

Dreidimensionale numerische Simulation von Methanmigrationsprozessen im Untergrund

Dr.-Ing. Hussam Sheta¹, Prof. Rainer Helmig², Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann²

1: Deutsche Montan Technologie DMT GmbH
Am Technologiepark 1
45307 Essen

2: Institut für Wasserbau
Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 61
70550 Stuttgart

Zusammenfassung

Die durch die Stilllegung von Bergwerken hervorgerufene Migration von Methan stellt zunehmend eine erhebliche Gefährdung der Nutzung von Bauwerken dar. Ein gewisser Anteil des Methans kann über die Schächte ausgesaugt und somit kontrollierbar abgeführt werden. Ein weiterer, schwer quantifizierbarer Anteil migriert durch das Deckgebirge an die Erdoberfläche. Mit numerischen Simulationswerkzeugen ist es möglich, die genannten Prozesse in Abhängigkeit der Datenlage qualitativ und quantitativ zu erfassen, wobei der Einfluss von Unsicherheiten in den Modellparametern abgeschätzt werden kann. In Abhängigkeit der relevanten Prozesse muss ein Modellkonzept für eine Zweiphasenströmung oder eines für Zweiphasen-Mehrkomponenten Strömung und Transport in einem geklüftet-porösen Medium zugrunde gelegt werden. Nachdem anhand verschiedener Prinzipstudien umfangreiches Prozessverständnis aufgebaut, wird z.z. an der Simulation von Westfalen gearbeitet. Dazu werden eine Modellkalibrierung und Prognoserechnungen in Aussicht gestellt.

1. Einleitung und Problembeschreibung

Im Zuge der Stilllegung von Steinkohlebergwerken kommt es zu einer verstärkten Migration von Methan durch den Untergrund, da das Methan nicht mehr kontrolliert über eine Bewetterung abgeführt wird. Das Methan entweicht aus der Kohle, die im Untergrund noch vorhanden ist und migriert durch Stollen, Schächte, Risse, Klüfte, Scherzonen und die geologischen Schichten. Wenn es an der Erdoberfläche austritt, kann es zu einer erheblichen Beeinträchtigung bzw. Gefährdung der Nutzung von Bauwerken kommen. Das Strömungsverhalten wird maßgeblich von den geologischen Strukturen des Untergrundes, von Verschlussbauwerken wie Dämmen sowie von möglichen Gasabsaugungen über Schächte beeinflusst.

Anhand eines realen Falles, des stillgelegten Bergwerkes Westfalen, werden verschiedene Simulationswerkzeuge aufgebaut, die die relevanten Strömungs- und Transportprozesse numerisch simulieren sollen. Abbildung 1 zeigt eine Prinzipskizze der geologischen Strukturen des Bergwerkes Westfalen. Das Grundgebirge besteht aus Sandstein und das Deckgebirge aus Grünsand-, Kalkstein-, Emschermergel- und einer Sandschicht [8]. Für die numerische Simulation müssen drei unterschiedliche Modellkonzepte zugrunde gelegt werden. Das Modellkonzept einer Zweiphasenströmung beschreibt die Bewegung der Fluide Grundwasser und Methan bzw. Methan-Luft-Gemisch im geklüftet-porösen Medium. Müssen Lösungsprozesse in die Betrachtung integriert werden, z.B. die Lösung von Methan im Wasser, so ist ein Zweiphasen-Mehrkomponenten Modellkonzept im geklüftet-porösen Medium zu verwenden. Beide Modellkonzepte werden in Kapitel 2 näher erläutert. Schließlich wird die Strömung durch nicht verfüllte Schächte, Stollen, Versorgungswege usw. durch das Modellkonzept einer eindimensionalen Rohrströmung beschrieben; dies wird hier nicht näher behandelt, siehe z.B. Pollack und Christensen (1987) [9]. Sämtliche Modellkonzepte können natürlich auch für zeitabhängige Problemstellungen verwendet werden. Zunächst musste Prozessverständnis anhand von Prinzipstudien aufgebaut werden [2]. In den nächsten Schritten werden eine Modellkalibrierung und Prognoseberechnungen in Aussicht gestellt, wobei die Einflüsse von Unsicherheiten in den Modellparametern auf die Simulationsergebnisse berücksichtigt werden sollen.

2. Modellkonzepte

Die nachfolgend beschriebenen Modellkonzepte sind Bestandteil des Programmsystems **MUFTE-UG** (**M**ulti phase **F**low, **T**ransport and **E**nergy, **U**nstructured **G**rid) [1], [4].

2.1 Modellkonzept Zweiphasenströmung

Das Wasser sowie das Gas im Untergrund wird als Phase bezeichnet. Jede Phase (Wasser / Gas) kann aus verschiedenen Komponenten bestehen; die Wasserphase z.B. aus Süßwasser, gelöstem Salz und gelöstem Methan sowie die Gasphase z.B. aus Methan, Bodenluft und Wasserdampf. Ein Zweiphasenströmungsmodellkonzept betrachtet nur die Strömungsinteraktion zwischen den Phasen (keine Lösungsprozesse; an der Trennflächen der Phasen wirken Kräfte, z.B. Kapillarität). Zur modellhaften Beschreibung einer Mehrphasenströmung wird das erweiterte Darcy-Gesetz angewendet [5]. Weiter wird der Begriff der Sättigung eingeführt. Die Sättigung ist eine Größe der Mesoskala. Auf dieser Skala (\gg m-Bereich) werden

die mikroskalig verteilten Bodenkenngrößen über ein bestimmtes Volumenelement gemittelt. Dieser Volumenabschnitt wird wie bei einer Grundwasserströmung als Repräsentatives Elementar Volumen (REV) bezeichnet [5]. Die Sättigung wird definiert als:

$$S_\alpha = \frac{\text{Volumen des Fluids } \alpha \text{ im REV}}{\text{Volumen des Porenraumes im REV}}$$

mit

$$\sum_{\alpha=1}^{n_{\text{phase}}} S_\alpha = 1 \quad \text{für} \quad 0 \leq S_\alpha \leq 1 .$$

Die integrale Form der Zweiphasendifferentialgleichung lautet für die Phase α :

$$\int_G \left[\frac{\partial(\phi \rho_\alpha S_\alpha)}{\partial t} + \text{div}(\rho_\alpha \underline{v}_\alpha) - \rho_\alpha q_\alpha \right] dG = 0$$

mit

ϕ	Porosität [-]
ρ_α	Dichte der Phase α [kg/m ³]
\underline{v}_α	Darcy-Geschwindigkeit der Phase α [m/s]
S_α	Sättigung der Phase α [-]

Das erweiterte Darcy-Gesetz hat folgende Form:

$$\underline{v}_\alpha = \frac{k_{r\alpha}}{\mu} k \left(\text{grad } p_\alpha - \rho_\alpha \underline{g} \right)$$

mit

$k_{r\alpha}$	relative Permeabilität der Phase α [-]
\underline{k}	Permeabilitätstensor [m ²]
\underline{g}	Erdbeschleunigung [m/s ²]
p_α	Druck der Phase α [kg/(s ² m)]

Es gelten folgende Nebenbedingungen:

$$S_w + S_g = 1$$

$$p_c(S_w) = p_g - p_w$$

w und g bezeichnen die Wasser- und die Gasphase. Der Kapillardruck p_c zwischen der Wasser- und Gasphase wird in Abhängigkeit von der Sättigung der Wasserphase ermittelt [5].

Für das hier verwendete Zweiphasenmodell bestehend aus den Phasen Wasser und Gas wird angenommen, dass die Gasphase vollständig aus Methan besteht.

Die bisherigen Arbeiten haben sich auf das Grundgebirge konzentriert (siehe Abb. 2, links). Wir gehen in diesem Bereich davon aus, dass Lösungsprozesse vernachlässigt werden können. Es wird angemerkt, dass die Strömungsprozesse in den durch Dammbauwerke verschlossenen Strecken und Versorgungswegen vereinfacht durch eine Klufftströmung in Anlehnung an das Darcy-Gesetz berücksichtigt wird. Diese Annahme kann hinsichtlich zu erwartender Reynoldszahlen nicht zutreffend sein und wird zukünftig gesondert untersucht. Eine genauere Erfassung dieser Prozesse, z.B. Kopplung Zweiphasenströmung im porösen Medium mit Rohr, ist zz. mit vertretbarem Aufwand nicht möglich; die Prozesse werden aber zumindest qualitativ erfasst.

2.2 Modellkonzept Zweiphasen-Mehrkomponenten Strömung und Transport

In Ergänzung zum Modellkonzept der Zweiphasenströmung wird hier der Transport der Komponenten innerhalb der Phasen sowie Massenaustauschprozesse zwischen den Phasen, z.B. Übergang gelöstes Gas in die freie Gasphase, mit berücksichtigt. Dieses Modellkonzept wird in zwei Bereichen eingesetzt werden. Zum einen im Übergangsbereich Grundwasser – ungesättigte Bodenzone, um die Vermischungsprozesse von Methan und Bodenluft zu beschreiben und um die Simulationen mit Methankonzentrationsmessungen an der Erdoberfläche vergleichen zu können; zum anderen im Bereich der sehr gering durchlässigen Emschermergelschicht, da hier möglicherweise diffusive Transportprozesse von Methan von Bedeutung sein können (siehe Abb. 2). Im Vergleich zum Zweiphasenmodellkonzept ist das Zweiphasen-Mehrkomponenten-Modellkonzept wesentlich komplexer und numerisch aufwendiger. Auf die Darstellung der Grundgleichungen wird hier verzichtet, siehe [4] und [5].

3. Prinzipstudien

Sämtliche hier dargestellten Ergebnisse wurde mit dem Zweiphasenströmungsmodell durchgeführt. Auf Arbeiten zum Zweiphasendreikomponenten Modellkonzept wird auf [7] und [6] verwiesen.

3.1. 2D Beispiel mit Schacht, Strecken und Klüften

Um die Strömungsverhältnisse von Methan im Grundgebirge numerisch simulieren zu können, wurde zunächst eine Prinzipstudie zum Ausbreitungsverhalten an einem zweidimensionalen Modellgebiet von 400m (Breite) x 400 m (Höhe) durchgeführt. Ziel dieser Prinzipstudie ist es, den Einfluss der Klüfte auf die Strömung von Methan zu zeigen. Die physikalischen Eigenschaften der Schicht und der Klüfte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die Anfangs- und Randbedingungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Das System ist zu Beginn voll wassergesättigt. Im Flöz wird ein Methanquellterm angesetzt. Sowohl die Strecke als auch der Schacht werden in der Simulation als eine Klufft mit einer Öffnungsweite von 2 cm angenommen. Der angenommene Wert der Öffnungsweite, aus dem dann eine Klufftpermeabilität abgeleitet wird, ergibt sich aus dem Undichtigkeitsbereich zwischen Damm und Gebirgskörper. Da die ausströmende Gasmenge konstant bleibt, wird diese Öffnung für die gesamte Strecke und den Schacht verwendet.

Wie die numerisch simulierte Gassättigungsverteilung zeigt (siehe Abb. 4), kann das Gas sowohl durch die Strecke, den Schacht als auch durch die Klüfte ausströmen. Das Gas kann nur von der rechten Kluft in die Matrix (Grundgebirge) eindringen, da diese Kluft in der Matrix endet. Dieses ist bei der linken Kluft nicht der Fall, da sie eine direkte Verbindung zum Schacht und somit zur Tagesoberfläche hat.

Die Reynoldszahl, über die sich die Gültigkeit des Darcy-Gesetzes überprüfen lässt, ergibt sich in Strecke und Schacht wie folgt.

$$R_e = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{5 \cdot 10^{-8} \cdot 0,02 \cdot 0,6}{10,2 \cdot 10^{-6}} = 5,882 \cdot 10^{-5} < 1,0$$

mit

R_e	Reynoldszahl [-]
v	Gasgeschwindigkeit in der Strecke [m/s]
η	dynamische Viskosität der Gasphase [kg/(ms)]
ρ	Gasdichte [kg/m ³]
d	Kluftöffnungsweite [m]

Für die hier getroffenen Annahmen ist die Gültigkeit des Darcy-Gesetzes gegeben. Jedoch wird das Widerstandsverhalten von Strecke und Schacht zz. noch überschätzt und soll künftig realitätsnäher abgeschätzt werden.

3.2. 2D Beispiel mit Klüften und Rissen

In Abbildung 5 sind die Geometrie sowie die Anfangs- und Randbedingungen eines weiteren Simulationsgebietes gegeben. Es wurde vereinfacht ein 2D Vertikalschnitt durch Grund- und Deckgebirge untersucht. In diesem Beispiel werden Strecken und Schächte nicht betrachtet. Im Grundgebirge bzw. Karbon gibt es abgebaute und nicht abgebaute Flöze. Durch den Abbauvorgang entstehen Risse, die sich bis zur Tagesoberfläche fortsetzen. Die Permeabilität der Risse wird als 10^{-11} [m²] angegeben. Abbildung 6 zeigt die Permeabilitätsverteilung des Untersuchungsgebietes. Das System ist zu Simulationsbeginn voll wassergesättigt. Der Methanquellterm ($1.0E-8$ kg/s/m²) wurde den nicht abgebauten Flözen zugeordnet.

Die numerische Simulation zeigt, dass das Methan durch den Kalkstein bis zur Emschermergel migrieren kann und dann durch Risse bis zur Tagesoberfläche vordringt (s. Abb. 7 und 8).

3.3. 3D Beispiel mit Schacht, Strecken und Klüften

In dieser Prinzipstudie wird ein vereinfachter realer Fall modelliert. Abbildung 9 zeigt die Lage der Flöze (vertikaler Schnitt) im Untersuchungsgebiet Westfalen (nahe Schacht 6). Der vertikale Schnitt zeigt Flöze, die abgebaut sind (z.B. Dickebank), und Flöze, die noch nicht abgebaut sind (z.B. Schöttelchen und Röttgersbank). Abbildung 10 zeigt die geometrische Lage der Flöze, deren Anbindung an Strecken und Schacht 6. Aufgrund des Abbaus entstehen mikro- und mesoskalige Klüfte, deren geometrische und physikalische Informationen im Detail nicht vorliegen; diese Klüfte können aber einen großen Einfluss auf das Gasmigrationsverhalten haben. Sie werden daher geostatistisch mit dem Programm *Frac3d* erfasst, wobei soweit wie möglich vorhandene Daten und geologisches Wissen einbezogen werden.[10] Die Abbildung 10 zeigt die für die Simulation gewählten Anfangs- und

Randbedingungen. Es ist anzumerken, dass der Quellterm den nicht abgebauten Flözen zugeordnet wurde, die oberhalb (Röttgersbank) oder unterhalb (Schöttelchen) des abgebauten Flözes Dickebank liegen. Es wurden die gleichen physikalischen Parameter (siehe Tab. 1) und Annahmen (Strecke und Schacht als Klüfte) wie im 2D Beispiel aus Kapitel 2.1 verwendet. Es wird hier nur der Bereich bis zur Grünsandschicht (Grundgebirge) modelliert, wobei das Verhalten der Gas-Wasser Strömung im Grundgebirge untersucht wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Methan vorwiegend nach oben migriert und sich unterhalb der Grünsandschicht aufstaut (Abb. 11). Hierbei wurde die Gasmigration durch die Strecken, Schächte und durch das Grundgebirge erfasst.

4. Vorläufige Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wird die numerische Modellierung der MethanAusgasung aus stillgelegten Kohlebergwerken durch den Untergrund, Strecken und Schächte an die Erdoberfläche behandelt. Es werden verschiedene Modellkonzepte zugrunde gelegt. Wenn Massentransferprozesse vernachlässigt werden dürfen, wird ein Zweiphasenströmungsmodellkonzept in einem geklüftet-porösen Medien verwendet. Dabei wird die Bewegungen der Fluide Wasser und Methan beschrieben. Wenn aber die Betrachtung von Massentransferprozessen, z.B. Lösung von Methan in Wasser oder die Ausgasung von Methan aus Wasser, eine wesentliche Rolle spielt, dann ist ein Zweiphasen-Mehrkomponenten Modellkonzept (Phasen: Wasser-Gas; Komponenten: z.B. Süßwasser, gelöstes Salz, gelöstes Methan, Wasserdampf) einzusetzen. Beide Modellkonzepte sind Bestandteil des Programmsystem **MUFTE-UG** (**M**ultiphase **F**low, **T**ransport and **E**nergy, **U**nstructured **G**rid).

Anhand verschiedener Prinzipstudien wurde ein umfangreiches Prozessverständnis der dominanten Parameter und Prozesse in Abhängigkeit der geologischen Strukturen aufgebaut. Die Methanmigration durch Grund- und Deckgebirge sowie durch die Strecken und Schächte wird zz. für das Bergwerk Westfalen durchgeführt. Dazu wird ein dreidimensionales Modellgebiet aufgenommen [3]. Es steht umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung:

- geometrische Lage der (abgebauten und nicht abgebauten) Flöze, Strecken, Schächte, Scherzonen, große Risse
- physikalische Parameter des Untergrundes (Permeabilitäten, Porositäten usw.)
- Messungen des Methanvolumenstroms aus Schächten
- Messungen von Methankonzentrationen an der Erdoberfläche
- Informationen über den Restgasgehalt nicht abgebauter Flöze
- Messungen zur Methankonzentration im Grundwasserwasser (oberflächennah).

Ziel der numerischen Simulation ist es, im Rahmen vorhandener Daten eine Modellkalibrierung und darauf aufbauend Prognoseberechnungen für das Bergwerk Westfalen durchzuführen.

Im nächsten Schritt soll der Methanquellterm derart ‚eingestellt‘ werden, dass die gemessenen Methanvolumenströme am Schacht 6 (einziger Schacht mit aktiver Absaugung, alle anderen Schächte verschlossen) reproduziert werden können, wobei wir davon ausgehen, dass der wesentliche Anteil des Methans nur aus dem Grundgebirge kommt. Daraus kann in einem ersten Schritt abgeleitet werden, wie viel Methan über Schächte und das Deckgebirge abgeführt werden. Darauf aufbauend wird die Methanmigration durch Grund- und Deckgebirge näher

behandelt, wobei zu untersuchen sein wird, in welchen Bereichen welche Modellkonzepte eingesetzt werden müssen. Es soll versucht werden, an der Erdoberfläche gemessene Methankonzentrationen zu reproduzieren. Begleitend werden Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt, die auch Abschätzungen zu Auswirkungen von Unsicherheiten in den Modellparametern auf die Simulationsergebnisse enthalten werden. Anhand dynamischer Ereignisse, z.B. Luftdruckschwankungen, soll die Prognosefähigkeit des Modells überprüft werden. Aufgrund der zu erwartenden großen Auswirkungen von Unsicherheiten auf die Methankonzentrationen an der Erdoberfläche ist zu erwarten, dass Bandbreiten von Ergebnissen versehen mit Auftrittswahrscheinlichkeiten angegeben werden.

Mit einem prognosefähigen Modell können dann verschiedene Szenarien berechnet werden, z.B. zur optimalen Positionierung von Entlastungsbohrungen [7]. Wir gehen davon aus, dass die an Westfalen gewonnen Erkenntnisse auf andere Bergwerke übertragbar sein werden.

Literaturverzeichnis:

- 1- Breiting, T., Hinkelmann, R. and Helmig, R. (2000): Modeling of Hydrosystems with MUFTE-UG: Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface, 4th International Conference on Hydroinformatics, Iowa, USA
- 2- Breiting, T., Hinkelmann, R. und Helmig, R. (2000): Modellierung und Analyse von Mehrphasenprozessen zur Simulation von Methanausgasung im Untergrund, Wissenschaftlicher Bericht, Institut für ComputerAnwendungen im Bauingenieurwesen, Technische Universität Braunschweig
- 3- Breiting, T., Hinkelmann, R. und Helmig, R. (2003): Kopplung von hydroinformatischen Methoden und Techniken für die Simulation von Gas-Wasser-Strömungsprozessen im Untergrund, Oberhausener Grubengastage, Oberhausen.
- 4- Helmig, R., Class, H., Huber H., Sheta, H., Ewing, R., Hinkelmann, R., Jakobs, R. and Bastian, P. (1998): Architecture of the Modular Program System MUFTE-UG for Simulating Multiphase Flow and Transport Processes in Heterogeneous Porous Media, Mathematische Geologie, 2
- 5- Helmig, R. (1997): Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface - A Contribution to the Modeling of Hydrosystems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany
- 6- Hinkelmann, R., Sheta, H., Class, H., Sauter, E.J., Helmig, R., and Schlüter, M. (2002): Numerical Simulation of Freshwater, Salt Water and Methane Interaction Processes in a Coastal Aquifer, IMA Volumes in Mathematics and its Applications, Volume 131: Confinement and remediation of Environmental Hazards and Resource Recovery, Editor: Chadam, J. Cunningham, A., Ewing, R.E., Ortoleva, P. & M. Wheeler, Springer-Verlag, Tokyo, Berlin, New York
- 7- Kobayashi, K., Hinkelmann, R., Class, H., Shoemaker, C. and Helmig, R. (2002): Development of an Optimisation Method for Methane Extraction in the Subsurface, Workshop Porous Media, Blaubeuren
- 8- Müller, W., Hewig, R. und Kunz, E. (1995): Stellungnahme zur Gasführung des Deckgebirges sowie des Oberkarbons im Ruhrgebiet und ihre Bedeutung für Explorationsbohrungen, DMT-Bericht Best-Nr: 02402-69650-1001

- 9- Pollak, R. und Christensen, J., (1987): Berechnung instationärer Strömungsvorgänge in Wernetzen, Glückauf-Forschungshefte 48 Nr. 1
- 10- Silberhorn-Hemming, A. (2002): Modellierung von Kluftaquifersystemen: Geostatistische Analyse und deterministisch-stochastische Kluftgenerierung, Dissertation, Mitteilungen Heft 114, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

5. Abbildungen

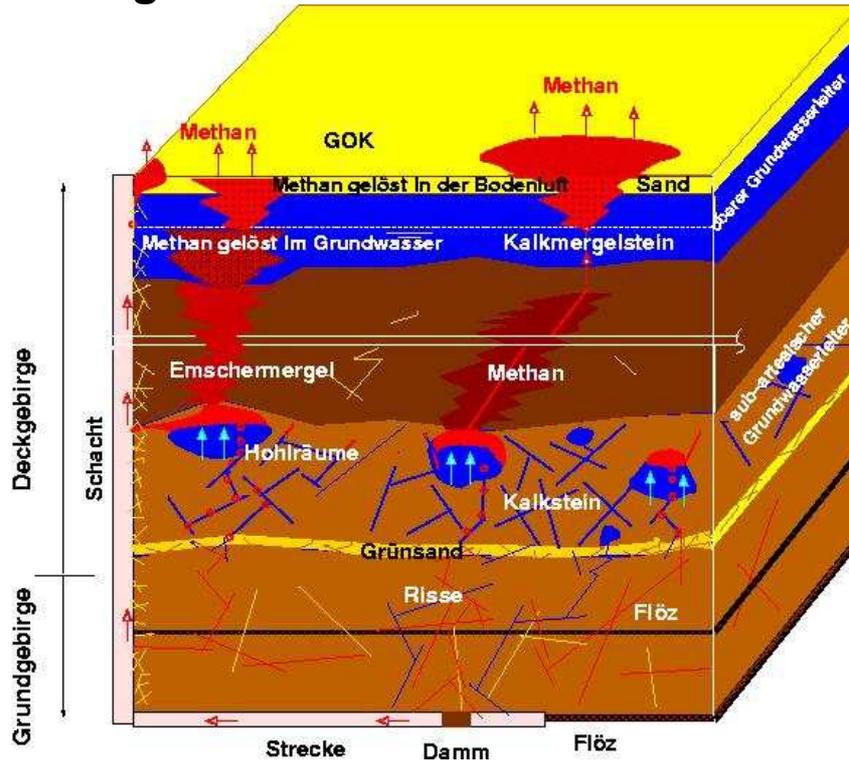


Abbildung 1: Geologische Struktur der Schichten

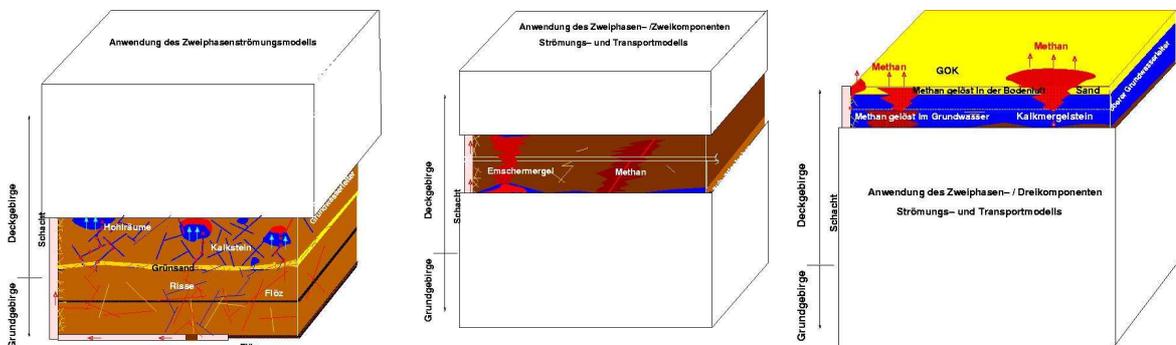


Abbildung 2: Anwendung der Modelle

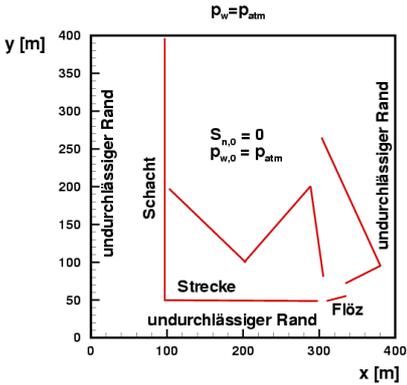


Abbildung 3: Anfangs- und Randbedingungen

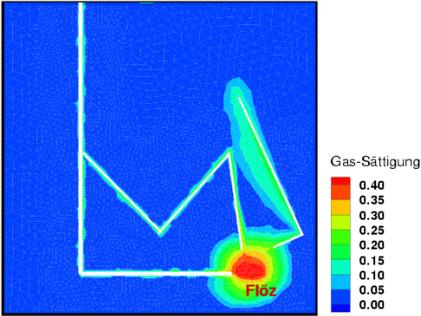


Abbildung 4: Numerische Ergebnisse der Methansättigung

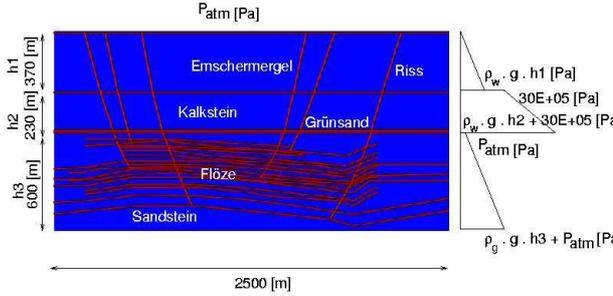


Abbildung 5: Anfangs- und Randbedingungen

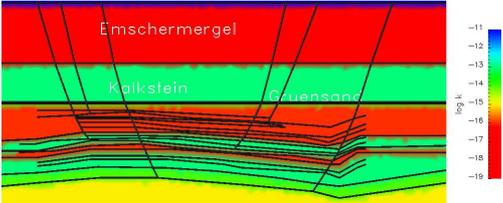


Abbildung 6: Permeabilitätsverteilung

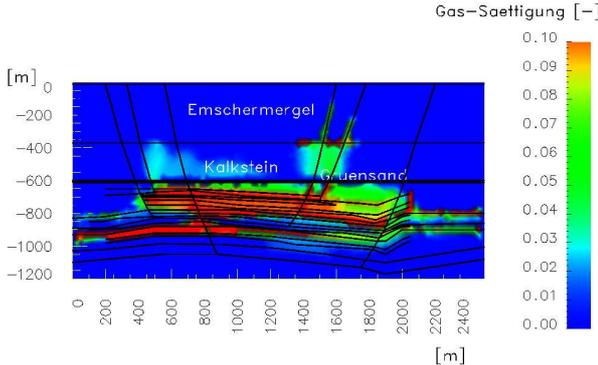


Abbildung 7: Methanausbreitung nach t1

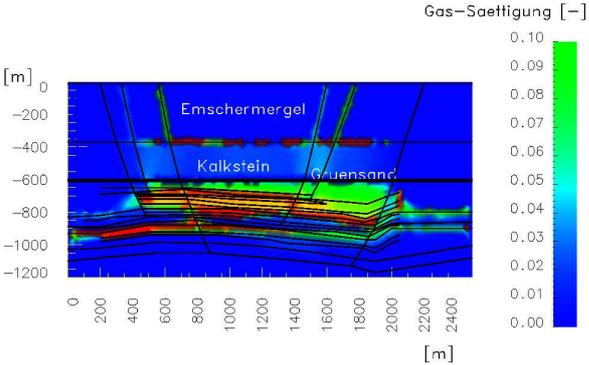
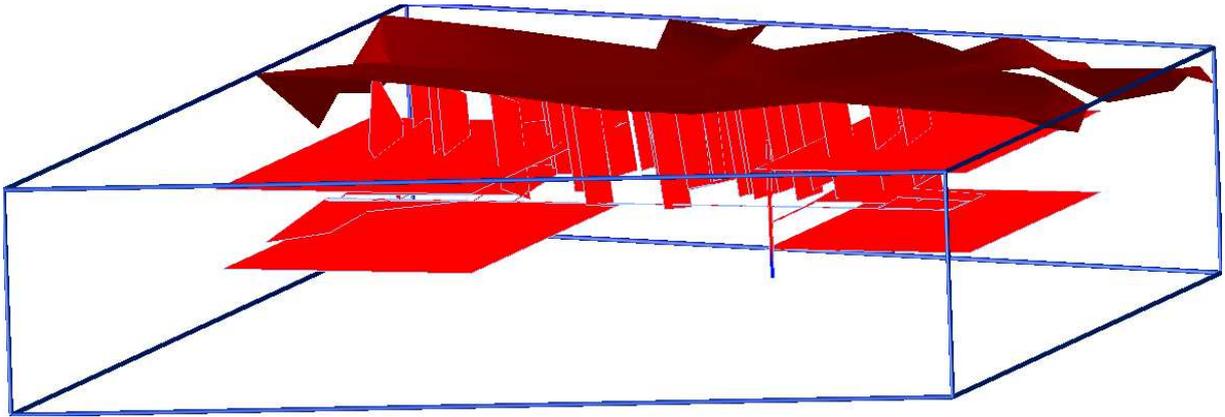


Abbildung 8: Methanmigration nach t2

Abbildung 11: Isofläche der Methansättigung ($S_g=0.1$ [-])

6. Tabellen

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften der Schicht bzw. Klüfte

	Permeabilität [m^2]	Porosität %[-]
Schicht	10^{-16}	5
Kluft (Damm)	10^{-08}	90
Kluft (Matrix)	10^{-11}	10