



Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern

**05
2010**



Schriftenreihe

ISSN 1611-4159

Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz
Lange Point 12, 85354 Freising-Weihenstephan
E-Mail: Agraroeekologie@LfL.bayern.de, Telefon: 08161/71-3640

Aktualisierte u.
überarbeitete

2. Auflage: April 2010

Druck: Direkt Marketing & Digitaldruck, 85399 Hallbergmoos

Schutzgebühr: 10,00 Euro

© LfL



Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern

Peter Capriel

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	7
1 Einleitung	8
2 Ziel	10
3 Material und Methoden	10
3.1 Auswahl der konventionellen und ökologischen Betriebe	10
3.2 Bodenprobenahme	10
3.3 Humusparameter, Methoden	11
4 Ergebnisse, Diskussion	11
4.1 Einfluss der Standortfaktoren	14
4.1.1 Einfluss der Bodenart	16
4.1.1.1 Organischer Kohlenstoff	17
4.1.1.2 Gesamtstickstoff	20
4.1.1.3 Humusqualität	22
4.1.2 Einfluss des Klimas	24
4.2 Einfluss der Viehhaltung	29
5 Standorttypische Humuskennwerte für Ackerland in Bayern	32
6 Hinweise für die Praxis	33
6.1 Bodenprobenahme	33
6.2 Humusparameter, Humusuntersuchung	33
6.3 Bestimmung der Bodentextur	34
6.4 Bewertung der Humuskennwerte	34
6.5 Erhaltung der standorttypischen Humuskennwerte	34
7 Literaturverzeichnis	36
8 Anhang	37

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Beziehung Humus, Standortfaktoren, Bewirtschaftung, Bodeneigenschaften	9
Abb. 2: Bodenprobenahme für die Humusuntersuchung	10
Abb. 3: Verteilung der C_{org} -Gehalte	12
Abb. 4: Verteilung der N_t -Gehalte	13
Abb. 5: Verteilung der Humusqualität (C_{org} / N_t)	13
Abb. 6: Verteilung der Carbonat-Kohlenstoffgehalte	14
Abb. 7: Anteil der carbonathaltigen Böden in den Bodenartgruppen	14
Abb. 8: Verteilung der Bodenarten der untersuchten Ackerböden	17
Abb. 9: C_{org} -Mediane (%) der konventionellen und ökologischen Teilflächen	18
Abb. 10: Spannweiten der C_{org} -Gehalte	19
Abb. 11: N_t -Mediane (%) der konventionellen und ökologischen Teilflächen	21
Abb. 12: Spannweiten der N_t -Gehalte	21
Abb. 13: C_{org} / N_t -Mediane der konventionellen und ökologischen Teilflächen	23
Abb. 14: Spannweiten der C_{org} / N_t -Verhältnisse	23
Abb. 15: Verteilung der Höhenlage der Teilflächen	25
Abb. 16: Spannweiten der C_{org} -Gehalte in Bezug zu Höhe und Bodenart	26
Abb. 17: Spannweiten der N_t -Gehalte in Bezug zu Höhe und Bodenart	27
Abb. 18: Spannweiten der C_{org} / N_t -Werte in Bezug zu Höhe und Bodenart	27
Abb. 19: C_{org} -Mediane (%) in Bezug zu Höhe und Bodenart	28
Abb. 20: N_t -Mediane (%) in Bezug zu Höhe und Bodenart	28
Abb. 21: C_{org} / N_t -Mediane in Bezug zu Höhe und Bodenart	28
Abb. 22: Spannweiten der C_{org} -Gehalte in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart	29
Abb. 23: Spannweiten der N_t -Gehalte in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart	29
Abb. 24: Spannweiten der C_{org} / N_t -Werte in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart	30
Abb. 25: C_{org} -Mediane (%) in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart	30
Abb. 26: N_t -Mediane (%) in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart	31
Abb. 27: C_{org} / N_t -Mediane in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart	31

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Statistische Parameter der untersuchten Variablen	12
Tab. 2: Statistische Parameter der Standortfaktoren.....	15
Tab. 3: Pearson Korrelationskoeffizienten (n = 1867)	15
Tab. 4: Spearman Korrelationskoeffizienten (n = 1867)	15
Tab. 5: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße	16
Tab. 6: Standardisierte Schätzer	16
Tab. 7: Bodenarteinteilung nach Ton- und Schluffgehalt.....	16
Tab. 8: Statistische Parameter für C_{org} (%) der konventionellen Teilflächen.....	18
Tab. 9: Statistische Parameter für C_{org} (%) der ökologischen Teilflächen	18
Tab. 10: Statistische Parameter für C_{org} (konventionell + ökologisch)	19
Tab. 11: Statistische Parameter für N_t (%) der konventionellen Teilflächen	20
Tab. 12: Statistische Parameter für N_t (%) der ökologischen Teilflächen.....	20
Tab. 13: Statistische Parameter für N_t (konventionell + ökologisch).....	22
Tab. 14: Statistische Parameter C_{org}/N_t der konventionellen Teilflächen.....	22
Tab. 15: Statistische Parameter C_{org}/N_t der ökologischen Teilflächen.....	22
Tab. 16: Statistische Parameter für C_{org}/N_t (konventionell + ökologisch).....	24
Tab. 17: Statistische Parameter für C_{org} (konventionell + ökologisch)	25
Tab. 18: Statistische Parameter für N_t (konventionell + ökologisch).....	26
Tab. 19: Statistische Parameter für C_{org}/N_t (konventionell + ökologisch).....	26
Tab. 20: Standorttypische Humusgehalte (C_{org} , N_t) und Humusqualität (C_{org}/N_t)	32

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist eine Aktualisierung und Überarbeitung des 2006 publizierten Berichtes (Capriel, 2006). Im Vergleich zur ersten Auflage (2006) wurde nicht nur die Bodenart, sondern auch das Klima als Kriterium für die Ermittlung der standorttypischen Humusgehalte berücksichtigt. Zudem wurde die Datenbasis um 65 Standorte erweitert. In 2001 hat das Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft in Zusammenarbeit mit den Sachgebieten Agrarökologie und Boden an den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten damit begonnen, eine Humusdatenbank für Bayern zu erstellen. Zurzeit enthält sie Daten (Humuskennwerte, Textur, Bewirtschaftung, Klima) von 375 konventionell und 79 ökologisch bewirtschafteten Ackerschlägen, die für Bayern repräsentativ sind. Basierend auf diesen Daten wurden standorttypische Spannweiten für Humusgehalte (organischer Kohlenstoff, Gesamtstickstoff) und Humusqualität (Verhältnis organischer Kohlenstoff: Gesamtstickstoff) von Ackerböden in Bayern in Abhängigkeit von Bodenart und Klima bestimmt. Damit steht für Landwirte und Berater ein Instrument zur Verfügung, mit dem man die Bewertung von Humuskennwerten vornehmen und schließlich die Humusversorgung von Ackerböden optimieren kann. Das bedeutet zudem, dass die praktische Umsetzung des §17 des Bundes-Bodenschutzgesetzes (1998) in Bayern hinsichtlich Humus jetzt möglich ist.

Summary

The present study is an updating and revision of the 2006 published report (Capriel, 2006). Compared to the first edition (2006) not only soil texture but also climate has been used as criterion in order to define site-typical ranges for humus content. Moreover, the database has been extended by 65 locations. In 2001 the Institute for Agricultural Ecology, Organic Farming and Soil Protection at the Bavarian State Research Centre for Agriculture in cooperation with the Sections for Agricultural Ecology and Soil at the Offices for Nutrition, Agriculture and Forestry has started developing a humus database. Currently, it contains data concerning humus, soil texture, agricultural management and climate of 375 conventional and 79 organic managed fields which are representative for Bavaria. These data have been used to determine site-typical ranges for humus content (organic carbon, total nitrogen) and humus quality (ratio organic carbon: total nitrogen) of arable land in Bavaria in dependence on clay and silt content and climate. Therewith farmers and agricultural advisers can now evaluate humus data and optimize the humus content and humus quality of arable fields. Moreover, the §17 of the German Federal Soil Protection Act (1998) concerning humus can now be put into practice in Bavaria.

1 Einleitung

Die Bedeutung des Humus (Organische Bodensubstanz) liegt in der komplexen Beeinflussung nahezu aller Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen (Abb. 1).

Der Humus hat u. a. folgende Funktionen:

Speichern von Nährstoffen: Der Humus stellt eine langsam fließende Nährstoffquelle für die Pflanzen dar. Durch mikrobiellen Abbau der Humusbestandteile werden organisch gebundene Elemente (Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Phosphor, Schwefel) in pflanzenaufnehmbare Verbindungen umgewandelt. Der Humus ist auch die Nahrungsquelle für Bodenmikroorganismen und Bodentiere. Zahlreiche experimentelle Ergebnisse belegen, dass zwischen dem Humusgehalt eines Bodens und der Menge an mikrobieller Biomasse eine enge Beziehung besteht.

Beeinflussen der Bodenstruktur: Der Humus wirkt Gefüge schaffend und Gefüge stabilisierend und beeinflusst damit wesentlich den Luft- und Wasserhaushalt. Dadurch werden die Wasser- und Nährstoffzufuhr zur Pflanzenwurzel, die Wurzelentwicklung, die Durchlüftung und somit die mikrobielle Aktivität, die Wasserspeicherfähigkeit, die Wasserversickerung, die Wasserstabilität der Bodenaggregate des Bodens beeinflusst. Zudem wird die mechanische Belastbarkeit des Bodens erhöht und die Bodenbearbeitung erleichtert. Gefährdungen durch Bodenschadverdichtung und Erosion können durch optimale Humusgehalte vermindert werden.

Filtern und Puffern: Der Humus bindet austauschbar die für die Pflanzenernährung wichtigen Kationen (Magnesium, Calcium, Kalium etc.) und Anionen (Phosphat, Sulfat, Nitrat) und schützt sie so vor Auswaschung, ein Vorgang, der insbesondere bei sandigen Böden von Bedeutung ist. Die Proteine, ein bedeutsamer Bestandteil des Humus, wirken als Puffer und verhindern größere Schwankungen des pH-Wertes, eine wichtige Voraussetzung für die biochemischen Prozesse im Boden. Schließlich vermindert der Humus durch eine Vielzahl von Adsorptionsmechanismen die Auswaschung und Abbaurate von Pflanzenschutzmitteln und Umweltchemikalien und schützt damit die Umwelt.

Wasser speichern: Der Humus speichert Wasser, eine Eigenschaft, die im Hinblick auf die prognostizierte Verringerung der Niederschläge im Sommer (Vegetationszeit) von Bedeutung ist.

Kohlenstoffsенke: Der Humus stellt eine bedeutende Kohlenstoffsенke dar. Global betrachtet speichert der Humus etwa 1600 Gt Kohlenstoff. Das ist etwa zwei- bis dreimal soviel Kohlenstoff als in der Luft (760 Gt) bzw. in der Vegetation (600 Gt) (Batjes, 1996; Schlesinger, 1997). Eine winzige Abnahme dieses Kohlenstoffreservoirs in Europa um 0,1 % würde der Kohlenstoff-Emission von zusätzlich 100 Millionen Pkws entsprechen. Der Humus spielt daher eine wichtige Rolle für den Klimawandel.

Aufgrund dieser vielfältigen Wirkungen stellt eine geordnete, standortangepasste Humuswirtschaft in landwirtschaftlichen Betrieben eine wesentliche Grundlage zur nachhaltigen Bodenfruchtbarkeit und Ertragssicherung dar.

Der Humusgehalt und die Humusqualität von Ackerböden hängen von Standortfaktoren (Temperatur, Niederschlag, Korngrößenverteilung, Grundwasser, chemische Zusammensetzung und Struktur des anorganischen Bodenanteils, der in Abb. 1 als anorganische Matrix bezeichnet wird) und von der Bodenbewirtschaftung (Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung) ab. Ein bestimmter Boden kann also nur eine bestimmte, für den Standort typische Humusmenge speichern.

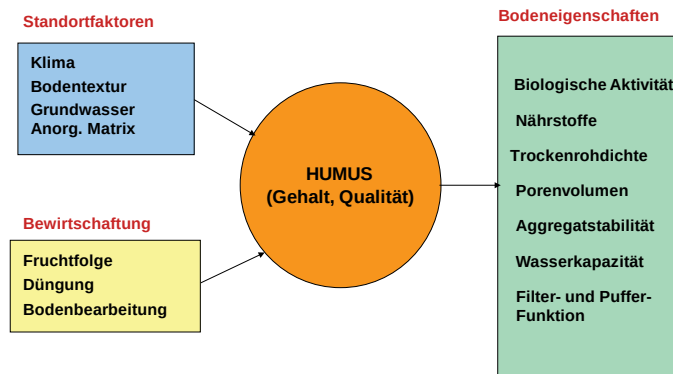


Abb. 1: Beziehung Humus, Standortfaktoren, Bewirtschaftung und Bodeneigenschaften

Der Verlust an Humus wird neben Erosion und Kontamination als derzeit besonders dringlich zu behandelnde Ursache für die Verschlechterung von Böden betrachtet (Mitteilung EU Kommission, "Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie", 16.04.2002).

Der §17 des BBodSchG (12.07.1999) fordert die Erhaltung der standorttypischen Humusgehalte in Deutschland. Die praktische Umsetzung ist aber in den meisten Bundesländern wegen fehlender Referenzwerte insbesondere für ackerbaulich genutzte Böden bisher nicht möglich (Prechtel et al., 2009), u.a. auch weil in der Vergangenheit die Bestimmung der Humuskennwerte nicht zur Standardbodenuntersuchung gehörte.

Zur Umsetzung des §17 des BBodSchG hat im Jahr 2001 das Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz (IAB) der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft in Zusammenarbeit mit den Sachgebieten Agrarökologie und Boden bei den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten mit dem Aufbau einer Humusdatenbank begonnen. Zurzeit enthält sie Daten von 375 konventionell und 79 ökologisch bewirtschafteten Ackerschlägen, die für Bayern repräsentativ sind. Darunter sind auch 100 Dauerbodenbeobachtungsflächen (BDF) mit Ackernutzung des IAB. Die vorliegende Arbeit ist eine Aktualisierung und Überarbeitung des 2006 publizierten Berichtes (Capriel, 2006).

2 Ziel

Das Ziel dieses Projektes ist es, standorttypische Spannweiten für Humusgehalt und Humusqualität von Ackerböden in Bayern in Abhängigkeit von Bodenart und Klima zu bestimmen. Zudem soll auch der Einfluss der Viehhaltung auf die Humuskennwerte erfasst werden.

Ferner soll geklärt werden, ob für konventionell und ökologisch bewirtschaftete Flächen gesonderte Spannweiten für die Humuskennwerte erforderlich sind.

3 Material und Methoden

3.1 Auswahl der konventionellen und ökologischen Betriebe

Die konventionell und ökologisch bewirtschafteten Ackerschläge wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- langjährige Bewirtschaftung nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis, keine „Extreme“ hinsichtlich Fruchtfolge, organische Düngung, Viehbesatz etc. (soweit rückwirkend festzustellen war)
- langjährige (> 10 Jahre) ökologische Bewirtschaftung
- viehhaltende und viehlose Betriebe
- keine Erosionsflächen
- Grundbodenbearbeitung mit Pflug
- breites Spektrum an Bodenarten

Die Auswahl der Betriebe wurde von den Sachgebieten Agrarökologie und Boden bei den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten getroffen.

3.2 Bodenprobenahme

Die Probenahme erfolgte im Frühjahr (Februar - April) vor der Ausbringung der Gülle und des mineralischen Stickstoff-Düngers oder frühestens zwei Wochen danach. Details sind dem folgenden Schema zu entnehmen (Abb. 2).

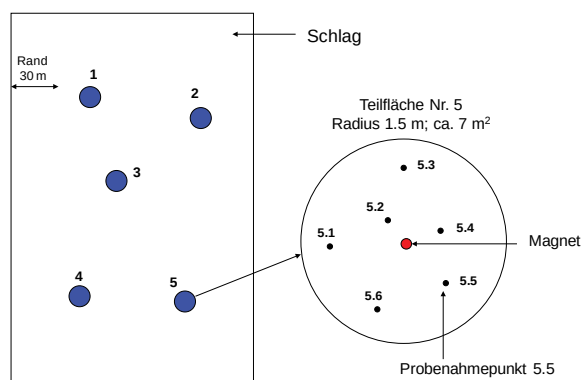


Abb. 2: Bodenprobenahme für die Humusuntersuchung

Pro Ackerfläche wurden fünf kleine kreisförmige, gleichmäßig auf dem Schlag verteilte Teilflächen (ca. 7 m²) beprobt. Um diese Teilflächen auch nach Jahren leicht wiederzufinden, wurden ihre GPS-Koordinaten gemessen. Um die Genauigkeit der Wiederfindung zu erhöhen, wurde zusätzlich in der Mitte von jeder Teilfläche ein Magnet in 50 cm Tiefe vergraben, dessen Position mit Hilfe eines Magnetsuchgerätes jederzeit exakt festgestellt werden kann. Aus jeder Teilfläche wurden mit dem Nmin-Bohrer (D = 35 mm) an sechs zufällig verteilten Punkten jeweils ca. 200 g Boden (1 Einstich) aus einer Tiefe von 0 – 15 cm entnommen. Pro Teilfläche wurden also sechs Einzelproben gezogen.

Von jeder Acker-BDF (ca. 30 x 30 m) wurden jeweils 4 repräsentative Mischproben (Tiefe 0 - 15 cm; je ca. 50 Einstiche) gezogen (Capriel und Seiffert, 2009).

Die Probenahme wurde von den Sachgebieten Agrarökologie und Boden bei den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten durchgeführt.

3.3 Humusparameter, Methoden

Folgende Humus-Kennwerte wurden bestimmt: organischer Kohlenstoff (C_{org}), Gesamtstickstoff (N_t), C_{org}/N_t -Verhältnis. C_{org} und N_t charakterisieren den Humusgehalt, das C_{org}/N_t -Verhältnis die Humusqualität eines Bodens. Die Bestimmung von Gesamtkohlenstoff (C_t) und N_t erfolgte simultan und quantitativ mittels Elementaranalyse (vario EL; DIN ISO 10694). Bei carbonathaltigen Böden wurde der Carbonat-Kohlenstoff ($C_{carbonat}$) nach Scheibler bestimmt (VDLUFA-Methodenbuch, Band I, 1991). Der organische Kohlenstoff wurde nach der Gleichung $C_{org} = C_t - C_{carbonat}$ berechnet. Der Stickstoff in der Ackerkrume liegt überwiegend in organischer Form vor. Der Anteil des anorganischen Stickstoffs – im wesentlichen Nitrat und Ammonium – in der Ackerkrume ist im Allgemeinen kleiner als 5 %. Der Gesamtstickstoff (N_t) ist also ein guter Indikator für den organischen Stickstoff. Diese Humusparameter (C_{org} , N_t , C_{org}/N_t) sind weltweit anerkannte Standardparameter.

Die Bodentextur (Prozentanteil von Ton, Schluff und Sand) wurde nach DIN ISO 11277 bestimmt.

4 Ergebnisse, Diskussion

Von jeder Teilfläche wurden die sechs Einzelproben auf C_{org} und N_t untersucht. Somit liegen für jede Teilfläche Mittelwerte von C_{org} , N_t und C_{org}/N_t mit den entsprechenden Standardabweichungen und Variationskoeffizienten vor. Diese Mittelwerte wurden für die Bestimmung der Spannweiten der Humusparameter verwendet. Die Bodentextur jeder Teilfläche wurde aus einer Mischprobe bestimmt, die aus den jeweils sechs Einzelproben hergestellt wurde. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Bewertung der Einheitlichkeit der untersuchten Acker- und der dazugehörigen Teilflächen hinsichtlich der Humusparameter (C_{org} , N_t , C_{org}/N_t) und der Bodenart. Der Vergleich der Variationskoeffizienten zeigt, dass die Teilflächen wesentlich einheitlicher sind, verglichen mit der entsprechenden Ackerfläche. Für die Praxis bedeutet dies, dass die Beprobung kleiner Teilflächen

(< 10 m²), deren Position z. B. mittels GPS festgelegt wird, die Methode der Wahl für die Erfassung und Bewertung der langfristigen Entwicklung der Humusgehalte und der Humusqualität ist.

Bei den BDF-Parzellen wurden aus den jeweils 4 Wiederholungen Mittelwerte für C_{org} , N_t und C_{org}/N_t errechnet.

Die statistischen Parameter der untersuchten Variablen für die 1867 Teilflächen (454 Standorte) sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Statistische Parameter der untersuchten Variablen

Variable	n	Mittel	SD	Min	Median	Max
C_{org} %	1867	1,67	0,67	0,43	1,56	6,83
N_t %	1867	0,161	0,066	0,038	0,149	0,692
C_{org} / N_t	1867	10,4	1,0	8,0	10,3	16,4
Carbonat-C %	571	0,78	1,23	0,01	0,22	8,27

In Abb. 3 und Abb. 4 ist die Verteilung der Humusgehalte (C_{org} , N_t) der untersuchten konventionell und ökologisch bewirtschafteten Teilflächen ($n = 1867$) dargestellt. Jede BDF-Parzelle wurde als eine Teilfläche betrachtet. Es ist auffallend, dass 95 % der Teilflächen C_{org} -Gehalte haben, die oberhalb der Cross-Compliance-Grenzwerte liegen ($C_{org} = 0,6$ % bei einem Tonanteil < 13 % bzw. $C_{org} = 0,9$ % bei einem Tonanteil > 13 %). Allerdings bei etwa 11 % der Teilflächen liegen die C_{org} -Gehalte in einem labilen Bereich zwischen 0,91 und 1,1 %. Etwa ein Drittel der Teilflächen weist relativ niedrige C_{org} -Gehalte (1,1 - 1,5 %) auf.

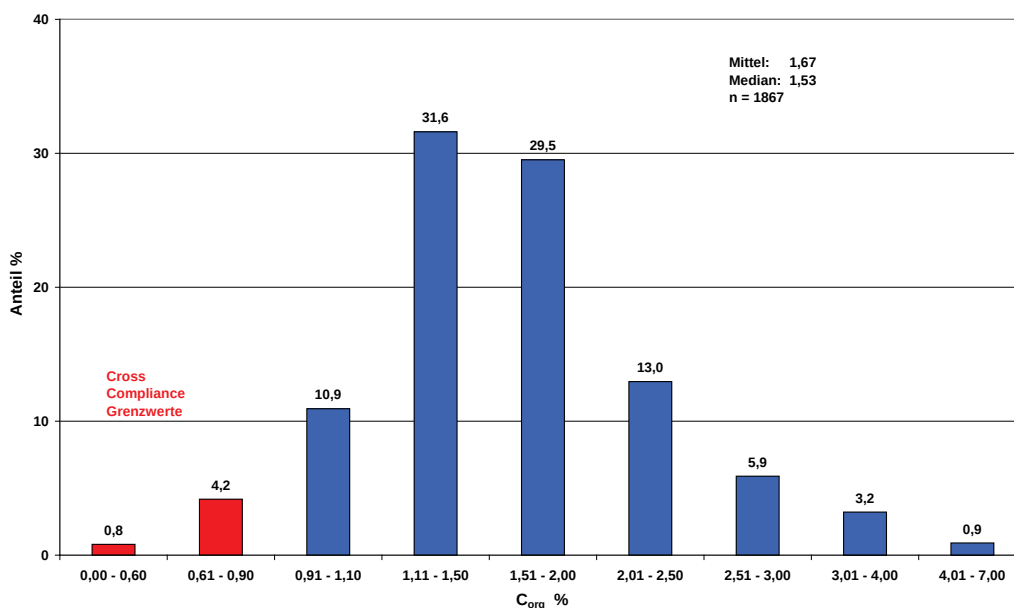


Abb. 3: Verteilung der C_{org} -Gehalte

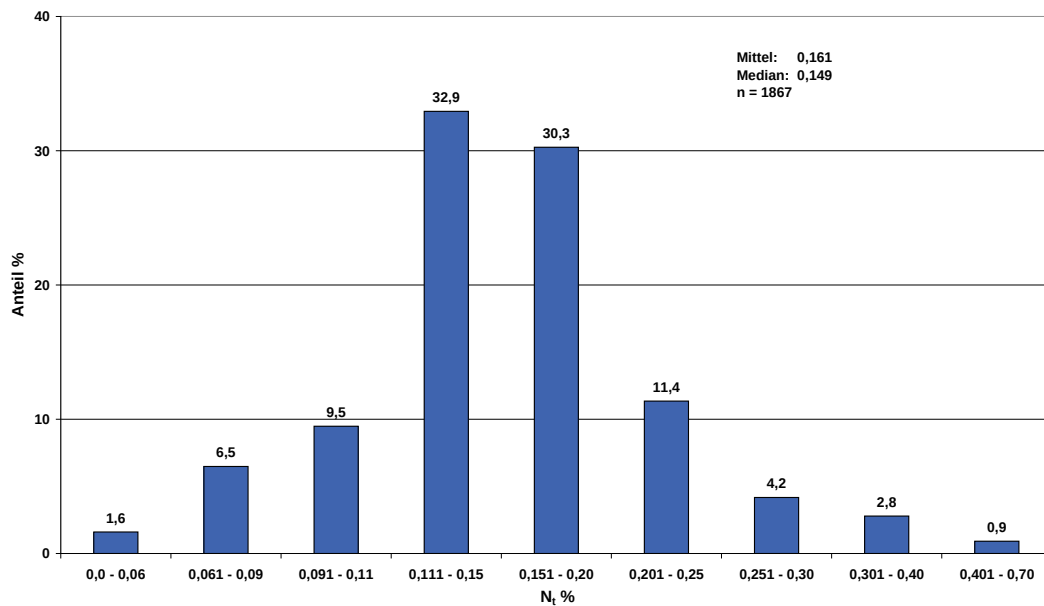


Abb. 4: Verteilung der N_t -Gehalte

Das C_{org}/N_t -Verhältnis der untersuchten konventionell und ökologisch bewirtschafteten Teilflächen (n = 1867) liegt in einem weiten Bereich von 8 bis 17 (Abb. 5, Tab. 1), was auf sehr unterschiedliche chemische Zusammensetzungen des Humus (Humusqualität) hindeutet.

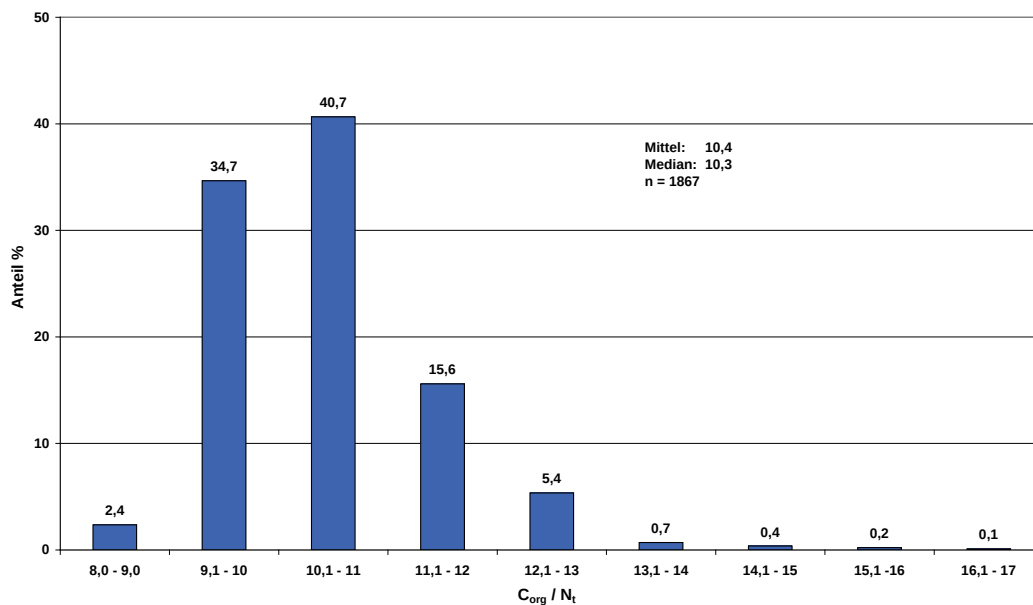


Abb. 5: Verteilung der Humusqualität (C_{org}/N_t)

In Anbetracht der Anzahl (454) und der gleichmäßigen Verteilung der untersuchten Standorte innerhalb Bayerns (s. Anhang) kann die Verteilung der Humusgehalte (C_{org} , N_t) und der Humusqualität (C_{org}/N_t) als repräsentativ für ackerbaulich genutzte Böden in Bayern betrachtet werden.

Etwa ein Drittel (571) der 1867 Teilflächen ist carbonathaltig. Der Carbonat-Kohlenstoff variiert stark zwischen 0,01 und 8,3 % (Tab. 1). Die Verteilung der Carbonat-

Kohlenstoffgehalte ist in Abb. 6 dargestellt. Erwähnenswert ist auch die Abhängigkeit von der Bodenart. Der Anteil der carbonathaltigen Böden in den jeweiligen Bodenartgruppen nimmt mit steigendem Tongehalt zu. Die Gruppe der lehmigen Tone (Tonanteil 45 – 65 %) weist den höchsten Anteil an carbonathaltigen Böden auf (Abb. 7).

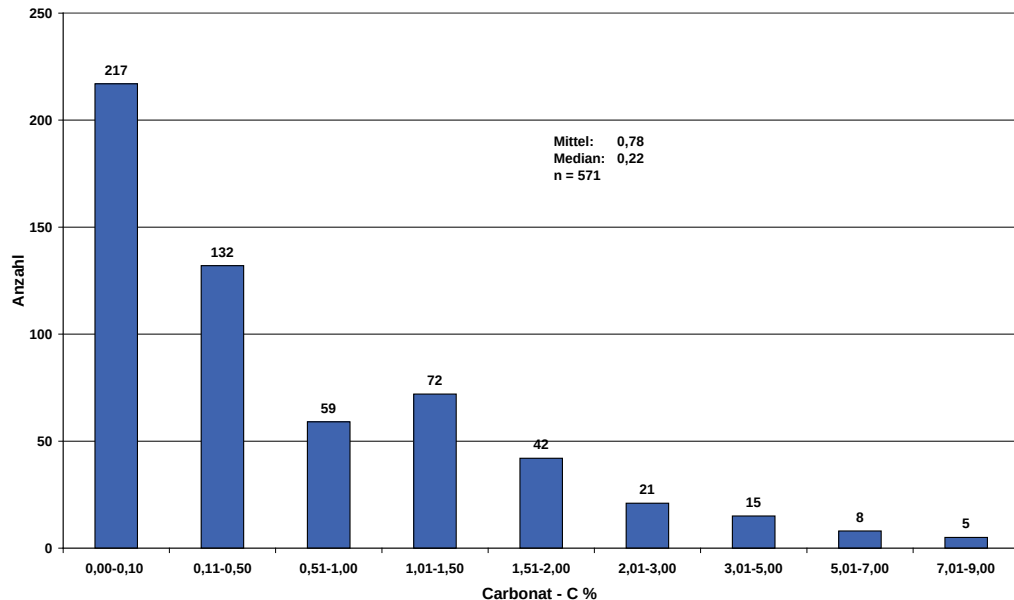


Abb. 6: Verteilung der Carbonat-Kohlenstoffgehalte

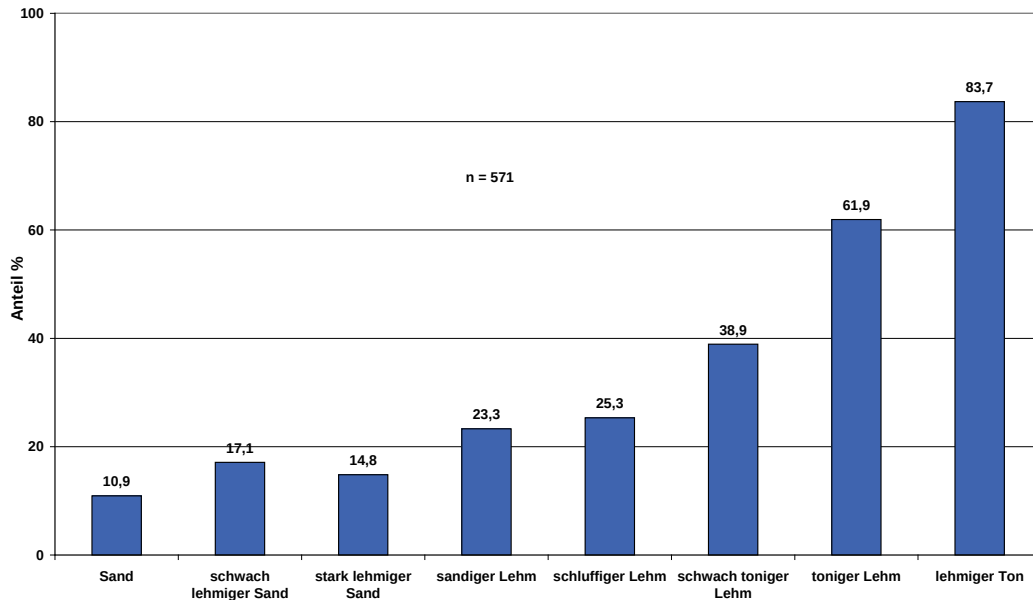


Abb. 7: Anteil der carbonathaltigen Böden in den Bodenartgruppen

4.1 Einfluss der Standortfaktoren

Von den Standortfaktoren, die den Humusgehalt und die Humusqualität beeinflussen (Abb. 1), ist die anorganische Matrix, d. h. die chemische Zusammensetzung und die chemische Struktur des anorganischen Bodenanteils, am schwierigsten zu erfassen. Der Grund dafür liegt in den begrenzten analytischen Möglichkeiten. Dieser Standortfaktor

wird deshalb in dieser Arbeit nicht mit berücksichtigt. Ein weiterer Standortfaktor ist das Grundwasser. Da es sich bei den ausgewählten Ackerschlägen um grundwasserferne Standorte handelt, kann dieser Faktor vernachlässigt werden.

In dieser Arbeit wird deshalb nur der Einfluss von Bodenart und Klima (Temperatur, Niederschlag) auf Humus untersucht.

Wie bereits erwähnt (S. 11) wurde für jede der 1867 Teilflächen die Bodenart bestimmt. Für die Ermittlung der Jahrestemperatur und des Jahresniederschlags der Teilflächen wurden die Mittelwerte der Temperatur und des Niederschlags in Bayern für den Zeitraum 1961 - 1990 des Deutschen Wetterdienstes herangezogen (Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst). Diese basieren auf langjährigen Niederschlags- und Temperaturmessungen von 1043 bzw. 142 DWD Wetterstationen, die in Bayern gleichmäßig verteilt sind. Für jeden der 454 Standorte wurde die jeweils nächsten DWD Wetterstation ausgewählt. Die mittlere Entfernung zur nächsten Temperatur-Station beträgt 11,9 km und zur nächsten Niederschlag-Station 3,6 km.

Die statistischen Parameter der Standortfaktoren für die 1867 Teilflächen (454 Standorte) sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Statistische Parameter der Standortfaktoren

Variable	n	Mittel	SD	Min	Median	Max
Tonanteil %	1867	22,6	10,9	0,3	21,0	64,4
Temperatur °C	1867	7,8	0,6	5,8	7,8	9,3
Niederschlag mm	1867	809	162	576	774	1793
Höhe m	1867	447	100	133	430	726

Tab. 3: Pearson Korrelationskoeffizienten ($n = 1867$)

	Tonanteil	Temperatur	Niederschlag	Höhe
C_{org}	0,40	-0,34	0,50	0,46
N_t	0,48	-0,26	0,52	0,43
C_{org} / N_t	-0,45	-0,21	-0,08	0,04
Höhe		-0,61	0,57	

Tab. 4: Spearman Korrelationskoeffizienten ($n = 1867$)

	Tonanteil	Temperatur	Niederschlag	Höhe
C_{org}	0,45	-0,28	0,40	0,43
N_t	0,55	-0,23	0,40	0,41
C_{org} / N_t	-0,48	-0,23	-0,04	0,06
Höhe		-0,60	0,61	

Die Pearson und die Spearman Korrelationskoeffizienten sind in Tab. 3 und Tab. 4 aufgeführt. Mehrere Beziehungen sind erwähnenswert. Zum einen korrelieren C_{org} und N_t

negativ mit der Temperatur und positiv mit den Tonanteil, Niederschlag und Höhe. Zum anderen korreliert C_{org}/N_t negativ mit den Tonanteil und Temperatur. Bemerkenswert ist auch, dass die Beziehungen Höhe-Temperatur und Höhe-Niederschlag die höchsten Korrelationskoeffizienten aufweisen.

Um den Einfluss der Faktoren Tonanteil, Jahrestemperatur, Jahresniederschlag und Höhenlage zu bestimmen, wurden verschiedene Modelle mittels Multipler Linearer Regression untersucht. Vorher wurde der Datensatz u.a. auf Ausreißer, einzelne Beobachtungen mit übermäßigem Einfluss auf die Koeffizienten der Regressionsgleichung, Linearität zwischen Prädiktoren und abhängiger Variable, normale Verteilung der Residuen, Varianzhomogenität der Residuen, und Kolinearität der Prädiktoren geprüft. Aufgrund dieser Prüfung wurden zwei Standorte mit C_{org} -Gehalten $> 5\%$ als Ausreißer erkannt und aus dem Datensatz entfernt. Die Ergebnisse der Multiplen Linearen Regression mit diesem reduzierten Datensatz (1861 Teilflächen) sind in Tab. 5 und Tab. 6 aufgeführt.

Tab. 5: Regressionsgleichungen und Bestimmtheitsmaße

Modell	Regressionsgleichung	R^2
1	$C_{org} = 2,36 + 0,03 \cdot \text{Ton} - 0,33 \cdot \text{Temp} + 0,002 \cdot \text{Niederschlag}$	0,50
2	$C_{org} = -0,34 + 0,03 \cdot \text{Ton} + 0,003 \cdot \text{Höhe}$	0,43

Tab. 6: Standardisierte Schätzer

Modell	Prädiktor	Standardisierter Schätzer
1	Ton	0,48
	Niederschlag	0,40
	Temperatur	-0,30
2	Höhe	0,50
	Ton	0,46

Das Modell 1 erklärt etwa 50 % der Varianz, das Modell 2 ca. 43 %. Der standardisierte Schätzer erlaubt einen direkten Vergleich der Prädiktoren. So ist der Tonanteil im Modell 1 der wichtigste Prädiktor. Im Modell 2 ist es die Höhenlage.

4.1.1 Einfluss der Bodenart

Die Teilflächen ($n = 1867$) wurden in 8 Bodenartgruppen eingeteilt. Die Bodenarteinstufung erfolgte im Wesentlichen nach VDLUFA (Tab. 7).

Tab. 7: Bodenarteinteilung nach Ton- und Schluffgehalt

Bodenartgruppe	Ton %	Schluff %	
Sand	< 5	< 10	leichte Böden
schwach lehmiger Sand	5 - 12	< 50	
stark lehmiger Sand	12 - 17	< 50	mittlere Böden
sandiger Lehm	17 - 25	< 50	
schluffiger Lehm	< 25	> 50	
schwach toniger Lehm	25 - 35	nicht	schwere Böden
toniger Lehm	35 - 45	maßgeblich	
lehmiger Ton	45 - 65		

Nach dem Bodenartenschlüssel Bayerns wird die VDLUFA Bodenartgruppe „sandig/schluffiger Lehm“ in 2 Gruppen geteilt, nämlich „sandiger Lehm“ und „schluffiger Lehm“. Außerdem werden die Bodenartgruppen „schwach toniger Lehm“ und „toniger Lehm“ unter der Bezeichnung „toniger Lehm“ (Ton 25 - 45 %) zusammengefasst.

Die Verteilung der Bodenarten mit überwiegend mittleren (52 % Anteil) und schweren (33 % Anteil) Böden kann als repräsentativ für ackerbaulich genutzte Böden in Bayern betrachtet werden (Abb. 8). Die Bodenartgruppe Sand ist mit 55 konventionell bewirtschafteten Teilflächen vertreten.

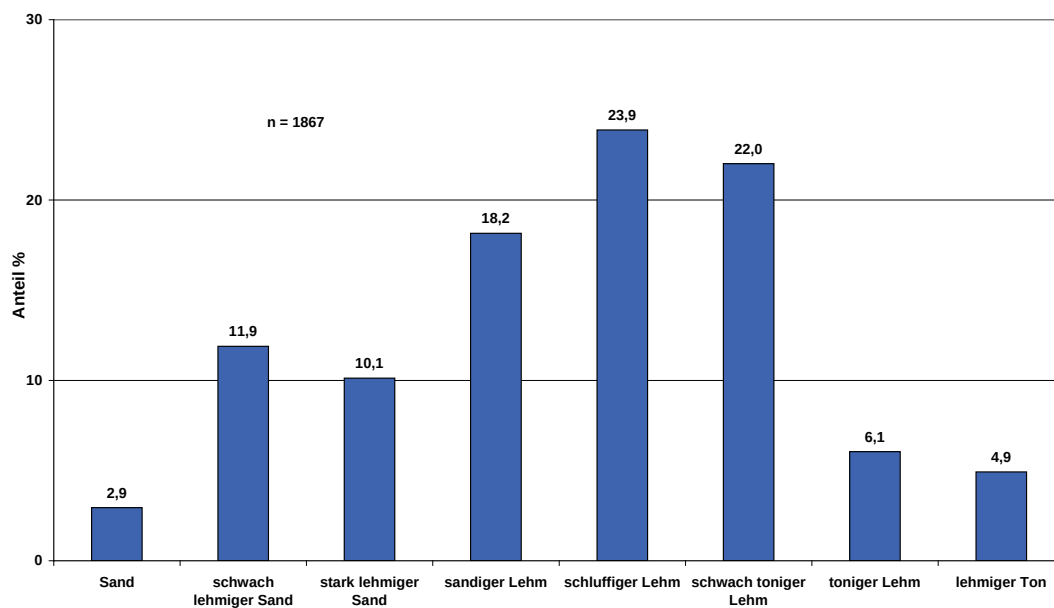


Abb. 8: Verteilung der Bodenarten der untersuchten Ackerböden

Die zwei Standorte mit C_{org} -Gehalten $> 5\%$ wurden aus dem Datensatz entfernt (s. S. 16). Es wurden also 1861 Teilflächen betrachtet. In jeder Bodenartgruppe wurde die Verteilung der C_{org} -, N_t - und C_{org}/N_t -Werte statistisch analysiert. Um nicht repräsentative sehr niedrige und sehr hohe Werte zu eliminieren, wurde für jede Bodenartgruppe das 12,5 % und 87,5 % Quantil berechnet. Die Spannweiten für die jeweiligen Variablen wurden ermittelt, indem jeweils 12,5 % der extremen Werte an den Enden der Verteilung unberücksichtigt blieben.

4.1.1.1 Organischer Kohlenstoff

Die statistischen Parameter für C_{org} der konventionell und ökologisch bewirtschafteten Teilflächen in Abhängigkeit von der Bodenart sind in Tab. 8 und Tab. 9 zusammengefasst. Die Standardabweichungen (SD) zeigen eine breite Streuung der Werte innerhalb der jeweiligen Bodenartgruppen. Die C_{org} -Werte innerhalb jeder Bodenartgruppe sind nicht normal verteilt.

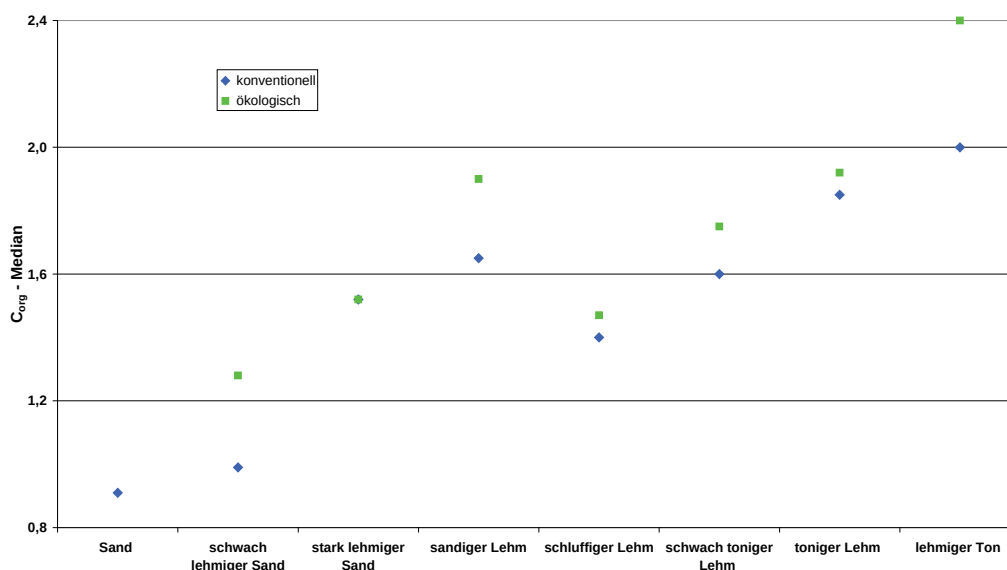
Tab. 8: Statistische Parameter für C_{org} (%) der konventionellen Teilflächen

Bodenartgruppe	n	Mittel	SD	Min	12,5 % Quantil	Median	87,5 % Quantil	Max
Sand	55	0,96	0,37	0,50	0,59	0,91	1,38	1,99
schwach lehmiger Sand	174	1,14	0,42	0,43	0,74	0,99	1,67	2,85
stark lehmiger Sand	139	1,63	0,57	0,73	1,00	1,52	2,35	3,67
sandiger Lehm	244	1,74	0,53	0,85	1,15	1,65	2,46	4,24
schluffiger Lehm	362	1,45	0,37	0,76	1,08	1,40	1,81	2,91
schwach toniger Lehm	323	1,83	0,70	0,74	1,19	1,60	2,85	4,47
toniger Lehm	87	2,01	0,65	0,94	1,52	1,85	2,77	4,70
lehmiger Ton	82	2,14	0,50	1,46	1,61	2,00	2,81	4,03
Summe 1466								

Tab. 9: Statistische Parameter für C_{org} (%) der ökologischen Teilflächen

Bodenartgruppe	n	Mittel	SD	Min	12,5 % Quantil	Median	87,5 % Quantil	Max
Sand	0	-	-	-	-	-	-	-
schwach lehmiger Sand	48	1,32	0,25	0,87	1,08	1,28	1,56	2,14
stark lehmiger Sand	50	1,72	0,71	0,82	1,12	1,52	2,32	3,84
sandiger Lehm	95	1,90	0,60	0,93	1,30	1,90	2,37	4,61
schluffiger Lehm	83	1,54	0,32	1,04	1,20	1,47	1,97	2,20
schwach toniger Lehm	83	2,15	0,91	1,02	1,33	1,75	3,50	4,50
toniger Lehm	26	1,96	0,30	1,29	1,67	1,92	2,27	2,71
lehmiger Ton	10	2,57	0,34	2,21	2,22	2,40	2,94	3,20
Summe 395								

Die C_{org} -Mediane der konventionellen und ökologischen Teilflächen sind in Abb. 9 dargestellt. Bei den ökologisch bewirtschafteten Teilflächen ist eine Tendenz zu höheren C_{org} -Gehalten erkennbar. In 3 Bodenartgruppen (schwach lehmiger Sand, sandiger Lehm, lehmiger Ton) sind die ökologischen C_{org} -Mediane signifikant höher im Vergleich zu den konventionellen (U - Test, $p = 0,05$).

Abb. 9: C_{org} -Mediane (%) der konventionellen und ökologischen Teilflächen

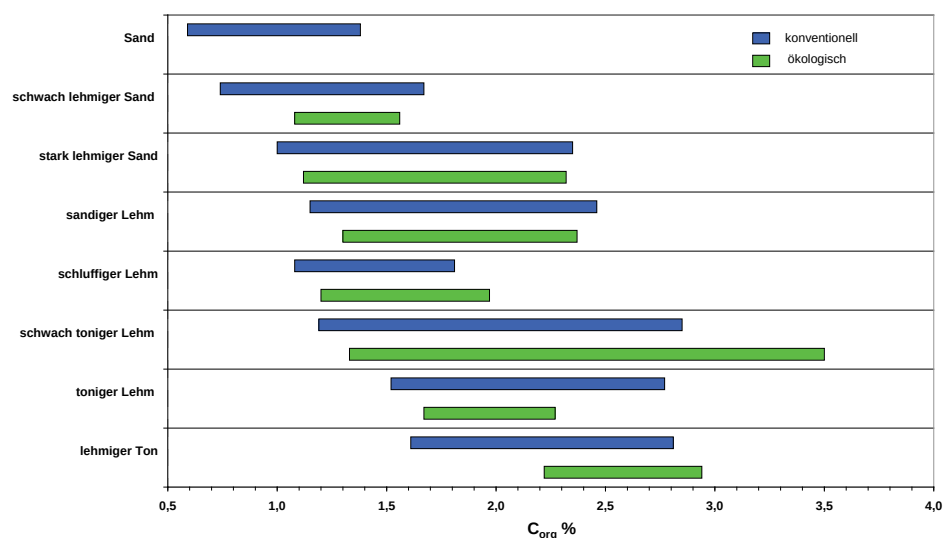


Abb. 10: Spannweiten der C_{org} -Gehalte

Die Spannweiten der C_{org} -Gehalte der konventionell und ökologisch bewirtschafteten Teilflächen sind als Balken in Abb. 10 dargestellt. Die Balkenlänge entspricht also dem Bereich zwischen dem 12,5 % und 87,5 % Quantil. Der Einfluss der Bodenart ist deutlich erkennbar. Mit zunehmendem Tonanteil verschieben sich die Balken von links nach rechts zu höheren C_{org} -Gehalten. Der Anstieg der Humusgehalte mit zunehmendem Tonanteil hat mehrere Ursachen. Durch Adsorption an die Oberfläche der Tonminerale wird die organische Bodensubstanz (Humus) dem direkten Zugriff von Bodenmikroorganismen entzogen und damit stabilisiert (Oades, 1995; Baldock und Skjemstad, 2000). Die schlechtere Durchlüftung mit zunehmendem Tonanteil verlangsamt den mikrobiellen Abbau der organischen Bodensubstanz und hat damit auch eine stabilisierende Wirkung.

Es ist auffallend, dass die C_{org} -Spannweiten für konventionelle und ökologische Bewirtschaftung innerhalb jeder Bodenartgruppe ziemlich ähnlich sind. Es ist deshalb nicht notwendig getrennte Spannweiten für konventionell und ökologisch bewirtschaftete Flächen zu definieren.

Die statistischen Parameter für C_{org} (konventionell + ökologisch) in Bezug zur Bodenart sind in Tab. 10 zusammengefasst.

Tab. 10: Statistische Parameter für C_{org} (konventionell + ökologisch)

Bodenartgruppe	n	Mittel	SD	Min	12,5 % Quantil	Median	87,5 % Quantil	Max
Sand	55	0,96	0,37	0,50	0,59	0,91	1,38	1,99
schwach lehmiger Sand	222	1,17	0,39	0,43	0,79	1,09	1,59	2,85
stark lehmiger Sand	189	1,65	0,61	0,73	1,06	1,52	2,35	3,84
sandiger Lehm	339	1,78	0,56	0,85	1,17	1,71	2,41	4,61
schluffiger Lehm	445	1,47	0,36	0,76	1,10	1,41	1,88	2,91
schwach toniger Lehm	406	1,90	0,76	0,74	1,21	1,63	2,92	4,50
toniger Lehm	113	2,00	0,59	0,94	1,53	1,87	2,53	4,70
lehmiger Ton	92	2,19	0,50	1,46	1,63	2,11	2,85	4,03
Summe	1861							

4.1.1.2 Gesamtstickstoff

Die statistischen Parameter für N_t der konventionell und ökologisch bewirtschafteten Teilflächen in Abhängigkeit von der Bodenart sind in Tab. 11 und Tab. 12 zusammengefasst. Ähnlich wie bei C_{org} deuten die Standardabweichungen (SD) auf eine ziemlich breite Streuung der Werte hin. Die N_t -Werte innerhalb jeder Bodenartgruppe sind nicht normal verteilt.

Tab. 11: Statistische Parameter für N_t (%) der konventionellen Teilflächen

Bodenartgruppe	n	Mittel	SD	Min	12,5 % Quantil	Median	87,5 % Quantil	Max
Sand	55	0,077	0,026	0,040	0,047	0,071	0,112	0,154
schwach lehmiger Sand	174	0,101	0,036	0,038	0,066	0,093	0,144	0,240
stark lehmiger Sand	139	0,148	0,046	0,075	0,095	0,140	0,201	0,305
sandiger Lehm	244	0,165	0,048	0,080	0,117	0,159	0,226	0,419
schluffiger Lehm	362	0,145	0,034	0,078	0,111	0,141	0,180	0,290
schwach toniger Lehm	323	0,183	0,067	0,077	0,124	0,161	0,278	0,490
toniger Lehm	87	0,205	0,067	0,101	0,154	0,187	0,283	0,486
lehmiger Ton	82	0,213	0,049	0,142	0,167	0,205	0,269	0,423
Summe 1466								

Tab. 12: Statistische Parameter für N_t (%) der ökologischen Teilflächen

Bodenartgruppe	n	Mittel	SD	Min	12,5 % Quantil	Median	87,5 % Quantil	Max
Sand	0	-	-	-	-	-	-	-
schwach lehmiger Sand	48	0,116	0,022	0,077	0,095	0,115	0,140	0,193
stark lehmiger Sand	50	0,153	0,057	0,073	0,103	0,136	0,225	0,325
sandiger Lehm	95	0,177	0,051	0,089	0,118	0,177	0,223	0,387
schluffiger Lehm	83	0,150	0,032	0,094	0,120	0,142	0,191	0,225
schwach toniger Lehm	83	0,216	0,097	0,090	0,131	0,175	0,368	0,476
toniger Lehm	26	0,191	0,030	0,126	0,163	0,191	0,224	0,271
lehmiger Ton	10	0,255	0,038	0,222	0,222	0,239	0,298	0,332
Summe 395								

Die N_t -Mediane der konventionellen und ökologischen Teilflächen sind in Abb. 11 dargestellt. Im Gegensatz zu C_{org} ist hier der Trend zu höheren N_t -Werten bei den ökologischen Teilflächen schwächer ausgeprägt. Lediglich in 2 Bodenartgruppen (schwach lehmiger Sand, lehmiger Ton) sind die ökologischen N_t -Mediane signifikant höher als die konventionellen (U - Test, $p = 0,05$).

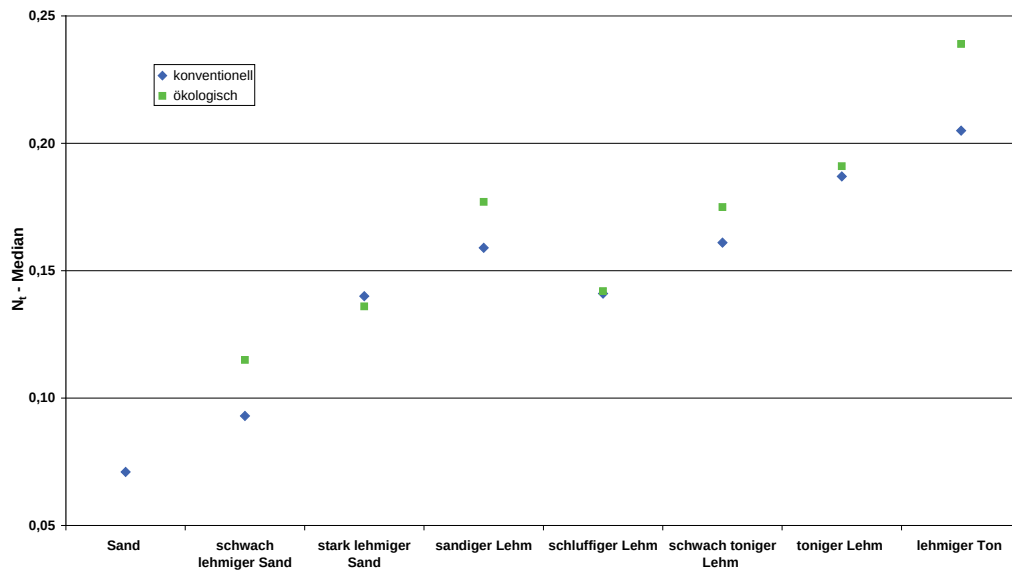


Abb. 11: N_t -Mediane (%) der konventionellen und ökologischen Teilflächen

Die Spannweiten der N_t -Gehalte der konventionell und ökologisch bewirtschafteten Teilflächen sind als Balken in Abb. 12 dargestellt. Ähnlich wie bei C_{org} ist auch bei N_t der Einfluss der Bodenart deutlich erkennbar. Mit zunehmendem Tonanteil verschieben sich die Balken von links nach rechts zu höheren N_t -Gehalten. Die Ursachen für diesen Effekt sind dieselben wie oben. Innerhalb der Bodenartgruppen sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Spannweiten (Balkenlängen) der konventionell und ökologisch bewirtschafteten Teilflächen vorhanden. Es ist folglich auch bei N_t nicht erforderlich, getrennte Spannweiten für konventionell und ökologisch bewirtschaftete Flächen festzulegen.

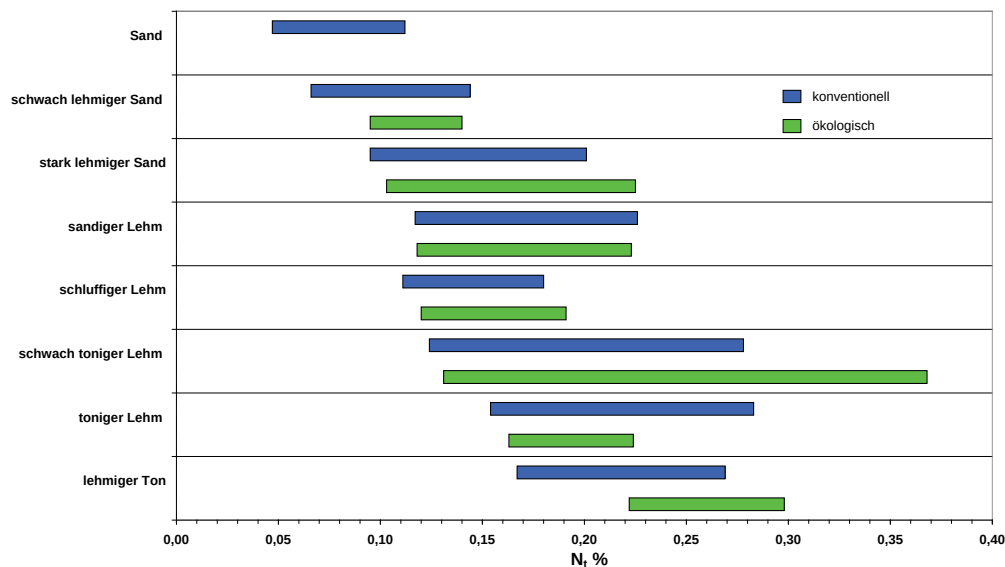


Abb. 12: Spannweiten der N_t -Gehalte

Die statistischen Parameter für N_t (konventionell + ökologisch) in Bezug zur Bodenart sind in Tab. 13 zusammengestellt.

Die C_{org}/N_t -Mediane der konventionellen und ökologischen Teilflächen sind in Abb. 13 dargestellt. Erwähnenswert ist der deutliche Trend bei den ökologischen Teilflächen. In 4 Bodenartgruppen (schwach lehmiger Sand, stark lehmiger Sand, schluffiger Lehm, toniger Lehm) weisen die ökologisch bewirtschafteten Teilflächen signifikant höhere C_{org}/N_t -Mediane auf (U - Test, $p = 0,05$). Allerdings sind die Unterschiede relativ gering. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Zum einen sind die unterschiedlichen Fruchtfolgen im ökologischen und konventionellen Landbau. Zum anderen dürften im ökologischen Landbau geringere Stickstoffmengen im Boden vorhanden sein als Folge der fehlenden mineralischen Stickstoffdüngung.

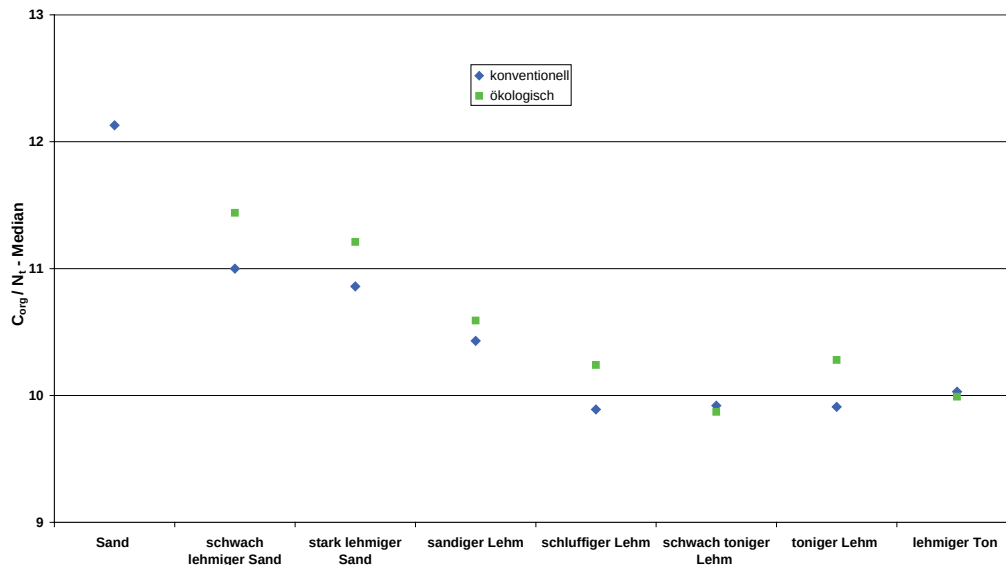


Abb. 13: C_{org}/N_t -Mediane der konventionellen und ökologischen Teilflächen

Die Spannweiten der C_{org}/N_t -Verhältnisse der konventionell und ökologisch bewirtschafteten Teilflächen sind als Balken in Abb. 14 dargestellt.

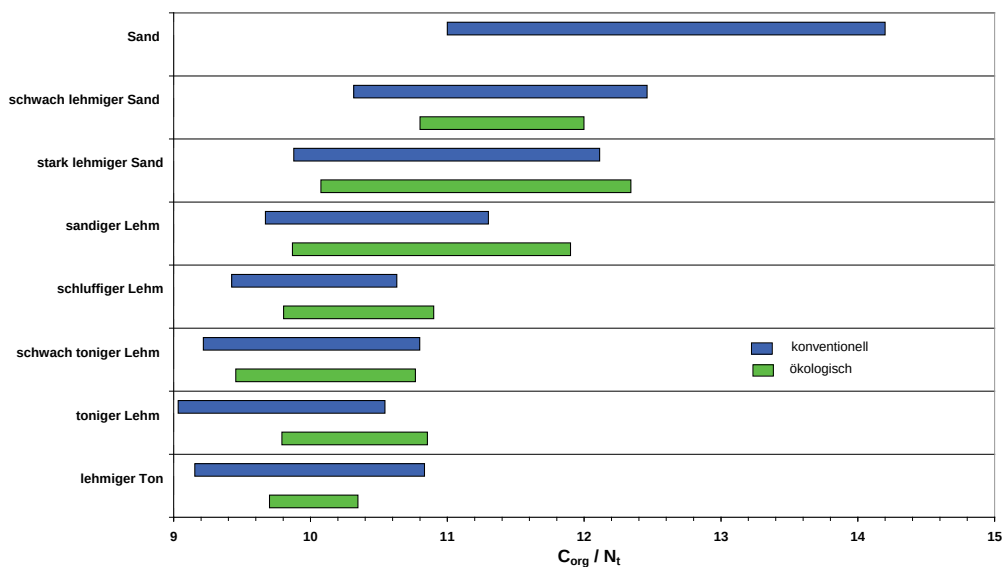


Abb. 14: Spannweiten der C_{org}/N_t -Verhältnisse

Das C_{org}/N_t -Verhältnis, das als klassischer Indikator für die Humusqualität gilt, weist eine deutliche Abhängigkeit von der Bodenart auf (Abb. 14). Im Gegensatz zum Humusgehalt (C_{org} , N_t) nimmt das C_{org}/N_t -Verhältnis aber mit zunehmendem Tonanteil ab. Demnach haben sandige Böden höhere C_{org}/N_t -Verhältnisse als tonige. Mit anderen Worten, der Humus sandiger Böden enthält weniger organische Stickstoff-Verbindungen wie z. B. Proteine. Bekanntlich werden Proteine, der wichtigste organische Stickstoffspeicher im Boden, durch Adsorption an die Oberfläche der Tonminerale geschützt. Mit abnehmendem Tonanteil nimmt die Schutzwirkung ab und die Proteine können mikrobiell leichter abgebaut werden. Zum anderen reichern sich in sandigen Böden organische Verbindungen an, die hauptsächlich Alkylgruppen (CH_3 , CH_2 , CH) und somit mehr Kohlenstoff enthalten (Capriel et al., 1990; Capriel et al., 1995; Capriel, 1997; Oades, 1995).

Die statistischen Parameter für C_{org}/N_t (konventionell + ökologisch) in Bezug zur Bodenart sind in Tab. 16 zusammengestellt.

Tab. 16: Statistische Parameter für C_{org}/N_t (konventionell + ökologisch)

Bodenartgruppe	n	Mittel	SD	Min	12,5 % Quantil	Median	87,5 % Quantil	Max
Sand	55	12,5	1,4	9,9	11,0	12,1	14,2	16,4
schwach lehmiger Sand	222	11,3	0,9	9,4	10,4	11,1	12,2	15,5
stark lehmiger Sand	189	11,0	0,9	9,1	9,9	11,1	12,2	12,9
sandiger Lehm	339	10,5	0,8	8,7	9,7	10,5	11,3	14,8
schluffiger Lehm	445	10,0	0,6	8,6	9,4	10,0	10,7	12,4
schwach toniger Lehm	406	10,0	0,6	8,5	9,3	9,9	10,8	12,8
toniger Lehm	113	9,9	0,6	8,0	9,1	10,0	10,7	11,2
lehmiger Ton	92	10,1	0,7	8,3	9,2	10,0	10,8	12,5
Summe 1861								

4.1.2 Einfluss des Klimas

Zwischen der Höhenlage und Temperatur bzw. Niederschlagsmenge besteht eine deutliche Beziehung (Tab. 3, Tab. 4). Zudem unterscheiden sich die mittels Multipler Linearer Regression erstellten Modelle nicht wesentlich (Tab. 5, Tab. 6). Es ist also naheliegend, die Höhenlage als Maß für den Klimaeinfluss (Niederschlag und Temperatur) zu nehmen.

Für jede Teilfläche liegen die GPS-Koordinaten einschließlich Höhenlage vor. Die Verteilung der Höhenlage der 1867 Teilflächen ist in Abb. 15 dargestellt. Etwa zwei Drittel der Teilflächen liegen in einer Höhe zwischen 350 und 550 m. Diese Verteilung dürfte für Bayern repräsentativ sein (Topographiekarte, Agrar- und Umweltklimatologischer Atlas von Bayern, 1997). Die Ackerbaugebiete mit guten Erzeugungsbedingungen liegen überwiegend unterhalb 550 m.

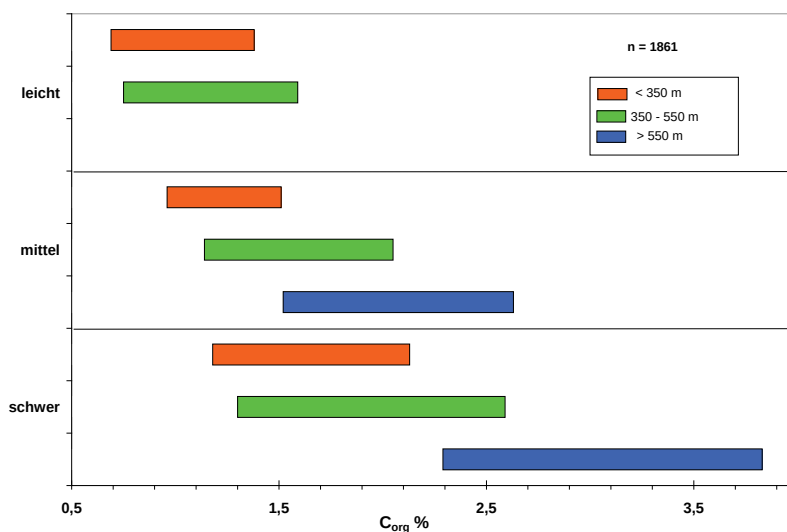
Tab. 18: Statistische Parameter für N_t (konventionell + ökologisch)

Bodenart	Höhe	n	Mittel	SD	Min	12.5% Quantil	Median	87.5% Quantil	Max
leicht	< 350	59	0,085	0,03	0,042	0,055	0,082	0,119	0,214
	350-550	214	0,101	0,03	0,038	0,066	0,099	0,141	0,202
	>550	4							
mittel	< 350	125	0,119	0,03	0,073	0,093	0,118	0,145	0,249
	350-550	667	0,151	0,04	0,075	0,113	0,144	0,192	0,419
	>550	181	0,192	0,05	0,099	0,148	0,189	0,243	0,387
schwer	< 350	150	0,166	0,04	0,090	0,123	0,157	0,218	0,295
	350-550	390	0,186	0,05	0,077	0,134	0,174	0,250	0,423
	>550	71	0,316	0,08	0,176	0,234	0,311	0,404	0,490
Summe 1861									

Tab. 19: Statistische Parameter für C_{org}/N_t (konventionell + ökologisch)

Bodenart	Höhe	n	Mittel	SD	Min	12.5% Quantil	Median	87.5% Quantil	Max
leicht	< 350	59	11,8	1,0	9,4	10,7	11,6	12,8	14,3
	350-550	214	11,4	1,2	9,6	10,4	11,2	12,4	16,4
	>550	4							
mittel	< 350	125	10,2	0,7	8,7	9,5	10,2	11,2	11,8
	350-550	667	10,3	0,8	8,7	9,5	10,2	11,3	14,8
	>550	181	10,8	0,9	9,3	9,8	10,6	12,0	12,9
schwer	< 350	150	9,9	0,7	8,7	9,2	9,9	10,7	12,7
	350-550	390	10,0	0,7	8,0	9,3	10,0	10,9	12,8
	>550	71	9,9	0,5	9,1	9,4	9,8	10,6	10,8
Summe 1861									

Die Spannweiten für C_{org} , N_t und C_{org}/N_t (konventionell + ökologisch) sind als Balken in Abb. 16, Abb. 17 und Abb. 18 dargestellt.

Abb. 16: Spannweiten der C_{org} -Gehalte in Bezug zu Höhe und Bodenart

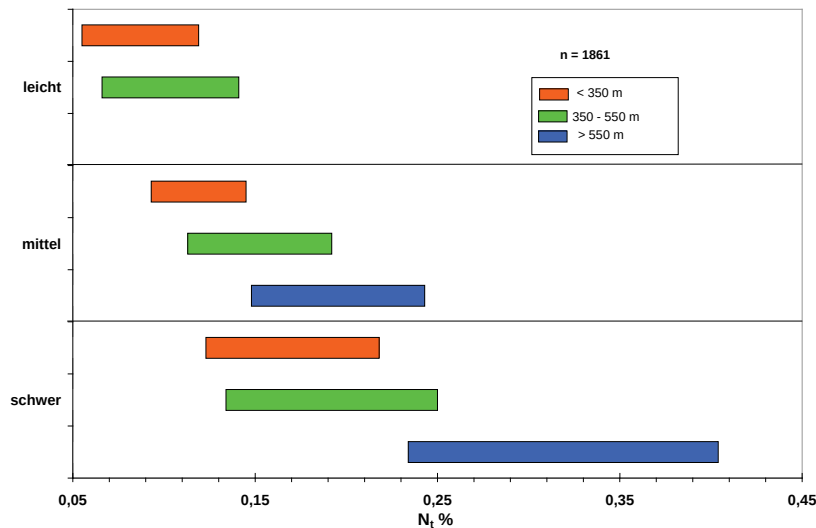


Abb. 17: Spannweiten der N_t -Gehalte in Bezug zu Höhe und Bodenart

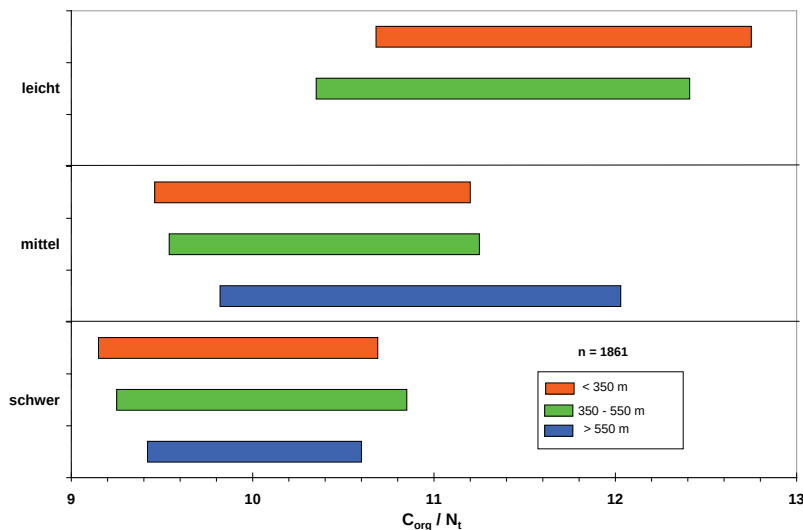


Abb. 18: Spannweiten der C_{org}/N_t -Werte in Bezug zu Höhe und Bodenart

Die Ergebnisse belegen den Einfluss des Klimas auf den Humusgehalt (C_{org} , N_t). Sowohl der C_{org} - als auch der N_t -Gehalt nehmen mit steigender Höhe zu (Abb. 16, Abb. 17, Tab. 3). Generell nimmt die Bodentemperatur mit steigender Höhe ab und der Niederschlag nimmt zu. Die Folge ist ein langsamer mikrobieller Abbau der organischen Bodensubstanz und damit verbunden eine Humusanreicherung. Im Gegensatz zu C_{org} und N_t ist die Humusqualität (C_{org}/N_t) weniger von der Temperatur abhängig. Sie ist hauptsächlich von der Bodenart beeinflusst (Abb. 18, Tab. 3).

Die C_{org} -, N_t - und C_{org}/N_t -Mediane sind in Abb. 19, Abb. 20 und Abb. 21 dargestellt.

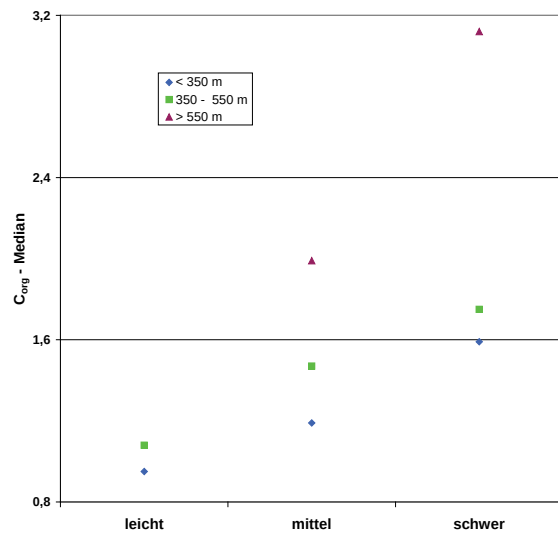


Abb. 19: C_{org} -Mediane (%) in Bezug zu Höhe und Bodenart

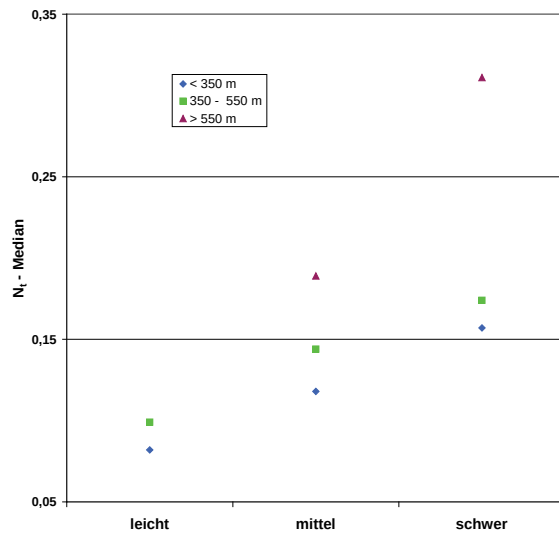


Abb. 20: N_t -Mediane (%) in Bezug zu Höhe und Bodenart

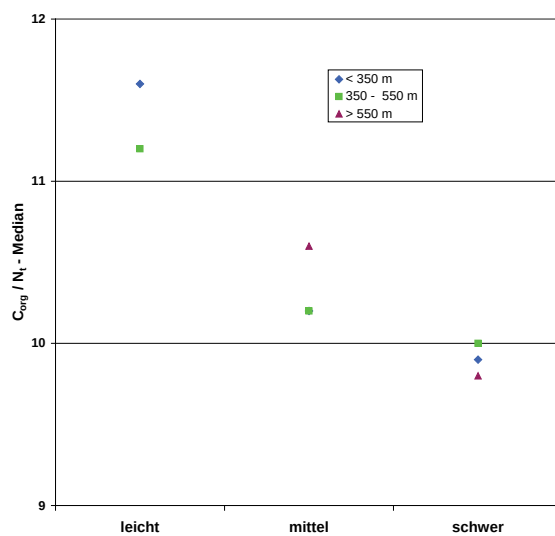


Abb. 21: C_{org}/N_t -Mediane in Bezug zu Höhe und Bodenart

Die Höhenlage beeinflusst deutlich die C_{org} - und N_t -Mediane. Die Unterschiede innerhalb jeder Bodenartgruppe (leicht, mittel, schwer) sind signifikant (U-Test, $p = 0,05$). Im Gegensatz dazu ist die Abhängigkeit der C_{org}/N_t -Mediane von der Höhenlage wesentlich schwächer (s. auch Tab. 3, Tab. 4). Die Unterschiede innerhalb jeder Bodenartgruppe sind meistens nicht signifikant (U-Test, $p = 0,05$).

4.2 Einfluss der Viehhaltung

Für die Berechnung der Spannweiten wurden die zwei Standorte mit C_{org} -Gehalten $> 5\%$ aus dem Datensatz entfernt (s. S. 16). Es wurden also 1861 Teilflächen betrachtet. Von den 1861 Teilflächen werden 432 (23 %) viehlos bewirtschaftet. In jeder Bodenartgruppe wurden die Teilflächen (konventionell + ökologisch) in zwei Gruppen (viehlos und viehhaltend) eingeteilt. Für jede Gruppe wurde das 12,5 % und 87,5 % Quantil für die C_{org} -, N_t - und C_{org}/N_t -Werte berechnet und somit die Spannweiten festgelegt. Die Ergebnisse sind in Abb. 22, Abb. 23 und Abb. 24 dargestellt.

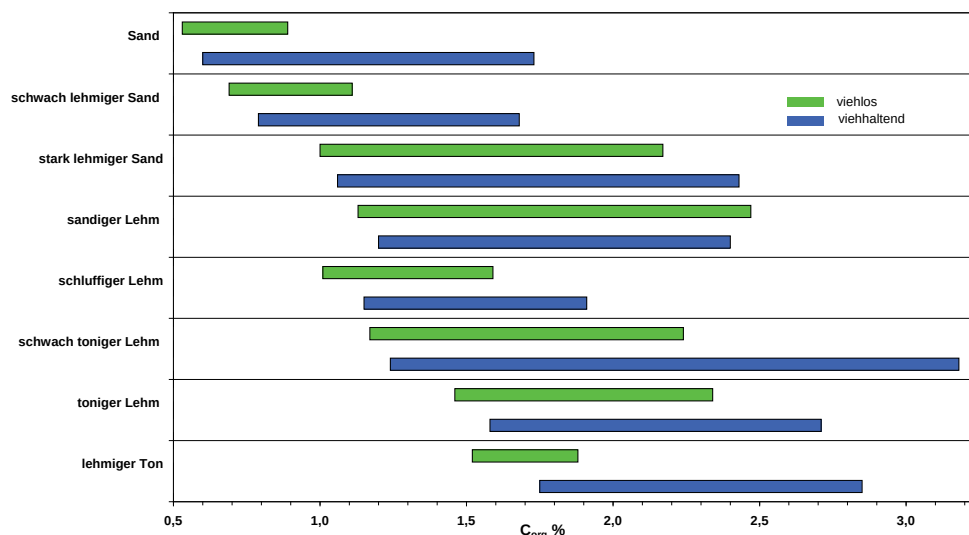


Abb. 22: Spannweiten der C_{org} -Gehalte in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart

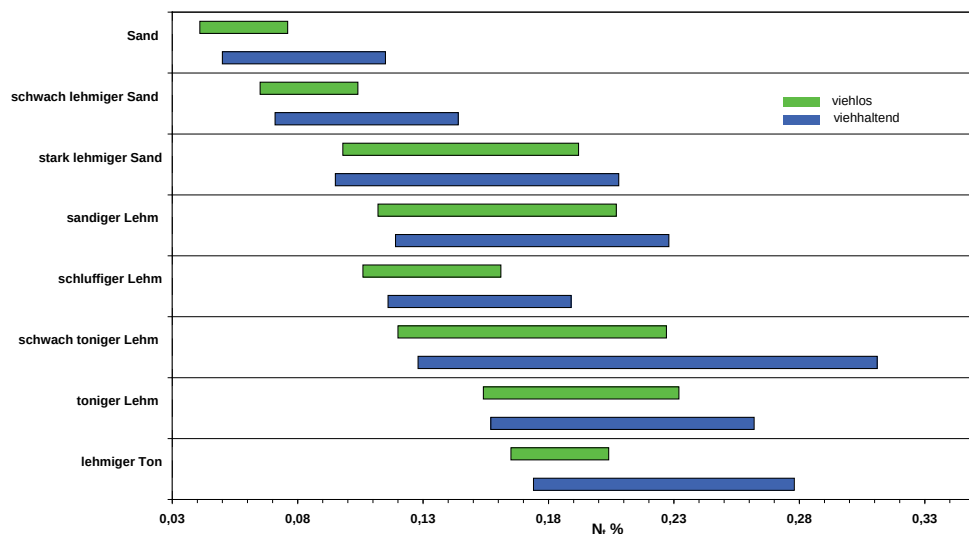


Abb. 23: Spannweiten der N_t -Gehalte in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart

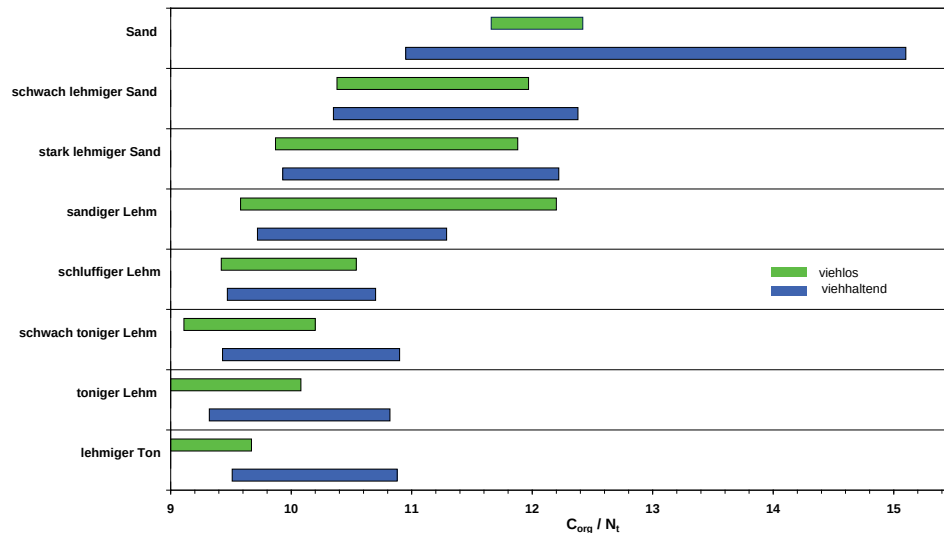


Abb. 24: Spannweiten der C_{org}/N_t -Werte in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart

Die C_{org} -, N_t - und C_{org}/N_t -Mediane sind in Abb. 25, Abb. 26 und Abb. 27 dargestellt. Die Viehhaltung beeinflusst deutlich den Humusgehalt (C_{org} , N_t). In 5 Bodenartgruppen (Sand, schwach lehmiger Sand, schluffiger Lehm, schwach toniger Lehm, lehmiger Ton) unterscheiden sich die C_{org} -Mediane signifikant (U-Test, $p = 0,05$). Bei N_t ist das der Fall in 6 Bodenartgruppen: Sand, schwach lehmiger Sand, schluffiger Lehm, schwach toniger Lehm, toniger Lehm und lehmiger Ton (U-Test, $p = 0,05$). Auch bei der Humusqualität (C_{org}/N_t) ist der Einfluss der Viehhaltung erkennbar. In 5 Bodenartgruppen (schwach lehmiger Sand, schluffiger Lehm, schwach toniger Lehm, toniger Lehm, lehmiger Ton) unterscheiden sich die C_{org}/N_t -Mediane signifikant (U-Test, $p = 0,05$). Bemerkenswert ist, dass die C_{org}/N_t -Mediane der viehhaltenden Betriebe tendenziell höher sind als die der viehlosen.

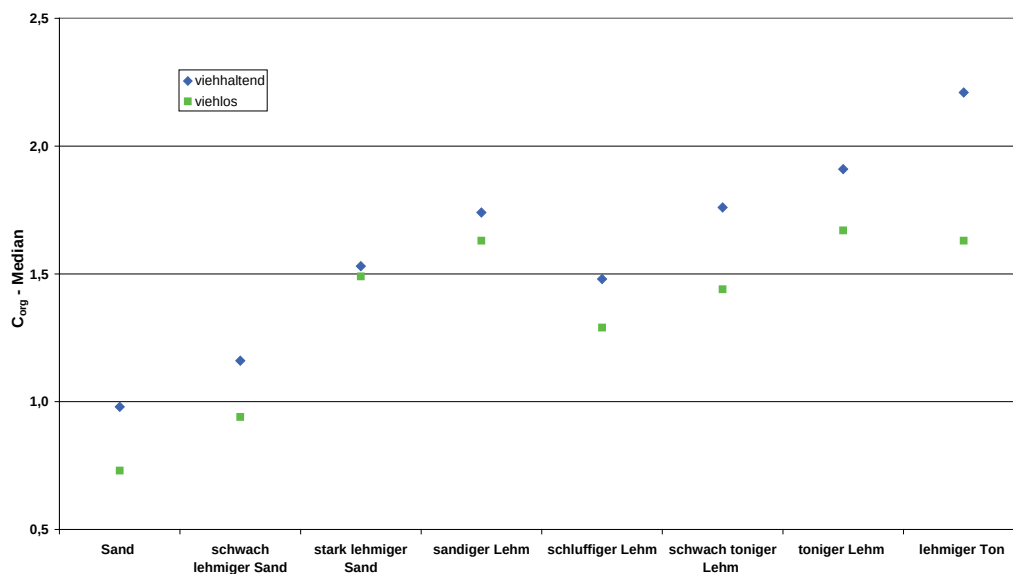


Abb. 25: C_{org} -Mediane (%) in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart

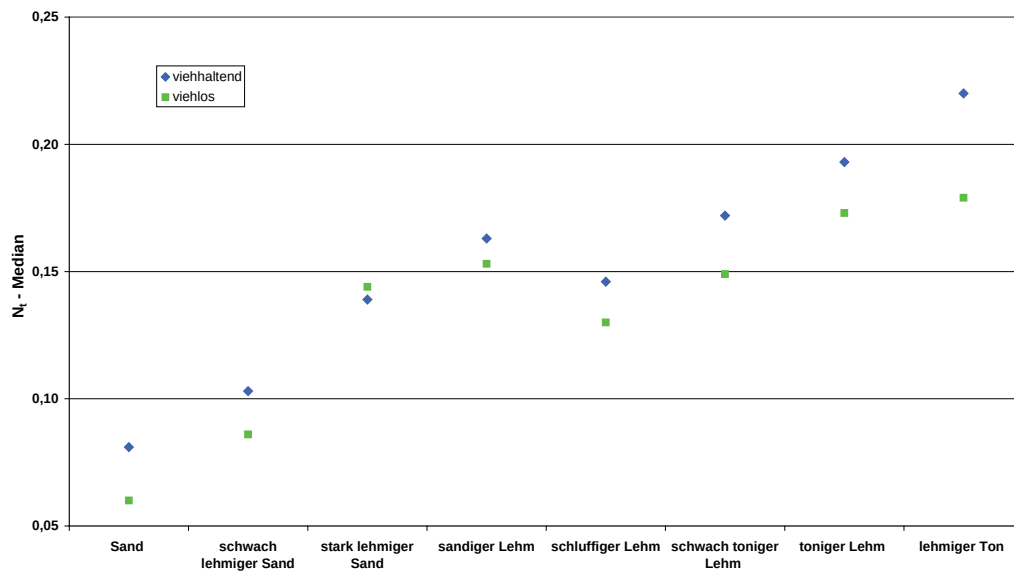


Abb. 26: N_t -Mediane (%) in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart

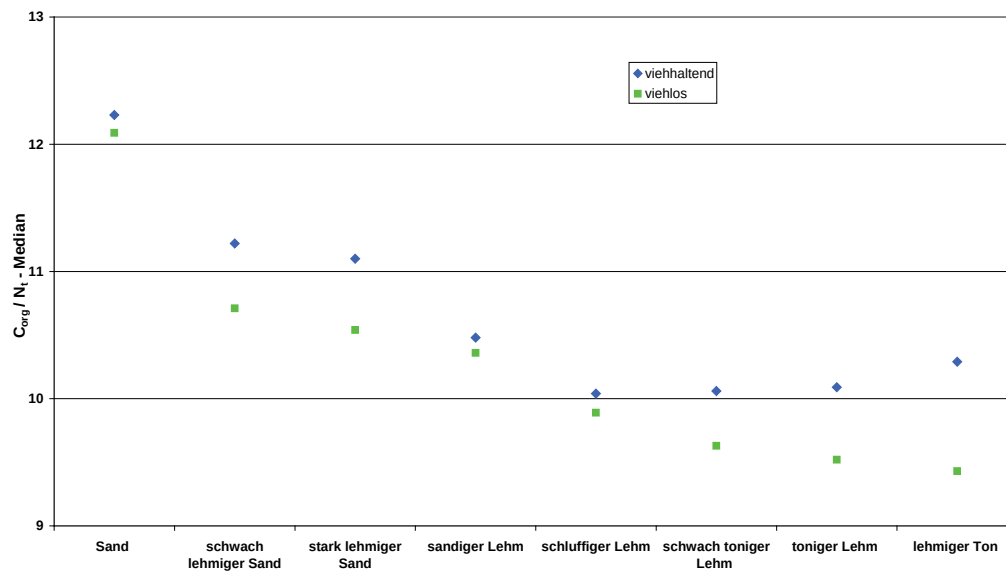


Abb. 27: C_{org}/N_t -Mediane in Bezug zu Viehhaltung und Bodenart

Durch die Einteilung der Teilflächen in zwei Gruppen verringert sich allerdings die Anzahl der Teilflächen in der jeweiligen Gruppe und damit die Datenbasis zur Ermittlung der Spannweiten der Humusgehalte (C_{org} , N_t) in Abhängigkeit von der Viehhaltung. Deshalb werden zunächst die Humuskennwerte nicht nach der Viehhaltung differenziert.

5 Standorttypische Humuskennwerte für Ackerland in Bayern

Die vorhandene Datenbasis ermöglicht die Bestimmung von standorttypischen Spannweiten der Humuskennwerte von Ackerböden in Bayern in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Klima (Höhenlage). Es wurden 3 Bodenartgruppen (leicht, mittel, schwer) und 3 Höhen (< 350 m, 350 - 550 m, > 550 m) berücksichtigt. Zudem wurde keine Trennung zwischen konventionellen und ökologischen Humuskennwerten vorgenommen, weil die Unterschiede nicht relevant sind. Diese Vorgehensweise hat mehrere Vorteile. Zum einen sind die Ackerschläge hinsichtlich der Bodenart oft uneinheitlich. Die Beschränkung auf 3 Bodenartgruppen (leicht, mittel, schwer) stellt daher eine für den Landwirt und Berater praktikable Lösung dar. Zum anderen kennt der Landwirt die Höhenlage seiner Äcker. Dagegen sind die Jahrestemperatur und Jahresniederschlag schwieriger zu ermitteln. Diese Vorgehensweise sichert zudem eine ausreichende Datenbasis zur Ermittlung der standorttypischen Spannweiten der Humuskennwerte.

In Tab. 20 sind die standorttypischen Spannweiten der Humusgehalte in Abhängigkeit von der Bodenart und der Höhenlage zusammengestellt. Für die Humusqualität wurde nur der Einfluss der Bodenart berücksichtigt, weil der Einfluss der Höhenlage gering ist. Diese Spannweiten gelten für grundwasserferne Ackerstandorte. Sie sollen zur Bewertung des Humusgehalts (C_{org} , N_t) und der Humusqualität (C_{org}/N_t) von Ackerböden in Bayern verwendet werden.

Wegen der oben erwähnten Schwierigkeit, der zu kleinen Datenbasis, wurde der Einfluss der Viehhaltung nicht mit berücksichtigt.

Tab. 20: Standorttypische Humusgehalte (C_{org} , N_t) und Humusqualität (C_{org}/N_t)

Bodenart	Höhe m	C_{org} %	N_t %	C_{org} / N_t
leicht	< 350	0,7 - 1,4	0,06 - 0,12	10,4 - 12,6
	350-550	0,8 - 1,6	0,07 - 0,14	
mittel	< 350	1,0 - 1,5	0,09 - 0,15	9,6 - 11,3
	350-550	1,1 - 2,1	0,11 - 0,19	
	>550	1,5 - 2,6	0,15 - 0,24	
schwer	< 350	1,2 - 2,1	0,12 - 0,22	9,2 - 10,8
	350-550	1,3 - 2,6	0,13 - 0,25	
	>550	2,3 - 3,8	0,23 - 0,40	

6 Hinweise für die Praxis

6.1 Bodenprobenahme

Die Aussagekraft der Humuskennwerte hängt entscheidend von der Bodenprobenahme ab. Die Beprobung von kleinen Teilflächen (kleiner 10 m²), deren Position bekannt ist (am einfachsten mittels GPS, s. Absatz 3.2), hat gegenüber der „üblichen“ Mischprobe, die aus mehreren über die gesamte Schlagfläche verteilten Einstichen gewonnen wird, den entscheidenden Vorteil, dass diese kleinen Teilflächen wesentlich einheitlicher als der ganze Schlag sind. Damit sind auch kleine Veränderungen des Humusgehalts und der Humusqualität im Laufe der Zeit erfassbar, man kann also die Humusversorgung langfristig genau verfolgen. Es wird empfohlen, mindestens 3 solcher Teilflächen (kleiner 10 m²) pro Schlag zu beproben. Von jeder Teilfläche werden mit einem Bohrer (Durchmesser 35 mm) in einer Tiefe von 0 - 15 cm 6 Bodenkerne entnommen, die zu einer Mischprobe vereint werden. Bei 3 Teilflächen sind es 3 Mischproben. Diese 3 Mischproben werden auf C_{org} und N_t und Bodenart untersucht. Bei der nächsten turnusmäßigen Humusuntersuchung werden diese 3 Teilflächen wieder beprobt.

Die Probenahme soll grundsätzlich in Frühjahr vor der Vegetationszeit stattfinden, wenn die Pflanzenreste (Wurzeln, Stoppeln, Stroh, Blätter) weitgehend abgebaut sind. Die Pflanzenreste werden bei der Humusuntersuchung mit erfasst und verfälschen die Messergebnisse. Die Beprobung in Wintergetreide hat sich in der Praxis bewährt. Die Beprobung in Klee gras soll wegen der störenden Pflanzenreste vermieden werden. Die Probenahme soll vor der Ausbringung der Gülle und des mineralischen Stickstoff-Düngers oder frühestens zwei Wochen danach erfolgen. Bei kombinierter Bodenbearbeitung (pfluglose Bodenbearbeitung und gelegentliche Grundbodenbearbeitung mit Pflug) soll die Bodenprobenahme möglichst in dem der Herbstfurche (Pflugeinsatz) folgenden Frühjahr stattfinden. Das sichert langfristig eine bessere Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse.

6.2 Humusparameter, Humusuntersuchung

Bei der Humusuntersuchung soll neben dem organischen Kohlenstoff (C_{org}) immer auch der Gesamtstickstoff (N_t) als Maß für den organischen Stickstoff im Boden mitbestimmt werden. Diese beiden Humusparameter werden in den meisten Laboren in einem analytischen Schritt simultan und quantitativ analysiert. Somit kann nicht nur der Humusgehalt (C_{org}, N_t) sondern auch die Humusqualität (C_{org}/N_t) bestimmt werden. Diese Humusparameter (C_{org}, N_t, C_{org}/N_t) sind weltweit anerkannte Standardparameter.

Die übliche Berechnung des Humusgehalts (C_{org} x 1,72) ist nicht gerechtfertigt, da der Faktor 1,72 nicht allgemein gültig ist (Capriel, 2005).

Die Humusuntersuchung soll in einem Turnus von 6 - 10 Jahren durchgeführt werden. Bei Fruchtfolgen, die überwiegend Humus zehrende Fruchtarten haben (siehe unten), ist ein sechsjähriger Untersuchungsturnus empfehlenswert.

Die regelmäßige Humusuntersuchung ist der einzige Weg, um die Humusversorgung von Ackerböden sicher zu erfassen. Auf dieser Basis kann man die Humusversorgung mittels geeigneter Bewirtschaftung optimieren.

Die verschiedenen Humusbilanzmethoden sind generell einfache Prognose-Modelle für den organischen Kohlenstoff, die weder den Einfluss der Bodenart und des anorganischen Bodenanteils, noch den des Klimas (Niederschlag, Temperatur) und der Bodenbearbeitungsintensität auf den organischen Kohlenstoff mit berücksichtigen. Hervorzuheben ist zudem die Tatsache, dass die Humusbilanz den globalen Klimawandel nicht berücksichtigt. Diese Faktoren spielen bekanntlich eine wichtige Rolle beim Humusaufbau und Humusabbau. Deshalb sind die Humusbilanzmethoden im Allgemeinen mit Fehlern behaftet. Die alleinige Anwendung der Humusbilanzmethode ohne begleitende Humusuntersuchung ist deshalb nicht ratsam. Selbst wenn mehrere Jahre in Folge positive Humussalden errechnet werden, ist ungewiss, ob die Humusversorgung ausreichend ist. Es besteht das Risiko, dass trotz positiver Humussalden der tatsächliche Humusgehalt abnimmt. Zudem gibt die Humusbilanz im Gegensatz zur Humusuntersuchung keine Auskunft über den Stickstoff im Boden. Der Stickstoff als Bestandteil des Humus ist für die Bodenfruchtbarkeit und den Umweltschutz von Bedeutung.

6.3 Bestimmung der Bodentextur

Die Bestimmung der Ton-, Schluff- und Sandanteile soll für jede Teilfläche ($< 10 \text{ m}^2$) durchgeführt werden (siehe Bodenprobenahme). Es wird empfohlen ein Standardverfahren (z.B. DIN ISO 11277 oder VDLUFA Methode C 2.2.1) zu verwenden. Der finanzielle Mehraufwand ist vertretbar, weil die Standardverfahren genauer sind als die Fingerprobe und die Bestimmung nur einmal erforderlich ist.

6.4 Bewertung der Humuskennwerte

Für die Bewertung des Humusgehaltes (C_{org} , N_t) und der Humusqualität (C_{org}/N_t) von Ackerböden sollen die standorttypischen Spannweiten der Tab. 20 herangezogen werden. Sie gelten für konventionell und ökologisch bewirtschaftete Ackerschläge.

Bei Viehhaltung kann der obere Bereich der jeweiligen Spannweiten in Betracht gezogen werden. Da der Einfluss der Viehhaltung nicht quantifiziert werden konnte (unzureichende Datenbasis, siehe oben), soll diese Bewertung allerdings von einem Fachmann vorgenommen werden.

6.5 Erhaltung der standorttypischen Humuskennwerte

Die Ergebnisse des Humusmonitorings in Bayern im Rahmen des Bodendauerbeobachtungsflächen-Programms (BDF) der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft deuten auf eine Abnahme der mittleren C_{org} -Gehalte um etwa 3 % in den Acker- und Grünlandböden zwischen 1986 und 2007 hin. Die Ursachen für die Abnahme der Humusgehalte sind vielfältig. Die Humusabnahme ist primär von der Bewirtschaftung verursacht. Die Hauptursachen sind der abnehmende Getreide- und Futterleguminosenanteil, der zuneh-

mende Hackfrucht- und Maisanteil, die abnehmende Bedeutung des Stallmistes zugunsten der Gülle, das Abfahren von Stroh und der abnehmende Zwischenfruchtanbau (Capriel, 2009).

Die Grenzwerte nach Cross Compliance für Humusgehalte, $C_{\text{org}} = 0,6 \%$ bei einem Tonanteil $< 13 \%$ bzw. $C_{\text{org}} = 0,9 \%$ bei einem Tonanteil $> 13 \%$, sind für Bayern offensichtlich zu niedrig (Abb. 3). Sie sind deshalb für Beratungszwecke in Bayern ungeeignet.

Allerdings soll man berücksichtigen, dass die Humusgehalte von etwa 48 % der Ackerböden in Bayern in einem sehr niedrigen ($C_{\text{org}} = 0,6 - 1,1 \%$) bzw. niedrigem Bereich ($C_{\text{org}} = 1,1 - 1,5 \%$) liegen. Der Rest hat Humusgehalte $> 1,5 \%$ (Abb. 4). In beiden Fällen ist eine optimale Humusversorgung (Bewirtschaftung) erforderlich, um die standorttypischen Humusgehalte zu erreichen bzw. zu erhalten.

Folgende landwirtschaftliche Maßnahmen erhalten und fördern den Humusgehalt und die Humusqualität:

- Standortgerechte vielfältige Fruchtfolge mit einem ausgewogenen Verhältnis zwischen humuszehrenden Fruchtarten (z. B. Zuckerrübe, Kartoffel, Mais, Raps, Sonnenblume, Getreide mit Strohabfuhr) und humusmehrenden (z. B. Klee gras, Luzerne, Körnerleguminosen, Zwischenfrüchte).
- Ausreichende Versorgung des Bodens mit organischer Substanz. Die Zufuhr von organischer Substanz erfolgt durch die bei der Ernte auf dem Feld verbleibenden Ernterückstände (Wurzeln, Stoppeln, Stroh, Sprossmasse), den gezielten Anbau von Zwischenfrüchten zur Gründüngung und durch Wirtschaftsdünger (Stallmist, Gülle, Kompost).
- Gleichmäßige Verteilung und Einarbeitung von Pflanzenresten und organischen Düngern.
- Standort- und bedarfsgerechte Bodenbearbeitung. Eine hohe Bearbeitungsintensität verstärkt den Humusabbau.
- Vermeidung von schädlichen Bodenverdichtungen. Eine gute Bodenstruktur ist die Voraussetzung für die Sauerstoff- und Wasserversorgung und damit für eine optimale mikrobielle Aktivität.
- Beachtung der Grundsätze der guten fachlichen Praxis bei Düngungsmaßnahmen.
- Standortgerechte Kalkversorgung. Die Bodenbakterien schränken ihre Aktivität mit zunehmender Versauerung ein. Die Kalkung hebt den pH-Wert an und fördert damit die mikrobielle Aktivität.

7 Literaturverzeichnis

Baldock J.A. und J.O. Skjemstad (2000): Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry*, 31, 697-710.

Batjes N. H. (1996): Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47, 151-163.

Capriel P., T. Beck, H. Borchert und P. Härter (1990): Relationship between soil aliphatic fraction extracted with supercritical hexane, soil microbial biomass and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 2, 415-420.

Capriel P., T. Beck, H. Borchert, J. Gronholz und G. Zachmann (1995): Hydrophobicity of the organic matter in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 27, 1453-1458.

Capriel P (1997): Hydrophobicity of the organic matter in arable soils: influence of management. *European Journal of Soil Science*, 48, 457-462.

Capriel P. (2005): Humusversorgung der Ackerböden,
<http://www.LfL.bayern.de/internet/stmlf/lfl/iab/bodenbearbeitung/13479/index.php>

Capriel P. (2006): Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern (1. Auflage). Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 16.
http://www.LfL.bayern.de/publikationen/daten/schriftenreihe/p_21843.pdf

Capriel P. und D. Seiffert (2009): 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern. Teil 3: Entwicklung der Humusgehalte zwischen 1986 und 2007. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 10, 2009.
http://www.LfL.bayern.de/publikationen/daten/schriftenreihe/p_36603.pdf

“Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie“, Mitteilung der EU Kommission, Brüssel, 16.04.2002 , [celex-txt - 52002DC0179 -](#)

Agrar- und Umweltklimatologischer Atlas von Bayern (1961 - 1990), Ausgabe 1997, Deutscher Wetterdienst Weihenstephan.

Oades J.M. (1995): An overview of processes affecting the cycling of organic carbon in soils. In “Role of nonliving organic matter in the earth`s carbon cycle”, R.G. Zepp and Ch. Sonntag, Eds., John Wiley & Sons, 1995.

Prechtel A., M. v. Lützow, B. U. Schneider, O. Bens, C. G. Bannick, I. Kögel-Knabner und R. F. Hüttl (2009): Organic carbon in soils of Germany: Status quo and the need for new data to evaluate potentials and trends of soil carbon sequestration. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 601–614.

Schlesinger W. H. (1997): *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change*, 2nd ed., London, New York: Academic Press.

8 Anhang

Karte C_{org} -Gehalt

Graphische Darstellung des C_{org} -Gehaltes der 454 untersuchten Ackerstandorte in Bayern. Für jeden Standort wurden die C_{org} -Werte der 5 Teilflächen herangezogen und daraus wurde ein Mittelwert errechnet.

Karte N_t -Gehalt

Graphische Darstellung des N_t -Gehaltes der 454 untersuchten Ackerstandorte in Bayern. Für jeden Standort wurden die N_t -Werte der 5 Teilflächen herangezogen und daraus wurde ein Mittelwert errechnet.

Karte Humusqualität

Graphische Darstellung der Humusqualität (C_{org}/N_t) der 454 untersuchten Ackerstandorte in Bayern. Für jeden Standort wurden die C_{org}/N_t -Werte der 5 Teilflächen herangezogen und daraus wurde ein Mittelwert errechnet.

Karte Bodenart

Graphische Darstellung der Bodenart der 454 untersuchten Ackerstandorte in Bayern.

Karte Höhenlage

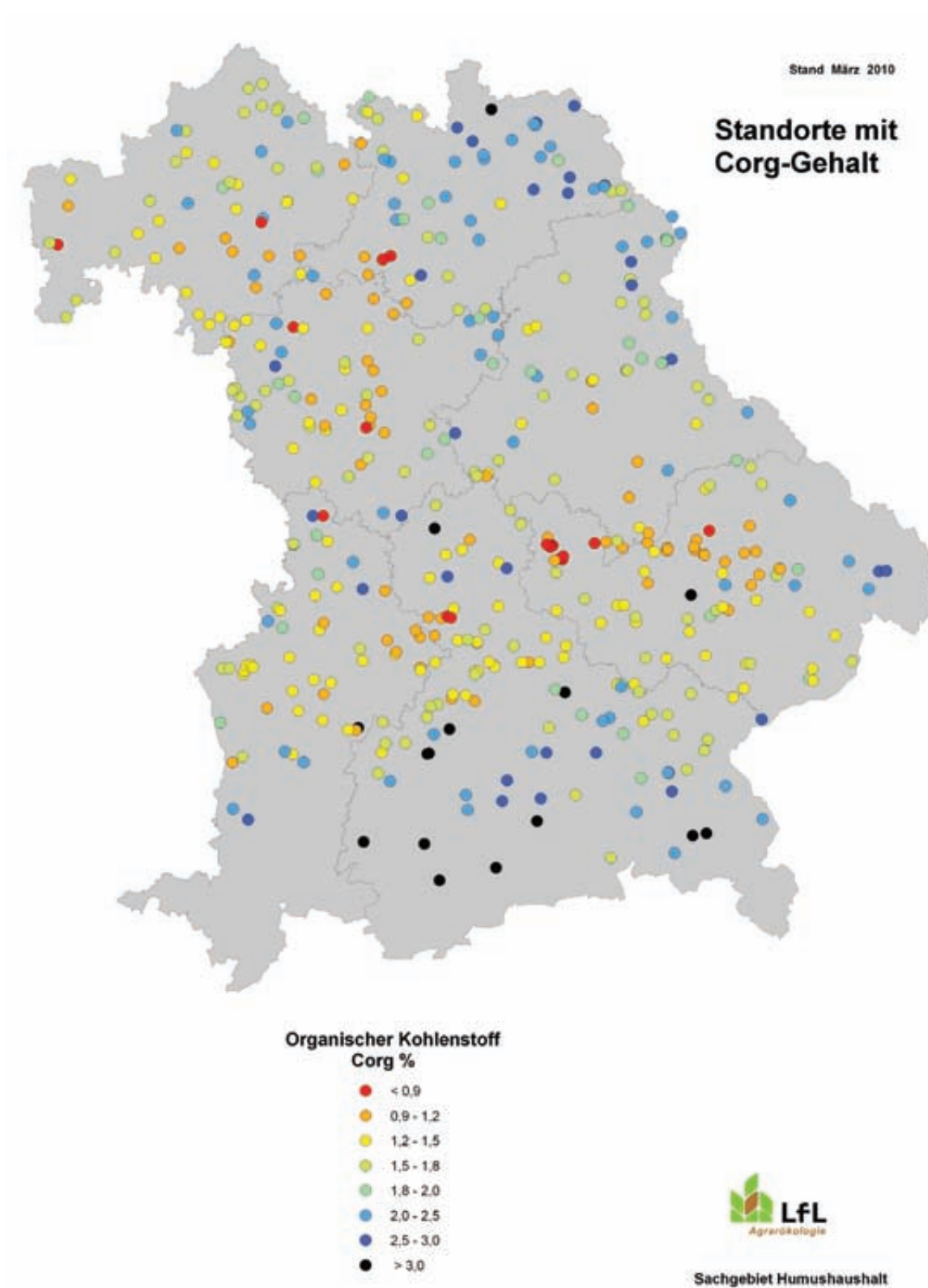
Graphische Darstellung der Höhenlage der 454 untersuchten Ackerstandorte in Bayern.

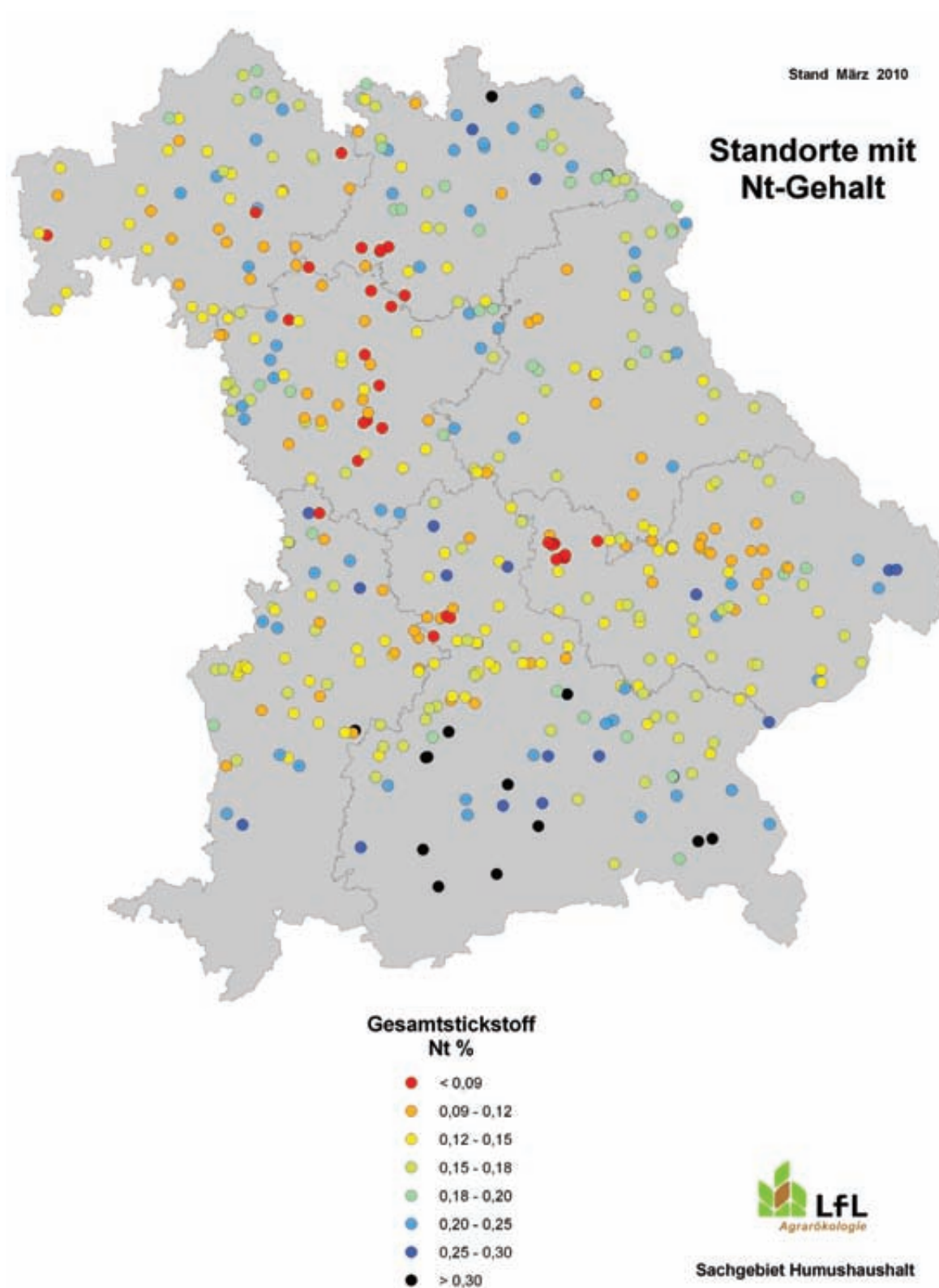
Karte Temperatur

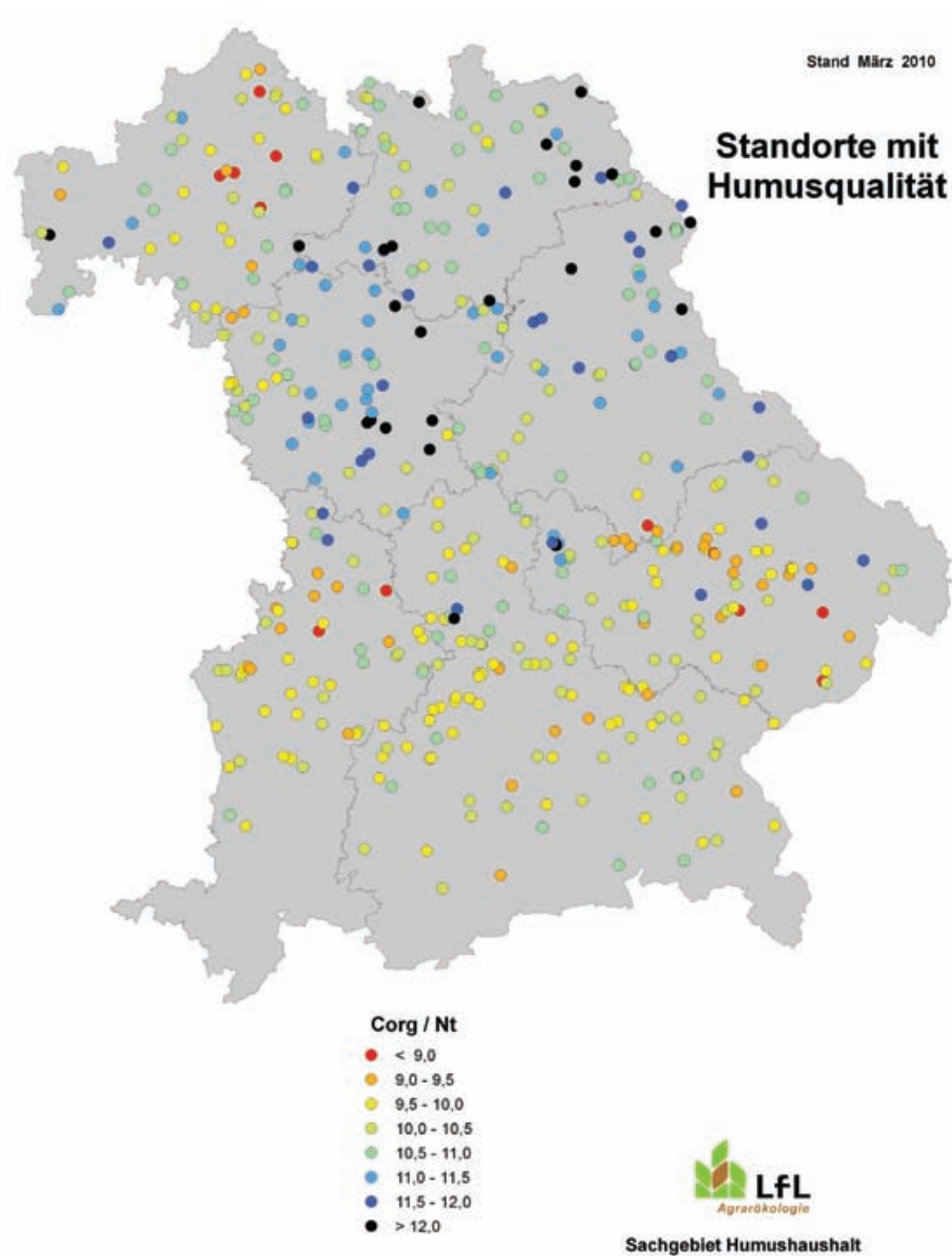
Graphische Darstellung der Jahrestemperatur der 454 untersuchten Ackerstandorte in Bayern.

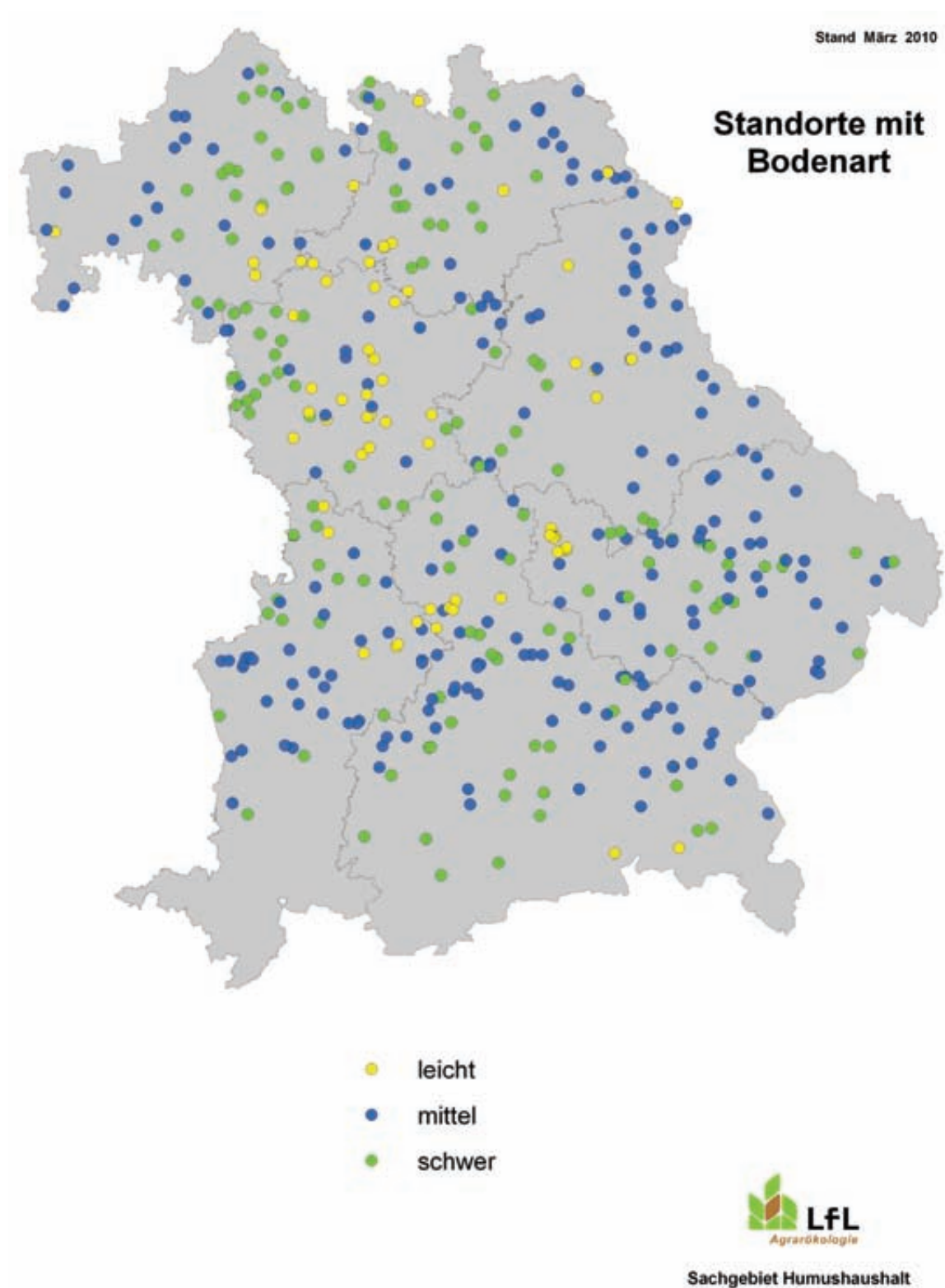
Karte Niederschlag

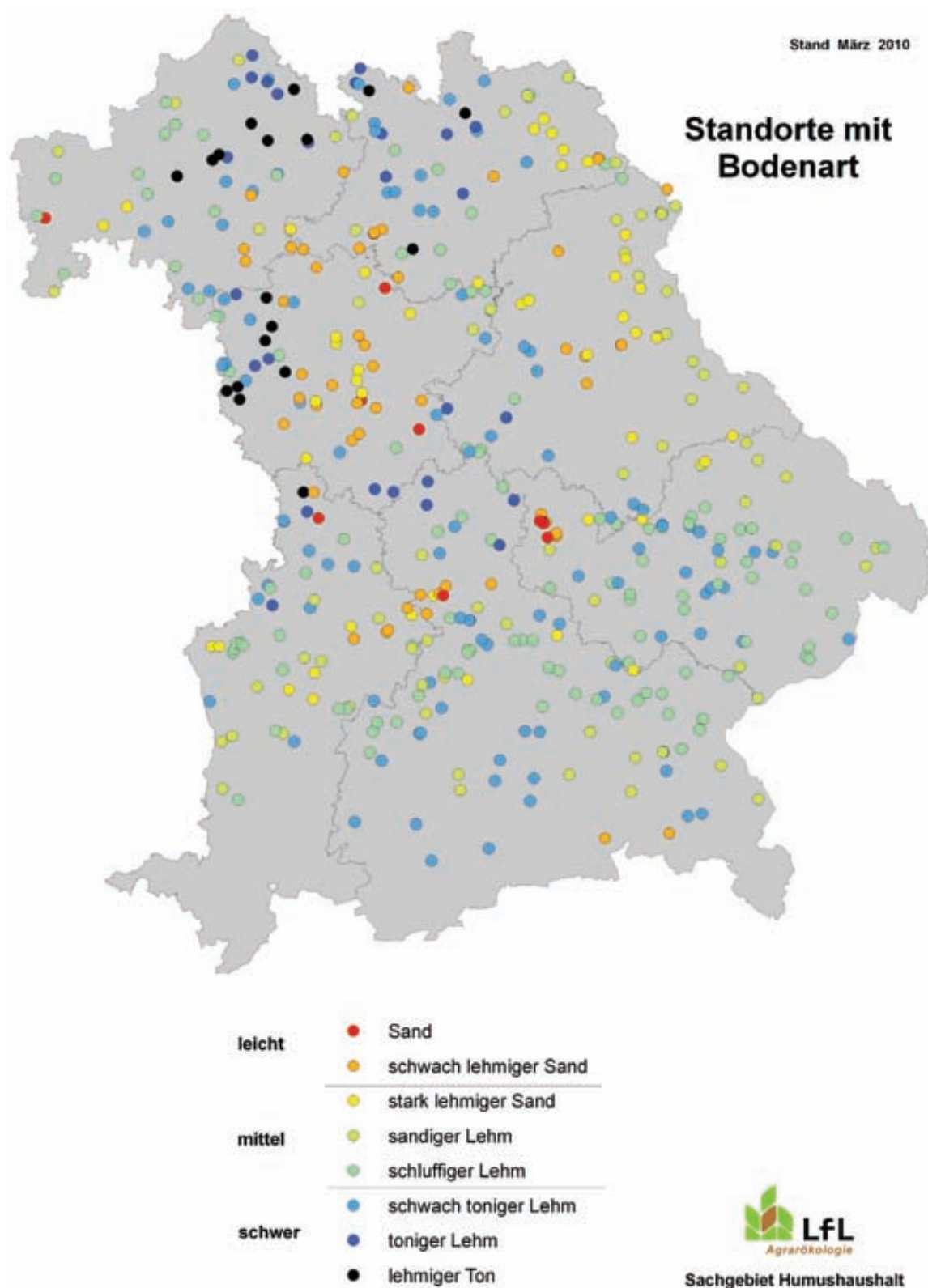
Graphische Darstellung des Jahresniederschlags der 454 untersuchten Ackerstandorte in Bayern.

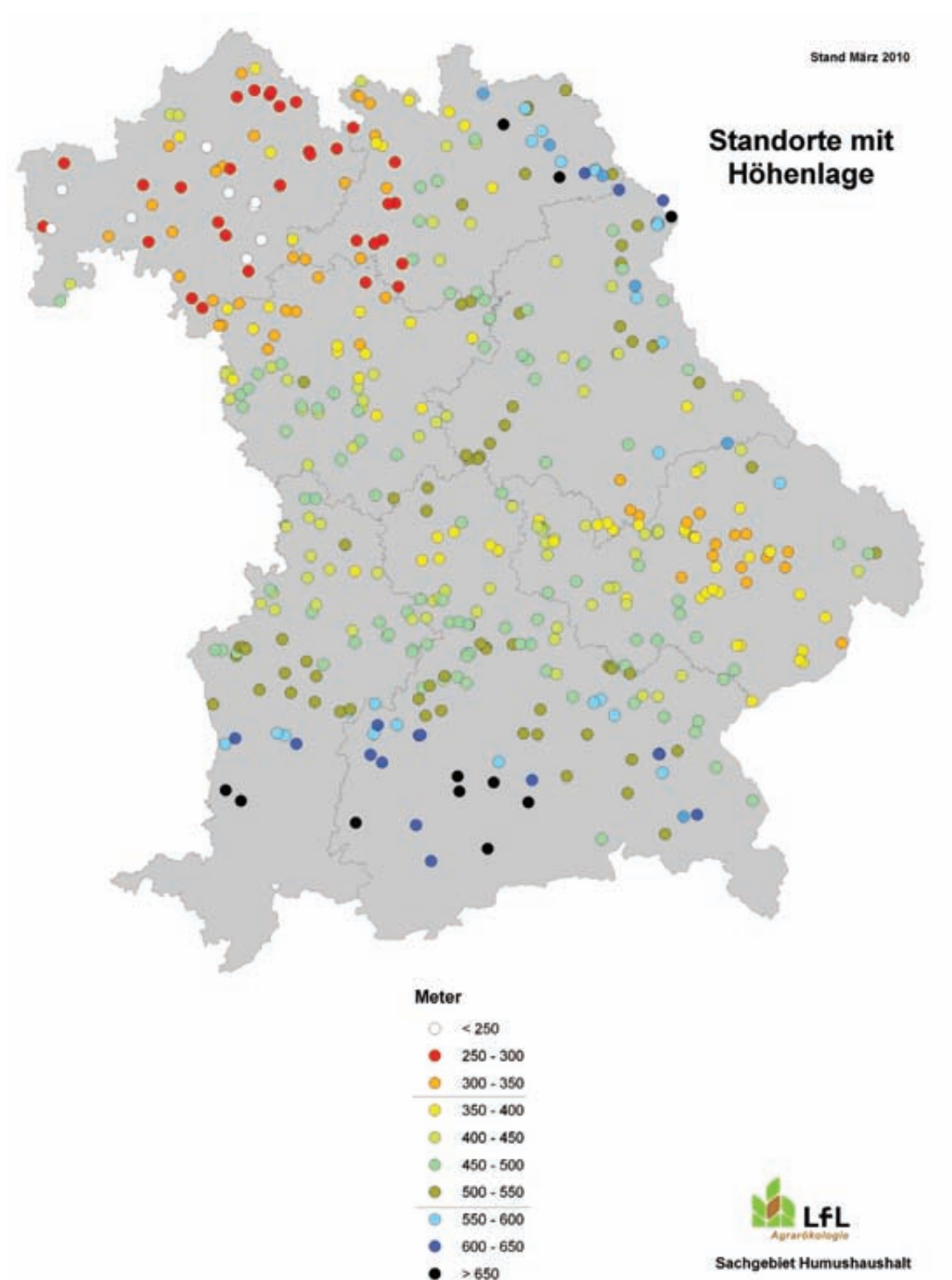


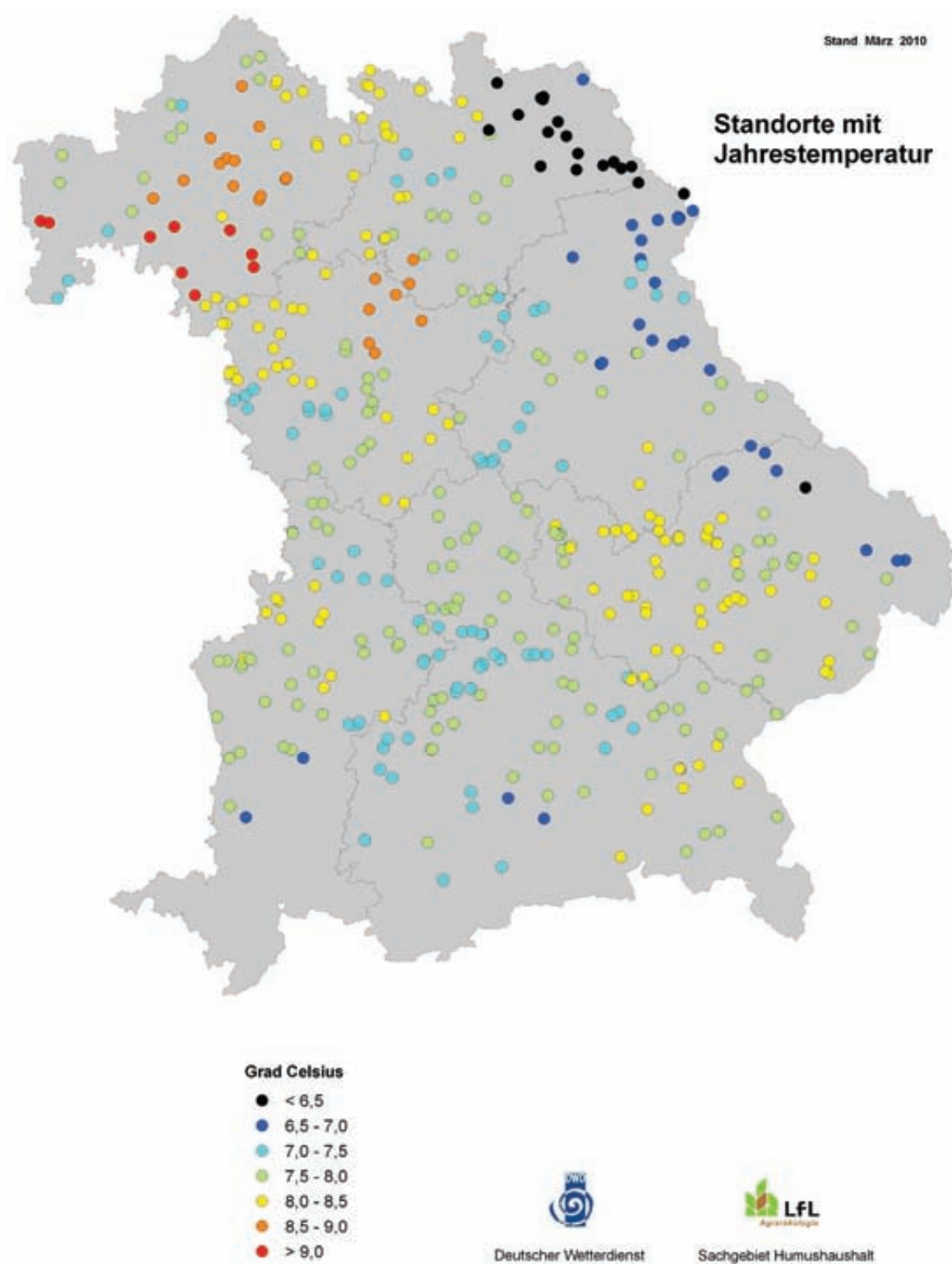


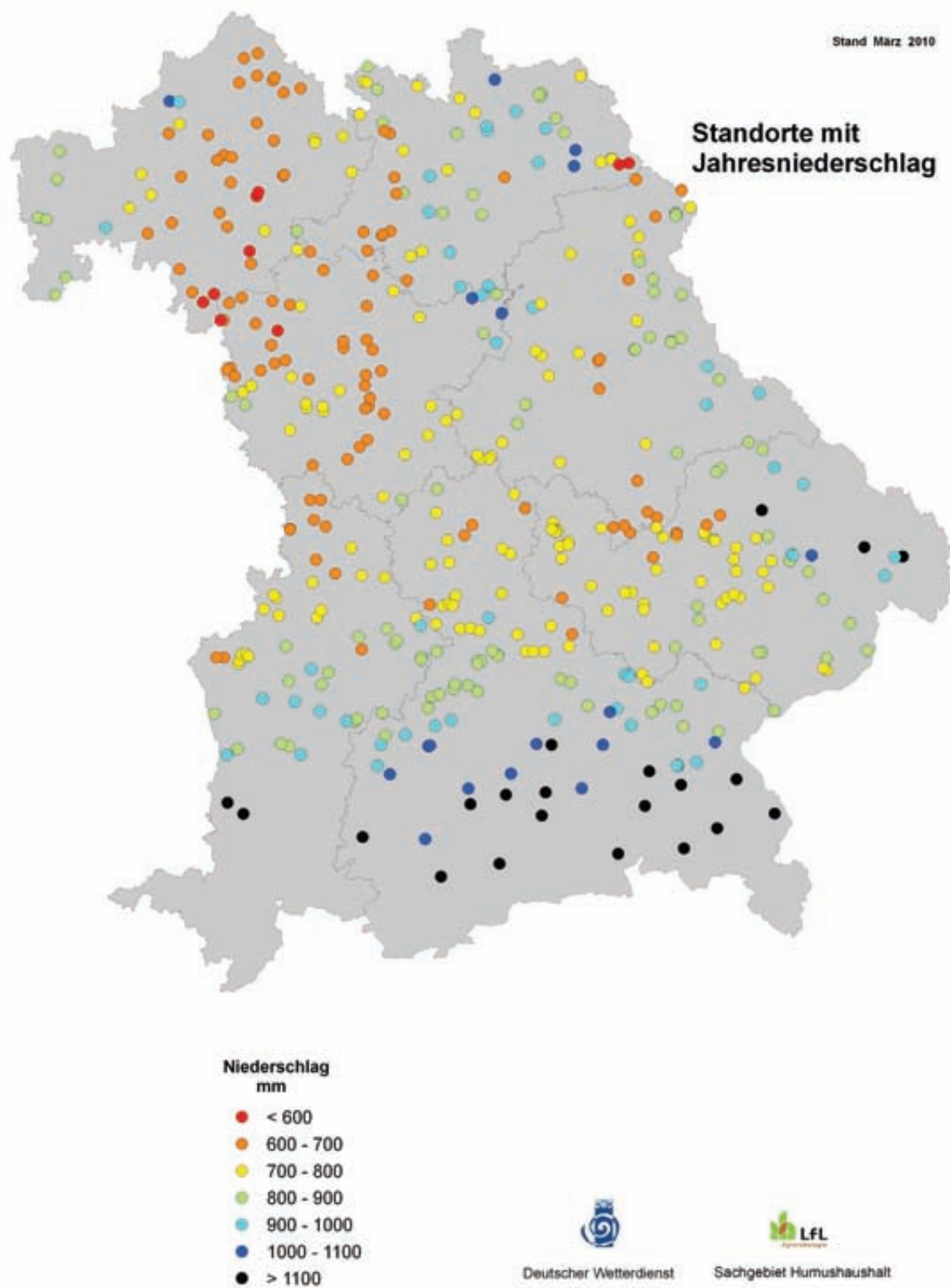












Danksagung

Die Sachgebiete Agrarökologie und Boden bei den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten haben die Betriebe ausgewählt und die Bodenproben entnommen.

Herr Detlef Seiffert, Frau Brigitte Dirscherl, Frau Veronika Ilmberger und Frau Heidi Scherzer-Gois haben die aufwändige und anspruchsvolle Verwaltung der etwa 11.400 Proben und der Messwerte organisiert und die Bodenaufbereitung und die Analysen im Labor durchgeführt.

Ich möchte mich bei allen bedanken.