

Speicherung von CO₂ in Aquiferen – die Lösung unseres Klimaproblems?

Vortrag im Rahmen der mündlichen Promotionsprüfung

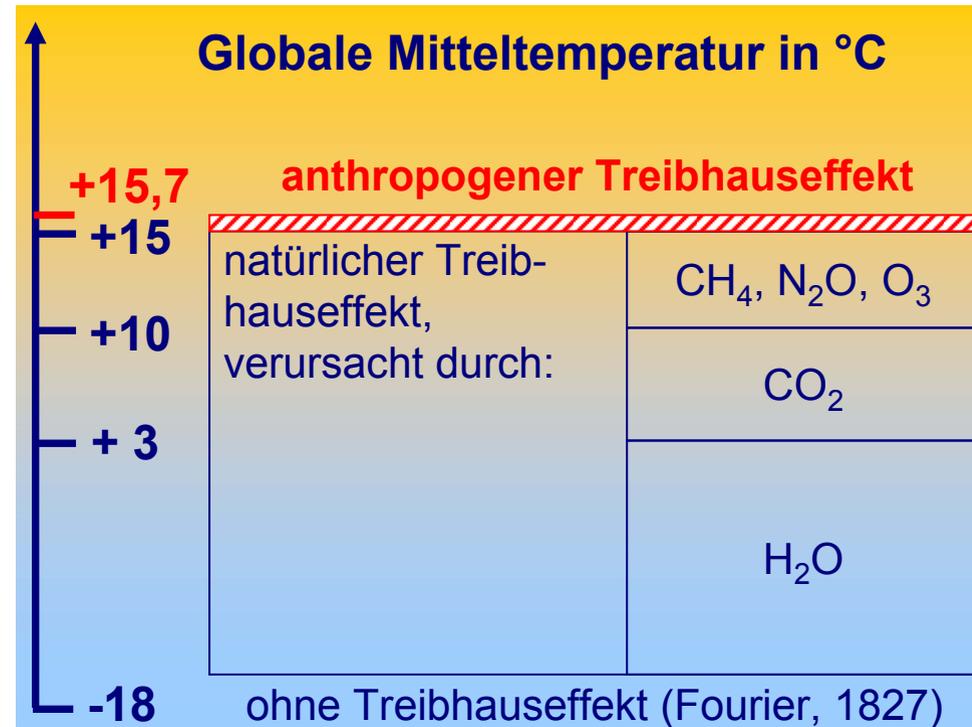
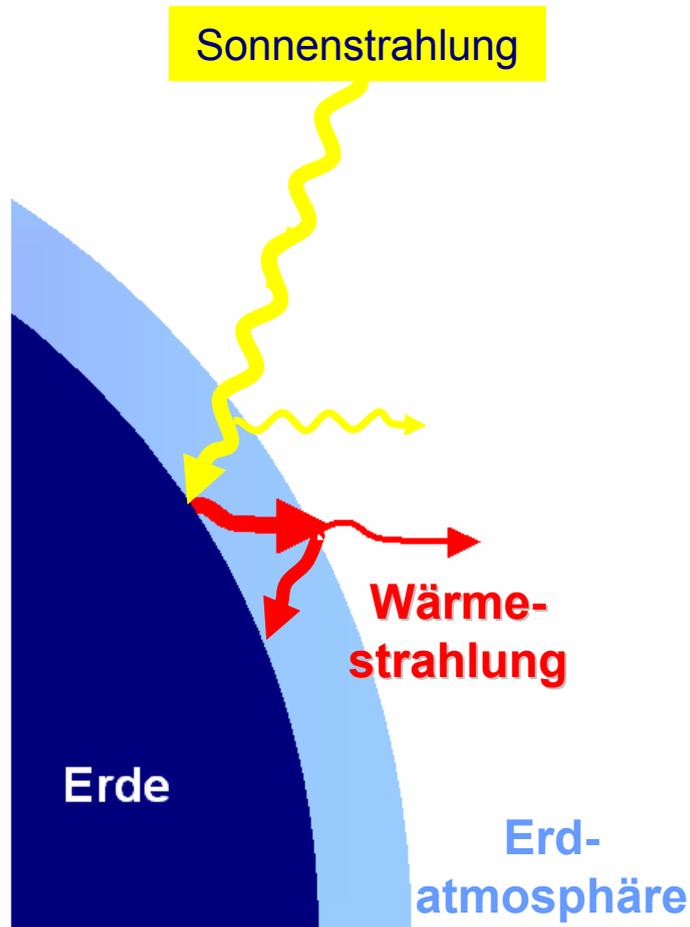
von

Matthias Finkenrath

RWTH Aachen, 23. Juni 2005

Bestandsaufnahme

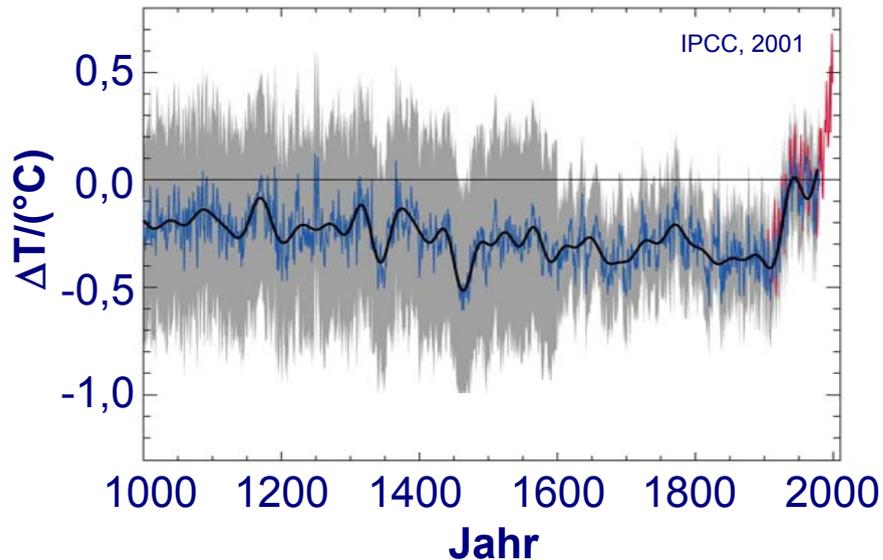
CO₂ und der Treibhauseffekt



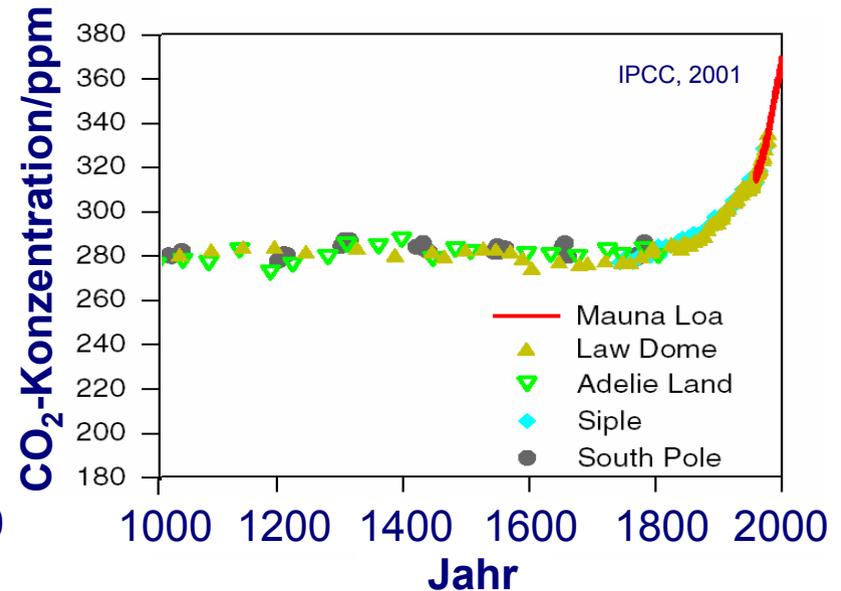
Bestandsaufnahme

CO₂ und der Treibhauseffekt

Mitteltemperatur der Nordhalbkugel
(Abweichungen vom 1961-1990
Durchschnittswert)



CO₂-Konzentration in der Atmosphäre



**CO₂ ist für über 50 % des anthropogenen Klimawandels
verantwortlich¹⁾**

Bestandsaufnahme

Entwicklung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes

CO ₂ -Gehalt 1860: 280 ppm	atm. CO ₂ -Gehalt	Verursacher glob. Temp.-Anstieg	Verursacher Meeresspiegel-Anstieg
seit 1860 durch Verbrennung von ~ 420 Gt C (fossile Brennstoffe)	368 ppm	0,7 °C	0,1 - 0,2 m
Bei Verbrennung aller fossilen Ressourcen und Reserven (~ 5000 GtC) ¹⁾ , keine Senken	~ 3100 ppm (Annahme: Kugelschale)	~ 6 - 8 °C*)	~ 1 - 2 m
IPCC-Prognosen bis 2100 ¹⁾	490 - 1250 ppm	1,4 - 5,8 °C	0,1 - 1 m

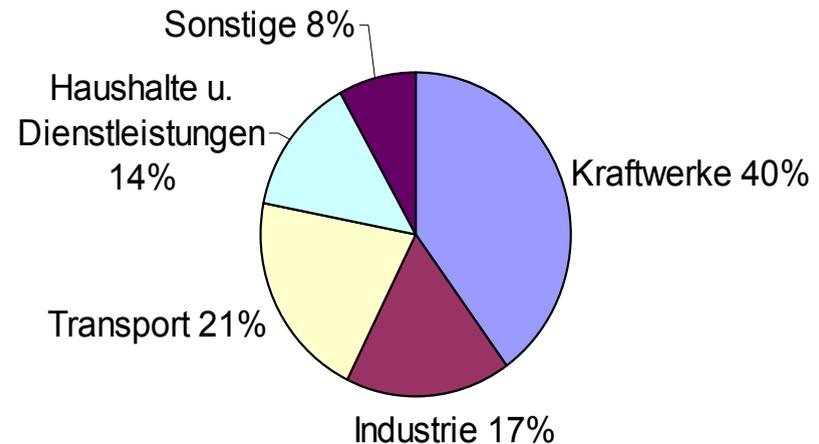
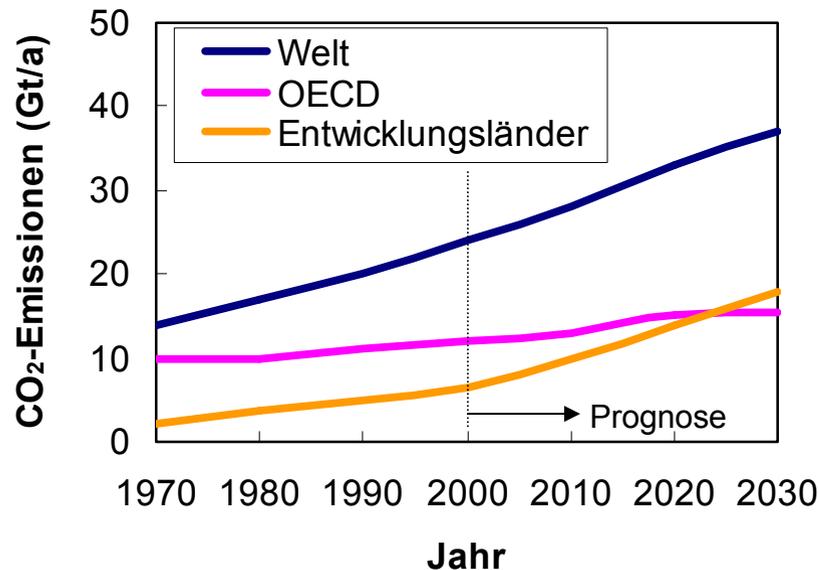
*) Annahme: 2 - 4 °C Temperaturerhöhung durch Verdopplung der CO₂-Konzentration

Klimaziel: Langfristige Stabilisierung bei 550 ppm CO₂
Maßnahmen: globale Emissionsreduktionen um ~ 70 % bis 2100! ²⁾

Bestandsaufnahme

Trends und Verursacher von anthropogenem CO₂

(Angaben weltweit ¹⁾)



CO₂-Emissionen durch Verbrauch fossiler Energieträger: 24 Gt_{CO₂}/a

Problemstellung

Wie lässt sich die Freisetzung dieser gewaltigen CO₂-Mengen vermeiden?



Lösungsstrategien:

**Rationellere
Energienutzung**

**Energieträger-
wechsel**

CO₂-Management

CO₂-Abtrennung und Speicherung

Problemstellung

Warum CO₂-Speicherung in Aquiferen?

Vergleich unterschiedlicher Speicheroptionen

	Oberirdisch	Ozeanisch	Unterirdisch
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Land-/Forstwirtsch. ■ Nutzung als techn. Hilfs- oder Rohstoff ■ als Karbonat 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Tiefseeinjektion 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geologische Lagerstätten ■ Aquifere
theor. Potential¹⁾	einige 10 Gt_{CO₂}	einige 1000 Gt_{CO₂}	einige 1000 Gt_{CO₂}
Speicher-dauer²⁾	max. Dekaden (Ausnahme: Karbonate)	bis zu 1000 a	bis zu 100.000 a
	geringes Potential und Speicherdauer	besonderes ökolog. Risiko	für langfristige Speicherung bes. interessant

Problemstellung

Warum CO₂-Speicherung in Aquiferen?

Weltweite Potentiale unterirdischer (geologischer) Speicher

	Geschätztes theoretisches Potential / Gt _{CO₂} ¹⁾	Statische Reichweite / a ^{*)}
Leere Öl-und Gasfelder	~ 900 – 1300	38 – 54
Nicht ausbeutbare Kohleflöze	60 – 150	2,5 – 6
Tiefe salzwasserführende Aquifere	6000 – 10 000	250 – 417

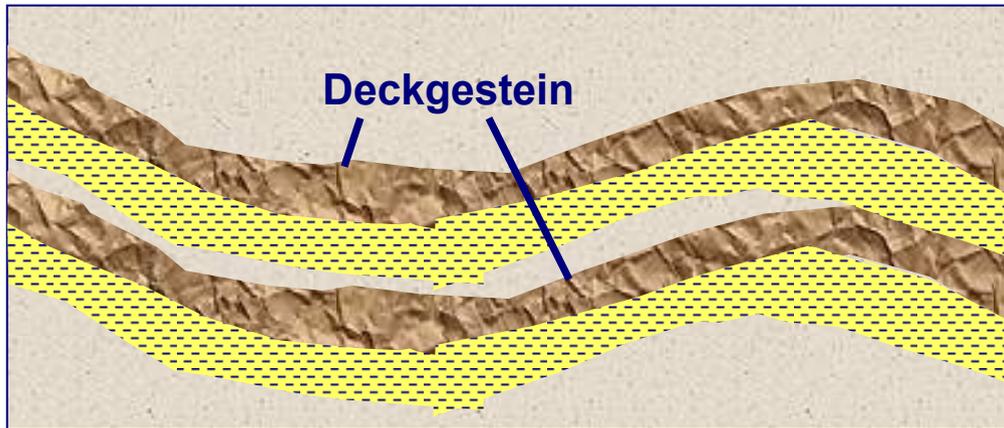
^{*)} bezogen auf 24 Gt globale CO₂-Emissionen in 2002

**mit Abstand größtes theoretisches CO₂-Speicherpotential
aller geologischen Speicher!**

Grundlegende Fragestellungen

- **Wie lassen sich Aquifere grundsätzlich charakterisieren?**
- **Was sind die wesentlichen Speichermechanismen in Aquiferen?**
- **Wie lässt sich die Speicherkapazität von Aquiferen abschätzen?**
- **Mit welchen Kosten sind die Abtrennung und Speicherung verbunden?**
- **Welche Risiken gehen von der Speicherung in Aquiferen aus?**

Charakterisierung von Aquiferen



**Aquifere = wasserführende
Sedimentschichten
(z.B. Mergelsteine)**

Unterteilung nach Gehalt an gelösten Feststoffen („Salzen“)¹⁾

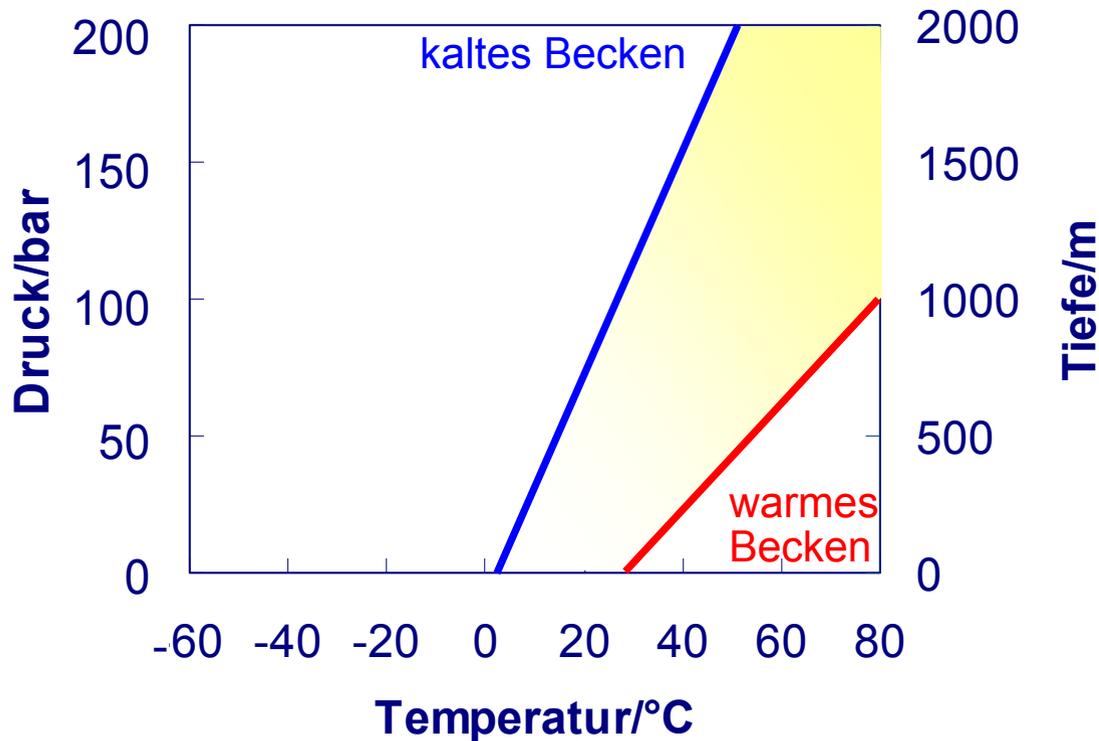
- < 1g/kg: Süßwassertaquifere
- > 1g/kg: Salzwassertaquifere

Unterteilung nach Tiefe²⁾

- < ~ 300 m: Umsatzwässer
- > ~ 300 m: Tiefenwässer, nicht am Wasserkreislauf beteiligt

⇒ Konfliktvermeidung mit Trinkwasser- oder landwirtschaftlicher Nutzung:
Auswahl **tiefer salzwasserführender („saliner“)** Aquifere für CO₂-
Speicherung

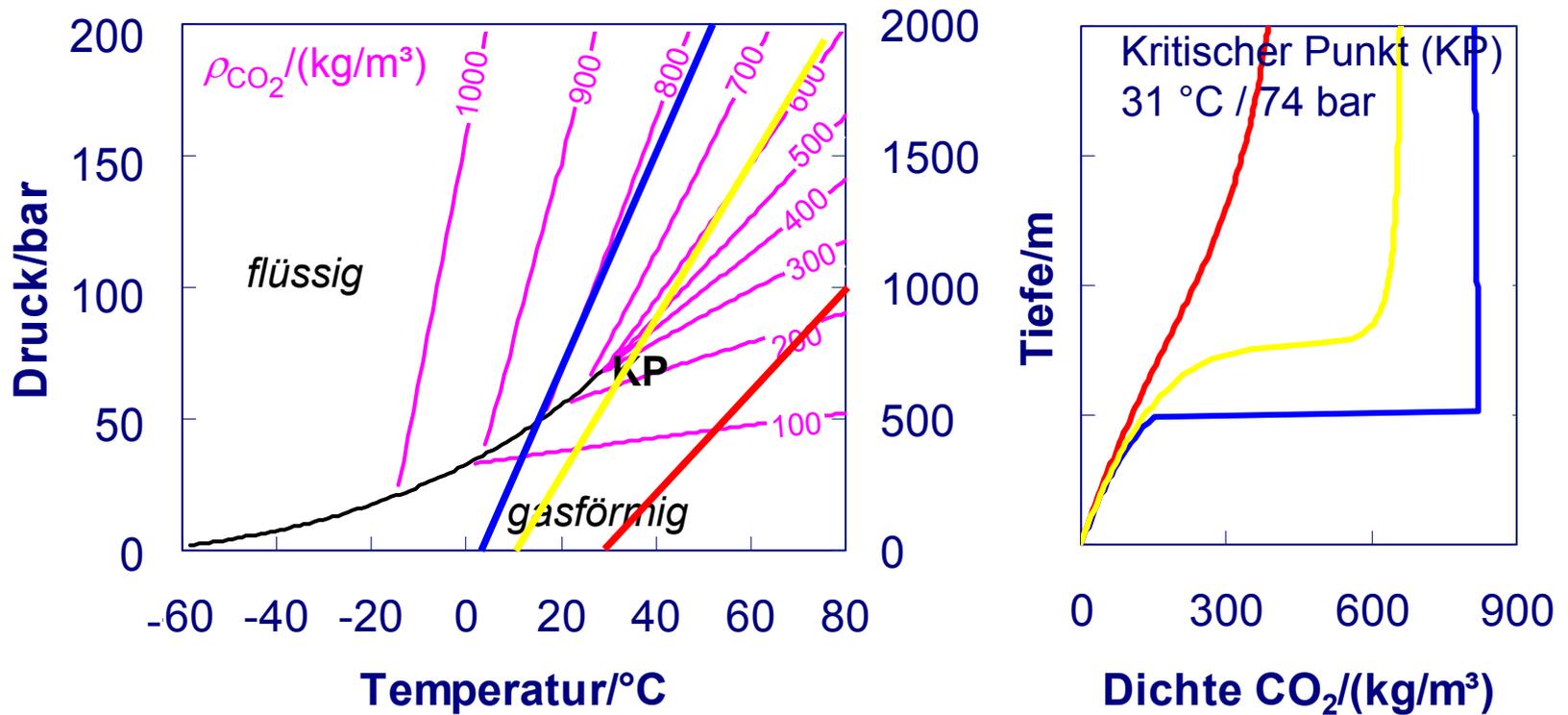
Charakterisierung von Aquiferen



Charakt. Eigenschaften von Aquiferen

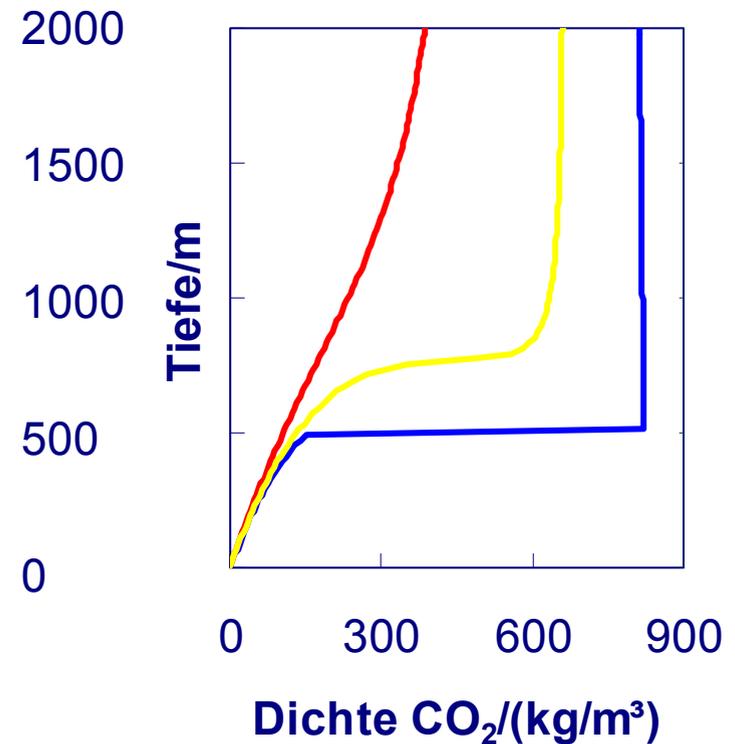
Temperaturgradienten:
20 – 50 °C / 1 km Tiefe
Druckgradient:
~ 100 bar / 1 km Tiefe

Charakterisierung von Aquiferen



Charakterisierung von Aquiferen

- Günstige Bodencharakteristik:
 - niedrige Oberflächentemperatur
 - niedriger Temperaturgradient
(=> entschärft Konfliktpotential mit Geothermie)
- Speicherung in Tiefen über 1000 m nicht sinnvoll:
 - geringe Kompressibilität
 - Bohrkosten $\sim (\text{Tiefe})^2$



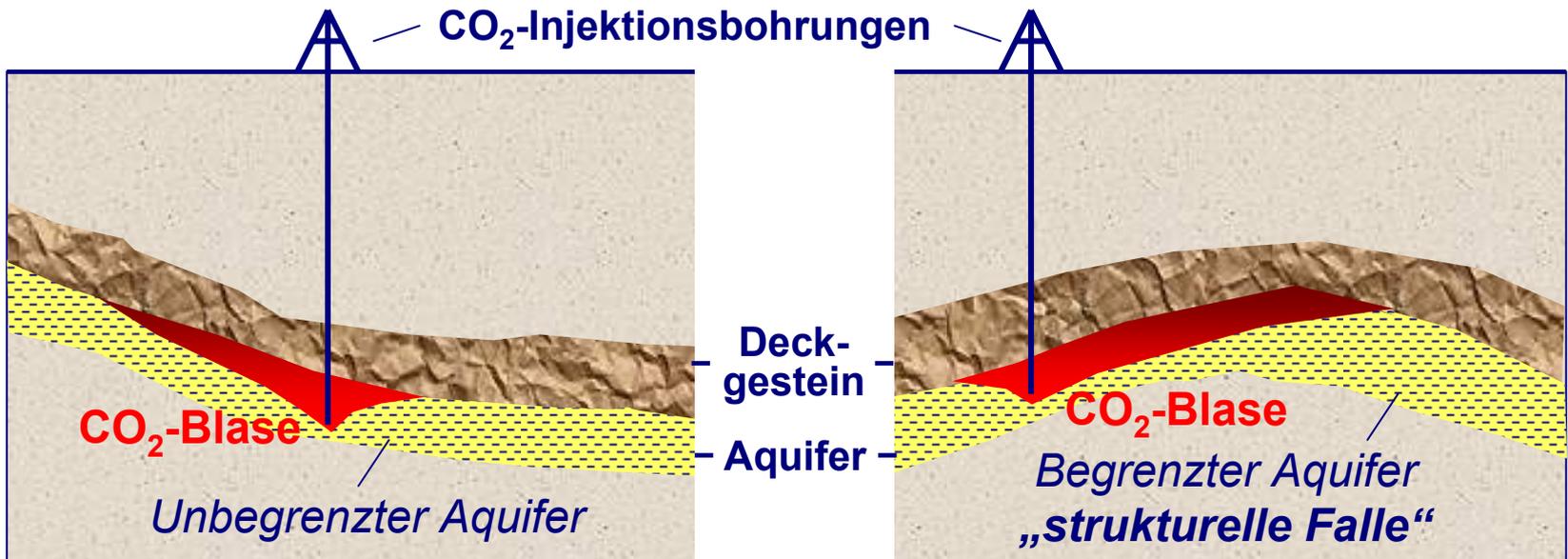
Grundlegende Fragestellungen

- **Wie lassen sich Aquifere grundsätzlich charakterisieren?**
- **Was sind die wesentlichen Speichermechanismen in Aquiferen?**
- **Wie lässt sich die Speicherkapazität von Aquiferen abschätzen?**
- **Mit welchen Kosten sind die Abtrennung und Speicherung verbunden?**
- **Welche Risiken gehen von der Speicherung in Aquiferen aus?**

CO₂-Einschlussmechanismen in Aquiferen

1. Struktureller Einschluss

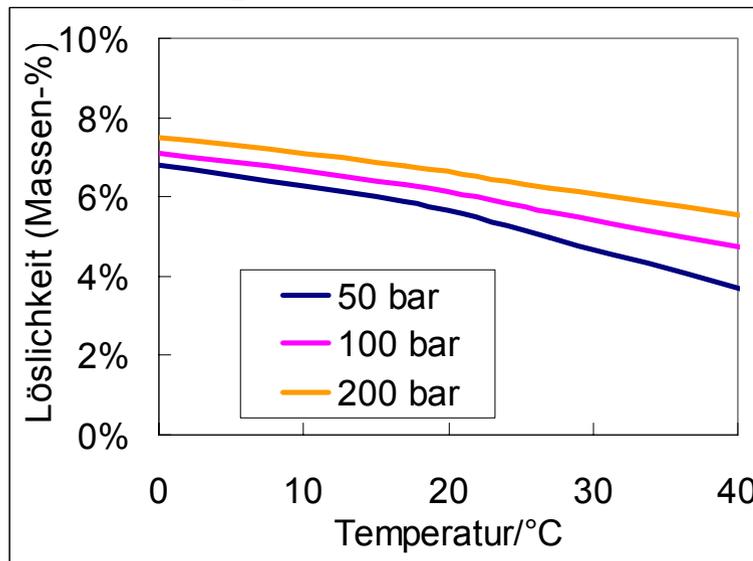
- Dichteunterschiede führen zu einer aufsteigenden CO₂-Blase (bei 100 bar / 30 °C: $\rho_{\text{CO}_2} = 650 \text{ kg/m}^3 < \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kg/m}^3$)
- Form und Beschaffenheit der Deckschicht bestimmen Dauerhaftigkeit des Einschlusses



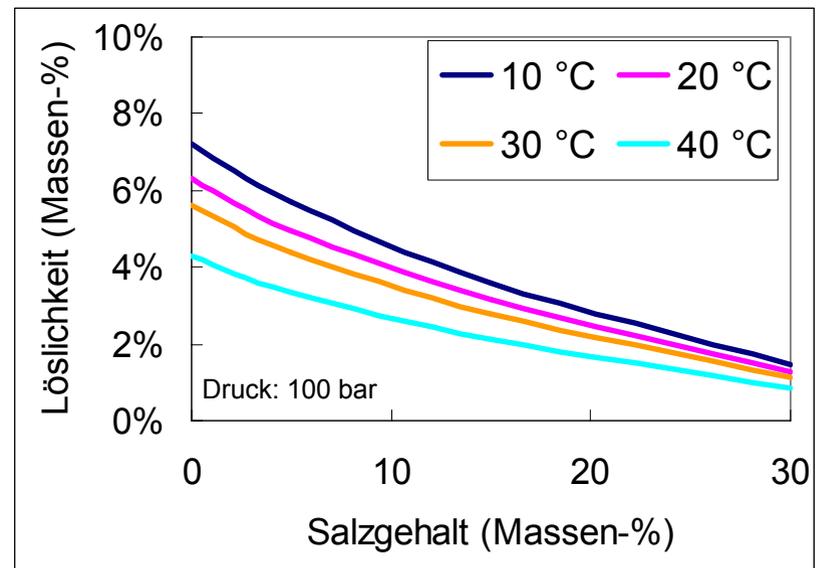
CO₂-Einschlussmechanismen in Aquiferen

2. Lösung im Porenwasser

CO₂ in reinem Wasser



CO₂ in Salzwasser ¹⁾



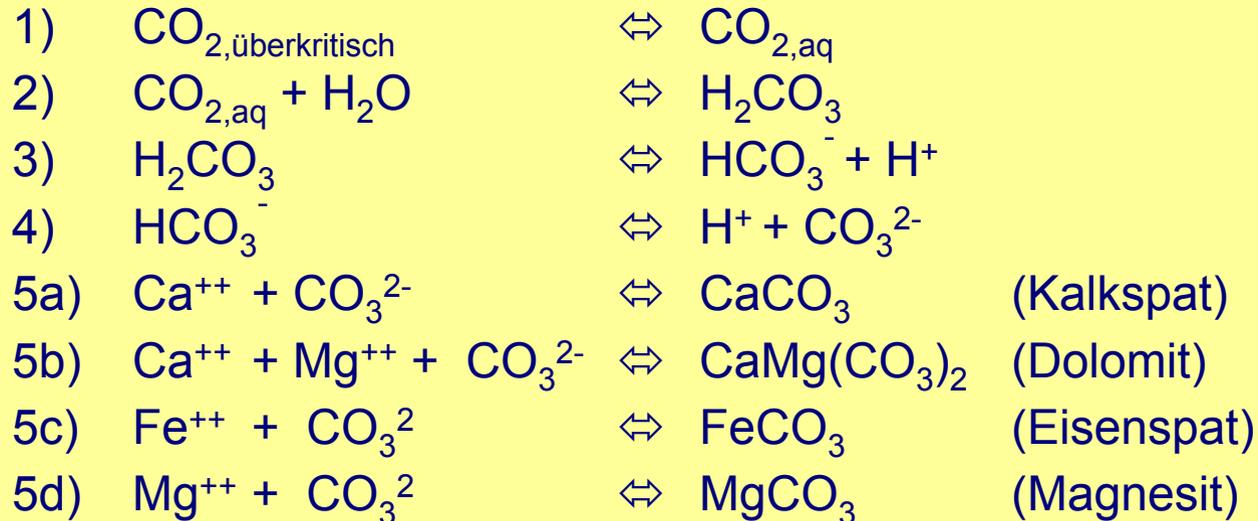
- Löslichkeit von CO₂ in Salzwasser
 - nimmt zu mit steigendem Druck
 - nimmt ab mit steigender Temperatur
 - nimmt ab mit steigendem Salzgehalt

Tendenz:
Löslichkeit sinkt mit
Tiefe des Aquifers

CO₂-Einschlussmechanismen in Aquiferen

3. Mineralisation

- Bildung von Karbonaten
- Reaktionsmechanismen:



CO₂-Einschlussmechanismen in Aquiferen

Bewertungsmatrix

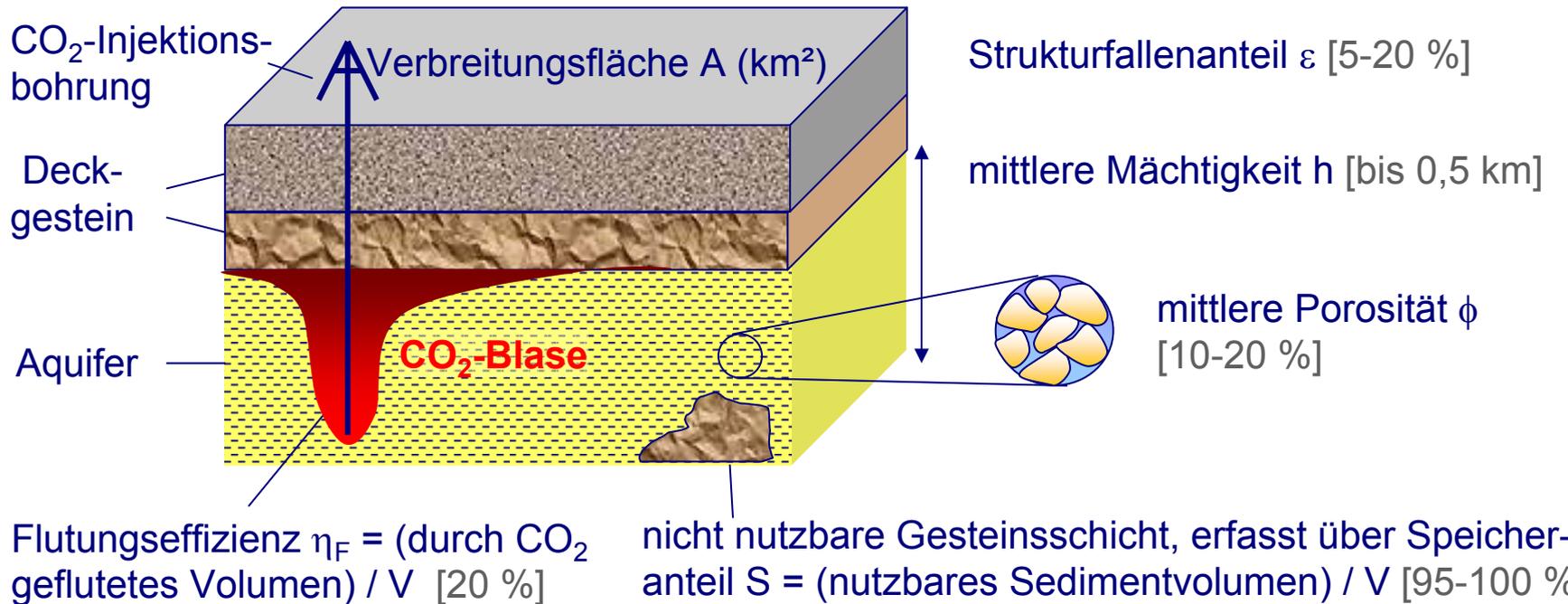
Mechanismus	Hauptwirksamkeit	max. Speicherdichte	relatives Leckagerisiko
Struktureller Einschluss	Sofort nach der Injektion	~ 700 kg _{CO2} /m ³	Hoch (Auftriebskräfte)
Lösung im Porenwasser	Nach 10 – 100 Jahren	~ 35 kg _{CO2} /m ³	Gering
Mineralisation	Nach 100 – 1000 Jahren	~ 2000 kg _{CO2} /m ³ ¹⁾	Sehr gering

- Primärer Speichermechanismus: Struktureller Einschluß von reinem CO₂
- Langfristig Lösung im Porenwasser und Mineralisation
=> Erhöhung der Speichersicherheit

Grundlegende Fragestellungen

- **Wie lassen sich Aquifere grundsätzlich charakterisieren?**
- **Was sind die wesentlichen Speichermechanismen in Aquiferen?**
- **Wie lässt sich die Speicherkapazität von Aquiferen abschätzen?**
- **Mit welchen Kosten sind die Abtrennung und Speicherung verbunden?**
- **Welche Risiken gehen von der Speicherung in Aquiferen aus?**

Abschätzung der CO₂-Speicherkapazität



Theoretische Speicherkapazität (t_{CO_2}):

$$M_{\text{CO}_2, \text{theor}} = V \cdot \rho_{\text{CO}_2} = A \cdot h \cdot \rho_{\text{CO}_2}$$

Effektive Speicherkapazität (t_{CO_2}):

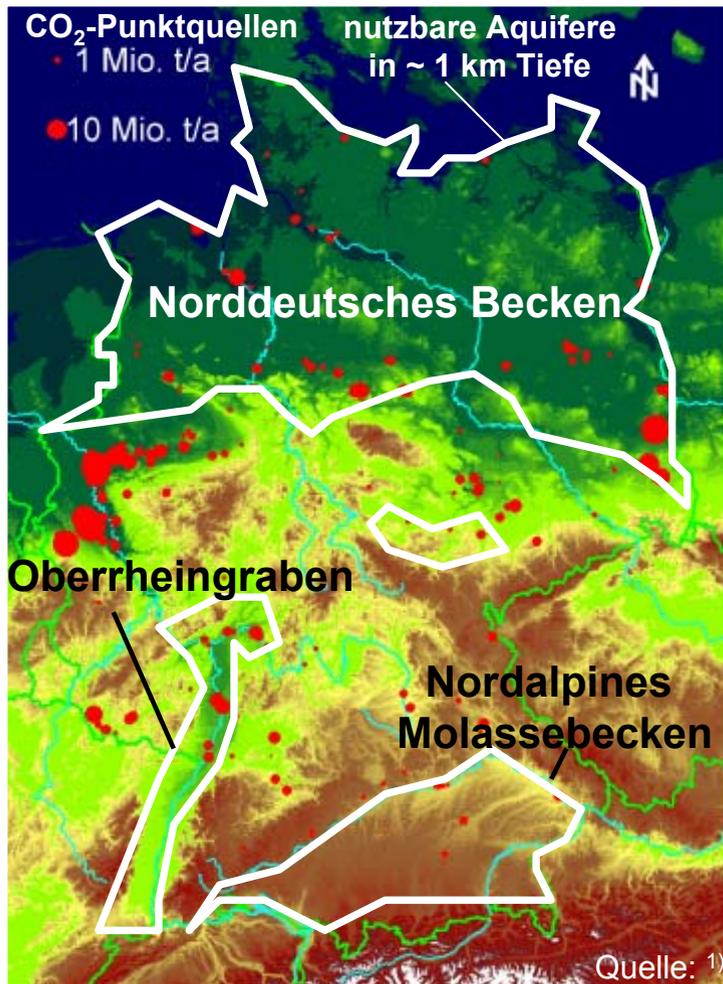
$$M_{\text{CO}_2, \text{eff}} = M_{\text{CO}_2, \text{theor}} \cdot \underbrace{\eta_{\text{Nutzungsgrad}}}_{\varepsilon \cdot S \cdot \phi \cdot \eta_F} \sim \underline{\underline{0,3 \%}}$$

$$\varepsilon \cdot S \cdot \phi \cdot \eta_F \sim \underline{\underline{0,3 \%}}$$

[Angaben in Klammern: Typische Werte für deutsche Aquifere in ca. 1 km Tiefe]¹⁾

Abschätzung der CO₂-Speicherkapazität

Situation in Deutschland



Mittlere spezifische Speicherkapazität¹⁾:
Norddeutsches Becken: $\sim 0,2 \text{ Mt}_{\text{CO}_2}/\text{km}^2$
Restliche Aquifergebiete: $\sim 0,08 \text{ Mt}_{\text{CO}_2}/\text{km}^2$

Gesamtkapazität¹⁾: $20 \pm 8 \text{ Gt}_{\text{CO}_2}$

Gesamt-CO₂-Emissionen:

$\sim 850 \text{ Mio t}_{\text{CO}_2}/\text{a}$

Emissionen großer Punktquellen²⁾:

$\sim 450 \text{ Mio t}_{\text{CO}_2}/\text{a}$

Statische Reichweite der Kapazität in Bezug auf die Hauptpunktquellen:
ca. 40 Jahre

Grundlegende Fragestellungen

- **Wie lassen sich Aquifere grundsätzlich charakterisieren?**
- **Was sind die wesentlichen Speichermechanismen in Aquiferen?**
- **Wie lässt sich die Speicherkapazität von Aquiferen abschätzen?**
- **Mit welchen Kosten sind die Abtrennung und Speicherung verbunden?**
- **Welche Risiken gehen von ihr aus?**

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Beispiel: Steinkohlekraftwerk, 1 GW_{el}, Baujahr 2020, 6000 Volllaststunden/a

spez. CO₂-Vermeidungskosten: K [€/t_{CO2}]

spez. Stromgestehungskosten: S [€/MWh]

spez. CO₂-Emissionen E [t_{CO2}/MWh]

$$K = \frac{(S_{\text{mit CO}_2\text{-Abtrennung}} - S_{\text{Ref.}})}{(E_{\text{Ref.}} - E_{\text{mit CO}_2\text{-Abtrennung}})}$$

	Referenz-Kraftwerk	Kraftwerk mit 90 % CO ₂ -Abtrennung
Wirkungsgrad [%]	50	46
Investkosten [€/kW]	1000	1500
Kapitalkosten [Mio. €/a]	91	136
Brennstoffkosten (1,8 €/GJ) [Mio. €/a]	77	84
CO ₂ -Emissionen [t _{CO2} /MWh]	0,67	0,07
Stromgestehungskosten [€/MWh]	36	47

Annuitätenmethode: Zins: 7,5 %, Abschreibung 30 a, fixe Kosten 31,5 €/kW, var. Kosten 2,5 bzw. 5 €/MWh

spez. CO₂-Vermeidungskosten für die CO₂-Abtrennung:

K_{CO₂-Abtrennung} = 18,8 €/t_{CO2} (Schwankungsbreite: 15 - 50 €/t_{CO2})¹⁾

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

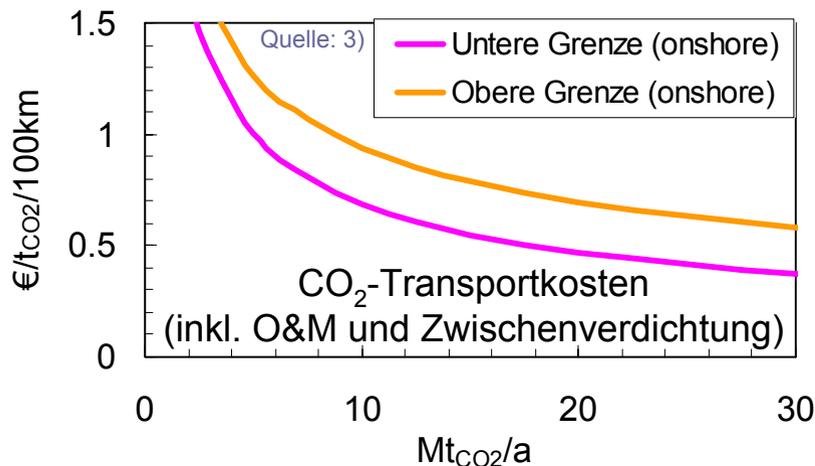
Zu speichernde CO₂-Menge: 3,6 Mio t_{CO2}/a

Spez. Kosten der CO₂-Verdichtung (110 bar inkl. Dehydrierung)

- Investitionskosten: 100 €/(t_{CO2}·a)¹⁾
- Energieaufwand: 0,33 GJ_{el}/t_{CO2}²⁾

$$K_{\text{CO}_2\text{-Verdichtung}} = 0,9 \text{ €/t}_{\text{CO}_2} \text{ (0,5 - 1 €/t}_{\text{CO}_2}\text{)}$$

Spez. Kosten für Pipeline-Transport



- geschätzte mittlere Entfernung zum Aquifer: 200 km,
Pipelinekapazität 15 Mio t_{CO2}/a

$$K_{\text{CO}_2\text{-Transport}} = 1,7 \text{ €/t}_{\text{CO}_2} \text{ (1,2 - 4,2 €/t}_{\text{CO}_2}\text{)}^{3)}$$

Spez. Kosten der CO₂-Speicherung

$$K_{\text{CO}_2\text{-Speicherung}} = 2,2 \text{ €/t}_{\text{CO}_2} \text{ (1,5-5 €/t}_{\text{CO}_2}\text{)}^{4)}$$

Spez. Kosten für CO₂-Monitoring

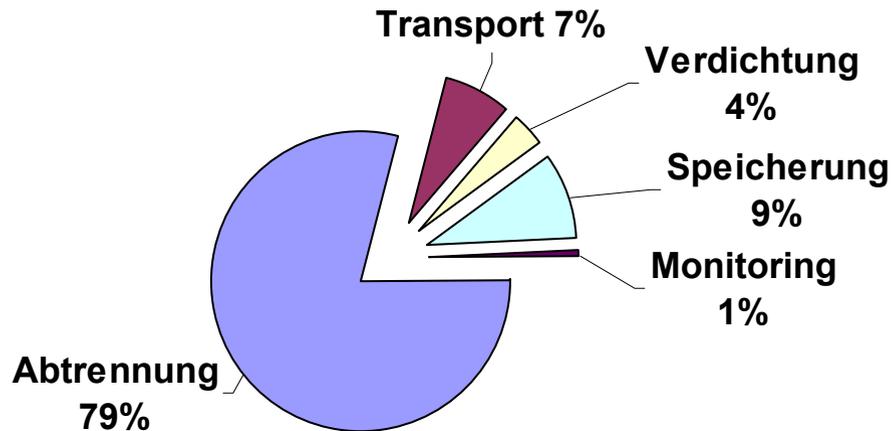
$$K_{\text{CO}_2\text{-Monitoring}} = 0,15 \text{ €/t}_{\text{CO}_2} \text{ (0,1-0,2 €/t}_{\text{CO}_2}\text{)}^{5)}$$

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Spez. CO₂-Vermeidungskosten insgesamt:

⇒ **K = 24 €/t_{CO2}** (18-60 €/t_{CO2})

Aufteilung der CO₂-Vermeidungskosten



⇒ **Abtrennungskosten dominieren die CO₂-Vermeidungskosten**

⇒ **Stromgestehungskosten erhöhen sich durch CO₂-Vermeidung um ~ 50 % (5,0 €/ct/kWh im Vergleich zu 3,6 €/ct/kWh im Referenzfall)**

Grundlegende Fragestellungen

- **Wie lassen sich Aquifere grundsätzlich charakterisieren?**
- **Was sind die wesentlichen Speichermechanismen in Aquiferen?**
- **Wie lässt sich die Speicherkapazität von Aquiferen abschätzen?**
- **Mit welchen Kosten sind die Abtrennung und Speicherung verbunden?**
- **Welche Risiken gehen von der Speicherung in Aquiferen aus?**

Risikobetrachtung

Umweltrisiken

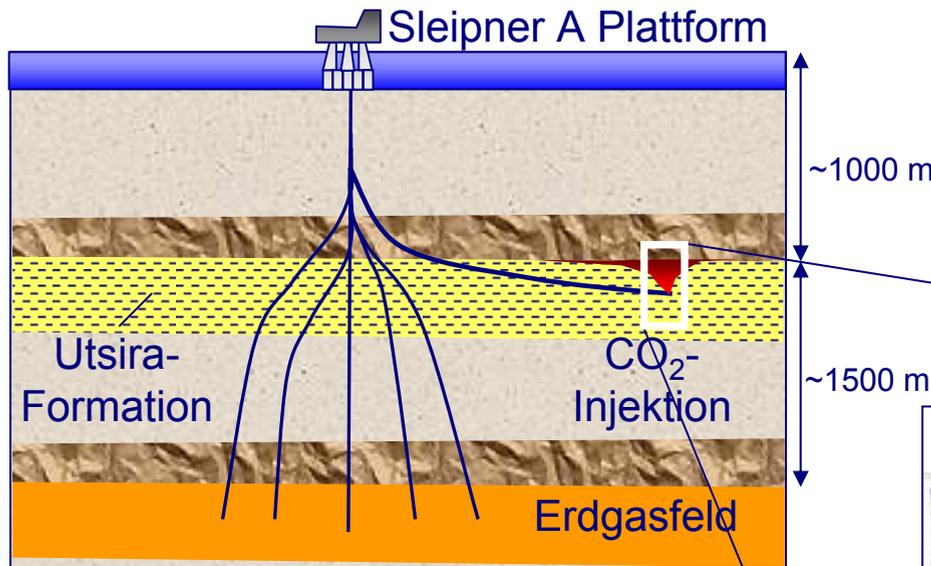
- schleichende Freisetzung von CO_2
- plötzliche lokale Freisetzung von CO_2 durch
 - Erdbeben
 - plötzliche Ausgasung
 - Reaktion aggressiver kohlensaurer Lösungen mit Bohrverschlüssen
- Versauerung / Verunreinigung der Aquifere

Konfliktfelder

- potenzieller Konflikt mit Nutzung geothermaler Energie
- rechtliche Probleme: Wasserhaushaltsgesetz, Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
- fehlende Sicherheits- und Überwachungsrichtlinien
- öffentliche Akzeptanz

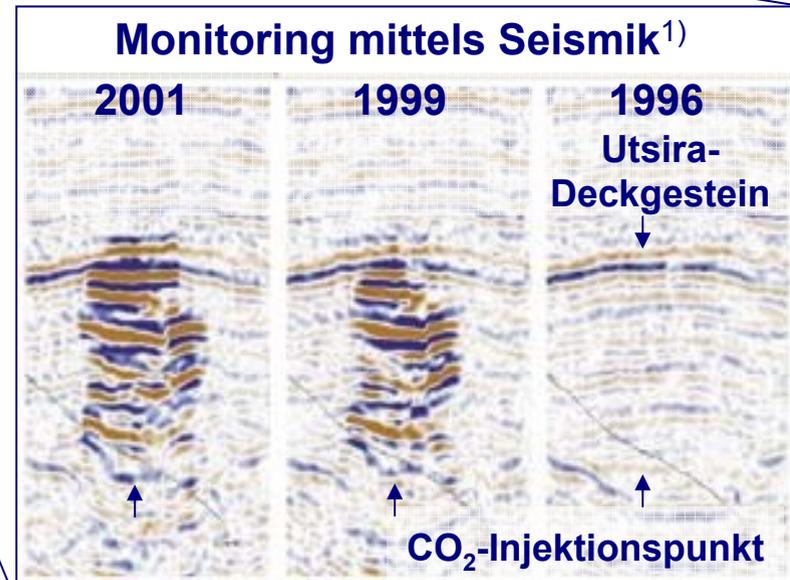
Risikobetrachtung

Monitoring: Beispiel Sleipner (norwegische Nordsee)



- In Betrieb seit 1996
- Speicherung von 1 Mio t CO₂ /a
- CO₂-Steuer in Norwegen:
30 €/t_{CO2}

- ⇒ CO₂-Monitoring in Erprobung
- ⇒ Nachweis der langfristigen Speichersicherheit noch nicht erbracht



Zusammenfassung

- enormes theoretisches CO₂-Speicherpotential in Aquiferen, tatsächlich nutzbare Kapazitäten sind deutlich geringer und nur schwer abschätzbar
- aufgrund hoher Kosten sind ökonomische Anreize etwa durch Emissionssteuern für wirtschaftlichen Einsatz unabdingbar
- grundsätzliche technische Machbarkeit gezeigt
- langfristige Speichersicherheit ist ungeklärt
- Bedarf an Forschung und gesellschaftlicher Grundsatzentscheidung

Fazit

Die Speicherung von CO₂ in Aquiferen ist aus heutiger Sicht **nicht** die Lösung unseres Klimaproblems.

Den noch ausstehenden **Nachweis** einer langfristigen **Speichersicherheit vorausgesetzt**, kann sie während einer Übergangsphase, in der nicht auf fossile Energieträger verzichtet werden kann, allerdings **einen Teilbeitrag** zur Reduzierung klimarelevanter Gase in der Atmosphäre leisten.

Die Anwendung von CO₂-Abtrennung und -speicherung ist mit **hohen Kosten** verbunden.