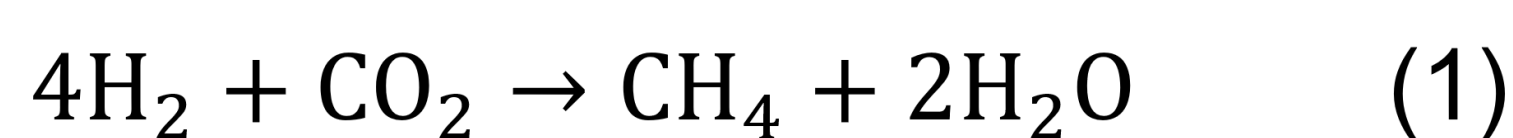


Geologische Wasserstoff und CO₂ Methanisierung zur Erzeugung erneuerbaren Methans: Reaktive Transportprozesse auf unterschiedlichen Skalen

Motivation

- Geologische Wasserstoffspeicherung ermöglicht saisonale Energiespeicherung in GWh-TWh Bereich
- Grüner Wasserstoff als **chemischer Energieträger** mit hoher spez. Energiedichte
- Produktion aus überschüssiger Energie: Wind und Solar
- Kontrollierte **in-situ Methanisierung**: durch mikrobielle Umwandlung von Wasserstoff und CO₂ zu Biomethan



Vorteile:

- Zyklische Nutzung von CO₂ (CCU)
- Reduktion der Emissionsintensität industrieller Prozesse
- Kompatibilität mit bestehender Gasinfrastruktur

Forschung:

- Analyse von Kontrollparameter für Massentransfer und bio-reaktiven Transport zwischen Gas- und Wasserphase
- Holistisches Verständnis** relevanter Prozesse im Untergrund durch Kombination aus numerischen und experimentellen Versuchen auf unterschiedlichen Zeit- und Längenskalen
- Untersuchung des **Energiespeicherpotentials** und assoziierter CO₂-Nutzung

Mikrofluidik Experimente

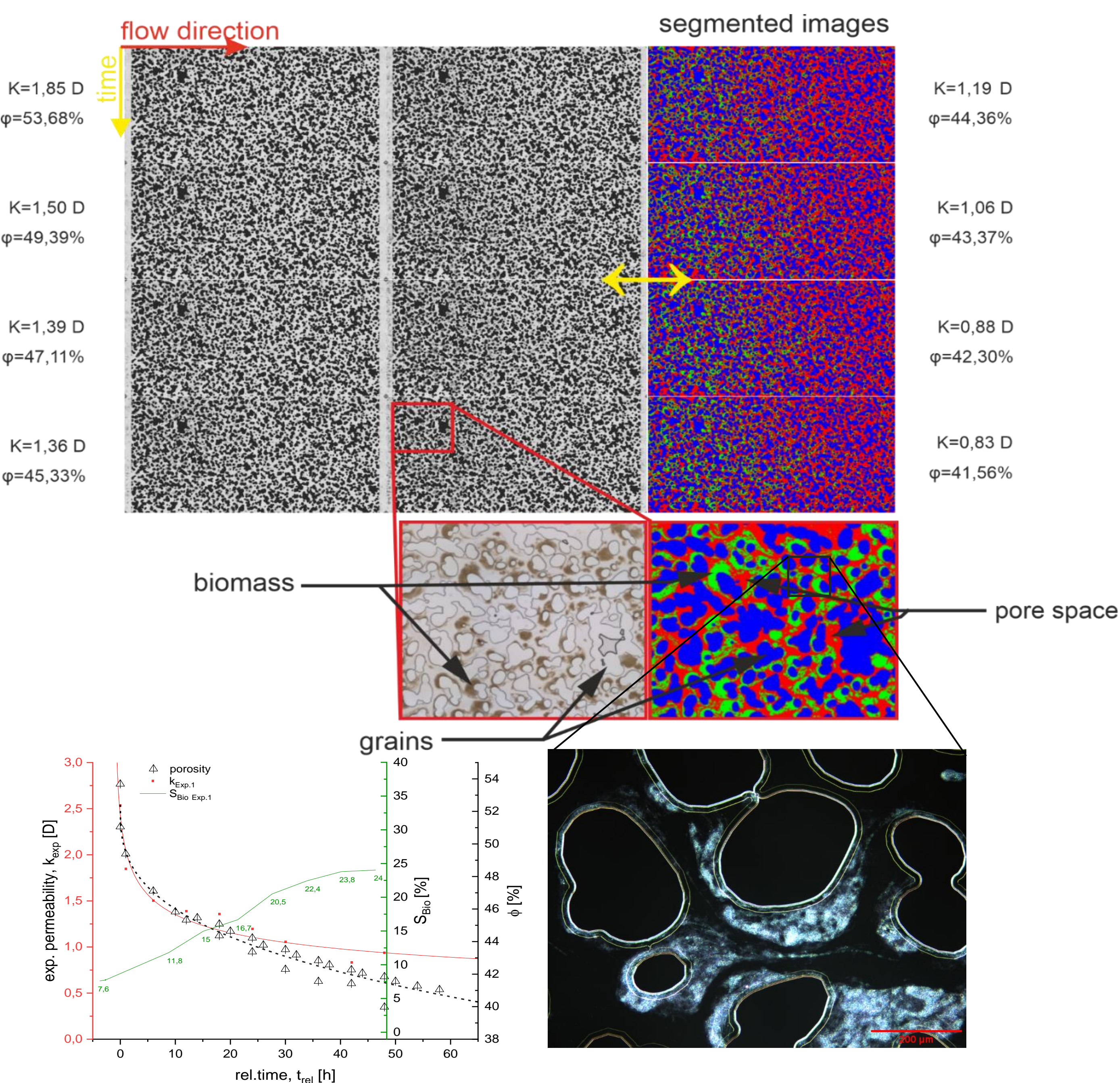


Abb.1: Biomassezunahme während eines 48-stündigen Einphasenexperimentes. Ausgehend von der linken oberen Ecke nach unten nimmt die Biomasse (grau) zu und verringert die Durchlässigkeit und Porosität des Mikromodells (Diagramm rechts unten). Bildspalte (rechts oben) zeigt die segmentierte Version der Bilder auf der linken Seite. Biomasse in grün, Körner in blau und Porenraum in rot. Die Nahaufnahmen darunter zeigen signifikante Biomasseakkumulationen auf der Einlassseite des Mikromodells. Dunkelfeldmikroskopie (rechts unten) von organischem Gewebe. Die Bildung bevorzugter Fließwege ist zu beobachten.

- 2D-Mikrofluidik-Chip** als Abbild der Gesteinsstruktur (Lab-on-a-Chip)
- Visualisierung von Biomasse und Gas unter kontrollierten Laborbedingungen
- Charakterisierung der hydrodynamischen Eigenschaften: **K/φ-Beziehung**
- Beschreibung der Transportphänomene: Akkumulation, Wachstum und Ablösung; Bestimmung der **intrinsischen Biomassepermeabilität** mit digitalen Zwillingen (Navier-Stokes-Brinkmann-Formulierung)
- Analyse kritischer Spannungs- und Geschwindigkeitsfelder
- Bewertung des reaktiven Systems mittels Gaschromatographie unter Einbeziehung kontrollierender Parameter (Pe, Da)

Kernflutungsexperimente

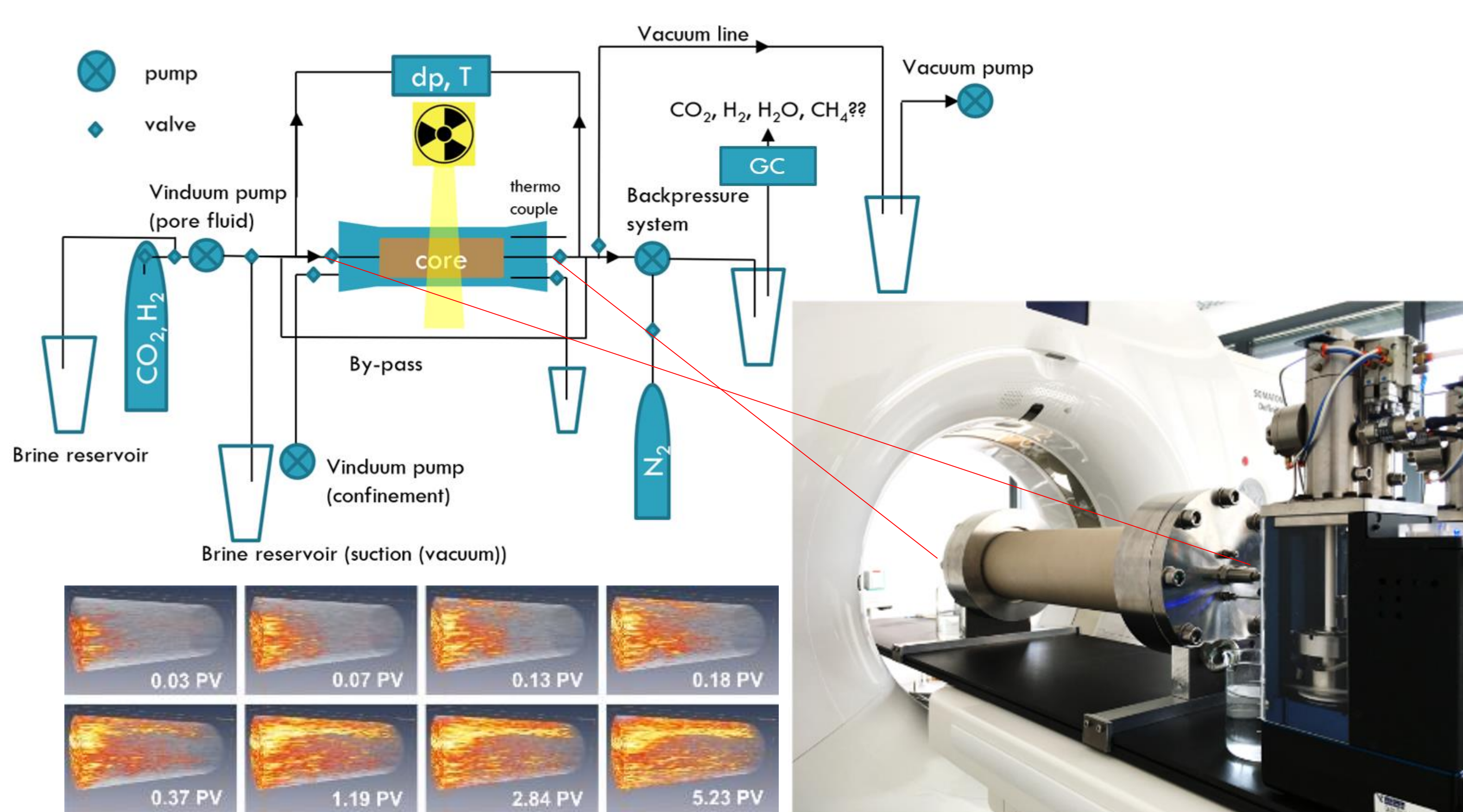


Abb.2: Schematische Übersicht des experimentellen Aufbaus für die Kernflutungsversuche auf der Meter-Skala (oben), Coreholder-System mit Hochdruckdosierpumpe in medizinischem CT-Scanner montiert (rechts), Visualisierung der Gasphasenmigration (Gassättigungsprofil) während einer CO₂-Injektion in eine wassergesättigte Bohrkernprobe (links unten, S. Berg et al. 2013)

- Untersuchungen auf makroskopischer Ebene (**feldrelevante Skala-Meterskala**)
 - Phasenverteilung (Gasphase/Wasserphase/Biomasse)
 - Separationseffekte (diffusiv, advektiv, Löslichkeiten der gasförmigen Substrate in flüssiger Phase)
 - Einfluss auf die hydraulische Gesteinseigenschaften
 - Verdrängungs- und Transportmechanismen
 - Gasumwandlungsraten und mikrobielles Wachstum
- Validierung des Simulators** mit experimentellen Daten (history-matching)
- Computertomographische Bildgebung (medizinischer CT-scanner), Gasanalyse mittels GC
- Hochskalierung der auf Mikroskala ermittelten Ergebnisse

Simulationen auf der Kontinuum-Skala

- Numerische Simulation von **bio-reaktiven Transportprozessen** infolge Wasserstoffspeicherung in erschöpften Gaslagerstätten
 - Injektion von H₂ und CO₂
 - Durchflussreaktor mit konstanten Injektions- und Produktionsraten
- Bio-reaktive vs. nichtreaktive Operationsszenarien
- Sensitivität und Einfluss verschiedener Input- und Prozessparameter auf das System bestimmen → **Was macht den Bioreaktor effizient?**
- Kombinierter work-flow durch numerisches history-matching der experimentellen Ergebnisse

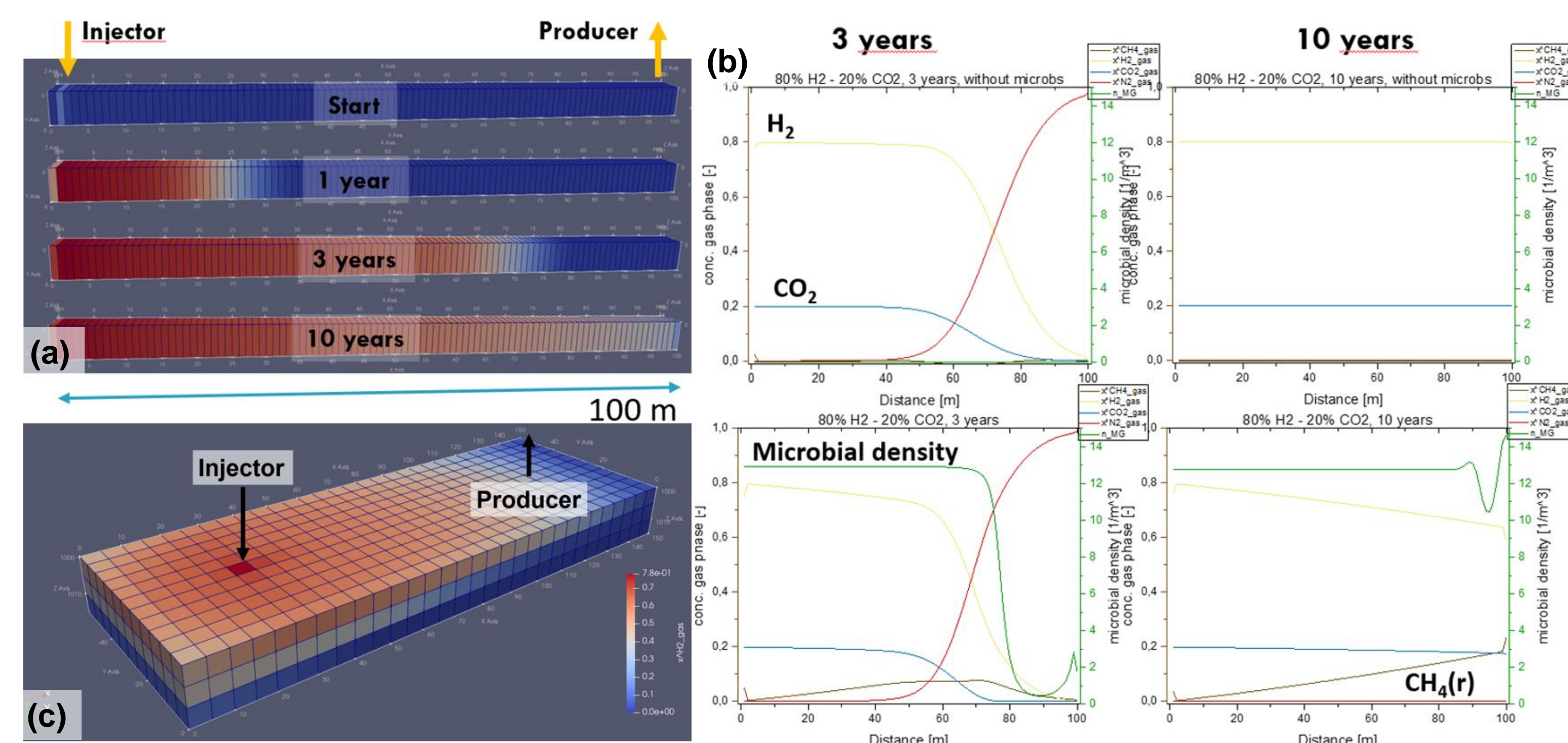


Abb.3: Simulationen bio-reaktiver Transportprozesse auf der Kontinuum-Skala: (a) 1D Simulations-Modell, (b) Gegenüberstellung der Gasverteilung von nichtreaktiven vs. bioreaktiven Simulationsszenarios (nach 3 bzw. 10 Jahren Operationsdauer), (c) 3D Simulations-Modell auf Feldskala