

Bodenkultur und Düngung

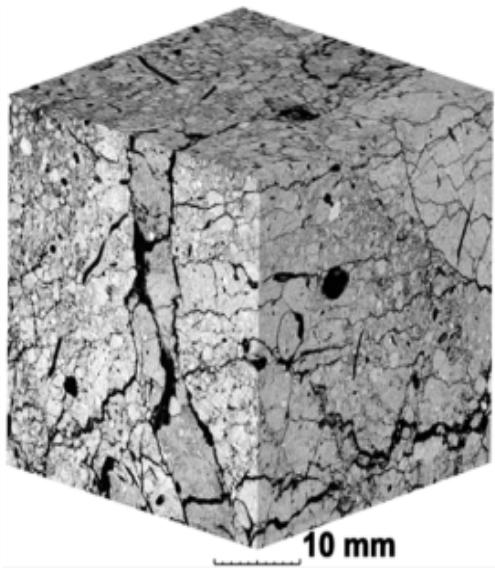
Bodenwassergehalt, Wasserbewegung und hydraulische
Leitfähigkeit

Prof. Dr. Mareike Ließ

WS 25/26

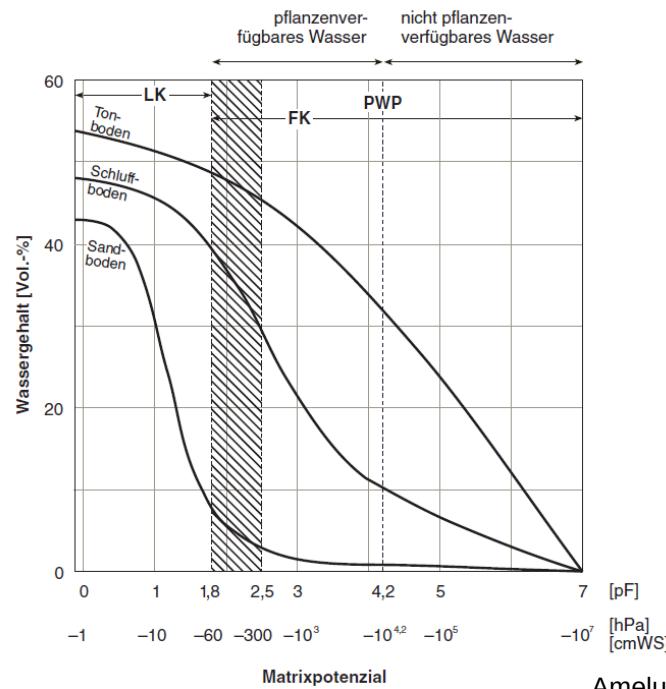
Rückblick

Porenraum



[https://www.dbges.de/de/dbg-themen/
komissionen/k1-bodenphysik-und-bodenhydrologie](https://www.dbges.de/de/dbg-themen/komissionen/k1-bodenphysik-und-bodenhydrologie)

Matrixpotenzial-Wassergehaltskurve



Amelung et al., 2018

Rückblick: Aufgabe

Eine mittels Stechzylinder entnommene Bodenprobe mit einem Gesamtvolumen von 100 cm^3 wurde im Labor für 3 Tage bei 105°C getrocknet. Damit ist die Probe frei von Wasser, alle Poren sind luftgefüllt.

Das Gewicht der getrockneten Probe (= Masse der Festsubstanz) lag bei 165 g. da es sich um eine sandige (=quarzreiche) Probe handelt, können Sie eine Festsubstanzdichte von $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ annehmen.

Berechnen Sie bitte die Lagerungsdichte und das Porenvolumen der Probe!

Lösung

$$\rho_{ges} = \frac{m_{trocken}}{V_{ges}} = \frac{165 \text{ g}}{100 \text{ cm}^3} = 1,65 \text{ g cm}^{-3}$$

Die Lagerungsdichte beträgt $1,65 \text{ g cm}^{-3}$.

$$PV = 1 - \frac{\rho_{ges}}{\rho_F} = 1 - \frac{1,65 \text{ g cm}^{-3}}{2,65 \text{ g cm}^{-3}} = 0,3774$$

Das Porenvolumen beträgt 37,74%.

Bodenwassergehalt

Definition: prozentualer Wasseranteil am Boden (Masse-% oder Vol-%) nach Trocknen bei 105 °C (oftentrocken) bis zur Gewichtskonstanz.

Gravimetrischer Wassergehalt $\theta_G = \frac{m_w}{m_f} = \frac{m_f - m_t}{m_f}$

Volumetrischer Wassergehalt $\theta_V = \frac{V_w}{V_{ges}}$

θ_G gravimetrischer Wassergehalt

θ_V volumetrischer Wassergehalt

m_w Wassermasse

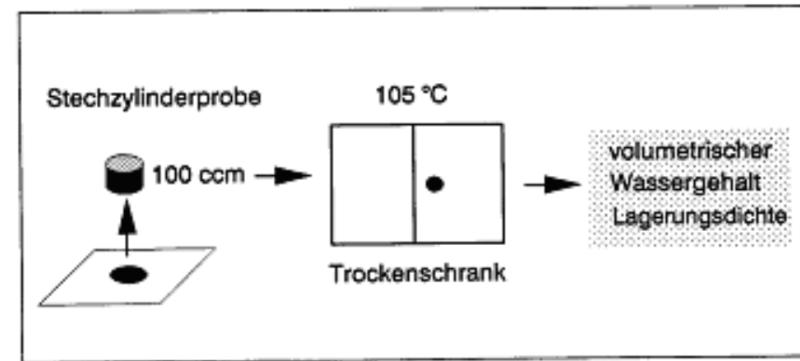
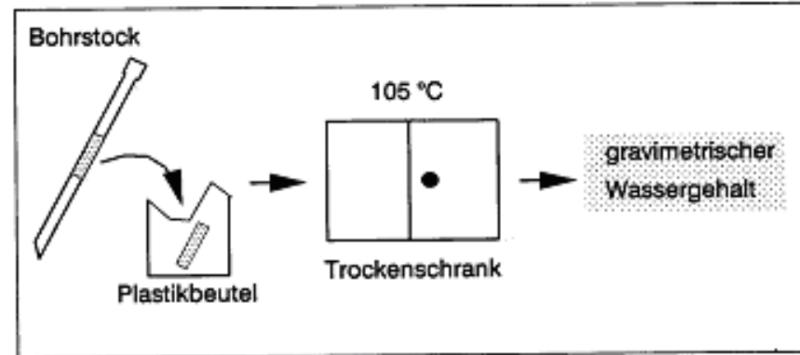
m_f Feuchtmasse

m_t Trockenmasse

V_w Wasservolumen

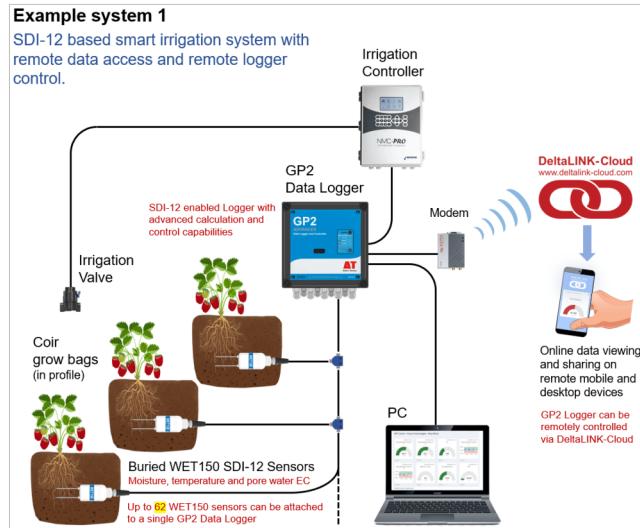
V_{ges} Gesamtvolumen

Wasseranteile, die erst bei höheren Temperaturen entfernt werden, rechnet man nicht zum Bodenwasser. Sie gehören zum Konstitutions- bzw. Kristallwasser der festen Bodenpartikel.



Bodenwassergehalt über Sensoren messen

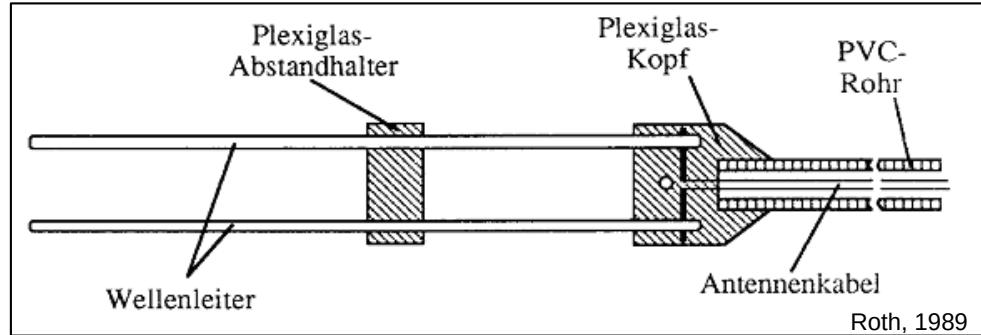
- Welches Messprinzip?
- Wie groß ist der Bereich (Bodenvolumen), in dem ich messe?
- Was muss ich beim Einbau, bei der Nutzung des Sensors beachten?
- Welche Bodentiefe?
- Welche zeitliche und räumliche Auflösung?



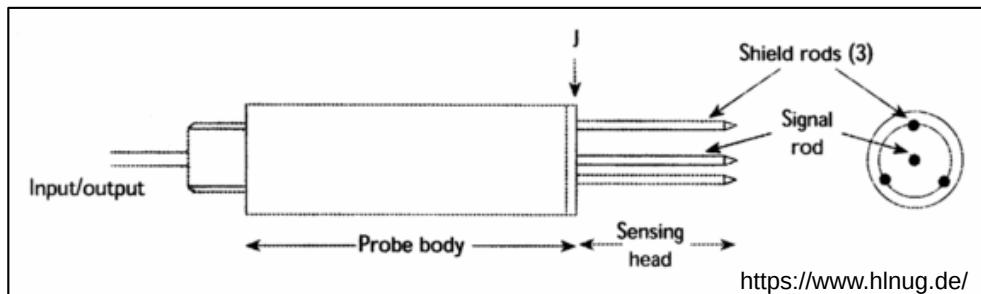
<https://delta-t.co.uk/soil-moisture-systems-and-networks/>

Bodenwassergehalt-Messung mit TDR & FDR

Beide Verfahren messen die Dielektrizitätskonstante eines umgebenden Mediums (Boden). Die Bestimmung des Wassergehalts basiert auf dem Umstand, dass die Dielektrizitätskonstante von Wasser mit $\epsilon \approx 81$ wesentlich größer ist als die der übrigen Bodenbestandteile ($\epsilon < 5$).



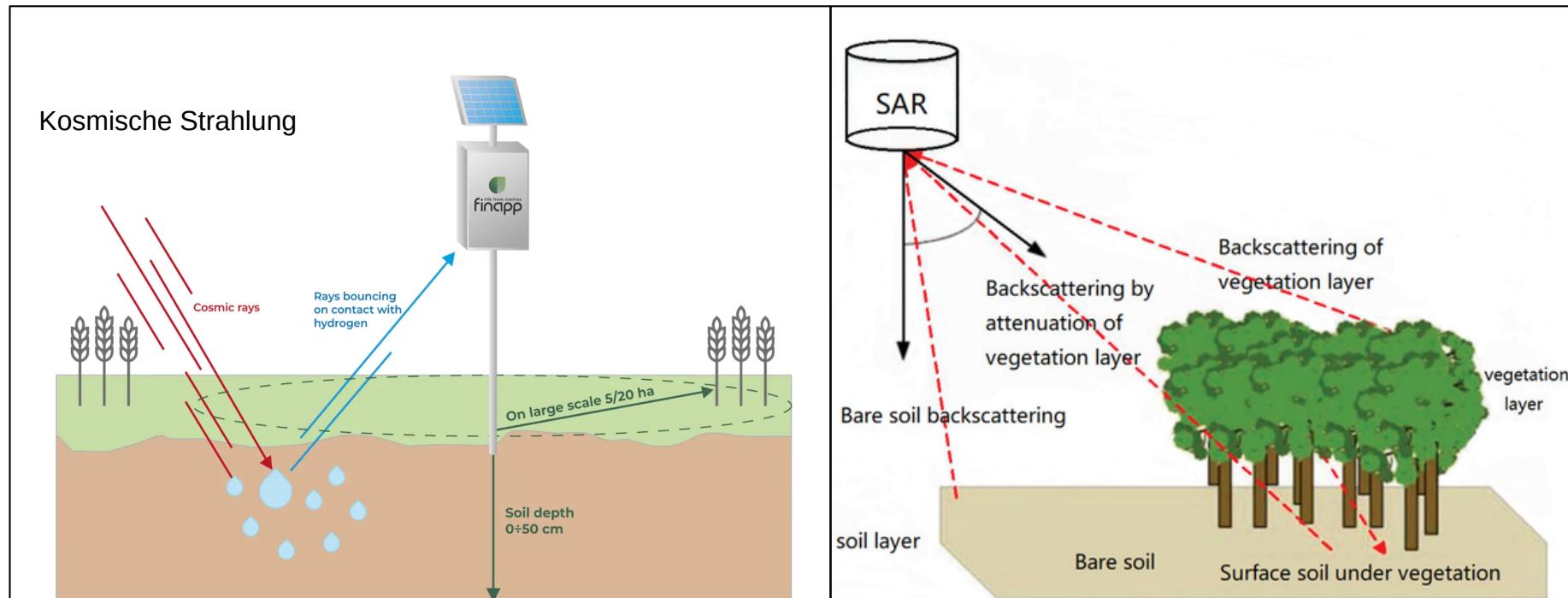
Time Domain Reflectometry (TDR):
Laufzeitmessung einer elektrischen Welle. Vom TDR-Gerät werden elektromagnetische Impulse erzeugt und auf den Wellenleiter gegeben. Das reflektierte Signal wird vom Messgerät aufgezeichnet und ausgewertet.



Frequency Domain Reflectometry (FDR):
Die FDR-Sonde funktioniert wie ein Kondensator. Durch Anlegen einer Spannung entsteht zwischen den beiden Leiterstäben ein elektrisches Feld. Der Betrag der jeweiligen Ladungen ist proportional zur angelegten Spannung, wobei die Kapazität C des Kondensators die Proportionalitätskonstante ist.

Bodenwassergehalt: CRNS und Radarfernerkundung

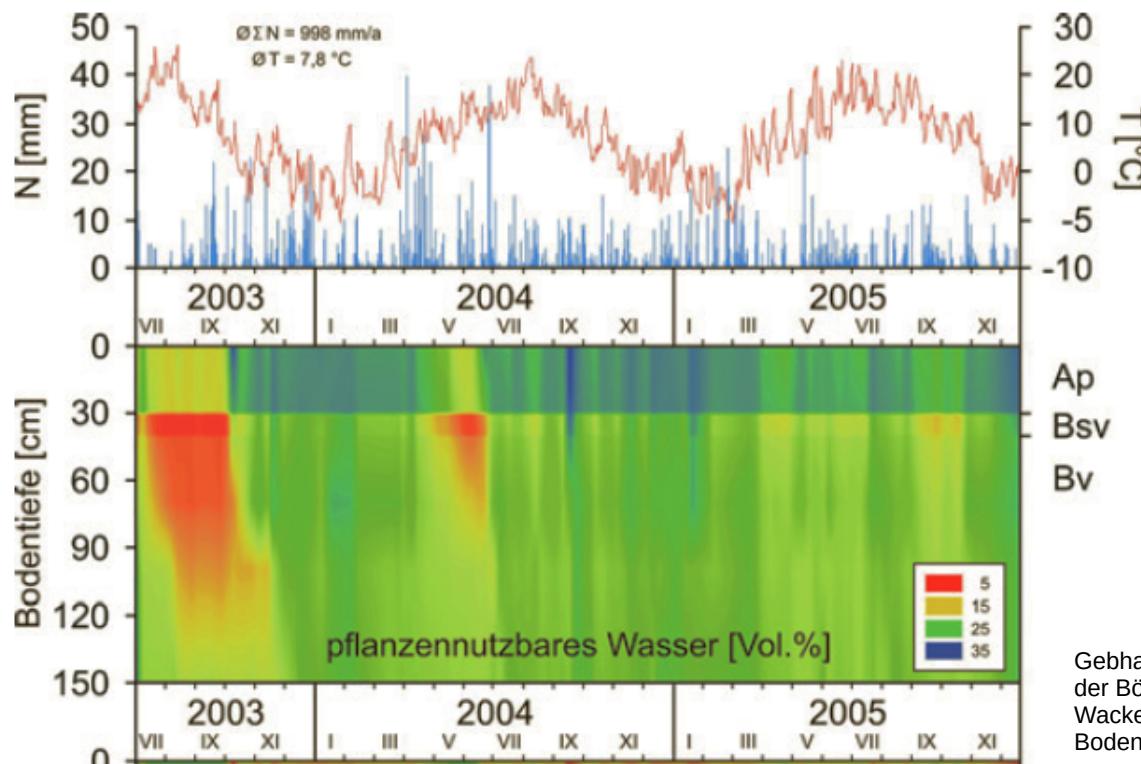
Cosmic-Ray Neutron Sensing (CRNS)



<https://ictinternational.com/knowledge-base/soil-moisture-measurements-neutron-sensing-technologies/>

<https://doi.org/10.3390/w15213757>

Jahresgänge der pflanzenverfügbaren Wassermenge



Jahresgänge der pflanzenverfügbaren Wassermenge in einer podzoligen Braunerde unter Ackernutzung.

Gebhardt, S. (2007): Wasserhaushalt und Funktionen der Böden im Grundwasserabsenkbereich des Wasserwerkes Wacken in Schleswig Holstein. Schriftenr Inst Pflanzenernähr & Bodenk. CAU Kiel, H. 75

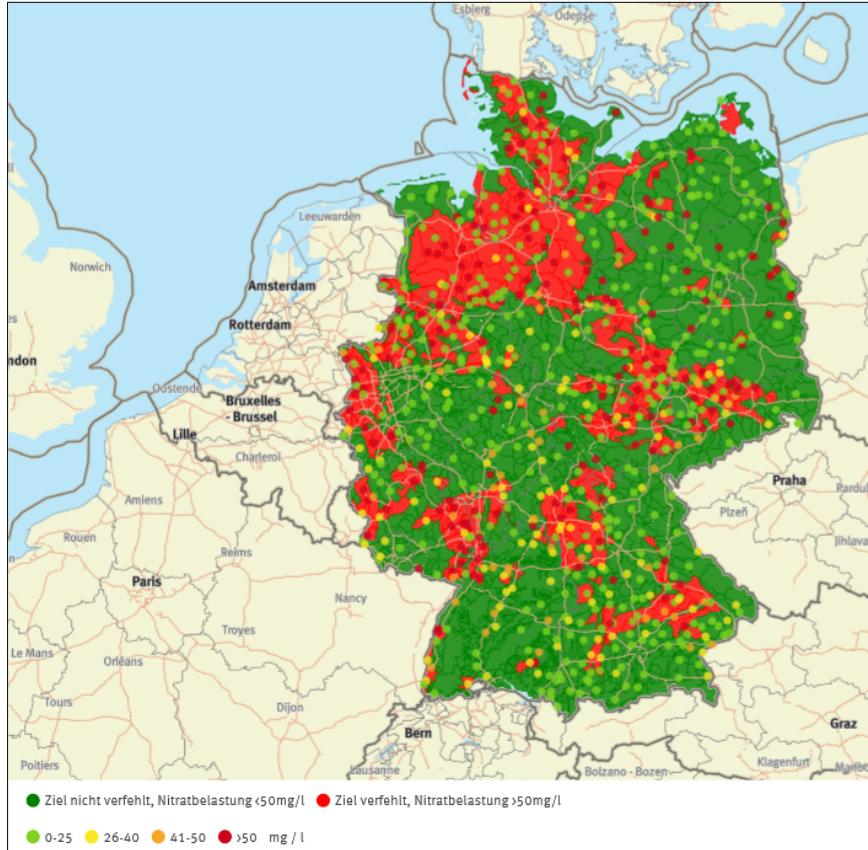
Dürre in der Landwirtschaft



Agrarheute, 24.05.2025

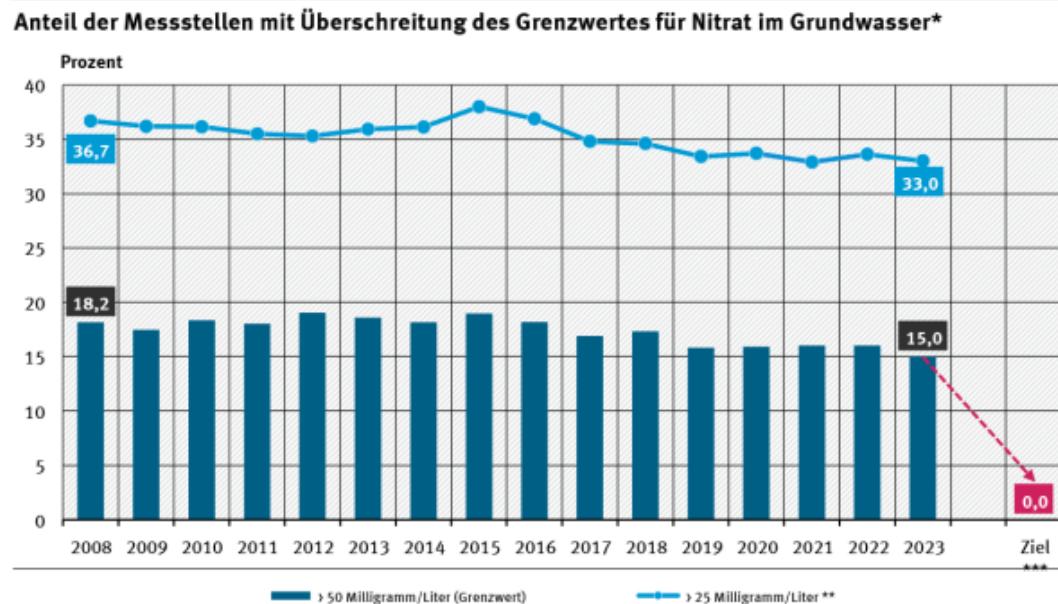
Der Agrarsektor der Europäischen Union (EU) verliert jedes Jahr 28,3 Milliarden Euro aufgrund von Extremwettern wie Dürre.

Nitrat im Grundwasser



<https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/wirkungen/grundwasser/wo-treten-probleme-nitrat-in-grundwasser-auf>

Nitrat im Grundwasser



* Basis: EUA-Messnetz; Grenzwert: 50 Milligramm pro Liter im Jahresmittel

** Wert dient als Frühwarnwert gemäß den Vorgaben des Indikators C5 "Nitrat im Grundwasser" der Bund-Länder Kernindikatoren (<https://www.liki.nrw.de/umwelt-und-gesundheit/c5-nitrat-im-grundwasser/>) + schließt den Anteil der Messstellen mit > 50 mg/l ein.

*** Ziel der Nitratrichtlinie sowie der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung

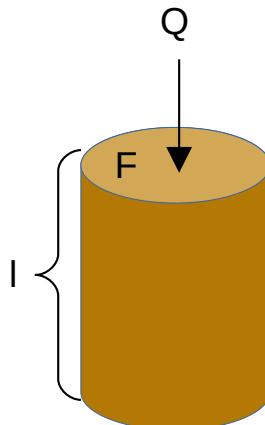
Quelle: Umweltbundesamt und Länderinitiative Kernindikatoren (LIKI) 2024 auf Basis von Daten der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser

Umweltbundesamt und Länderinitiative Kernindikatoren (LIKI) 2023 auf Basis von Daten der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser

Wasserbewegung: Darcy-Gleichung

Darcy-Gleichung:

$$\frac{Q}{F \cdot t} = q = k \cdot \frac{\Delta \psi_H}{\Delta l} = k \cdot \text{grad}(\psi)$$



- Wasser im Boden ist selten in einem statischen Gleichgewicht, weil Niederschläge und Evapotranspiration das Einstellen eines Potenzialgleichgewichts immer wieder unterbrechen.
- Es ist in Bewegung in Richtung auf das niedrigste Potenzial.
- Das Ausmaß der Wasserbewegung ist abhängig von dem antreibenden Potenzialgefälle und der **Durchlässigkeit** oder **Wasserleitfähigkeit** des Bodens.

q	die je Zeiteinheit (t) und Fläche (F) transportierte Wassermenge Q (Fließgeschwindigkeit, Fluss, Flussdichte)
$\Delta \psi_H$	Unterschied im hydraulischen Potenzial
l	Fließstrecke
$\text{grad}(\psi)$	hydraulischer Gradient
k	k-Wert, Wasserleitfähigkeit

Wasserleitfähigkeit

gesättigte Wasserleitfähigkeit: alle Poren sind mit Wasser gefüllt

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist hoch, wenn ein großer Fließquerschnitt vorliegt, d.h. wenn:

- viele und große Poren vorliegen,
- sie wenig gewunden oder verästelt (geringe Tortuosität) sind und
- gut miteinander verbunden (hohe Kontinuität) sind

Die **ungesättigte Wasserleitfähigkeit** ist meist um zwei bis vier 10er-Potenzen kleiner als die gesättigte Wasserleitfähigkeit.

Die Wasserleitfähigkeit ist eine richtungsabhängige Größe. Daher muss berücksichtigt werden, ob der Boden hinsichtlich der Wasserleitfähigkeit isotrope oder anisotrope Eigenschaften aufweist.

	gesättigte Wasserleitfähigkeit	ungesättigte Wasserleitfähigkeit
Sandböden		
Tonböden		
Schluffböden		

Wasserbewegung: Darcy-Gleichung

Einschränkungen der Darcy-Gleichung:

- **inertes Porensystem:** keine Interaktionen zwischen der flüssigen und festen Phase
- **eindimensionale Strömung** in eine Richtung (vertikal oder horizontal)
- **stationäre Strömung:** der hydraulische Gradient bleibt während der Mess- bzw. Beobachtungszeit unverändert.
- **laminarer Fluss:** Die Wasserfäden in den Poren verlaufen parallel zueinander. Die höchste Fließgeschwindigkeit ist in der Mitte der Poren, zur Porenwand hin langsamere Fließgeschwindigkeiten
- **starre Porenwandungen:** während des Flusses keine Stabilitätsänderung, weder durch mechanische Belastungen, durch Quellung und Schrumpfung noch durch chemische Fällungs- bzw. Dispergierungsvorgänge

Wasserbewegung: Kontinuitätsgleichung

Forderung nach Erhaltung der Masse

Wechselnde Fließquerschnitte (F_1, F_2) bei konstant bleibender gesamter Fließmenge (Q) erfordern veränderte Fließgeschwindigkeiten (q).

$$Q = q_1 \cdot F_1 = q_2 \cdot F_2$$

In einem zweidimensionalen Strömungsfeld, in dem die Fließrichtung von Ort zu Ort verschieden ist, muss zur Erhaltung der Masse des fließenden Mediums eine Zunahme des Flusses (q) in Richtung x eine gleichzeitige Abnahme in Richtung y zur Folge haben.

$$\frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} = 0$$

Wasserbewegung: Laplace-Gleichung

Kombination von Darcy-Gleichung und Kontinuitätsgleichung

Darcy-Gleichung

$$q = k \cdot \frac{\delta \psi}{\delta x}$$

Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} = 0$$

Laplace-Gleichung

$$\frac{\delta [k \cdot \frac{\delta \psi}{\delta x}]}{\delta x} + \frac{\delta [k \cdot \frac{\delta \psi}{\delta y}]}{\delta y} = 0$$

Ist die Wasserleitfähigkeit in alle Richtungen gleich groß (isotrop), so gilt:

$$\frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta y^2} = 0$$

Partielle Differentialgleichung für den zweidimensionalen Fluss.

Wasserbewegung in ungesättigten Böden

stationärer Fluss: keine zeitliche Veränderung in der Wasserbewegung

instationärer Fluss: Für den ungesättigten Bereich oberhalb der GWO bedeutet instationärer Fluß i.d.R. Abnahme oder Zunahme des Wassergehalts, also Versickerung zum Grundwasser oder kapillare Nachlieferung als Folge von Wasserverlusten durch Evapotranspiration

Kontinuitätsgleichung mit x als Richtungscoordinate (eindimensionale Betrachtung) bei zeitlicher Änderung des Wassergehalts:

$$\frac{\theta(t_1) - \theta(t_2)}{t_1 - t_2} = \frac{q(x_1) - q(x_2)}{x_1 - x_2} \quad \rightarrow \quad \frac{\delta \theta}{\delta t} = \frac{\delta q_x}{\delta x}$$

Kombination von Darcy-Gleichung und Kontinuitätsgleichung (eindimensionale Betrachtung):

Richardsgleichung
$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left[k \cdot \frac{\delta \psi}{\delta x} \right] = k \cdot \frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2}$$

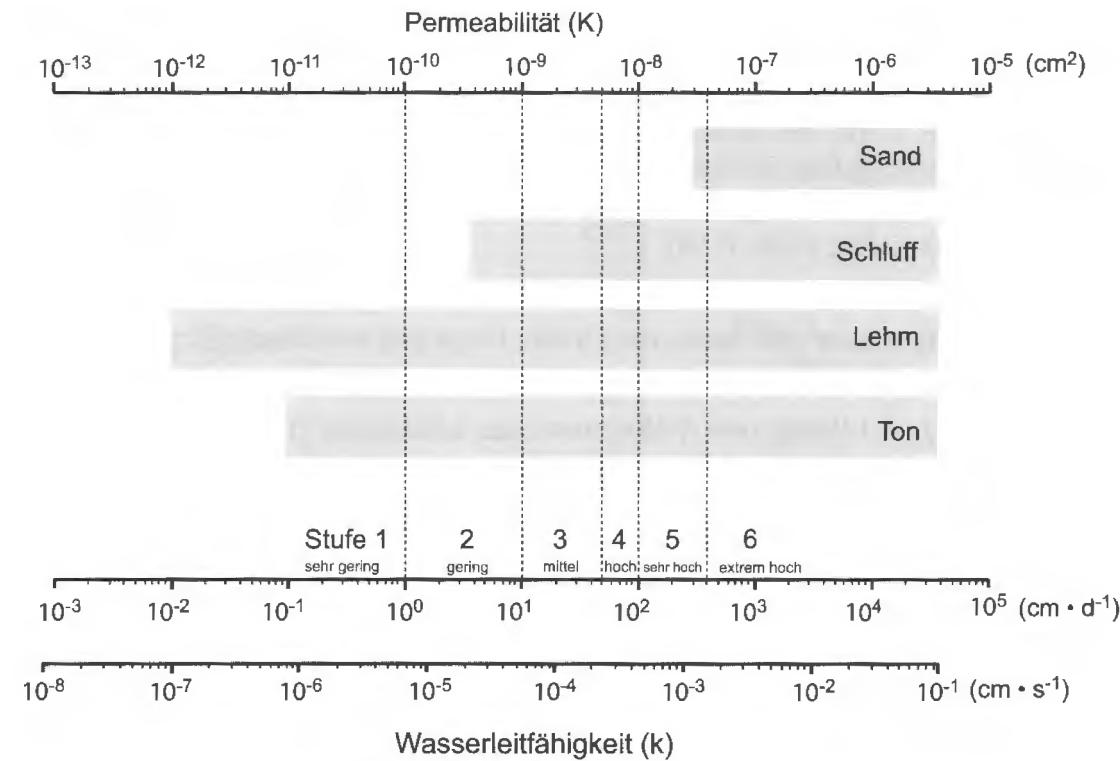
Wasserbewegung: Richardsgleichung

Dreidimensionale Betrachtung

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = \frac{\delta [k \cdot \frac{\delta (\psi_m + \psi_z)}{\delta x}]}{\delta x} + \frac{\delta [k \cdot \frac{\delta (\psi_m + \psi_z)}{\delta y}]}{\delta y} + \frac{\delta [k \cdot \frac{\delta (\psi_m + \psi_z)}{\delta z}]}{\delta z}$$

Die Richardsgleichung hat eine zentrale Bedeutung für die Beschreibung von ungesättigten Transportvorgängen in Böden.

Wasserleitfähigkeit in gesättigten Böden (K_s)



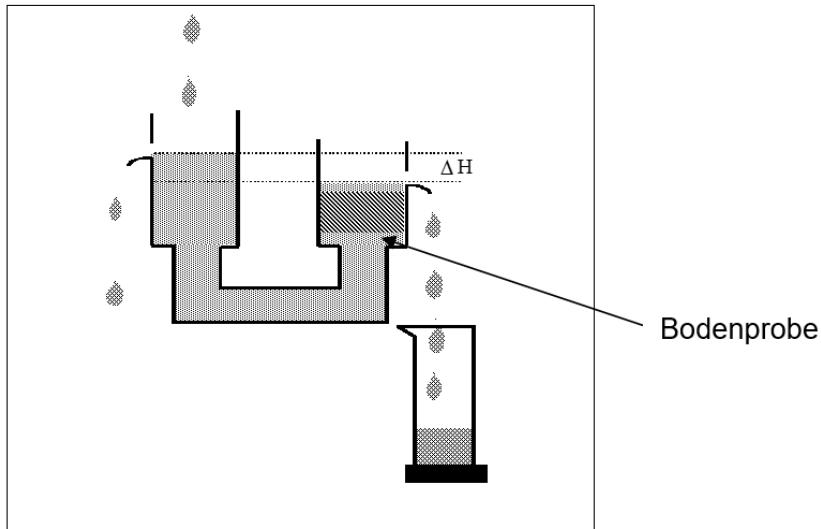
Bachmann et al., 2014

Wasserleitfähigkeit: Messmethoden

Um bei Kenntnis des hydraulischen Gradienten zu einer Abschätzung des resultierenden Wasserflusses zu kommen, muss der Proportionalitätsfaktor im Darcy-Gesetz, die hydraulische Leitfähigkeit (k) bekannt sein.

$$q = k \cdot \frac{\delta \psi}{\delta x}$$

Wasserleitfähigkeit: Messmethoden (Labor)



Methode mit konstanter Druckdifferenz

Nach dem Einbau der Probe in die Halterung wird mit einem Überlaufsystem eine konstante Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenseite eingestellt. Gemessen werden die durch die Probe geflossene Wassermenge und die Zeit. Probenhöhe und die Querschnittsfläche der Probe sind bekannt.

$$k = \frac{Q \cdot l}{\Delta H \cdot F \cdot t}$$

- Q Volumen des durch die Probe gestromten Wassers
- k hydraulische Leitfähigkeit
- ΔH Differenz der Wasserspiegelhöhen
- l Probenlänge
- F Querschnittsfläche der Probe
- t Zeitintervall

Wasserleitfähigkeit: Messmethoden (Feld)



Guelph-Permeameter

In-Situ-Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit (K_s) nahe Sättigung

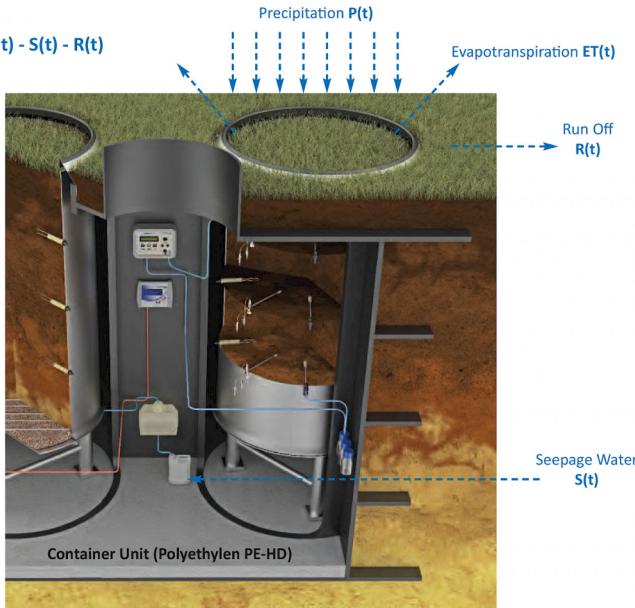
- Das Messgerät erstellt in einem „Brunnen“ (Bohrloch) einen konstanten Überstau und misst die dazugehörige Infiltrationsrate.
- Wassermenge: ca. 2,5 Liter pro Messung
- Zeitbedarf pro Messung: zwischen 5 und 30 Minuten
- Bekannte Probleme bestehen bei Böden, in denen die Wandungen durch das Bohrloch und den Bohrvorgang verschmiert werden.

<https://ugt-online.de/>

Bodenwasserhaushalt

Waterbalance:

$$\Delta W(t) = P(t) - ET(t) - S(t) - R(t)$$



<https://ugt-online.de/themen/systemloesungen/lysimeter/>

Lysimeter

hydrologische Messanlagen zur quantitativen Bestimmung des Bodenwasserhaushaltes definierter Raumauschnitte. Untersuchung...

- ...der Grundwasserneubildung,
- ...der Verlagerung von Wasser und Stoffen im Boden,
- ...der Verdunstung.

Präferentieller Fluss



Abb.1: Bodenprofile (1×1 m) der Brilliant Blue-Farbstoff-Tracer-Experimente.

Bogner, C. (2009). Analysis of flow patterns and flow mechanisms in soils.
<https://theses.hal.science/tel-00451288v1>

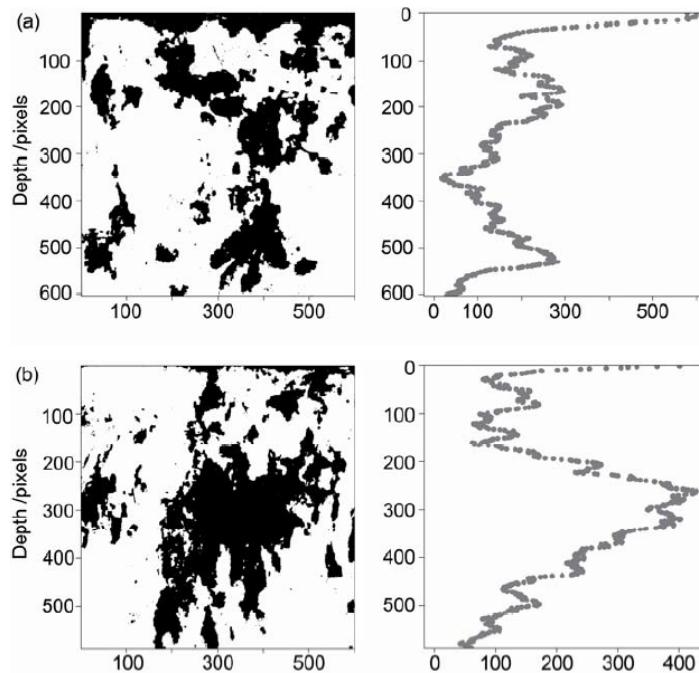


Abb. 2: Beispielbilder aus Farbstoff-Tracer-Experimenten. Binärbilder und Farbstoffabdeckungsfunktionen.

Präferentieller Fluss



Review

Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques

Suzanne E. Allaire ^a   , Stéphanie Roulier ^{b,1} , Allan J. Cessna ^{c,2}

Show more 

 Add to Mendeley  Share  Cite

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.013> 

[Get rights and content](#) 

Der präferentielle Fluss im Boden hat Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit, da er den Transport von Schadstoffen ins Grundwasser begünstigt, ohne dass es zu einer Wechselwirkung mit der chemisch und biologisch reaktiven oberen Bodenschicht kommt.

Modellierung von Wasserbewegung und Transportprozessen

Article

Modeling Irrigation of Tomatoes with Saline Water in Semi-Arid Conditions Using Hydrus-1D

Sabri Kanzari¹, Jiří Šimůnek^{2,*}, Issam Daghari³, Anis Younes⁴, Khouloud Ben Ali¹, Sana Ben Mariem¹ and Samir Ghannem^{1,5}

¹ National Institute of Rural Engineering, Waters, and Forestry, University of Carthage, Ariana 2080, Tunisia; sabri.kanzari@resa.agrinet.tn (S.K.)

² Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA 92507, USA

³ National Institute of Agronomy, University of Carthage, Tunis 1082, Tunisia

⁴ Institut Terre et Environnement de Strasbourg, Université de Strasbourg, CNRS, ENGEES, UMR 7063, 67084 Strasbourg, France

⁵ Faculty of Sciences of Bizerte (FSB), University of Carthage, Jarzouna 7021, Tunisia

* Correspondence: jiri.simunek@ucr.edu

Abstract: In arid and semi-arid regions like Tunisia, irrigation water is typically saline, posing a risk of soil and crop salinization and yield reduction. This research aims to study the combined effects of soil matric and osmotic potential stresses on tomato root water uptake. Plants were grown in pot and field experiments in loamy-clay soils and were irrigated with three different irrigation water qualities: 0, 3.5, and 7 dS/m. The Hydrus-1D model was used to simulate the combined dynamics of subsurface soil water and salts. Successful calibration and validation of the model against measured water and salt profiles enabled the examination of the combined effects of osmotic and matric potential stresses on root water uptake. Relative yields, indirectly estimated from actual and potential transpiration, indicated that the multiplicative stress response model effectively simulated the measured yields and the impact of saline water irrigation on crop yields. The experimental and modeling results provide information to aid in determining the salinity levels conducive to optimal crop growth. The findings indicate that the selected salinity levels affect tomato growth to varying degrees. Specifically, the salinity levels conducive to optimal tomato growth were between 0 and 3.5 dS/m, with a significant growth reduction above this salinity level. The gradual salinization of the root zone further evidenced this effect. The scenario considering a temperature increase of 2 °C had no significant impact on crop yields in the pot and field experiments.



Citation: Kanzari, S.; Šimůnek, J.; Daghari, I.; Younes, A.; Ali, K.B.; Mariem, S.B.; Ghannem, S. Modeling Irrigation of Tomatoes with Saline Water in Semi-Arid Conditions Using Hydrus-1D. *Land* **2024**, *13*, 739. <https://doi.org/10.3390/land13060739>

Keywords: soil; saline water supply; irrigation; tomato; Hydrus-1D; Tunisia

Pedonskala

HYDRUS-1D

Modellierungsumgebung zur Analyse von Wasserfluss und Stofftransport in porösen Medien

<https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus-1d>

Anwendungsbeispiel:
Modellierung der Bewässerung von Tomaten mit salzhaltigem Wasser unter semiariden Bedingungen

Modellierung von Wasserbewegung und Transportprozessen

Science of the Total Environment 945 (2024) 173629



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv



A spatio-temporal analysis of environmental fate and transport processes of pesticides and their transformation products in agricultural landscapes dominated by subsurface drainage with SWAT+

Anne-Kathrin Wendell ^{a,*}, Björn Guse ^{a,b}, Katrin Bieger ^c, Paul D. Wagner ^a, Jens Kiesel ^a, Uta Ulrich ^a, Nicola Fohrer ^a

^a Institute of Natural Resource Conservation, Department of Hydrology and Water Resources Management, Christian Albrecht University of Kiel, Kiel, Germany

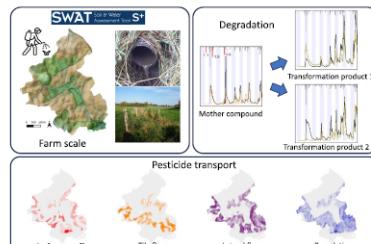
^b GFZ German Research Centre for Geosciences, Hydrology, Potsdam, Germany

^c Department of Ecosystem - Catchment Science and Environmental Management, Aarhus University, Aarhus, Denmark

HIGHLIGHTS

- Model-based analysis of the transport pathways of pesticides and their transformation products
- Degradation in soils and subsurface transport processes into surface water and groundwater
- SWAT+ is capable of modelling pesticides and their transformation products at a tile drainage dominated farm with high quality.
- Subsurface tile drains contribute significantly to the pesticide losses in lowlands.
- Transport of non-mobile pesticides via tile drains is underestimated.

GRAPHICAL ABSTRACT



Landschaftskala

SWAT Soil & Water Assessment Tool
<https://swat.tamu.edu/software/plus/>

Anwendungsbeispiel:
Räumlich-zeitliche Analyse des
Verbleibs und der Transportprozesse
von Pestiziden und ihren
Umwandlungsprodukten in
Agrarlandschaften

Zusammenfassung

- Volumetrischer und gravimetrischer Wassergehalt
- Bodenwassergehaltsmessung: TDR, FDR, Neutronensonde, Radar-Fernerkundung
- Wasserbewegung im Boden
- Stationärer und instationärer Fluss
- Hydraulische Leitfähigkeit
- Präferentieller Fluss

Quellen

Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H. et al. (2018). Scheffer/Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. 17. Auflage, Springer Spektrum, Berlin. ISBN 978-3-662-55870-6

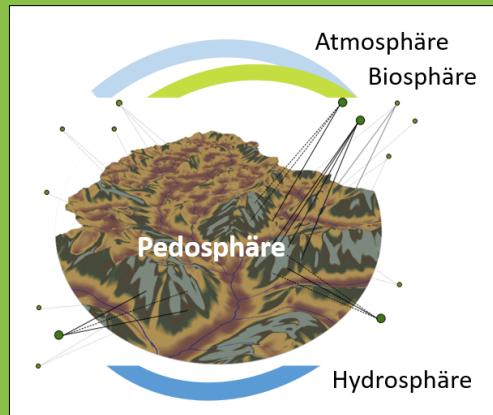
Bachmann, J., Horn, R., Peth, S. (2014). Hartge/Horn Einführung in die Bodenphysik. 4. Aufl., Schweizerbart, Stuttgart. ISBN 978-3-510-65280-8

DANKE

für die Aufmerksamkeit!

Prof. Dr. Mareike Ließ

WS 25/26



*Applied Sciences
for Life*