

# **Bewertung des technischen Zustandes und des wirtschaftlichen Betriebes von wasserführenden Porenspeichern**

**Wolfgang Schacht (VDI)**

**Wasserführende Porenspeicher, Programmpaket MATLAB<sup>®</sup>, Speichermodell, Speichersimulation, Gas-Wasser-Kontakt, Speicherdruck, Hysteresis, Porenvolumen, Kissengasvolumen, Speicherverluste, Wirtschaftlichkeit**

**Im vorliegenden Artikel wird der Einsatz einfacher Modelle für die Simulation des zyklischen Prozesses der Ein- und Auspeisung von Gasen in wasserführenden Porenspeichern vorgestellt. Die Berechnung und graphische Auswertung solcher wichtiger Speicherparameter, wie die Lage des Gas-Wasser-Kontaktes, der mittlere gewichtete Speicherdruck und das Druck – Volumen – Diagramm (Hysteresis) erfolgt mit speziell entwickelten Toolboxen des Programmpaketes MATLAB<sup>®</sup>.**

**Durch zielgerichtete Anpassung der aus Modelldaten gewonnenen Hysteresis an praktische Messdaten (Parameteridentifikation) können wertvolle Informationen für die Bewertung des technischen Zustandes und für die vorausschauende wirtschaftliche Betriebsführung von Untertagespeichern in wasserführenden Speicherschichten gewonnen werden. Ein Schwerpunkt bildet die Berechnung des effektiven Poren- und Kissengasvolumens und die sich daraus ergebenden Gasverluste im Speicher.**

**The article deals with implementation of simple models for cyclic processes simulation of gas injection and withdrawal in water drive porous underground storage reservoirs. The calculation and graphic evaluation of such important storage parameters as the position of gas-water contact, mid-weight storage pressure and pressure-volume-diagram (hysteresis charts) are made with toolboxes of MATLAB<sup>®</sup> - Software, which were worked out for this purpose.**

**Due to well mapped-out adjustment of modelled hysteresis to practical measurements (parameter identification) important information can be obtained for evaluation of technical conditions as well as foresighted economic operation of underground storages in water drive storage levels. The main**

emphasis is put to the calculation of the actual porous and cushion gas volume and resulting gas losses in underground storage reservoirs.

## 1. Einleitung

Die Untertagespeicherung von Erdgas ist ein im hohen Maße effizienter Prozess, der die konstanten Erdgaslieferungen durch lange Transitleitung mit dem saisonalen und wetterabhängigen Marktbedarf in Übereinstimmung bringt. Während des Sommers, wenn die Lieferungen über dem Bedarf liegen, werden die frei verfügbaren Erdgasmengen in die Untertagespeicher eingespeist. Während des Winters, wenn der Bedarf über den Lieferungen liegt, wird dieses Gas dem Speicher wieder entnommen. Die Untertagespeicherung erfolgt entweder in wasserführenden porösen und permeablen Gesteinsschichten oder in großen Hohlräumen (Kavernen), die durch Aussolen in bestimmten Salzformationen geschaffen werden.

Weil Erdgas in wasserführenden Porenspeichern stets unter einem hohen Druck steht und außerdem leichter als andere Fluide in die Poren, feinen Risse und isolierten Hohlräume des Speichergesteins eindringen kann, neigt es zur Migration und Versickerung. Wesentliche Faktoren, die zu einer Abwanderung des Gases bei-tragen, sind:

- die Druckgradienten im Speicher;
- die Permeabilität und Integrität des Gesteins;
- die Löslichkeit des Gases im Lagerstättenwasser;
- die Geometrie der Speicherschicht;
- die Fehler und Defekte in der geologischen Struktur des Speichers;
- die Untertage-Ausrüstung (Equipment) des Speichers sowie die
- die Art und Weise seiner operativen Steuerung.

Im Verlaufe der über viele Jahrzehnte dauernden Nutzung von wasserführenden Porenspeicher entstehen in der Regel Gasverluste, die durch eine rein buchhalterische Erfassung der ein- und ausgespeisten Mengen, ihre Saldierung und Zuordnung zu den Kategorien „Arbeitsgas“ und „Kissengas“

nicht quantifiziert werden können. Diese Verluste führen zu einer Abnahme der Erdgasbestände und damit zu einer geringeren Lieferfähigkeit. Neben den wirtschaftlichen Risiken für die Speicherunternehmen können durch unkontrollierte Gasabwanderungen auch die Umwelt sowie Menschen und Güter gefährdet werden [1, 2].

Zuverlässige Informationen über die Höhe der Gasverluste in wasserführenden Porenspeichern müssen aus dem funktionalen Zusammenhang zwischen der ein- bzw. ausgespeister Gasmenge und dem mittleren Speicherdruck, d.h. aus gemessen und berechneten Größen abgeleitet werden. Grundlage dafür bilden einfache Modelle für die Simulation der zyklisch ablaufenden Filtrations- und Speicherprozesse. Für die Berechnung und graphische Auswertung solcher wichtiger Speicherparameter wie die Lage des Gas-Wasser-Kontaktes, der mittlere gewichtete Speicherdruck und das Druck – Volumen – Diagramm (Hysteresis) werden in dieser Arbeit speziell entwickelte Toolboxen des Programmpaketes MATLAB® [3] eingesetzt.

Durch zielgerichtete Anpassung der aus Modelldaten gewonnenen Hysteresis an praktische Messdaten (Parameteridentifikation) und ihre graphische Auswertung können konkrete Aussagen über die Gasmigration und Gasversickerung in einem wasserführenden Porenspeicher gewonnen werden. Das im Artikel vorgestellte Verfahren ist nicht nur für klassische Aquifer-Speicher, sondern auch für erschöpfte bzw. teilerschöpfte Erdgaslagerstätten mit einem Wassertrieb in der Randzone einsetzbar.

## 2. Berechnungsgrundlagen

Das von dem französischen Ingenieur Henry Darcy (1803 – 1858) entdeckte und 1856 erstmals publizierte Filtrationsgesetz beschreibt in hervorragender Art und Weise den physikalischen Zusammenhang zwischen der Filtrationsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten und Gasen in einem permeablen Medium und den für dieses Transportphänomen verantwortlichen Kräften, dem Druckgradienten und der Schwerkraft. In seiner klassischen Schreibweise lautet es [4]:

$$v_i = -\frac{k_{i,j}}{\mu} (\nabla_j p + \rho g_j). \quad (1)$$

Der Permeabilitätskoeffizient  $k_{i,j}$ , ein Tensor zweiter Ordnung, definiert in (1) den allgemeinen Fall von anisotropen Filtrationseigenschaften des Speichergesteins. Für den speziellen Fall eines Gesteins mit isotropen Filtrationseigenschaften, d.h. mit gleichen bzw. sehr ähnlichen  $k$ -Werten in allen Richtungen ( $k_{i,j} = k \cdot \delta_{i,j}$ ) lautet das vereinfachte Gesetz von Darcy:

$$v_i = -\frac{k}{\mu} (\nabla_j p + \rho g_j). \quad (2)$$

Ist die Mächtigkeit einer Speicherschicht im Vergleich zu seiner linearen Ausdehnung gering, so lassen sich über die Vektor- und Gradientendarstellung von (2) aus dem Modell „Dünne Speicherschicht“ die folgenden invarianten Komponenten für die Berechnung der Filtrationsgeschwindigkeiten ableiten:

$$\begin{aligned} v^1 &= -\frac{k}{\mu} \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \\ v^2 &= -\frac{k}{\mu} \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \\ v^3 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Hier ist

$$\Phi(x, y, t) = p(x, y, t) + \rho \cdot g \cdot z(x, y). \quad (4)$$

das so genannte Filtrationspotential, dessen Ableitung gleich Null ist und das deshalb nur in den Punkten  $(x, y)$  auf der Oberfläche der Speicherschicht berechnet werden muss.

Die Gleichungen (3) und (4) bilden die Grundlage für die erfolgreiche Lösung, Analyse und Simulation einer Vielzahl von Filtrationsaufgaben. Unter Einbeziehung von entsprechenden Massenbilanzen sowie der konkreten Anfangs- und Randbedingungen lassen sich mit ihnen relativ einfache, in der Praxis effektiv einsetzbare Speichermodelle ableiten. Beispiele dafür sind in [5, 6, 7, 8, 9] zu finden.

## 2.1 Lineares Speichermodell

Bild 1 zeigt den Schnitt durch eine dünne Speicherschicht mit der durchschnittlichen Mächtigkeit  $h$ , die gegenüber der horizontalen Oberfläche

den Neigungswinkel  $\gamma$  besitzt. Die Ein- und Ausspeisung des Erdgases erfolgt über eine Reihe von Sonden, die rechtwinklig zur  $x$  – Achse in der Ebene  $x = 0$  angeordnet sind.

In der Ebene  $x = L$  sei eine Reihe von Entlastungssonden installiert, die in der sich herausbildenden Kontur mit dem Filtrationspotential  $\Phi = const$  einen konstanten Druck  $p_{SK}$  gewährleisten. Das Modell unterstellt einen horizontalen Gas-Wasser-Kontakt (GWK) in der Ebene AB, wobei  $x = a(t)$  die Bewegung des Punktes B längs der First in der Speicherschicht beschreibt.

Die Grenzen OAB und ABC teilen die Speicherschicht in zwei Teile: im ersten Teil befindet sich Erdgas, im zweiten – Lagerstättenwasser.

Der Druck  $p(t)$  in der Gasblase hängt dank der geringen Zähigkeit des Mediums Gas nicht von den Raumkoordinaten ab. Das Filtrationspotential

$$\Phi(x, t) = p(x, t) + \rho \cdot g \cdot z(x) \quad (5)$$

im wasserführenden Gebiet und die Filtrationsgeschwindigkeit  $v(x, t)$  des Wassers sind mit dem Filtrationsgesetz von Darcy

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad (6)$$

verknüpft.

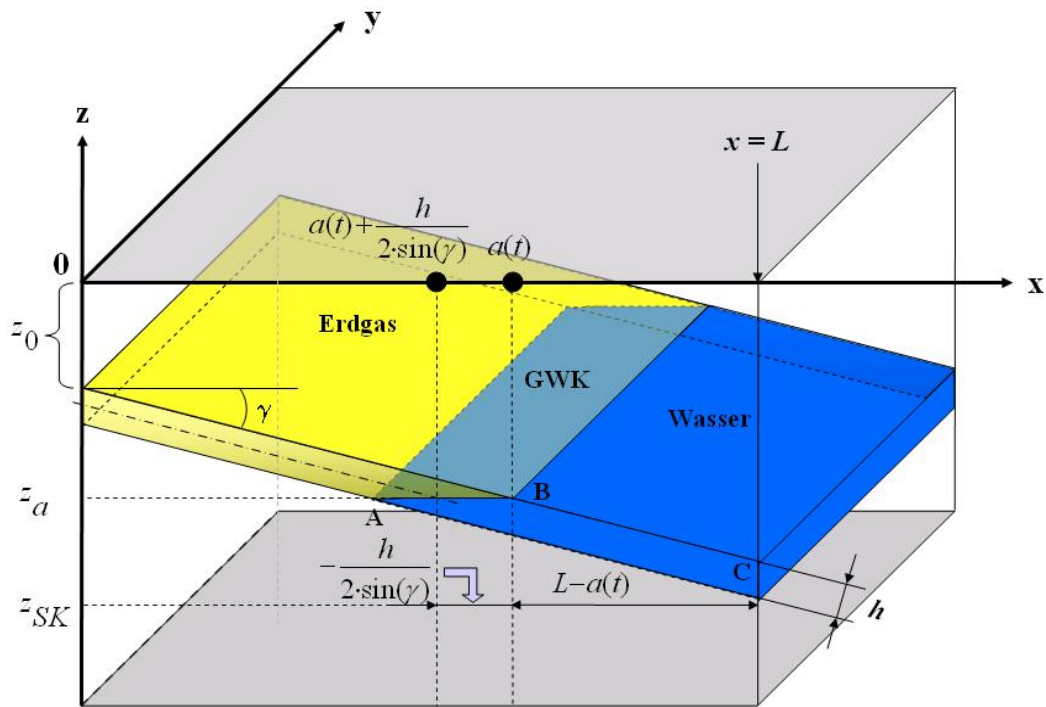


Bild 1: Lineares Speichermodell

Weil Wasser ein inkompressibles Medium ist, hängt seine Strömungsgeschwindigkeit nicht von der  $x$ -Koordinate ab. Das Filtrationspotential  $\Phi$  im wasserführenden Gebiet der Speicherschicht ändert sich deshalb nur linear. Die Gleichung (6) lautet deshalb:

$$v = -\frac{k}{\mu_w} \frac{\Phi[a(t), t] - \Phi_{SK}}{a(t) - L}, \quad (7)$$

bzw.

$$v = -\frac{k}{\mu_w} \frac{[p(t) - p_{SK}] + \rho_w g \cdot (z_a - z_{SK})}{a(t) - L}, \quad (8)$$

und schließlich

$$v = -\frac{k}{\mu_w} \left( \frac{p(t) - p_{SK}}{a(t) - L} + \rho_w g \cdot \tan(\gamma) \right). \quad (9)$$

Aus der Bedingung an der Grenze des GWK

$$m \cdot \frac{\partial a}{\partial t} = v \quad (10)$$