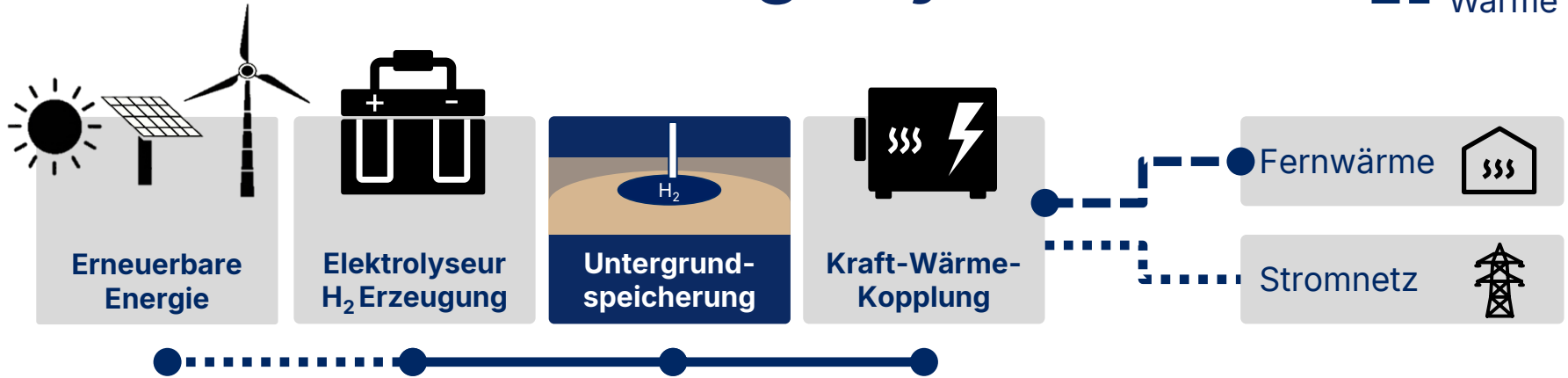


Aus Experimenten wächst Planung – Labore bereiten den Weg für geologische Wasserstoffspeicherung

Prof. Dr. Ingo Sass; Wisdom David, M.Sc.; Lea Döpp, M.Sc.;
Dr. Anna-Maria Eckel; Dr. María Belén Febbo; Dr. Peter Pilz;
Dr. Cornelia Schmidt-Hattenberger, Dr. Juliane Kummerow,
Dr. Mrityunjay Singh, Dr. Nora Wolff

Sektion 4.3 Geoenergie
Potsdam, 16. Oktober 2025

Wasserstoffspeicherung im Kontext des Energiesystems



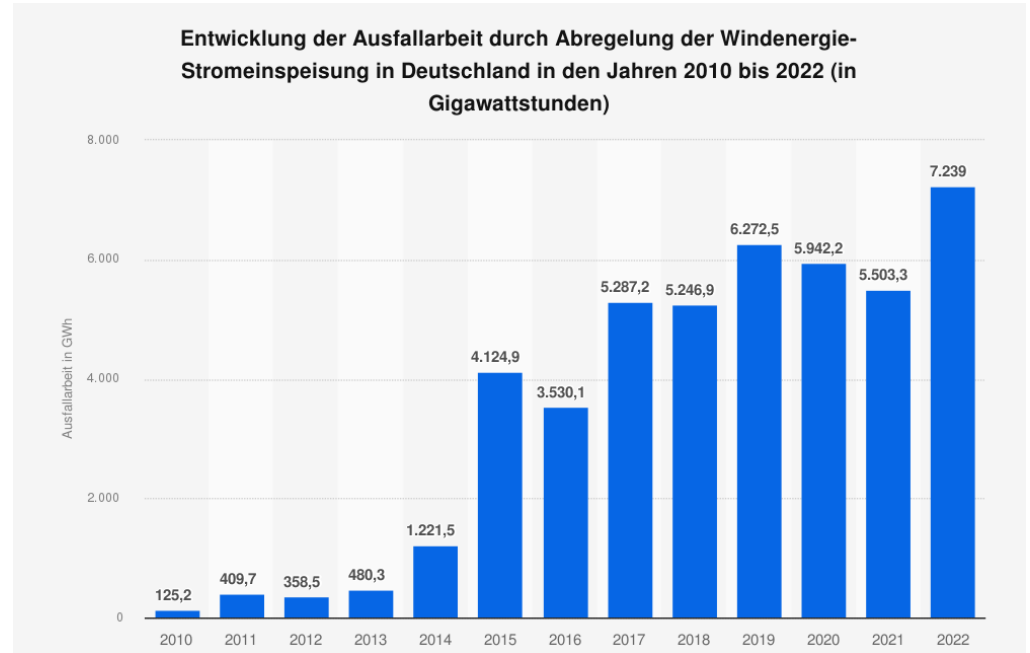
- Fluktuation der erneuerbaren Energien ausgleichen
- Sektorenübergreifende Dekarbonisierung (Strom + Wärme + Verkehr + Industrie)
- Versorgungssicherheit durch hohe Speicherkapazität

Wasserstoffspeicherung im Kontext des Energiesystems

Der **Ausbau erneuerbarer Energien** in Deutschland bringt Chancen zur autarken und nachhaltigen Energieversorgung.

Herausforderungen:

- Stromspeicherung im TWh Bereich
- Sektorenkopplung
- Dekarbonisierung energieintensiver Industrie



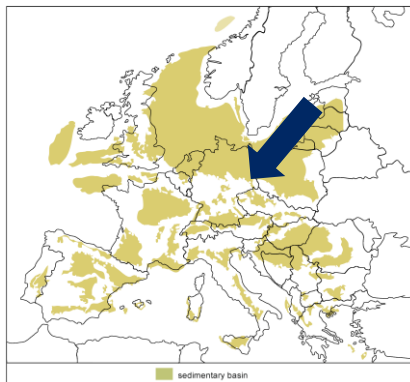
Quelle: Bundesnetzagentur, Monitoringbericht 2023

Wasserstoffspeicherung im Untergrund

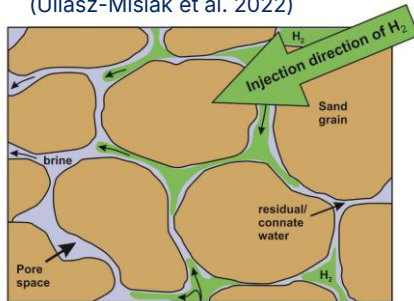
Porenspeicher

Saliner Aquifer

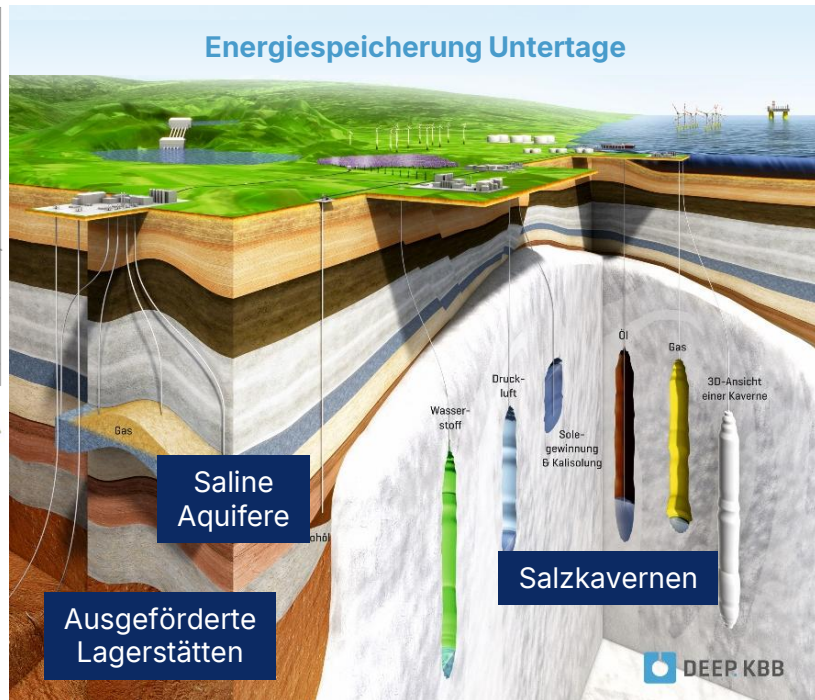
- Sedimentbecken in Europa
- Speicherkapazität im GWh-TWh Bereich
- Geringer Ausbauaufwand
- Jahrzehntelange Erfahrung in Erdgasspeicherung



(Uliasz-Misiak et al. 2022)



(Kruck et al. 2013)



(Verändert nach DEEP KBB)

Fallbeispiel Speicherstandort Ketzin

1964-1999 Speicherung von Stadtgas und Erdgas

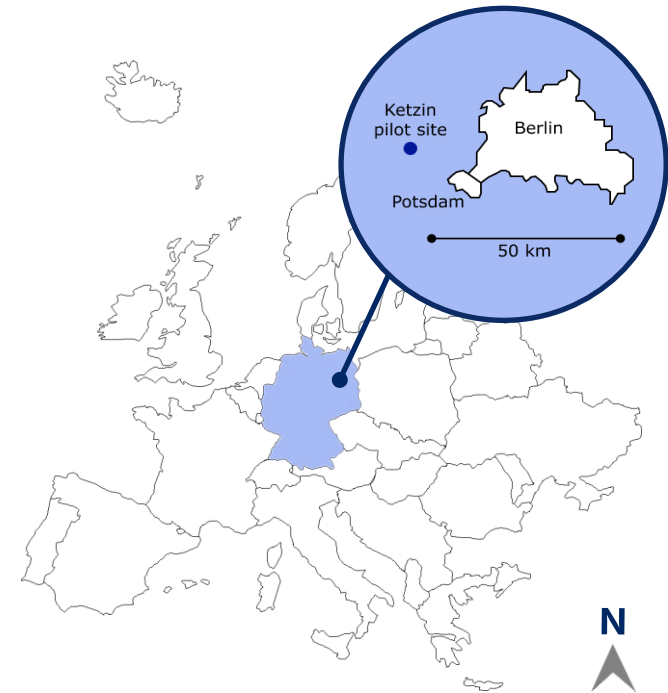
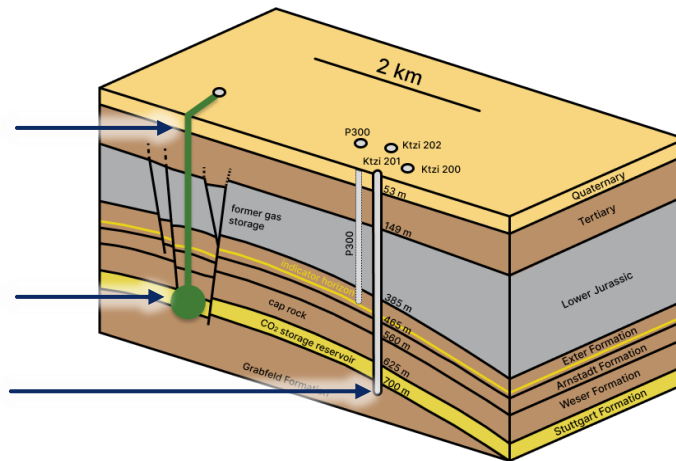
2004-2017 Speicherung von CO₂

2022-2026 Experimentelle und numerische Studien zu H₂
(Projekt GEOZeit/HyPrepare)

Injektions- und
Förderbohrung

Reservoir
Stuttgart Formation

Ehemaliger CO₂
Speicher

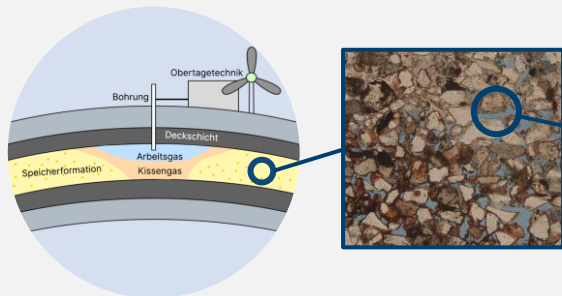


Verändert nach Liebscher et al. (2013)
und Martens et al. (2012)

HyPrepare: Ein multi-disziplinärer Forschungsansatz (Phase 1)



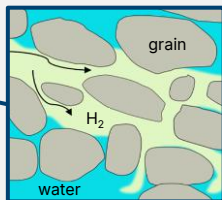
Geologische Charakterisierung



Charakterisierung des Reservoir- und Deckgesteins in einem geologischen Modell



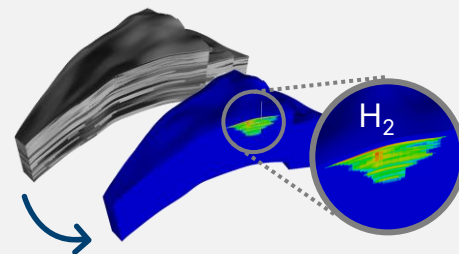
Wasserstofflabor und petrophysikalisches Labor



Petrophysikalische Untersuchungen der Fluid-Gestein-Mikroben Wechselwirkungen



Numerische Modelle der H₂ Speicherung



Modellierung des H₂ Transports und Ausbreitung im Reservoir

Wasserstoff im Untergrund – wie viel löst sich im Formationswasser?

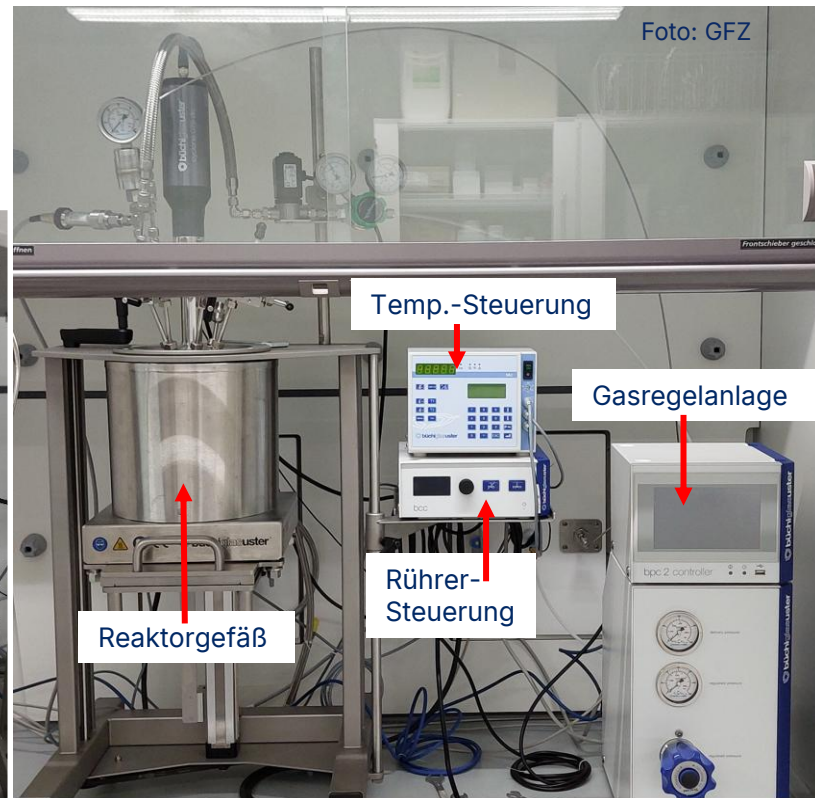
Wasserstofflöslichkeit

H₂-Löslichkeitsexperimente in komplexen H₂O-H₂-Salz-Systemen unter Reservoirbedingungen

Messprinzip: Berechnung der gelösten H₂-Menge aus Gasverbrauch und Druckabfall in einem Autoklav

- Reaktionstemperatur bis 100°C
- Druck 50 – 200 bar
- Magnetrührer 800 U/min

Ziel: realitätsnahe Reservoir-Simulation von Wasserstoffspeichern, **Beurteilung möglicher Speicherverluste**



Bleibt der Wasserstoff, wo wir ihn speichern?

Wasserstoffdiffusion

Experimente an Gesteinsproben, die ein typisches Speichermedium für H_2 im Untergrund repräsentieren

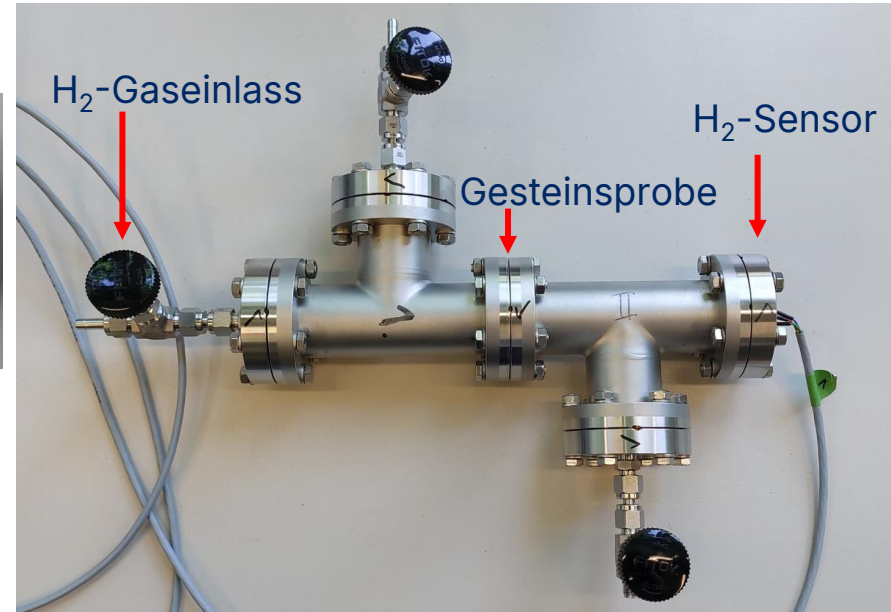
Messprinzip:

2 Gaskammern → Diffusion durch Gesteinsprobe zum H_2 -Sensor



Ziel:

- Abschätzung von **Wasserstoffverlusten** und **mögliche Sicherheitsrisiken**
- Bewertung von **Materialdichtheit**



Diffusionszelle Setup mit Gesteinsprobe (oben links),
Fotos: GFZ.

Experimentierplattformen zur Reservoirsimulation

SEPP

$p_{\text{conf}} = 40 \text{ MPa}$ (Tiefe < 2km)

$p_{\text{pore}} = 25 \text{ MPa}$

$T_{\text{max}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$



ITHERLAB

$p_{\text{conf}} = 200 \text{ MPa}$ (Tiefe < 8 km)

$p_{\text{pore}} = 100 \text{ MPa}$

$T_{\text{max}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$



FLECAS-HT

$p_{\text{conf}} = 40 \text{ MPa}$ (Tiefe < 2 km)

$p_{\text{pore}} = 25 \text{ MPa}$

$T_{\text{max}} = 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$

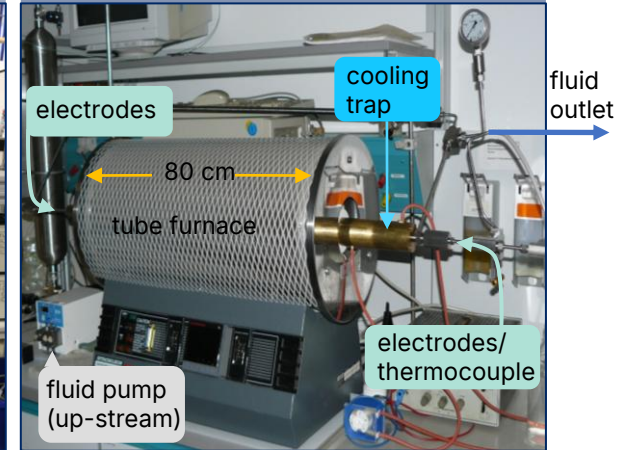


Fluid Conductivity Cell

$p_{\text{conf}} = 40 \text{ MPa}$ (Tiefe < 2 km)

$p_{\text{pore}} = 40 \text{ MPa}$

$T_{\text{max}} = 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Gemessene Parameter

- (Relative) Permeabilität
- Elektrischer Widerstand
- P- und S-Wellen Geschw.
- Fluid sampling

- (Relative) Permeabilität
- Temperaturleitfähigkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- Fluid sampling

- (Relative) Permeabilität
- Elektrischer Widerstand
- Fluid sampling

- Elektrische Eigenschaften von Fluiden
- Elektrisches Widerstands-Monitoring während des reaktiven Flusses
- Minerallöslichkeitsraten
- Fluid sampling

Durchströmungsversuche zur Bestimmung petrophysikalischer Parameter

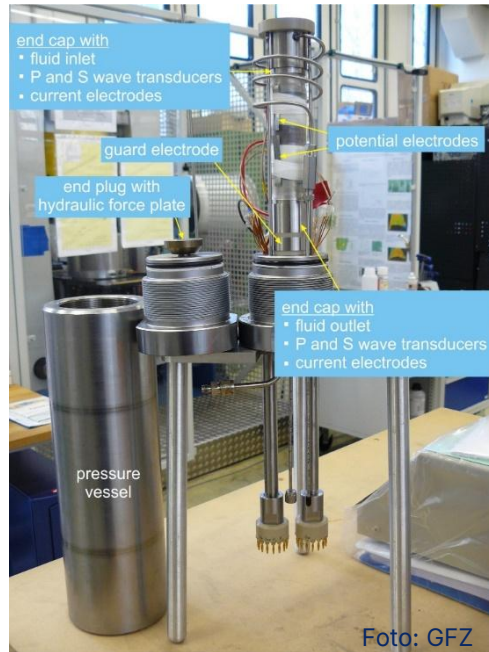
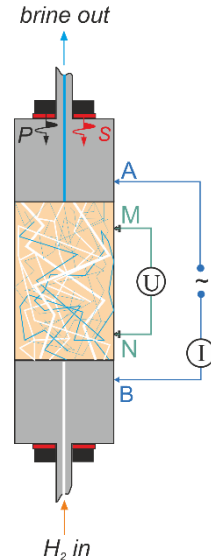


Foto: GFZ

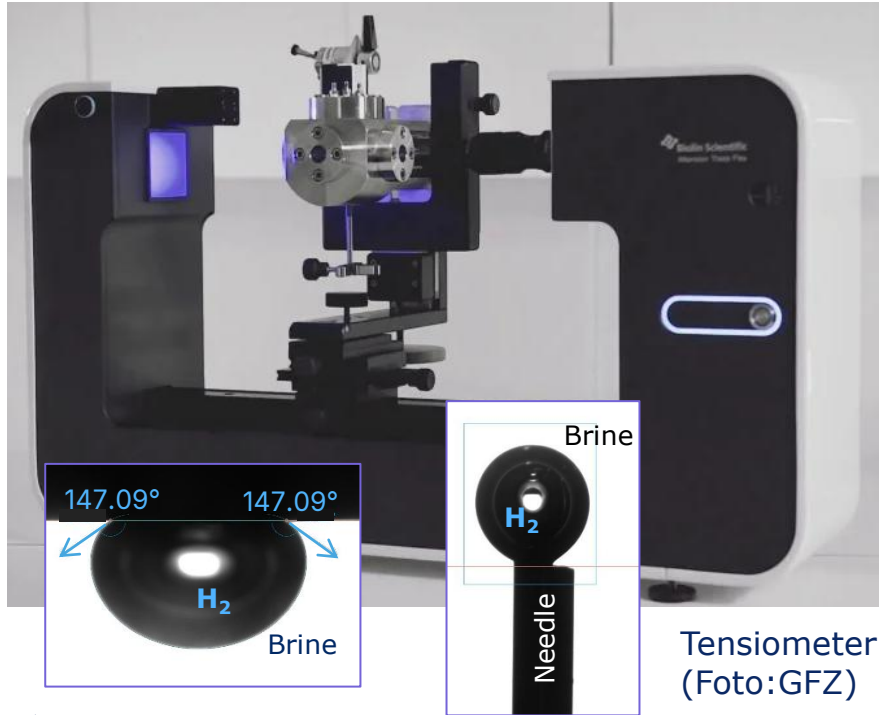


$p_{\text{conf}} = 150 \text{ bar}$
 $p_{\text{pore}} = 75 \text{ bar}$
 $T = 37 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Porenfluid: hoch-salinar

Laborverfahren zur Untersuchung der Wasserstoffspeicherung in porösen Medien:

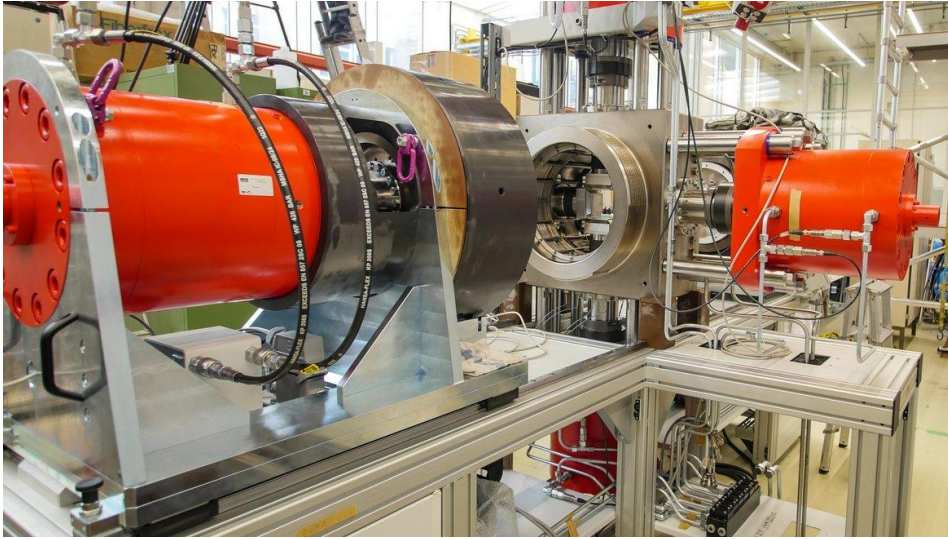
- Bestimmung der **relativen Permeabilität** durch sukzessive Verdrängung von Salzlösung mit H_2
- Konstante maximale H_2 -Sättigung über 2–4 Wochen
- **Rückgewinnung von H_2** durch Injektion von Salzlösung
- **Gasprobenahme** zur chemischen Analyse
- Durchführung von 2–3 Zyklen
(abiotische und biotische Betriebsweise möglich)

Kontaktwinkel- und Oberflächenspannungs-Messung



- Der Kontaktwinkel zwischen Wasserstoff, Formationswasser und Gesteinsoberfläche bestimmt die **Verteilung von H₂ im Porenraum**.
 - Die Oberflächenspannung (zwischen H₂ und H₂O) beeinflusst die **Kapillardruck-Kurve im Porensystem**.
- Beide Parameter haben Einfluss auf die **Speicherkapazität** und die **Rückgewinnungsrate von Wasserstoff**.

Mit dem H₂-THM-System die Kräfte im Untergrund messbar machen



Hochdruck-Prüfanlage für Gesteinsproben „TrueTriax“ (Foto: GFZ)
Gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) durch das Land Brandenburg via ILB, und aus Mitteln des GFZ.

H₂-THM-Triaxial System:

- Untersuchung thermischer, hydraulischer und mechanischer Prozesse bei der H₂-Speicherung.

Nutzen für Speicherbetreiber:

- **Realitätsnahe Labordaten:** Simulation der Speicherbedingungen (Druck, Temperatur, Spannungen) unter kontrollierten Bedingungen
- **Bewertung der Speicherstabilität:** Reaktion des Gesteins auf Druckzyklen und Gasinjektion – Schlussfolgerungen für die Integrität der Speicherformation.

Vorhaben H₂-THM-Triax (Phase 2)

Untersuchung Thermisch-Hydraulisch-Mechanischer Prozesse

Arbeitsabläufe



Multidisziplinäre
Laborexperimente



Zyklische
Belastungsprozesse



Porenetzwerkanalyse



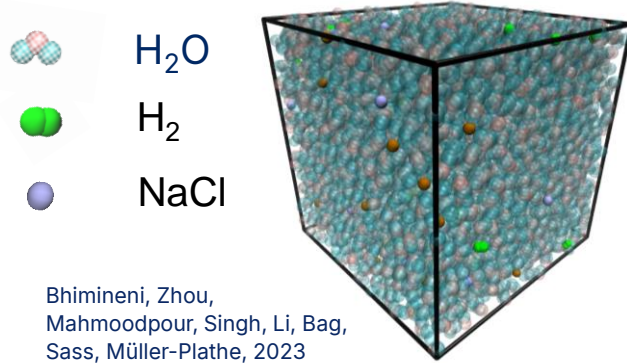
Molekulardynamische
Untersuchungen



Ziele

- Bewertung der **Reservoirtüchtigkeit**
- Analyse **mechanischer Prozesse** für sicheren Speicherbetrieb
- **Open Access Datenbank** für Wissenstransfer in Forschung und Industrie

Von der Molekülbewegung zum Porennetzwerk – wie Wasserstoff im Gestein „unterwegs“ ist



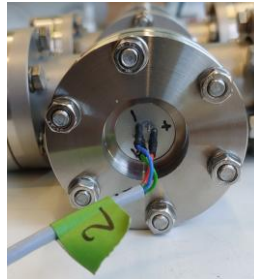
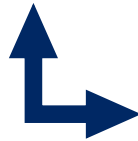
Molekular-Skala (Gasmoleküle)

- Molekulardynamik (MD) beschreibt die Molekülbewegungen und Wechselwirkungen
- Liefert eine Methodik, um die experimentellen Beobachtungen bei **H_2 -Diffusion** und **H_2 -Löslichkeit** zu interpretieren oder zu extrapolieren.

Nutzen für Speicherbetreiber:

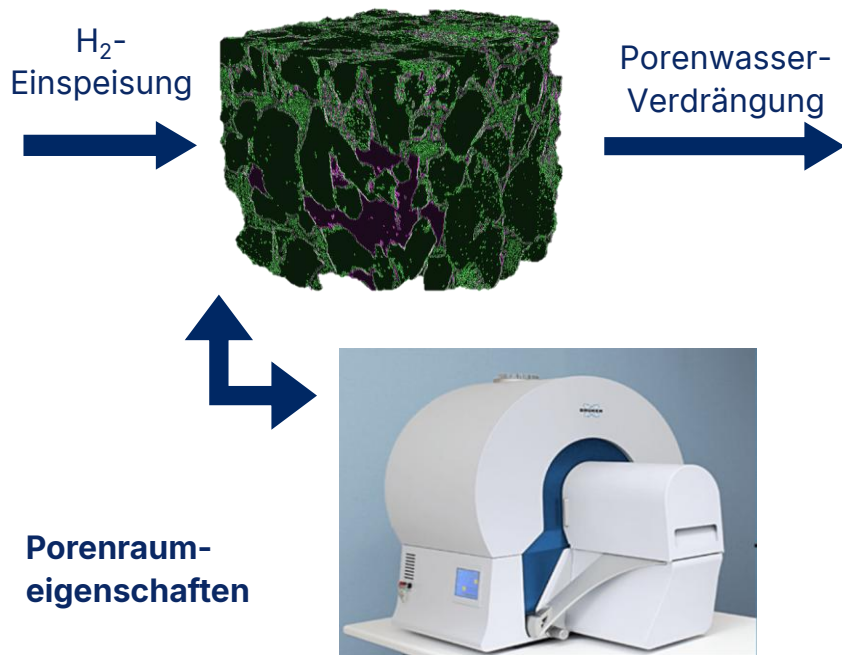
- **Effizienz:** Optimierung der Befüllung und Entnahme von Wasserstoff im Speicher
- **Planung:** Grundlage für langfristige Simulationen und Entscheidung über Speicherbetrieb und Kapazität

Einfließen
thermodynamischer
und kinetischer
Eigenschaften



Teil der Diffusionszelle
(Foto: GFZ)

Vom Porennetzwerk bis zur Molekülbewegung – wie Wasserstoff im Gestein „unterwegs“ ist



Symbolbild: Darstellung µCT
(Quelle: Bruker)

Porenraum-Skala (Bohrkern)

- **Phasenfeld-Modelle** zeigen für die Bohrkern Daten, wie sich Wasserstoff, Porenwasser und Gestein im Porenraum verhalten.

Nutzen für Speicherbetreiber:

- **H₂-Verteilung verstehen:** Gleichmäßige Migration im Reservoir oder Verdrängung infolge von Druck- und Strömungsgradienten in einzelnen Speicherzonen.
- **Sicherheit erhöhen:** Engstellen oder schlecht durchströmte Bereiche frühzeitig erkennen, Risiken minimieren

Zukunftsprojekt HyAquistore - H₂-Speicherung im salinen Aquifer



Wasserstoff-Kernnetz (Bundesnetzagentur 2024)

**Skalierbarer H₂-Demonstrator mit Infrastruktur für
Injektion, Speicherung und Rückförderung**
→ Übertragung des Konzepts auf verschiedene
Standorte als **Demonstrator-Portfolio**

Integration umfangreicher Echtzeitüberwachung mit geophys./
geochem. Sensoren → **Speichersicherheit und Umweltmonitoring**

Kombination von Wasserstoffspeicherung mit Power-to-Gas-Anlagen
und erneuerbaren Energien → **Wirtschaftlichkeitsanalysen**

Öffentlichkeitsarbeit zur Akzeptanz neuer Technologien
→ **Förderung der Wasserstoffwirtschaft**

Potenzielles Konsortium für H₂-Demonstratorkonzept

—

Raum für weitere Partner und Ideen

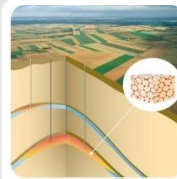
Unterstützungsschreiben von
Konsortialpartnern für das
H₂-Demonstratorkonzept (Stand 03/2024):



STADTWERKE
POTSDAM



Das Vorhaben wird
unterstützt durch:



Umstellung
vorhandener Speicher

- Bohrkonzept und -technik
- Operatives Engineering
- Betriebsführung
- Energiesystem-Integration
- Transportleitungen
- Risikoanalyse



GFZ Helmholtz-Zentrum
für Geoforschung

Kontakt:

Prof. Dr. Ingo Sass

Diplom-Geologe

Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger
für Geothermie - Brunnenbau – Tiefbohrtechnik

Beratender Ingenieur, IngKH und IngKBW

Leitung Sektion 4.3 Geoenergie

ingo.sass@gfz.de

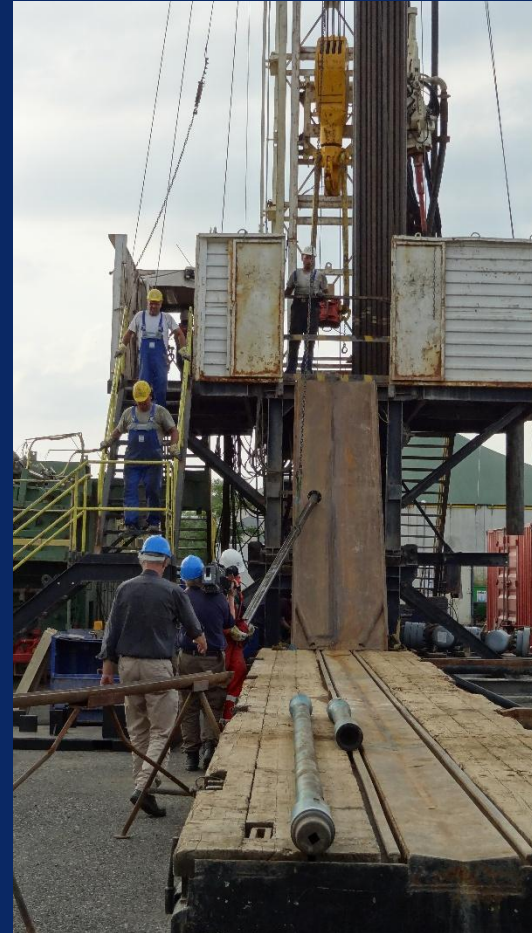


Foto: GFZ