihrer Speichereffizienz möglich. Bei einer Standortsuche müssen viele Kriterien berücksichtigt werden. Das Gr-Kriterium kann hierfür ein hilfreiches Instrument sein. Die Methodik lässt sich auch auf andere Speicherkomplexe im Norddeutschen Becken anwenden.

Für die großskalige Untersuchung der Sole Migration sind folgende Ergebnisse für zukünftige Vorhaben von Interesse:

- Die Wahl der hydrogeologischen Parameter im System und deren Einfluss auf die Solemigration
- Der Einfluss der CO<sub>2</sub> Injektion auf das regionale Strömungsfeld, also über die Injektionsschicht hinaus. Dies hat insbesondere für die Wahl der Größe des Modellierungsgebiets sowie für ein mögliches Monitoring-Konzept Bedeutung.
- Der Sole-Austausch zwischen tiefen und flachen Formationen.
- Der Einfluss möglicher Vereinfachungen im Modell, z.B. Ein- oder Mehrphasen Strömungsprozesse

Der derzeitige Forschungsstand und die im CO2BRIM-Projekt gemachten Erfahrungen verweisen darauf, dass PM eine hochgradig offene, prozedural angelegte Forschungsmethode ist, die noch keine verallgemeinerbare Blaupause für Konzept und Durchführung von PM erlaubt. Allenfalls lassen sich derzeit Eckpunkte für ein Grundgerüst der PM identifizieren, welches Hinweise für eine fallspezifisch flexibel auszugestaltende Anwendung liefert. Unabhängig von Verfahrensfragen zeigen die bisherigen Praxisprojekte jedoch, dass der mit PM verbundene Kerngedanke der Öffnung des Modellierungsprozesses für Nicht-Modellierer die Chancen zur Erzeugung geteilter Perspektiven und Lösungen für transdisziplinäre Probleme beträchtlich erhöht. Viele Autoren berichten darüber, dass die von ihnen durchgeführten oder komparativ ausgewerteten PM-Prozesse erhebliche kollaborative Lerneffekte zur Folge hatten (Antunes et al., 2006;

Dreyer et al., 2009; Edwards und Smith, 2011; Stave, 2003, 2010; Webler et al., 2011). Hervorgehoben werden Punkte wie ein wachsendes Bewusstsein und Verständnis für die Perspektiven anderer Stakeholder, die Förderung von Engagement und Interaktion, Gruppendenken, Gruppenidentität, gemeinsamen Gruppenzielen und einer geteilten Wahrnehmung des Problems und Systemumfeldes sowie die Unterstützung der Konsensbildung und Konfliktlösung. Diesen Prozessqualitäten wird eine eigenständige Bedeutung beigemessen, die PM-Aktivitäten jenseits der eigentlichen Modellierungsergebnisse und unabhängig davon zukommen, ob erarbeitete Problemlösungen umgesetzt werden oder nicht. Der partizipative Prozess der Modellkonstruktion „can be the most valuable product of collaborative learning through modelling, which may, in turn, lead to resolution of conflicts through realizing which elements of the system need to be addressed“ (Metcalf et al. (2010), S. 1289).

Der letzte Punkt verweist auf eine weitere positive Konsequenz partizipativer Modellierung, und zwar auf ein verbessertes Problem- und Systemverständnis infolge der gemeinsamen Entwicklung und Nutzung von Modellen (Antunes et al., 2006; Ravera et al., 2011; Stave, 2003, 2010; Webler et al., 2011). Die dabei gemeinsam gewonnenen vertieften Kenntnisse über Aufbau und Dynamik einer Ressourcenfrage erhöhen die Anerkennung für die Dimension der Aufgabe des Ressourcenmanagements, tragfähige Lösungen für ein komplexes System interdependenter Beziehungen verschiedener natürlicher, technischer und sozialer Strukturen und Akteure zu finden und umzusetzen. Selbst wenn sich der Partizipationsprozess lediglich auf die Bewertung und Diskussion eines bereits existierenden Modells beschränkt, ist die Herausbildung von langfristigem, dynamischem und ganzheitlichem Denken zu beobachten. Die gemeinsame Arbeit an Modellen kann zu einem Perspektivwechsel von der Suche nach den Schuldigen für ein Problem zur Frage danach führen, wie eine Sachlage beschaffen ist und warum sie sich im Zuge von Interventionen in einer bestimmten Weise verändert oder warum mit einer Handlungsalternative bessere bzw. schlechtere Ergebnisse verbunden sind als mit einer Anderen. „Model output challenged the mental models participants had about what the best solutions were, and disconnected the message from the messenger, making participants more receptive to ideas that they might otherwise have rejected“ (Stave (2010), S. 2780).

Das damit angesprochene Vertrauen in Modelle und Modellresultate ist mit Blick auf die Akzeptanz von Politik- und Managemententscheidungen durch die verschiedenen Projektbeteiligten zentral. So haben Edwards und Smith (2011) eine wechselseitige Bereitschaft beobachtet, eigene Pläne und Positionen aufgrund von Modellergebnissen aufzugeben, wenn andere am Verfahren beteiligte Akteursgruppen dieses Vertrauen schenken wie die eigene Gruppe. Die Nutzung von Modellen zur Erzeugung, Bewertung und Auswahl von Managementoptionen führt dazu, dass Stakeholder ihre Absichten klären und sich der jeweiligen Vor- und Nachteile bewusst werden, die verschiedenen Strategien inhärent sind. Der damit verbundene Legitimitätswachstum ist gerade in Kontexten mit hoher Unsicherheit und starken Konflikten hilfreich für die Konsensbildung über Zukunftsoptionen (Dreyer et al., 2009; Ravera et al., 2011; Webler et al., 2011).

## II.5 Fortschritt des Vorhabens bei anderen Stellen

Aus technischer Sicht gab es bei der Charakterisierung von Standorten für die CO<sub>2</sub> Speicherung während der Projektlaufzeit einige neue Entwicklungen in der nationalen und internationalen Forschung. Diese Entwicklungen wurden berücksichtigt und - wo nötig - in das Projekt integriert. In den Bereich regionales Screening von Formationen und Abschätzung von Speicherkapazitäten sind vor allem die Arbeiten von Szulczewski et al. (2012) und Goater et al. (2013) hervorzuheben. Für die Solemigration in großskaligen Gebieten sind vor allem die im BRINE Projekt getätigten Arbeiten wichtig, insbesondere Tillner et al. (2013). Weiterhin wurden am LH2 Simulationsstudien zur Solemigration mit idealisierten Geometrien durchgeführt (Walter et al., 2012, 2013). Um die großskaligen Verdrängungsprozesse effizienter behandeln zu können, wurden analytische und semi-analytische Modelle für geschichtete Aquifer/Aquitard Systeme entwickelt, welche lokale Migration über Störungzonen und/oder diffuse Migration über Aquitarde beinhalten (Cihan et al., 2011; Birkholzer et al., 2012; Cihan et al., 2013; Zeidouni, 2012; Kang et al., 2014). Eine Methoden vergleichende Studie findet sich in Huang et al. (2014).

## II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

### Begutachtete Veröffentlichungen

- Kissinger, A., Noack, V., Knopf, S., Scheer, D., Konrad, W., & Class, H. (2014). Characterization of reservoir conditions for CO<sub>2</sub> storage using a dimensionless Gravitational Number applied to the North German Basin. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 209–220. doi:10.1016/j.seta.2014.06.003
- Scheer, D., Konrad, W., Class, H., Kissinger, A., Knopf, S., & Noack, V. (2015). Expert involvement in science development: (re-)evaluation of an early screening tool for carbon storage site characterization. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 37, 228–236. 10.1016/j.ijggc.2015.03.023

### Konferenzbeiträge

- Class, H., Kissinger, A., Knopf, S., Müller, C., V. Noack: The Gravitation Number as a screening criterion for CO<sub>2</sub> storage efficiency of different formations in Germany. (2012) AGU 2012 Fall Meeting (3. - 7. December 2012, San Francisco, USA).
- Class, H., Kissinger, A., Knopf, S., Konrad, W., Müller, C., Noack, V., Scheer, D.: CO<sub>2</sub>BRIM: Regional-scale characterization of potential CO<sub>2</sub> storage formations with particular focus on brine migration risks – an integrated natural and social science approach. (2013) Sedimentary Basins Jena 2013 - Research, Modelling, Exploration (23.-25. September 2013, Jena, Germany).
- Class, H., Kissinger, A., Knopf, S., Konrad, W., Müller, C., Noack, V., Scheer, D.: CO<sub>2</sub>BRIM: Regional-scale characterization of potential CO<sub>2</sub> storage formations with particular focus

on brine migration risks – an integrated natural and social science approach. (2013) 2nd International Conference on Non-Linearities and Upscaling in Porous Media (30. September - 2. October 2013, Bergen, Norway).

- Noack V., Kissinger, A., Class, H., Knopf, S., Konrad, W., Scheer, D.: Evaluation of Brine Migration Risks due to CO<sub>2</sub> Injection - an Integrated natural and Social Science Modeling Approach. (2014) AGU 2014 Fall Meeting, (15. - 19 December 2014, San Francisco, USA).
- Scheer, D., Konrad, W., Class, H., Kissinger, A., Knopf, S., Noack, V. (2015). Expert involvement in science development: (re-)evaluation of an early screening tool for carbon storage site characterization. Sociology of Risk and Uncertainty Research Network 22 (ESA), Mid-term conference, Stuttgart, 8-10 April 2015
- Kissinger, A., Noack, V., Class, H., Knopf, S., Konrad, W., Scheer, D.: Assessment of brine migration along vertical pathways due to CO<sub>2</sub> injection. (2015) EGU General Assembly 2015, (12. - 17 April 2015, Vienna, Austria).

### **Technische Berichte**

- Class, H., Brauer, K., Kissinger, A., Walter, L., Darcis, M. und A. Ebigbo: Beeinträchtigung von Grundwasser durch Speicherung von Gasen im Untergrund. 15/2011. Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart, 2011. Zusammenarbeit mit Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

### **Buchbeiträge**

- Class, H., Kissinger, A., Knopf, S., Konrad, W., Noack, V., & Scheer, D. (2015). Combined Natural and Social Science Approach for Regional-Scale Characterisation of CO<sub>2</sub> Storage Formations and Brine Migration Risks (CO<sub>2</sub>BRIM). In A. Liebscher & U. Münch (Eds.), Geological Storage of CO<sub>2</sub> – Long Term Security Aspects (pp. 209–227). doi:10.1007/978-3-319-13930-2 22. Springer-Verlag, 2015, 209-227.
- Dreyer, M., Konrad, W., Scheer, D. (2014): Partizipative Modellierung, In: Niederberger, M., Wassermann, S. (Hrsg.): Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung. Wiesbaden: Springer VS, S. 265-289.
- Scheer, D., Konrad, W. (2014): Partizipative Modellierung im Versuchslabor: Das CO<sub>2</sub>BRIM-Projekt, in: DIALOGIK (Hrsg.): Innovativ und partizipativ: Einblicke in die Arbeit von DIALOGIK, Stuttgart: Eigenverlag, S. 67-77.

### **Abschlussarbeiten**

- Scholz, S. Analytical Solution for Determining Brine Leakage Along a Salt Wall. Bachelor Thesis, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 2014.

- Wirth, M. Modeling Flow and Diffusion along a Salt Flank. Bachelor Thesis, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 2013.

## **Presse**

- Carsten Preis: CO<sub>2</sub>-Speicherung transparent machen, in: planeterde 07/2012.
- Christopher Schrader: Expressfahrstuhl für Salzwasser, in: Süddeutsche Zeitung, 13. Oktober 2014, S. 16.

## **Geplante Veröffentlichungen**

- Kissinger, A., Noack, V., Knopf, S., Scheer, D., Konrad, W., & Class, H. (2015, in prep.). Regional scale investigation of impacts of deep subsurface utilization on hydrosystems – An assessment of relevant physical processes and suitable modeling approaches [current working title], Begutachtete Publikation.
- Kissinger, Alexander (2015, in prep.). Regional scale site screening and investigation of possible impacts of deep subsurface utilization on hydrosystems – An assessment of relevant physical processes and suitable modeling approaches [current working title], Doktorarbeit, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.

# Literaturverzeichnis

- Adams, J.J. und Bachu, S. Equations of state for basin geofluids: algorithm review and inter-comparison for brines. *Geofluids*, 2(4):257–271 [2002]. ISSN 14688115. doi:10.1046/j.1468-8123.2002.00041.x. URL <http://doi.wiley.com/10.1046/j.1468-8123.2002.00041.x>.
- Antunes, P., Santos, R. und Videira, N. Participatory decision making for sustainable development - The use of mediated modelling techniques. *Land Use Policy*, 23(1):44–52 [2006]. ISSN 02648377. doi:10.1016/j.landusepol.2004.08.014.
- Asprion, U., Griffel, G. und Elbracht, J. Die neue Quartärbasis im deutschen Nordseesektor und im Küstenbereich der deutschen Nordsee. Technischer Bericht, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover [2013].
- Batzle, M. und Wang, Z. Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, 57(11):1396 [1992]. ISSN 1070485X. doi:10.1190/1.1443207. URL <http://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.1443207>.
- Bielinski, A., Kopp, A., Schütt, H. und Class, H. Monitoring of CO<sub>2</sub> plumes during storage in geological formations using temperature signals: Numerical investigation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2:319–328 [2008]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2008.02.008.
- Birkholzer, J.T., Cihan, A. und Zhou, Q. Impact-driven pressure management via targeted brine extraction—Conceptual studies of CO<sub>2</sub> storage in saline formations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 7:168–180 [2012]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2012.01.001. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583612000023>.
- Birkholzer, J.T. und Zhou, Q. Basin-scale hydrogeologic impacts of CO<sub>2</sub> storage: Capacity and regulatory implications. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(6):745–756 [2009]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2009.07.002. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583609000668>.
- Birkholzer, J.T., Zhou, Q. und Tsang, C.F. Large-scale impact of CO<sub>2</sub> storage in deep saline aquifers: A sensitivity study on pressure response in stratified systems. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(2):181–194 [2009]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2008.08.002. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583608000753>.

- Bombien, H., Hoffers, B., Breuckmann, S., Helms, M., Lademann, K., Lange, M., Oelrich, A., Reimann, R., Rienäcker, J. und Schmidt, K. Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell. Technischer Bericht [2012].
- Bots, P.W.G. und Daalen, C.E. Participatory Model Construction and Model Use in Natural Resource Management: a Framework for Reflection. *Systemic Practice and Action Research*, 21(6):389–407 [2008]. ISSN 1094-429X. doi:10.1007/s11213-008-9108-6.
- Brasser, T., Fischer-Appelt, K., Larue, J. und Moeing, J. Hydrochemischer Charakter von Tiefenwässern in ausgewählten Regionen Deutschlands. Technischer Bericht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH [2001].
- Cihan, A., Birkholzer, J.T. und Zhou, Q. Pressure buildup and brine migration during CO<sub>2</sub> storage in multilayered aquifers. *Ground water*, 51(2):252–67 [2013]. ISSN 1745-6584. doi:10.1111/j.1745-6584.2012.00972.x. URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22880722>.
- Cihan, A., Zhou, Q. und Birkholzer, J.T. Analytical solutions for pressure perturbation and fluid leakage through aquitards and wells in multilayered-aquifer systems. *Water Resources Research*, 47(10) [2011]. ISSN 00431397. doi:10.1029/2011WR010721. URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2011WR010721>.
- Class, H., Ebigbo, A., Helmig, R., Dahle, H.K., Nordbotten, J.M., Celia, M.A., Audigane, P., Darcis, M., Ennis-King, J., Fan, Y., Flemisch, B., Gasda, S.E., Jin, M., Krug, S., Labregere, D., Naderi Beni, A., Pawar, R.J., Sbai, A., Thomas, S.G., Trenty, L. und Wei, L. A benchmark study on problems related to CO<sub>2</sub> storage in geologic formations. *Computational Geosciences*, 13(4):409–434 [2009]. ISSN 1420-0597. doi:10.1007/s10596-009-9146-x. URL <http://link.springer.com/10.1007/s10596-009-9146-x>.
- Class, H., Kissinger, A., Knopf, S., Konrad, W., Noack, V. und Scheer, D. Combined Natural and Social Science Approach for Regional-Scale Characterisation of CO<sub>2</sub> Storage Formations and Brine Migration Risks (CO<sub>2</sub>BRIM). In Geological Storage of CO<sub>2</sub> – Long Term Security Aspects, (Hrsg.) A. Liebscher und U. Münch, Kapitel 10, Seiten 209–227 [2015]. ISBN 978-3-319-13929-6. doi:10.1007/978-3-319-13930-2. URL <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-13930-2>.
- Darcis, M. Coupling Models of Different Complexity for the Simulation of CO<sub>2</sub> Storage in Deep Saline Aquifers. Doktorarbeit, Institute for Modelling Hydraulic and Environmental Systems, University of Stuttgart [2012].
- Darcis, M., Class, H., Flemisch, B. und Helmig, R. Storage in Deep Saline Aquifers. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, 66(1):93–103 [2011]. ISSN 1294-4475. doi:10.2516/ogst/2010037. URL <http://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/10.2516/ogst/2010037>.

- Diener, I., Pasternack, G., Stollenberg, K., Tesch, M., Tessin, R., Toleikis, R. und Wormbs, J. Geologische Perspektivitätsbewertung für die Geothermienutzung in NE-Deutschland - Blatt Berlin/Frankfurt (Oder). Technischer Bericht, UWG GmbH, Berlin [1990].
- Diener, I., Tesch, M. und Pasternack, G. Geologische Grundlagen für die Geothermienutzung in Nordost-Deutschland (Kartenwerk). Technischer Bericht, UWG GmbH, Berlin [1992].
- Diener, I., Wormbs, J., Pasternack, G., Stollenberg, K., Tesch, M., Tessin, R. und Toleikis, R. Geologische Grundlagen für die Geothermienutzung in Nordost-Deutschland - Blatt Magdeburg/Brandenburg. Technischer Bericht, UWG GmbH, Berlin [1991].
- Doornenbal, J. und Stevenson, A. (Hrsg.) Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. EAGE Publications b.v., Houten [2010]. ISBN 978-90-73781-83-2.
- Dreyer, M., Konrad, W. und Scheer, D. Partizipative Modellierung. In Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung, (Hrsg.) M. Niederberger und S. Wassermann, Seiten 265–289. Springer VS, Wiesbaden [2015].
- Dreyer, M. und Renn, O. Participatory approaches to modelling for improved learning and decision-making in natural resource governance: An editorial. *Environmental Policy and Governance*, 21(6):379–385 [2011a]. ISSN 1756932X. doi:10.1002/eet.584.
- Dreyer, M. und Renn, O. Synopsis of the literature reviews for guidance on using participatory modelling in fisheries governance. Deliverable 2.6.2 of eu project jakfish, Dialogik, Stuttgart [2011b].
- Dreyer, M., Renn, O., Drakeford, B. und Borodzicz, E. Review of literature about participatory modelling in fisheries management with a focus on the Invest in Fish South West project and the PRONE project. Deliverable 2.3 of eu project jakfish, Dialogik, Stuttgart [2009].
- Ebigbo, A., Helmig, R., Cunningham, A.B., Class, H. und Gerlach, R. Modelling biofilm growth in the presence of carbon dioxide and water flow in the subsurface. *Advances in Water Resources*, 33(7):762–781 [2010]. ISSN 0309-1708. doi:DOI:10.1016/j.advwatres.2010.04.004. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VCF-4YWB2MD-1/2/b19aabe59bc546aacc3b79ef850807b5>.
- Edwards, V.M. und Smith, S. Lessons from the application of decision-support tools in participatory management of the New Forest National Park, UK. *Environmental Policy and Governance*, 21(6):417–432 [2011]. ISSN 1756932X. doi:10.1002/eet.589.
- Fenghour, A., Wakeham, W.A. und Vesovic, V. The Viscosity of Carbon Dioxide. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 27(1):31 [1998]. ISSN 00472689. doi:10.1063/1.556013. URL <http://link.aip.org/link/JPCRBV/v27/i1/p31/s1&Agg=doi>.
- Flemisch, B., Darcis, M., Erbertseder, K., Faigle, B., Mosthaf, K., Lauser, A., Müthing, S., Nuske, P., Tatomir, A., Wolf, M. und Helmig, R. DUMUX: DUNE for multi-{phase, component, scale,

- physics, ...} flow and transport in porous media. *Advances in Water Resources*, 34(9):1102–1112 [2011]. doi:10.1016/j.advwaters.2011.03.007.
- Goater, A.L., Bijeljic, B. und Blunt, M.J. Dipping open aquifers - The effect of top-surface topography and heterogeneity on CO<sub>2</sub> storage efficiency. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 17:318–331 [2013]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2013.04.015. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583613001722>.
- Hable, R., Kaufhold, H., Liebsch-Dörschner, T. und Thomsen, C. Endbericht Speicher-Kataster Deutschland für die Bundesländer Hamburg und Schleswig-Holstein. Technischer Bericht, Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek [2011].
- Hare, M. Forms of participatory modelling and its potential for widespread adoption in the water sector. *Environmental Policy and Governance*, 21(6):386–402 [2011]. ISSN 1756932X. doi:10.1002/eet.590.
- Huang, X., Bandilla, K.W., Celia, M.A. und Bachu, S. Basin-scale modeling of CO<sub>2</sub> storage using models of varying complexity. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 20(2014):73–86 [2014]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2013.11.004. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583613003885>.
- Johnson, M.S. Public Participation and Perceptions of Watershed Modeling. *Society & Natural Resources*, 22(1):79–87 [2008]. ISSN 0894-1920. doi:10.1080/08941920802220347.
- Kang, M., Nordbotten, J.M., Doster, F. und Celia, M.A. Analytical solutions for two-phase subsurface flow to a leaky fault considering vertical flow effects and fault properties. *Water Resources Research*, 50:3536–3552 [2014]. ISSN 19447973. doi:10.1002/2013WR014628. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/2013WR014628>.
- Kaufmann, D., Heim, S., Jähne, F., Steuer, S., Bebiolka, A., Wolf, M. und Kuhlmann, G. GSN – Generalisiertes, erweitertes Strukturmodell des zentralen deutschen Nordsee-Sektors – Konzept zur Erstellung einer konsistenten Datengrundlage für weiterführende Modellierungen im Bereich des zentralen deutschen Nordsee-Sektors. Technischer Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover [2014].
- Kempka, T. CO<sub>2</sub>-Speicherung in Ostbrandenburg: Implikationen für eine synergetische geothermische Energiegewinnung und Konzeptionierung eines Frühwarnsystems gegen Grundwasserversalzung. Technischer Bericht [2013].
- Kissinger, A., Noack, V., Knopf, S., Scheer, D., Konrad, W. und Class, H. Characterization of reservoir conditions for CO<sub>2</sub> storage using a dimensionless Gravitational Number applied to the North German Basin. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7:209–220 [2014]. ISSN 22131388. doi:10.1016/j.seta.2014.06.003. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213138814000526>.

- Kopp, A., Binning, P., Johannsen, K., Helmig, R. und Class, H. A contribution to risk analysis for leakage through abandoned wells in geological CO<sub>2</sub> storage. *Advances in Water Resources*, 33(8):867–879 [2010]. ISSN 03091708. doi:10.1016/j.advwatres.2010.05.001. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0309170810000990>.
- Kopp, A., Class, H. und Helmig, R. Investigations on CO<sub>2</sub> storage capacity in saline aquifers - Part 2: Estimation of storage capacity coefficients. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(3):277–287 [2009a]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2008.10.001. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583608000984>.
- Kopp, A., Class, H. und Helmig, R. Investigations on CO<sub>2</sub> storage capacity in saline aquifers Part 1. Dimensional analysis of flow processes and reservoir characteristics. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(3):263–276 [2009b]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2008.10.002. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583608000972>.
- Korfmacher, K.S. The politics of participation in watershed modeling. *Environmental Management*, 27(2):161–176 [2001]. ISSN 0364152X. doi:10.1007/s002670010141.
- Land, C.S. Calculation of imbibition relative permeability for two and three-phase flow from rock properties. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 8(2):149–156 [1968]. ISSN 0197-7520.
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). CO<sub>2</sub>-Speicherung [2012]. URL [http://www.lbeg.niedersachsen.de/energie\\_rohstoffe/co2speicherung/co2-speicherung-935.html](http://www.lbeg.niedersachsen.de/energie_rohstoffe/co2speicherung/co2-speicherung-935.html).
- Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LUGV). Hydroisohypsen des oberen genutzten Grundwasserleiters des Landes Brandenburg für das Frühjahr 2011, Daten des LUGV Brandenburg [2012]. URL <http://www.mlul.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.310481.de>.
- Larue, J. Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes, Teil 2: Standortcharakterisierung. Abschlussberichte zum Vorhaben 3607R02538 „planerische Grundsatzfragen“. Technischer Bericht, GRS-A-3535, Köln [2010].
- Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG). Deutschlandkarte des geothermischen Gradienten [2012]. URL <http://www.liag-hannover.de/de/s/s4/forschungsfelder/temperaturfeld-im-untergrund-deutschlands/ergebnis.html>.
- Metcalf, S.S., Wheeler, E., BenDor, T.K., Lubinski, K.S. und Hannon, B. Sharing the floodplain: Mediated modeling for environmental management. *Environmental Modelling and Software*, 25:1282–1290 [2010].
- Müller, C. und Reinhold, K. (Hrsg.) Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland - eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland). Technischer Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin/Hannover [2011].

- Noack, V., Scheck-Wenderoth, M., Cacace, M. und Schneider, M. Influence of fluid flow on the regional thermal field: results from 3D numerical modelling for the area of Brandenburg (North German Basin). *Environmental Earth Sciences*, 70(8):3523–3544 [2013]. ISSN 1866-6280. doi:10.1007/s12665-013-2438-4. URL <http://link.springer.com/10.1007/s12665-013-2438-4>.
- Okwen, R.T., Stewart, M.T. und Cunningham, J.A. Analytical solution for estimating storage efficiency of geologic sequestration of CO<sub>2</sub>. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(1):102–107 [2010]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2009.11.002. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S175058360900142X>.
- Ravera, F., Hubacek, K., Reed, M. und Tarrasón, D. Learning from experiences in adaptive action research: A critical comparison of two case studies applying participatory scenario development and modelling approaches. *Environmental Policy and Governance*, 21(6):433–453 [2011]. ISSN 1756932X. doi:10.1002/eet.585.
- Reutter, E. Hydrostratigrafische Gliederung Niedersachsens. *Geofakten*, 21 [2011].
- Röckmann, C., Ulrich, C., Dreyer, M., Bell, E., Borodzicz, E., Haapasaari, P., Hauge, K.H., Howell, D., Mäntyniemi, S., Miller, D., Tserpes, G. und Pastoors, M. The added value of participatory modelling in fisheries management - what has been learnt? *Marine Policy*, 36(5):1072–1085 [2012]. ISSN 0308597X. doi:10.1016/j.marpol.2012.02.027.
- Röhling, H.G. The Quickborn Sandstone - a new lithostratigraphic unit in the lowermost Middle Buntsandstein (Scythian). *Zbl. Geol. Paläont.*, 1(7-8):797–812 [1999].
- Schäfer, F., Walter, L., Class, H. und Müller, C. The regional pressure impact of CO<sub>2</sub> storage: a showcase study from the North German Basin. *Environmental Earth Sciences*, 65(7):2037–2049 [2011]. ISSN 1866-6280. doi:10.1007/s12665-011-1184-8. URL <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s12665-011-1184-8>.
- Scheer, D. und Konrad, W. Partizipative Modellierung im Versuchslabor: Das CO<sub>2</sub>BRIM-Projekt. In *Innovativ und partizipativ: Einblicke in die Arbeit von DIALOGIK*, (Hrsg.) DIALOGIK, Seiten 67–77. Eigenverlag, Stuttgart [2014]. ISBN 978-3-938245-29-3.
- Scheer, D., Konrad, W., Class, H., Kissinger, A., Knopf, S. und Noack, V. Expert involvement in science development: (re-)evaluation of an early screening tool for carbon storage site characterization. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 37:228–236 [2015]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2015.03.023. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583615001152>.
- Span, R. und Wagner, W. A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 25(6):1509 [1996]. ISSN 00472689. doi:10.1063/1.555991. URL <http://link.aip.org/link/JPCRBU/v25/i6/p1509/s1&Agg=doi>.

- Stave, K.A. A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *Journal of Environmental Management*, 67:303–313 [2003].
- Stave, K.A. Participatory system dynamics modeling for sustainable environmental management: Observations from four cases. *Sustainability*, 2(9):2762–2784 [2010]. ISSN 20711050. doi:10.3390/su2092762.
- Szulczewski, M.L., MacMinn, C.W., Herzog, H.J. und Juanes, R. Lifetime of carbon capture and storage as a climate-change mitigation technology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(14):5185–9 [2012]. ISSN 1091-6490. doi:10.1073/pnas.1115347109. URL <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3325663&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- Tillner, E., Kempka, T., Nakaten, B. und Kühn, M. Brine migration through fault zones: 3D numerical simulations for a prospective CO<sub>2</sub> storage site in Northeast Germany. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [2013]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2013.03.012. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583613001321>.
- Videira, N., Antunes, P. und Santos, R. Scoping river basin management issues with participatory modelling: The Baixo Guadiana experience. *Ecological Economics*, 68(4):965–978 [2009]. ISSN 09218009. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.11.008.
- Voinov, A. und Bousquet, F. Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling and Software*, 25:1268–1281 [2010].
- Walter, L., Binning, P.J. und Class, H. Predicting salt intrusion into freshwater aquifers resulting from CO<sub>2</sub> injection – A study on the influence of conservative assumptions. *Advances in Water Resources*, 62:543–554 [2013]. ISSN 03091708. doi:10.1016/j.advwatres.2013.09.017. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0309170813001784>.
- Walter, L., Binning, P.J., Oladyshkin, S., Flemisch, B. und Class, H. Brine migration resulting from CO<sub>2</sub> injection into saline aquifers - An approach to risk estimation including various levels of uncertainty. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 9:495–506 [2012]. ISSN 17505836. doi:10.1016/j.ijggc.2012.05.004.
- Webler, T., Tuler, S. und Dietz, T. Modellers’ and Outreach Professionals’ Views on the Role of Models in Watershed Management. *Environmental Policy and Governance*, 21:472–486 [2011].
- Wolf, M., Steuer, S., Jähne, F., Kaufmann, D. und Weitkamp, A. 3D-Lithofaziesmodell des Buntsandstein in der zentralen deutschen Nordsee. Technischer Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover [2014].
- Wolfgramm, M. und Seibt, A. Zusammensetzung von Tiefenwässern in Deutschland und ihre Relevanz für geothermische Anlagenteile. In GTV-Tagung in Karlsruhe 2008, Seiten 503 – 516 [2008].

Zeidouni, M. Analytical model of leakage through fault to overlying formations. *Water Resources Research*, 48(12):n/a–n/a [2012]. ISSN 00431397. doi:10.1029/2012WR012582. URL <http://doi.wiley.com/10.1029/2012WR012582>.