

THEMENHEFTE VORSORGENDER BODENSCHUTZ

Thermische Eigenschaften von Böden

Eine Auswertung von Messdaten aus Rheinland-Pfalz





RheinlandPfalz

LANDESAMT FÜR GEOLOGIE
UND BERGBAU

THEMENHEFTE VORSORGENDER BODENSCHUTZ

Thermische Eigenschaften von Böden

Eine Auswertung von Messdaten aus Rheinland-Pfalz

IMPRESSUM

Titel:	Themenhefte Vorsorgender Bodenschutz, Heft 6: Thermische Eigenschaften von Böden – Eine Auswertung von Messdaten aus Rheinland-Pfalz
Herausgeber:	Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) Emy-Roeder-Straße 5 55129 Mainz
ISSN:	2509-4785
Bearbeitung:	Dr. Ulrich Dehner (LGB)
Fotos:	s. S. 56
Titelbild:	Messung thermischer Parameter an Bodenstechzylindern im Bodenphysiklabor des LGB
Textsatz, Gestaltung:	Thomas Wiesner (LGB)
Druck:	LM Druck + Medien GmbH, Freudenberg
Stand:	April 2024



Dieser Band der Themenhefte Vorsorgender Bodenschutz ist lizenziert unter einer Creative-Commons-(Namensnennung 4.0 International)-Lizenz

INHALT

	Vorwort.....	5
1	Einleitung.....	6
2	Grundlagen zu den thermischen Eigenschaften von Böden.....	7
2.1	Wärmeleitfähigkeit.....	8
2.2	Wärmekapazität.....	10
3	Untersuchungsmethodik und Datenbasis	13
3.1	Probennahme und Laboranalytik.....	14
3.2	Datenaufbereitung und Datenbasis	16
4	Ergebnisse.....	18
4.1	Thermische Eigenschaften in Abhängigkeit von Trockenrohdichte und Wassergehalt	18
4.2	Kritische Betrachtung der gemessenen Wärmekapazitäten	20
4.3	Schätzrahmen für Wärmekapazitäten und Wärmeleitfähigkeiten	21
4.4	Thermische Kennwerte für Substrat-Horizont-Kombinationen	23
5	Literatur	25
Anhang		
Anhang 1	Texturorientierte Datenauswertung	29
Anhang 1.1	Datengrundlagen und Schätzrahmen auf Basis von Bodenarten der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 2005)	29
Anhang 1.2	Datengrundlagen und Schätzrahmen auf Basis der Texturklassen nach IUSS WORKING GROUP WRB (2015)	34
Anhang 2	Substrat-bodengenetisch orientierte Datenauswertung	36
Anhang 3	Messdaten typischer Bodenprofile	39
Danksagung		
Bildnachweis		

VORWORT

Das vorliegende Themenheft widmet sich den thermischen Eigenschaften des oberflächennahen Untergrundes. Es richtet somit seinen Fokus auf den Boden als zentrale Schnittstelle zwischen Atmosphäre und Lithosphäre. Die Kenntnis der thermischen Eigenschaften von Böden ist entscheidend für die Beantwortung zentraler Fragen zum Energiehaushalt der Erde: Wie wird Sonnenenergie im oberflächennahen Untergrund gespeichert? Wie kann diese Energiequelle genutzt werden? Wie breitet sich Wärme im Boden aus und wie beeinflusst der Boden die Temperatur in der Atmosphäre?



Bereits mit dem Beginn der 2000er Jahre wurde am LGB ein Datenbestand zu den thermischen Leitfähigkeiten für Festgesteine aufgebaut. Diese Daten bilden u.a. eine Grundlage für die Dimensionierung von Erdwärmesonden für Wärmepumpenanlagen. Seit dem Jahr 2011 folgten mit der Einführung einer neuen Messtechnik weitere Untersuchungen im Bodenphysiklabor des LGB. Damit sollen die Kenntnisse für das Lockermaterial des oberflächennahen Untergrundes erweitert werden.

Das Themenheft bietet eine Auswertung des gesamten Datenbestandes. Es liegen bodensystematische sowie laboranalytische Daten für 174 Standorte in Rheinland-Pfalz vor, an denen ca. 2.700 Einzelmessungen vorgenommen wurden. Mit Hilfe der erstellten Tabellen können mittels einfacher bodenkundlicher Feldmethoden die thermischen Kenngrößen für Ober- und Unterböden bereits am Standort abgeschätzt werden. Darüber hinaus werden die physikalisch-thermischen Eigenschaften typischer Böden von Rheinland-Pfalz präsentiert.

Wir möchten mit diesem Themenheft eine Grundlage für die Beantwortung wichtiger Fragen der angewandten Bodenkunde bereitstellen.



ANDREAS TSCHAUDER
LEITER DES LANDESAMTES FÜR GEOLOGIE
UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ

1 EINLEITUNG

Ob Energiewende, die Gewinnung geothermischer Energie aus dem Boden, der Bau von unterirdischen Stromtrassen oder die Modellierung des Energiehaushalts der Erdoberfläche – die Kenntnisse der physikalisch-thermischen Eigenschaften des oberflächennahen Untergrundes sind von zentraler Bedeutung für zahlreiche Fragestellungen der angewandten Bodenkunde.

Böden als 3-Phasengemische aus Wasser, Luft und Festsubstanz können erhebliche Unterschiede und Differenzierungen bezüglich der thermischen Eigenschaften aufweisen. Neben dem Wasser- und Lufthaushalt sind Lagerungsdichte, Textur sowie die mineralogische Zusammensetzung entscheidende Einflussfaktoren. Auf Basis dieser Grundlagen wurden von verschiedenen Autoren Modellansätze entwickelt, um thermische Parameter bei unterschiedlichen Feuchtezuständen abzuleiten. Die meisten dieser Ansätze beruhen auf der Auswertung von repräsentativen Bodenproben, die ein möglichst breites Texturspektrum abbilden sollen.

Die vorliegende Untersuchung verfolgt einen alternativen Ansatz. Durch Messungen im Routinebetrieb eines bodenphysikalischen Labors wurde ein umfangreicher Datensatz aufgebaut, der Auswertungen nach verschiedenen laboranalytischen sowie boden- und substratsystematischen Aspekten ermöglicht. Auf dieser breiten Datenbasis sollen die thermischen Eigenschaften von Böden bei definierten Randbedingungen noch genauer gefasst werden. Darüber hinaus sollen Grundlagen erarbeitet werden, die es ermöglichen, thermische Kennwerte über die Kenntnis einfacher Feldparameter möglichst präzise abzuschätzen.

2 GRUNDLAGEN ZU DEN THERMISCHEN EIGENSCHAFTEN VON BÖDEN

Die thermischen Eigenschaften von Böden werden im Wesentlichen durch drei Größen beschrieben:

- Spezifische Wärmekapazität C ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), C_v ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$)

Energiemenge (J = Joule), die erforderlich ist, um eine bestimmte Masse (kg) oder ein bestimmtes Volumen (m^3) einer Substanz um 1 Kelvin (K) zu erwärmen

- Thermische Leitfähigkeit bzw. Wärmeleitfähigkeit λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

Vermögen einer Substanz, thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren (W = Watt)

- Thermische Diffusivität – Temperaturleitfähigkeit α ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

Quotient aus Wärmeleitfähigkeit und volumetrischer Wärmekapazität ($\alpha = \lambda/C_v$), Maß für die Eindringgeschwindigkeit und die Abschwächung eines Wärmestroms

Der Forschungsstand über den Wärmehaushalt und die thermischen Eigenschaften von Böden wird in zwei Artikeln von BACHMANN (1997, 2005) zusammengefasst. Darüber hinaus bieten FAROUKI (1986) und SANNER (1992) einen Überblick zu den Wärmeleitfähigkeiten von Böden und Gesteinen. Grundlegende Arbeiten zu diesem Thema wurden von KERSTEN (1949) und DE VRIES (1963, 1975) vorgelegt. Auf diesen Arbeiten fußen weitere Untersuchungen von JOHANSEN (1977), OCHSNER et al. (2001), CÔTÉ & CONRAD (2005, 2006) sowie LU et al. (2007).

Auf Grundlage der Modellentwicklung von XIE et al. (2018) bieten HORN et al. (2021) verschiedene Schätzrahmen analog zu den Wasserhaushaltstabellen der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 2005) an. Der Vorteil dieser Schätzrahmen liegt in der einfachen Ableitung thermischer Kenngrößen auf der Basis von Bodenarten und Trockenrohdichten für Wassergehalte bei unterschiedlichen Matrixpotenzialen.

Angaben zur Nutzung der o.g. Ansätze für die Erstellung von Karten zu den thermischen Eigenschaften von Böden finden sich bei DEHNER et al. (2007). Die Karten sollten in erster Linie eine

Planungsgrundlage für die Installation von erdgekoppelten Wärmetauschern für Wärmepumpenanlagen liefern. Eine Erweiterung der Fragestellungen ergab sich mit der Energiewende und dem Bau von unterirdischen Stromtrassen (SPRINGER FACHMEDIEN 2015). Somit stehen Fragen zur Wärmeausbreitung um erdverlegte Stromkabel im Fokus aktueller Untersuchungen (TRINKS 2010, WESSOLEK & TRINKS 2015, WESSOLEK et al. 2020, 2022).

2.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit bzw. thermische Leitfähigkeit (λ) ist das Vermögen einer Substanz (Festkörper, Flüssigkeit oder Gas), thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren. Sie gibt an, welche Energiemenge pro Sekunde durch einen Körper fließt, der die Querschnittsfläche von 1 m^2 und die Länge von 1 m hat, wenn die Temperaturdifferenz zwischen beiden Seiten 1 K beträgt. Die Wärmeleitfähigkeit wird in $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ angegeben ($\text{W} = \text{Watt}$).

Entsprechend ihrer mehrphasigen Zusammensetzung erfolgt der Wärmetransport in Böden entweder innerhalb des Korngerüsts, über Wassermenisken zwischen Einzelkörnern oder in Form von latenter Wärme durch Wasserdampftransport (vgl. Abbildung 1).

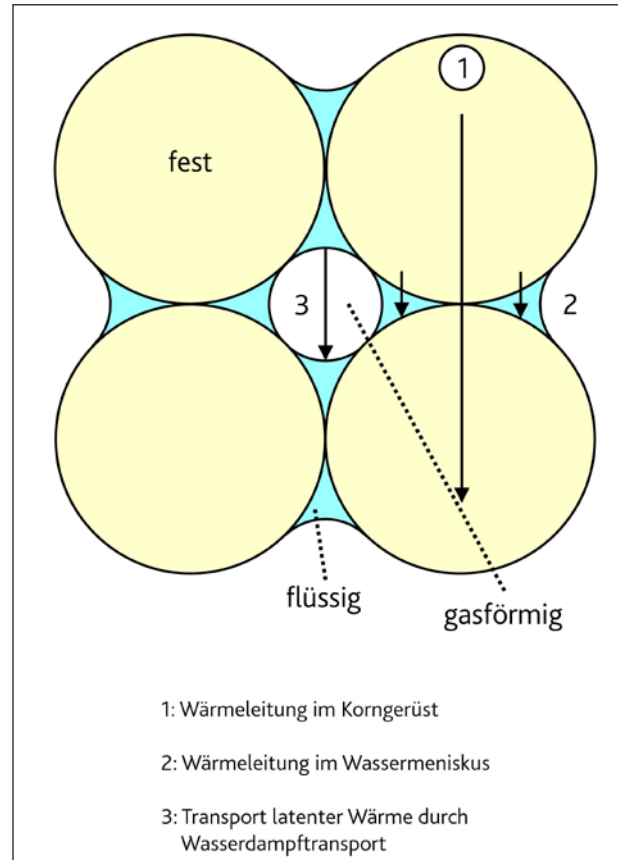


Abb. 1: Wärmetransport im Boden (verändert nach BACHMANN 2005).

Tabelle 1 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Bodenmaterialien. Auch hier wird die Bedeutung des Wassers deutlich, welches die Wärme in fester Form besser leitet als in flüssigem Zustand.

Tab. 1: Thermische Leitfähigkeit von Bodenmaterialien (BACHMANN 2005).

Substanz	$\lambda \text{ (W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$
Quarz	8,80
Tonminerale	2,92
Organische Substanz	0,25
Wasser	0,57
Luft	0,025
Eis	2,18

Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Böden ist insofern problematisch, da je nach Lagerung der Partikel und den Phasenübergängen des Wassers die Energie auf unterschiedliche Art und Weise transportiert wird (vgl. Abbildung 1). Weiterhin besteht eine enge Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Temperatur (BACHMANN 2005).

Auf Basis der Kornverteilung in Böden können nach BACHMANN (2005) generelle Aussagen über die Wärmeleitfähigkeit gemacht werden. In Böden der mittleren Breiten erhöht sich der Anteil des gut Wärme leitenden Minerals Quarz (vgl. Tabelle 1) mit zunehmender Vergröberung des Korns etwa bis zur Grenze Mittelsand/Grobsand, wohingegen Böden mit hohem Tonanteil und niedrigeren Quarzgehalten geringere Leitfähigkeiten haben.

Abbildung 2 zeigt den Einfluss des Wassers auf die Wärmeleitfähigkeit von Böden unterschiedlicher Textur. Grundsätzlich steigt die Wärmeleitfähigkeit zunächst steil an, um dann mit weiter zunehmenden Wassergehalten abzuflachen. Besonders deutlich wird dies für den Sand und das, obwohl die Wärmeleitfähigkeit des Wassers geringer ist, als die des Quarzes (vgl. Tabelle 1). Der höhere Wassergehalt führt hier zur Bildung von Wassermenisken und damit zu einer Erhöhung der Kontaktflächen zwischen den Einzelkörnern (BACHMANN 2005). Dieser Effekt ist in tonigerem Material geringer ausgeprägt, da hier die Wärmeübertragung vorwiegend innerhalb des Korngerüsts erfolgt.

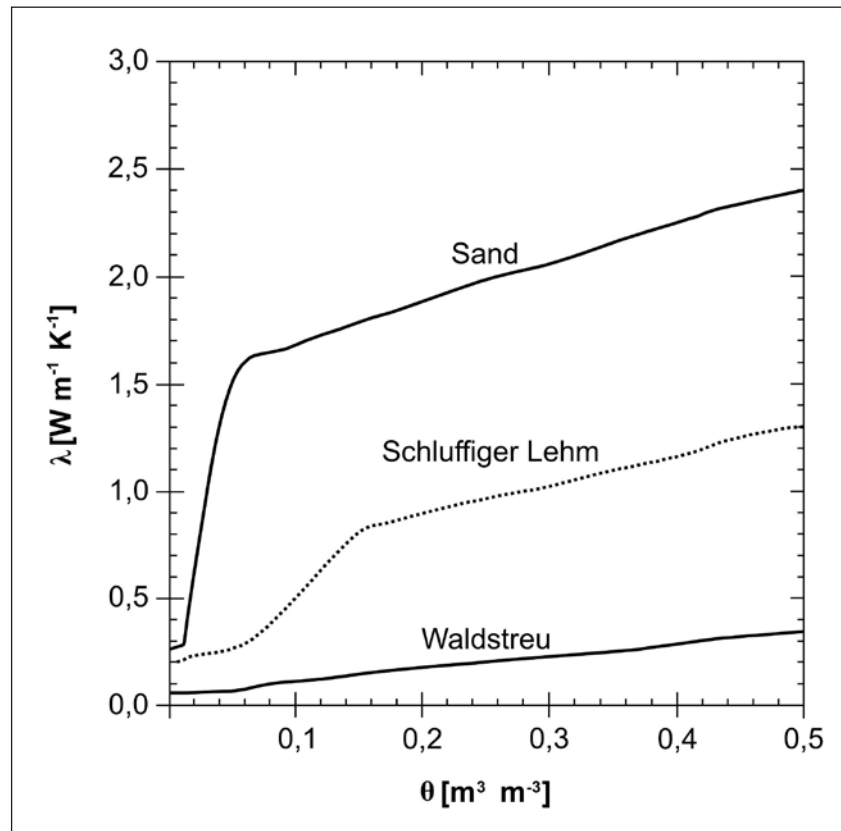


Abb. 2: Typische Leitfähigkeitsfunktionen für Sand, schluffigen Lehm und organisches Auflagematerial in Abhängigkeit vom Volumenanteil Wasser (BACHMANN 2005).

Nach Untersuchungen von OCHSNER et al. (2001) bestehen enge Zusammenhänge zwischen der thermischen Leitfähigkeit und dem Luftgehalt von Böden. Die Autoren untersuchten Böden unterschiedlicher Textur und variierten die Wassergehalte. Da jedoch das Wasser die Luft aus den Poren verdrängt, sind die Luftgehalte wiederum eng mit den Wassergehalten korreliert, so dass beide Größen nicht isoliert betrachtet werden können.

2.2 Wärmekapazität

Oberhalb des absoluten Nullpunktes hat der Boden einen Wärmehalt, der pro Gewichts- oder Raumeinheit (J g^{-1} oder J cm^{-3}) angegeben werden kann. Da diese Größe schwer zu erfassen ist, wird häufig die Energiemenge angegeben, die in einer definierten Bodenmenge eine bestimmte Temperaturänderung hervorruft.

Die entsprechende physikalische Größe ist die *spezifische Wärmekapazität* C ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$). In der bodenkundlichen Literatur wird häufig die spezifische Wärmekapazität pro Volumeneinheit verwendet C_v ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), die sog. volumetrische Wärmekapazität (HARTGE & HORN 1999, BACHMANN

2005). Sie kann über die Kenntnis der Dichte (ρ) (g cm^{-3}) aus der spezifischen Wärmekapazität errechnet werden ($C_v = C_s \cdot \rho$).

Tabelle 2 zeigt die Wärmekapazitäten und Trockenrohdichten verschiedener Bodenkomponenten. Generell lässt sich die Wärmekapazität eines Bodens aus den Summen der Kapazitäten der Einzelkomponenten (mineralische Bestandteile, organische Substanz, Wasser, Luft) entsprechend ihrer Volumenanteile berechnen (BACHMANN 2005, KERSTEN 1949, DE VRIES 1963, OCHSNER et al. 2001).

Aus Tabelle 2 wird auch deutlich, dass die Wärmekapazität des Wassers wesentlich höher ist als die der festen Bodenbestandteile. Damit hat der Wassergehalt eine herausragende Bedeutung für die Wärmekapazität von Böden.

Tab. 2: Wärmekapazität und Dichte wichtiger Bodenkomponenten (gemessen unter verschiedenen Temperaturbedingungen) (BACHMANN 2005).

Substanz	Wärmekapazität ($\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$)	spez. Dichte (g cm^{-3})	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
Quarz	2,01	2,66	10
Tonminerale	2,01	2,65	10
organische Substanz	2,51	1,30	10
Wasser	4,19	1,00	10
Luft	0,00126	0,00125	10
Eis	1,88	0,92	0
CaCO_3	2,31	2,71	55-60
Fe_2O_3	3,62	5,24	55-60
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	3,41	3,60	55-60
Glimmer	2,53	2,90	55-60
Dolomit	2,69	2,90	55-60
Andesit	2,00	2,40	55-60
Basalt	2,69	3,00	55-60

(MJ = Megajoule = 1 Mio. Joule)

Feuchte Böden haben demnach höhere Wärmekapazitäten als trockene. Dies hat zur Folge, dass ihnen mehr Energie zugeführt werden muss, um eine Temperaturerhöhung hervorzurufen. Im Falle der thermischen Nutzung, z.B. durch Erdwärmekollektoren, kann aber auch mehr Energie

entnommen werden, bis sich die Temperatur ändert. Besonders feuchte Böden sind z.B. Moore, Gleye (Grundwasserböden) oder Pseudogleye (Stauwasserböden), wobei letztere insbesondere in den Winter- und Frühjahrsmonaten über hohe Wassergehalte verfügen.

Bei der Betrachtung des Wassers im Boden müssen auch seine Aggregatänderungen berücksichtigt werden: Beim Phasenübergang von Wasser zu Eis sinkt die volumetrische Wärmekapazität von 4,19 auf 1,88 MJ m⁻³ K⁻¹ (vgl. Tabelle 2) verbunden mit einer Volumenzunahme von 9 % (BACHMANN 2005). Demnach haben gefrorene Böden geringere Wärmekapazitäten als nicht gefrorene.

Auf Basis der dargestellten Grundlagen zu den thermischen Eigenschaften einzelner Bodenbestandteile sind die folgenden grundsätzlichen Aussagen möglich:

- Das im Boden gespeicherte Wasser spielt eine zentrale Rolle für die thermischen Eigenschaften. Einerseits ist es auf Grund seiner hohen Wärmekapazität ein guter Wärmespeicher, andererseits führen Wassermenisken in den Bodenporen zu einer besseren Wärmeübertragung zwischen den Bodenpartikeln.
- Der Wasserhaushalt unterliegt je nach Witterung jahreszeitlichen Veränderungen, so dass sich nicht nur Substanz bedingte, sondern auch zeitliche Differenzierungen ergeben.
- Lagerungsdichte und Porenraumverteilung steuern den Luft- und Wasserhaushalt des Bodens und somit die thermischen Eigenschaften.
- Das Bodenmineral Quarz verfügt gegenüber Tonmineralen und organischer Substanz über eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit. Daher haben sandige und sandig-lehmige Böden mit hohen Quarzanteilen vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeiten.
- Trockene Böden haben auf Grund der geringen Wassergehalte geringere Wärmeleitfähigkeiten und -kapazitäten. Sie erwärmen sich schneller als feuchte oder nasse Böden, können aber auch weniger Wärme speichern.

3 UNTERSUCHUNGSMETHODIK UND DATENBASIS

Die Untersuchungen der thermischen Eigenschaften erfolgten im Rahmen bodenkundlicher Profilaufnahmen in verschiedenen Landesteilen von Rheinland-Pfalz (vgl. Abbildung 3). Grundlage war zunächst eine detaillierte bodenkundliche Beschreibung von Aufschlüssen aus Bodenprofilgruben nach den Vorgaben des Erfassungsstandards für das Fachinformationssystem Boden des LGB (FRIEDRICH et al. 2003).

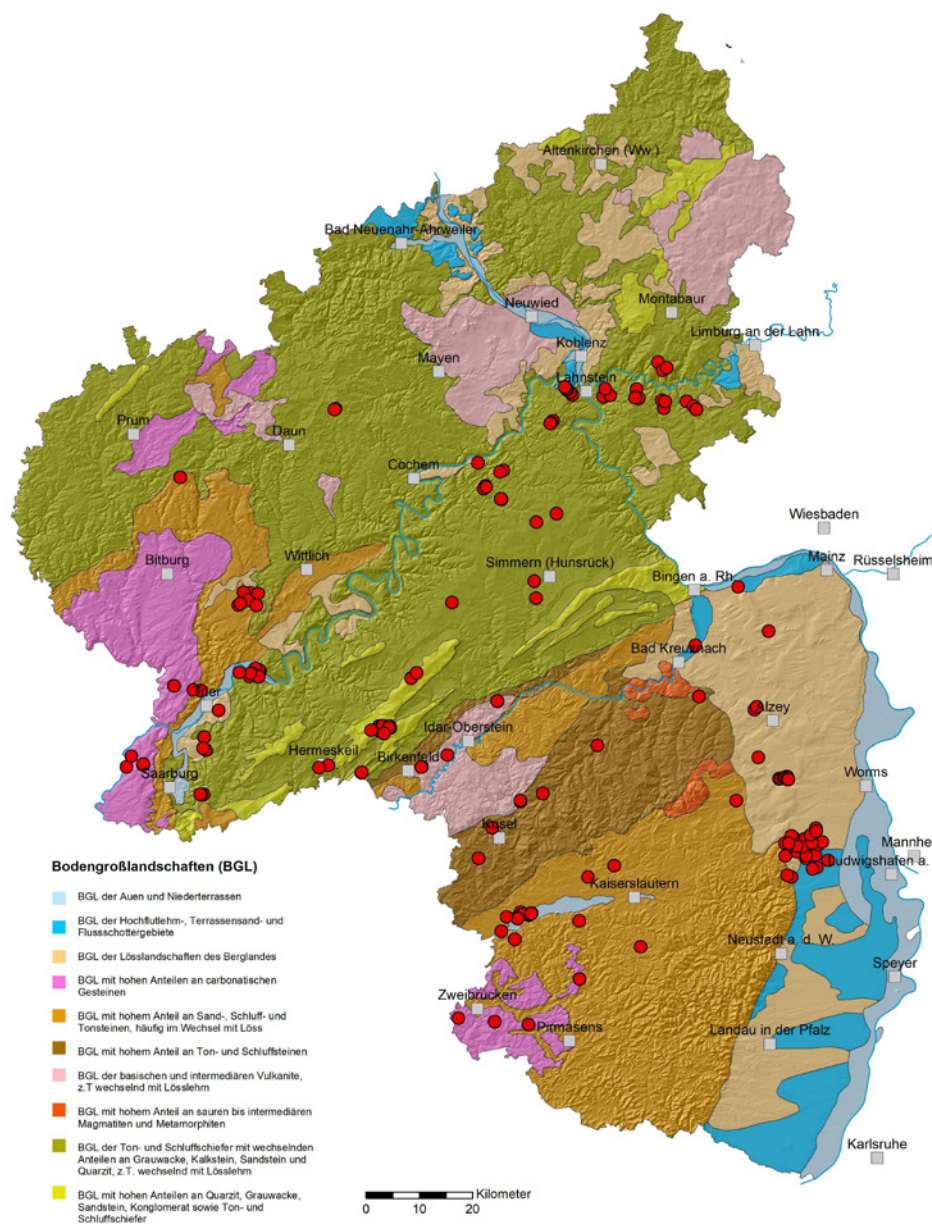


Abb. 3: Lage der Bodenprofile mit thermischen Messungen innerhalb der Bodengroßlandschaften von Rheinland-Pfalz.

3.1 Probennahme und Laboranalytik

Im Anschluss an die bodenkundliche Beschreibung der Profilgruben wurden horizontweise gestörte Proben für bodenchemische sowie ungestörte Proben für bodenphysikalische Untersuchungen entnommen. Bei der Entnahme der ungestörten Proben kamen Stechzylinder mit einem Volumen von 100 cm³ zum Einsatz. Da mit einzelnen Stechzylindern nur ein jeweils kleiner Bodenausschnitt untersucht werden kann, wurden in der Regel 6 Parallelproben pro Bodenhorizont entnommen. Tabelle 3 gibt einen Überblick zu den eingesetzten bodenchemischen und -physikalischen Untersuchungsmethoden im Labor des LGB.

Tab. 3: Bodenchemische und bodenphysikalische Analytik.

Parameter	Methodik
Bodenchemische Parameter	
Probenaufbereitung	DIN ISO 11464: Lufttrocknung, Trennung Grob- und Feinboden (2mm-Sieb), Feinmahlen eines Aliquotes des aufbereiteten, homogenisierten Feinbodens in Achat-Kugelmühle
Gesamtkohlenstoff (Ct/TC)	DIN ISO 10694
organischer Kohlenstoff (TOC)	berechnet nach DIN ISO 10694
Bodenphysikalische Parameter	
Korngrößenverteilung	DIN ISO 11277
Trockenrohddichte	DIN ISO 11274
Porenraumverteilung	DIN ISO 11274 mit Bestimmung der Dichte der Festsubstanz mittels Heliumpyknometer
Thermische Messungen	Thermal Analyzer KD2 PRO der Fa. Decagon

Die Messungen der thermischen Parameter erfolgten im Routinebetrieb zur Bestimmung der Porenraumverteilung im Bodenphysiklabor des LGB. Dazu wurden die Stechzylinderproben zunächst auf Keramikplatten gesetzt und kapillar aufgesättigt. Anschließend wurden die Proben in Druckapparaturen unter definierten Bedingungen stufenweise entwässert. Am LGB werden an ungestörten Proben standardmäßig die Druckstufen pF 1,8 und pF 2,5 untersucht. Um die Porenraumverteilung in den Stechzylindern nicht zu stören, erfolgten die thermischen Messungen nach Wägung der Proben aus der Druckstufe pF 2,5. Hier wird das Bodenmaterial einem Druck von 33 kPa (entsprechend 3 m Wassersäule) ausgesetzt. Daraus ergibt sich die in den Fein- und Mittelporen gespeicherte Wassermenge. Diese Größe bildet neben dem Wassergehalt bei pF 1,8 und dem Feuchteäquivalent ein Maß für die Feldkapazität von Böden (RENGER

et al. 2009). Dabei handelt es sich um die Wassermenge, die ein Boden gegen die Schwerkraft zurückhalten kann. Bei der Interpretation der Messwerte ist daher zu beachten, dass Textur bedingt unterschiedliche Wassergehalte in den Bodenproben vorliegen.

Für die thermischen Messungen wurde das Feldmessgerät KD 2 PRO der Fa. Decagon (vgl. Abbildung 4) verwendet, das auch in weiteren Untersuchungen zur Wärmeausbreitung um erdverlegte Kabel zum Einsatz kam (HENN 2021, KNABE 2021, KNABE & BRUNSWIG 2022).

Die theoretischen Grundlagen zur Messtechnik finden sich in DECAGON DEVICES (2016). Das Gerät verfügt über 3 Messsensoren unterschiedlicher Längen (2 Einfachnadeln mit 6 und 10 cm Länge, 1 Doppelnadel mit 3 cm Länge). Verwendet wurde der Doppelnadelsensor, der in das feuchte Bodenmaterial eingestochen wurde, so dass die folgenden Parameter bestimmbar sind:

- Thermische Leitfähigkeit (λ) ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- Volumetrische Wärmekapazität (C) ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)
- Thermische Diffusivität, Temperaturleitfähigkeit (α) ($\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$) = λ/C
- Wärmewiderstand (ρ) (K cm W^{-1}) = $1/\lambda \cdot 100$

Sämtliche Messungen fanden im Bodenphysiklabor des LGB bei Temperaturen zwischen 18 und 26 °C statt.



Abb. 4: Messung thermischer Parameter an Bodenstechzylindern im Bodenphysiklabor des LGB mit dem Thermal Analyzer KD 2 Pro und Doppelnadelsensor.

3.2 Datenaufbereitung und Datenbasis

Aus den Messdaten der einzelnen Stechzylinder wurden nach Plausibilitätsprüfung (Kontrolle der Porenraumverteilungen, Abgleich der Gesamtporenvolumina mit den Wassergehalten bei pF 2,5) für jeden Bodenhorizont Mittelwerte für Wassergehalte, Trockenrohdichten und die o.g. thermischen Parameter berechnet. Durch die Kombination von Analysedaten (Bodenchemie und -physik) mit bodensystematischen Erhebungen ergibt sich eine Datenmatrix mit der folgenden Kennzeichnung:

- Bodensystematische Beschreibung von 174 Bodenprofilen und 734 Bodenhorizonten,
- Bodenphysikalische Daten für ca. 2.700 Stechzylinder,
- Bodenchemische und -physikalische Daten für 734 Bodenhorizonte.

Folgende Messdaten wurden für die Auswertung herangezogen:

- Thermische Parameter (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Temperaturleitfähigkeit),
- Wassergehalt bei pF 2,5 (Wassergehalt in Fein- und Mittelporen),
- Trockenrohdichte,
- Gesamtporenvolumen,
- Korngrößenverteilung,
- Gehalt an organischer Substanz.

Die Ausgangsgesteine der untersuchten Böden umfassen ein breites Spektrum von organischen Bildungen des Holozäns bis zu devonischen Sedimentgesteinen und Metamorphiten (vgl. Tabelle 4). Zu beachten ist, dass nahezu alle untersuchten Bodenprofile einen geschichteten Aufbau haben. Damit können an einem Standort unterschiedliche Ausgangsteine der Bodenbildung bzw. Substrate auftreten (vgl. Anhang 3). Dies ist insbesondere bei den Böden der Mittelgebirge der Fall, die aus periglaziären Lagen mit unterschiedlichen Anteilen an verschiedenen Gesteinskomponenten bestehen. Die entsprechende Zuordnung zu den Ausgangsgesteinen der Bodenbildung erfolgte daher horizontweise nach der vorliegenden Hauptkomponente. Neben natürlich gelagerten Böden wurden auch Messungen an Weinbergsböden vorgenommen, deren Profilaufbau und bodenphysikalische Eigenschaften durch die Bodenbearbeitung verändert wurden. Auch hier erfolgte eine Zuweisung der Proben, soweit möglich, nach der Hauptgesteinskomponente.

Tab. 4: Datengrundlage, Zuordnung der Proben zu Ausgangsgesteinen der Bodenbildung bzw. Substraten.

Ausgangsgesteine der Bodenbildungen bzw. Substrate	Stratigraphie	Anzahl der unter- suchten Proben
Organische Bildungen		
Torf	Holozän	63
Stark zersetzte Torfe mit mineralischen Beimengungen (Anmoore)	Holozän	39
Magmatische Gesteine		
Laacher-See-Tephra	Pleistozän/Holozän	25
Andesit	Rotliegend	14
Pleistozäne äolische Sedimente		
Flugsand	Pleistozän	13
Löss	Pleistozän	61
Lösslehm	Pleistozän	45
Holozäne und pleistozäne fluviatile Sedimente		
Fluvialsand	Pleistozän	36
Fluviallehm	Holozän	8
Fluviallehm	Pleistozän	14
Fluvialschluff	Holozän	4
Fluvialton	Holozän	6
Fluvialton	Pleistozän	2
Sedimentgesteine, Metamorphite		
Kalkstein, Mergel	Tertiär	67
Tonmergel	Keuper	3
Kalkstein, Mergel	Muschelkalk	29
Sandstein	Buntsandstein	75
Sandstein	Rotliegend	11
Sandstein, Quarzit	Devon	36
Ton-, Siltstein	Devon	146
Ton-, Siltstein	Rotliegend	20
Sand (unklare Genese)	Pleistozän	8
Unklare petrographische Zuordnung		9
Gesamt		734

4 ERGEBNISSE

In Kapitel 4 wird ein Überblick zur Auswertung des Datenbestandes hinsichtlich verschiedener Aspekte gegeben. Die Präsentation der Ergebnisse erfolgt mit dem Schwerpunkt auf Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, da Temperaturleitfähigkeit und Wärmewiderstand aus diesen beiden Messgrößen berechnet werden können.

Umfangreiche Tabellen sowie die Darstellungen der Datengrundlagen können dem Anhang entnommen werden. Die Tabellen enthalten texturorientierte Auswertungen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (AG BODEN 2005) und nach IUSS WORKING GROUP WRB (2015) (vgl. Anhang 1). Darüber hinaus wurde eine Datenauswertung nach Substrat und bodengenetischen Kriterien vorgenommen (vgl. Anhang 2). Beispielhafte Messdaten repräsentativer Böden finden sich in Anhang 3.

4.1 Thermische Eigenschaften in Abhängigkeit von Trockenrohdichte und Wassergehalt

Das Datenkollektiv der untersuchten Bodenhorizonte zeigt die komplette Spannbreite von Lagerungsdichten natürlich gelagerter Böden (vgl. Abbildung 5). Diese liegen in mineralischen Böden i.d.R. zwischen 0,9 und 1,9 und in organischen Böden bei etwa 0,2 bis 0,6 g cm⁻³.

Grundsätzlich steigen die thermischen Leitfähigkeiten und Temperaturleitfähigkeiten mit zunehmenden Trockenrohdichten (vgl. Abbildung 5a und 5b). Dieser Effekt ergibt sich aus den erhöhten Kornkontakten bei gleichzeitiger Abnahme der Luftkapazitäten (BACHMANN 2005). Die niedrigsten Leitfähigkeiten liegen in organischen Substraten (Torfe und Anmoore, Humusstufen h6-h7) sowie in sehr locker gelagerten mineralischen Böden vor.

Der Einfluss der organischen Substanz auf die thermischen Leitfähigkeiten wird ansatzweise sichtbar. Mit zunehmenden Humusgehalten (bei gleichzeitig abnehmenden Trockenrohdichten) sinken die thermischen Leitfähigkeiten und Temperaturleitfähigkeiten.

Die Wärmekapazitäten der untersuchten Böden zeigen sehr breite Streuungen, die den Einfluss des Bodenwassers lediglich in der Tendenz nachzeichnen (vgl. Abbildung 5c). Möglicherweise hat neben Textur und Wassergehalt das Bodengefüge einen weiteren Einfluss auf die Messungen an

natürlich gelagerten Böden, der sich nur schwer quantifizieren lässt. Hervorzuheben sind auch hier die besonderen Eigenschaften von organischen Substraten, die auf Grund ihrer hohen Porenvolumina große Wassermengen speichern und somit die höchsten Wärmekapazitäten aufweisen.

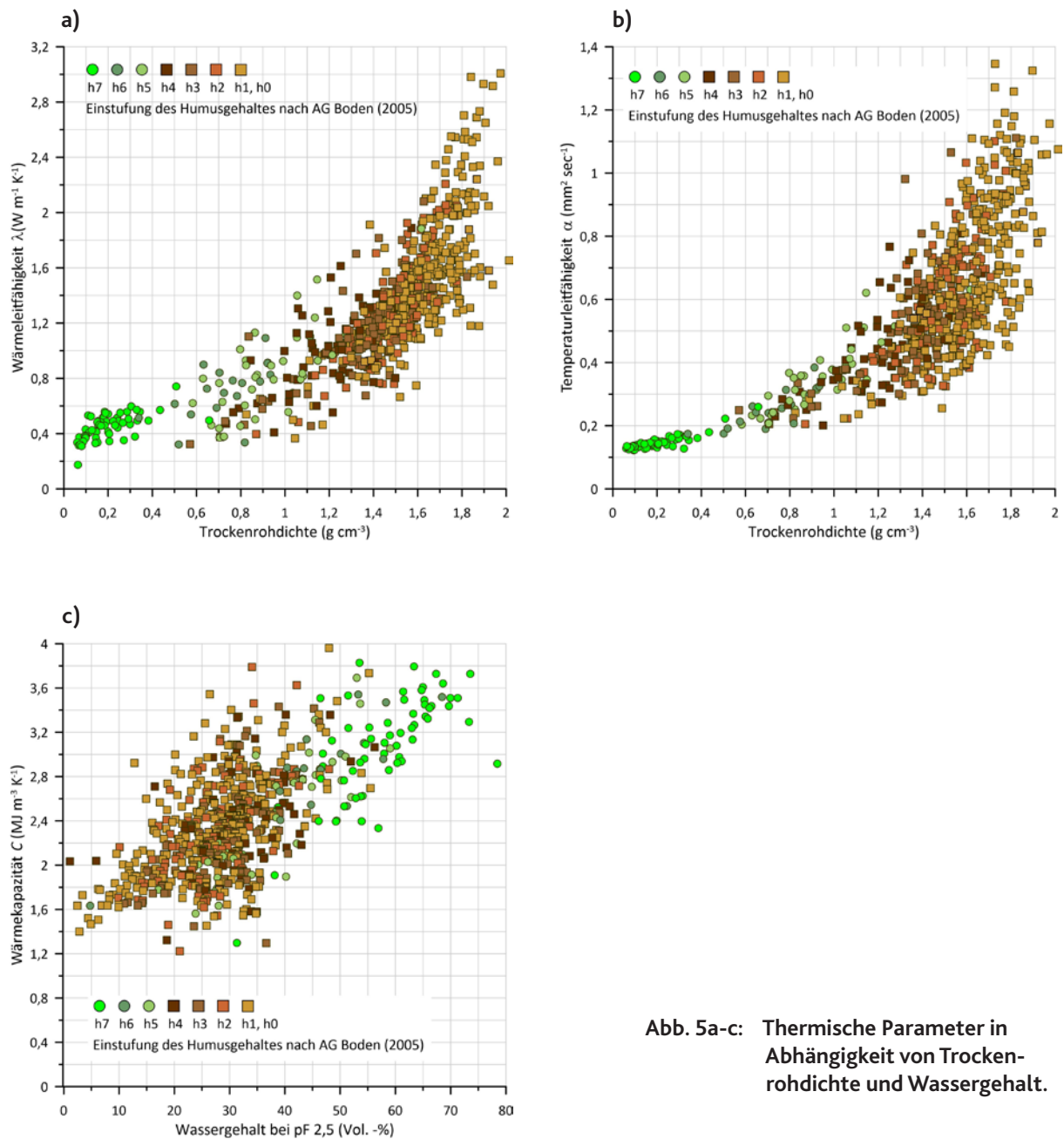


Abb. 5a-c: Thermische Parameter in Abhängigkeit von Trockenrohdichte und Wassergehalt.

4.2 Kritische Betrachtung der gemessenen Wärmekapazitäten

Der in Abbildung 5 dargestellte Zusammenhang zwischen Wärmekapazität und Wassergehalt zeigt sehr breite Streuungen, die in dieser Form nicht erwartet wurden. Daher wurden nach dem Ansatz von DE VRIES (1963) die Wärmekapazitäten der untersuchten Bodenproben aus der Summe der Kapazitäten der einzelnen Bodenbestandteile (Festsubstanz + Wasser) berechnet:

$$C = \text{TRD} * C_s + 4,18 * \theta$$

C	=	Volumetrische Wärmekapazität ($\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$)
TRD	=	Trockenrohdichte (g cm^{-3})
C_s	=	Wärmekapazität trockenes Bodenmaterial ($\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$)
4,18	=	Wärmekapazität Wasser ($\text{J cm}^{-3} \text{K}^{-1}$)
θ	=	Volumenanteil Wasser

Für die Wärmekapazität des trockenen Bodenmaterials (C_s) können einerseits die Angaben aus Tabelle 2 oder die Werte von KERSTEN (1949) bei einer Temperatur von 20°C verwendet werden (DEHNER et al. 2007). Dies entspricht einem Wert von ca. $740 \text{ J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ (entsprechend $0,74 \text{ J g}^{-1} \text{K}^{-1}$). Löst man die o.a. Gleichung mit den Wärmekapazitäten von HORN et al. (2021) bei den entsprechenden Wassergehalten nach AG BODEN (2005) nach C_s auf, ergibt sich eine ähnliche Größenordnung als Durchschnittswert über alle Bodenarten. Somit lassen sich auf der Basis des vorliegenden Datensatzes die Wärmekapazitäten für Böden geringer bis mittlerer Humusgehalte (Humusstufen h0-h3) abschätzen.

In Abbildung 6a sind die Messergebnisse den berechneten Werten gegenübergestellt, woraus sich wie erwartet keine besonders guten Übereinstimmungen ergeben. Gleichzeitig wird deutlich, dass sich der Einfluss des Wassers auf die Wärmekapazitäten mit der Berechnung nach DE VRIES (1963) schlüssiger abbilden lässt (vgl. Abbildung 6b sowie 5c).

Bei bekannten Randbedingungen zu Bodenfeuchte und Trockenrohdichten bieten somit die berechneten Wärmekapazitäten eine Alternative zu Messungen.

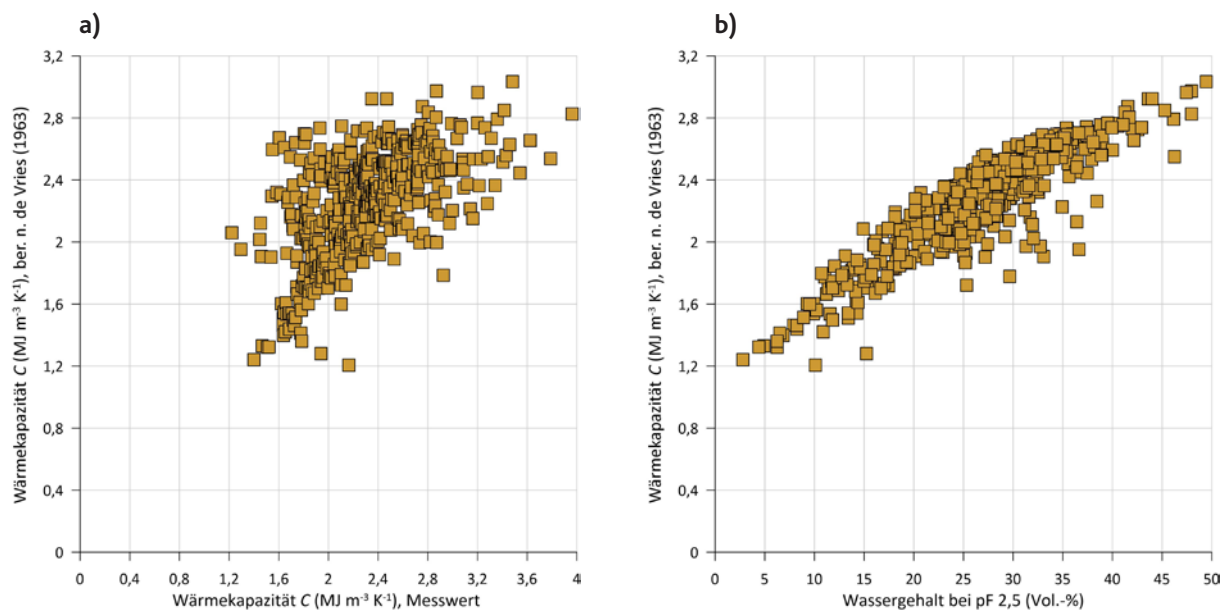


Abb. 6a-b: Darstellung der Wärmekapazitäten nach Modellierung und Messung (Proben mit org. Substanz < 4 %).

4.3 Schätzrahmen auf Basis von Textur und Trockenrohdichte

Analog zu den Wasserhaushaltstabellen der AG BODEN (2005) wurden für die thermischen Parameter verschiedene Schätzrahmen erstellt, so dass auf Basis von Textur und Trockenrohdichte entsprechende Kenngrößen abgeschätzt werden können.

Die Auswertungen liegen für die Bodenarten der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 2005) und für die Texturklassen der IUSS WORKING GROUP WRB (2015) vor (vgl. Anhang 1).

Durch die teils geringen Fallzahlen ergeben sich statistisch einigermaßen abgesicherte Werte auf der Basis der Bodenartenhauptgruppen oder Bodenartengruppen nach AG BODEN (2005).

Sollte im Gelände die Packungsdichte nach DIN 19682-10 oder die effektive Lagerungsdichte nach AG BODEN (2005) ermittelt werden, können die Befunde nach RENGGER et al. (2009) für die Ableitung der Trockenrohdichte genutzt werden.

Da ansteigende Humusgehalte zu einer Verringerung der Trockenrohdichten und gleichzeitig zu einer Erhöhung der Wassergehalte bei pF 2,5 führen, wurden ausschließlich Bodenproben mit weniger als 4 % organischer Substanz (Humusstufen h0-h3 nach AG BODEN 2005) ausgewertet. Damit ist gewährleistet, dass die Daten der unterschiedlichen Stufen der Trockenrohdichte (TRD-

Stufen) miteinander vergleichbar sind. Darüber hinaus können auf dieser Datengrundlage die meisten im Gelände auftretenden Fälle beurteilt werden.

Die thermischen Eigenschaften humoser Oberböden sowie organischer Böden sind Gegenstand der Substrat orientierten Auswertung (vgl. Kapitel 4.4 sowie Anhang 2 & 3).

Am Beispiel des Schätzrahmens für die thermische Leitfähigkeit in Tabelle 5 wird nochmals der herausragende Einfluss der Trockenrohdichte deutlich. Sollten keine Daten aus bodenphysikalischen Untersuchungen vorliegen, ist es daher erforderlich, die Lagerungsdichte bzw. Packungsdichte im Gelände möglichst präzise einzuschätzen.

Tab. 5: Thermische Leitfähigkeiten für Bodenartengruppen nach AG BODEN (2005) 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	0,43	1,06	1,29	1,86	2,40
us	Schluffsand	Su3, Su4	0,40				
sl	Sandlehme	Slu, Sl4, St3	0,39	1,00	1,42	1,85	2,48
ll	Normallehme	Lt2, Ls2, Ls3, Ls4	0,64	1,06	1,28	1,60	2,07
tl	Tonlehme	Lts, Ts3, Ts4	0,60	1,02	1,48	1,73	2,02
su	Sandschluffe	Us, Uu				2,35	
lu	Lehmschluffe	Ut2, Ut3, Uls		1,05	1,21	1,59	
tu	Tonschluffe	Ut4, Lu	0,80	1,06	1,28	1,55	1,67
ut	Schlufftone	Tu3, Tu4, Lt3	0,86	1,07	1,28	1,42	
lt	Lehmtone	Tt, Tu2, Tl, Ts2	0,68	1,05	1,16		

*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 $g\ cm^{-3}$

Grundsätzlich haben alle locker gelagerten Proben (TRD-Stufen pt1-2) sehr geringe Leitfähigkeiten. Größere Textur bedingte Differenzierungen treten erst ab TRD-Stufe pt3 auf. Hier heben sich Sande- und Sandlehmgemische mit hohen Leitfähigkeiten von Schluffen und insbesondere von stark tonigen Proben mit sehr geringen Werten ab.

Weniger systematisch sind die Tendenzen bei den Wärmekapazitäten (Tabelle 7, Anhang 1). Offensichtlich führt die Erhöhung der Trockenrohdichten zu einer Verringerung der Luftkapazitäten und nur zu geringfügigen Änderungen der Wassergehalte in den Fein- und Mittelporen. Gleichzeitig steigen tendenziell die Wärmekapazitäten mit zunehmenden Anteilen der Festsubstanz.

4.4 Thermische Kennwerte für Substrat-Horizont-Kombinationen

Bei fehlenden Daten zu Lagerungsdichte und Körnung können die thermischen Eigenschaften von Böden als Durchschnittswerte für Substrat-Horizont-Kombinationen abgeschätzt werden. Nach diesem Ansatz wurden bereits von verschiedenen Autoren Kennwerte des Bodenwasserhaushaltes ermittelt (VETTERLEIN 1986, RIEK et al. 1995, RENGGER et al. 2009).

Grundlage dieses Konzeptes der Datenauswertung ist die Annahme, dass die wesentlichen bodenphysikalischen Eigenschaften bereits durch die Ausgangsgesteine der Bodenbildung und deren pedogene Überprägungen ableitbar sind. Damit lässt sich nach RENGGER et al. (2009) die Genauigkeit der Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte deutlich verbessern und der substratgenetische Einfluss von Trockenrohdichte, Textur und Humusgehalt auf die bodenphysikalischen Eigenschaften quantifizieren.

Die Ergebnisse bieten damit zum einen eine Präzisierung der in Kapitel 4.3 und Anhang 1 dargestellten Schätzrahmen, zum andern können sie auch zur Parametrisierung von geologischen Karten oder von Lockermaterial aus geologischen Schichtenverzeichnissen herangezogen werden.

In Abbildung 7 wird am Beispiel der thermischen Leitfähigkeiten für ausgewählte Substrate der Einfluss von mineralogischer Zusammensetzung und pedogener Überprägung sichtbar.

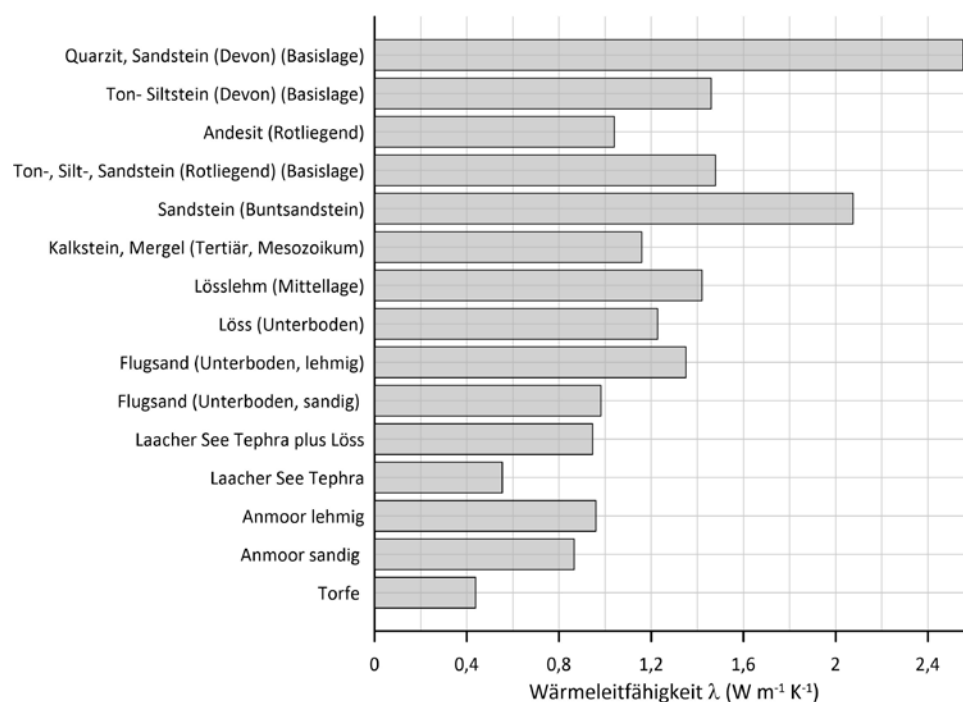


Abb. 7: Wärmeleitfähigkeiten ausgewählter Substrate.

Die höchsten thermischen Leitfähigkeiten treten demnach in den stratigraphisch ältesten periglaziären Fließerden (Basislagen) aus mesozoischen und devonischen Sandsteinen auf. Während des Pleistozäns verursachte der mehrfache Wechsel zwischen Frost- und Tauphasen zusammen mit der Verlagerung von Bodenmaterial auf gefrorenem Untergrund eine teils extreme Verdichtung mit Trockenrohdichten von bis zu $1,9 \text{ g cm}^{-3}$. Die dichte Lagerung verbunden mit den hohen Quarzanteilen führt hier zu Maximalwerten der thermischen Leitfähigkeit bis zu $2,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Mittlere Leitfähigkeiten zwischen $1,2$ bis $1,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ liegen in quarzarmen carbonatreichen Bodenausgangsteinen (Kalke, Mergel), intermediären Vulkaniten (Andesit) sowie in sandigen bis schluffigen äolischen Sedimenten (Flugsand, Löss und Lösslehm) vor.

Extrem niedrige thermische Leitfähigkeiten haben organische Böden (Torf und Anmoore). Ursache hierfür ist der hohe Anteil an organischer Substanz verbunden mit hohen Porenvolumina und niedrigen Lagerungsdichten bei gleichzeitig hohen Wassergehalten.

Eine Sonderrolle bei den mineralischen Substraten nehmen Böden aus Laacher-See-Tephra ein. Die lockere Lagerung der vulkanischen Asche ist die Ursache für sehr geringe thermische Leitfähigkeiten. Die Oberböden aus den jüngsten periglaziären Lagen (Hauptlagen) in weiten Teilen des Rheinischen Schiefergebirges bestehen aus Mischungen aus Laacher-See-Tephra und Löss. Die Lösskomponente führt hier zu etwas höheren Lagerungsdichten und somit zu einer Erhöhung der thermischen Leitfähigkeiten. Die angegebenen Werte sind somit großräumig auf locker gelagerte Oberböden im rheinischen Schiefergebirge anwendbar.

Eine detaillierte Aufstellung der thermischen Kennwerte zu verschiedenen Substrat-Horizont-Kombinationen für Ober- und Unterböden sowie eine Dokumentation typischer Bodenprofile finden sich in Anhang 2 und Anhang 3.

5 LITERATUR

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage (KA5). Hannover (BGR).
- BACHMANN, J. (1997): Wärmefluss und Wärmehaushalt. In: BLUME, H.-P. et al.: Handbuch des Bodenschutzes. 3. Erg. Lfg. 11/97. Landsberg/Lech (Ecomed).
- BACHMANN, J. (2005): Thermisches Verhalten der Böden. In: BLUME, H.-P. et al.: Handbuch des Bodenschutzes. 22. Erg. Lfg. 08/05. Landsberg/Lech (Ecomed).
- CÔTÉ, J. & KONRAD, J.-M. (2005): Thermal conductivity of base-course materials. – Can. Geotech. J., 42, S. 61-78. Ottawa, Ont. (<https://doi.org/10.1139/t04-081>).
- CÔTÉ, J. & KONRAD, J.-M. (2006): Estimating the thermal conductivity of pavement granular materials and subgrade soils. – Transportation Research Record, 1967(1), S. 10-19. Thousand Oaks, CA. (<https://doi.org/10.1177/0361198106196700102>).
- DE VRIES, D. A. (1963): Thermal property of soils. In: VAN WIJK, W. R. (Ed.): Physics of plant environment, S. 210-235. Amsterdam (North Holland Publishing Company).
- DE VRIES, D. A. (1975): Heat transfer in soils. In: DE VRIES, D. A. & AFGAN, N. H. (Ed.): Heat and mass transfer in the biosphere, S. 5-28. Washington, DC. (Scripta Book Co.)
- DECAGON DEVICES (2016): KD2 Pro Thermal Properties Analyzer, Operator's Manual. (Version: February 29, 2016).
- DEHNER, U., MÜLLER, U. & SCHNEIDER, J. (2007): Erstellung von Planungsunterlagen für die Nutzung von Erdkollektoren – Geoberichte 5. (DOI. 10.48476/geober_5_2007).
- DIN 19682-10 (2014-07): Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchungen - Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges. Berlin.
- DIN ISO 10694 (1996-8): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).
- DIN ISO 11274 (2020-4): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren.
- DIN ISO 11277 (2002-08): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation.
- DIN ISO 11464 (2006-12): Bodenbeschaffenheit - Probenvorbehandlung für physikalisch-chemische Untersuchungen.
- FAROUKI, O. T. (1986): Thermal properties of soils. – Series on rock and soil mechanics, **11**, Clausthal-Zellerfeld (Transtech Publications).

- FRIEDRICH, K., KASEL, H., LÜGGER, K., SCHMANKE, M. & VORDERBRÜGGE, T. (2003): Erfassungsstandard Boden/Bodenschutz Hessen. Wiesbaden. (<https://www.hlnug.de/static/medien/boden/fisbo/erfstnd/index.html>).
- HARTGE, K. H & HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik, 3. Auflage. Stuttgart (Enke).
- HENN, R. (2021): Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Sedimenten - Betrachtung verschiedener Einflussfaktoren anhand eines neu entwickelten halbautomatischen Nadelsonden-Messsystems. Bachelorarbeit am Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen.
- HORN, R., LU, Y, REN, T., HORTON, R., MORDHORST, A. & FLEIGE, H. (2021): Ableitung der thermischen Bodenfunktionen anhand von Körnung und Porengrößenverteilung als Grundlage für In-situ-Vorhersagen des Bodenwärmehaushaltes. – Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment, 72(1), S. 33-43. (DOI: 10.2478/boku-2021-0004).
- IUSS WORKING GROUP WRB (2015): World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. – World Soil Resources Reports, 106. Rome (FAO of the United Nations). (www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf).
- JOHANSEN, Ö. (1977): Thermal conductivity of soils. Ph.D. thesis. Trondheim. Translation for the Corps of Engineers, U.S. Army. Hanover, New Hampshire. (<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA044002.pdf>), based on: JOHANSEN, Ö. (1975): Varmeledningsevne av jordarter: 231 S. Ph.D. thesis. Trondheim.
- KERSTEN, M. S. (1949): Thermal properties of soils. – University of Minnesota, Institute of Technology, Engineering Experiment Station, Bull. 28. Vol. LII, No. 21. Minneapolis, Minn. (University of Minnesota). (<https://hdl.handle.net/11299/124271>).
- KNABE, B. & BRUNSWIG, W. D. (2022): Wärmeleitfähigkeiten von Böden - experimentelle Bestimmung und Bedeutung beim Bau von Erdkabeltrassen. – bbr, 73(9), S. 20-25. Bonn. (<https://bbr-online.de/bbr-9-2022/>).
- KNABE, B. (2021): Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Sedimenten - Betrachtung verschiedener Einflussfaktoren anhand eines neu entwickelten halbautomatischen Nadelsonden-Messsystems. Bachelorarbeit am Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen.
- LU, S., REN, T. GONG, Y & HORTON, R. (2007): An improved model for prediction soil thermal conductivity from water content at room temperature. – Soil Sci. Soc. Am. J., 71, S. 8-14. Hoboken, NJ. (<https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0041>).
- OCHSNER, T. E., HORTON, R. & REN, T. (2001): A new perspective on soil thermal properties. – Soil Sci. Soc. Am. J., 65, S. 1641-1647. Hoboken, NJ. (<https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1641>).
- RENGGER, M., BOHNE, K., FACKLAM, M., HARRACH, H., RIEK, W., SCHÄFER, W., WESSOLEK, G. & ZACHARIAS, S. (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 Bodengenesse, 40. Berlin.

- RIEK, W., WESSOLEK, G., RENGGER, M. & VETTERLEIN, E. (1995): Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität von Substrathorizontgruppen – eine statistische Auswertung von Labordatenbanken. – Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 158, S. 485-491. Weinheim. (<https://online-library.wiley.com/doi/pdf/10.1002/jpln.19951580512>).
- SANNER, B. (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen – Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation – IZW-Berichte 2/92. Karlsruhe (FIZ).
- SPRINGER FACHMEDIEN (Hrsg.) (2015): Boden und Energiewende – Trassenbau, Erdverkabelung und Erdwärme. Wiesbaden.
- TRINKS, S. (2010): Einfluss des Wasser- und Wärmehaushaltes auf den Betrieb erdverlegter Energiekabel. Dissertation, TU Berlin. (https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/3036/1/Dokument_57.pdf).
- VETTERLEIN, E. (1986): Bodenphysikalische Parameter auf der Grundlage von Substrat-Horizont-Gruppen. – Tagungsber., Akad. Landwirtsch.-Wiss. DDR, 245, S. 241-247. Berlin.
- WESSOLEK, G., TRINKS, S. & KERSEBAUM, K. (2020): Das CableEarth Verfahren für 110-kV-Kabeltrassen. WindNODE Abschlussbericht innerhalb des Teilprojekts 3: „Effiziente Betriebskonzepte für Stromnetze“. (https://www.researchgate.net/publication/344472989_Das_CableEarth_Verfahren_fur_110-kV-Kabeltrassen).
- WESSOLEK, G. & BOHNE, K. & TRINKS, S. & KLUGE, B. (2022). Case studies on soil heating by cables liners. – J. Mod. Appl. Phys., 5(5), S. 1-6.
- WESSOLEK, G. & TRINKS, S. (2015): Das CableEarth-Verfahren zur ökologischen Bewertung und Optimierung der Strombelastbarkeit erdverlegter Energiekabel. In: SPRINGER FACHMEDIEN (Hrsg.) (2015): Boden und Energiewende – Trassenbau, Erdverkabelung und Erdwärme, S.39-59. Wiesbaden.
- XIE, X., LU, Y., REN, T. & HORTON, R. (2018): An empirical model for estimating soil thermal diffusivity from texture, bulk density, and degree of saturation. – Journal of Hydrometeorology, 19, S. 445-457. (<https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0131.1>).

ANHANG

Anhang 1: Textur orientierte Auswertung

Anhang 1.1: Datengrundlagen und Schätzrahmen auf Basis von Bodenarten der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ag Boden 2005)

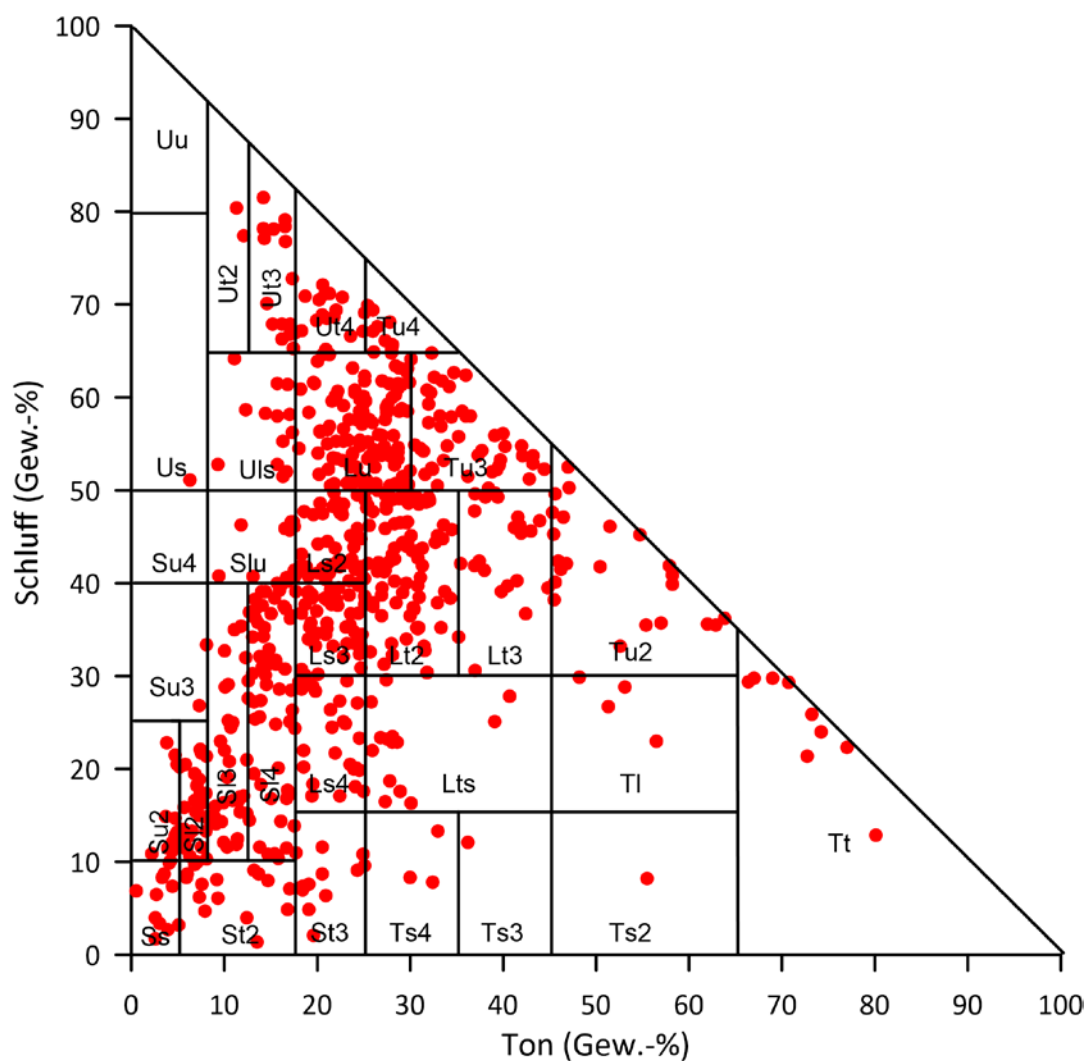


Abb. 8: Lage der Proben im Bodenartendiagramm der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ag Boden 2005), n = 741.

Tab. 6: Thermische Kennwerte (Mittelwerte) für Bodenartenhauptgruppen und TRD-Stufen nach AG BODEN (2005) (Proben mit org. Sub. < 4 Masse-%).

Bodenarten- hauptgruppe	Kürzel	TRD- Stufe	TRD	WG	λ	C	α	n
Sande	s							
		pt1	0,88	19	0,42	1,99	0,21	3
		pt2	1,33	14	1,04	1,74	0,60	9
		pt3	1,50	12	1,28	1,78	0,72	29
		pt4	1,68	14	1,88	1,99	0,95	21
		pt5	1,86	14	2,40	2,21	1,09	5
Lehme	l							
		pt1	0,93	32	0,59	1,97	0,30	10
		pt2	1,33	28	1,05	2,24	0,49	29
		pt3	1,51	26	1,30	2,28	0,59	60
		pt4	1,70	25	1,69	2,34	0,75	70
		pt5	1,86	23	2,22	2,36	0,96	29
Schluffe	u							
		pt1	1,01	36	0,80	2,63	0,31	8
		pt2	1,32	29	1,06	2,34	0,47	21
		pt3	1,48	29	1,26	2,29	0,57	59
		pt4	1,70	30	1,58	2,43	0,68	39
		pt5	1,84	29	1,67	2,46	0,76	4
Tone	t							
		pt1	1,13	31	0,80	2,28	0,36	3
		pt2	1,33	38	1,06	2,72	0,40	17
		pt3	1,50	35	1,25	2,54	0,51	48
		pt4	1,67	34	1,42	2,51	0,60	16

Erläuterung Tabelle 6 bis Tabelle 9:

TRD-Stufe	=	Einstufung der Trockenrohdichte (TRD) 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
TRD	=	Trockenrohdichte (g cm ⁻³)
WG	=	Wassergehalt bei pF 2,5 (Vol.-%)
λ	=	Thermische Leitfähigkeit (W m ⁻¹ K ⁻¹)
C	=	Volumetrische Wärmekapazität (MJ m ⁻³ K ⁻¹)
α	=	Temperaturleitfähigkeit (mm ² sec ⁻¹)
n	=	Anzahl der untersuchten Bodenhorizonte

Tab. 7: Thermische Kennwerte (Mittelwerte) für Bodenartengruppen und TRD-Stufen nach AG BODEN (2005) (Proben mit org. Sub. < 4 Masse-%).

Bodenarten- gruppe	Kürzel	TRD- Stufe	TRD	WG	λ	C	α	n
Reinsande	ss							
		$\rho t2$	1,31	11	0,92	1,65	0,55	1
		$\rho t3$	1,51	9	1,24	1,68	0,73	5
		$\rho t4$	1,69	13	2,06	2,00	1,02	2
Lehmsande	ls							
		$\rho t1$	0,88	22	0,43	2,01	0,21	2
		$\rho t2$	1,33	15	1,06	1,75	0,61	8
		$\rho t3$	1,50	12	1,29	1,80	0,72	24
		$\rho t4$	1,68	14	1,86	1,98	0,95	19
		$\rho t5$	1,86	14	2,40	2,21	1,09	5
Schluffsande	us							
		$\rho t1$	0,87	15	0,40	1,94	0,21	1
Sandlehme	sl							
		$\rho t1$	0,69	35	0,39	1,68	0,24	2
		$\rho t2$	1,34	25	1,00	2,09	0,49	5
		$\rho t3$	1,48	20	1,42	2,11	0,68	7
		$\rho t4$	1,71	21	1,85	2,29	0,83	23
		$\rho t5$	1,87	21	2,48	2,50	1,01	11
Normallehme	ll							
		$\rho t1$	0,97	31	0,64	2,08	0,32	7
		$\rho t2$	1,34	28	1,06	2,28	0,50	22
		$\rho t3$	1,52	27	1,28	2,30	0,58	51
		$\rho t4$	1,69	27	1,60	2,33	0,72	41
		$\rho t5$	1,86	24	2,07	2,28	0,93	17
Tonlehme	tl							
		$\rho t1$	1,13	32	0,60	1,82	0,33	1
		$\rho t2$	1,33	28	1,02	2,12	0,47	2
		$\rho t3$	1,51	26	1,48	2,14	0,71	2
		$\rho t4$	1,68	30	1,73	2,55	0,69	6
		$\rho t5$	1,86	26	2,02	2,30	0,88	1
Sandschluffe	su							
		$\rho t4$	1,80	21	2,35	2,24	1,05	1
Lehmschluffe	lu							
		$\rho t2$	1,31	27	1,05	2,23	0,47	3
		$\rho t3$	1,48	27	1,21	2,28	0,54	17
		$\rho t4$	1,65	31	1,59	2,55	0,65	3
Tonschluffe	tu							
		$\rho t1$	1,01	36	0,80	2,63	0,31	8
		$\rho t2$	1,32	30	1,06	2,36	0,47	18
		$\rho t3$	1,48	30	1,28	2,30	0,58	42
		$\rho t4$	1,70	30	1,55	2,43	0,68	35
		$\rho t5$	1,84	29	1,67	2,46	0,76	4
Schlufftone	ut							
		$\rho t1$	1,14	31	0,86	2,32	0,38	2
		$\rho t2$	1,34	34	1,07	2,49	0,43	10
		$\rho t3$	1,50	34	1,28	2,49	0,53	36
		$\rho t4$	1,67	34	1,42	2,51	0,60	16
Lehmtone	lt							
		$\rho t1$	1,10	29	0,68	2,20	0,31	1
		$\rho t2$	1,33	42	1,05	3,06	0,35	7
		$\rho t3$	1,51	39	1,16	2,69	0,44	12

Tab. 8: Thermische Kennwerte (Mittelwerte) für Bodenarten und TRD-Stufen nach AG BODEN (2005) (Proben mit org. Sub. < 4 Masse-%).*

Bodenarten	TRD					WG					λ				
	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5
Ss		1,31	1,51	1,69			11	9	13			0,92	1,24	2,06	
Sl2	1,06	1,37	1,48	1,65		10	14	12	12		0,48	1,04	1,30	1,67	
Sl3	0,71	1,35	1,50	1,68	1,92	33	15	16	18	18	0,38	1,10	1,38	1,97	2,78
Sl4	0,69	1,34	1,47	1,71	1,87	35	25	19	23	20	0,39	1,00	1,44	1,88	2,54
Slu				1,61	1,82				23	21				1,09	1,90
St2		1,31	1,54	1,69	1,83		16	7	12	12		0,97	1,13	1,65	2,02
St3			1,51	1,72	1,88			23	18	21			1,37	1,90	2,73
Su2		1,28	1,53	1,68	1,81		13	13	13	12		1,09	1,40	1,93	2,41
Su3	0,87					15					0,40				
Ls2		1,35	1,53	1,69	1,92		26	28	29	27		1,08	1,21	1,64	1,58
Ls3	0,91	1,33	1,51	1,71	1,85	32	27	21	24	25	0,61	1,08	1,14	1,53	2,16
Ls4	1,04	1,38	1,48	1,70	1,85	27	23	23	22	23	0,50	0,87	1,33	1,87	2,31
Lt2	0,99	1,32	1,53	1,68	1,87	31	30	31	29	25	0,70	1,08	1,36	1,53	1,66
Lt3	1,19	1,35	1,51	1,65		37	36	34	34		0,99	1,10	1,19	1,40	
Lts	1,13	1,33	1,45	1,68	1,86	32	28	23	32	26	0,60	1,02	1,39	1,56	2,02
Lu	1,01	1,33	1,49	1,70	1,84	36	30	30	30	29	0,80	1,05	1,28	1,56	1,67
Uls		1,28	1,48	1,72			26	27	28			1,00	1,23	2,04	
Us				1,80					21					2,35	
Ut2			1,42					25					1,06		
Ut3		1,37	1,49	1,62			27	27	32			1,16	1,21	1,37	
Ut4		1,31	1,47	1,64			29	30	30			1,07	1,24	1,53	
Tt		1,31					47					1,06			
Tl			1,56					32					1,12		
Tu2	1,10	1,34	1,50			29	39	39			0,68	1,05	1,16		
Tu3		1,33	1,50	1,68			34	34	35			1,05	1,31	1,38	
Tu4	1,10	1,39	1,49	1,67		25	29	34	32		0,74	1,08	1,35	1,59	
Ts4			1,58	1,68				29	27				1,57	2,06	

*Auch wenn einzelne Bodenarten teils nur mit geringen Fallzahlen belegt sind, wird hier im Sinne einer vollständigen Darstellung der Messergebnisse eine Auswertung auf der Basis der Bodenarten nach AG BODEN (2005) bereitgestellt.

Boden- arten	C					α					n				
	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5
Ss		1,65	1,68	2,00			0,55	0,73	1,02			1	5	2	
Sl2	2,16	1,66	1,78	1,91		0,22	0,63	0,73	0,88		1	1	11	2	
Sl3	1,87	1,80	1,92	2,12	2,62	0,21	0,61	0,72	0,94	1,06	1	4	6	6	2
Sl4	1,68	2,09	2,14	2,39	2,46	0,24	0,49	0,68	0,80	1,06	2	5	5	15	6
Slu				2,36	2,43				0,49	0,78				1	2
St2		1,74	1,68	1,84	1,95		0,56	0,66	0,90	1,05		2	5	4	2
St3			2,05	2,05	2,64			0,67	0,95	1,05			2	7	3
Su2		1,64	1,84	1,97	1,93		0,67	0,76	1,00	1,26		1	2	7	1
Su3	1,94					0,21					1				
Ls2		2,27	2,38	2,06	2,03		0,52	0,53	0,82	0,78		6	11	11	1
Ls3	2,32	2,36	1,90	2,20	2,15	0,26	0,48	0,62	0,73	1,01	2	3	10	10	5
Ls4	1,54	2,04	2,14	2,28	2,35	0,32	0,43	0,64	0,83	1,00	1	2	10	5	7
Lt2	2,09	2,32	2,55	2,64	2,39	0,34	0,50	0,55	0,60	0,75	4	11	20	15	4
Lt3	2,46	2,47	2,50	2,79		0,41	0,45	0,49	0,55		1	3	9	5	
Lts	1,82	2,12	1,81	2,60	2,30	0,33	0,47	0,77	0,61	0,88	1	2	1	4	1
Lu	2,63	2,39	2,30	2,43	2,46	0,31	0,47	0,59	0,68	0,76	8	12	33	31	4
Uls		2,13	2,11	2,27			0,47	0,60	0,91			2	7	1	
Us				2,24					1,05					1	
Ut2			2,29					0,46					1		
Ut3		2,42	2,40	2,69			0,48	0,51	0,52			1	9	2	
Ut4		2,32	2,29	2,40			0,46	0,56	0,66			6	9	4	
Tt		3,37					0,32					3			
Tl			2,25					0,50					1		
Tu2	2,20	2,83	2,73			0,31	0,38	0,43			1	4	11		
Tu3		2,52	2,57	2,33			0,42	0,52	0,63			6	22	9	
Tu4	2,17	2,38	2,13	2,58		0,34	0,46	0,66	0,62		1	1	5	2	
Ts4			2,46	2,46				0,64	0,86				1	2	

Anhang 1.2: Datengrundlagen und Schätzrahmen auf Basis der Texturklassen nach IUSS WORKING GROUP WRB (2015)

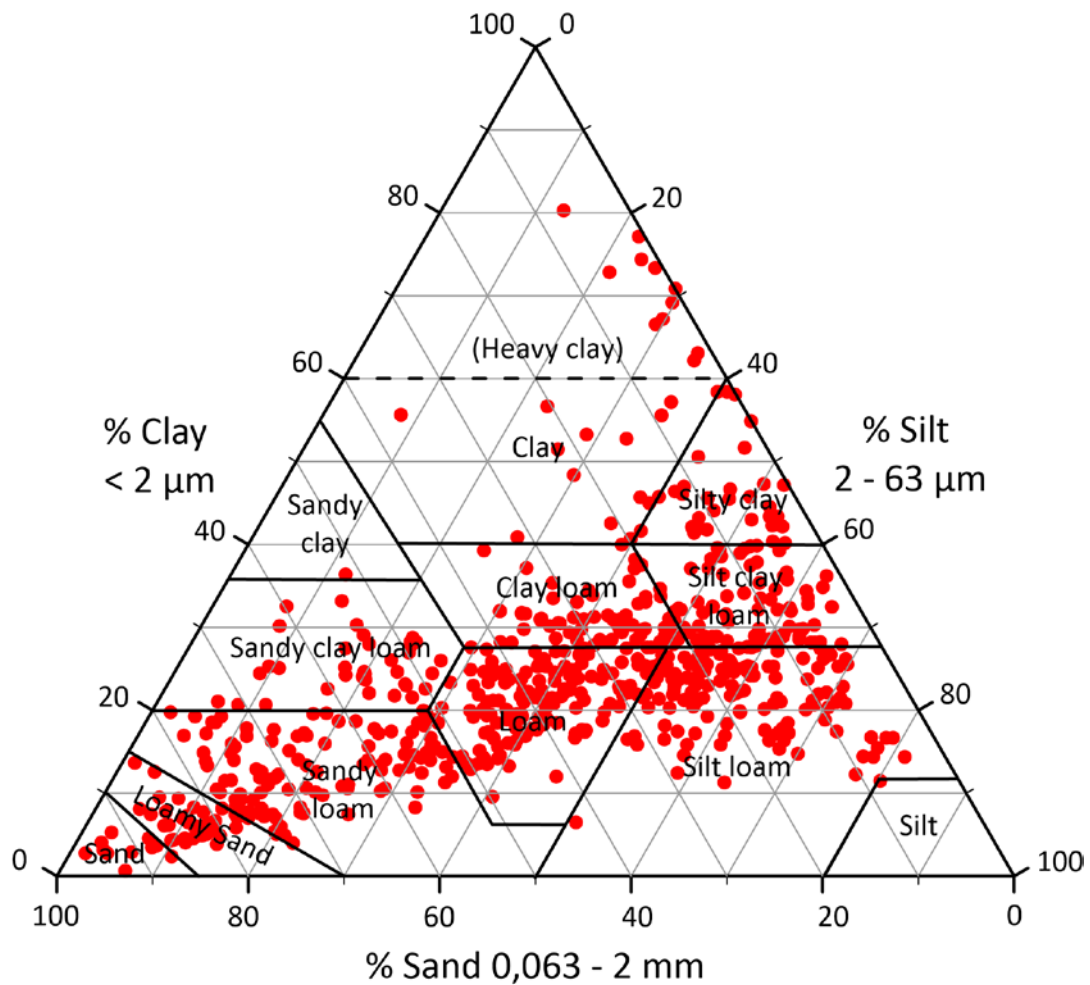


Abb. 9: Darstellung aller Proben im Bodenartendiagramm der IUSS WORKING GROUP WRB (2015), n = 741.

Tab. 9: Seite 35 – Thermische Kennwerte (Mittelwerte) für Texturklassen nach IUSS WORKING GROUP WRB (2015) und TRD-Stufen (Proben mit org. Sub. < 4 Masse-%). →

Textur	Kürzel	TRD-Stufe	TRD	WG	λ	C	α	n
Sand	S							
		pt3	1,51	8	1,15	1,63	0,69	6
		pt4	1,69	13	2,06	2,00	1,02	2
Loamy sand	LS							
		pt2	1,32	14	1,01	1,68	0,60	4
		pt3	1,48	10	1,19	1,65	0,72	8
		pt4	1,68	12	1,87	1,93	0,98	11
		pt5	1,83	12	2,15	1,94	1,12	3
Sandy loam	SL							
		pt1	0,92	21	0,44	1,88	0,24	4
		pt2	1,34	18	1,01	1,94	0,54	10
		pt3	1,50	17	1,37	1,99	0,70	29
		pt4	1,69	19	1,85	2,18	0,87	26
		pt5	1,86	20	2,62	2,54	1,05	10
Sandy clay loam	SCL							
		pt1	1,13	32	0,60	1,82	0,33	1
		pt2	1,35	27	0,96	2,05	0,47	3
		pt3	1,49	26	1,33	2,13	0,64	5
		pt4	1,70	26	1,83	2,42	0,77	11
		pt5	1,87	23	2,29	2,35	0,99	8
Silt loam	SiL							
		pt1	0,96	37	0,76	2,60	0,30	6
		pt2	1,33	28	1,06	2,28	0,48	21
		pt3	1,49	29	1,26	2,24	0,59	56
		pt4	1,69	29	1,59	2,45	0,68	34
		pt5	1,84	29	1,67	2,46	0,76	4
Silt clay loam	SiCL							
		pt1	1,15	32	0,86	2,53	0,35	3
		pt2	1,31	35	1,04	2,68	0,40	7
		pt3	1,50	32	1,31	2,57	0,53	27
		pt4	1,68	33	1,44	2,38	0,65	16
Clay loam	CL							
		pt1	1,03	32	0,76	2,16	0,36	5
		pt2	1,32	33	1,03	2,40	0,45	7
		pt3	1,53	32	1,31	2,51	0,54	13
		pt4	1,68	29	1,56	2,70	0,59	12
		pt5	1,85	25	1,51	2,37	0,72	3
Loam	L							
		pt1	0,80	33	0,50	2,00	0,25	4
		pt2	1,33	27	1,11	2,25	0,53	14
		pt3	1,52	26	1,25	2,30	0,57	30
		pt4	1,70	27	1,60	2,22	0,75	30
		pt5	1,86	24	2,09	2,26	0,94	10
Silt	Si							
		pt3	1,42	25	1,06	2,29	0,46	1
Silty clay	SiC							
		pt1	1,10	29	0,68	2,20	0,31	1
		pt2	1,36	35	1,06	2,71	0,40	5
		pt3	1,50	37	1,21	2,61	0,48	14
		pt4	1,67	35	1,41	2,66	0,55	3
Clay	C							
		pt2	1,30	43	1,10	2,59	0,43	2
		pt3	1,47	36	1,13	2,76	0,42	5
		pt4	1,61	34	1,32	3,46	0,38	1
Heavy clay	HC							
		pt2	1,31	47	1,06	3,37	0,32	3
		pt3	1,48	44	1,14	2,41	0,48	2

Anhang 2: Substrat-bodengenetisch orientierte Auswertung

Tab. 10: Thermische Kennwerte (Mittelwerte) für Substrat-Horizont-Kombinationen.

Ausgangsgesteine der Bodenbildung, Substrate	Bodenarten	Horizontbez.	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α	n
Holozäne organische Bildungen									
Hochmoortorfe		Hv, Hh	45,9	0,11	55	0,44	3,24	0,14	5
Niedermoor- bzw. Übergangsmoortorfe		Hv, H	38,5	0,19	58	0,44	3,06	0,14	51
Anmoor, sandig	Sl2, Sl3	Ap, Aa, Ah, Ghr	7,5	0,90	38	0,87	2,60	0,34	5
Anmoor, lehmig	Ls4, Sl2, Ls2, Lt2	Aa, Ah, Ghr	8,5	0,85	47	0,96	3,01	0,33	19
Anmoor, schluffig-tonig	Tu3, Lt3, Lu, Ut4	Aa, Ah, Ghr	8,4	0,69	47	0,63	2,67	0,24	7
Vulkanische Aschen und magmatische Gesteine									
Laacher See-Tephra	Lt2, Ls3, Sl3, Sl4	Ah	5,4	0,87	18	0,46	1,84	0,25	7
	Lt2, Sl4, Ls4	Bfv	1,2	0,94	30	0,55	1,84	0,30	10
Laacher See-Tephra plus Löss	Ls2, Ls3, Ls4	Bv	0,6	1,45	23	0,95	1,90	0,51	10
Andesit (Rotliegend)	Ls2, Lt2, Tu3	Ah	3,1	1,12	37	0,80	2,13	0,39	4
	Ls2, Sl4, Ls3	Ap	1,7	1,41	28	0,96	2,20	0,46	4
	Ls2, Sl4, Ls4	Bv, M	0,6	1,44	33	1,05	2,20	0,53	3
	Ls2	Cv	0,1	1,53	30	1,04	2,61	0,42	3
Pleistozäne äolische Sedimente									
Flugsand	Sl4, St2	Ap, Ah	1,3	1,50	19	1,39	2,16	0,64	3
Flugsand (Unterboden, sandig)	Ss, Sl2, St2	Cv, Bv, R	0,2	1,53	6	0,98	1,55	0,63	5
Flugsand (Unterboden, lehmig)	Sl4	R, elC	0,3	1,46	19	1,35	2,16	0,63	5
Löss	Lu, Tu3, Tu4	Ap, Axh	1,2	1,41	28	1,19	2,19	0,55	20
Löss (Unterboden, tonig)	Tu3, Tu4	Bt	0,3	1,46	32	1,22	2,42	0,50	6
Löss (Unterboden, schluffig)	Ut2, Ut3, Ut4, Lu, Uls	elC	0,2	1,47	26	1,23	2,25	0,55	18

Ausgangsgesteine der Bodenbildung, Substrate	Bodenarten	Horizontbez.	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α	n
Pleistozäne äolische Sedimente (Fortsetzung)									
Lösslehm (Hauptlage)	Lu, Ut4, Ls2	Ah	3,4	1,05	25	0,71	1,93	0,36	10
	Lu, Ls2	Ap	1,5	1,46	30	1,25	2,82	0,45	3
	Lu, Ut4, Ls2	Bv	0,8	1,42	28	1,11	2,23	0,51	11
Lösslehm (Mittellage)	Lu, Tu2, Tu3, Tu4	Bt, Bvt, Sd	0,2	1,59	33	1,42	2,42	0,61	23
Holozäne und pleistozäne fluviatile Sedimente									
Fluviatile Tone (Pleistozän/Holozän)	Lt3, Tu2, Tu3	M, Sd	1,1	1,40	41	1,21	2,76	0,44	8
Fluviatile Lehme, Schluffe (Holozän)	Ls3, Ls4, Sl4	Ap, Ah	2,6	1,27	39	1,32	2,74	0,48	3
	Ls3, Ls4, Sl4, Lu	aM	0,5	1,65	28	1,66	2,18	0,78	8
Fluviatile Lehme (Pleistozän)	Lt3, Sl4	Ap, Ah	1,3	1,42	26	1,25	2,58	0,50	4
	Ls3, Sl4, Lt2, St3	Go, Gr, M	0,4	1,67	22	1,89	2,25	0,86	8
Fluviatile Sande (Pleistozän)	Su2, Sl2	Bv	0,2	1,65	11	1,73	1,97	0,88	6
Sedimentgesteine, Metamorphite									
Kalkstein, Mergel (Tertiär, Mesozoikum)	Tu3, Tu4, Lu	Ap	1,8	1,44	34	1,21	2,44	0,51	19
	Lt2, Lt3, Tu2, Tu3	R, M	1,2	1,44	31	1,15	2,60	0,46	14
	Tu3, Lt3	P	0,4	1,53	37	1,19	2,60	0,47	9
	Tu2, Tu3	Cv, eCv	0,3	1,53	37	1,16	2,67	0,45	37
Sandstein (Buntsandstein)	Ss, Sl2	Ah, Bh	2,2	1,26	15	0,97	1,76	0,56	6
	Sl2, Sl3, St2	Bv	0,4	1,48	15	1,36	1,88	0,73	10
	St2, St3, Sl3, Sl4, Ls4	lCv, Sd, Sw	0,2	1,78	22	2,08	2,32	0,91	29
Ton-, Silt-, Sandstein (Rotliegend) (Hauptlage)	Ls2, Sl4, Lt2, Lu	Ap	1,63	1,45	31	1,36	2,13	0,64	9
	Lt2, Lts, Lu	Sw, Bv	0,3	1,69	32	1,46	2,23	0,70	3

Ausgangsgesteine der Bodenbildung, Substrate	Bodenarten	Horizontbez.	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α	n
Sedimentgesteine, Metamorphite (Fortsetzung)									
Ton-, Silt-, Sandstein (Rotliegend) (Basislage)	Lt3, Lts, Lu	lCj, lCv	0,2	1,71	33	1,48	1,96	0,81	9
Ton-, Silt-, Sandstein (Rotliegend) (Kolluvium)	Ls2, Sl4, Lu	M	0,3	1,71	26	1,62	2,16	0,77	10
Quarzit, Sandstein (Devon) (Hauptlage)	Lt2	Ah	5,8	1,07	37	0,85	2,56	0,33	5
	Lt2, Ls2, Ls3, Ls4	Bv	1,4	1,30	35	1,30	2,52	0,53	15
Quarzit, Sandstein (Devon) (Basislage)	Ls3, Ls4, Sl4	lCv, lCjv, Sd	0,3	1,81	22	2,55	2,51	1,04	8
Ton- Siltstein (Devon) (Hauptlage)	Lt2, Lu	Ah	4,1	1,07	25	0,84	2,38	0,37	6
	Lt2, Ls2, Lu	Ap	2,1	1,35	25	1,06	2,25	0,50	36
	Lu, Lt2	Bv, Sw	0,4	1,54	21	1,25	2,52	0,56	26
Ton- Siltstein (Devon) (Basislage)	Lu, Lt2	Cjv, Sd	0,2	1,70	27	1,46	2,43	0,64	30
Ton- Siltstein (Devon) (Rigolhorizont)	Lu, Ls2, Ls3, Lt2	R	0,9	1,52	23	1,23	2,33	0,57	21

Abkürzungen Anhang 2:

Horizontbez.	=	Horizontbezeichnung nach AG BODEN (2005)
C _{org}	=	Gehalt an organischem Kohlenstoff (Masse-%), C _{org} * 2 = Gehalt an organischer Substanz (org. Sub.)
TRD	=	Trockenrohdichte (g cm ⁻³)
WG	=	Wassergehalt bei pF 2,5 (Vol.-%)
λ	=	Thermische Leitfähigkeit (W m ⁻¹ K ⁻¹)
C	=	Volumetrische Wärmekapazität (MJ m ⁻³ K ⁻¹)
α	=	Temperaturleitfähigkeit (mm ² sec ⁻¹)
n	=	Anzahl der untersuchten Bodenhorizonte

Abkürzungen Anhang 3:

Horizontogr.	=	Horizontuntergrenze (cm)
Horizontbez.	=	Horizontbezeichnung nach AG BODEN (2005)
Bodenart	=	Kürzel nach AG BODEN (2005)
T	=	Ton (Gew.-%)
U	=	Schluff (Gew.-%)
S	=	Sand (Gew.-%)

Anhang 3: Messdaten typischer Bodenprofile

Organische Substrate (Holozän)

Hochmoor aus Hochmoortorf (Holozän) über tiefem kiesführendem Sand (Pleistozän) aus Sandstein (Buntsandstein)

Das Hochmoor aus dem Truffvenn in der Eifel ist auf einem durch hohe Grundwasserstände beeinflussten Horizont aus verwittertem Buntsandstein entstanden. Bemerkenswert ist die äußerst dichte Lagerung der liegenden Sande verbunden mit einer extremen Änderung der thermischen Eigenschaften.



Horizont- ugr.	Hori- zont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
7	Hv1					45,6	0,16	59	0,47	3,29	0,14
20	Hv2					45,3	0,10	47	0,39	2,89	0,13
40	hH1					44,2	0,07	39	0,32	2,52	0,13
80	hH2					50,2	0,11	63	0,53	3,80	0,14
90	hH3					44,7	0,12	67	0,52	3,73	0,14
115	II uH					44,6	0,19	70	0,55	3,51	0,16
130	III Ghr	Ss	4	9	88	3,90	1,25	36	1,61	2,12	0,77
140	III Gr	Su2	2	11	87	0,25	1,73	19	2,38	1,85	1,35

Organische Substrate (Holozän)

Niedermoor aus flachem Sand (Sand-deckkultur/Holozän) über Nieder-moortorf (Holozän) über sehr tiefem Fluvialsand (Pleistozän-Holozän)

Das Bodenprofil stammt aus dem Landstuhler Bruch am Nordrand des Pfälzer Waldes. Im Zuge der Grünlandnutzung wurde Sand in den Torf eingepflügt. Dies führte zu einer Verdichtung der Mooroberfläche und somit zu einer Veränderung des Wasserhaushaltes und der thermischen Eigenschaften.



Hori-zont-ugr.	Hori-zont-bez.	Boden-art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
25	Ap	Sl3	8	17	75	5,53	1,05	43	1,40	2,77	0,51
40	uHw					34,8	0,17	58	0,46	3,10	0,15
50	uHr1					45,6			0,48	3,29	0,15
65	uHr2					44,3			0,44	3,12	0,14
90	uHr3					45,1	0,13	60	0,42	2,92	0,15
130	uHr4					46,5	0,10	51	0,37	2,76	0,13

Laacher See-Tephra (Jungpleistozän)

Lockerbraunerde aus bimsasche-reichem Lehm (Hauptlage) über tiefem grusführendem Schluff (Basislage) aus Tonschiefer (Devon)

Lockerbraunerden sind in Rheinland-Pfalz ausschließlich unter Wald anzutreffen. Sie zeichnen sich u.a. durch sehr niedrige Trockenrohdichten unter 1 g cm^{-3} aus, was die Ursache für die äußerst geringen thermischen Leitfähigkeiten ist.



Hori-zont-ugr.	Hori-zont-bez.	Boden-art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
7	Ah	Lt2	30	34	36	8,27	0,52	26	0,32	1,68	0,19
15	Bhfv	Lt2	32	33	35	4,31	0,70	32	0,44	2,10	0,21
40	Bfv	Lt2	27	37	37	2,46	0,88	33	0,62	2,51	0,25
80	Bfv	Ls2	18	41	41	2,15	0,73	36	0,47	2,06	0,23
110	II ICjv	Lu									

Laacher See-Tephra plus Löss (Jungpleistozän)

Braunerde aus flachem lösslehmarmem, bimsaschereichem Lehm (Hauptlage) über dunklem Aschentuff (Pleistozän) über tiefem lösslehmarmem, bimsascheführendem Lehm (Mittellage)

Die Oberböden der jüngsten periglaziären Lagen (Hauptlagen) in weiten Teilen des rheinischen Schiefergebirges bestehen aus Mischungen aus Laacher See-Tephra und Löss. Die Lösskomponente führt hier zu etwas höheren Lagerungsdichten und somit zu einer Erhöhung der thermischen Leitfähigkeiten.



Horizont- ogr.	Hori- zont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
4	Ah										
9	Bhv	Sl4	17	31	53	2,21	1,25	26	0,82	1,77	0,46
25	Bv	Ls3	18	31	51	0,84	1,44	24	0,91	1,72	0,53
45	II Bv1	Ls4	21	26	52	0,62	1,39	24	0,86	1,90	0,46
65	II Bv2	Ls4	19	22	60	0,45	1,47	22	0,86	1,83	0,47
80	II Sw-Bv	Ls3	23	35	42	0,53	1,54	28	1,10	1,54	0,72
85	III Sw	Ls2	21	41	38	0,36	1,67	26	1,33	2,10	0,63

Andesit (Rotliegend)

Regosol-Braunerde aus lösslehm-armem Gruslehm (Hauptlage) über Sandgrus bis Grus (Basislage) aus basaltischem Andesit (Rotliegend)

Böden aus Andesit verfügen trotz mittlerer Lagerungsdichten über geringe thermische Leitfähigkeiten um $1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Die Ursache hierfür dürften die niedrigen Quarzgehalte im Ausgangstein der Bodenbildung sein.



Hori-zont-ugr.	Hori-zont-bez.	Boden-art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
40	Ap	Ls3	17	37	46	2,10	1,42	23	0,92	2,33	0,41
90	II Bv-lCv	Slu	13	41	46	0,13	1,61	23	1,09	2,36	0,49
130	II lCv	Ls2	23	42	34	0,09	1,57	24	1,09	2,41	0,47

Flugsand (Pleistozän)

Rigosol-Braunerde aus carbonat-führendem Flugsand mit Rheinweiß-Horizont (Quartär)



Hori- zont- ugr.	Hori- zont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
20	Ap	St2	8	8	85	1,62	1,34	17	1,01	1,79	0,56
40	R	St2	7	6	87	0,46	1,53	10	1,15	1,64	0,70
65	II Bv	St2	8	5	87	0,19	1,52	5	0,90	1,47	0,61
95	II ICv	St2	5	3	92	0,12	1,52	3	0,67	1,40	0,48
105	II rGo- lCmkc	Sl4	16	14	70	0,38	1,30	24	0,97	1,89	0,52

Löss (Pleistozän)

Tschernosem aus Löss (Pleistozän)

Am Beispiel des Bodenprofils eines Tschernosems wird deutlich, dass Lössböden bezüglich der thermischen Parameter nur geringe Differenzierungen zwischen Unter- und Oberboden aufweisen.



Horizont- ugr.	Hori- zont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
30	Ap	Lu	29	63	8	1,58	1,48	31	1,24	2,30	0,55
50	Axh	Tu4	28	65	7	0,74	1,39	29	1,08	2,38	0,46
60	Axh + elCkc	Tu4	26	67	7	0,53	1,41	29	1,13	2,46	0,46
155	elCkc	Ut4	20	71	9	0,23	1,61	26	1,29	2,22	0,59

Lösslehm (Pleistozän)

Pseudogley-Braunerde aus Lösslehm
(Hauptlage über Mittellage)



Hori- zont- ugr.	Hori- zont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
30	Ap	Lu	22	61	17	1,16	1,62	31	1,68	3,08	0,55
70	II Sw-Bv	Tu3	32	59	9	0,22	1,63	35	1,59	2,73	0,58
145	II Swd-Bv	Lu	29	61	10	0,12	1,77	31	1,71	1,93	0,90

Fluviatile Lehme (Holozän/Pleistozän)

Vega aus Auenlehm bis -ton (Holozän) über tiefem Auenlehm (Holozän) über sehr tiefem Fluvialsand (Quartär)



Horizont- ugr.	Hori- zont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
30	rAp	Lt2	32	49	19	1,88	1,53	35	1,41	2,86	0,49
55	aM1	Lt3	37	50	13	0,81	1,64	32	1,36	2,96	0,46
95	aM2	Tu2	46	40	14	0,84	1,55	36	1,22	2,69	0,46
180	II (Go)-aM	Lt2	30	44	26	0,46	1,64	31	1,52	2,69	0,57
210	III Go	mSfs									

Fluviatile Tone (Holozän/Pleistozän)

**Pseudogley-(Relikt-)Gley-Pelosol
aus Fluvialton (Pleistozän-Holozän)
über sehr tiefem Fluviallehm und
-sand (Pleistozän-Holozän)**



Hori- zont- ugr.	Hori- zont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
13	Sw-Ah	Tl	48	30	22	4,65	0,92	49	0,91	2,93	0,31
45	Sd-P	Tu2	58	40	2	0,98	1,31	48	1,05	2,87	0,37
115	(r)Go-P	Tu3	33	62	5	0,55	1,50	41	1,45	2,80	0,52
140	II (r)Gr1	Ls2	22	44	34	0,18	1,77	32	2,03	2,51	0,81
150	II (r)Gr2	Sl3	12	35	53	0,15	1,74	29	2,11	2,40	0,89

Tonmergel (Tertiär)

Rigosol-Pelosol aus lössarmem, grusführendem Tonmergel über sehr tiefem Carbonatschutt (Tertiär) aus Tonmergel (Tertiär)

Die rot markierten Wassergehalte bei pF 2,5 übersteigen eigentlich das Gesamtporenvolumen. Es ist daher davon auszugehen, dass die Proben zum Zeitpunkt der Messung wassergesättigt waren. Die Werte werden hier trotzdem mitgeteilt, um zu verdeutlichen, dass reine Tone auch bei dichter Lagerung nur sehr geringe thermische Leitfähigkeiten haben.



Horizont- ugr.	Horizont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
37	R	Tl	53	29	18	2,74	1,25	39	0,79	2,50	0,32
90	P	Tt	67	30	3	0,42	1,41	56	0,98	2,70	0,36
145	II elC	Tu2	63	36	2	0,25	1,60	48	1,08	2,74	0,40
164	III elC1	Tt	69	30	1	0,14	1,71	48	1,22	2,69	0,45
210	III elC3	Tt	73	26	1	0,16	1,49	55	0,95	3,73	0,26

Sandstein (Buntsandstein)

Podsol-Braunerde aus grusführendem Sand (Haupt- über Basislage) über weiß gebleichtem Sandstein (Buntsandstein)



Hori- zont- ugr.	Hori- zont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
5	Ahe	Ss	3	8	88	4,92	1,01	17	0,56	1,78	0,31
15	Bh	Ss	4	10	86	1,71	1,31	11	0,92	1,65	0,55
25	Bhv	Su2	4	10	86	1,4	1,28	13	1,09	1,64	0,67
40	II ICv	Ss	4	7	88	0,5	1,51	8	1,24	1,73	0,72
60	III mCv1	St2	6	9	85	0,06	1,78	11	1,73	1,90	0,91
90	III mCv2	St2	9	6	85	0,04	1,84	13	2,05	1,90	1,09
160	III mCv3	St2	9	8	83	0,04	1,82	11	2,00	2,01	1,00

Sandstein (Buntsandstein)

Podsoliger Pseudogley aus flachem Sand (Hauptlage) über Lehm (Basislage) aus Sandstein (Buntsandstein)

Der Stauwasserboden ist als Extrembeispiel für die dichte Lagerung von Basislagen aus Buntsandstein aufgeführt, in denen thermische Leitfähigkeiten bis max. $2,9 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ auftreten.



Horizont- ugr.	Horizont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
3	Ahe										
20	Sew	Sl3	10	29	61	0,75	1,72	18	2,21	2,02	1,10
28	Sw	Ls4	19	20	61	0,36	1,81	24	2,53	2,48	1,04
38	II Swd	Ts4	25	10	65	0,22	1,72	28	2,29	2,71	0,86
70	II Sd	St3	24	9	67	0,07	1,88	23	2,73	2,67	1,03
90	II lCv	St3	21	12	68	0,04	1,94	20	2,92	2,86	1,06
125	III fBv	Ls3	21	39	39	0,09	1,86	26	2,14	2,22	0,97
150	IV lCv	Sl4	15	11	74	0,03	1,85	17	2,51	2,29	1,11

Quarzit, Sandstein (Devon)

Braunerde aus bimsaschearmem, lösslehm- und grusführendem Lehm (Hauptlage) über Gruslehm (Basislage) aus quarzitischem Sandstein (Unterdevon)

Typisch für Bodenprofile aus den Mittelgebirgen ist ein mehrschichtiger Aufbau, wobei locker gelagerte Hauptlagen mit Anteilen an Löss und/oder Laacher See-Tephra sehr dicht gelagerten Basislagen aus devonischen Quarziten und/oder Sandsteinen aufliegen. Daraus ergibt sich ein abrupter Wechsel der thermischen Eigenschaften an der Grenze Haupt- zu Basislage.



Horizont- ogr.	Horizont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
6	Oh+Ah	Ls2	22	50	29	16,0	0,66	38	0,50	1,91	0,26
25	Ah-Bv	Lt2	25	48	26	3,7	0,77	31	0,56	1,95	0,28
45	Bv	Lu	25	51	24	1,84	0,90	25	0,64	2,14	0,30
55	(Sw)-Bv	Uls	14	58	27	0,76	1,22	30	0,94	2,17	0,43
65	II (Sd)-Bv	Us	6	51	43	0,22	1,80	21	2,35	2,24	1,05
100	II Bv-ICv	Slu	9	41	50	0,1	1,82	22	2,12	2,44	0,87

Ton-/Siltstein (Devon)

Braunerde aus bimsasche-, lösslehm- und grusführendem Lehm (Hauptlage) über tiefem Gruslehm (mehrgliedrige Basislage) aus Schiefer (Devon)

Das Profil zeigt eine typische Bodenbildung der Hunsrückhochfläche unter landwirtschaftlicher Nutzung.



Horizont- ugr.	Horizont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
35	Ap	Ls2	21	48	32	1,22	1,58	24	1,27	2,30	0,55
45	Bv1	Lu	17	56	27	0,29	1,72	22	1,45	1,78	0,81
80	Bv2	Lu	22	51	28	0,17	1,73	21	1,37	1,70	0,94
105	II Bv-ICjv	Lt2	34	38	27	0,1	1,84	23	1,18	2,36	0,75
120	II ICjv	Lu	29	59	13	0,05	1,88	29	1,54	2,99	0,63
160	II ICv	Lt2	25	47	28	0,1	1,85	25	1,25	2,84	0,45

Ton-/Siltstein (Devon)

Pseudogley aus lösslehmreichem, grusführendem Lehm (Hauptlage) über grusführendem Schluff (Basislage aus Saprolith) aus Tonschiefer (Devon)

Teile des rheinischen Schiefergebirges werden von mesozoisch/tertiären Verwitterungsdecken bedeckt. Hier führte die intensive chemische Verwitterung des Tonschiefers zu einer Auflösung des ursprünglichen Gesteinsverbandes mit der Bildung von mächtigen Lockermaterialdecken. Die oberflächennahen Teile des Saproliths wurden während der quartären Kaltzeiten in der Basislage solifluidal/solimixtiv aufgearbeitet und verdichtet, was zur Bildung von staunassen Böden (Pseudogleyen) führte.



Hori- zont- ugr.	Hori- zont- bez.	Boden- art	T	U	S	C _{org}	TRD	WG	λ	C	α
25	Ap	Lt2	32	49	20	2,42	1,39	35	1,14	2,54	0,45
45	S(e)w	Tu3	32	52	15	0,4	1,55	36	1,41	2,69	0,54
70	II Swd	Lu	28	60	11	0,19	1,64	35	1,63	2,60	0,63
105	II Cj-Sd	Lu	25	62	13	0,08	1,81	33	1,79	2,85	0,65
120	III Cvj	Lu									

Danksagung

Die umfangreichen Untersuchungen zu den thermischen Eigenschaften von Böden waren nur durch die Zusammenarbeit und die Hilfe der folgenden Kolleginnen und Kollegen möglich. Bei allen möchte ich mich hiermit herzlich bedanken:

- Dr. Ulrich Steinrücken, Timo Aßmann (Fa. Soilution, Heusweiler), Dr. Stephan Sauer (ehem. LGB, jetzt LfU), Britta vom Lehn (ehem. LGB) – für die bodenkundlichen Profilaufnahmen im Gelände,
- Matthias Hauenstein (stellvertretend für die Kolleginnen und Kollegen des bodenchemischen Labors am LGB) – für die bodenchemischen Untersuchungen,
- Gunther Habich (ehem. LGB) und Marion Mays (ehem. LGB) – für die Probennahme im Gelände und die Messungen im Bodenphysiklabor des LGB.

Bildnachweise

Titel		Archiv LGB
Seite 05		Archiv LGB
Seite 15		Archiv LGB
Seite 39	MUR 014	LGB (U. Dehner)
Seite 40	HOM 019	LGB (S. Sauer)
Seite 41	EMS 037	LGB (U. Dehner)
Seite 42	BOP 046	LGB (U. Dehner)
Seite 43	BIO 121	LGB (S. Sauer)
Seite 44	ING 081	LGB (S. Sauer)
Seite 45	WOR 033	LGB (S. Sauer)
Seite 46	KIR 028	LGB (S. Sauer)
Seite 47	BKR 088	LGB (S. Sauer)
Seite 48	GLM 016	LGB (S. Sauer)
Seite 49	GRO 052	Fa. Soilution (T. Aßmann)
Seite 50	LAS 029	LGB (U. Dehner)
Seite 51	LAS 031	LGB (U. Dehner)
Seite 52	MOR 177	Fa. Soilution (U. Steinrücken)
Seite 53	DOM 014	LGB (U. Dehner)
Seite 54	KIS 194	LGB (S. Sauer)



RheinlandPfalz

LANDESAMT FÜR GEOLOGIE
UND BERGBAU

Emy-Roeder-Straße 5
55129 Mainz

office@lgb-rlp.de
www.lgb-rlp.de

ISSN 2509-4785