

NMR-Relaxation bei Teilsättigung unter Berücksichtigung von fast- und slow diffusion

Motivation

➤ Verständnis vom Zusammenhang Sättigung (S) und NMR-Relaxation (T_1)
(=> Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit bei Teilsättigung)

➤ Übliche Vorstellung sehr vereinfacht (Abb.1): Entsättigung gemäß Kapillarbündelmodell, NMR nur im fast diffusion regime

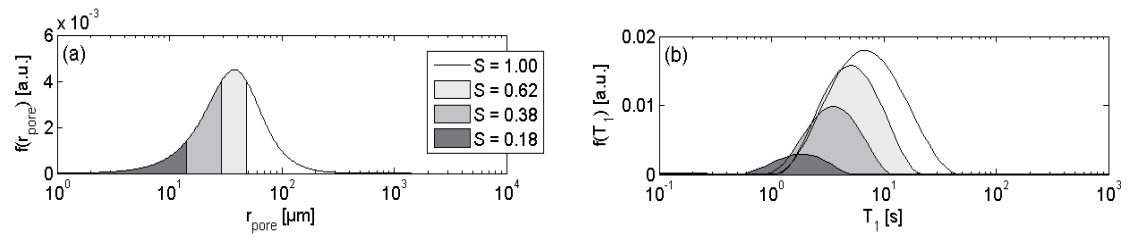


Abb. 1: (a) Idealvorstellung: Porenradienverteilungen (Kapillarbündel) bei Entsättigung, (b) entsprechende Verteilung der NMR-Relaxationszeiten (Inversion mit Glattheitskriterium).

Modellvorstellungen zum Relaxationsverhalten

➤ Nur im fast diffusion regime gilt Proportionalität :

$$\frac{1}{T_{1,surf}} = \rho \frac{a}{r_{pore}}$$

➤ Im slow diffusion regime ist multi-exponentielles Verhalten aus einer einzelnen Pore möglich!
D.h. keine eindeutige Zuordnung von $T_{1,surf}$ und r_{pore}

➤ Relaxation in vollgesättigten Kapillaren (Abb.2, Modell 1): Brownstein und Tarr (1979)

➤ Berücksichtigung residueller Wasserfilme (Abb.2, Modell 2): Costabel (2011)

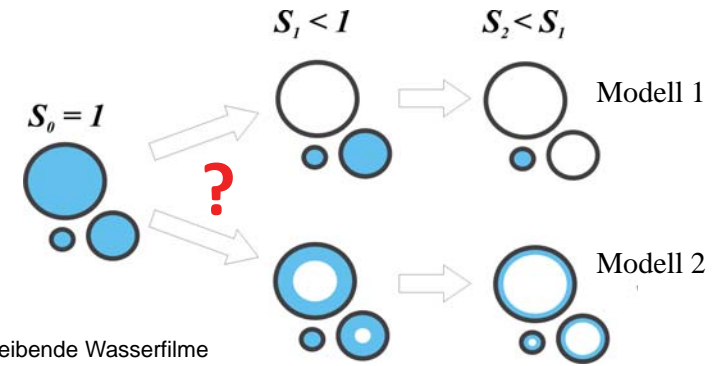


Abb. 2: evtl. verbleibende Wasserfilme beeinflussen das NMR-Relaxationsverhalten.

Material und Methoden

➤ Proben mit enger Porenradienverteilung (Abb.3a): industrieller Feinsand (fs) und natürlicher Mittelsand aus dem Fuhrberger Feld (FBS)

➤ Entsättigung über Vakuumpumpe mit regelbarem Druck

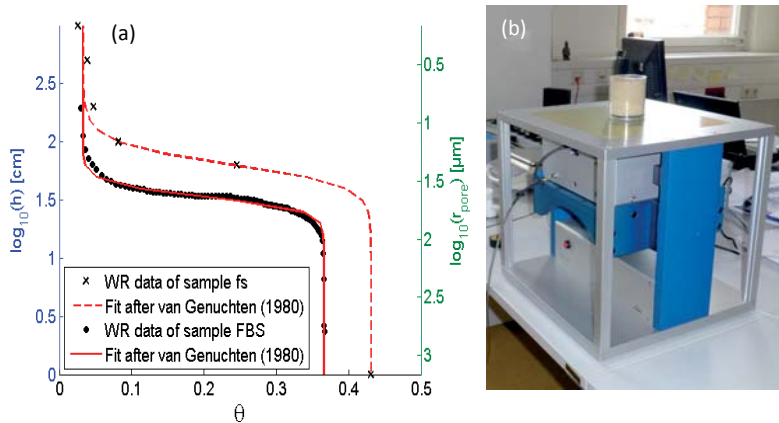


Abb. 3: (a) Wasserretentionskurven der untersuchten Proben, (b) verwendetes NMR-Messgerät: NMR Mouse (Blümich et al., 2008).

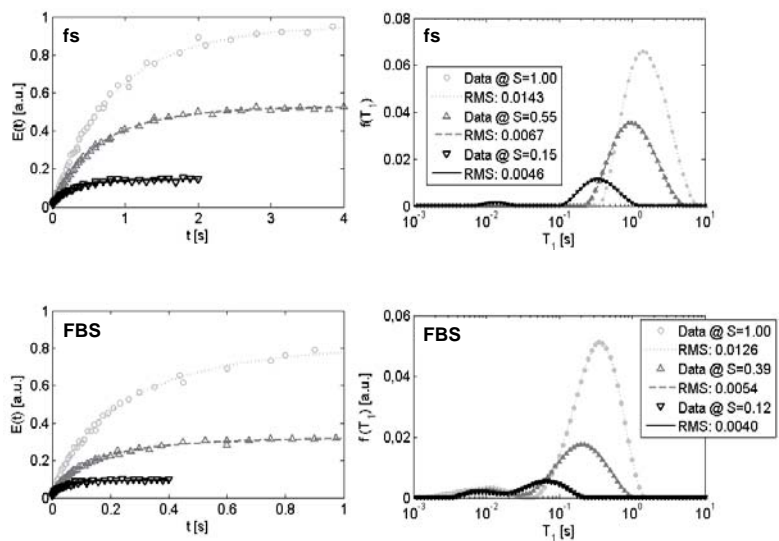


Abb. 4: NMR Messdaten (saturation recovery, links) und T_1 -Verteilung (rechts).

Alternative Interpretation (Berücksichtigung des Diffusionsregimes)

➤ Vorwärtsmodellierung der Relaxation in einer einzigen Pore mit effektivem Radius r_{eff} (Modell 1 und 2):

➤ Parametersuche für r_{eff} und ρ (Abb.5):

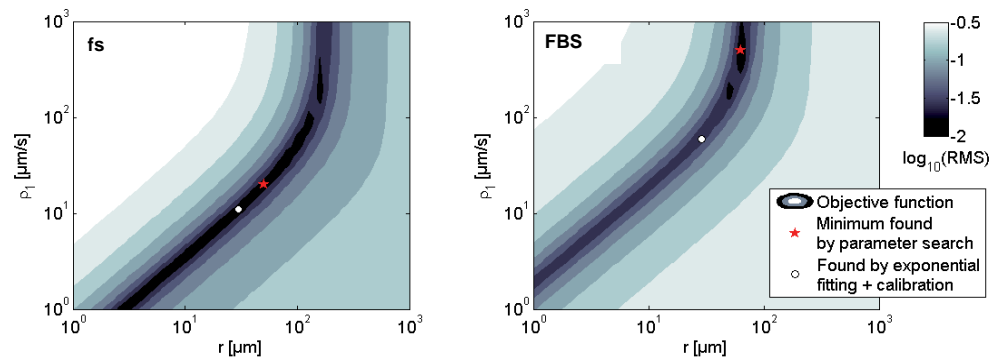


Abb. 5: Suchfunktionen (root mean square, RMS als Funktion von r_{eff} und ρ).

➤ Modell 1 erklärt die Messdaten genauso gut wie Standardauswertung (Siehe Abb.4)

➤ Modell 2 erklärt die Daten hier nicht: Einfluss der Wasserfilme wird für diese Beispiele nicht nachgewiesen

➤ Probe fs im fast diffusion regime:

=> mono-exponentielles Verhalten (Abb.6, links)

=> r_{eff} und ρ_1 nur durch Kalibration ermittelbar ($\rho = 11 \mu\text{m/s}$):

S	h [cm]	r_{eff} [μm]
1	0	30
0.55	100	19
0.15	200	6

➤ Probe FBS im slow diffusion regime (Abb. 6, rechts)

=> multi-exponentielles Verhalten innerhalb einer Pore (r_{eff})

=> r_{eff} und ρ_1 ohne Kalibration ermittelbar!

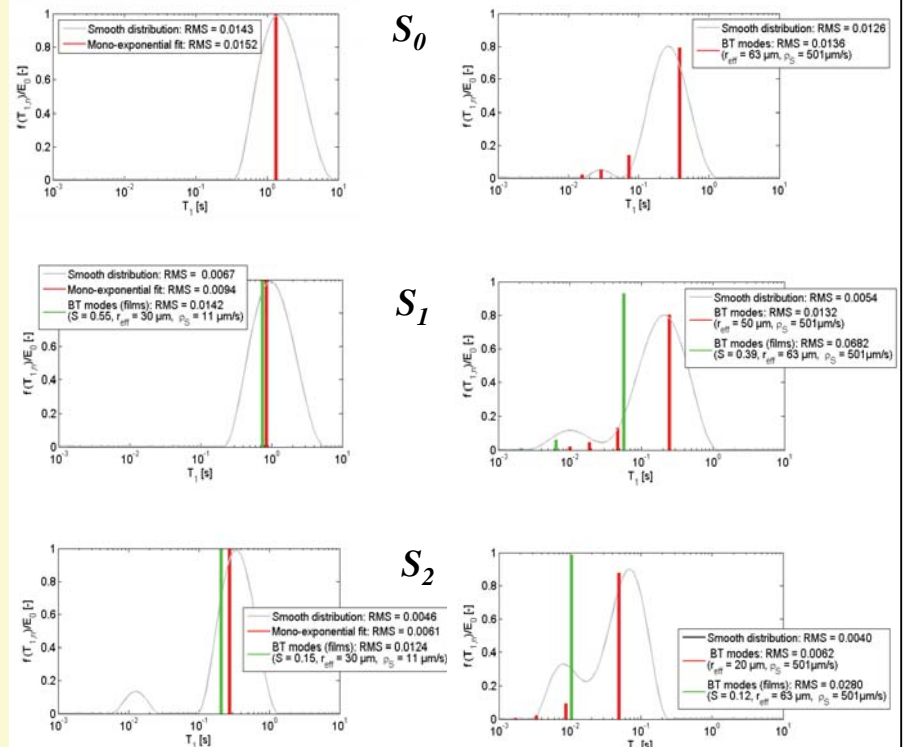


Abb. 6: Anpassung der NMR-Messkurven mit Modell 1 (rot) und Modell 2 (grün) im Vergleich zur üblichen T_1 -Verteilung (grau)

Schlussfolgerungen

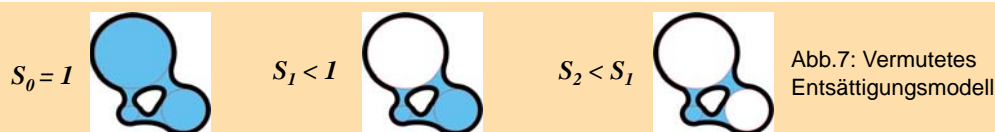


Abb. 7: Vermutetes Entsättigungsmodell

=> Bei Lockersedimenten (Sand) löst NMR nicht generell die gesamte Porenradienverteilung auf (weil Porenkonnektivität zu groß ist, Abb. 7, Mohnke und Klitzsch, 2010).

=> Trotzdem ist die Relaxationszeit auch bei Teilsättigung ein glaubwürdiges Proxy für den effektiven Porenradius des restwassergefüllten Porenraumes

=> Die ungesättigte Leitfähigkeit ist ermittelbar, im slow diffusion sogar ohne Kalibration (im fast diffusion ist Kalibration notwendig ähnlich dem Vorgehen bei Vollsättigung)

Referenzen

➤ Blümich, B., Perlo, J., and Casanova, F. (2008), Mobile single-sided NMR. Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, 52, 197–269.
 ➤ Brownstein, K. R. and Tarr, C. E. (1979), Importance of classical diffusion in NMR studies of water in biological cells. Physical Review A, 19, 2446–2453.
 ➤ Costabel, S. (2011), Nuclear magnetic resonance on laboratory and field scale for estimating hydraulic parameters in the vadose zone. Dissertation, Technische Universität Berlin.
 ➤ Mohnke, O., and Klitzsch, N. (2010), Microscale simulations of NMR relaxation in porous media considering internal field gradients, Vadose Zone J., 9, 846–857.