

Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der DBG, Kommission I

Titel der Tagung: Böden - divers multifunktional

Veranstalter: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft

Termin und Ort der Tagung: 2. - 8. September 2023, Halle
Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation) <http://www.dbges.de>

Thermische Eigenschaften von Böden - Modelle und Messungen

Ulrich Dehner¹

Stichworte:

Thermische Eigenschaften von Böden, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit

Einleitung, Problemstellung

Die Kenntnis thermischer Eigenschaften hat für Fragen zur Wärmespeicherung und zum Wärmetransport in Böden eine zentrale Bedeutung. Von verschiedenen Autoren liegen Modellansätze zur Ableitung von Wärmeleitfähigkeit und -kapazität aus bodenphysikalischen Daten vor (KERSTEN 1949, DE VRIES 1963, JOHANSEN 1975, CÔTÉ & KONRAD 2005, LU et al. 2007, XIE et al. 2018). Entscheidenden Einfluss haben demnach Lagerungsdichte, Wassergehalt, Textur sowie die Anteile verschiedener Bodenkomponenten. Tab. 1 verdeutlicht dies eindrucksvoll anhand der sehr unterschiedlichen thermischen Eigenschaften wichtiger Bodenbestandteile. HORN et al. (2021) bieten mehrere Schätzrahmen mit Kennwerten für die Bodenarten der Bo-

denkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 2005) bei differierenden Trockenrohdichten und Wassergehalten. Verwendet wurde ein Modellansatz von XIE et al. (2018), der auf Basis ausgewählter Böden erstellt wurde.

Die vorliegende Untersuchung verfolgt einen anderen Ansatz. Die Bestimmung thermischer Parameter wurde in den Routinebetrieb eines Bodenphysiklabors integriert. Ziel ist der Aufbau eines größeren Datenbestandes aus bodenphysikalischen und -chemischen Messungen kombiniert mit boden- und substratsystematischen Angaben. Dies soll eine Auswertung in Richtung sog. Substrat-Horizont-Kombinationen ermöglichen, wie sie bereits von verschiedenen Autoren für die Kennwerte des Bodenwasser- und -lufthaushaltes vorgenommen wurde (VETTERLEIN 1986, RIEK et al. 1995, RENGER et al. 2009).

Methodik

Im Rahmen der bodenkundlichen Landesaufnahme wurden aus Bodenprofilen horizontweise ungestörte Stechzylinderproben zur Bestimmung der Porenraumverteilung genommen. Pro Horizont sind dies i.d.R. 6 Zylinder mit einem Volumen von jeweils 100 cm³. Darüber hinaus wurden aus den Bodenprofilen gestörte Proben zur Bestimmung von Korngrößenverteilungen und bodenchemischen Parametern (u.a. C_{org}-Gehalt) entnommen. Die Stechzylinder wurden im Labor auf Keramikplatten gesetzt und in Drucktöpfen bei definierten Druckbedingungen entwässert.

¹ Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Emy-Roeder-Str. 5, 55129 Mainz

Tab. 1: Thermische Eigenschaften wichtiger Bodenbestandteile (BACHMANN 2005)

Substanz	spez. Gewicht. [g cm ⁻³]	Wärmekapazität [MJ m ⁻³ K ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Quarz	2,65	2,12	8,80
Tonminerale	2,65	2,01	2,92
org. Substanz	1,30	2,51	0,25
Wasser	1,00	4,19	0,57
Eis	0,92	1,88	2,18
Luft	0,00125	0,00126	0,025

Nach Wägung der Proben aus der Druckstufe pF 2,5 erfolgten an jedem Stechzylinder thermische Messungen mit dem *KD2 Pro Thermal Properties Analyzer* der Fa. Decagon (Abb. 1).



Abb. 1: Messung thermischer Parameter an Bodenstechzylindern im Labor

Das Messgerät verfügt über verschiedene Sonden. Verwendet wurde eine Doppelnadel, so dass die folgenden Parameter bestimmbar sind (DECAGON DEVICES 2016):

- Thermische Leitfähigkeit (λ) [W m⁻¹ K⁻¹], Vermögen einer Substanz thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren.
- Volumetrische Wärmekapazität (C) [MJ m⁻³ K⁻¹], Energiemenge, die erforderlich ist, um ein bestimmtes Volumen

einer Substanz um 1 Kelvin (K) zu erwärmen.

- thermische Diffusivität, Temperaturleitfähigkeit (α) = λ/C [mm² s⁻¹], Maß für die Eindringgeschwindigkeit und die Abschwächung eines Wärmestroms.
- Wärmewiderstand (ρ) [K cm W⁻¹], Temperaturdifferenz, die in einem Körper beim Hindurchtreten eines Wärmestromes entsteht.

Aus den Daten der Stechzylinder wurden nach Plausibilitätsprüfung für jeden Bodenhorizont Mittelwerte für Wassergehalte, Trockenrohdichten und die o.g. thermischen Kenngrößen berechnet.

Datengrundlage

Untersucht wurden insgesamt 174 Bodenprofile, die nach dem Erfassungsstandard des Fachinformationssystems Boden des LGB bodenkundlich beschrieben wurden.

Die Datengrundlage umfasst:

- 174 Bodenprofile
- 739 Bodenhorizonte
- 2.780 Stechzylinder

mit Messdaten für:

- thermische Parameter
- Wassergehalt bei pF 2,5
- Trockenrohdichte
- Gesamtporenvolumen
- Kornverteilung
- C_{org} - Gehalt

Die Ausgangsgesteine der Bodenbildungen (Tab. 4) umfassen ein breites Spektrum von devonischen Sedimentgesteinen und Metamorphiten bis zu organischen Bildungen des Holozäns. Nahezu alle untersuchten Böden haben einen mehrschichtigen Aufbau. Darüber hinaus bestehen insbesondere Böden aus periglaziären Lagen in den Mittelgebirgen aus lokalen Gesteinen und äolischen Komponenten. Damit können in einem Bodenprofil unterschiedliche Ausgangsgesteine der Bodenbildung auftreten. Die Zuordnung zu entsprechenden Substraten bzw. Ausgangsgesteinen der Bodenbildung erfolgte horizontweise nach den Hauptkomponenten.

Ergebnisse

Das Datenkollektiv der untersuchten Bodenhorizonte zeigt die komplette Spannbreite von Lagerungsdichten natürlich gelagerter Böden (Abb. 2). Grundsätzlich steigen die **thermischen Leitfähigkeiten** mit zunehmenden Trockenrohdichten; ein Effekt, der sich aus den erhöhten Kornkontakten bei gleichzeitiger Abnahme der Luftkapazitäten ergibt (BACHMANN 2005). Der Großteil der Daten für mineralische Böden bewegt sich in den Spanweiten des Schätzrahmens von Horn et al. (2021). Die niedrigsten Leitfähigkeiten liegen in

organischen Substraten (Torfe und Anmoore, Humusstufen h7-h6) sowie in sehr locker gelagerten mineralischen Böden vor. Maximalwerte treten bei sehr dichter Lagerung auf.

Der Einfluss der organischen Substanz auf die thermischen Leitfähigkeiten wird ansatzweise sichtbar. Mit zunehmenden Humusgehalten sinken die Leitfähigkeiten bei gleichzeitiger Zunahme der Wassergehalte.

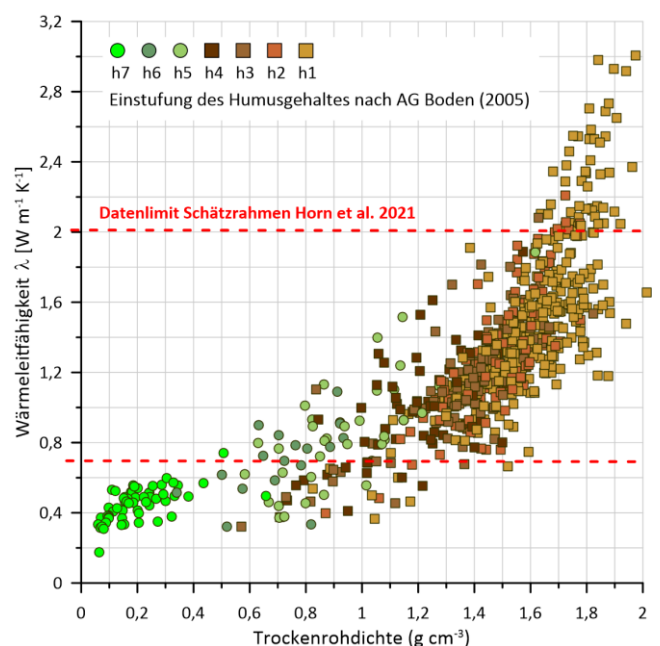


Abb. 2: Thermische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte

Texturbedingte Differenzierungen sind in Tab. 2 dargestellt. Besonders ausgeprägt ist die Zunahme der thermischen Leitfähigkeiten mit steigender Trockenrohdichte in Sand-Lehmgemischen, wohingegen insbesondere bei Lehmtönen die Differenzierungen weitaus geringer sind.

Tab. 2: Thermische Leitfähigkeiten für Bodenartengruppen und Trockenrohdichten* (org. Sub. < 4 Masse- %, Wassergehalte bei pF 2,5) (Angaben in $W m^{-1} K^{-1}$)

	Bodenartengruppe	Bodenarten	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5
ss	Reinsande	Ss		0,92	1,24	2,06	
ls	Lehmsande	St2, Su2, Sl2, Sl3	0,44	1,04	1,33	1,92	2,40
us	Schluffsande	Su3, Su4	0,40				
sl	Sandlehme	Slu, Sl4, St3	0,39	1,00	1,41	1,92	2,45
ll	Normallehme	Lt2, Ls2, Ls3, Ls4	0,64	1,05	1,27	1,60	1,97
tl	Tonlehme	Lts, Ts3, Ts4	0,60	1,02	1,58	1,75	2,02
su	Sandschluffe	Us, Uu				2,35	
lu	Lehmschluffe	Ut2, Ut3, Uls		1,05	1,21	1,59	
tu	Tonschluffe	Ut4, Lu	0,76	1,06	1,25	1,53	1,66
ut	Schlufftone	Tu3, Tu4, Lt3	0,86	1,07	1,28	1,42	1,51
lt	Lehmtone	Tt, Tu2, Tl, Ts2	0,68	1,16	1,13	1,15	

*Stufen nach AG Boden (2005) pt1: < 1,2; pt2: 1,2-1,4; pt3: 1,4-1,6; pt4: 1,6-1,8; pt5: > 1,8 $g cm^{-3}$

Die **Wärmekapazitäten** von Böden ergeben sich nach DE VRIES (1963) aus der Summe der Kapazitäten der einzelnen Bodenbestandteile. Bedingt durch seine hohe Wärmekapazität ist der Wasseranteil im Porenraum von zentraler Bedeutung (Tab. 1).

Die untersuchten Böden zeigen sehr breite Streuungen, die den o.g. Einfluss des Wassers in der Tendenz nachzeichnen (Abb. 3). Auch hier liegt ein Großteil der Daten für mineralische Böden innerhalb der Spannweiten des Schätzrahmens von HORN et al. (2021).

Die Wärmekapazitäten für TRD-Stufen und Bodenartengruppen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 2005) ergeben sich aus Tab. 3. Grundsätzlich liegen zwischen den Dichtestufen nur geringe Schwankungen vor mit einer leichten Zunahme der Wärmekapazitäten bei dichterer Lagerung.

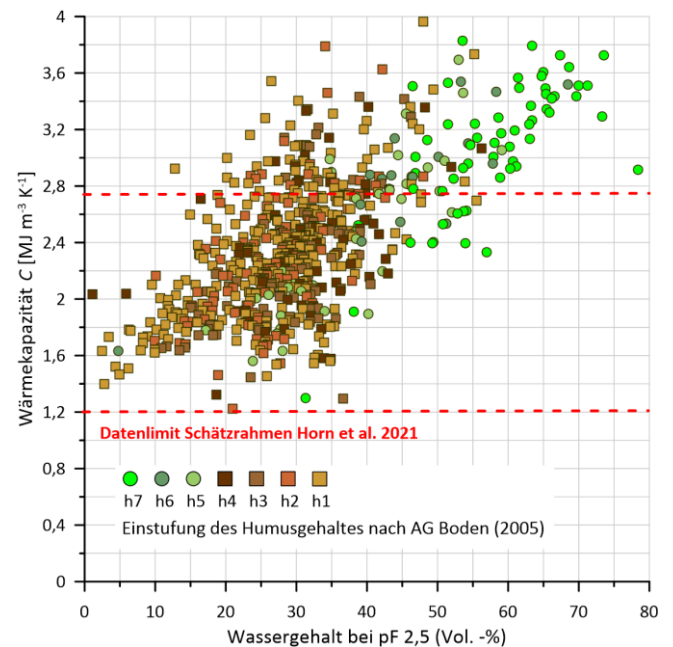


Abb. 3: Wärmekapazität in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Offensichtlich führt die Erhöhung der Trockenrohdichten zu einer Verringerung der Luftkapazitäten und damit zu geringfügigen Änderungen der Wassergehalte bei pF 2,5. Gleichzeitig steigt aber der Anteil der Wärmekapazitäten der Festsubstanz.

Tab. 3: Wärmekapazitäten für Bodenartengruppen und Trockenrohdichten* (org. Sub. < 4 Masse-%, Wassergehalte bei pF 2,5) (Angaben in MJ m⁻³ K⁻¹)

	Bodenartengruppe	Bodenarten	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5
ss	Reinsande	Ss		1,65	1,68	2,00	
ls	Lehmsande	St2, Su2, Sl2, Sl3	1,92	1,74	1,81	2,00	2,21
us	Schluffsande	Su3, Su4					
sl	Sandlehme	Slu, Sl4, St3	1,68	2,09	2,17	2,30	2,45
ll	Normallehme	Lt2, Ls2, Ls3, Ls4	2,08	2,28	2,31	2,33	2,22
tl	Tonlehme	Lts, Ts3, Ts4	1,82	2,12	2,69	2,64	2,30
su	Sandschluffe	Us, Uu				2,24	
lu	Lehmschluffe	Ut2, Ut3, Uls		2,23	2,28	2,55	
tu	Tonschluffe	Ut4, Lu	2,48	2,35	2,27	2,49	2,49
ut	Schlufftone	Tu3, Tu4, Lt3	2,32	2,49	2,49	2,49	2,23
lt	Lehmtone	Tt, Tu2, Tl, Ts2	2,20	3,06	2,80	2,67	

*Stufen nach AG Boden (2005) pt1: < 1,2; pt2: 1,2-1,4; pt3: 1,4-1,6; pt4: 1,6-1,8; pt5: > 1,8 g cm⁻³

Bei fehlenden Daten zu Lagerungsdichte und Körnung können die thermischen Kennwerte als Durchschnittswerte aus **Substrat-Horizont-Kombinationen** abgeschätzt werden. Bei diesem Ansatz der Datenauswertung wird davon ausgegangen, dass die wesentlichen bodenkundlichen Eigenschaften von den Ausgangsgesteinen der Bodenbildung und deren pedogenen Überprägungen ableitbar sind. In Tab. 4 sind die Daten für Unterböden, ausgewählte Oberböden und organische Substrate zusammengestellt.

Erläuterungen zu Tab. 4:

Zu 1: Das Datenkollektiv der organischen Böden besteht im Wesentlichen aus stark zersetzten Torfen. Kennzeichnend sind niedrige Trockenrohdichten mit sehr niedrigen thermischen Leitfähigkeiten bei sehr hohen Wärmekapazitäten was die schwere Erwärmbarkeit von Moorböden ausmacht.

Zu 2: Anmoore sind mit Moorböden vergesellschaftet oder sie treten flächig in Moor-

folgelandschaften nach Abtorfung und Kultivierung auf. Gegenüber den reinen Torfen zeigt sich eine Erhöhung der Leitfähigkeiten bei gleichzeitiger Verringerung der Wärmekapazitäten.

Zu 3: Böden aus Laacher-See-Tephra sind in Rheinland-Pfalz ausschließlich unter Wald anzutreffen, da sie unter landwirtschaftlicher Nutzung flächig erodiert wurden. Typisch sind sehr niedrige Trockenrohdichten mit extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeiten.

Zu 4) Die Oberböden (Hauptlagen) in weiten Teilen des rheinischen Schiefergebirges enthalten Mischungen aus Laacher-See-Tephra und Löss. Die hier angegebenen Werte sind somit großräumig auf locker gelagerte Bv-Horizonte anwendbar.

Zu 5) Bei den Flugsanden können zwei Datenkollektive mit reinen Sanden und lehmigen bis schluffigen Sanden unterschieden werden.

Tab. 4: Thermische Eigenschaften ausgewählter Substrat-Horizont-Kombinationen

Nr.	Ausgangsgesteine der Bodenbildung, Substrate	Bodenhorizonte	Bodenarten	C _{org}	TRD	WG bei pF _{2,5}	λ	C	n
1	Torfe	Hv, H		39,4	0,18	56	0,44	3,08	58
2	Anmoor sandig	Aa, Ah, Ghr	SI2, SI3	7,5	0,90	38	0,87	2,60	5
	Anmoor lehmig	Aa, Ah, Ghr	Ls4, SI2, Ls2, Lt2	8,5	0,85	47	0,96	3,01	19
3	Laacher See Tephra	Bfv	Lt2, SI4, Ls4	1,2	0,94	30	0,55	1,84	10
4	Laacher See Tephra plus Löss	Bv	Ls2, Ls3, Ls4	0,6	1,45	23	0,95	1,90	10
5	Flugsand (sandig)	Cv, Bv, R	Ss, SI2, St2	0,2	1,53	6	0,98	1,55	5
	Flugsand (lehmig)	R, eIC	SI4	0,3	1,46	19	1,35	2,16	5
6	Löss	Ah, Ap	Lu, Tu3, Tu4	1,2	1,41	28	1,19	2,19	20
		eIC	Ut2, Ut3, Ut4, Lu, Uls	0,2	1,47	26	1,23	2,25	18
7	Lösslehm	Bt, Bvt, Sd	Lu, Tu2, Tu3, Tu4	0,2	1,59	33	1,42	2,42	23
8	Kalkstein, Mergel (Tertiär, Mesozoikum)	Cv, eICv	Tu2, Tu3	0,3	1,53	37	1,16	2,67	37
9	Sandstein (Buntsandstein)	ICv, Sd, Sw	St2, St3, SI3, SI4, Ls4	0,2	1,78	22	2,08	2,32	29
	Quarzit, Sandstein (Devon)	ICv, ICjv, Sd	Ls3, Ls4, SI4	0,3	1,81	22	2,55	2,51	8
10	Ton-, Silt-, Sandstein (Rotliegend)	ICj, ICv	Lt3, Lts, Lu	0,2	1,71	33	1,48	1,96	9
	Ton-, Siltstein (Devon)	Cjv, Sd	Lu, Lt2	0,2	1,70	27	1,46	2,43	30

C _{org}	=	Gehalt an organischem Kohlenstoff (Masse-%), C _{org} * 2 = Gehalt organische Substanz
TRD	=	Trockenrohdichte (g cm ⁻³)
WG bei pF 2,5	=	Wassergehalt bei pF 2,5 = Wassergehalt in Fein- und Mittelporen (Vol.-%)
λ	=	thermische Leitfähigkeit (W m ⁻¹ K ⁻¹)
C	=	Volumetrische Wärmekapazität (MJ m ⁻³ K ⁻¹)
n	=	Anzahl der untersuchten Bodenhorizonte

Schon geringe Zunahmen des Ton- und Schluffanteils im Zuge der Bodenbildung führen hier zu Änderungen des Wasserhaushalts und der thermischen Eigenschaften.

6) Die untersuchten Lössen stammen ausschließlich aus dem Mainzer Becken und der nördlichen Oberrheinebene. Zwischen

Ober- und Unterböden liegen nur geringe Differenzierungen vor.

Zu 7) Im Zuge der Bodenbildung kommt es zu einer Entkalkung von Lössen mit der Bildung von Lösslehm. Das Datenkollektiv besteht hauptsächlich aus lösslehmreichen, periglaziären Lagen (Mittellagen) des rheinischen Schiefergebirges, die eine dichtere Lagerung als reine Lössen haben.

Zu 8) Verwitterungsbildungen von Kalksteinen und Mergeln bestehen aus stark tonigen Substraten, die selbst bei dichter bis sehr dichter Lagerung nur geringe thermische Leitfähigkeiten erreichen. Ursache hierfür dürften hohe Ton- und niedrige Quarzgehalte sein.

Zu 9) Die C- und Sd-Horizonte aus Sandsteinen und Quarziten haben sich in lössfreien periglaziären Fließerden (Basislagen) entwickelt. Auf Grund der hohen Lagerungsdichten und den hohen Quarzanteilen werden hier Maximalwerte der thermischen Leitfähigkeiten erreicht.

Zu 10) Die untersuchten C-Horizonte der Ton- und Siltsteine verfügen über teils hohe Anteile an Verwitterungsbildungen der mesozoisch/tertiären Verwitterungsdecke des rheinischen Schiefergebirges. Die ursprünglichen Gesteinseigenschaften wurden im Zuge der chemischen Verwitterung tiefgreifend verändert. Die hohen Lagerungsdichten sind eine Folge der periglaziären Überprägung der alten Landoberfläche.

Fazit

Mit der Auswertung umfangreicher Datenbestände und den Modellen aus der Literatur können die thermischen Eigenschaften des oberflächennahen Untergrundes schlüssig beschrieben werden. Bei fehlenden Daten zu den bodenphysikalischen Randbedingungen bildet die Auswertung von Substrat-Horizont-Kombinationen eine Ergänzung zu vorliegenden Modellierungen. Damit sind insbesondere die thermi-

schen Eigenschaften organischer, vulkanischer sowie äußerst dicht gelagerter Substrate präziser beschreibbar.

Literatur

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl., Hannover.
- BACHMANN, J. (2005): Thermisches Verhalten der Böden. In: Blume et al. Handbuch des Bodenschutzes. 22. Erg. Lfg. 08/05. Ecomed. Landsberg/Lech.
- CÔTÉ, J. & J.-M. KONRAD (2005): Thermal Conductivity of Base-Course Materials. Can. Geotech. J. 42: 61-78.
- DECAGON DEVICES (2016): KD2 Pro Thermal Properties Analyzer, Operator's Manual. (Version: February 29, 2016).
- DE VRIES, D.A. (1963): Thermal Properties of Soils. In: Van Wijk, W.R. (ed.): Physics of plant environment. S. 210-235. North Holland Publishing Company. Amsterdam.
- FAROUKI, O.T. (1986): Thermal Properties of Soils. Series on Rock and Soil Mechanics Vol. 11. Transtech Publications. Clausthal-Zellerfeld.
- HORN, R., LU, Y., REN, T., HORTON, R., MORDHORST, A. & H. FLEIGE (2021): Ableitung der thermischen Bodenfunktionen anhand von Körnung und Porengrößenverteilung als Grundlage für In-situ-Vorhersagen des Bodenwärmehaushaltes. In: Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment, Volume 72, Issue 1, 33–43, 2021.

- JOHANSEN, O. (1975): Thermal Conductivity of Soils. Ph.D. thesis. Trondheim. Norway.
- KERSTEN, M.S. (1949): Thermal Properties of Soils. Bull. No. 28. University of Minnesota, Institute of Technology, Experiment station. University of Minnesota.
- LU, S., REN, T. GONG, Y & R. HORTON (2007): An improved Model for Prediction Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature. Soil Sci. Soc. Am. J. 71: 8-14.
- RENGER, M.; BOHNE, K.; FACKLAM, M.; HARRACH, H.; RIEK, W.; SCHÄFER, W.; WESSOLEK, G. & S. ZACHARIAS. (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Teil I: Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. In: Bodenökologie und Bodengenese, Heft 40. Berlin.
- RIEK, W., WESSOLEK, G., RENGER, M. & E. VETTERLEIN (1995): Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität von Substrathorizontgruppen – eine statistische Auswertung von Labordatenbanken, Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 158, 485-491.
- XIE, X., LU, L., REN, T. & R. HORTON (2018): Empirical Model for Estimating Soil Thermal Diffusivity from Texture, Bulk Density, and Degree of Saturation. Journal of Hydrometeorology 19, 445–457.
- VETTERLEIN, E. (1986): Bodenphysikalische Parameter auf der Grundlage von Substrat-Horizont-Gruppen, Tag.-Ber., Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, Berlin, 245, 241 – 247.