



CO₂-Speicherung im Untergrund: das Unsichtbare sichtbar gemacht

Dr. Frauke Schäfer



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

CO₂-Speicherung...
...was ist das eigentlich?

Wie sieht so ein Speicher
überhaupt aus?

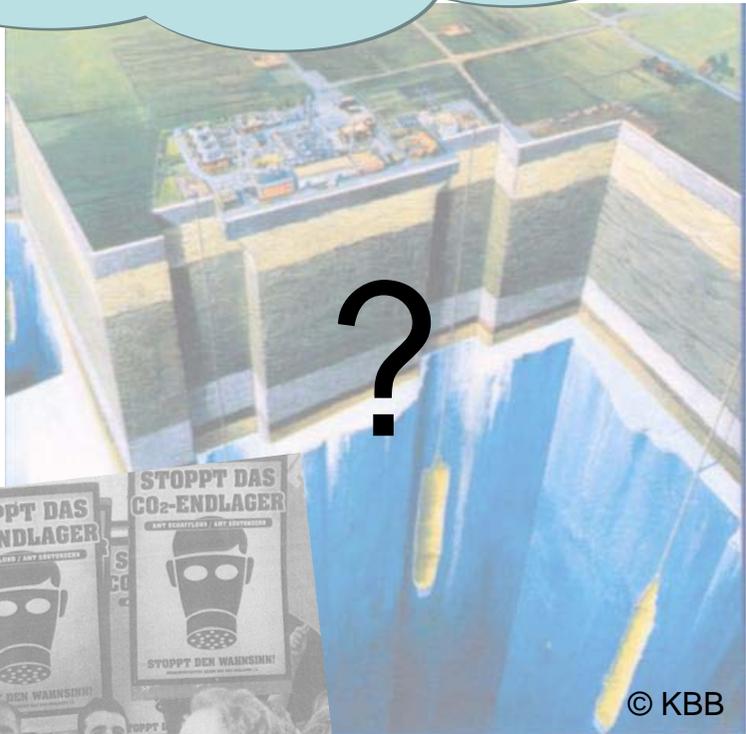
Woher weiß ich, was
das CO₂ im
Untergrund macht?

...?





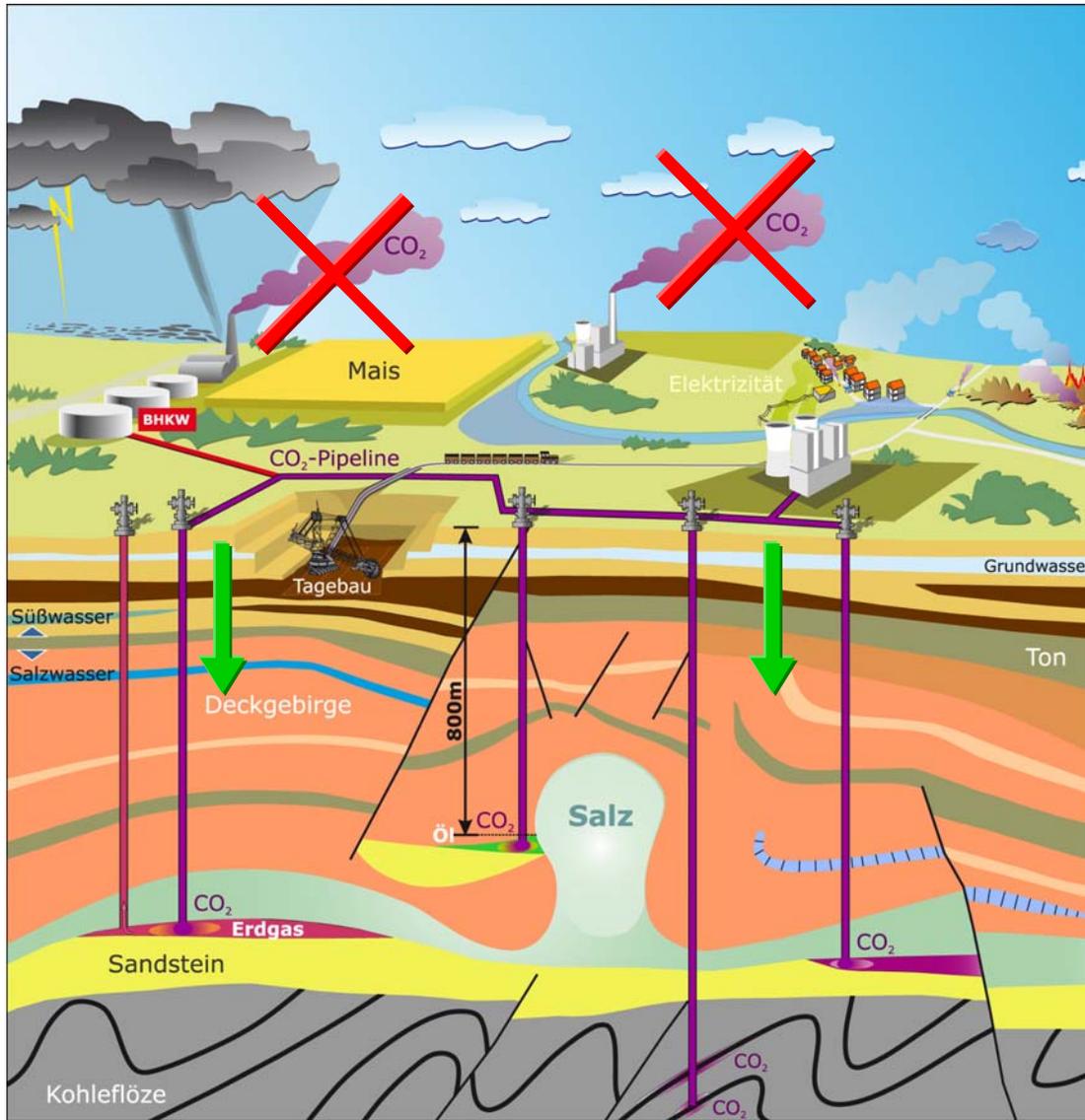
CO₂-Speicherung...
...was ist das eigentlich?



© KBB



Einleitung

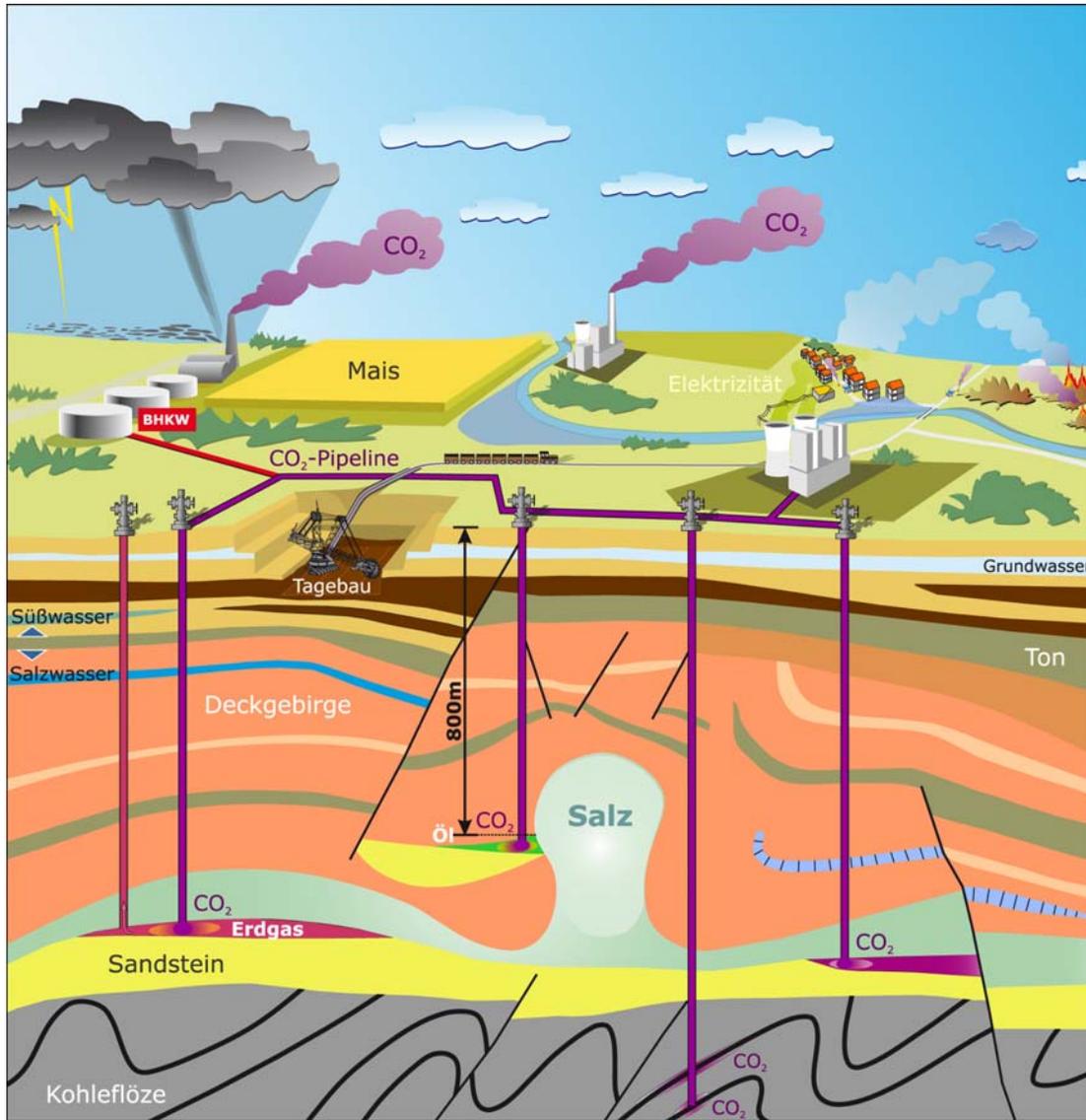


**CO₂-Speicherung ist...
...eine Maßnahme zum
Klimaschutz!**

Die Idee:

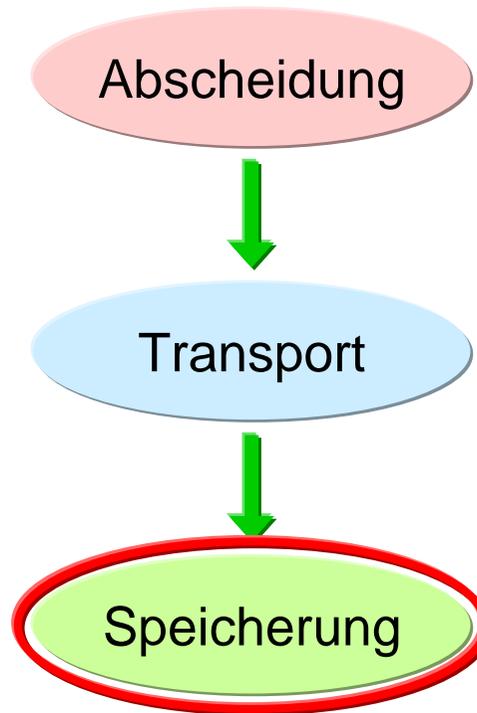
Anstatt CO₂ in die
Atmosphäre zu entlassen, soll
es dahin zurück, wo es
ursprünglich (als Kohle, Öl
oder Gas) herkam:

in den tiefen Untergrund



Zeichnung: U. Benitz

Carbon Capture and Storage (CCS) =



von industriellem CO₂

Einleitung



© Vattenfall

Abscheidung

- „post combustion“: Abscheidung des CO_2 aus dem Rauchgas nach der Verbrennung
- „pre combustion“: Abscheidung des CO_2 aus dem Brennstoff vor der Verbrennung
- „oxyfuel“: die Verbrennung mit reinem Sauerstoff

Einleitung



© StatoilHydro, Vattenfall, E.ON Ruhrgas



Transport

Pipeline, Schiff oder LKW

Einleitung

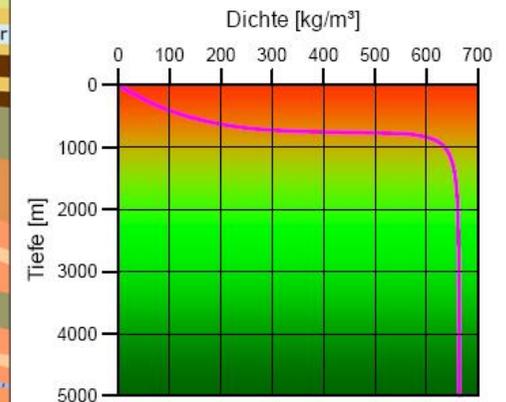
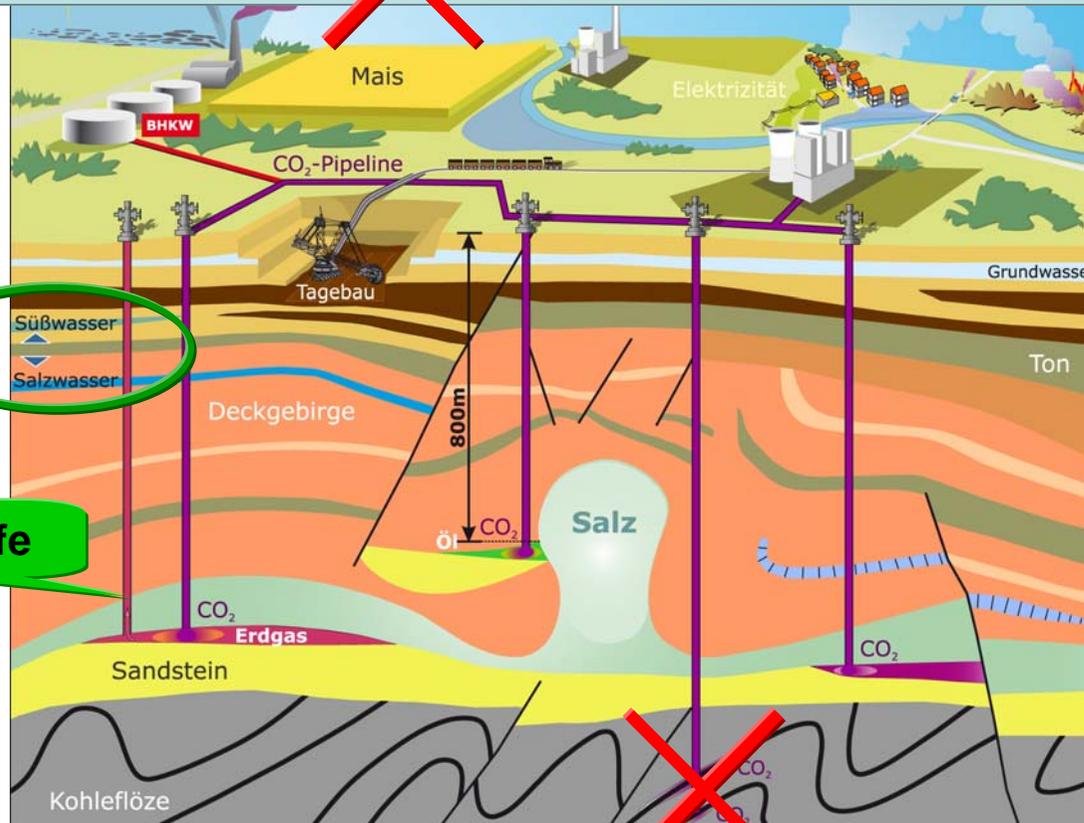


Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Speicherung

- Ausgeförderte Erdöl- und Erdgasfelder
- Salinare Aquifere
- Nicht gewinnbare Kohleflöze



Zeichnung: U. Benitz

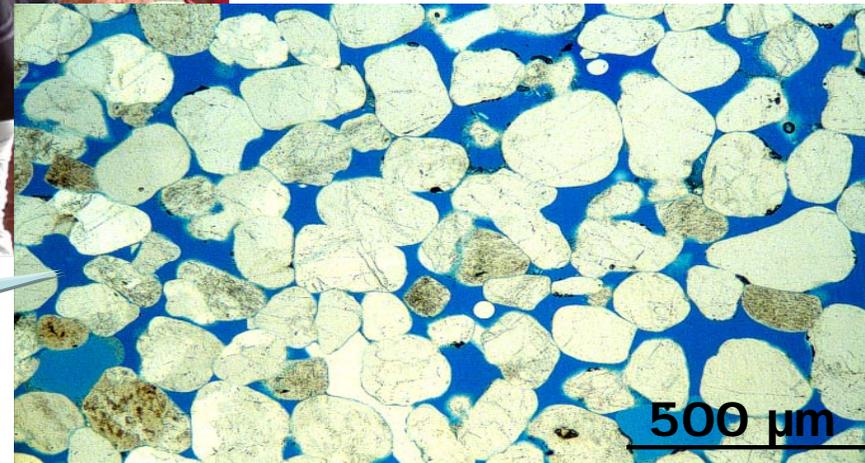
CO₂-Speicherung



im Gestein!



Mikroskopaufnahme eines Sandsteins
Porenraum = Speicherraum (blau)



Einleitung

Speicher- und Barrieregestein im Handstück

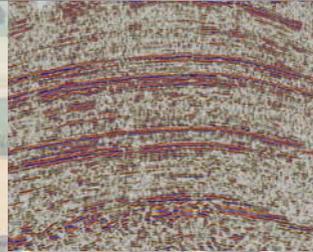
**Tonstein
bildet Barriere**

**Sandstein
nimmt Flüssigkeit auf**

Aber woher weiß ich, wo
geeignete Speicher und
Barrieren im Untergrund liegen?



Geologisches Modell

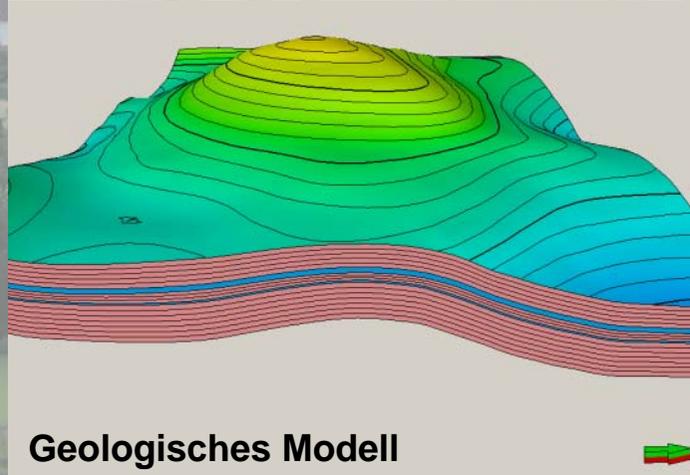
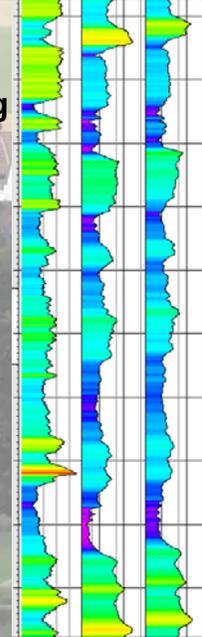


Reflektions-Seismik



Aufschluss

Bohrung



Geologisches Modell

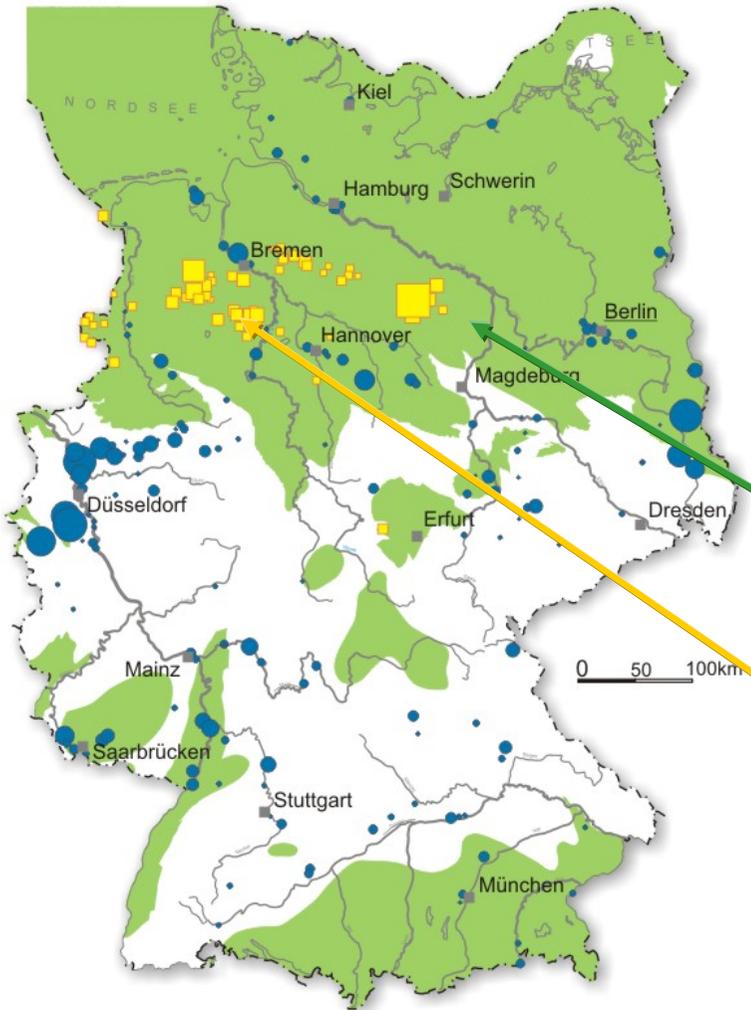


Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

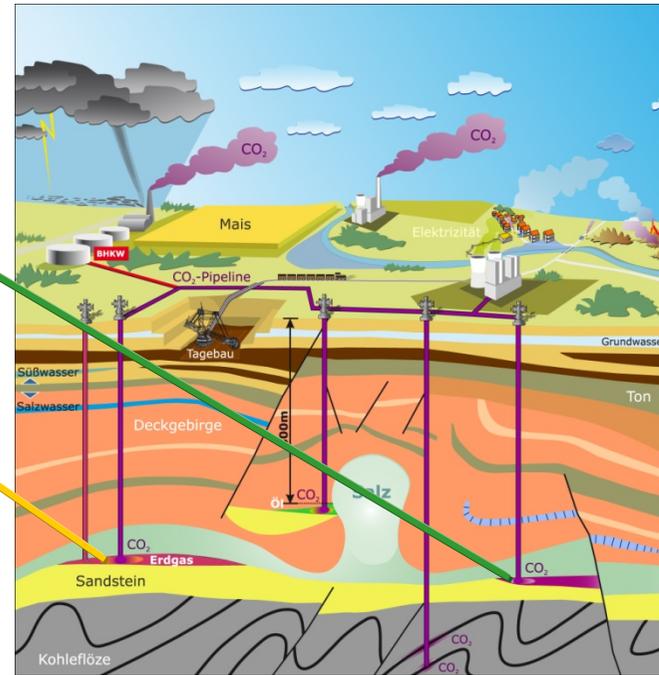
Geologisches Modell

Speicherkapazitäten in Deutschland



12-28 Gt

2,75 Gt



Zeichnung: U. Benitz

- Salinare Aquifere
- Erdgasfelder
- Nicht geeignet
- Kraftwerke und andere bedeutende CO₂-Quellen

Geologisches Modell

Geologische Modellierung



Seismische Interpretation (Strukturkarten)

Strukturbilanzierung

Bohrungslogs (z.B. Gamma Logs)

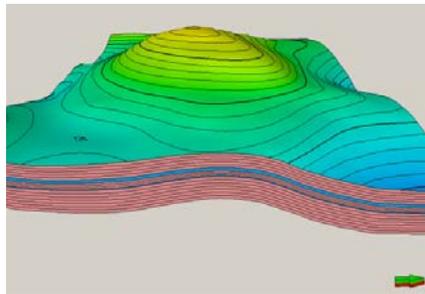
Petrographie

Korrelation von Bohrungen

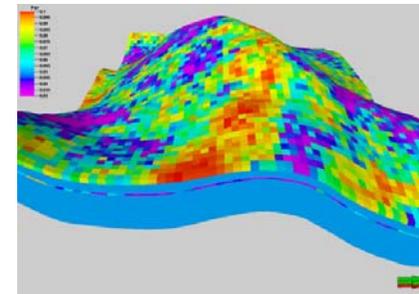
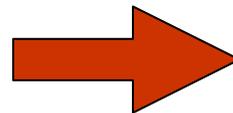
3D-Extrapolation

z.B. Porosität (aus Neutronen-, Dichte-, Akustik-Logs)

z.B. Permeabilität (Porosität, Labor, Produktionstests)



3D Horizonte



3D Zellen

Geologisches Modell



Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

Fertig mit dem geologischen Modell?

- ✓ Ausdehnung und Mächtigkeit der Speicher- und Barrieregesteine
- ✓ petrophysikalische Eigenschaften der Speicher- und Barrieregesteine
- ✓ Strukturmodell
- ✓ ggf. Störungseigenschaften (mechanisch und hydrologisch)
- ✓ Eigenschaften der Formationsfluide (Sole, Öl, Gas)
- **Erstellung eines geozellulären Modells („statisches“ Modell)**

Woher weiß ich, was das CO₂ im
Untergrund macht?



Numerische Simulation

Numerische Simulation („dynamisches Modell“)

- ✓ Methode zur Quantifizierung und Interpretation physikalischer Prozesse im Reservoir.
- ✓ Das Reservoir wird in eine Anzahl von diskreten 3D-Einheiten (Zellen) unterteilt.
- ✓ **Die Entwicklung der Reservoir- und Fluideigenschaften durch Raum und Zeit wird in einer Serie von diskreten Schritten modelliert. (Finite-Differenzen-Ansatz)**
- ✓ Die Gleichungen, die die physikalischen Prozesse beschreiben, werden für jede Zelle und für jeden Zeitschritt gelöst.
 - Für die numerische Simulation von CO₂-Flüssen braucht man:
 - ✓ Darcys Fließgesetz
 - ✓ Massenbilanzgleichung

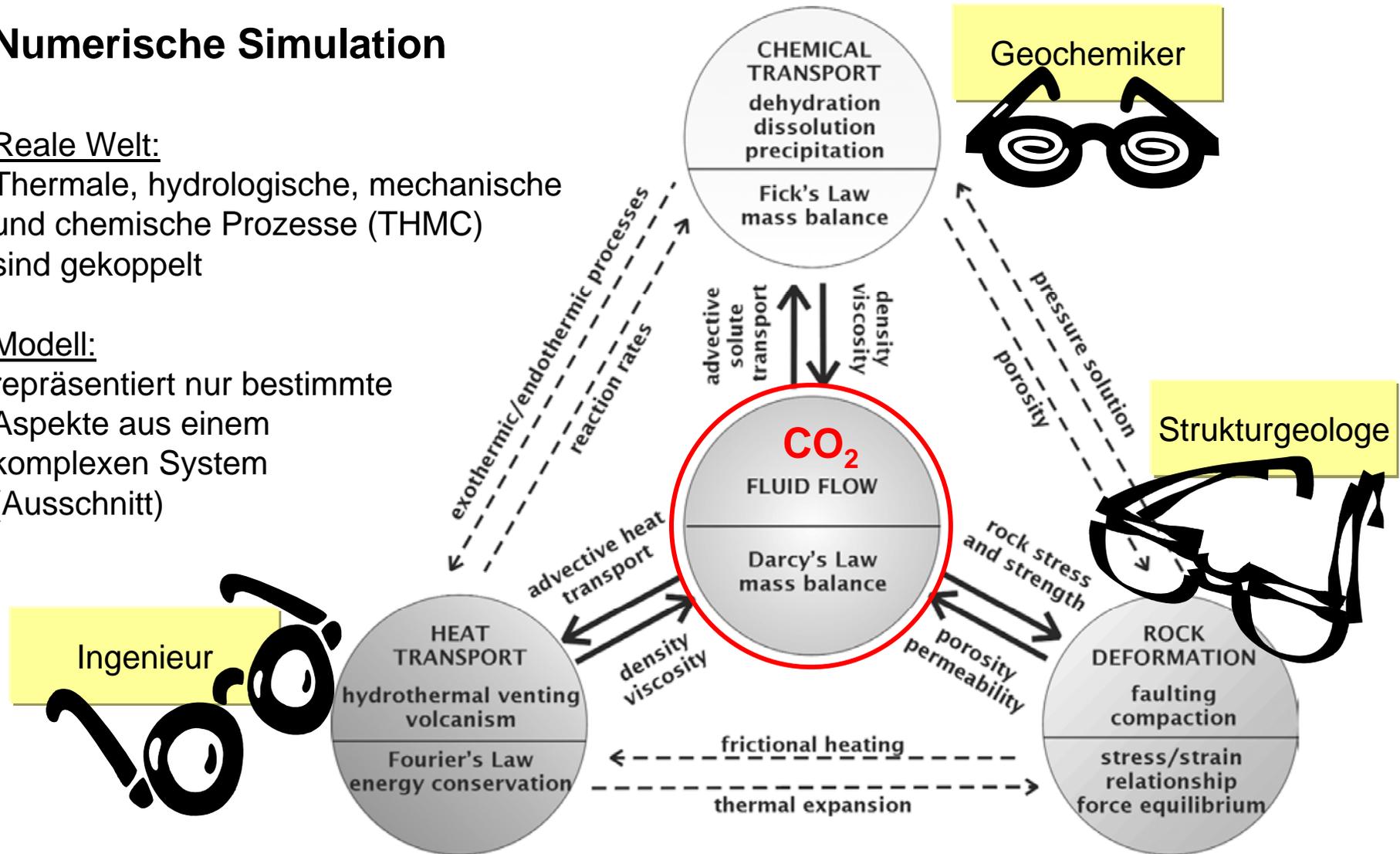
Numerische Simulation

Reale Welt:

Thermale, hydrologische, mechanische und chemische Prozesse (THMC) sind gekoppelt

Modell:

repräsentiert nur bestimmte Aspekte aus einem komplexen System (Ausschnitt)



Was muss ich bei der CO₂-Speicherung simulieren?

- CO₂ fließt durch die Injektionsbohrung
- CO₂ fließt von der Bohrung in den Speicher (die erste Gitterzelle)
- CO₂ fließt im Speicher (von einer Gitterzelle in die nächste)

CO₂ -Fluss = Transmissibilität * Mobilität * Potenzialunterschied



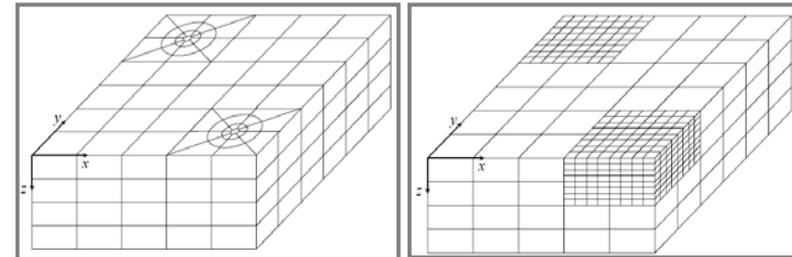
Numerische Simulation

für CO₂-Flüsse in
porösen Medien

Wichtige Modellparameter

1. Gitter

- kartesisch, radial, irregulär
- Zellgröße und -orientierung
- lokale Gitterverfeinerung (LGR)
- Regionen



Zhao (1994)

2. Gesteinseigenschaften

- Porosität, Permeabilität, relative Permeabilität, Kapillardrücke, Kompressibilität

3. Fluideigenschaften

- Initialbedingungen: Druck, Temperatur, Salinität, Sättigung, Dichte
- Zustandsgleichungen

Wichtige Modellparameter

für CO₂-Flüsse in
porösen Medien

4. Injektionsprogramm

- Bohrungen und Bohrungskomplettierungen
- Kontrollmechanismus für die Injektion (Druck oder Injektionsrate)
- Zeitplan
- Injektionsstrategie

5. Benötigte Ergebnisse

- Was? – z.B. Druck, CO₂ Sättigung, gelöstes CO₂, pH-Wert, injiziertes Gesamtvolumen, Injektionsrate
- Wo? – z.B. Feld, Bohrungsgruppe, Einzelbohrung, Komplettierung, Gitterzelle
- Wann? – z.B. nach x Stunden, Tagen, Jahren, Jahrhunderten, Jahrtausenden
- Format (Tabelle, Text, Gitter)

Gute Praxis

Welche
Injektionsstrategie
muss ich wählen?

Ist die Störung
dicht?

Welchen Druck hält
die Barriere aus?

1. Definiere deine Frage
2. Entscheide, welcher Maßstab wichtig ist (z.B. Porenraum, Bohrungsumfeld, Becken)
3. Mach es so einfach wie möglich
4. Definiere ein Referenzszenario („Base Case“)
5. Szenarien: variiere immer nur einen Parameter auf einmal (Sensitivitätsstudie)
6. Parameter, die keinen großen Einfluss haben, können dann für komplexere und gekoppelte Modelle konstant gehalten werden
7. Nutze LGR (lokale Gitterverfeinerung)

Beispiel 1: Buntsandstein in Niedersachsen

Fragen:

Wie beeinflussen laterale und vertikale Heterogenität die Entwicklung der CO₂-Fahne?

Wie durchlässig sind die Tonstein-Lagen?

Wahl des Maßstabs:

Speicherstruktur → einige km
(Submodell im cm-m-Maßstab wäre auch sinnvoll)



**Sandstein
(Speicher)**

**Tonstein
(Barriere)**

Mittlerer Buntsandstein im Aufschluss (Marienburg)

Beispiel 2: Salinärer Aquifer in Nordost-Deutschland

Fragen:

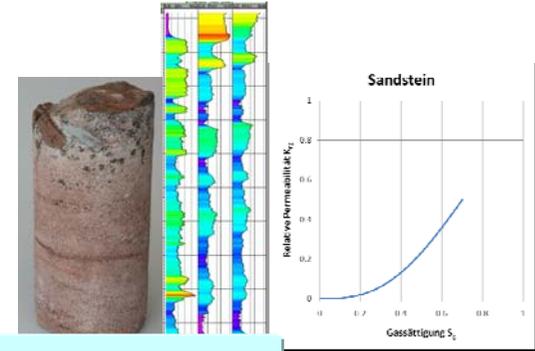
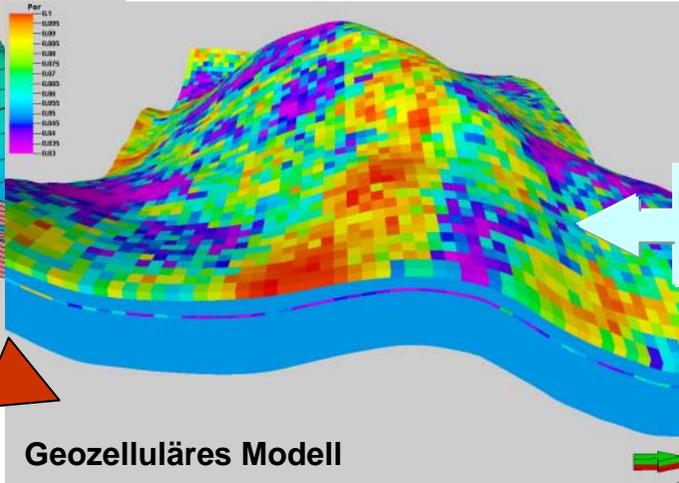
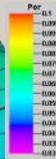
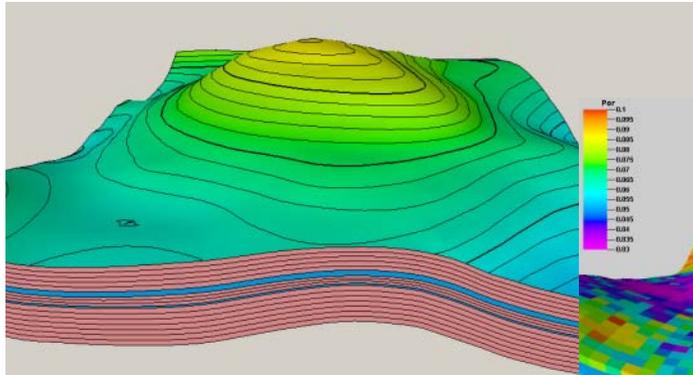
- Wie wirkt sich die Injektion von CO₂ im industriellen Maßstab regional aus?
- Beeinflusst sie die Nutzung benachbarter Strukturen?

➤ Maßstab:

Becken (km bis 10er km)

Die Ergebnisse beider Beispiele werden derzeit publiziert und können daher hier nicht online gestellt werden.

Geologisches Modell

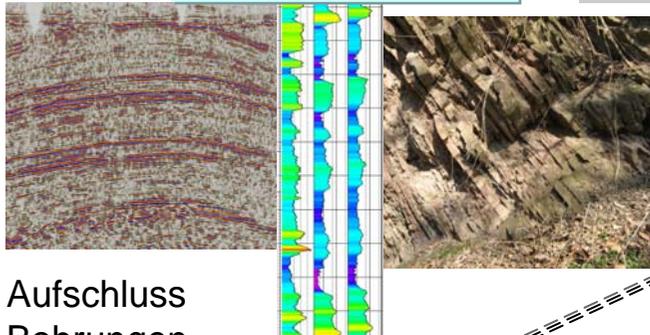


Gesteins-Geometrie

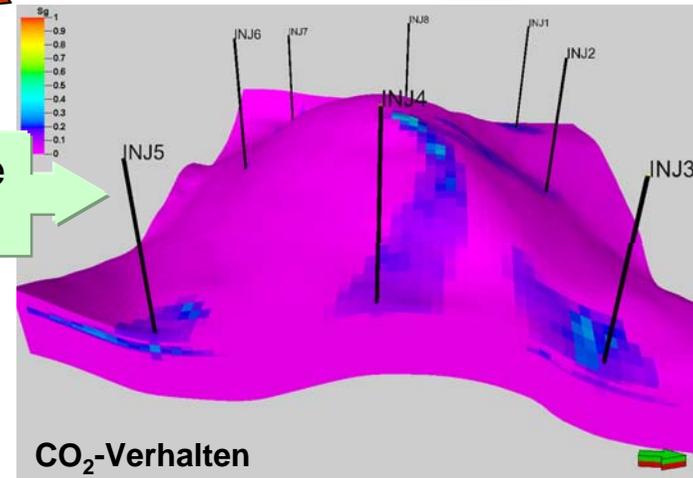
Gesteins-Eigenschaften

Labor Logs

Dynamisches Modell



Numerische Simulation



Fluid-Eigenschaften Injektionsprogramm

```

--MESSAGE
--100 1* 100 5* 100000 100000 2* /
TUNING
0.01 3452.5 0.01 7* /
14* /
20 1.50 7* /
TSTEP
1 364 29*365 /
--- Shut after 30 years and continue to simulate
MCOORINTE
INJ1 'GAS' 'SHUT' 'RATE' 500000 1* 800 3* /
INJ2 'GAS' 'SHUT' 'RATE' 500000 1* 800 3* /
INJ3 'GAS' 'SHUT' 'RATE' 500000 1* 800 3* /
INJ4 'GAS' 'SHUT' 'RATE' 500000 1* 800 3* /
INJ5 'GAS' 'SHUT' 'RATE' 500000 1* 800 3* /
INJ6 'GAS' 'SHUT' 'RATE' 500000 1* 800 3* /
INJ7 'GAS' 'SHUT' 'RATE' 500000 1* 800 3* /
INJ8 'GAS' 'SHUT' 'RATE' 500000 1* 800 3* /
TSTEP
10*3650 /
END
    
```

Zusammenfassung

Natürliche CO₂-Austritte



Laacher See



Laacher See



Ciampino, Italien (7 t pro Tag)



Wallenborner Brubbel

Diskussion



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER

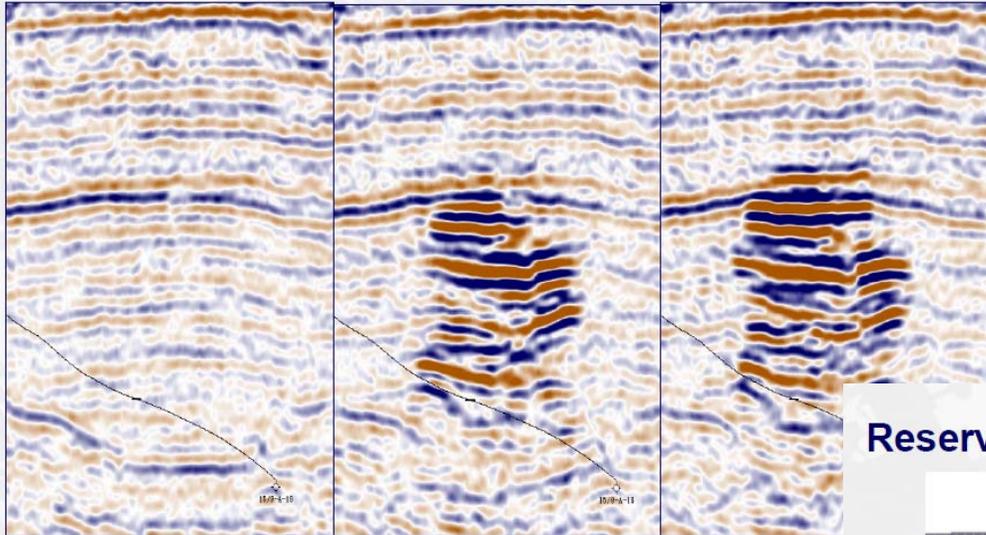
3D Seismic survey at Sleipner



1996

1999

2001

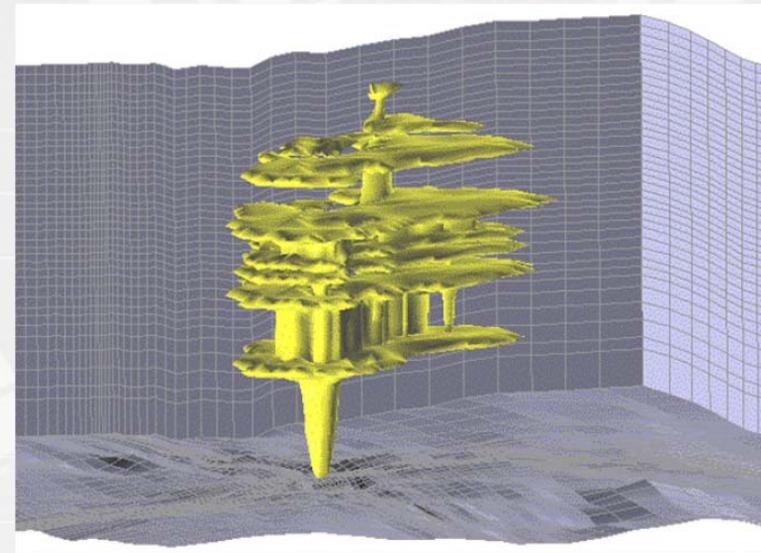


Source: SACS, Best Practise manual 2003

© Statoil

Monitoring

Reservoir model of CO₂ after 3 years



Source: SACS, Best Practise manual 2003

9

Diskussion



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

GEOZENTRUM HANNOVER