

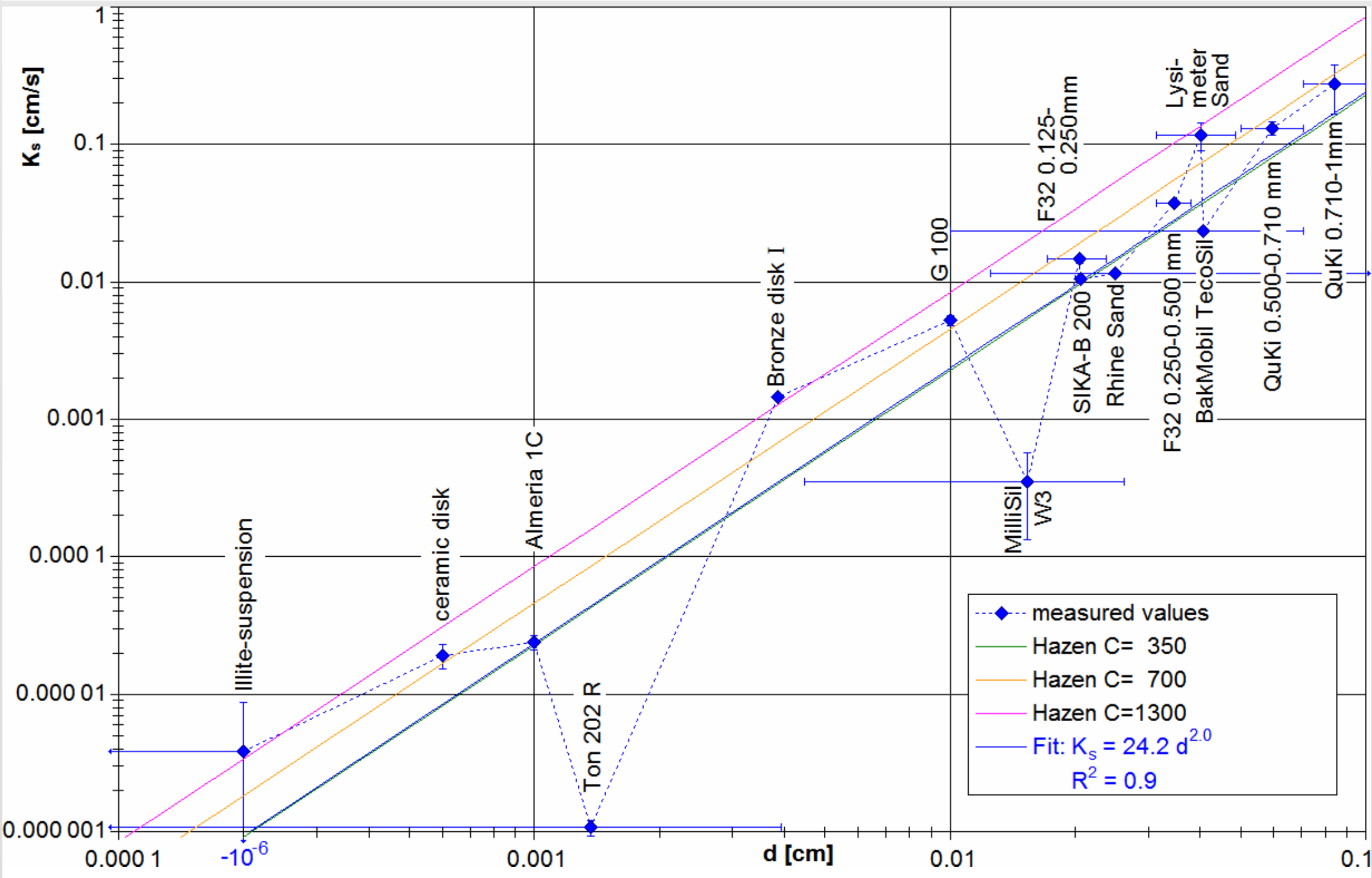
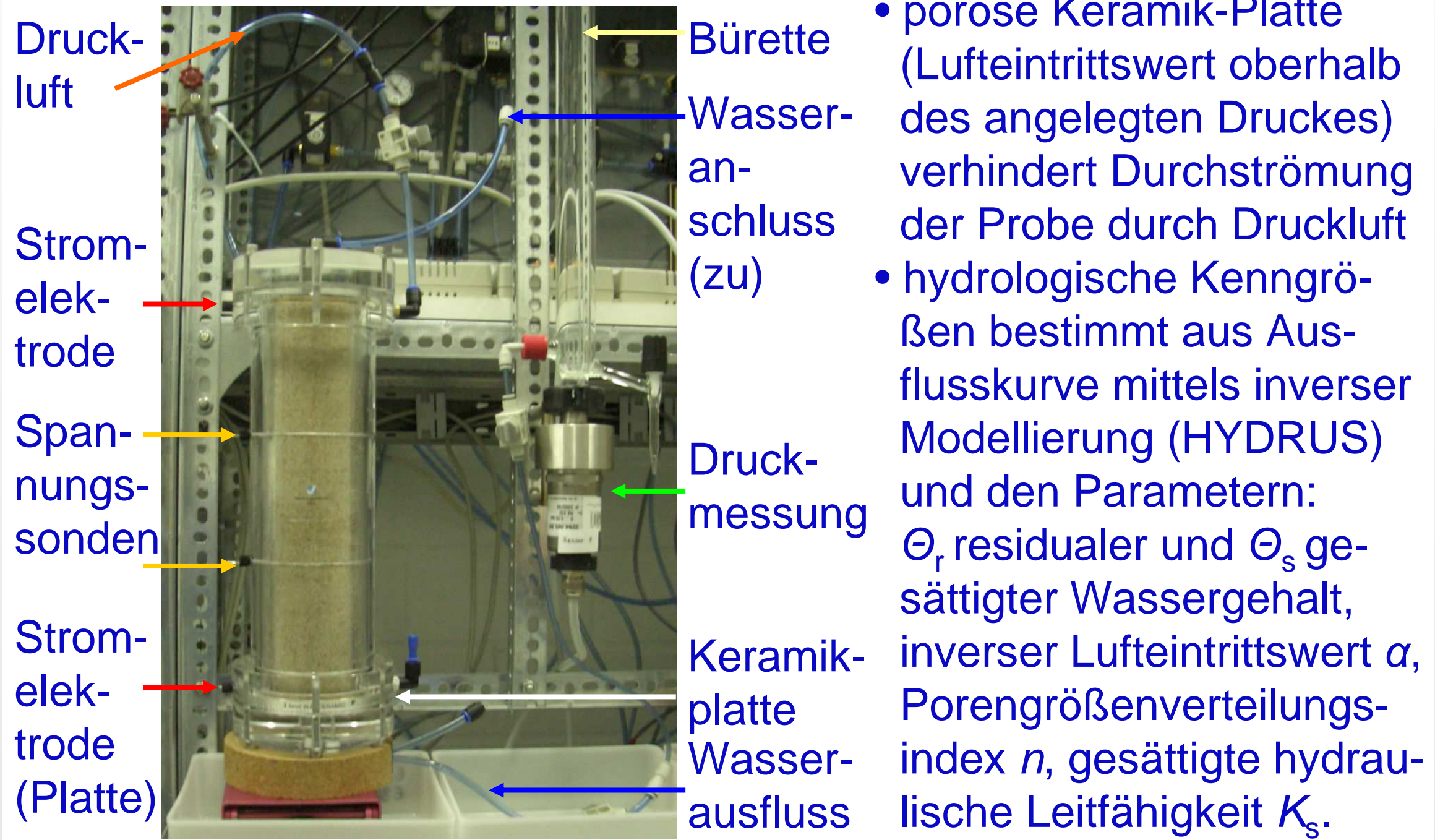
Charakterisierung hydrologischer Material-Eigenschaften mittels *Multi Step Outflow* (MSO) Experimenten

H.-Martin Münch, Bonn



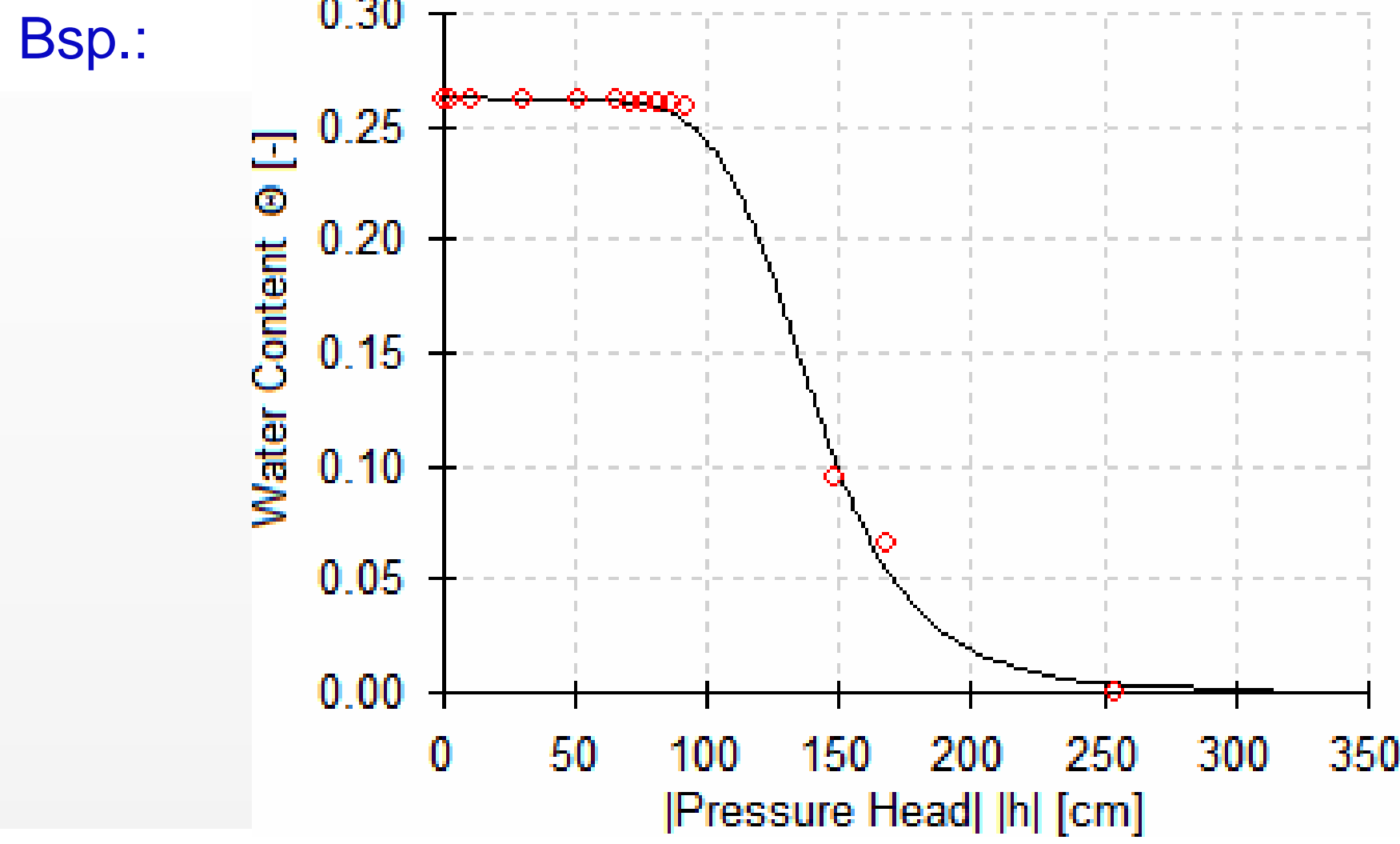
Methode/Messsystem

- Kenntnis hydrologischer Eigenschaften ist essentiell für Grundwasser-Management
- Bestimmung dieser Eigenschaften mittels MSO zwecks Verknüpfung mit elektrischen Eigenschaften (Spektrale Induzierte Polarisation)
- Probenhalter entwickelt zur gemeinsamen Messung der hydraulischen und elektrischen Eigenschaften
- gesättigtes Medium wird mittels Druckluft schrittweise entwässert



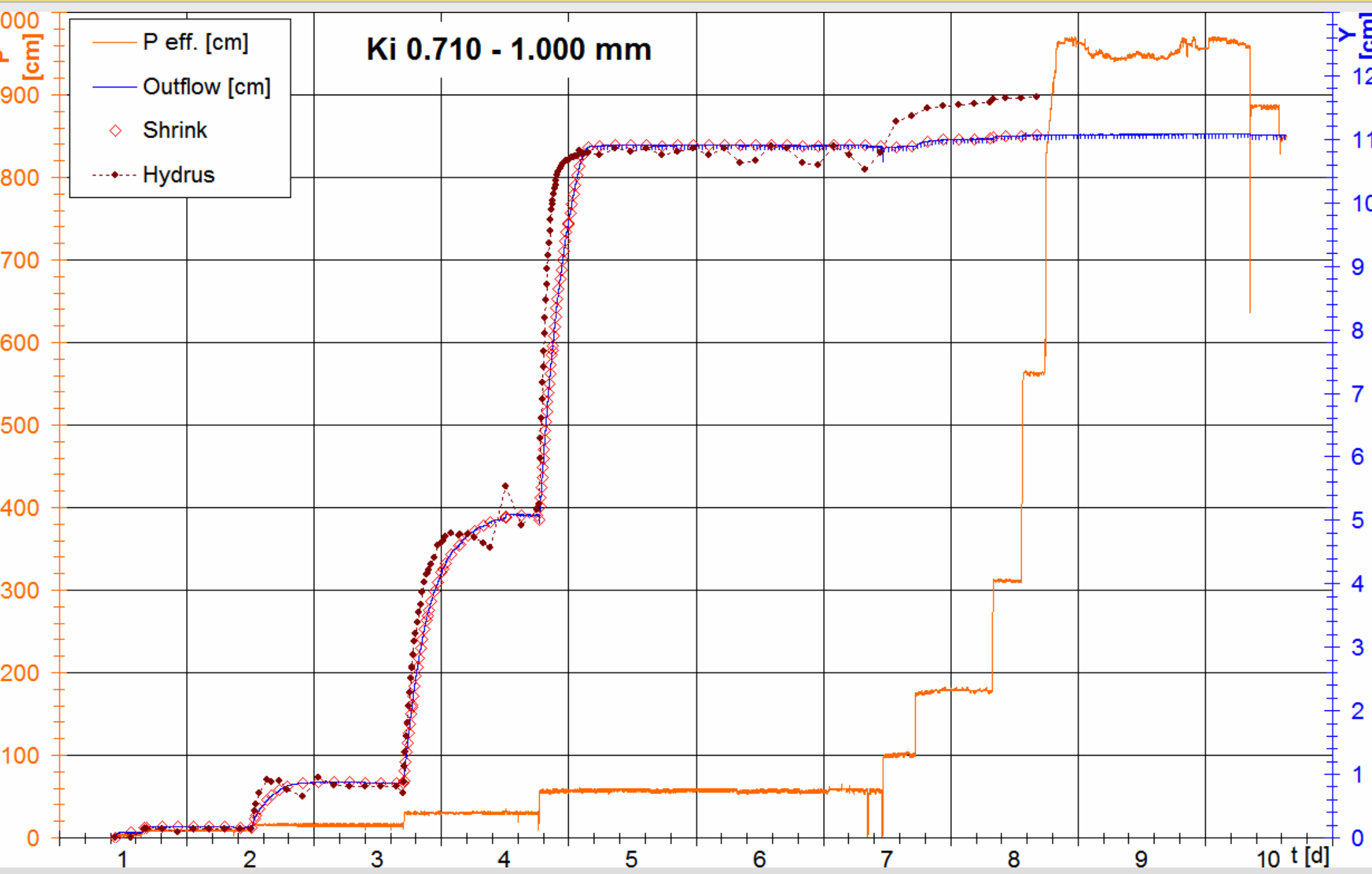
K_s untersuchter Materialien, Korndurchmesser d (Ton 202 R: Agglomerate); HAZEN (1892) Formel: $K_s [m/d] = C (d_{10} [mm])^2$

Platten: α, n



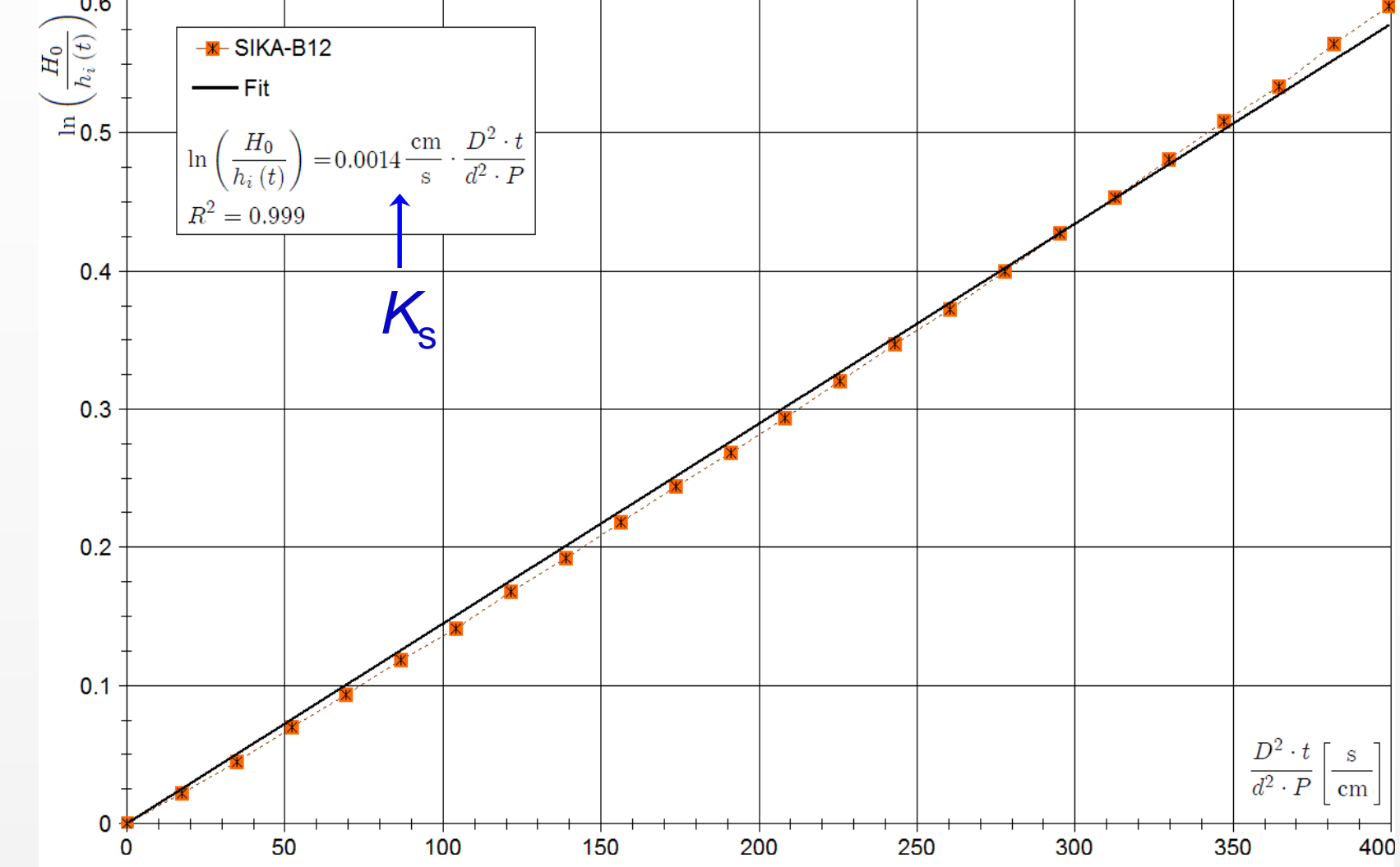
- Messung der Wasserhaltekurve im Drucktopf: Wassergehalt θ abhängig von angelegtem Luftdruck (P bzw. *pressure head* h)
- inverse Modellierung mit RetC (VAN GENUCHTEN *et al.*, 1991) aus dem HYDRUS (ŠIMÚNEK *et al.*, 2005) Software-Paket \Rightarrow inverser Lufteintrittswert $\alpha [cm^{-1}] = P_{bubble}^{-1}$ und Porengrößenverteilungsindex n (mit $m=1-1/n$)

MSO-Daten & HYDRUS-Modellfit



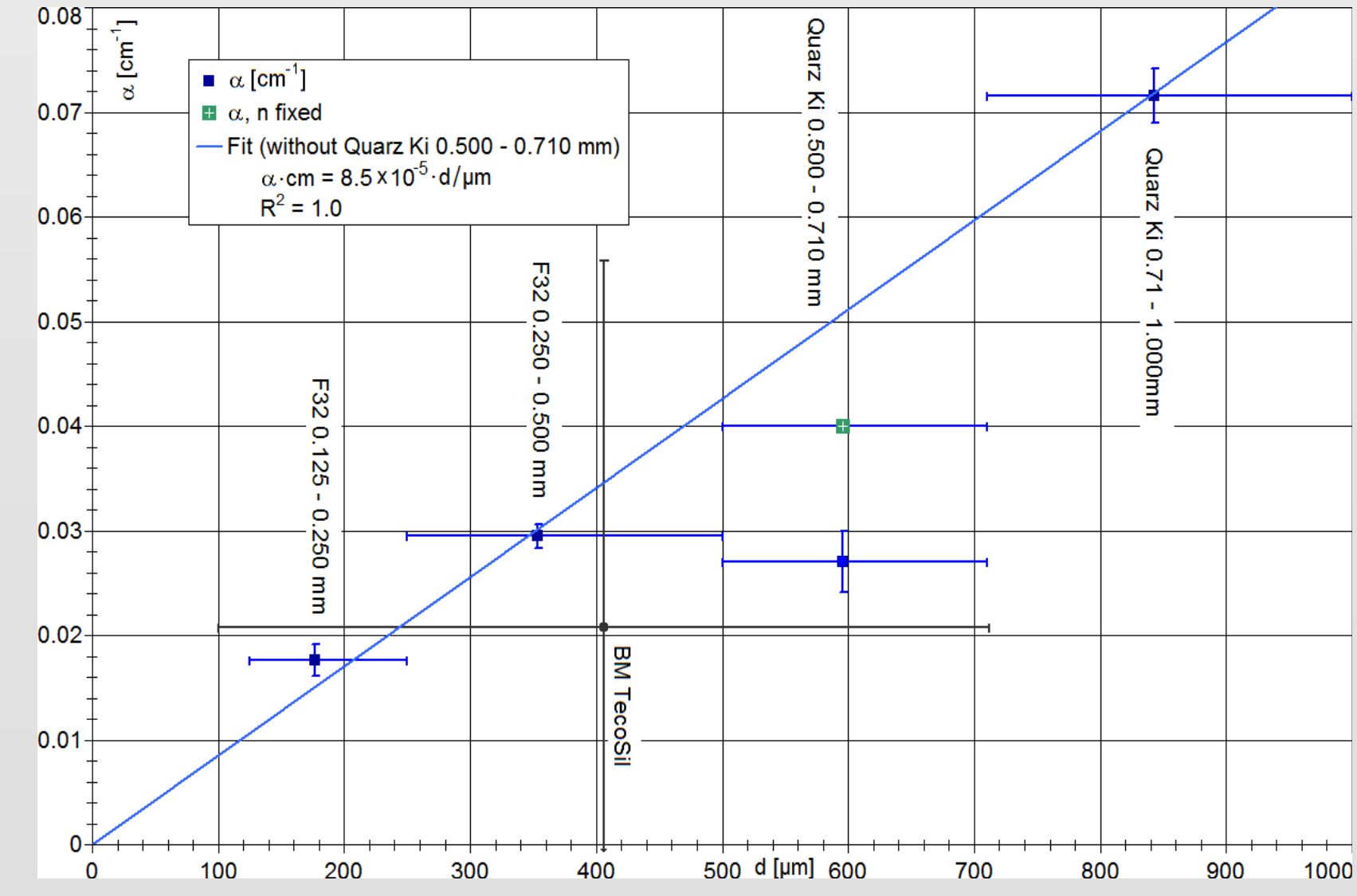
Effektiver angelegter Druck P_{eff} , resultierender normierter Ausfluss Y , Ausflusswerte ausgewählt mittels Shrink-Programm und angepasst mit HYDRUS-Programm unter Verwendung der bestimmten Werte für α , n und K_s der Platten.

Platten: K_s



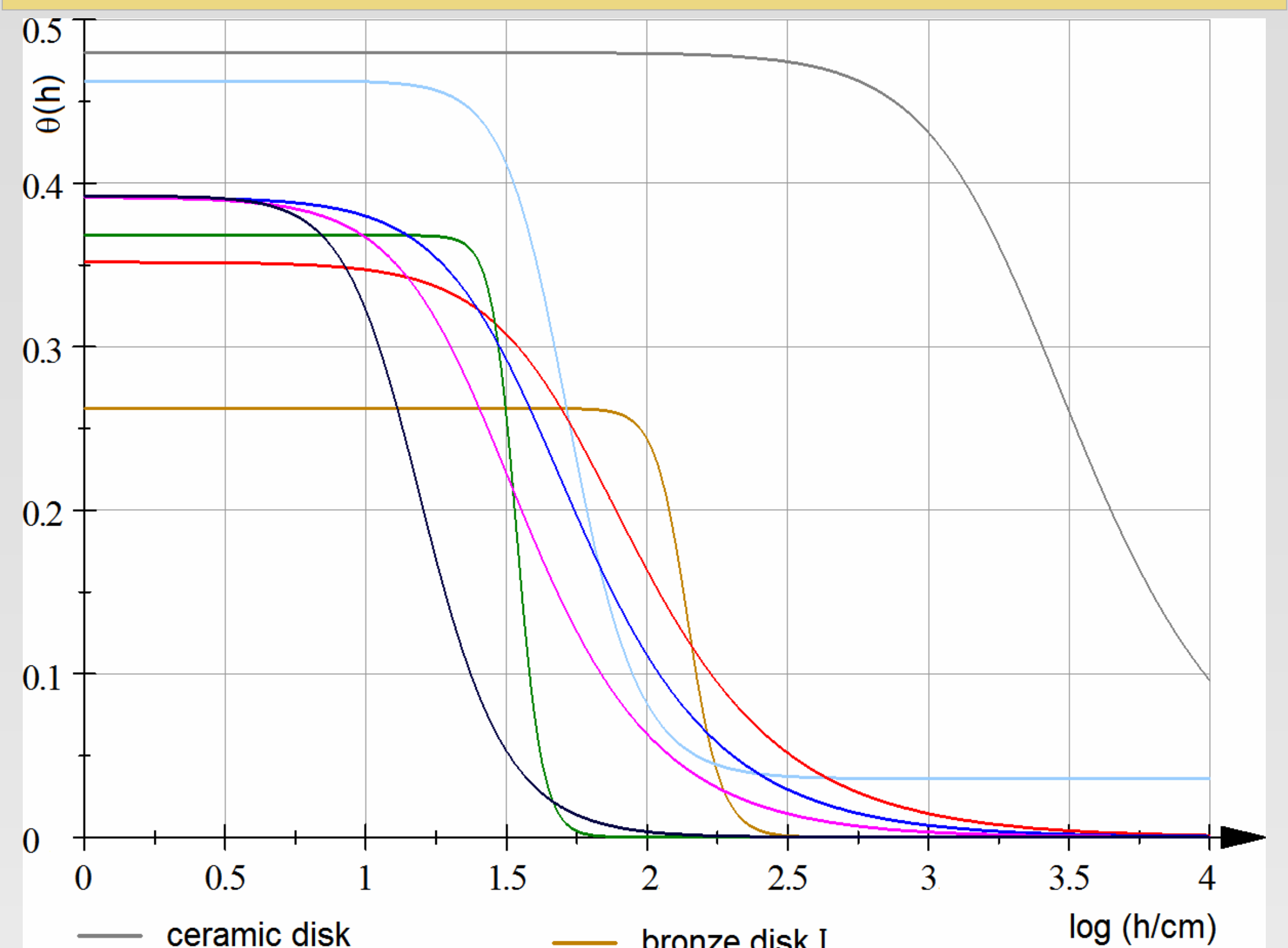
Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit K_s der Stromelektrode mittels *falling head permeameter* Experiment (Ausfluss aus anfänglich wassergefülltem Zylinder durch die Platte): D Durchmesser, P Dicke der Platte, t Zeit, H_0 anfängliche Wasserhöhe, $h(t)$ verbleibende Wasserhöhe zur Zeit t

Proben: α, n



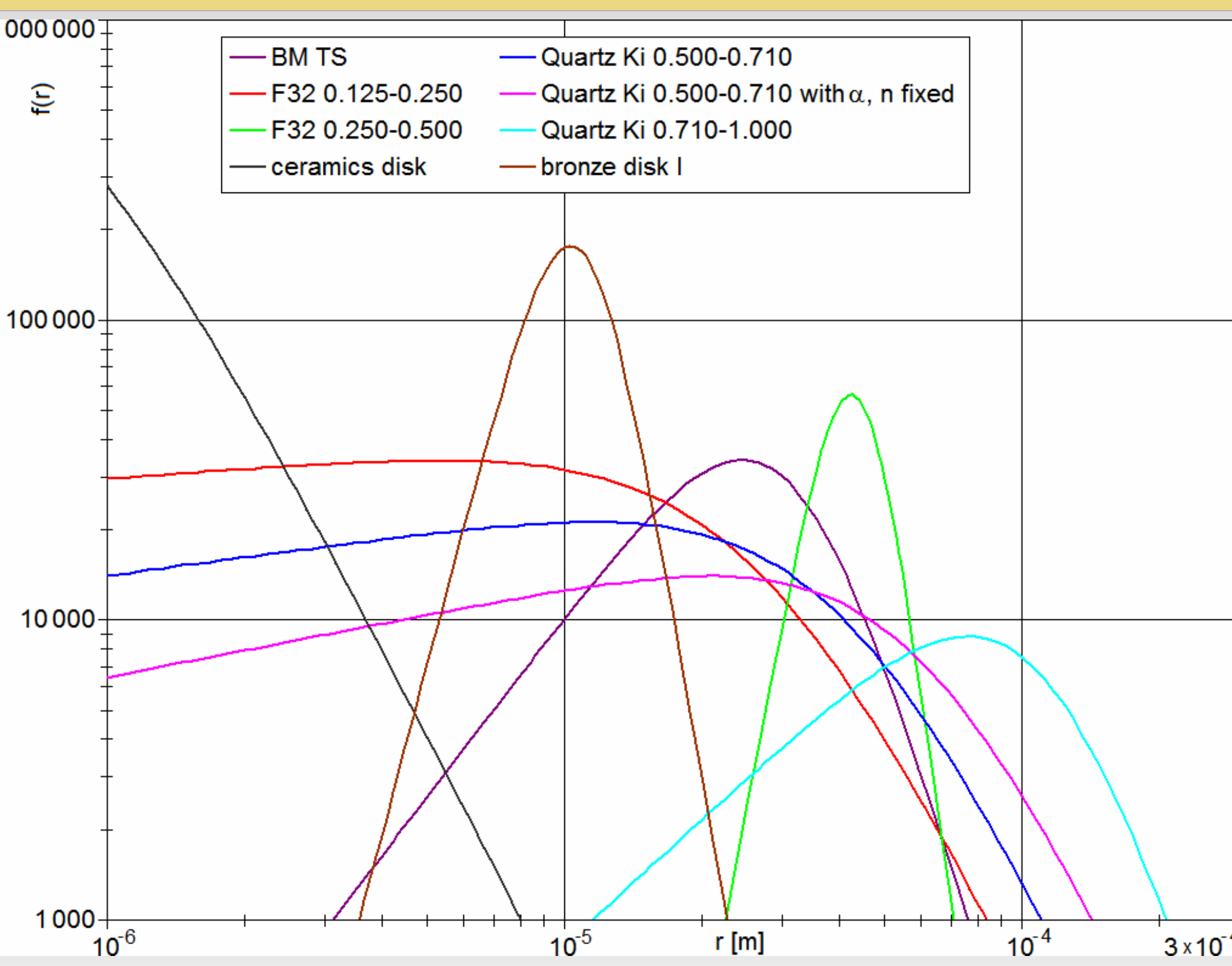
Die Modellierung mit HYDRUS liefert Werte für α und n der untersuchten Materialien. $\alpha \sim P^{-1} \sim d$ wie erwartet (wobei Quartz Ki 0.500 – 0.710 mm wie üblich abweicht). Etwa $2 < n < 4$, zunehmend mit der Korngröße (wobei n für F32 0.250–0.500 gegen die Schranke im Programm läuft und daher nicht signifikant ist).

Wasserhaltekurven (Modell)



Modellierte Wasserhaltekurven $\theta(h)$ entsprechen der experimentellen Beobachtung.

Porengrößenverteilung (Modell)



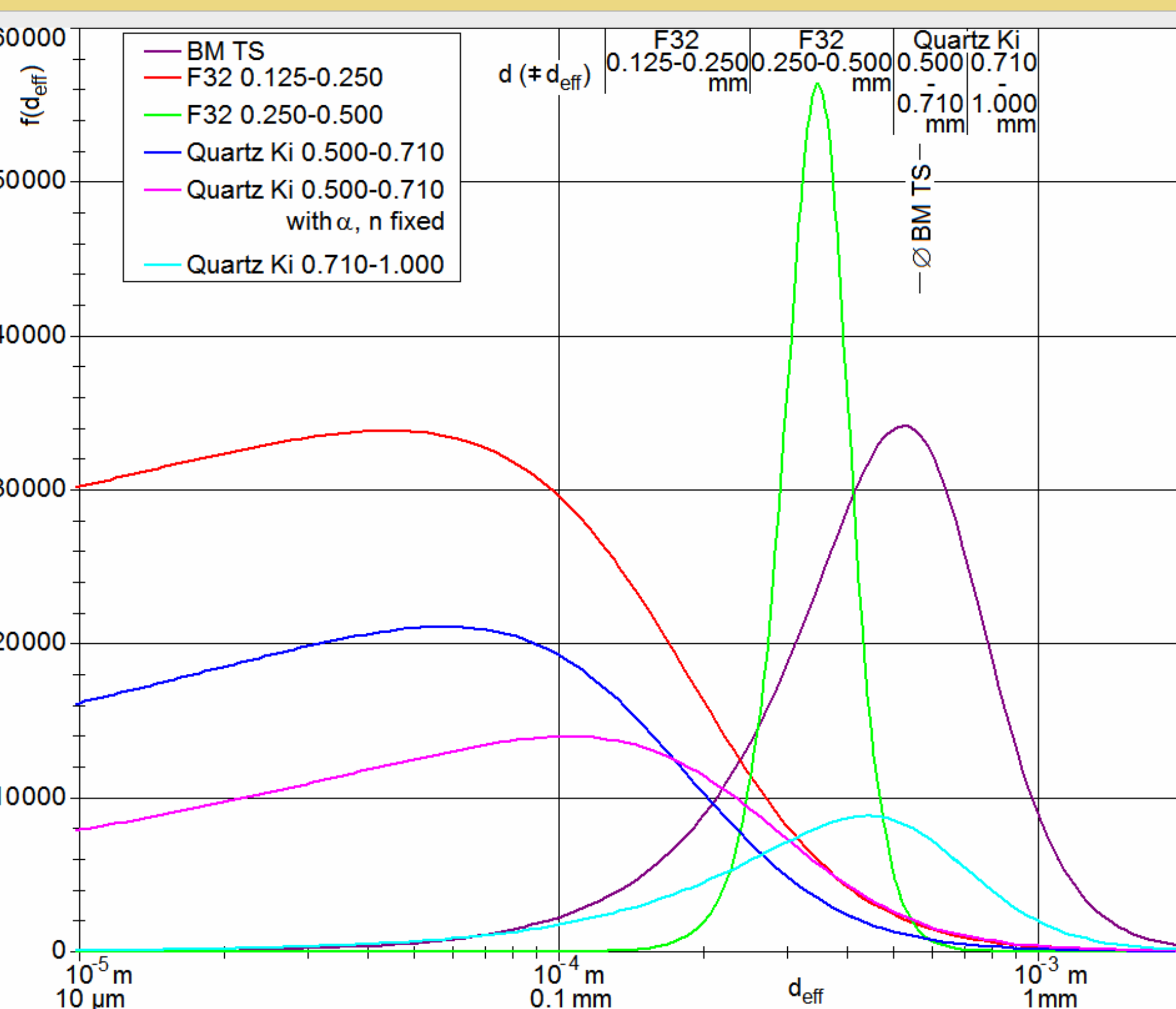
Porengrößenverteilung $f(r)$ für Sande and Platten, modelliert mit ihren ermittelten van-Genuchten-Parametern α and n

$$f(r) = \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \frac{d\theta}{dr} = (n-1) \cdot (1+y)^{\frac{1}{n}-2} \cdot y \cdot r^{-1}$$

$$y := \left(\frac{\rho g \cos \gamma}{2\sigma_{st}\alpha} \right)^{-n} = (-h_m)^{-n}$$

sowie Wasserdichte ρ , Schwerebeschleunigung g , Benetzungswinkel γ , Kraft der Oberflächenspannung σ_{st} ; Höhe des Kapillaranstiegs h_m .

Korngrößenverteilung (Modell)



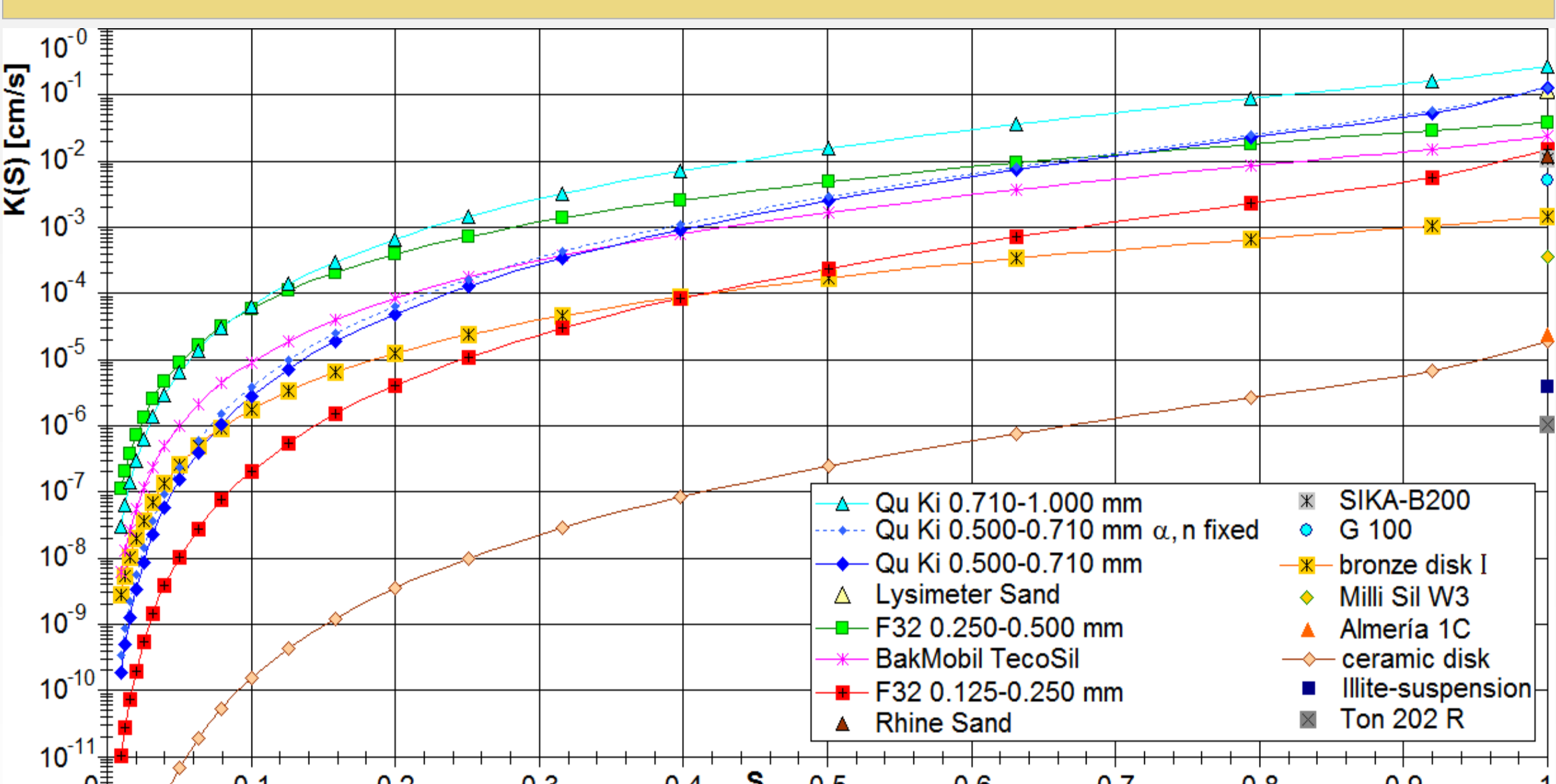
Aus der Porengrößenverteilung folgt mit $d_{eff} = 2 \theta_{eff}$ die Korngrößenverteilung mit Theta transform

$$\theta = \sqrt{\frac{am^2}{8\phi^{2m}}} = \sqrt{\frac{am^2 F^2}{8}}$$

mit d_{eff} effektiver Korndurchmesser, r_{eff} effektiver Porenradius, ϕ Porosität, m Zementationsexponent, F Formationsfaktor, $a \approx 8/3$ für quasisphärische Körner (GLOVER & WALKER, 2009). Das modellierte hauptsächliche d_{eff} stimmt besser als innerhalb einer Größenordnung mit d aus Siebungen überein (und F32 0.125 – 0.250mm < F32 0.250–0.500mm < Quartz Ki 0.710–1.0 mm). Probe Quartz Ki 0.500 – 0.710 mm weicht stärker ab (wie bei anderen Parametern auch), aber auch nur etwa eine Größenordnung.

Poster, Abstract etc. als PDF unter <http://ukoeln.de/RG8TA>

Sättigungsabh. hydr. Leitfähigkeit (Modell)



Mittels der ermittelten (van-Genuchten-)Parameter kann die hydraulische Leitfähigkeit K in Abhängigkeit der Sättigung S berechnet werden.

Literatur

GENUCHTEN, M. Th. van, ŠIMÚNEK, J., LEIJ, F. J., & ŠEJNA, M. (1991): RetC, version 6.0, Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, Riverside (CA, U. S. A.); online verfügbar unter: <http://www.pc-progress.com/Documents/programs/retc.pdf>.
 GLOVER, P. W. J., & WALKER, E. (2009): Grain-size to effective pore-size transformation derived from electrokinetic theory, *Geophysics*, **74**(1), E17 – E29; online verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1190/1.3033217>.
 HAZEN, A. (1892): Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration, in: Massachusetts State Board of Health (ed.): 24th Annual Report, Pub. Document Number 34, 539 – 556.
 ŠIMÚNEK, J., GENUCHTEN, M. Th. van, & ŠEJNA, M. (2008): Modeling subsurface water flow and solute transport with HYDRUS and related numerical software packages, in: Garcia-Navarro, P., & Playán, E. (eds.): Numerical modelling of hydrodynamics for water resources, Laylor & Francis Group, London (UK), ISBN-13: 978-0-415-44056-1, p. 95 – 115; online verfügbar unter: http://www.pc-progress.com/Documents/Jirka/Spain_Workshop_HYDRUS_Review_2007.pdf.



Die Kenntnis hydrologischer Eigenschaften ist essentiell für das Grundwassermanagement. Im Rahmen eines Projektes zur Verknüpfung mit elektrischen Eigenschaften, welche nicht-invasiv bestimmbar sind (Spektrale Induzierte Polarisation, SIP), wurden am IBG-3 (Agrosphäre; vormals ICG-IV) der Forschungszentrum Jülich GmbH hydrologische Material-Eigenschaften bestimmt mittels *Multi-Step-Outflow*-Experimenten (MSO). Dazu wurde ein Probenhalter entwickelt zur gemeinsamen Messung der hydraulischen und der elektrischen Eigenschaften. In der MSO-Anlage wird das gesättigte Medium mittels Druckluft bzw. Saugspannung schrittweise entwässert. Unterhalb der Probe verhindert eine poröse Keramik-Platte (mit Lufteintrittswert oberhalb des angelegten Druckes) die Durchströmung der Probe durch die Druckluft (was die Entsättigung beenden würde). Aus der Ausflusskurve können mittels inverser Modellierung hydrologische Kenngrößen bestimmt werden (MUALEM-VAN-GENUCHTEN-Ansatz, HYDRUS-Software-Programm).

HYDRUS verwendet folgende Parameter: Θ_r residualer und Θ_s gesättigter Wassergehalt, Porenverbindungsparameter $l:=1/2$, inverser Lufteintrittswert α , Porengrößenverteilungsindex n , VAN-GENUCHTEN-Parameter $m:=1-1/n$, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_s . Dabei werden α und n bestimmt mittels inverser Modellierung aus Wasserhaltekurven (Wassergehalt in Abhängigkeit von angelegtem Luftdruck im Drucktopf, RetC-Software-Programm). K_s wird bestimmt mittels *falling head permeameter* Experimenten (Durchfluss in Abhängigkeit vom Wasserdruck). Die ermittelten K_s -Werte in Abhängigkeit von der Korngröße folgen der Formel von HAZEN (1892).

Die MSO-Daten werden ins HYDRUS-Format konvertiert (z. B. Ausfluss durch Probenhalterquerschnitt normiert, Druck [bar] oberhalb zu Saugspannung [cm] unterhalb der Säule) und mittels SHRINK-Software-Programm systematisch reduziert.

Der inverse Lufteintrittswert α aus der inversen Modellierung zeigt eine generelle Zunahme mit der Korngröße, wie wegen der inversen Beziehung beider Größen mit dem Lufteintrittswert erwartet. Mit zunehmender Korngröße wird auch ein zunehmender Porengrößenverteilungsindex n beobachtet.

Mit α , n , m und K_s wird die Leitfähigkeit in Abhängigkeit von Wassergehalt θ bzw. Sättigung $0 \leq S \leq 1$ oder Druckhöhe h berechnet, ebenso Wasserhaltekurven (θ abhängig von Matrixpotential ψ oder h), effektive Poren- und daraus Korn-Größen-Verteilungen, welche zu den Korngrößen passen, wie sie durch Siebungen eingegrenzt wurden.

Der nächste Schritt ist die Korrelation der Sättigungs-abhängigen hydraulischen Leitfähigkeiten mit den Ergebnissen der elektrischen Messungen, z. B. Korrelation von α und Relaxationszeitkonstante τ_1 ($\alpha=1,678 \log(\tau_1/s)+2,147) \cdot 10^{-2} \text{cm}^{-1}$, $R^2=0,997$) (vgl. NORDSIEK *et al.*, 2012).

<http://ukoeln.de/PL9SK>

Kontakt: <http://ukoeln.de/GDYH1>

Literatur

- Genuchten, M. Th. van, Šimůnek, J., Leij, F. J., & Šejna, M. (1991): RetC, version 6.0, Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, Riverside (CA, U. S. A.); online verfügbar unter: <http://www.pc-progress.com/Documents/programs/retc.pdf>.
- Glover, P. W. J., & Walker, E. (2009): Grain-size to effective pore-size transformation derived from electrokinetic theory, *Geophysics*, **74**(1), E17 – E29; online verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1190/1.3033217>.
- Hazen, A. (1892): Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration, in: Massachusetts State Board of Health (ed.): 24th Annual Report, Pub. Document Number 34, 539 – 556.
- Münch, H.-M., Kemna, A., Herbst, M., Zimmermann, E., & Vereecken, H. (2005): Multi-step outflow experiments to link soil hydraulic properties with electrical characteristics, in: Hassanizadeh, S. M., & Torkzaban, S. (eds.): Proceedings of Workshop on HYDRUS Applications, Department of Earth Sciences, Utrecht University, The Netherlands, ISBN-10: 90-3934112-5, p. 42 – 45, Utrecht, The Netherlands: 17.10.2005 – 19.10.2005; online verfügbar unter <http://ukoeln.de/NP1XY>.
- Nordsiek, S., Hördt, A., Durner, W., & Diamantopoulos, E. (2012): Zusammenhänge zwischen hydrologischen Parametern und Spektren der Induzierten Polarisation an Bodenproben, 72. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft e. V. (DGG), GE-4.004, Hamburg: 08.03.2012; Abstract-Band S. 143, ISSN 0344-7251; online verfügbar unter http://www.dgg-2012.de/fileadmin/documents/DGG/Tagungsband_web.pdf.
- Šimůnek, J., Genuchten, M. Th. van, & Šejna, M. (2008): Modeling subsurface water flow and solute transport with HYDRUS and related numerical software packages, in: García-Navarro, P., & Playán, E. (eds.): Numerical modelling of hydrodynamics for water resources, Laylor & Francis Group, London (UK), ISBN-13: 978-0-415-44056-1, p. 95 – 115; online verfügbar unter: http://www.pc-progress.com/Documents/Jirka/Spain_Workshop_HYDRUS_Review_2007.pdf.