

Tagungsbeitrag zu:

Jahrestagung der DBG, Kommission V

Titel der Tagung:

„Unsere Böden – Unser Leben“

Veranstalter: DBG

Termin und Ort der Tagung:

5.–10. September 2015, München

Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation); <http://www.dbges.de>

Boden-Gammastrahlung und ihre Abschwächung durch Wasser, Kalk und Torf

Nadja Reinhardt¹, Ludger Herrmann¹

Zusammenfassung

Gammaspektrometrie wird als Möglichkeit genutzt, um nicht-invasiv über Fern- oder Naherkundung Bodendaten zu gewinnen. Sie liefert direkt bodenchemische Informationen. Da die Gammastrahlung durch Nichtstrahler (z.B. Wasser) gedämpft wird, ist es auch möglich, bodenphysikalische Daten abzuleiten. Theoretisch muss eine Korrektur der Messung für die Nichtstrahler vorgenommen werden. Bisher liegen aber nur wenige theoretisch abgeleitete Schwächungskoeffizienten für die Nichtstrahler vor. Deren Überprüfung fehlt.

Ziel dieser Arbeit war es daher, diese theoretischen Werte anhand eines real im Gelände eingesetzten Spektrometers zu überprüfen. Es wurden die linearen Schwächungskoeffizienten von Wasser, Kalk und Torf ermittelt. Hierzu wurde die Gammastrahlung an fixen Standorten (Referenzstrahlung) mit verschiedenen Schichtdicken der Nichtstrahler über dem Boden gemessen.

Die Ergebnisse zeigen deutliche Abweichungen von den theoretisch ermittelten linearen Schwächungskoeffizienten. Dies wird auf den Versuchsaufbau (gerichteter Strahler im Labor vs. Boden als „streuender“ Strahler) und die theoretische Annahme

eines Einphasenmodells vs. der in der Natur vorkommenden Mehrphasigkeit (Mineral, Wasser, Luft) zurückgeführt. Uranmessungen werden aufgrund zu hoher experimenteller Abweichungen nicht diskutiert. Es bedarf weiterer Labor- und Feldexperimente zur Bestimmung der linearen Schwächungskoeffizienten in Böden in Abhängigkeit von natürlichen Umweltfaktoren.

Schlüsselworte: Gammaspektrometrie, linearer Schwächungskoeffizient, H₂O, organische Bodensubstanz, Löschkalk (Ca(OH)₂)

Einleitung

Bodenbürtige Gammastrahler sind natürlicherweise Minerale, die Kalium, Thorium oder Uran enthalten. Wasser, Kalk und organische Bodensubstanz enthalten diese Elemente nur in verhältnismäßig geringen Konzentrationen, schwächen damit die mineralbürtige Gammastrahlung und verändern in Konsequenz das bodenbürtige Signal. Um das Signal an der Bodenoberfläche interpretieren zu können sollte also der Einfluss der Nichtstrahler auf die Bodengammastrahlung quantitativ bekannt sein.

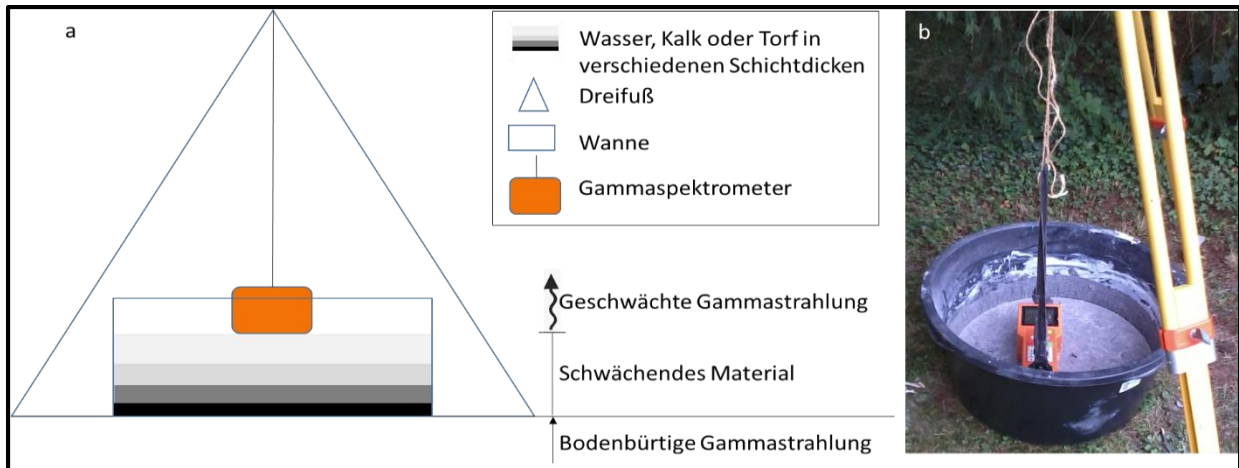
Bisher wurden nur theoretische Berechnungen der linearen Schwächungskoeffizienten bzw. Laborexperimente zu ihrer Bestimmung durchgeführt; siehe hierzu Beamish (2013). Experimentelle Untersuchungen zu deren Überprüfung im Feld sind nicht verfügbar. Die vorliegende Studie soll diese Lücke schließen.

Material & Methoden

Die Messungen zur experimentellen Bestimmung der linearen Schwächungskoeffizienten für Wasser wurden an zwei Parabraunerde-Standorten durchgeführt: (1) Hohenheim, anthropogen beeinflusste Parabraunerde und (2) Mörsch, Bänderparabraunerde. Die Messungen für Kalk und Torf wurden

¹Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, 70593 Stuttgart

Abbildung 1a: Schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus; 1b: Gammaskopfmessung über Löschkalk.



ausschließlich an Standort (1) durchgeführt. Die Basisgammastrahlung (I_0) wurde zu Beginn jeder Messung in einer auf dem Boden stehenden Wanne ($d=60$ cm) aus Polyethylen gemessen (Abb. 1). Die Materialien deionisiertes Wasser, Löschkalk (Weißkalkhydrat = $\text{Ca}(\text{OH})_2$) und Weißtorf wurden anschließend jeweils in verschiedenen Schichtdicken aufgetragen und die resultierende Strahlung an deren Oberfläche bestimmt. Als Messgerät diente das Handspektrometer „Gamma Surveyor“ von GF instruments (CZ), Abb.1b. Die Messzeit betrug je Material und Schichtdicke 4*3 Minuten.

Die Messergebnisse wurden mit dem Microsoft Excel Solver (Version 2013) entsprechend dem Lambert-Beerschen Gesetz gefittet:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_L \cdot x} \quad (\text{Gleichung 1}) \quad (\text{IAEA, 2003})$$

I beschreibt die gemessene Gammastrahlung,

I_0 die Basisgammastrahlung,

μ_L den linearen Schwächungskoeffizienten und

x die Schichtdicke des jeweiligen schwächenden Materials.

Aus den gefitteten Funktionen ließen sich dann die linearen Schwächungskoeffizienten μ_L ablesen.

Ergebnisse

Die gemessene Gammastrahlung wurde gegen die relative Schichtdicke der schwächenden Materialien aufgetragen. Es wird davon ausgegangen, dass die Lagerungsdichte der Materialien über die Schichtdicke konstant war. Die Versuchsergebnisse unterstützen diese Annahme. Der lineare Schwächungskoeffizient μ_L wurde für die unterschiedlichen Elemente und Materialien erfolgreich auf Grundlage von Gleichung (1) mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (RMSE) gefittet (Abb. 2, Tab.1). Die Ergebnisse verifizierten die aus dem Lambert-Beer Gesetz vorausgesagte exponentielle Schwächung durch die verschiedenen Materialien.

Die Messungen bestätigten, dass die linearen Schwächungskoeffizienten sich für die einzelnen radioaktiven Elemente unterscheiden. Dies liegt begründet in den unterschiedlichen Anteilen der Schwächungsprozesse²⁻⁴ in Abhängig-

² Photoelektrischer Effekt: Die Energie der Gammastrahlung wird durch Abgabe eines Elektrons vollständig absorbiert.

³ Compton Streuung: Durch Kollision eines Gamma-Photons mit einem Elektron wird die Gammastrahlung (Energie) teilweise auf das Elektron übertragen. Das Gamma-Photon prallt in einem veränderten Streuwinkel mit geänderter Wellenlänge, und somit geringerer Energie, vom Elektron ab.

⁴ Paarbildung: Bei Energien ab 1,02 MeV des Photons können Positron-Elektron-Paare entstehen. Dieser Prozess dominiert bei großen Energien, besonders bei hohen Kernladungszahlen.

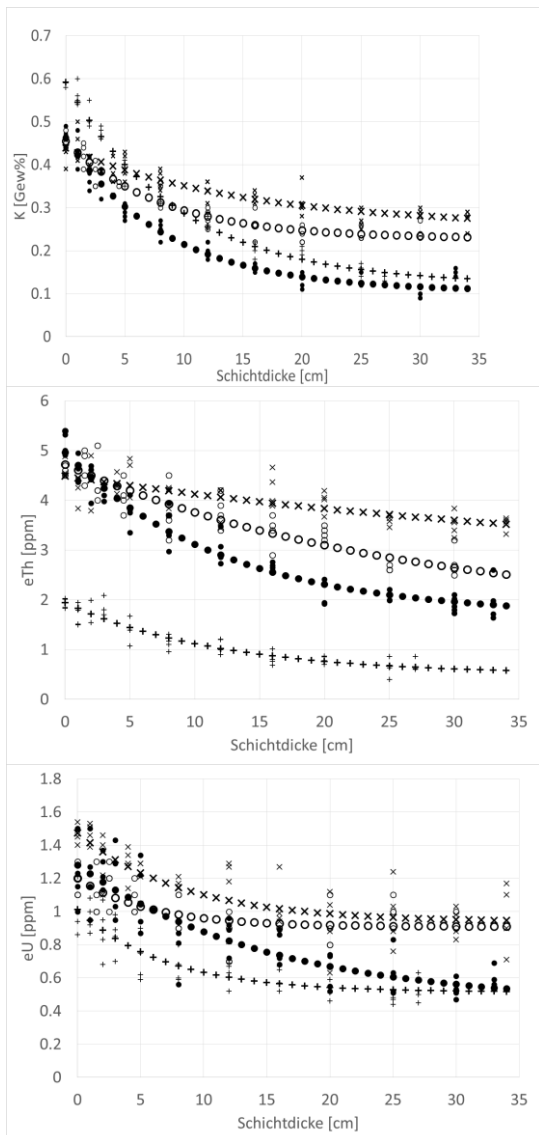


Abbildung 2: Schwächungskurven von Wasser, Kalk und Torf für a) K [Gew%], b) eTh [ppm] und c) eU [ppm] in Abhängigkeit von der Schichtdicke [cm] des jeweiligen schwächenden Materials; ●: Wasser an Standort Hohenheim, +: Wasser an Standort Mörsch, ○: Kalk und x: Torf, Messzeit: je 4x3 min.

Tabelle 1: Lineare Schwächungskoeffizienten μ_L für Wasser (Standort 1 und 2), Kalk und Torf (Standort 1), sowie für Wasser und Gestein nach Grasty (1979).

	μ_L für Kalk (1)	μ_L für Torf (1)	μ_L für Wasser (1)	μ_L für Wasser (2)	μ_L für Wasser (Grasty)	μ_L für Gestein (Grasty)
K (1.46 MeV)	0.123	0.066	0.119	0.104	0.059	0.132
eU (1.76 MeV)	0.175	0.119	0.066	0.144	0.053	0.121
eTh (2.62 MeV)	0.038	0.012	0.083	0.084	0.043	0.099

keit von der Strahlungsenergie (K 1,46 MeV; U 1,76 MeV; Th 2,62 MeV; Nelson and Reilly 1991).

Diskussion

Frage 1: Warum unterscheiden sich die hier ermittelten linearen Schwächungskoeffizienten für Wasser sowohl in Höhe als auch Abstufung von denen durch Grasty (1979) kommunizierten?

Bei Grasty (1979) nehmen die Schwächungskoeffizienten mit zunehmender Energieintensität ab. Die Berechnung des Koeffizienten beruht aber auf der Annahme eines gerichteten Strahlers. Der Boden ist jedoch ein „streuender“ Strahler aufgrund der zum Teil ungleichmäßigen räumlichen Verteilung der Komponenten. Grundsätzlich sind die Koeffizienten bei Kalium aufgrund geringer energetischer Strahlung größer als bei Thorium. Dies wird auch durch die hier gezeigten Versuche belegt, mit Ausnahme für Uran.

Die Uranmessungen sind über die Standorte instabil und verweisen damit auf das grundsätzliche Problem (IAEA, 2003) von standort- und wetterabhängigen Uranungleichgewichten durch selektive Auswaschung oder Ausgasung von Produkten (z.B. ^{222}Rn -Gas) in der Zerfallskette. Daher sind Uranmessungen nur unter optimalen Umweltbedingungen sinnvoll auswertbar.

Frage 2: Wodurch kommt es zu der unterschiedlichen Größenreihenfolge der linearen Schwächungskoeffizienten in Abhängigkeit vom verwendeten Material?

Rechnet man den von Grasty (1979) kommunizierten Massenschwächungskoeffizienten für Gestein (repräsentiert durch Beton) durch Multiplikation mit der Dichte in den linearen Schwächungskoeffizienten um, ergibt sich für die Kaliumstrahlung ein μ_L von $0,132 \text{ cm}^{-1}$. Dieser liegt nahe bei dem für Löschkalk ermittelten μ_L ($0,123 \text{ cm}^{-1}$). Bei dieser Betrachtung sollte man berücksichtigen, dass sich die bei Grasty (1979) dokumentierten Werte auf ein Einphasensystem beziehen.

Dies ist im hier dargestellten Versuch – insbesondere beim Weißtorf - nicht gegeben. Daher dürfte die Lagerungsdichte einen Einfluss auf das Messergebnis haben und der lineare Schwächungskoeffizient beim Torf am geringsten ausfallen. Sehr niedrig fällt μ_L für die Löschkalkmessreihe bei Thoriumstrahlung ($0,038 \text{ cm}^{-1}$) aus. Der vergleichbare Wert für Beton bei Grasty (1979) liegt bei $0,099 \text{ cm}^{-1}$. Für diese Differenz besteht bisher kein Erklärungsansatz.

Frage 3: *Wie kommt es zur Standortabhängigkeit der ermittelten linearen Schwächungskoeffizienten für Wasser?*

Bei einer Vernachlässigung von Uran (siehe Argumentation unter Frage 1) bleiben die Abweichungen in einer Größenordnung, die bei Geländeexperimenten zu erwarten sind.

Schlussfolgerungen

Eine exponentielle Abnahme der Gammastrahlung wurde mit zunehmender Schichtdicke für alle Materialien festgestellt. Die experimentell bestimmten linearen Schwächungskoeffizienten liegen überwiegend in gleichen Größenordnungen wie die theoretisch bestimmten. Wie bei Grasty (1979) beschrieben, nimmt der Schwächungskoeffizient bei energiereicherer Strahlung ab. Die Unterschiede zwischen den in der Literatur bestimmten und den hier ermittelten linearen Schwächungskoeffizienten sind begründet in unterschiedlichen Annahmen/Bedingungen:

- gerichteter vs. „streuender“ Strahler
- Einphasen- vs. Mehrphasensystem

Ausblick

Weitere Labor- und Geländeuntersuchungen sind vorgesehen um reelle Schwächungskoeffizienten für Bodenmaterialien zu bestimmen.

Dazu gehören:

- Messungen mit einer Abschirmung des Gammaskpektrometers, um den Einfluss der Umgebungsstrahlung zu eliminieren
- Lysimeterversuche im Gelände mit variablen Bodenwassergehalten
- Laborversuche mit verschiedener Messgeometrie

Literatur

Beamish, D. (2013): Gamma ray attenuation in the soils of Northern Ireland, with special reference to peat. *Journal of Environmental Radioactivity* 115, 13–27.

Grasty, R.L. (1979): Gamma ray spectrometric methods in Uranium exploration - theory and operational procedures; in *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores* (P.J. Hood, ed.), Geol. Survey of Canada, Economic Geology Report 31, pp 147-161.

International Atomic Energy Agency IAEA (2003): *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Wien: IAEA.

Nelson, G., Reilly, D. (1991): *Gamma ray interactions with matter. Passive Nondestructive Analysis of Nuclear Materials*, Los Alamos National Laboratory, NUREG/CR-5550, LAUR-90-732, 27-42.