

TEXTE

26/2016

Erarbeitung fachlicher, rechtlicher und organisatorischer Grundlagen zur Anpassung an den Klimawandel aus Sicht des Bodenschutzes

Teil 3: Bestimmung der Veränderungen des
Humusgehalts und deren Ursachen auf Ackerböden
Deutschlands

TEXTE 26/2016

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3711 71 213
3 UBA-FB 002187

Erarbeitung fachlicher, rechtlicher und organisatorischer Grundlagen zur Anpassung an den Klimawandel aus Sicht des Bodenschutzes

Teil 3: Bestimmung der Veränderungen des Humusgehalts und deren Ursachen auf Ackerböden Deutschlands

von

Dr. Marc Marx, Carsten Schilli, Prof. Dr. agr. Jörg Rinklebe
Bergische Universität Wuppertal, Institut für Grundbau, Abfall- und
Wasserwesen, Lehr- und Forschungsgebiet Boden- und
Grundwassermanagement, Wuppertal

Dr. Michael Kastler, Charlotte Molt, Carolin Kaufmann-Boll, Dr. Silvia Lazar
ahu AG Wasser-Boden-Geomatik, Aachen

Prof. Dr. Gunnar Lischeid
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Müncheberg

Prof. Dr. habil. agr. Dr. h.c. Martin Körschens, Bad Lauchstädt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Bergische Universität Wuppertal
Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen
Lehr- und Forschungsgebiet Boden- und Grundwassermanagement
Pauluskirchstr. 7
42285 Wuppertal

Abschlussdatum:

Juli 2015

Redaktion:

Fachgebiet II 2.7 Bodenzustand und europäischer Bodenschutz
Dr. Frank Glante

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-fachlicher-rechtlicher-0>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2016

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3711 71 213 3 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Teil A – Datenabfrage, Datennachverfolgung, Zusammenführung und Qualitätssicherung	14
1 Anlass und Ziel	14
2 Abfragekonzepte	17
3 Übersicht über die Daten – Datenabfrage und Datennachverfolgung	18
3.1 Bewirtschaftungsdaten	19
3.2 BDF-Daten	19
3.3 Klimatologische Daten	20
4 Datenzusammenführung	20
Teil B – Ergebnisse der Literaturrecherche	21
1 Einleitung	21
2 Einflüsse auf den Humushaushalt von Ackerböden	22
3 Klimatologische Einflüsse	23
4 Flächenhistorie und Humusstatus	24
5 Standorteigenschaften	24
5.1 Bodenart	24
5.2 Wasserhaushalt	25
6 Auswirkungen der Flächenbewirtschaftung	25
6.1 Bodenbearbeitung	25
6.2 Düngung	26
6.3 Hauptfrucht und Erntemenge	27
7 Richtwerte für den Humusgehalt	27
Teil C – Datenauswertung	29
1 Statistik	29
1.1 TOC-Veränderung	29
1.2 Bewirtschaftungsdaten (Humusbilanzierung)	29
1.3 Klimadaten des DWD	30
1.4 Multiple Regressionen	30
2 Ergebnisse	31
2.1 Temperatur	31
2.2 Niederschlag	32

2.3	Verdunstung.....	33
2.4	Bodenfeuchte	34
2.5	TOC-Daten.....	35
2.7	Bewirtschaftungsdaten	36
2.8	TOC-Gehalte.....	36
2.9	TOC-Veränderungen.....	37
2.10	Betrachtung sensibler Klimaräume (Einfluss des Klimas auf die TOC-Gehalte).....	39
2.11	Einfluss der Bewirtschaftung auf die TOC-Veränderung	41
2.12	Ergebnisse der nichtlinearen Regression	42
3	Methodische Ansätze zur Ableitung von TOC-Erwartungsspannen.....	49
4	Vergleich mit Dauerfeldversuchen	53
5	Entwicklung von Vorschlägen zum verbesserten Bodenschutz im Hinblick auf die C-Gehalte.....	57
5.1	Darstellung der erarbeiteten Ergebnisse vor dem Hintergrund des Bodenschutzes.....	57
5.2	Vorschläge zum verbesserten Bodenschutz	61
6	Anforderungen an die Daten und Auswertungsmethoden.....	76
6.1	Boden-Dauerbeobachtung und Dauerfeldversuche	76
6.2	Datenqualität	77
6.3	Datenauswertung	78
7	Anforderungen an die Verbesserung des Vollzugs der „guten fachlichen Praxis“	79
8	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.....	79
9	Danksagung	80
	Literatur.....	81
	Anhang.....	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einflüsse von Klima und Nahrungsmittelproduktion auf die Bodenfunktionen.....	14
Abbildung 2: Häufigkeitsverteilungen der Humusgehalte (Klassen nach KA5) für die drei Nutzungsarten Acker, Grünland und Wald.....	16
Abbildung 3: Hypothetisches Beispiel zur Darstellung der Ermittlung der TOC-Veränderungen	29
Abbildung 4: Veränderung der durchschnittlichen Jahrestemperatur an den BDF-Standorten im Zeitraum 1975 bis 2013	31
Abbildung 5: Veränderung des durchschnittlichen Jahresniederschlags an den BDF-Standorten im Zeitraum 1975 bis 2013	32
Abbildung 6: Veränderung der durchschnittlichen Jahresverdunstung (nach Penman 1956) an den BDF-Standorten im Zeitraum 1975 bis 2013.....	33
Abbildung 7: Einteilung der Bodenfeuchte an BDF-Standorten	34
Abbildung 8: Räumliche Verteilung der TOC-Gehalte an den Acker-BDF.....	37
Abbildung 9: Räumliche Verteilung der Acker-BDF mit mindestens vier TOC-Messungen und deren Veränderungen	38
Abbildung 10: Anteil der Veränderungen von Acker-BDF mit unterschiedlicher Anzahl von TOC-Messungen.....	39
Abbildung 11: BDF mit signifikanten Veränderungen des Durchschnittswerts der Jahrestemperatur, des Jahresniederschlags und der Jahresverdunstung, alle ohne signifikante Veränderung des TOC-Gehalts im Zeitraum 1975 bis 2013.....	41
Abbildung 12: Mittels Support Vector Machine bestimmter Beitrag unabhängiger Variablen, die den TOC-Gehalt erklären	43
Abbildung 13: Einfluss des Niederschlags und des Tongehalts auf den TOC-Gehalt an den Acker-BDF unter Berücksichtigung der Jahresmitteltemperatur, bestimmt mittels SVM	43
Abbildung 14: Cluster des Einflusses klimatischer Größen auf den TOC-Gehalt im bundesweiten Maßstab.....	45
Abbildung 15: Mittels Support Vector Machine bestimmter Beitrag unabhängiger Variablen, die die langfristigen TOC-Veränderungen erklären	47
Abbildung 16: Einfluss des Anfangs-TOC-Gehalts und des Tongehalts auf die langfristige TOC-Veränderung (in % pro Jahr) an den Acker-BDF	47
Abbildung 17: Mittels Support Vector Machine bestimmter Beitrag unabhängiger Variablen auf die kurzfristigen TOC-Veränderungen	48
Abbildung 18: Vergleich von Spannweiten der TOC-Gehalte in Abhängigkeit der Höhe und Bodenart, abgeleitet aus drei Methoden.....	50

Abbildung 19: Vergleich der TOC-Verläufe von Bad Lauchstädt (DFV) und BY 72 (BDF).....	55
Abbildung 20: Vergleich der TOC-Verläufe von Prag (DFV) und SH 29 (BDF)	55
Abbildung 21: Vergleich der TOC-Verläufe von Thyrow (DFV) und NI17 (BDF).....	56
Abbildung 22: Vergleich der TOC-Verläufe von Braunschweig (DFV) und NI3 (BDF).....	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter der Länderabfrage	18
Tabelle 2: Vorliegende Klimadaten	20
Tabelle 3: Anzahl der Acker-BDF mit Anzahl der TOC-Messungen, maximaler Anzahl der Messzeitpunkte und der Laufzeit nach Bundesland	35
Tabelle 4: Anzahl der gelieferten Bewirtschaftungsdaten aus fünf Bundesländern	36
Tabelle 5: Kennwerte zu Bodenart und TOC-Gehalt der sechs BDF mit signifikanten Veränderungen von durchschnittlicher Jahrestemperatur, Jahresniederschlag und Jahresverdunstung zwischen 1975 und 2013.....	40
Tabelle 6: Anzahl der BDF mit gemessenen TOC-Werten (Anzahl Zeitpunkte) und maximale Laufzeit.....	46
Tabelle 7: Einteilung der Bodenart nach VDLUFA (aus Capriel 2010).....	49
Tabelle 8: Einordnung der TOC-Gehalte der BDF nach der Erwartungsspanne und Gegenüberstellung der gemessenen mit den zu erwartenden Werten.....	52
Tabelle 9: Übersicht der Dauerfeldversuch (DFV)- und Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF)-Standorte und sowie deren ausgewählte Eigenschaften.....	53
Tabelle 10: DPSIR-Ansatz: Einfluss der Landwirtschaft auf die Bodennutzung und das Klima.....	58
Tabelle 11: Folgen des Klimawandels und deren Einflüsse auf den Humusvorrat des Bodens	59

Abkürzungsverzeichnis und Begriffsdefinitionen

AG Boden	Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Aktive organische Substanz	entspricht (in ihrer Funktion) der mikrobiellen Biomasse
AOC	Assimilable Organic Carbon, Assimilierbarer Kohlenstoff: der im Boden vorhandene, von Bakterien assimilierbare organische Kohlenstoff Dieser Kohlenstoff stammt aus (bioverfügbaren), abbaubaren org. Substanzen. Verfahren: DIN/ISO 16072 (2005, Ersatz für DIN 19737), AT 4 (DeponieV, Anhang 4, 2009). Anmerkung: Die Verfahren sind wassergehalts-, zeit-, und temperaturabhängig. Ergebnisse aus verschiedenen Untersuchungen sind daher oft nicht vergleichbar. Die Methoden gelten für aerobe, ungesättigte Böden.
BioAbfV	Bioabfallverordnung Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden
C _{org}	Organischer Kohlenstoff im Boden oder Kompost wird synonym zu → TOC verwendet C _{org} umfasst den gesamten organisch gebundenen Kohlenstoff in einer Matrix wie Boden (oder anderen Substraten). Entsprechend der Bodenkundlichen Kartieranleitung (→ KA5, AG Boden 2005) ergibt sich aus dem Gehalt an C _{org} im Boden multipliziert mit dem Faktor 1,72 der Humusgehalt (Kehrwert 0,58).
DirektZahlVerpfIV	Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung - DirektZahlVerpfIV Verordnung über die Grundsätze der Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand
DVF	Dauerfeldversuchsfläche
Grunddüngung	Unter Grunddüngung wird in der Regel die Versorgung mit Phosphat, Kalium und Magnesium verstanden vgl. Landwirtschaftskammer NRW: Der bei der Bodenuntersuchung ermittelte Nährstoffgehalt wird angegeben in der Dimension mg / 100 g Boden. Die Bewertung des Nährstoffgehaltes hinsichtlich des Düngedarfes erfolgt durch Einstufung in die Versorgungsstufen A bis E. Angestrebt werden Nährstoffgehalte im mittleren Bereich (Stufe C), die sich in einer Vielzahl von Feldversuchen als ökonomisch optimal erwiesen haben.
Humifizierung	Umwandlung der organischen Substanz in Huminstoffe, nach deren Abbau bzw. deren Zersetzung
Huminstoffe	stark umgewandelte organische Substanzen, die weitgehend gegen Mineralisierung stabilisiert sind (Blume et al. 2009)
Humus	vgl. → Organische Bodensubstanz (OBS)

Humusäquivalente (Häq)	<p>Einheit (angegeben in kg → Humus-C / (ha*a) zur Bewertung des Humusreproduktionsbedarfs (→ Humusbedarf) von Fruchtarten und der Humusreproduktionsleistung organischer Primärsubstanzen</p> <p>Sie geben nach VDLUFA (2004) die Humusmengen an, die im Boden nutzungsbedingt durch Mineralisierung verloren gehen und durch organische Düngung ersetzt werden sollten. Die Ableitung von Humusäquivalenten aus der humusreproduktionswirksamen organischen Substanz erfolgt über einen mittleren C_{org}-Gehalt in der organischen Substanz und eine mittlere temporäre Humifizierung der humusreproduktions-wirksamen organischen Substanz im Boden (C_{org}-%).</p>
Humusbedarf auch: Humus-C-Bedarf bzw. Humusreproduktionsbedarf	<p>nach VDLUFA (2004): „Humusmengen (ausgedrückt als kg Humus-C / ha), die im Boden nutzungsbedingt verloren gehen und durch organische Düngung ersetzt werden sollten (anbauspezifischer Humusbedarf)“, um einen gleich bleibenden Humusgehalt im Boden zu erhalten</p> <p>Der Humusbedarf nach VDLUFA wird anbauspezifisch unterschieden, da die Verringerung des Humusvorrats im Boden durch Bewirtschaftung, Fruchtfolge und Bodenbearbeitung bedingt ist und die organischen Materialien unterschiedlich reproduktionswirksam sind. Zu beachten ist: In der Literatur wird der Begriff „Humusbedarf“ teilweise gleichbedeutend mit „Humus-C-Bedarf“ verwendet. Humus-C ist nach BGK (2011) „der für die Humusreproduktion im Boden anrechenbare Kohlenstoff. In organischen Düngern wird Humus-C in der Regel aus dem Glühverlust (organische Substanz) multipliziert mit 0,58 und Multiplikation des Ergebnisses mit dem substratspezifischen Faktor für die Reproduktionswirksamkeit (Anteil Humus-C) ermittelt.“</p>
Humusbilanzierung	<p>Methode nach VDLUFA zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland (vgl. VDLUFA 2004)</p> <p>Im Rahmen der Cross Compliance ist eine Humusbilanz optional als Nachweis für den Erhalt organischer Substanz im Boden vorgesehen. Dazu soll der Humusbilanzsaldo (Humussaldo) im Bereich zwischen -75 kg C/(ha*a) und +125 kg C/(ha*a) liegen und darf den Wert von -75 kg C/(ha*a) nicht unterschreiten (DirektZahlVerpflV).</p>
Humusreproduktion	<p>die Zufuhr von organischen Primärsubstanzen zur Aufrechterhaltung einer nutzungstypischen Mineralisierung umsetzbarer organischer Bodensubstanz bei Erhaltung des standort- und nutzungstypischen Humusgehalts im Boden</p> <p>„Je höher das Niveau der Humusreproduktion ist, desto mehr organische Primärsubstanz wird im Boden humifiziert und später wieder mineralisiert. Die notwendige Höhe der Humusreproduktion auf Ackerflächen hängt vom Nutzungstyp (integrierter bzw. ökologischer Landbau) sowie der Humusversorgung in der Vergangenheit ab und wird in drei Stufen differenziert.“ (Reinhold 2011)</p>
Humussaldo	nach VDLUFA (2004): Humuszufuhr (Reproduktionsleistung organischer Materialien) minus Humusbedarf (anbauspezifisch)
Humusstufen	<p>nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (AG Boden 2005) Einteilung des Gehalts an OBS in Masse- % in 8 Humusstufen:</p> <p>h0 = humusfrei, h1 = < 1 % (sehr schwach humos), h2 = 1 - 2 % (schwach humos), h3 = 2 - 4 % (mittel humos), h4 = 4 - 8 % (stark humos), h5 = 8 - 15 % (sehr stark humos), h6 = 15 -30 % (anmoorig), h7 = > 30 % (organische Horizonte)</p>
Inerter organische Substanz	<p>organischer Kohlenstoff im Boden, der unter natürlichen Bedingungen selbst bei langjähriger Unterlassung jeglicher Düngung und dem Anbau humuszehrender Fruchtarten nicht unterschritten wird</p> <p>gleichbedeutend mit: Dauerhumus</p>
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Ausgabe (AG Boden 2005)

Mineralisation	vollständiger mikrobieller Abbau der organischen Substanz im Boden (OBS) zu einfachen anorganischen Verbindungen wie CO ₂ , NO ₂ etc., bei dem auch die in den organischen Stoffen enthaltenen Pflanzennährelemente freigesetzt werden (z.B. Mg, Fe, N, S) (Blume et al. 2010)
Organische Bodensubstanz (OBS)	die im Boden integrierte, lebende und abgestorbene organische Substanz wird synonym zu „Humus“ verwendet
Organische Primärschubstanz (OPS)	umsetzbare organische Substanzen wie Ernterückstände (z.B. Stroh), Pflanzenwurzeln, Gülle, Kompost etc., die im Boden verbleiben oder diesem zugeführt werden Nach VDLUFA wird die OPS verwendet, um einen nutzungsbedingten Humusabbau auszugleichen. Sie kann sowohl in die umsetzbare OBS eingehen, als auch anteilig humifiziert werden.
oTS	in der Landwirtschaft verwendeter Begriff für die „Organische Trockensubstanz“, beschreibt den Anteil organischer Substanz in Düngemitteln, z.B. Kompost, bezogen auf die Trockenmasse; wird messtechnisch bestimmt durch den Glühverlust in % (vgl. → C _{org})
Stabile Fraktionen	Die stabilen Kohlenstoff-Anteile in Böden (C _{stabil}) können u.a. aus der Differenz von C _{org} und dem umsetzbaren Anteil (C _{ums}) ermittelt werden [C _{org} = C _{stabil} + C _{ums}]. Zu berücksichtigen ist jedoch bereits hier, dass die Begriffe in der Literatur nicht einheitlich und oft ohne eindeutige Definitionen und Zeitangaben verwendet werden (vgl. Tab. 1).
TC	Total Carbon, Gesamtkohlenstoff: im Boden vorhandener, elementarer, organischer und anorganischer Kohlenstoff, durch Aufheizen in O ₂ -haltigem, CO ₂ -freien Gasstrom bei mindestens 1.000°C oxidierbar. Verfahren nach BBodSchV, Anhang 1: Organischer Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung DIN ISO 10694:08.96 Neues EN-Verfahren (prEN15936, Dezember 2010): Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung
TIC	Total Inorganic Carbon, Anorganischer Kohlenstoff: im Boden vorhandener, elementarer anorganischer Kohlenstoff, der durch Säurebehandlung als Kohlendioxid freigesetzt wird (z.B. Carbonate, Carbide) Verfahren Scheibler-Finkener Apparatur, Schlichting et al. (1995) oder Differenzbildung TIC = TC - TOC (DIN ISO 10694:08.96) Neues EN-Verfahren (prEN15936, Dezember 2010): Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung
TOC	Total Organic Carbon, Gesamtgehalt an elementarem organischem Kohlenstoff (TOC), wird z.B. als Differenz zwischen Gesamtkohlenstoff (TC) und anorganischem (Carbonat-) Kohlenstoff bestimmt (z.B. nach DIN ISO 10694, vgl. BBodSchV, Anhang 1: Organischer Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung), entweder nach Entfernen des Karbonates durch Säure oder durch Abzug des getrennt ermittelten Karbonat-Kohlenstoffs Neues EN-Verfahren (prEN15936, Dezember 2010): Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung TOC kann nicht mit den Glühverlusten (GV) (DIN 19684) gleichgesetzt werden, da hier Abweichungen auftreten. wird synonym zu → C _{org} verwendet
TS	Trockensubstanz, entspricht TM = Trockenmasse

1 Anlass und Ziel

Die organische Substanz in Böden, insbesondere unter landwirtschaftlicher Nutzung, ist von hoher Relevanz, u.a. aufgrund ihrer Fähigkeit, Nährstoffe zu binden und die Wasserspeicherkapazität des Bodens zu erhöhen. Der Gehalt an organischer Substanz wirkt sich positiv auf die Qualität der Böden hinsichtlich der landwirtschaftlichen Nutzbarkeit aus. Zusätzlich wirkt er bodenstrukturbildend und aggregatstabilisierend und erhöht somit die Resistenz des Bodens gegenüber Schadeinwirkungen, wie z.B. durch Erosion. Darüber hinaus nimmt die organische Substanz als C-Speicher eine wichtige Funktion im C-Kreislauf ein.

Die hohe Relevanz der organischen Substanz für Böden spiegelt sich auch im Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG 1998) wider. Hier heißt es in § 17 Absatz 2, dass im Rahmen der „Guten fachlichen Praxis“ der landwirtschaftlichen Bodennutzung die Bodenfruchtbarkeit und Leistungsfähigkeit des Bodens nachhaltig zu sichern ist. Dazu gehört unter Punkt 7, dass „...der standorttypische Humusgehalt des Bodens ... erhalten wird“. Die Einflüsse auf den (C-Gehalt im) Boden – und damit auf seine Funktionen – durch das Klima und die Flächennutzung sind vielfältig und eng miteinander verknüpft (Abbildung 1).

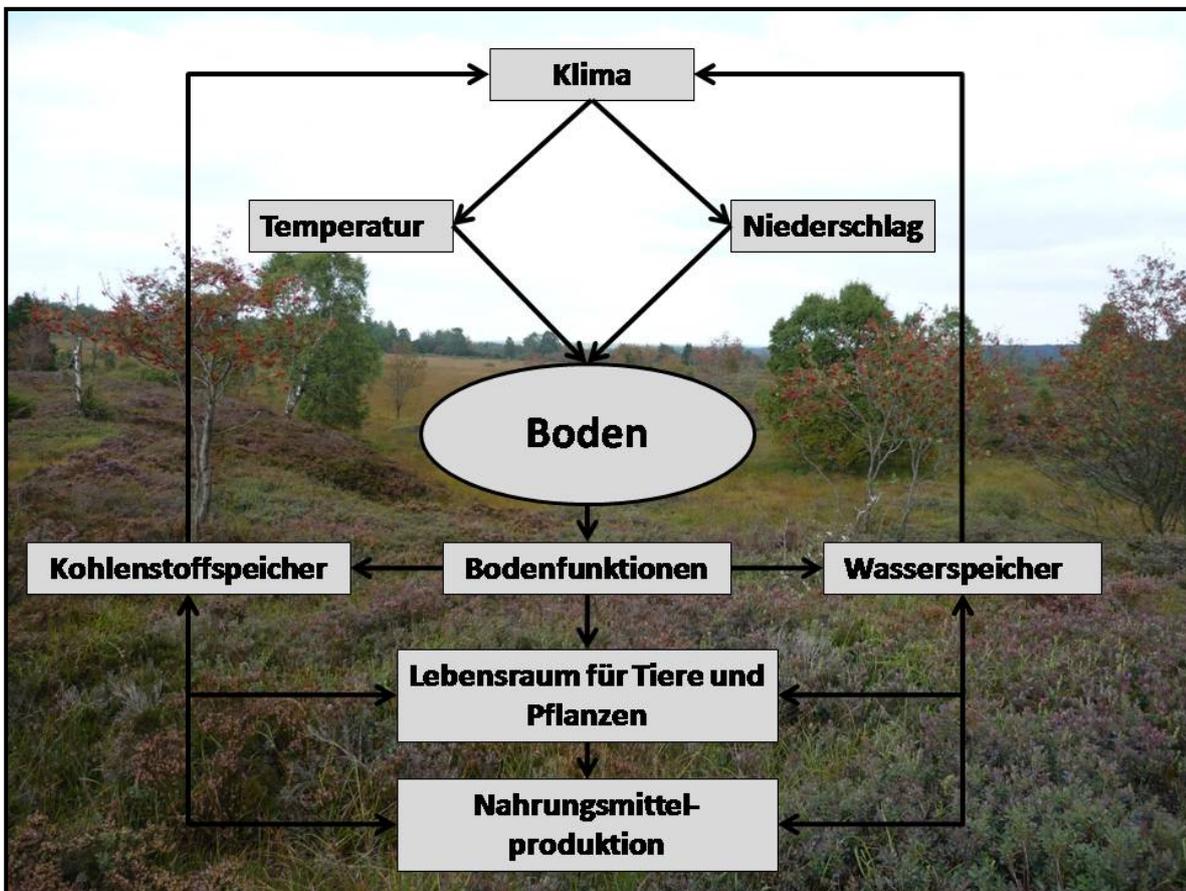


Abbildung 1: Einflüsse von Klima und Nahrungsmittelproduktion auf die Bodenfunktionen

Es wird erwartet, dass von zukünftigen klimatologischen Veränderungen auch Einflüsse auf den C-Haushalt von Böden ausgehen. Die prognostizierten Veränderungen des Wasserhaushalts und der Bodentemperaturen werden Auswirkungen auf die mikrobielle Aktivität im Boden und somit auf dessen Gehalt bzw. Vorrat an organischem Kohlenstoff zeigen. Die Freisetzung von klimarelevanten Gasen (z.B. CO₂ und CH₄) wird maßgeblich durch die Umsetzung der im Boden gespeicherten organischen Substanz beeinflusst (Wessolek et al. 2008).

Agrarisch genutzte Böden weisen mit 1 bis 2 % an organischem Kohlenstoff (TOC) (entspricht etwa 1,7 bis 3,5 % Humusgehalt laut AG Boden 2005) im Vergleich zu Grünland- oder Waldböden verhältnismäßig geringe Konzentrationen auf (Rinklebe & Makeschin 2003; Wessolek et al. 2008).

Bisherige Untersuchungen zu C-Gehalten und -vorräten beschränken sich meist auf die flächenhafte Erfassung des C-Status. Eine bundesweite Auswertung von über 7.000 Analysen von Oberböden aus dem Fachinformationssystem Boden der BGR (FISBo BGR) zum C-Status wurde vor wenigen Jahren vorgelegt (Düwel et al. 2007, Utermann et al. 2009). Systematische bundesweite Auswertungen zur Identifikation und Interpretation von Veränderungen des C-Gehalts an vielen verschiedenen Flächen in Deutschland fehlen bisher. Die Auswertungen zu zeitlichen Änderungen werden meist nur an Einzelflächen oder als Vergleich weniger Einzelflächen durchgeführt. Die Fragestellungen solcher Untersuchungen sind häufig sehr speziell und führen meist zu kaum regionalisierbaren Ergebnissen. Einzelne Arbeiten aus den Monitoringprogrammen der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche (DFV) und der Boden-Dauerbeobachtung haben bereits zeitliche Veränderungen der C-Gehalte flächenhaft untersucht. An ackerbaulich genutzten Einzelflächen der DFV konnten bereits gerichtete Entwicklungen der organischen Bodensubstanz beschrieben werden (Ellmer & Gäbert 2009, Körschens 2010). Auch auf Landesebene wurden bereits Veränderungen der C-Gehalte an Boden-Dauerbeobachtungsflächen näher untersucht (Capriel & Seiffert 2009).

Die vergleichsweise niedrigen TOC-Gehalte der Ackerflächen (Abbildung 2), verschiedene Einflussfaktoren auf die Gehalte (z.B. Flächenbewirtschaftung, Klima) und Unsicherheiten bei der Analytik erschweren eine abgesicherte Feststellung von zeitlichen Veränderungen der Kohlenstoffgehalte. Untersuchungen, deren Ziel der Nachweis systematischer Veränderungen des TOC-Gehalts ist, sollten im Idealfall einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren abdecken (Körschens 2010).

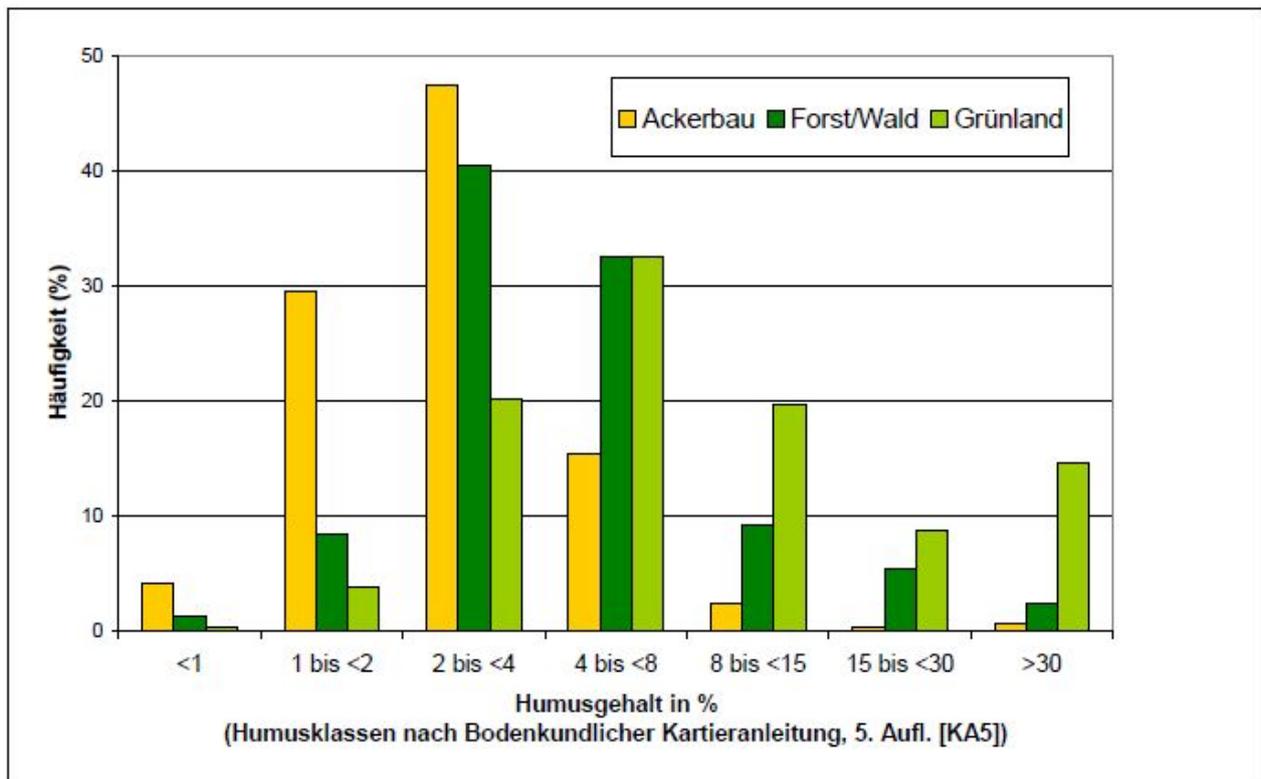


Abbildung 2: Häufigkeitsverteilungen der Humusgehalte (Klassen nach KA5) für die drei Nutzungsarten Acker, Grünland und Wald (aus Düwel et al. 2007)

Mit dem Programm der Boden-Dauerbeobachtung steht ein Monitoringprogramm zur Verfügung, welches (bundeslandabhängig) auf Messergebnisse von bis zu 25 Jahren zurückgreifen kann. Im Programm der Boden-Dauerbeobachtung werden an etwa 800 Flächen physikalische, chemische und biologische Parameter untersucht. Die Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) können als repräsentativ im Hinblick auf die naturräumliche Gliederung angesehen werden (Spatz 2001). Zusätzlich spiegeln die BDF bundesweit die Hauptnutzungen, regionale Bodenformen wie auch spezielle Belastungsszenarien wider. Die Standorte der Boden-Dauerbeobachtung können in Basis-BDF und Intensiv-BDF unterschieden werden (Barth et al. 2001). Die Differenzierung erfolgt anhand des Umfangs und der Intensität der durchgeführten Untersuchungen.

An den Basis-BDF wird im Wesentlichen die Bodenfestphase untersucht. Es erfolgt eine umfassende und wiederholte (parameterabhängig in Zyklen von ein bis zehn Jahren) Erhebung von biologischen, chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften. Zusätzlich werden relevante zusätzliche Informationen wie z.B. Flächenbewirtschaftungsdaten erhoben. Die Basis-BDF dienen der Merkmalsdokumentation.

An Intensiv-BDF werden dynamische Bodenprozesse dokumentiert. An diesen Flächen werden neben der Festphase des Bodens auch die Bodenlösung und die Depositionsmengen sowie deren Zusammensetzung untersucht. Ein wesentliches Ziel ist ein zeitlich höher auflösendes Monitoring sowie ferner eine Prozessidentifikation und -dokumentation.

Vor dem Hintergrund möglicher flächenhafter Einflüsse von Änderungen in der Flächenbewirtschaftung und des Klimas wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) das F+E-Vorhaben „Erarbeitung fachlicher, rechtlicher und organisatorischer Grundlagen zur Anpassung an den Klimawandel aus Sicht des Bodenschutzes, Teilvorhaben 03: Bestimmung der Veränderungen des Humusgehalts und deren Ursachen auf Ackerböden Deutschlands“ (FKZ 3711 71 213/03) bearbeitet. Wesentliche Ziele des F+E-Teilvorhabens waren:

- eine zielgerichtete Zusammenführung bestehender Datenbestände der BDF (Analyse- und Bewirtschaftungsdaten) und des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie von Ergebnissen landwirtschaftlicher Dauerfeldversuche (DFV) zum Vergleich von Veränderungen der TOC-Gehalte;
- die multivariate statistische Auswertung des zusammengestellten Datenbestandes der BDF im Hinblick auf die
 - Darstellung der C-Gehalte und C-Pools auf den BDF in Deutschland,
 - Identifikation von räumlichen und/oder zeitlichen Veränderungen des C-Gehalts in Böden;
- Auswertung und Bewertung der Einflüsse von Klima und Flächenbewirtschaftung auf die C-Gehalte;
- Erarbeitung von Vorschlägen zum verbesserten Bodenschutz auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse;
- Entwicklung von Vorschlägen zur Qualitätsverbesserung des Boden-Dauerbeobachtungsprogramms durch angepassten Datenaustausch und Parameterumfang.

In Teil A des vorliegenden Abschlussberichts zum F+E-Teilvorhaben werden die Ergebnisse und der derzeitige Stand der „Datenabfrage“ und „Datennachverfolgung“ kurz zusammengefasst. In Teil B werden die Ergebnisse der Literaturrecherche dargestellt. Teil C zeigt die Ergebnisse der Datenauswertung, den Vergleich von BDF mit Dauerfeldversuchen und Vorschläge zu TOC-Erwartungsspannen sowie Vorschläge zu verbessertem Bodenschutz im Hinblick auf die TOC-Gehalte.

2 Abfragekonzepte

Für die Abfrage der Daten wurden insgesamt drei Abfragekonzepte erstellt. Auf der Basis der Literaturrecherche wurde ein Abfragekonzept für die Bewirtschaftungsdaten entwickelt.

- Für die Analysedaten der BDF wurden Parametersets zusammengestellt, die als Grundlage der Abfrage für unterschiedliche Daten(quellen) verwendet werden können.
- Für die klimatologischen Daten der BDF-Standorte wurde ein separater Entwurf verfasst, da andere Datenhalter angefragt werden müssen als bei den Analysedaten der Bodenproben.

3 Übersicht über die Daten - Datenabfrage und Datennachverfolgung

Die Datenabfrage wurde mit Unterstützung des Umweltbundesamtes (UBA) organisiert und durchgeführt. In Tabelle 1 sind alle Parameter zusammengestellt, die für das vorliegende Vorhaben abgefragt wurden. Die einzelnen Parameter sollten möglichst alle geliefert werden, da sie für eine umfassende Beurteilung von Humusgehalten und Humusentwicklung wichtig sind. Es wurden also keine Angaben priorisiert abgefragt. Weitere Angaben über Parameter, die für die Beschreibung des Humusstatus und dessen Prognose nötig sind und sich durch die Bearbeitung dieses F+E-Vorhabens ergeben haben, erfolgen in Teil C, Kapitel 6.

Tabelle 1: Parameter der Länderabfrage

Beschreibende Parameterliste	Standort-Formular	Profil-Formular	Messwert-Formular
Abgefragte Nutzungen	Standort-ID	Standort-ID	Standort-ID
Acker	Kennung	Profil-ID	Profil-ID
Grünland	Name	Auflage- / Horizontbezeichnung	Projekt / Kampagne
Ackerbrache	Bundesland	OK Auflage- / Horizont (cm)	Flächen-ID oder Proben-ID
Grünlandbrache	Gebietstyp	UK Auflage- / Horizont (cm)	Messwert-ID
	spezifische Belastungen	Auflage Ja/Nein	Probenahmedatum
Abgefragte Gebietstypen	Hochwert	Bodenartenhauptgruppe (KA5)	OK Entnahmetiefe (cm)
ländlicher Raum	Rechtswert	Bodenartengruppe (KA5)	UK Entnahmetiefe (cm)
Verdichtungsraum	Bezugssystem	Bodenart (KA5)	Beprobungsmethode
	Bodenausgangsgestein	Grobbodenanteil in %	Analysedatum
Abgefragte Auflagen / Horizonte / Tiefenstufen	Bodentyp	Humusgehalt (KA5)	Methoden-Code BZE/BDF
Profilansprache bis 2 m u. GOK	Bodensubtyp	Carbonatgehalt (KA5)	Untersuchungsmethode
	Nutzung allgemein	effektive Lagerungsdichte (KA5)	Verfahrenshinsweis
Abgefragter Probenahmezeitraum	Nutzung speziell		Messverfahren
keine Beschränkung	Bewirtschaftungsart		Parameter
	Bewirtschaftungsintensität		Präfix-Bestimmung
Abgefragte Begleitparameter	Aufbringung Klärschlamm		Messwert
Grundwasserflurabstand	Aufbringung Kompost		Dimension
Grundwasserstufe (KA5)	Grundwasserflurabstand		
organischer Kohlenstoff / C _{org} / TOC (Masse-%)	Grundwasserstufe (KA5)		
Gesamtkohlenstoff / TC (Masse-%)	Bemerkungen		
anorganischer Kohlenstoff / TIC (Masse-%)			
Gesamtstickstoff / Nt			
Gesamtphosphor / P			

Beschreibende Parameterliste	Standort-Formular	Profil-Formular	Messwert-Formular
Leicht verfügbarer Phosphor (P-CAL)			
Kalium			
Karbonatgehalt (Masse-%)			
Humusgehalt (Masse-%)			
Bodenart Feinboden (KA5)			
Tongehalt Feinboden (Masse-%)			
Schluffgehalt Feinboden (Masse-%)			
Sandgehalt Feinboden (Masse-%)			
Grobbodenanteil (Vol.-%)			
Trockenrohdichte (g/cm ³)			
KAK (H-Wert, S-Wert)			
LK			
FK			
nFK			
pH-Wert			
Mikrobielle Biomasse C / C _{mik}			
Mikrobielle Basalatmung			
Kennzeichnung spezifischer Belastungen			
Klärschlammaufbringung / wiederholte Klärschlammaufbringung			
Kompostaufbringung			
Wirtschaftsdünger			
Aufschüttung			

3.1 Bewirtschaftungsdaten

Die Bewirtschaftungsdaten wurden bei den Betreibern der BDF vom UBA angefragt. Die Daten wurden nach Eingang im UBA unbearbeitet an den Auftragnehmer übergeben. Die Daten wurden nach Eingang vom Auftragnehmer auf Lesbarkeit, Struktur und Plausibilität geprüft. Wenn notwendig erfolgte eine Datentransformation sowie -auswahl für die weitere Projektbearbeitung.

3.2 BDF-Daten

Als Basisdatensatz für eine Auswertung lagen Daten aus dem F+E-Vorhaben „Auswertung der Veränderungen des Bodenzustands für Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) und Validierung räumlicher Trends unter Einbeziehung anderer Messnetze“ (FKZ 3707 71 203) vor. Die bei den Ländern angefragten Daten sollten den bestehenden Datensatz ergänzen. Für die Abfrage der Daten wurde ein Excel-Template erstellt, um eine Struktur vorzugeben. Die Daten wurden vom UBA bei den Betreibern angefragt und nach Erhalt in die abgesprochene Struktur über-

führt, die sich in vorherigen Projekten als geeignet erwiesen hatte. Anschließend erfolgte eine Übergabe an den Auftragnehmer. Die Daten wurden nach Eingang beim Auftragnehmer auf Struktur und Plausibilität geprüft. Bei Bedarf erfolgten eine Datenauswahl und eine Datentransformation für die weitere Projektbearbeitung.

3.3 Klimatologische Daten

Die im Abfragekonzept aufgeführten Daten wurden über das UBA beim DWD angefragt. Tabelle 2 enthält eine Übersicht der gelieferten Daten.

Tabelle 2: Vorliegende Klimadaten

Klimainformation	Beschreibung
Niederschlag, Temperatur und Verdunstung	Die Daten wurden als bundesweites Raster mit 1 km-Pixelgröße übergeben. Es liegt für den Zeitraum von 1975 bis 2013 vor. Jedes Jahr wurde in „Frühjahr“, „Sommer“, „Herbst“ und „Winter“ unterteilt. Für jeden Parameter liegen somit 156 Rasterdaten vor.
Bodenfeuchte	Es liegen für den Zeitraum von 1970 bis 2000 Mittelwerte der berechneten Bodenfeuchte für jeden Tag im Jahr vor. Die Bodenfeuchten wurden bundesweit auf die Bodenarten SI2 und Ut3 und die Feldfrucht Winterweizen normiert.

Eine automatisierte Zuweisung der Klimadaten zu den BDF war für fünf Standorte (Baltrum, Lindhof 1, List, Rieth und Schneizelrath) nicht möglich. Die Standorte liegen nicht innerhalb der Abgrenzungen des DWD. Die Standorte wurden dem nächstliegenden Raster-Pixel mit Klimainformationen zugewiesen. Für alle fünf Standorte war mindestens ein Raster-Pixel mit Klimainformationen innerhalb eines Kilometers vorhanden.

4 Datenzusammenführung

In einem weiteren Schritt wurden die abgefragten Daten zur Auswertung in einer Datenbank zusammengeführt, deren Aufbau sich an den Anforderungen der statistischen Auswertung orientierte. Eine zentrale Aufgabe der Datenzusammenführung war die Harmonisierung, Qualitätssicherung und Einpflege der von den verschiedenen Institutionen zur Verfügung gestellten Daten sowie die kritische Prüfung von Daten aus verschiedenen Quellen zur gemeinsamen Verwendung.

1 Einleitung

Der organische Kohlenstoff ist Voraussetzung für die Bodenbildung und für die Erhaltung der Fruchtbarkeit des Bodens. Er macht den Unterschied zwischen Ausgangssubstrat und Boden aus. Alle Arbeiten zu Gehalt und Dynamik der organischen Bodensubstanz (OBS/Humus) basieren auf Untersuchungen des Gehalts an TOC. Der Anteil an organischer Substanz in Böden (OBS) ist ein wesentliches Merkmal bei der Bewertung von Böden. Dies gilt sowohl für die Bewertung der Bodenfruchtbarkeit als auch für die Rolle von Böden vor dem Hintergrund des prognostizierten Klimawandels.

Die organische Bodensubstanz wird in der Literatur unterschiedlich definiert. Stellvertretend für eine Vielzahl unterschiedlichster Definitionen sei hier die häufig verwendete nach Blume et al. (2010) genannt:

„Zur organischen Substanz der Böden gehören alle in und auf dem Mineralboden befindlichen abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Streustoffe und deren organische Umwandlungsprodukte. Auch die durch menschliche Tätigkeit eingebrachten z.T. synthetischen organischen Stoffe (z.B. Pestizide, organische Abfälle) werden dazu gerechnet. Die lebenden Organismen (das aus Bodenflora und -fauna bestehende Edaphon) sowie lebende Wurzeln gehören nicht zur organischen Substanz der Böden.“

Eine alleinige Bestimmung abgestorbener organischer Substanzen im Boden ist nicht möglich. Aus analytischen Gründen wird der organische Kohlenstoff in der lebenden Biomasse (die nicht bei der Probenvorbereitung aussortiert wird) mit erfasst (Blume et al. 2011). In der Praxis werden die Begriffe „organische Bodensubstanz“ und „Humus“ vielfach synonym verwendet, so auch nachfolgend.

Üblicherweise wird die OBS aus dem analytisch ermittelten Gehalt des Bodens an organischem Kohlenstoff durch Multiplikation mit dem Faktor 1,724 errechnet. Teilweise wird auch mit dem Faktor 2 gerechnet.

Als Speicher für Kohlenstoff in Böden nimmt die OBS eine wichtige Rolle im globalen C-Kreislauf ein. Im Boden sind etwa 80 % der terrestrischen organischen Kohlenstoffvorräte, die am aktiven Kohlenstoffkreislauf teilnehmen, gebunden (Blume et al. 2010). Von klimatologischen Veränderungen werden Einflüsse auf den C-Haushalt von Böden erwartet (Deutsche Bundesregierung 2008). Die prognostizierten Veränderungen des Wasserhaushalts und der Bodentemperaturen können sich auf die Umsetzungsprozesse der OBS auswirken. Die Umsetzung der im Boden gespeicherten organischen Substanz wird maßgeblich durch die temperatur- und feuchtesensitive mikrobielle Aktivität im Boden gesteuert (Diaz-Ravifina et al. 1993, Rinklebe & Prüß 2011), wodurch auch die Freisetzung von klimarelevanten Gasen, wie z.B. CO₂ und CH₄, beeinflusst wird (Wessolek et al. 2008). Die erwartete klimabedingte Beeinflussung der Umsetzung der OBS kann zu veränderten Gehalten bzw. Vorräten an OBS im Boden führen bzw. beitragen.

Hinsichtlich der Bodenfruchtbarkeit ist die OBS aufgrund ihrer Fähigkeit, Nährstoffe zu binden und die Wasserspeicherkapazität des Bodens zu erhöhen, von besonderer Relevanz (Rühlmann et al. 2006). Durch ihre strukturbildenden und aggregatstabilisierenden Eigenschaften wirkt sie

zusätzlich erosionshemmend. Die hohe Relevanz der organischen Substanz für Böden spiegelt sich auch im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG 1998) wider. In § 17 (2) Nr. 7 (Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft) heißt es:

„... dass der standorttypische Humusgehalt des Bodens, insbesondere durch eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz oder durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität erhalten werden soll.“

Die OBS ist zusätzlich von wirtschaftlichem Interesse, da sich ihr Gehalt auf die Erträge der landwirtschaftlich genutzten Flächen auswirkt. In den vergangenen Jahrzehnten konnte in umfangreichen Arbeiten verschiedener Autorinnen und Autoren durch die Auswertung von Dauerfeldversuchen nachgewiesen werden, dass die bodenverbessernde Wirkung der OBS auf Sandböden bis zu 10 % und auf Leimböden bis zu 6 % Ertragsvorteil bringt (Körschens et al. 2013).

Die Auswertung von 16 Dauerfeldversuchen mit insgesamt 246 Versuchsjahren (fruchtartenbezogen 350 Jahre) ergab einen Ertragsvorteil der kombinierten organisch-mineralischen Düngung im Vergleich zur ausschließlich optimalen Mineraldüngung von 6 %. Die geringste Wirkung war bei Winterweizen (n = 92) mit nur 3 % zu verzeichnen, die größten Unterschiede bei Kartoffeln (n = 40) mit 9 %.

2 Einflüsse auf den Humushaushalt von Ackerböden

Der Humushaushalt von landwirtschaftlichen Böden wird schon seit Langem mit großem Interesse beobachtet (Körschens 1998). Dabei müssen Untersuchungen zu Veränderungen der C_{org} Gehalte im Boden berücksichtigen, dass nicht die gesamte Menge der OBS durch die äußeren Einflüsse beeinflusst und umgesetzt werden kann. Der inerte Teil der organischen Bodensubstanz kann als der Gehalt an C_{org} definiert werden, „*der unter natürlichen Bedingungen bei langjähriger Unterlassung jeglicher Düngung und Anbau humuszehrender Fruchtarten bzw. Schwarzbrache nicht unterschritten wird*“ (Körschens 1980). Der inerte Teil der organischen Bodensubstanz ist standortabhängig und führt dazu, dass ein standorteigener Gehalt an C_{org} auch bei ausbleibender Düngung im Boden verbleibt (Körschens 1997). So wurde z.B. beim Dauerfeldversuch in Rothamsted nach 50-jähriger Monokultur mit Weizen trotz ausbleibender organischer Düngung ein Gehalt an TOC von 0,89 % nicht unterschritten (Jenkinson & Rayner 1977).

Vor dem Hintergrund der Bodenfruchtbarkeit und der zeitlichen Entwicklung der TOC-Gehalte wurden schon seit Beginn des letzten Jahrhunderts Untersuchungen an Dauerfeldversuchsflächen (DFV) durchgeführt. Die Humusversorgung von Böden wurde in zahlreichen DFV (vgl. Körschens 1998) intensiv erforscht. Verschiedene DFV können auf Zeitreihen der Beobachtungen des Gehalts an organischer Substanz von mehr als 100 Jahren zurückgreifen (Körschens 2005). Ein Einfluss der Flächenbewirtschaftung auf den Gehalt an OBS konnte an solchen Flächen wissenschaftlich nachgewiesen und dokumentiert werden (z.B. Rühlmann & Ruppel 2005; Zimmer et al. 2005; Körschens 2010; Körschens et al. 2014). An einzelnen Flächen der landwirtschaftlichen Dauerfeldversuche (z.B. Ellmer & Gäbert 2009) sowie ackerbaulich genutzter Moore (z.B. Heinemeyer & Gensior 2008) konnten z.B. Abnahmen der organischen Bodensubstanz beschrieben werden, in anderen Versuchen (Albert & Grunert 2013) eine Zunahme. Der Umgang mit den Böden durch die entsprechenden Bewirtschafter spielt eine wichtige Rolle für den Ge-

halt an OBS. Die dem Boden durch die Ernte entzogene Menge an Kohlenstoff oder der potentielle Verlust von Bodenmaterial durch Erosion sind in hohem Maß von der Flächenbewirtschaftung abhängig. Neben dem Entzug von Kohlenstoff wird dem Boden durch Düngemittel oder das Unterpflügen von Zwischenfrüchten jedoch auch Kohlenstoff zugeführt.

Die Humusversorgung von Böden im bundesweiten Maßstab wurde von Hüttl et al. (2008) beschrieben. Die Ergebnisse der Untersuchungen weisen darauf hin, dass im Besonderen die Standorteigenschaften und die Flächenbewirtschaftung Auswirkungen auf eine Entwicklung der TOC-Gehalte nehmen. Zahlreiche weitere Untersuchungen wurden aufgrund der seit mehreren Jahren geführten Diskussionen der Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels auf Böden und entsprechender Anpassungsstrategien (z.B. Deutsche Bundesregierung 2008; LBEG 2009; MKUNLV 2011) durchgeführt bzw. laufen aktuell (Kaufmann-Boll et al. 2011). Ein abgesicherter Nachweis flächenhafter Auswirkungen des Klimawandels auf den TOC-Gehalt von Böden ist zzt. nicht bekannt.

Im Folgenden werden bekannte Einflüsse auf den Gehalt an OBS und deren zeitliche Veränderung genauer dargestellt.

3 Klimatologische Einflüsse

Im Fokus der Betrachtung des weltweiten Kohlenstoffhaushalts steht aktuell der prognostizierte Klimawandel. Weltweit werden verschiedene Klimamodelle verwendet, um die zukünftige Entwicklung im globalen Maßstab abzuschätzen. Für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland werden hochauflösende Modelle (z.B. CLM, REMO, STAR, WETTREG) verwendet, um kleinräumig Klimaszenarien und Trends berechnen zu können. Ausgewertete Zeitreihen klimatologischer Parameter haben bereits Veränderungen der Niederschlagsmenge und -häufigkeit, der Lufttemperatur sowie das Auftreten klimatologischer Extremereignisse beschreiben können (Deutsche Bundesregierung 2008). Die prognostizierten Auswirkungen auf Böden können jedoch regional schwanken, z.B. auf Grund der vorherrschenden Bodeneigenschaften (z.B. LBEG 2009; MKULNV 2011). Auch im Bereich der Landwirtschaft rückt der prognostizierte Klimawandel immer mehr in den Fokus der Betrachtung. Es werden Anpassungsszenarien entwickelt, um auf die möglichen Auswirkungen eines Klimawandels vorbereitet zu sein (z.B. Deutsche Bundesregierung 2008; LBEG 2009; MKULNV 2011).

Bodenmikroorganismen, die eine wesentliche Rolle bei der Umsetzung der OBS spielen (Gisi 1997), werden entscheidend von Änderungen im hydrothermalen Regime des Bodens beeinflusst (Rinklebe & Prüß 2011). Der Einfluss von Temperatur und Bodenfeuchte auf die mikrobielle Aktivität ist seit Langem bekannt und in zahlreichen Studien beschrieben worden (z.B. Brookes et al. 1985; Paul & Clark 1996; NLF 2001; Rinklebe 2004). Warmes, feuchtes Klima begünstigt die Abbauprozesse der organischen Substanz im Boden. Bei nassen, kühlen Standortbedingungen ist mit vergleichsweise niedrigen Abbauraten zu rechnen. Niedrige Abbauraten können zur Anreicherung des Bodens mit organischer Substanz führen (Carter 1996; Capriel 2010).

Die prognostizierte veränderte Bodenfeuchte und -temperatur wird zur Folge haben, dass sich die im Boden lebenden Organismen an die neuen Bedingungen anpassen müssen. Dementsprechend werden sich neue, standorttypische Gehalte an TOC einstellen (vgl. Düwel et al. 2007; Capriel 2010). Die erwartete Temperatur- und Niederschlagsveränderung wird zusätzlich

zum Auftreten längerer Trockenphasen oder auch zu ausbleibendem Gefrieren des Bodens führen. Auch dadurch sind Auswirkungen auf die Aktivität der Bodenmikroorganismen zu erwarten (Borken & Matzner 2009).

4 Flächenhistorie und Humusstatus

Im Hinblick auf die Untersuchung von Veränderungen der TOC-Gehalte mit der Zeit spielt die Flächenhistorie eine besondere Rolle. Wechsel der Flächennutzung, z.B. durch Moorkultivierung, Grünlandumbruch oder Umwandlung von Waldflächen in Ackerflächen, führt zur verstärkten Mineralisierung der OBS in den Böden (vgl. Davidson & Ackermann 1993; Höper & Schäfer 2008). Entsprechend entwickeln sich humusreiche Böden durch den Nutzungswechsel hin zu einem für Ackerflächen (standortabhängigen) typischen niedrigeren Niveau an OBS. Die Umstellung von futter- zur ackerbaulichen Nutzung zeigte in einer fast 50-jährigen Untersuchung einen – wenn auch teilweise nur geringen – Rückgang der TOC-Gehalte. Die Zugabe verschiedener (organischer) Düngemittel konnte diesen Verlust nicht verhindern (Walther et al. 2001).

Die erstmalige ackerbauliche Nutzung von humusarmen Böden (z.B. humusarme Sande, Rekultivierungsböden) führt meist zu einer Anreicherung von organischer Substanz im Boden (Wesolek et al. 2008). Durch die Zufuhr von organischer Substanz (z.B. durch organische Düngung und die Einarbeitung von Ernte- und Wurzelrückständen) stellt sich auf Dauer ein höherer, standort- und nutzungstypischer TOC-Gehalt auf solchen Flächen ein. Ein solcher Gleichgewichtszustand bzw. ein Fließgleichgewicht stellt sich bei langjähriger, unveränderter Nutzung an jedem Standort ein. Das Fließgleichgewicht ist erreicht, wenn die Abbaurate des organischen Kohlenstoffs im Boden der Summe des Aufbaus und der Zufuhr entspricht. Es ist abhängig von der Menge an zugeführtem organischem Material, der Abbaurate des zugeführten und bereits vorhandenen organischen Materials sowie der Standorteigenschaften (Poulton 1996).

5 Standorteigenschaften

Verschiedene physikalische Eigenschaften von Böden, wie z.B. die Bodenart und die Lagerungsdichte, wirken sich erheblich auf den Bodenwasser- und Lufthaushalt aus (Blume et al. 2010). Wie bereits in Teil B, Kapitel 3 beschrieben, sind sowohl die Temperatur als auch der Bodenwasserhaushalt und Bodenlufthaushalt von Bedeutung für den mikrobiellen Abbau der OBS. Im Boden stattfindende Akkumulations- und Umsetzungsprozesse, welche die OBS betreffen, werden somit von diesen Standorteigenschaften beeinflusst.

5.1 Bodenart

Die Auswertung von Gehalten an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands (Düwel et al. 2007) konnte einen Zusammenhang zwischen den Gehalten an OBS und der Bodenart feststellen. Vergleichsweise hohe TOC-Gehalte konnten in Böden auf Ausgangsgesteinen mit tonigen Verwitterungsprodukten nachgewiesen werden. Es zeigten sich positive Korrelationen zwischen Schluff- und Tonanteilen und den TOC-Gehalten (Körschens 1980; Utermann et al. 2009). Der Tongehalt in Böden bietet der OBS einen physikalischen Schutz gegen den mikrobiellen Abbau (Barkusky et al. 2009). Eine Beeinflussung der mikrobiellen Aktivität durch Standortei-

genschaften, insbesondere der Bodenart und des Bodengefüges, ist in verschiedenen Studien beschrieben worden (z.B. Franzluebbbers & Arshad 1997; Kuka 2005). Organische Stoffe können zwischen den Schichten der Tonminerale eingelagert werden und sind somit nur schwer mikrobiell umsetzbar (Blume et al. 2010). Die beschriebenen Zusammenhänge entsprechen den Ergebnissen von Körschens (1998), der eine sehr enge positive Korrelation des Tongehalts mit dem inerten TOC-Gehalt festgestellt hat.

5.2 Wasserhaushalt

Wie schon in Teil B, Kapitel 4 beschrieben, spielt der Wasserhaushalt durch die Auswirkung auf die Umsetzungsprozesse der OBS eine entscheidende Rolle für die Gehalte an Humus im Boden. Bei landwirtschaftlichen Nutzflächen wird der natürliche Wasserhaushalt der Böden nicht selten erheblich verändert. Nasse Standorte werden durch Drainagen entwässert. Im Gegensatz dazu wird der Wassergehalt zeitweise trockener Böden durch Bewässerung angehoben. Bei Flächen landwirtschaftlicher Nutzung muss davon ausgegangen werden, dass der tatsächliche, aktuelle Wasserhaushalt möglicherweise nicht zukünftigen Standortbedingungen entspricht. Dadurch wird die ackerbauliche Flächennutzung das Anreicherungspotential der Böden für die OBS erheblich beeinflussen (Wessolek et al. 2008).

Stark durch Grundwasser beeinflusste Böden, wie z.B. Niedermoore und Anmoorgleye, sind durch hohe Humusgehalte gekennzeichnet. Hoch anstehendes Grundwasser kann eine Anreicherung an organischer Substanz im Boden in Folge des reduzierten mikrobiellen Abbaus bewirken (Rinklebe 2004; Blume et al. 2010). Die Entwässerung von nassen Standorten, wie z.B. Mooren und Gleyen, kann durch die bessere Durchlüftung der Böden zur verstärkten Mineralisation der organischen Substanz führen (LBEG 2009). Bei Grundwasserabsenkungen von Feuchtstandorten kommt es aufgrund der steigenden mikrobiellen Aktivität zu Ausgasungen von CO₂, wodurch dem Boden organischer Kohlenstoff entzogen wird (Höper 2007). Die Folge ist ein Absinken der TOC-Gehalte. Ein Anstieg der Mineralisation konnte ebenfalls bei der Beregnung von trockenen Standorten festgestellt werden (Ellmer & Baumecker 2008). In diesem Fall wird die hemmende Wirkung der Trockenheit auf die Aktivität der Mikroorganismen (Blume et al. 2010) durch die Bewässerung aufgehoben.

6 Auswirkungen der Flächenbewirtschaftung

Bei landwirtschaftlichen Nutzflächen, speziell bei ackerbaulich genutzten Böden, wird die Auswirkung der Aktivität des Menschen auf die TOC-Gehalte der Böden deutlich. Neben den bereits beschriebenen Auswirkungen der menschlichen Aktivität auf die Standorteigenschaften sind weitere Auswirkungen der Flächenbewirtschaftung zur Bewertung der Gehalte und Vorräte an OBS relevant.

6.1 Bodenbearbeitung

Ein wesentlicher Faktor bei der Untersuchung der TOC-Gehalte landwirtschaftlicher Nutzflächen ist die Bodenbearbeitung. Die Tiefe der Bearbeitung eines Bodens und damit die Mächtigkeit der Ackerkrume kann direkten Einfluss auf die TOC-Gehalte im Boden nehmen. Durch z.B. die Vertiefung der Ackerkrume wird (meist humusärmeres) Unterbodenmaterial in den

Pflughorizont (Ap-Horizont) eingemischt (vgl. z.B. Köhn & Ellmer 2009). Durch den Verdünnungseffekt sinkt der TOC-Gehalt des jetzt mächtigeren Ap-Horizontes. Der Vorrat der OBS, bezogen auf die jetzt aktuelle Pflugtiefe, ändert sich jedoch nicht.

Intensität und Art der Bodenbearbeitung stehen in den letzten Jahren verstärkt in der Diskussion. Eine Umstellung von konventioneller auf konservierende Bearbeitung führt zur bereits erwähnten Differenzierung des Pflughorizontes (Seyfarth et al. 1999; Epperlein 2002). Die bei konventioneller Bearbeitung meist 25 bis 30 cm tiefe Ackerkrume kann bereits innerhalb weniger Jahre nach der Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung in eine Oberkrume (Bereich der aktuellen Bodenlockerung) und Unterkrume (nicht mehr bearbeiteter Bereich) unterteilt werden. Verschiedene Arbeiten konnten belegen, dass sich in der Oberkrume häufig höhere Gehalte an verschiedenen Kohlenstofffraktionen und der OBS einstellen. Erhöhte TOC-Gehalte konnten in verschiedenen Publikationen mit der reduzierten Bodenbearbeitung in Verbindung gebracht werden (z.B. Franzluebbbers & Arshad 1997; Epperlein 2002; Hoyer 2008).

Die nachgewiesenen Auswirkungen einer reduzierten Bodenbearbeitung auf die TOC-Gehalte zeigen sich jedoch kaum oder gar nicht in den TOC-Vorräten. Die Bodenbearbeitung nimmt im Wesentlichen einen Einfluss auf die Tiefenverteilung der Menge an im Boden gespeicherter organischer Substanz (Brock et al. 2008; Hoyer 2008). Bei der Vorratsberechnung sind mögliche Unterschiede der TOC-Gehalte und der Trockenrohdichten verschiedener Horizonte / Horizontbereiche zu berücksichtigen (Höper 2012). Die Problematik der sich ändernden Horizontmächtigkeiten bei der Berechnung von Humusmengen und Bewertung der TOC-Gehalte wurde bereits an mehreren BDF beschrieben (z.B. Schilling 1997). Gerade die Ausprägung reliktscher Horizonte in Folge der Verringerung der Bearbeitungstiefe stellt für die Vorratsberechnungen ein Problem dar. Eine separate Beprobung des nun nicht mehr bearbeiteten Horizontes ist zukünftig notwendig (Höper 2012). Gänzlich unbeeinflusst sind die Vorräte durch wechselnde Bodenbearbeitung jedoch nicht. Durch ein einmaliges oder gelegentlich tiefes Umbrechen von Flächen wird organisches Material in tiefere Bereiche eingebracht, in denen die Umsetzbarkeit der OBS geringer ist. Durch die Vertiefung der Pflugsohle konnte an einzelnen Flächen ein Anstieg der Humusvorräte beschrieben werden (van Wesemael et al. 2004).

Neben der Bearbeitungstiefe sind die Häufigkeit der Bearbeitung sowie die verwendeten Geräte (z.B. Pflug, Grubber etc.) von Bedeutung. Die potentielle Mineralisierung der organischen Substanz wird durch die Häufigkeit der Bodenbearbeitung sowie die Verwendung von bodenwendenden Geräten erhöht und kann zu sinkenden TOC-Gehalten führen. Eine Umstellung der Bodenbearbeitung kann auch zur qualitativen Veränderung der OBS führen. Die Änderung der Bearbeitung zeigt sich z.B. im Anteil der labilen organischen Substanz an der gesamten OBS (Körschens et al. 1980).

6.2 Düngung

Der Stoffhaushalt von landwirtschaftlichen Böden wird maßgeblich durch die Düngung beeinflusst. Die Düngemittel wirken auf unterschiedliche Art und Weise auf den TOC-Gehalt von Böden. Ein Anstieg der TOC-Gehalte im Boden, der auf den Einfluss von Düngemittelapplikation zurückzuführen ist, wurde in zahlreichen Studien beschrieben (z.B. Körschens 1997; Nieder & Richter 2000; Zimmer et al. 2005; Heitkamp et al. 2011).

Die mineralische Düngung kann sich indirekt auf den TOC-Gehalt auswirken. Durch die Steigerung der auf den Flächen wachsenden Biomasse verbleiben größere Mengen an Ernte- und

Wurzelnrückständen auf den Flächen (vgl. Teil B, Kapitel 6.3; Klimanek 1997; Ellmer & Baumecker 2008; Barkusky et al. 2009).

Die organische Düngung kann sich durch das Einbringen organischer Substanzen in und auf den Boden direkt auf dessen TOC-Gehalt auswirken (z.B. Del Moral et al. 2013). Die unterschiedliche Wirkung der verschiedenen Düngemittel ist auf die Menge an enthaltenem organischem Kohlenstoff sowie dessen Umsetzbarkeit zurückzuführen (VDLUFA 2004). Menge und Art der organischen Düngung sind entscheidend für die mögliche Änderung des TOC-Gehalts. Mögliche Änderungen in der Art der verwendeten Düngemittel könnten somit Auswirkungen auf den TOC-Gehalt in Böden haben. Für die Acker-BDF in Bayern wurde z.B. eine abnehmende Bedeutung des Stallmistes zugunsten der Güllewirtschaft beschrieben (Capriel & Seiffert 2009).

Die Applikation organischer Stoffe führt jedoch nicht zwingend zu steigenden TOC-Gehalten (vgl. Teil B, Kapitel 4; Walther et al. 2001; Höper & Schäfer 2008; Körschens 2010). Zusätzlich müssen, wie in den vorherigen Kapiteln angesprochen, Menge und Umsetzung der applizierten organischen Substanz, die Standorteigenschaften und die Vornutzung betrachtet werden.

6.3 Hauptfrucht und Erntemenge

Der Gehalt an OBS im Boden kann durch die Applikation organischen Materials erhöht werden. Neben der Aufbringung von organischen Düngemitteln werden auch große Mengen an organischem Material durch z.B. nach der Ernte im und auf dem Boden verbleibende Wurzeln und Ernterückstände in den Boden eingebracht. Die Menge des organischen Materials ist abhängig von den Haupt- und Zwischenfrüchten. Je mehr Pflanzenmasse (Wurzeln, Erntereste, Stroh etc.) im Boden akkumulieren kann, desto größer ist der Einfluss auf die Menge der OBS im Boden und die Wahrscheinlichkeit eines Anstiegs des TOC-Gehalts. Die Fruchtfolge (und damit die Menge und Qualität der Ernte- und Wurzelnrückstände) hat dementsprechend einen Einfluss auf die Menge an OBS im Boden (Wessolek et al. 2008). Die Menge der Ernte- und Wurzelnrückstände ist auch abhängig vom Ertrag. So bewirkt eine Erhöhung des Getreideertrags um 10 dt/ha eine Erhöhung der Ernte- und Wurzelnrückstände um 2 dt/ha (Körschens et al. 1989).

Auf den Flächen der BDF in Bayern konnte die Fruchtfolge als eine der Hauptursachen für die gefundenen Humusveränderungen identifiziert werden (Capriel & Seiffert 2009). Ein Rückgang des Klee-/Luzerneanteils sowie ein verringerter Getreideanbau zugunsten von Silomais und Raps sind mögliche Erklärungen. Bei Silomais und Raps fallen geringere Mengen an Ernte- und Wurzelnrückständen an. Der politisch motivierte, verstärkte Energiepflanzenanbau führt möglicherweise aus denselben Gründen zukünftig zu einer Abnahme der TOC-Gehalte in Böden auf betroffenen Flächen (Hüttl et al. 2008; Warnecke et al. 2008).

7 Richtwerte für den Humusgehalt

Für alle Makro- und Mikronährstoffe, vielfach auch für die Schadstoffe, sind Richtwerte teilweise schon seit Jahrzehnten bekannt. Für die organische Substanz (TOC) im Boden gibt es in dieser Hinsicht aber noch keine zufriedenstellende Lösung.

Im Jahr 1980 wurden erste Richtwerte für den Gehalt an organischer Substanz erarbeitet (Körschens 1980) und 1986 als erste „Orientierungswerte für die Einstufung grundwasserferner Diluvial- und Lößstandorte nach dem Grad ihrer Versorgung mit organischer Substanz“ publi-

ziert (Körschens et al. 1986). Diese Werte sind heute noch gültig, jedoch nur für die genannten Standorte. Ihre Anwendung in der Praxis als Grundlage für die Bemessung der organischen Düngung bzw. der Zufuhr von organischer Primärschubstanz scheitert an der hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität und den hohen Ansprüchen an Präzision und Treffgenauigkeit. Wessolek et al (2008) kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass einheitliche Grenzwerte nicht angemessen sind, da die Humusgehalte in Böden je nach Bodenart und Klima stark variieren.

Teil C - Datenauswertung

In diesem Teil werden die Ergebnisse der Datenauswertung, der Vergleich von BDF mit Dauerfeldversuchen und Vorschläge zu TOC-Erwartungsspannen sowie Vorschläge für einen verbesserten Bodenschutz im Hinblick auf die TOC-Gehalte präsentiert.

1 Statistik

1.1 TOC-Veränderung

Für die Ausweisung von TOC-Veränderungen über die Zeit wurden nur Oberbodenproben (Oberkante 0 cm als Kriterium) von Acker-BDF ausgewählt, an denen mindestens vier TOC-Messwerte vorlagen. Aufgrund der geringen Zahl der Beprobungstermine pro Standort war eine Trendanalyse mit dem Mann-Kendall-Ansatz nicht sinnvoll. Stattdessen wurde die Steigung der Regressionsgeraden der TOC-Gehalte über die Zeit bestimmt. Eine positive Steigung gibt dabei eine Zunahme, eine negative Steigung eine Abnahme des TOC-Gehalts an. Um die TOC-Veränderungen statistisch abzusichern, wurden Korrelationen nach Spearman und deren Signifikanz ($p \leq 0,05$) zwischen den TOC-Werten und der Zeit pro BDF gerechnet. In der Beispieldarstellung aus Abbildung 3 handelt es sich um eine signifikante Zunahme des TOC-Gehalts über die Zeit (Steigung von 0,011 % pro Jahr, Signifikanz durch das Sternchen ausgewiesen).

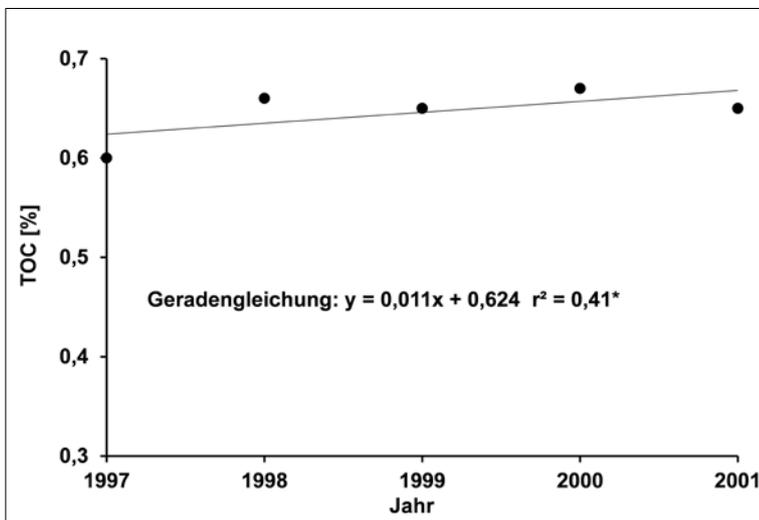


Abbildung 3: Hypothetisches Beispiel zur Darstellung der Ermittlung der TOC-Veränderungen

1.2 Bewirtschaftungsdaten (Humusbilanzierung)

Um die Daten der Bewirtschaftung zu den signifikanten TOC-Veränderungen in Beziehung zu setzen, wurden Humusbilanzen nach VDLUFA (2004) errechnet. Dabei wurde mit den dort angegebenen unteren und oberen Richtwerten gerechnet. Erstere sind vor allem bei Böden in gutem Kulturzustand mit optimaler mineralischer N-Düngung, letztere für dauerhaft humusun-

tersversorgte Böden anzuwenden. Dazu wurde der Humus-C aus der Haupt- und Zwischenfrucht sowie aus dem organischen Dünger addiert, um den Humussaldo zu erhalten. Dieser Saldo wurde gerechnet, wenn ein einzelnes Bewirtschaftungsdatum, also ein Wert aus entweder Hauptfrucht, Zwischenfrucht oder organischer Düngung, in einem Jahr vorhanden war. Da die TOC-Daten nicht wie die Bewirtschaftungsdaten für jedes Jahr vorliegen, wurden die Humussalden aufsummiert, um sie den TOC-Messwerten zuzuordnen. Gab es beispielsweise an einer BDF-Fläche TOC-Messwerte aus den Jahren 2000 und 2005, so wurden die Humussalden an dieser Fläche für die Jahre 2001 bis 2005 addiert und konnten auf diese Weise mit der TOC-Differenz korreliert werden. Diese Korrelationen wurden nach Spearman auf Signifikanz ($p \leq 0,05$) getestet.

1.3 Klimadaten des DWD

Der DWD hat u.a. bundesweit Informationen zu Temperatur, Niederschlag, Verdunstung und Bodenfeuchte übergeben (Tabelle 2). Die Daten mussten für das F+E-Teilvorhaben zur weiteren Verwendung aufbereitet werden.

Trendanalysen für Niederschlag, Temperatur und Verdunstung

Um Veränderungen für den Niederschlag, die Temperatur und die Verdunstung über die Zeit zu untersuchen, wurden Trendanalysen nach Mann-Kendall mit Bereinigung von Autokorrelationen nach Yue et al. (2002) berechnet. Ähnlich wie schon bei den TOC-Veränderungen wurden auch hier aus der Steigung der Trendanalyse die Veränderungen über die Zeit abgeleitet: Eine positive Steigung bedeutet eine Zunahme der jeweils berechneten abhängigen Variable, eine negative Steigung zeigt dementsprechend eine Abnahme an.

Nur die Veränderungen wurden als Zu- bzw. Abnahme gewertet, die statistisch abgesichert auf einem Signifikanzniveau von 5 % waren. Die Trendanalysen wurden mit der Software R (R Core Team 2014) und dem Paket zyp (Bronaugh & Werner 2013) berechnet.

Bodenfeuchte

Zur Charakterisierung der BDF hinsichtlich der Bodenfeuchte wurde aus den vorliegenden Modellierungsdaten des DWD für die Bodenart „schwach lehmiger Sand“ (Sl2) unter Winterweizen ein Bodenfeuchtwert pro BDF abgeleitet. Für jeden Tag des Jahres wurde ein Mittelwert aus den Jahren 1970 bis 2000 gebildet. Anschließend wurde für jeden Tag die Differenz zwischen diesem Mittelwert und 100 % (Feldkapazität) berechnet und zu einem Wert aufsummiert. Daraus folgt, dass je ausgeprägter die Sommertrockenheit an einem BDF-Standort, desto höher die Differenz des abgeleiteten Bodenfeuchtwertes ist.

1.4 Multiple Regressionen

Mit Hilfe von Support Vector Machines (SVM) wurden multivariate nicht-lineare Regressionen berechnet, um die Bestimmungsgrößen (Prädiktoren) und die Art der Zusammenhänge sowohl für den TOC-Gehalt als auch für die TOC-Veränderungen zu untersuchen. Da nichtlineare Zusammenhänge erwartet wurden und für multivariate lineare Regressionsverfahren ohnehin auch noch das Problem der Multi-Kollinearität zu berücksichtigen wäre, wurde ein nichtlineares Verfahren gewählt. Support Vector Machines gehören zu den Verfahren des Maschinellen

nens. Die Art der Beziehung zwischen Prädiktoren und der Zielgröße (z.B. ein Polynom dritten Grades oder Sättigungskurven) muss dabei nicht vorgegeben werden, sondern wird von dem Verfahren eigenständig ermittelt. Damit sind diese Verfahren wesentlich flexibler als klassische Regressionsverfahren. Support Vector Machines zeichnen sich unter den Verfahren des Maschinennlernens, wie z.B. Künstlichen Neuronalen Netzen oder Genetischen Algorithmen, dadurch aus, dass sie sehr schnelle und sehr robuste Ergebnisse liefern, die kaum von der Parametrisierung des Verfahrens abhängen.

2 Ergebnisse

2.1 Temperatur

Abbildung 4 zeigt eine bundesweit fast flächendeckende signifikante Zunahme der Jahresmitteltemperaturen an allen BDF ($0,03 \text{ K/Jahr} = 1,14 \text{ K}$ in 38 Jahren, $n = 739 \text{ BDF}$). Nicht signifikante Zunahmen sind räumlich abgrenzbar in der Norddeutschen Tiefebene in einem engen Bereich um Hamburg, in den Allgäuer und Bayerischen Alpen, in einem schmalen Streifen vom Harz über die Leipziger Tieflandbucht bis zur Lausitz und in der Kölner Bucht.

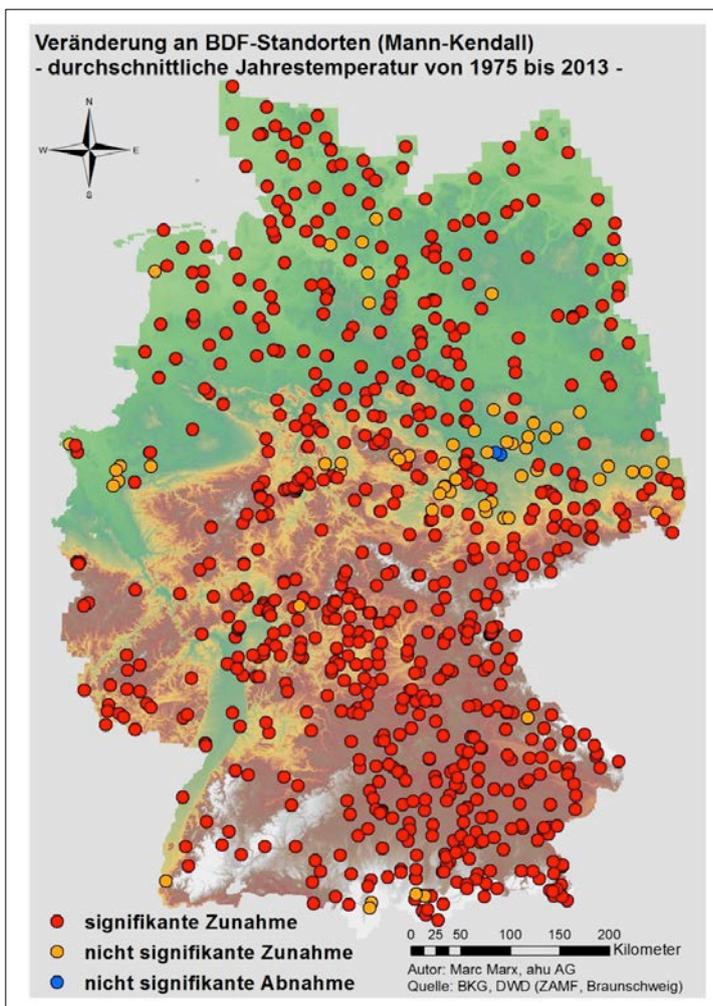


Abbildung 4: Veränderung der durchschnittlichen Jahrestemperatur an den BDF-Standorten im Zeitraum 1975 bis 2013

2.2 Niederschlag

In Abbildung 5 ist nur eine regional auftretende signifikante Zunahme des Jahresniederschlags in der Leipziger Tieflandbucht ausgewiesen (4 mm/Jahr, $n = 15$ BDF). Flächenhafte, nicht signifikante Abnahmen zeigen sich in Süddeutschland. In Norddeutschland sind nur an sehr wenigen Standorten signifikante Zunahmen nachzuweisen.

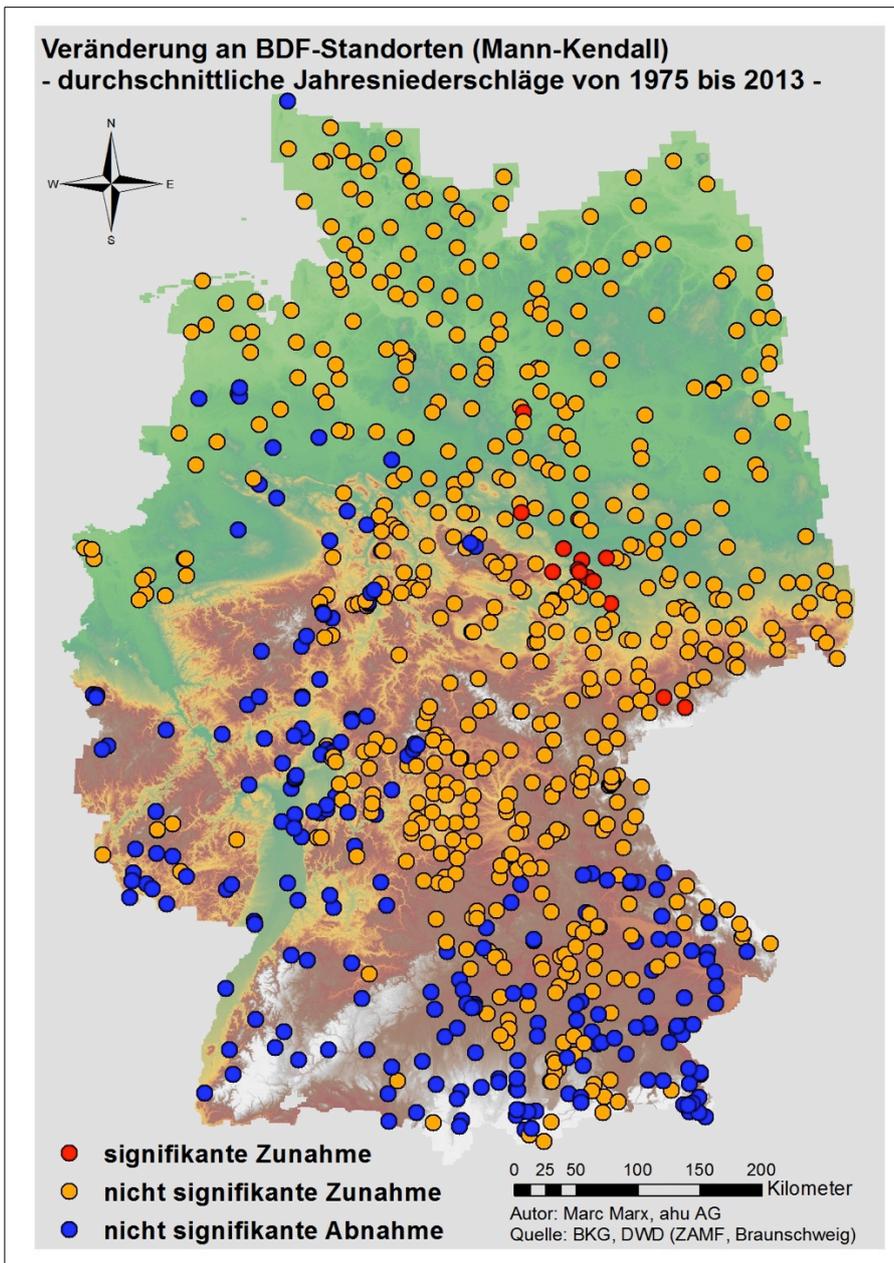


Abbildung 5: Veränderung des durchschnittlichen Jahresniederschlags an den BDF-Standorten im Zeitraum 1975 bis 2013

2.3 Verdunstung

Ähnlich wie bei der Veränderung der Jahresmitteltemperatur lassen sich auch bei der Jahresmittelverdunstung (berechnet nach Penman 1956) fast flächendeckend signifikante Zunahmen erkennen (2,5 mm/Jahr, n = 717 BDF) mit einigen Ausnahmen in Teilen Norddeutschlands (Abbildung 6).

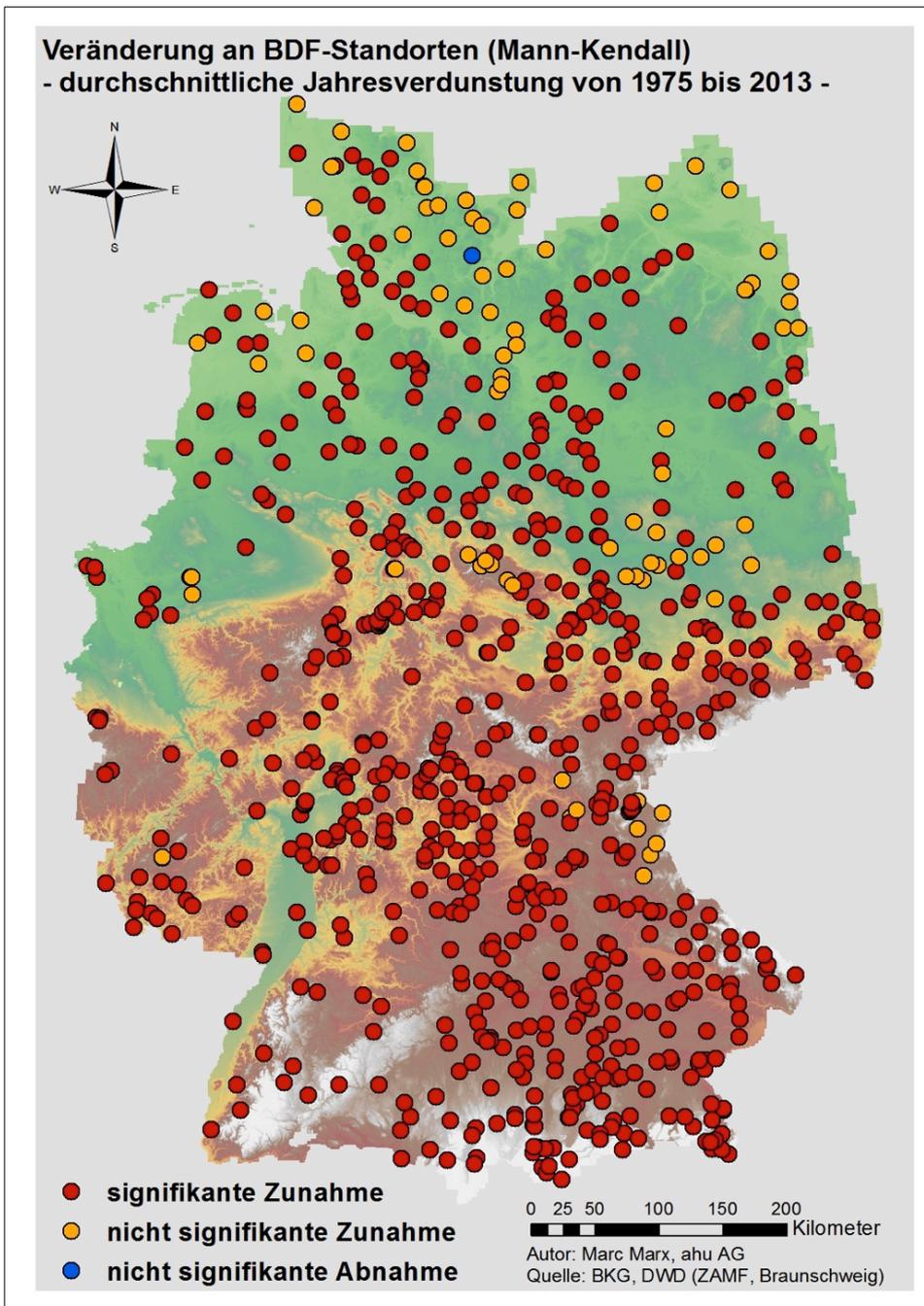


Abbildung 6: Veränderung der durchschnittlichen Jahresverdunstung (nach Penman 1956) an den BDF-Standorten im Zeitraum 1975 bis 2013

2.4 Bodenfeuchte

Für die Darstellung der Bodenfeuchte wurden die Werte in fünf gleich große Klassen eingeteilt (Abbildung 7). Regional auftretende Unterschiede des Bodenfeuchtemaßes zeigen sich daran, dass die Punkte gleicher Farbe in der Regel gehäuft zu erkennen sind. So zeichnet sich beispielsweise der nordostdeutsche Raum durch ausgeprägte Sommertrockenheit aus (gelbe Punkte), während der Alpenraum durch überwiegend hohe Bodenfeuchte charakterisiert ist (blaue Punkte).

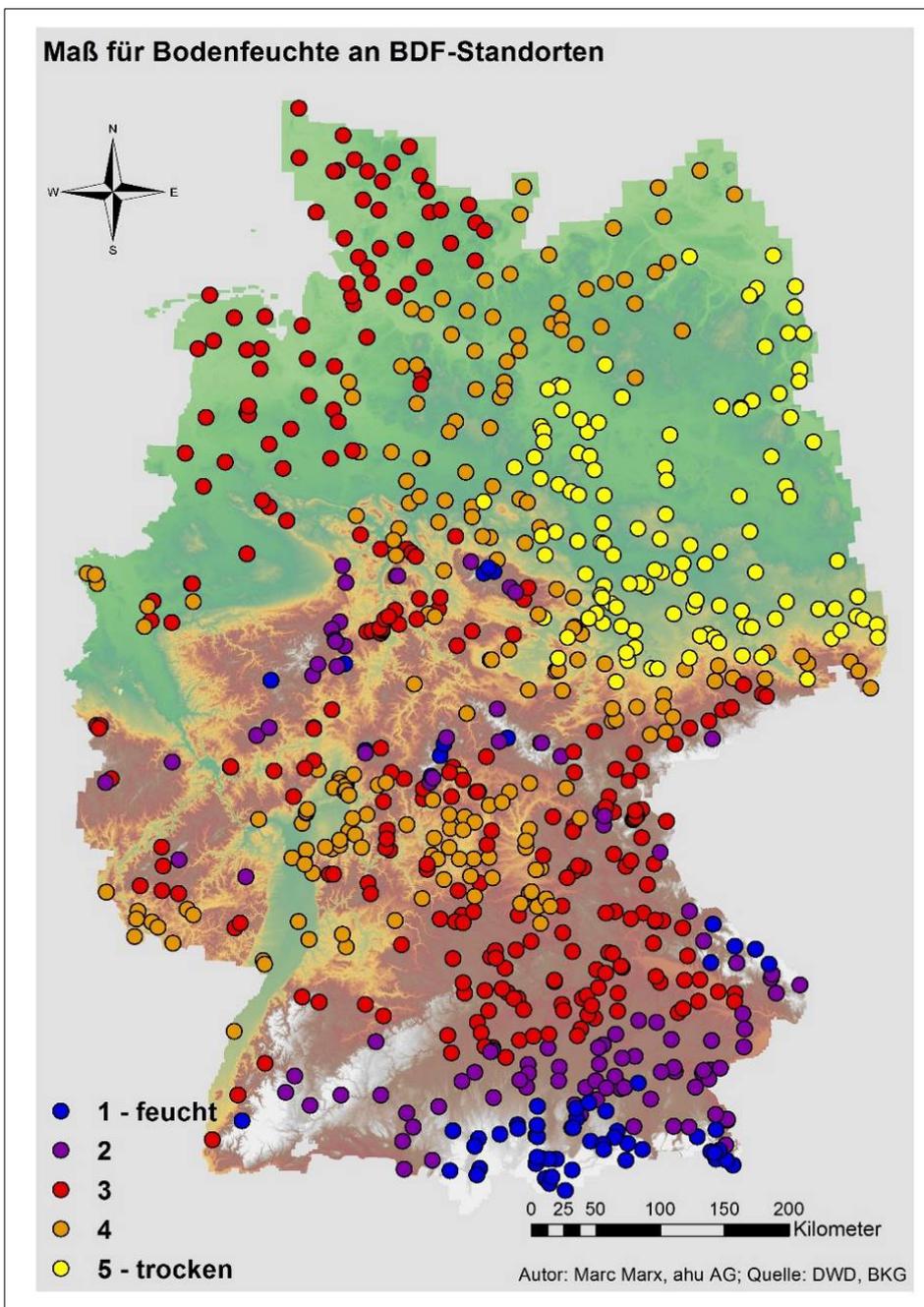


Abbildung 7: Einteilung der Bodenfeuchte an BDF-Standorten

2.5 TOC-Daten

Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die Anzahl der Acker-BDF der datenliefernden Bundesländer. Berücksichtigt wurden dabei nur Messwerte aus den Oberböden mit Oberkante 0 cm. Ein weiteres Kriterium bestand darin, dass es in der BDF-Historie zu keinem Umbruch von Grünland zu Acker gegeben haben durfte. Da im Allgemeinen die Vernässung einen großen Einfluss auf den TOC-Gehalt hat (Möller & Kennepohl 2014), wurden zudem Moor- und Anmoor-Standorte aus der Auswertung herausgenommen. Aus Bayern wurden die meisten Daten geliefert. Hier wurden an 100 BDF 384 TOC-Messungen durchgeführt. Niedersachsen und Sachsen lieferten etwas weniger mit 313 beziehungsweise 118 TOC-Werten. Aus Baden-Württemberg wurden von 10 BDF 16 TOC-Messwerte geliefert. Weiterhin zeigt die Tabelle, dass die maximale Anzahl der Zeitpunkte pro BDF von 2 bis 11 schwankt. In Schleswig-Holstein wurde an mindestens 1 BDF maximal 11-mal der TOC-Gehalt gemessen, in Baden-Württemberg sowie Mecklenburg-Vorpommern waren es maximal 2 Messungen. Auch die Laufzeiten, in der BDF Messungen stattfanden, reichen von 1 Jahr nach der Erstbeprobung in Mecklenburg-Vorpommern bis zu 22 Jahren in Schleswig-Holstein. Bis auf die Ausnahme in Mecklenburg-Vorpommern beträgt die Laufzeit mindestens 15 Jahre. Die Daten der Tabelle verdeutlichen die unterschiedlich angelegten Messprogramme an den BDF in den verschiedenen Bundesländern.

Tabelle 3: Anzahl der Acker-BDF mit Anzahl der TOC-Messungen, maximaler Anzahl der Messzeitpunkte und der Laufzeit nach Bundesland

Bundesland	Anzahl BDF	Anzahl Messungen	max. Anzahl Zeitpunkte	Laufzeit in Jahren
Baden-Württemberg	10	16	2	15
Bayern	100	384	4	21
Brandenburg	21	46	3	16
Hessen	28	88	4	16
Mecklenburg-Vorpommern	15	17	2	1
Niedersachsen	47	313	9	19
Sachsen	45	118	6	16
Sachsen-Anhalt	19	32	3	16
Schleswig-Holstein	15	107	11	22
Thüringen	12	37	4	15

2.6 Bewirtschaftungsdaten

Aus insgesamt fünf Bundesländern wurden Bewirtschaftungsdaten zu Haupt- und Zwischenfrucht sowie organischer Düngung geliefert (Tabelle 4). Wie schon bei den TOC-Messungen hat auch bei den Bewirtschaftungsdaten Bayern die meisten Daten geliefert. Thüringen hat 191 Hauptfruchtangaben und 49 Datensätze zur organischen Düngung zur Verfügung gestellt. Die Anzahl der Bewirtschaftungsdaten aus Brandenburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein liegt zwischen den erstgenannten Bundesländern.

Tabelle 4: Anzahl der gelieferten Bewirtschaftungsdaten aus fünf Bundesländern

Bundesland	Hauptfrucht	Zwischenfrucht	Organische Düngung
Bayern	2257	393	2210
Brandenburg	238	11	64
Niedersachsen	724	67	380
Schleswig-Holstein	323	14	541
Thüringen	191	0	49

2.7 TOC-Gehalte

Der Mittelwert aller gemessenen TOC-Gehalte ($n = 1158$) an 312 Acker BDF beträgt 1,85 % (SD 2,52), das Minimum 0,34 %, das untere Quartil 1,13 %, der Median 1,49 %, das obere Quartil 1,94 % und das Maximum 40,01 %. Mehr als die Hälfte der Werte liegt zwischen etwa 1 und 2 % (unteres bzw. oberes Quartil). Diese Werte sind zusammen mit den TOC-Gehalten aller Acker-BDF unter 1 % und über 2 % in Abbildung 8 gezeigt, um die räumliche Verteilung der TOC-Gehalte darzustellen. Tendenziell sind niedrige TOC-Werte in Teilen Nordostdeutschlands zu finden. Es ist darüber hinaus kein klares räumliches Muster ersichtlich.

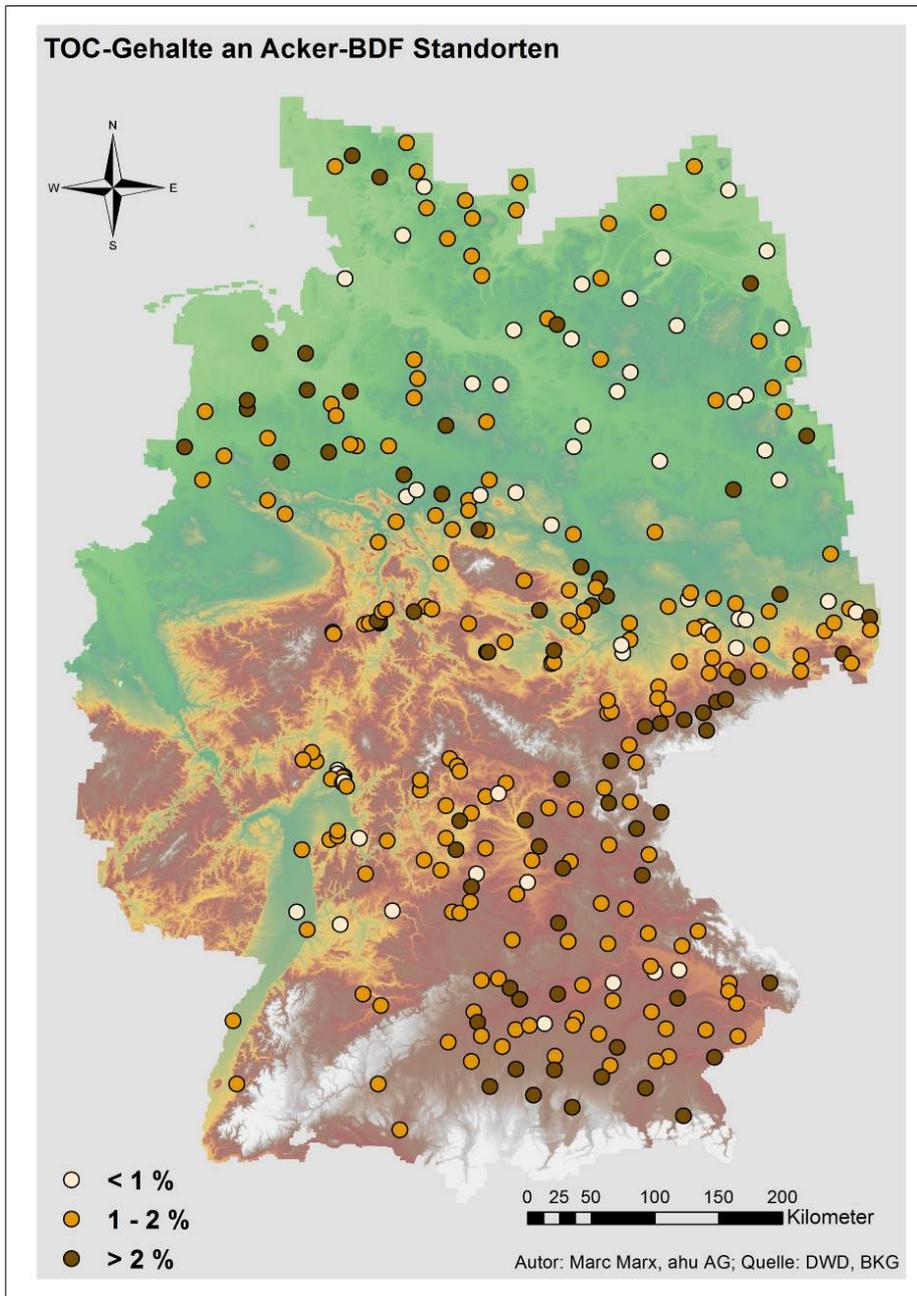


Abbildung 8: Räumliche Verteilung der TOC-Gehalte an den Acker-BDF

2.8 TOC-Veränderungen

Die Auswertung der TOC-Messwerte an den insgesamt 171 BDF mit mindestens vier Messwerten ergab, dass an 22 Standorten eine signifikante Abnahme und an 17 Acker-BDF eine Zunahme des TOC-Gehalts in Abhängigkeit von der Zeit zu verzeichnen war. An Standorten mit weniger als 1,1 % TOC wurden insgesamt fünf signifikante Zunahmen nachgewiesen. An Standorten mit mehr als 3,7 % TOC konnten insgesamt zwei signifikante Abnahmen beobachtet werden. Bei den anderen Werten, die zwischen 1,1 und 3,7 % TOC liegen, gab es kein Muster, d.h. dass bei-

spielsweise bei einem TOC-Gehalt von 1,4 % sowohl Ab- wie auch Zunahmen beobachtet wurden.

Die minimale Laufzeit der Flächen betrug zehn Jahre, die maximale Laufzeit 22 Jahre. An 132 Flächen waren statistisch keine TOC-Veränderungen nachweisbar (Abbildung 10). Abbildung 9 zeigt, dass sich aus der Lage der insgesamt 39 signifikanten TOC-Veränderungen kein räumliches Muster ableiten lässt, sondern dass die betroffenen Standorte unregelmäßig über die Fläche verteilt sind.

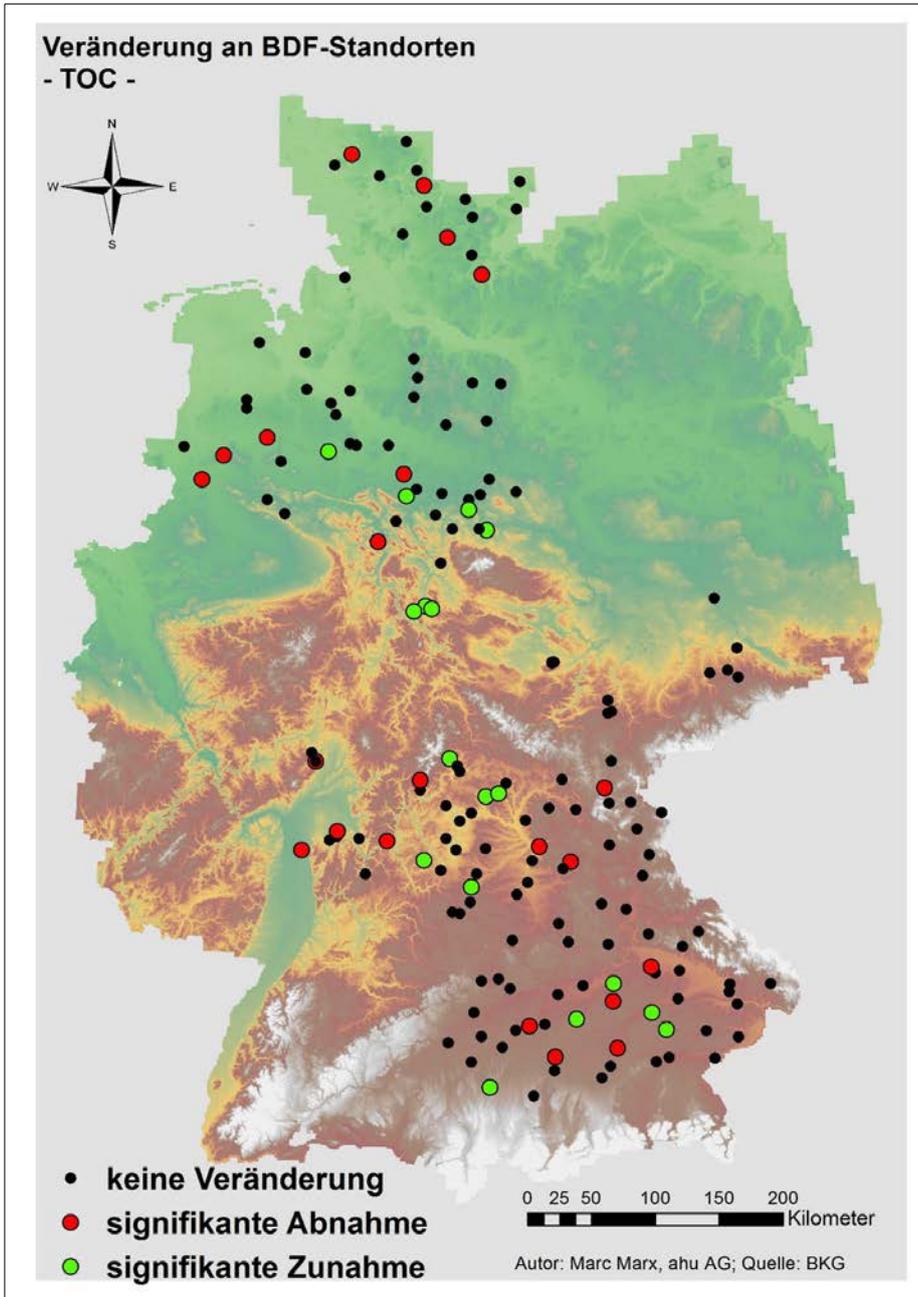


Abbildung 9: Räumliche Verteilung der Acker-BDF mit mindestens vier TOC-Messungen und deren Veränderungen

Werden nur Standorte mit mindestens fünf Beprobungen berücksichtigt (62 BDF), steigt der Anteil der BDF mit signifikanten Änderungen nur leicht von 23 % auf 26 % an (Abbildung 10). Der Anteil der BDF mit signifikanten Abnahmen steigt von 13 % auf 15 % und der mit signifikanten Zunahmen von 10 % auf 11 % an. Damit bestätigt sich zumindest tendenziell die Erwartung, dass mit zunehmender Anzahl der Messungen die Wahrscheinlichkeit der Detektion signifikanter Veränderungen ansteigt. Um eine endgültige Aussage über die TOC-Entwicklung treffen zu können, muss der organische Kohlenstoff an den Acker-BDF regelmäßig und langfristig überwacht werden.

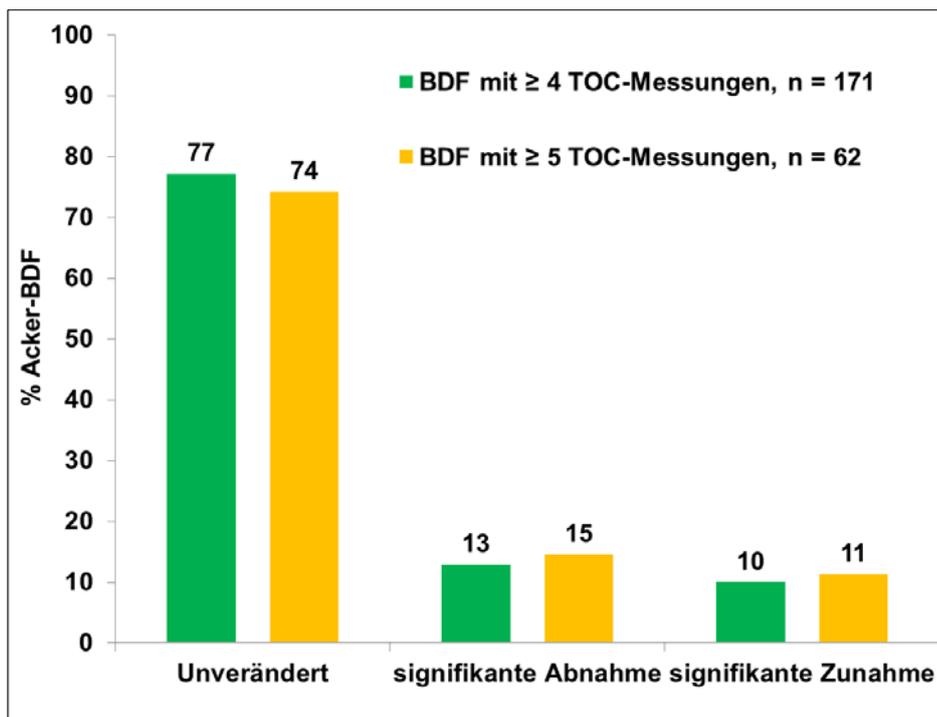


Abbildung 10: Anteil der Veränderungen von Acker-BDF mit unterschiedlicher Anzahl von TOC-Messungen

2.9 Betrachtung sensibler Klimaräume (Einfluss des Klimas auf die TOC-Gehalte)

Die Definition „sensibler Klimaräume“ erfolgt in diesem Projekt im Hinblick auf die Veränderung des Humusstatus in Regionen, deren Böden aufgrund besonders niedriger oder sehr hoher TOC-Gehalte als besonders empfindlich gegenüber den mit dem Klimawandel verbundenen Einflüssen erscheinen.

Als den TOC-Gehalt beeinflussende klimatische Größen fanden Utermann et al. (2009) die Niederschläge (i.e. Höhenlage) und die Temperatur. Sie konnten mit ihrem Regionalisierungsansatz der TOC-Gehalte in Oberböden auf Basis multivariater Analysen ein (1) Trockenheits-Cluster im Nordostdeutschen Tiefland mit sehr geringen TOC-Gehalten, ein (2) Wärme-Cluster im west- und südwestdeutschen Raum (Westliches Rheinland, Rheinhessen, Oberrheingraben) mit mittleren Gehalten und ein (3) Niederschlags(Höhen)-Cluster mit ausgeprägten bis überdurchschnittlichen TOC-Gehalten im Alpenvorland ausgrenzen (Abbildung 14).

Eine Überprüfung der Veränderung dieser Einflussfaktoren an den BDF-Standorten anhand von DWD-Klimaaufzeichnungen von 1975 bis 2013 zeigte signifikante Zunahmen der Temperatur und Verdunstung (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 6), während die Veränderung der Jahresniederschläge nur bei wenigen Standorten signifikant war (vgl. Abbildung 5).

Es gibt deutschlandweit nur sechs BDF, bei denen alle klimatischen Kennwerte zwischen 1975 und 2013 signifikante Zunahmen erfahren haben. Dabei handelt es sich um Standorte in Sachsen und Sachsen-Anhalt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Kennwerte zu Bodenart und TOC-Gehalt der sechs BDF mit signifikanten Veränderungen von durchschnittlicher Jahrestemperatur, Jahresniederschlag und Jahresverdunstung zwischen 1975 und 2013

UBA-Kennung	Name	Anzahl Messungen	Bundesland	Sand	Schluff	Ton	VDLUF	Bodenart	TOC-Gehalt [%]
SN-0006	Priesteblich	2	Sachsen	40	48	12	leicht	Slu	1,1
SN0046	Dittersdorf	2	Sachsen	24	57	20	mittel	Lu	3,7
SN0054	Cunnersdorf	2	Sachsen	57	32	14	mittel	Sl4	2,1
ST-0033	Cattau	2	Sachsen-Anhalt	7	69	24	mittel	Ut4	2,1
ST-0049	Seeben	2	Sachsen-Anhalt	35	46	19	mittel	Us	3,6
ST-0050-2	Lettewitz Profil 2	1	Sachsen-Anhalt	NA	NA	NA	NA	NA	1,6

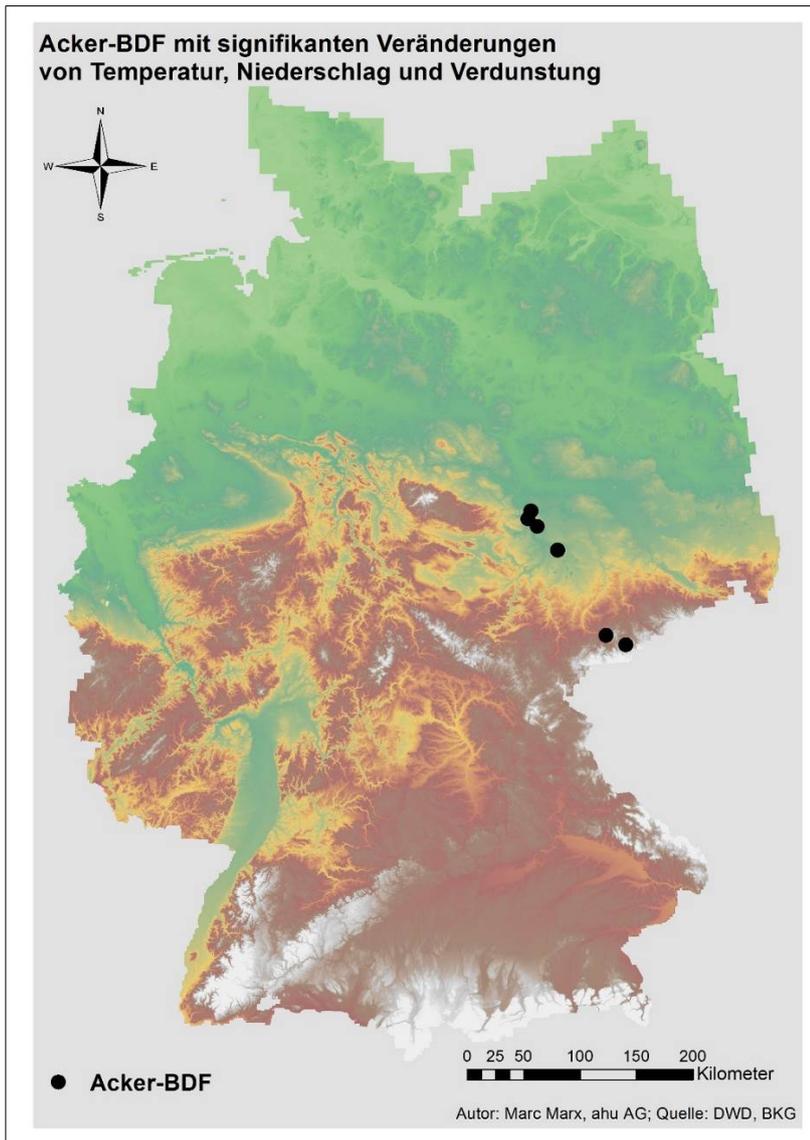


Abbildung 11: BDF mit signifikanten Veränderungen des Durchschnittswerts der Jahrestemperatur, des Jahresniederschlags und der Jahresverdunstung, alle ohne signifikante Veränderung des TOC-Gehalts im Zeitraum 1975 bis 2013

Wie ein Vergleich von Abbildung 9 und Abbildung 11 zeigt, sind die BDF mit signifikanten Änderungen des TOC-Gehalts nicht deckungsgleich mit denen, deren klimatische Kennwerte sich im Betrachtungszeitraum signifikant geändert haben. Auf Basis der Daten dieser sechs BDF lässt sich der gleichzeitige Einfluss von Temperatur, Niederschlag und Verdunstung auf die TOC-Gehalte somit nicht überprüfen.

2.10 Einfluss der Bewirtschaftung auf die TOC-Veränderung

An 157 Acker-BDF Standorten lagen für eine Korrelation auswertbare TOC- und Bewirtschaftungsdaten vor. Für die Humusbilanzierung mit den oberen und unteren Werten der VDLUFA wurden an den BDF-Standorten BY 0055 und BY 0093 positive signifikante Korrelationen zwischen den TOC-Differenzen und dem TOC aus der Bewirtschaftung nachgewiesen. Das entspricht einem Veränderungsanteil von etwa 1,3 % und ist daher unerheblich für die weitere Betrachtung.

2.11 Ergebnisse der nichtlinearen Regression

Erklärung der TOC-Gehalte

Das Verfahren der nichtlinearen Regression mittels Support Vector Machines (SVM) benötigt für seine Berechnungen komplette Datensätze. Fehlende Messwerte reduzieren somit den Datenbestand für die parameterübergreifende Auswertung. Liegen beispielsweise für die Auswertung der TOC-Gehalte noch 1.158 Messwerte als zu interpretierende Variable an den 312 Acker-BDF vor, so reduziert sich der Datenbestand bei Betrachtung der vorliegenden Ton-Werte als erklärender Faktor für den TOC-Gehalt um 10 auf 1.048. Zieht man noch alle vorhandenen Hauptfruchtarten mit in die Berechnung ein, verbleiben noch insgesamt 837 Werte für die Auswertung. Für die Berechnung mit allen Parametern verringert sich der Datensatz auf 821.

Die potentiell unabhängigen (d.h. erklärenden) Variablen waren die Bodenart, die geographische Lage, die Bewirtschaftungs- und Klimadaten sowie die Höhe über NN; die abhängige, zu erklärende Variable war hier der TOC-Gehalt. Zunächst wurde eine nichtlineare Regression mit allen erklärenden Variablen gemeinsam berechnet. Damit konnten 57 % der Varianz der TOC-Gehalte erklärt werden. Danach wurde schrittweise jeweils die Variable, die am wenigsten zur Erklärung beitrug, entfernt. Damit erhöhte sich gleichzeitig der Datenbestand ($n = 1.132$), weil für den reduzierten Variablensatz eine höhere Anzahl kompletter Datensätze vorlag. Ungefähr die Hälfte der unabhängigen Variablen konnte entfernt werden, ohne dass die Güte des Modells erkennbar abnahm. Die größten Anteile an erklärter Varianz der gemessenen TOC-Gehalte stellen der Tonanteil, der Jahresniederschlag und die Jahresmitteltemperatur dar (Abbildung 12).

In Abbildung 13 sind die Zusammenhänge zwischen den wichtigsten drei Einflussgrößen und dem TOC-Gehalt in zwei 3D-Darstellungen, so wie sie von der SVM bestimmt wurden, dargestellt. Dabei wurden das 10. und das 90. Perzentil der Jahresmittelwerte der Temperatur in dem Datensatz zur Darstellung gewählt. Diese stehen für das kälteste und für das wärmste Zehntel der Standorte des Datensatzes. Für niedrigere Werte der Jahresmitteltemperatur zeigt sich ein insgesamt deutlich höheres Niveau der TOC-Gehalte (Abbildung 13).

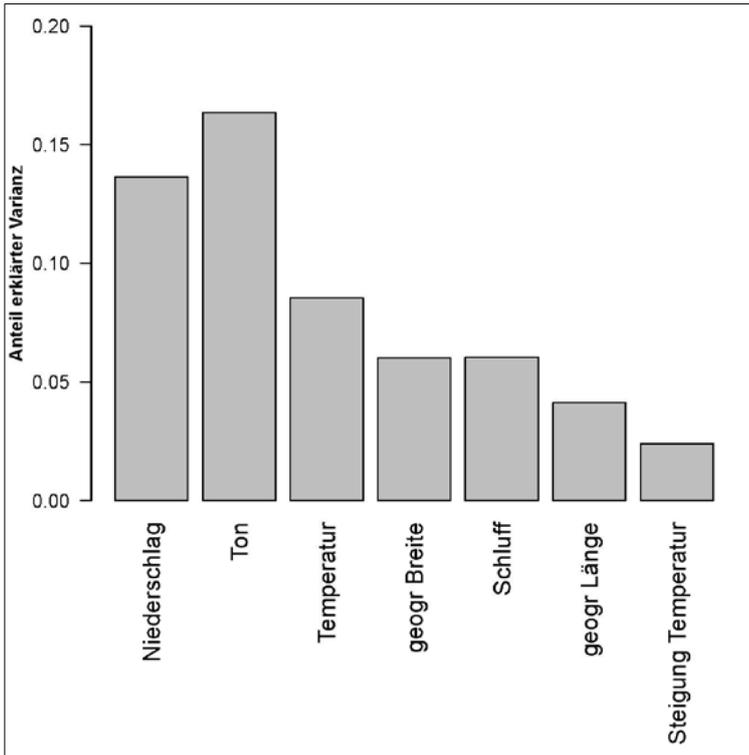


Abbildung 12: Mittels Support Vector Machine bestimmter Beitrag unabhängiger Variablen, die den TOC-Gehalt erklären

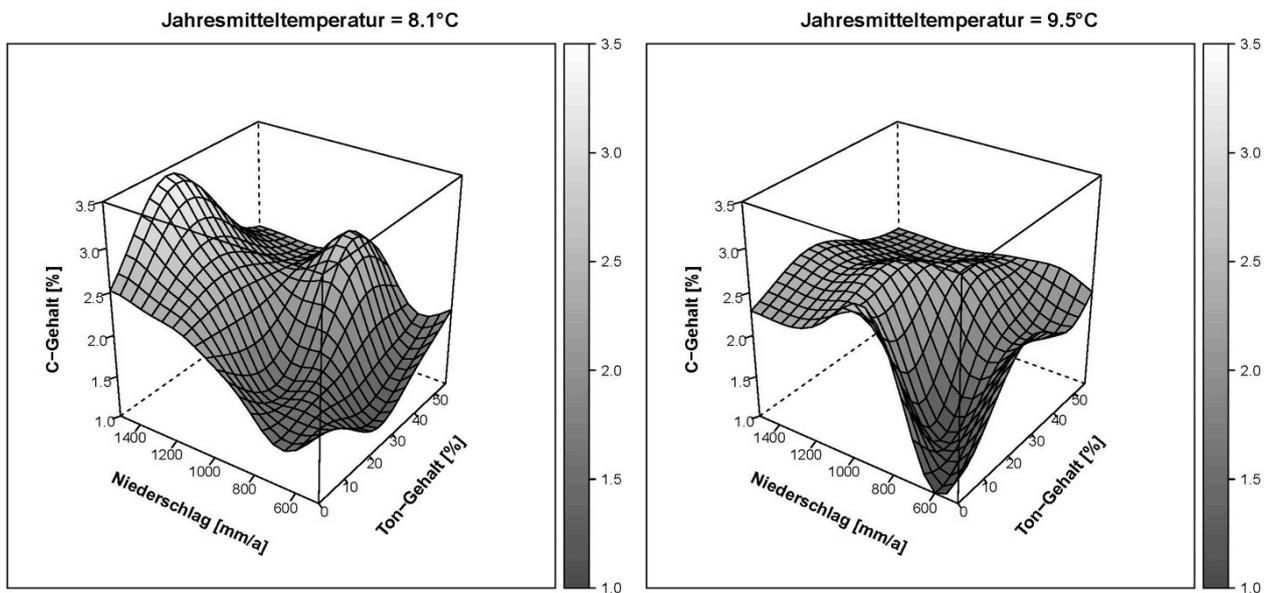


Abbildung 13: Einfluss des Niederschlags und des Tongehalts auf den TOC-Gehalt an den Acker-BDF unter Berücksichtigung der Jahresmitteltemperatur, bestimmt mittels SVM (links: 10. Perzentil der Jahresmitteltemperatur; rechts: 90. Perzentil der Jahresmitteltemperatur)

Generell steigen die TOC-Gehalte mit zunehmender Höhe der Jahresniederschläge sowie mit steigendem Tongehalt an. Dabei zeigen sich vor allem bei höheren Temperaturwerten deutliche Sättigungseffekte sowohl hinsichtlich des Niederschlags als auch des Tongehalts. Die lokalen Maxima („Höcker“) der Regressionsflächen sind vermutlich primär durch die ungleichmäßige Verteilung der Daten bedingt und sollten nicht überinterpretiert werden.

Für niedrige Temperaturen bedingen Tongehalte um 30 % gekoppelt mit Niederschlägen über 1.200 mm/a die höchsten TOC-Gehalte von ca. 3,5 %. Bei extrem tonigen Böden mit Tongehalten um 40 % und Niederschlägen von 800 mm/a liegt der TOC-Gehalt knapp unter 3 %. Diese Standortverhältnisse finden sich bei den BDF im Voralpenland bzw. in der Fränkischen Alb. Die organische Bodensubstanz ist unter diesen Bedingungen wahrscheinlich durch organomineralische Verbindungen (Ton-Humus-Komplexe) gegen Verlust (Abbau, Auswaschung) stabilisiert. Bei den hohen Jahresniederschlägen ist der mikrobielle Abbau der organischen Substanz vermutlich noch durch Sauerstoffmangel infolge von Vernässung gehemmt.

Bei Betrachtung des wärmsten Zehntels der Standorte (Jahresmitteltemperatur 9,5 °C) liegt das TOC-Niveau weitgehend einheitlich bei etwa 2,5 %. Eine Ausnahme bildet der Bereich mit Niederschlägen von 600 mm/a und Tongehalten von weniger als 20 %. Hierbei sind TOC-Gehalte von 1 % zu beobachten. Diese Bedingungen können räumlich den sandigen Böden im Nordosten Deutschlands zugeordnet werden (vgl. auch Abbildung 8). Hier findet einerseits kaum eine TOC-Stabilisierung durch Ton-Humus-Komplexe statt und andererseits sind die Abbauprozesse nicht durch O₂-Mangel in Folge von Wasserstau gehemmt.

Utermann et al. (2009) werteten in ihrer Studie zum Status des Kohlenstoffgehalts in Böden Deutschlands TOC-Messungen aus dem Oberboden (n = 7.465) aus. Dabei konnten sie bestimmte TOC-Gehaltsklassen unterschiedlichen Räumen in Abhängigkeit verschiedener Standortfaktoren zuordnen, wie in Abbildung 14 dargestellt. Die dort dargestellten Cluster konnten auch mit den vorliegenden SVM-Ergebnissen aus 1.032 TOC-Messungen bestätigt werden. So finden sich in beiden Studien Ton, Schluff, Temperatur/Wärme und Niederschlag/Trockenheit als erklärende Faktoren für das bundesweite Muster der TOC-Gehalte im Oberboden. Beim Berg- und Hüggellandcluster sind die Klimafaktoren Niederschlag und Temperatur indirekt über die Höhe als die steuernden Faktoren für die TOC-Gehalte verantwortlich (siehe auch Teil C, Kapitel 3).

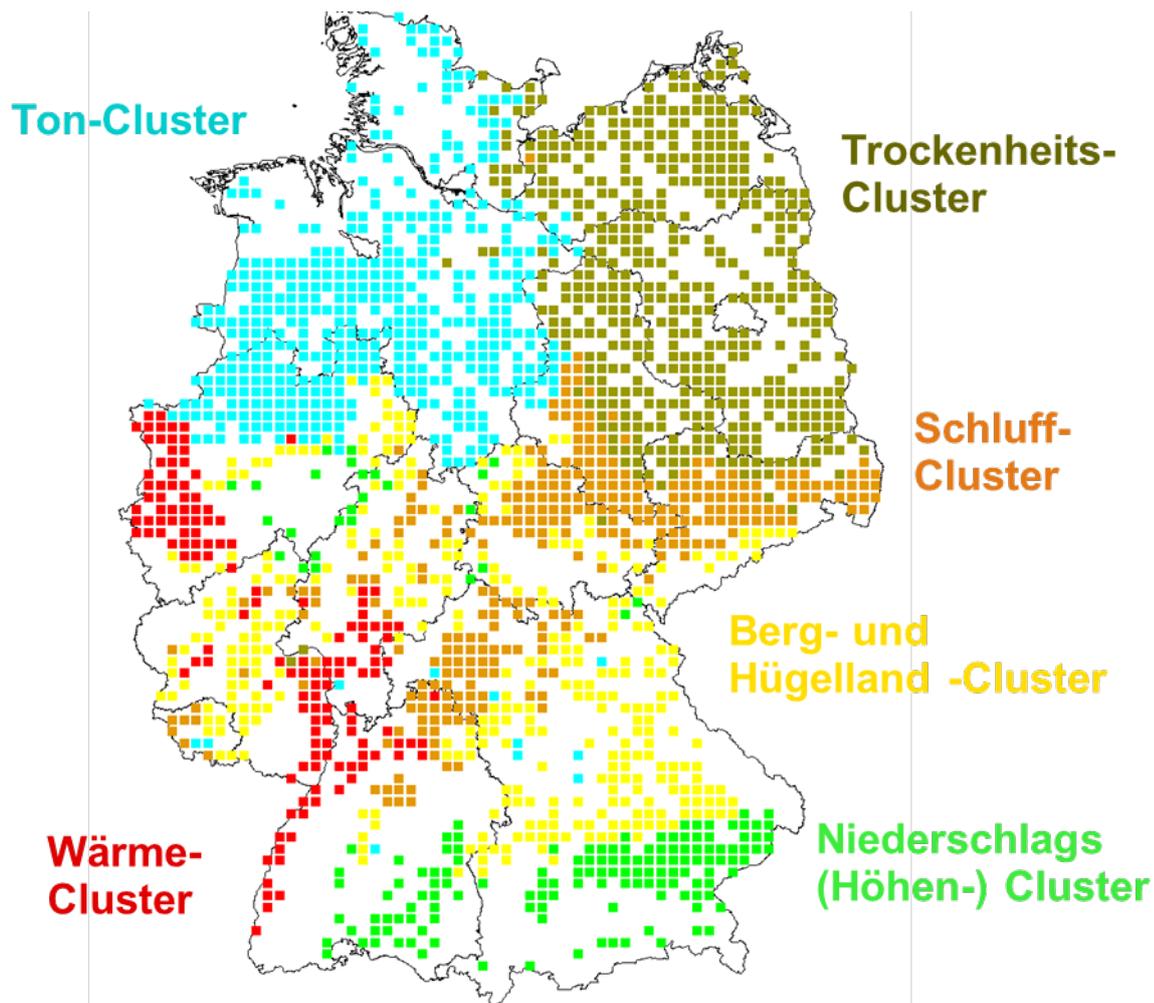


Abbildung 14: Cluster des Einflusses klimatischer Größen auf den TOC-Gehalt im bundesweiten Maßstab, verändert nach Utermann et al. (2009)

Ähnliche Ergebnisse wurden auch in anderen Studien gefunden. Kolbe (2008) bestimmte mittels multipler Regressionsanalyse, dass die Standorteigenschaften die größte Relevanz für den C_{org} -Gehalt eines Bodens aufweisen. Die relevanten Eigenschaften waren dabei die Bodenart sowie die Temperatur und die Niederschlagsmengen. Ein signifikanter Einfluss der Flächenbewirtschaftung konnte auch bei europaweiten Literaturlauswertungen beschrieben werden (Hedlund 2012). Ellmer & Baumecker (2008) stellten an einer Versuchsfläche die organische Düngung und Fruchtartenfolge als wichtigste Einflussgrößen auf die organische Bodensubstanz fest. Die Auswirkungen von mineralischer Düngung und Beregnung waren erkennbar, aber nur schwach ausgeprägt.

In einem Datensatz von über 42.000 Bodenproben aus mehr als 8.000 Betrieben konnte per Varianzkomponentenschätzung die Bodenart mit 33 % der erklärten Varianz als die wichtigste identifizierbare Einflussgröße erkannt werden. Neben der Bodenart wurde auch der Einfluss von Höhenlage, zeitlicher Veränderung in 13 Jahren sowie der Viehhaltung (und die damit verbundene Menge an organischer Düngung) untersucht. Der größte Teil der Varianz (57 %) konnte jedoch keiner der betrachteten Einflüsse zugeordnet werden (Ebertseder et al. 2010a).

Langfristige TOC-Veränderung

An 4 von den 39 Acker-BDF, an denen signifikante TOC-Veränderungen nachgewiesen wurden, lagen keine Bewirtschaftungsdaten und damit keine vollständigen Datensätze vor. Die betrachteten Datensätze reduzierten sich demnach um 10 % auf 35 Acker-BDF. Tabelle 6 zeigt, dass in die Auswertung nur die BDF eingingen, an denen mindestens 4 Messwerte vorlagen.

Tabelle 6: Anzahl der BDF mit gemessenen TOC-Werten (Anzahl Zeitpunkte) und maximale Laufzeit

Anzahl BDF	Anzahl Zeitpunkte	Maximale Laufzeit (Jahre)
20	4	17
2	5	11
2	6	20
4	7	14
6	8	14
1	9	10

Wie schon bei den Werten der TOC-Gehalte wurden auch für die Untersuchung der Bestimmungsgrößen der signifikanten TOC-Veränderungen (Steigung der Geradengleichung) die Bodenart, die geographische Lage, die Bewirtschaftungs- und Klimadaten sowie die Höhe über NN betrachtet. Zusätzlich ging noch die Laufzeit als unabhängige Variable in das Modell ein. Die Vorgehensweise entsprach dabei der SVM-Modellierung der TOC-Gehalte.

Die erklärte Varianz betrug 90 %, wenn man bei den Bewirtschaftungsdaten die unteren Werte der Humusbilanzierung einbezog, bzw. 89 %, wenn die oberen Werte der Humusbilanzierung angelegt wurden. Dies bedeutet, dass nahezu die gesamte TOC-Veränderung durch die gegebenen Faktoren erklärt werden konnte. Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse der SVM, gerechnet mit den oberen und unteren Werten der VDLUFA-Humusbilanzierung. Die wichtigsten Einflussgrößen sind demnach der TOC-Ausgangsgehalt einer Fläche und deren Tongehalt.

Abbildung 16 verdeutlicht den Einfluss der Haupteinflussgrößen (TOC-Anfangsgehalt und Tongehalt) auf die langfristige TOC-Veränderung. Generell gibt es die höchste Zunahme der TOC-Gehalte bei niedrigen TOC-Anfangsgehalten von unter 2 % und Tongehalten ab ca. 30 %. Die größten TOC-Abnahmen sind bei hohen TOC-Anfangsgehalten zwischen etwa 2 % und 3 % und Tongehalten unter 10 % zu verzeichnen.

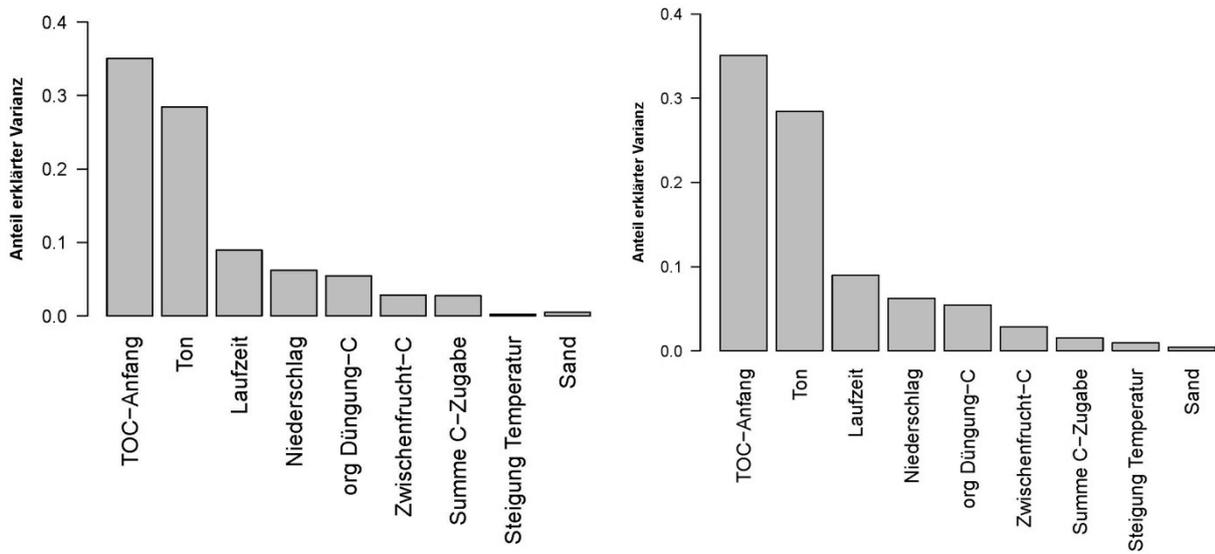


Abbildung 15: Mittels Support Vector Machine bestimmter Beitrag unabhängiger Variablen (links mit unteren, rechts mit oberen Richtwerten der VDLUFA-Humusbilanzierung), die die langfristigen TOC-Veränderungen erklären

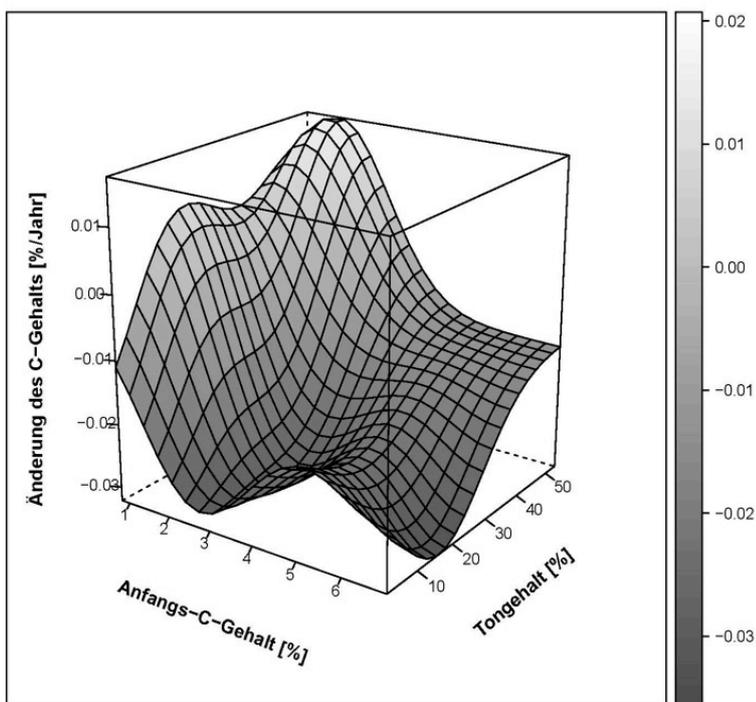


Abbildung 16: Einfluss des Anfangs-TOC-Gehalts und des Tongehalts auf die langfristige TOC-Veränderung (in % pro Jahr) an den Acker-BDF

Die Bedeutung des TOC-Ausgangsgehalts für TOC-Veränderungen wird in der Literatur diskutiert (z.B. Körschens 1997; Springob et al. 2001; Walther et al. 2001; Barkusky et al. 2009). Das Erreichen eines Gleichgewichtszustands bzw. Fließgleichgewichts des TOC-Status ist von verschiedenen Standorteigenschaften abhängig und benötigt mehrere Jahrzehnte. Bis zur Einstellung des Fließgleichgewichts ist die Kenntnis um die Vornutzung bzw. um den Humusgehalt zu Beginn der neuen Flächennutzung ein relevanter Faktor bei der Untersuchung von Trends der TOC-Gehalte. Die Richtung der Veränderungen ist abhängig vom Ausgangsgehalt.

Kurzfristige TOC-Veränderungen

Zur Erklärung der Differenz des TOC-Gehalts zum vorhergehenden Zeitpunkt der Probenahme wurden wieder die Variablen verwendet, welche auch schon für die Interpretation der TOC-Gehalte herangezogen wurden. Der Datenbestand (n = 668) setzte sich aus vollständigen Datensätzen ohne die erste Beprobung an einem Standort zusammen, weil hier naturgemäß keine Differenzbildung möglich ist. Die Auswertung mittels SVM ergab, dass die Gesamtvarianz zu 31 % erklärt werden konnte, was im Vergleich zu den beiden vorherigen Auswertungen deutlich weniger ist (Abbildung 17). Unabhängig von den verwendeten unteren oder oberen Werten der VDLUFA-Humusbilanzierung hat der mittlere Jahresniederschlag den höchsten Anteil an der erklärten Varianz (Abbildung 17). Allerdings erklärten einzelne Variablen maximal 8 % der Varianz. Die Ergebnisse sind deshalb nur mit äußerster Vorsicht zu interpretieren.

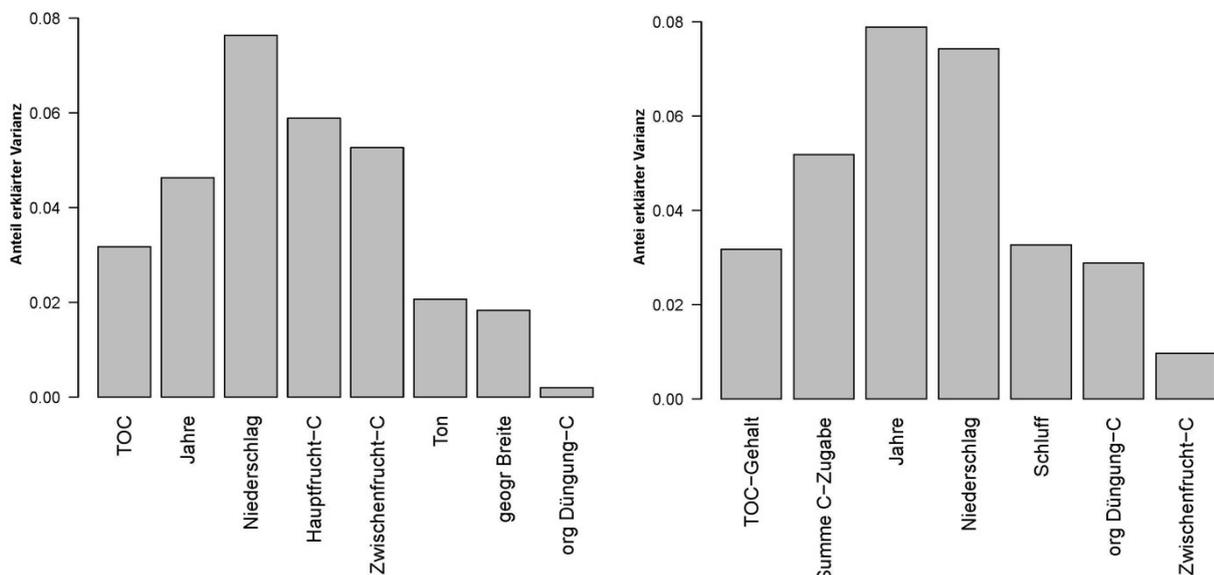


Abbildung 17: Mittels Support Vector Machine bestimmter Beitrag unabhängiger Variablen (links mit unteren, rechts mit oberen Richtwerten der VDLUFA-Humusbilanzierung) auf die kurzfristigen TOC-Veränderungen

3 Methodische Ansätze zur Ableitung von TOC-Erwartungsspannen

In § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG wird beschrieben, dass „*der standorttypische Humusgehalt des Bodens, insbesondere durch eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz oder durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität erhalten wird*“. Es wurden in diesem F+E-Teilvorhaben drei methodische Ansätze auf Basis des vorliegenden Datenbestandes erarbeitet, um Ober- und Untergrenzen an TOC-Gehalten abzuleiten, die in Ackerböden erwartet werden können. Daneben könnten solche Erwartungsspannen genutzt werden, um die Entwicklung von TOC-Gehalten über die Zeit zu prognostizieren.

Die Ansätze sind in Anlehnung an die Methodik von Capriel (2010) entwickelt. Bei dieser ursprünglich für bayerische Verhältnisse entwickelten Methode, die im Folgenden als „Lfl“ bezeichnet wird, dient die Höhenlage aufgrund ihrer engen Beziehung zu Niederschlag und Temperatur als Maß für den Einfluss des Klimas auf den TOC-Gehalt. Die Einstufung der Höhenlage wurde von Capriel (2010) so gewählt, dass etwa zwei Drittel der untersuchten Flächen in Bayern in einer Höhenstufe erfasst werden (350 bis 550 m). Die beiden anderen Höhenklassen haben die Grenzen <350 m bzw. >550 m. Des Weiteren wurden die drei Bodenartengruppen nach VDLUFA (leicht, mittel, schwer), die sich nach Tabelle 7 ableiten, für die Einordnung der TOC-Gehalte in Abhängigkeit von der Höhenstufe verwendet. Die TOC-Spannen wurden dann mit dem 12,5 %-Quantil als Untergrenze und dem 87,5 %-Quantil als Obergrenze für die Kombinationen von Höhenlage und Bodenart berechnet. Auf diese Weise wurden die extremen Werte auf beiden Seiten der Verteilung ausgeschlossen. Als erster Vorschlag wurde diese Methodik für die Ableitung von zu erwartenden TOC-Gehalten im Bundesgebiet angewendet.

Tabelle 7: Einteilung der Bodenart nach VDLUFA (aus Capriel 2010)

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		

Für einen zweiten Ansatz wurde die Lfl-Methode modifiziert (Methode Lfl_mod.), indem die TOC-Spannen auf Basis der bundesweiten TOC-Daten bestimmt wurden und nicht nur der aus Bayern. Beim dritten Ansatz (Methode Bund) wurde noch zusätzlich zur Methode Lfl_mod. die bundesweite Höhenverteilung in Betracht gezogen. Zwei Drittel der bundesweiten Acker-BDF liegen dabei zwischen 55 und 462 m. Die anderen beiden Höhenklassen haben demnach die Grenzen <55 m bzw. >462 m.

Für die Berechnungen wurden alle Acker-BDF einbezogen, bei denen Angaben zur Bodenart vorhanden waren. Anmoor- und Moor-Standorte wurden wegen ihrer untypisch hohen TOC-Gehalte ausgeschlossen. Nach Ansetzen dieser Kriterien konnten 302 von 312 Acker-BDF betrachtet werden.

Abbildung 18 zeigt die Spannweiten der TOC-Gehalte, die mit den drei Ansätzen ermittelt wurden. Bei leichten Böden in der ersten Höhenstufe differieren die TOC-Spannen zwischen den Ansätzen am meisten, wobei die Methode Bund den größten TOC-Bereich abdeckt. Bei den schweren Böden in der dritten Höhenstufe liegen die Spannen zwischen der LfL- und Bund-Methode (keine Daten für LfL_mod.) am weitesten auseinander.

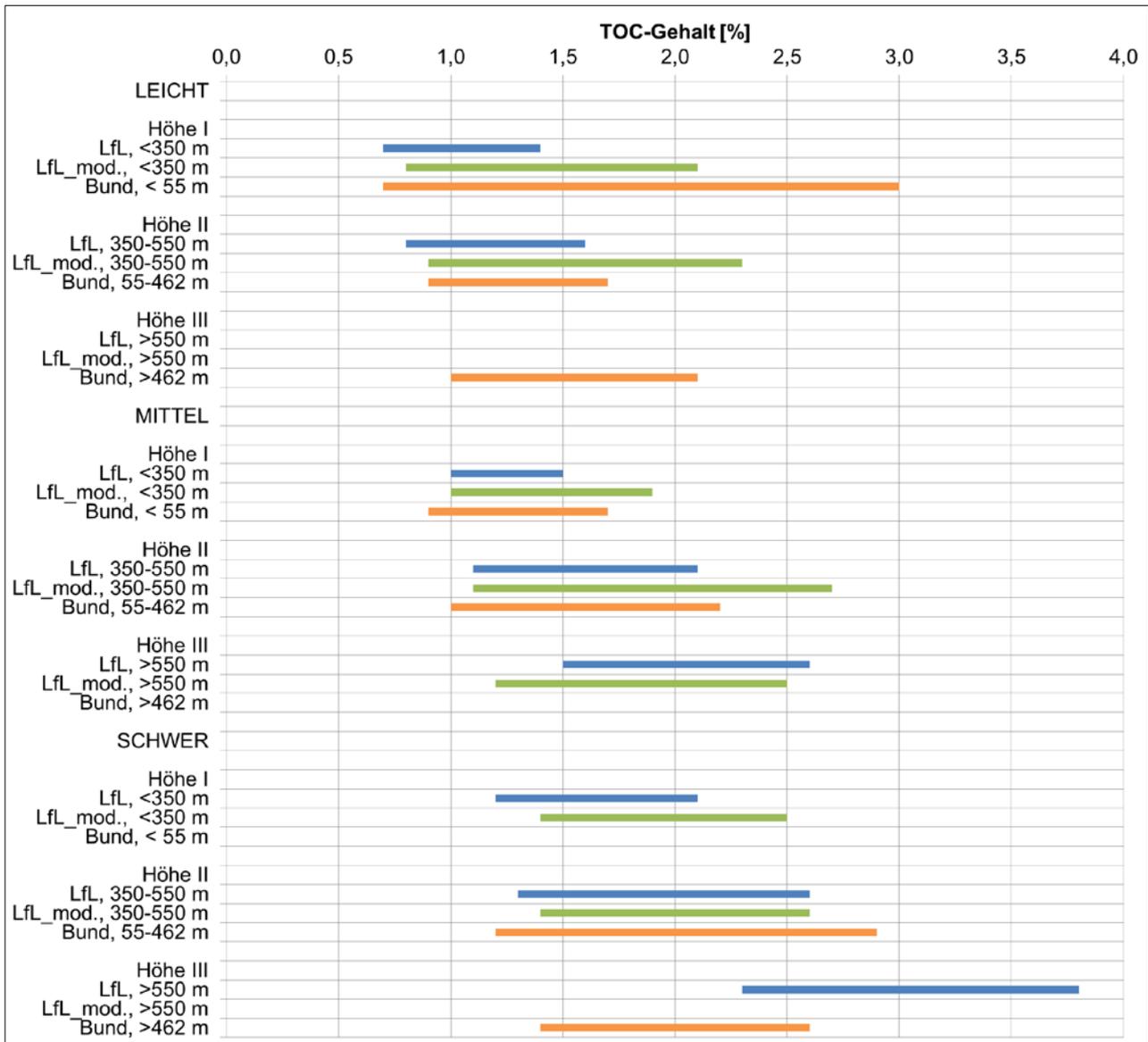


Abbildung 18: Vergleich von Spannweiten der TOC-Gehalte in Abhängigkeit der Höhe und Bodenart, abgeleitet aus drei Methoden (fehlende Balken = Spannen konnten nicht berechnet werden)

Die hier vorgelegten Erwartungsspannweiten, die aus den vorgestellten Ansätzen abgeleitet wurden, sind ein Werkzeug, um den TOC-Gehalt der BDF zu beschreiben. Die Anlage der BDF erfolgte u.a. unter Berücksichtigung einer Flächenrepräsentanz bezüglich des Bodeninventars eines Bundeslandes. Die Ergebnisse einer statistischen Auswertung bezüglich der Spannweiten von TOC-Gehalten der BDF, klassiert nach Bodenarten und Höhen über NN, tragen deshalb den

Charakter einer Übersicht über typische TOC-Gehalte von Böden in Deutschland. Diese Werte können auf ähnlichen Standorten erwartet werden.

In bundesweiten flächenhaften Auswertungen ohne zeitlichen Bezug wird die Relevanz der Bodeneigenschaften und klimatologischer Parameter für die vorgefundenen TOC-Gehalte dargestellt (z.B. bei Düwel et al. 2007). In verschiedenen Publikationen ist ein expliziter Einfluss der Höhenlage auf die Gehalte an TOC beschrieben. Auch in bundesweiten Auswertungen konnten Hinweise gefunden werden, nach denen die Höhenlage der Standorte ein abgrenzbarer Einflussfaktor für C_{org} -Gehalte sein kann (Utermann et al. 2009). Die Höhenlage spiegelt in diesen Fällen in erster Linie die Unterschiede hinsichtlich Temperatur und Niederschlag wider (vgl. z.B. Capriel 2010; Ebertseder et al. 2010a). Hinweise auf Auswirkungen durch klimatische Veränderungen werden auch in anderen Publikationen gegeben (Ellmer & Baumecker 2008; Baumecker et al. 2009).

Die SVM-Ergebnisse dieser Studie erbrachten keinen Hinweis darauf, dass die Höhenlage über den Effekt der klimatischen Größen hinaus einen direkten Einfluss auf die TOC-Gehalte hatte (Teil C, Kapitel 2.11). Für eine Einbeziehung der Temperatur- und Niederschlagsdaten in die Berechnung von standorttypischen TOC-Werten müsste in einem ersten Schritt eine geeignete Klassifizierung dieser Klimadaten vorgenommen werden, um die vorgeschlagenen Methodik zu optimieren.

Faktoren wie Grünlandumbruch, Grundwasserabsenkung, Vernässung, Erosion usw. müssen bei der Erarbeitung von Bewertungsspannen ebenfalls näher berücksichtigt werden, da sie in erheblichem Maß den TOC-Gehalt beeinflussen. Ebenso müssen Angaben zur Bewirtschaftung in eine Auswertung einfließen, beispielsweise Informationen zu meliorativer Tieflockerung mit Tiefenangabe. In diesem Zusammenhang wird von Möller & Kennepohl (2014) darauf hingewiesen, dass es in sandigen Podsolen durch eine Einarbeitung des Bhs- in den Ap-Horizont zu einer Erhöhung der TOC-Gehalte im Oberboden kommen kann.

In Tabelle 8 sind die TOC-Werte der 39 BDF aufgelistet, bei denen signifikante TOC-Veränderungen über die Zeit nachgewiesen wurden (Teil C, Kapitel 2.8). Diese Werte wurden anhand der ebenfalls aufgelisteten Erwartungsspannen eingeordnet, die mit der Methode „Bund“ abgeleitet wurden. Bei der Gegenüberstellung von gemessenen (realen) und gemäß den Spannen zu erwartenden TOC-Veränderungen zeigt sich, dass in 18 % (7 von 39) der Fälle die beobachteten Veränderungen in Richtung der zu erwartenden Gleichgewichtswerte erfolgte. In nur zwei Fällen waren die Richtungen gegenläufig, d.h. es wurde eine Abnahme beobachtet und eine Zunahme prognostiziert (BY-0055) und umgekehrt (NI-0065). Bei 30 von 39 BDF lagen die realen Werte innerhalb der Erwartungsspanne, daher wurde keine Veränderung prognostiziert. Ob die dabei gemessenen Zu- oder Abnahmen die TOC-Erwartungsspannen in Zukunft über- oder unterschreiten, kann mit den vorhandenen Daten nicht vorhergesagt werden. Auch wenn in den methodischen Ansatz noch die oben genannten Faktoren zur Optimierung einfließen müssen, lässt sich festhalten, dass beim überwiegenden Anteil der vorliegenden Ergebnisse die Entwicklungsrichtung der TOC-Veränderungen treffend prognostiziert werden konnte.

Tabelle 8: Einordnung der TOC-Gehalte der BDF nach der Erwartungsspanne und Gegenüberstellung der gemessenen mit den zu erwartenden Werten (oberhalb der oberen fetten Linie = durchgängig Zunahmen, unterhalb der unteren fetten Linie = durchgängig Abnahmen)

BDF	TOC [%]	TOC-Erwartungsspanne [%]	Veränderung	
			real	zu erwarten
BY-0028	0,8	0,9-1,7	Zunahme	Zunahme
BY-0093	0,8	1,2-2,5	Zunahme	Zunahme
NI-0047	0,9	1,0-2,2	Zunahme	Zunahme
NI-0005	1,0	1,0-2,2	Zunahme	keine
BY-0109	1,1	1,2-2,5	Zunahme	Zunahme
SH-0036	1,2	0,9-1,7	Abnahme	keine
NI-0009	1,2	1,0-2,2	Zunahme	keine
NI-0067	1,2	0,7-3,0	Abnahme	keine
NI-0051	1,2	1,4-2,6	Zunahme	Zunahme
BY-0029	1,3	1,0-2,2	Zunahme	keine
BY-0123	1,3	1,2-2,5	Abnahme	keine
BY-0041	1,3	1,0-2,2	Zunahme	keine
SH-0029	1,3	0,9-1,7	Abnahme	keine
NI-0002	1,3	1,0-2,2	Zunahme	keine
BY-0055	1,3	1,4-2,6	Abnahme	Zunahme
BY-0103	1,4	1,2-2,5	Zunahme	keine
HE-0018	1,5	1,4-2,6	Abnahme	keine
SH-0024	1,5	0,9-1,7	Abnahme	keine
BY-0025	1,6	1,0-2,2	Zunahme	keine
NI-0013	1,6	1,0-2,2	Abnahme	keine
HE-0012	1,7	0,9-1,7	Abnahme	keine
BY-0095	1,7	1,0-2,2	Abnahme	keine
BY-0100	1,7	1,2-2,5	Abnahme	keine
BY-0019	1,8	1,4-2,6	Abnahme	keine
BY-0092	1,8	1,4-2,6	Zunahme	keine
NI-0035	1,8	0,7-3,0	Zunahme	keine
BY-0064	1,8	1,0-2,2	Abnahme	keine
NI-0026	1,9	0,7-3,0	Abnahme	keine
NI-0033	1,9	0,7-3,0	Abnahme	keine
BY-0060	2,0	1,0-2,2	Abnahme	keine
BY-0125	2,0	1,0-2,2	Zunahme	keine
BY-0071	2,1	1,0-2,2	Abnahme	keine
BY-0086	2,1	1,4-2,6	Zunahme	keine
HE-0002	2,3	1,4-2,6	Abnahme	keine

BDF	TOC [%]	TOC-Erwartungsspanne [%]	Veränderung	
			real	zu erwarten
SH-0004	2,5	0,7-3,0	Abnahme	keine
BY-0067	2,6	1,4-2,6	Abnahme	keine
NI-0065	2,7	1,4-2,6	Zunahme	Abnahme
NI-0031	3,7	0,9-1,7	Abnahme	Abnahme
BY-0005	7,0	1,0-2,2	Abnahme	Abnahme

4 Vergleich mit Dauerfeldversuchen

Um die TOC-Entwicklungen an den BDF einordnen zu können, wurden einige der vorliegenden Ergebnisse mit den Daten von Dauerfeldversuchen (DFV) verglichen, die von Körschens et al. (2014) ausgewertet wurden (siehe Kapitel 9, Anhang). In der genannten Arbeit wurden die TOC-Gehalte der Böden an 10 unterschiedlichen Standorten mit insgesamt 15 Versuchen und etwa 150 unterschiedlichen Düngungsvarianten auf signifikante Veränderungen untersucht. Dabei konnte auf Messreihen zurückgegriffen werden, an denen TOC-Gehalte über einen Zeitraum von 20 Jahren lückenlos gemessen wurden. Anders als bei den BDF haben die DFV den Vorteil, dass dort gemäß Ceteris-Paribus-Prinzip alle Bewirtschaftungsfaktoren, wie beispielsweise Fruchtfolge, Düngung und Bodenbearbeitung, unverändert waren. Diese Bedingungen waren zudem schon vor den TOC-Untersuchungen über einen langen Zeitraum gegeben, sodass die jeweiligen Böden möglichst keinen Einflüssen von Nutzungsänderungen ausgesetzt waren, was in weiterer Abgrenzung zu den BDF steht. Bei nahezu allen gedüngten Fläche wurde keine signifikante Abnahme der TOC-Gehalte über die Zeit registriert, in einigen Fällen wurden signifikante TOC-Zunahmen während des Untersuchungszeitraums nachgewiesen (Körschens et al. 2014). Diese Ergebnisse bestätigten andere Untersuchungen von Dauerfeldversuchen und wurden auch bei der Auswertung der TOC-Veränderungen bei den BDF gefunden (Teil C, Kapitel 2.8). Einzelne Beispiele dazu werden im Folgenden gegeben.

Für den Vergleich zwischen den TOC-Entwicklungen bei BDF und DFV wurden vier Flächen mit möglichst ähnlichen Bodeneigenschaften und TOC-Gehalten ausgewählt. Die Flächenpaare mit ihren Standorteigenschaften sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Übersicht der Dauerfeldversuch (DFV)- und Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF)-Standorte und sowie deren ausgewählte Eigenschaften

DFV / BDF	Bad Lauchstädt / BY-72	Prag / SH-29	Thyrow / NI-17	Braunschweig / NI-3
Substrat	Lehm/Lehm	Lehm/Lehm	Sand/Sand	Sand/Sand
Ton [%]	21/21	31/17	3/6	6/7
Durchschnittliche Jahrestemperatur [°C]	8,8/7,3	8,1/8,8	8,6/8,9	9,0/9,4
Temperatur 1991-2010	0,8/0,7	0,4/0,4	0,7/0,8	0,6/0,6
Niederschlag [mm]	489/748	450/692	520/683	619/659

In Abbildung 19 bis Abbildung 22 sind die Trendgeraden der TOC-Verläufe der ausgewählten BDF und DFV dargestellt. Es wurden die Daten der DFV-Flächen abgebildet, die eine mineralische (NPK)-Düngung und organische Düngung (Stalldung oder -mist) erhalten hatten, da die dargestellten BDF ebenfalls mineralisch und organisch gedüngt wurden. Bei den Vergleichspaaren Bad Lauchstädt/BY72 und Braunschweig/NI3 sind keine signifikanten Veränderungen nachgewiesen worden. Das Paar Prag/SH72-BDF zeigt signifikante Abnahmen des TOC über die Zeit und beim Vergleich Thyrow/NI17 zeigt die DFV-Fläche eine signifikante Zunahme des TOC-Gehalts, während dieser sich bei der BDF unverändert zeigte und mit der hier zusätzlich dargestellten NPK-Düngungsvariante gleichlief.

Die Hauptaussagen in der Auswertung der DFV gelten auch für die BDF. So überwiegt deutlich der Anteil der BDF- und DFV-Standorte, an denen keine statistisch abgesicherten Veränderungen festzustellen waren (siehe auch Bad Lauchstädt/BY72, Braunschweig/NI3).

Die beobachteten signifikanten TOC-Zu- und -Abnahmen konnten keinem Klimaeinfluss zugeordnet werden. Dass längerfristige Klimaänderungen einen Einfluss auf die TOC-Entwicklung haben, kann dennoch nicht ausgeschlossen werden. Die nachgewiesenen TOC-Änderungen sind durch das TOC-Ausgangsniveau der Flächen gesteuert, das möglicherweise einem standorttypischen Wert zustrebt (Teil C, Kapitel 3). Daher kann man mit TOC-Anstiegen rechnen, wenn die TOC-Gehalte der Böden unterhalb eines erwarteten TOC-Wertes liegen und ständig über z.B. Bewirtschaftung (organische Düngung) mit Humus angereichert werden. Auf diese Weise können auch die TOC-Verläufe beim Vergleichspaar Thyrow/NI17 erklärt werden. Dabei ist der TOC-Gehalt der BDF im Fließgleichgewicht mit den dortigen Standorteinflüssen, während der TOC der DFV-Fläche signifikant ansteigt, weil hier der standorttypische Wert noch nicht erreicht ist. Die NPK-Variante derselben DFV-Fläche zeigt hingegen keine Veränderung im TOC-Gehalt, weil die Humuszufuhr durch eine organische Düngung fehlt. Tatsächlich beginnen die mit allen Methoden abgeleiteten TOC-Erwartungsspannen bei leichten Böden in der niedrigsten Höhenstufe, wie sie an beiden Standorten vorliegt, bei ca. 0,8 %. Dieser Wert ist erst gegen Ende der Messreihe nach 20 Jahren erreicht, sodass man erst jetzt unter weiterhin gleich bleibenden Bedingungen erwarten kann, dass sich die TOC-Gehalte stabilisieren.

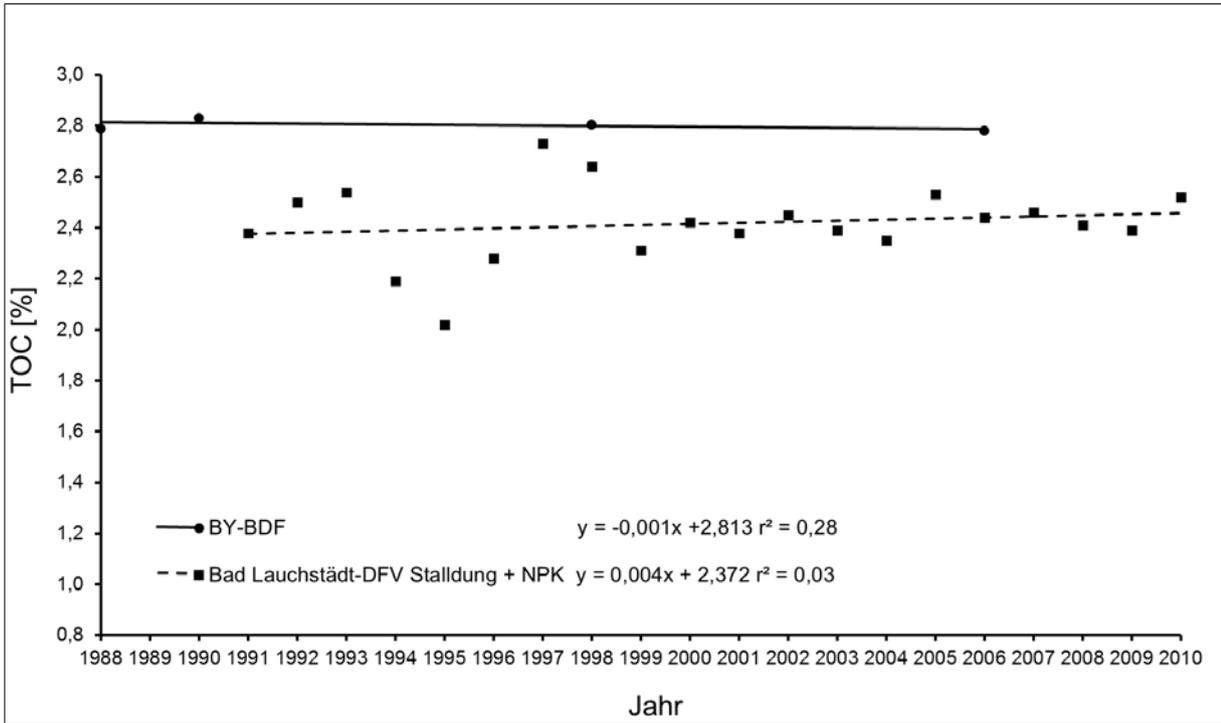


Abbildung 19: Vergleich der TOC-Verläufe von Bad Lauchstädt (DFV) und BY 72 (BDF)

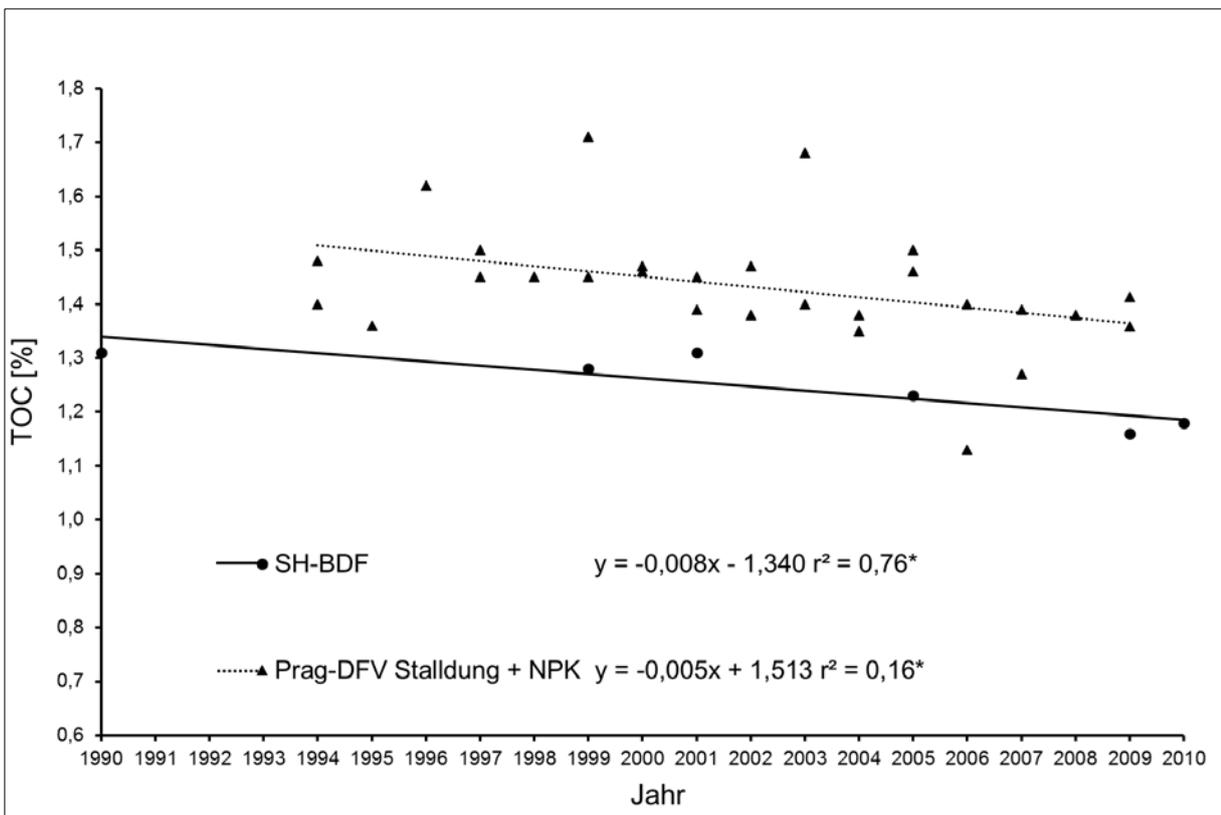


Abbildung 20: Vergleich der TOC-Verläufe von Prag (DFV) und SH 29 (BDF)

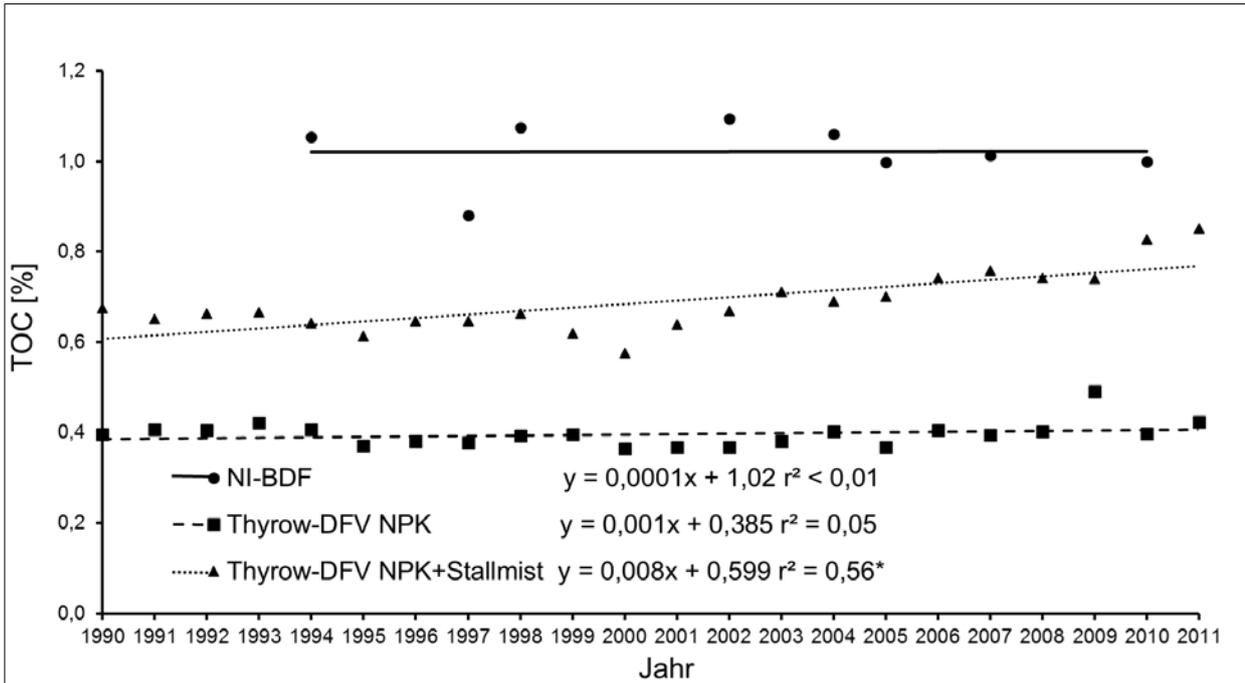


Abbildung 21: Vergleich der TOC-Verläufe von Thyrow (DFV) und NI17 (BDF)

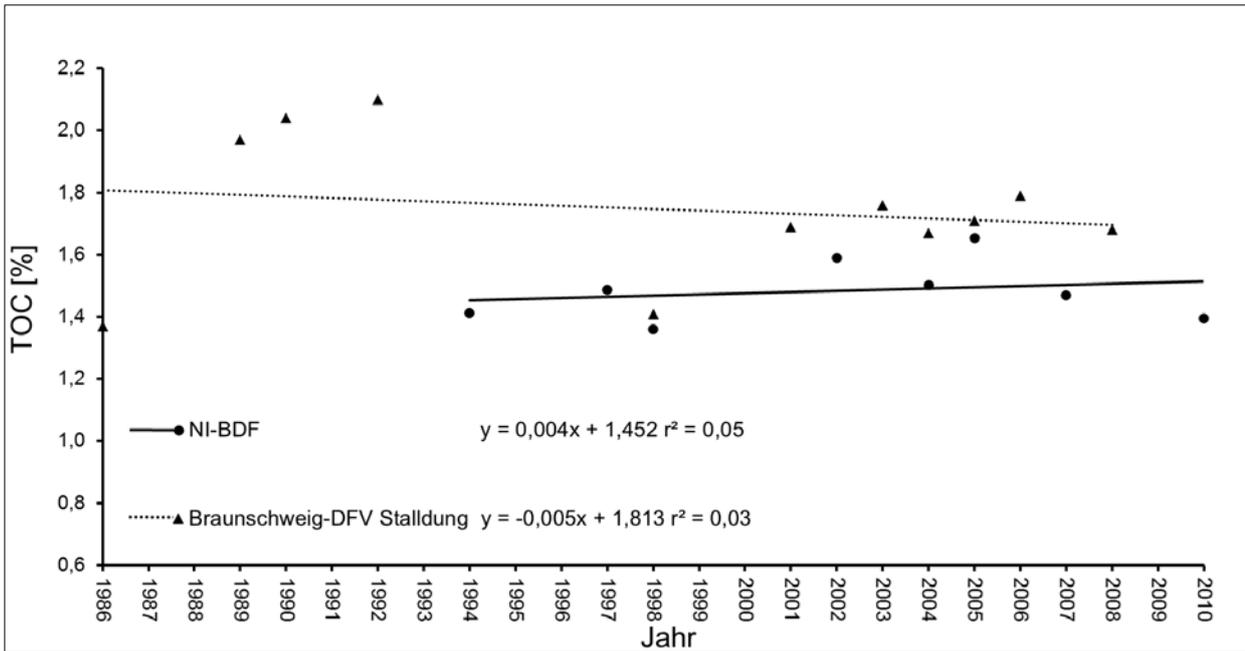


Abbildung 22: Vergleich der TOC-Verläufe von Braunschweig (DFV) und NI3 (BDF)

5 Entwicklung von Vorschlägen zum verbesserten Bodenschutz im Hinblick auf die C-Gehalte

5.1 Darstellung der erarbeiteten Ergebnisse vor dem Hintergrund des Bodenschutzes

Festgestellte Regelhaftigkeiten und Relevanz für den Bodenschutz

Die Humusgehalte von Böden werden bestimmt durch die Zufuhr organischen Materials und die Umsetzungsbedingungen am Standort. Dabei spielen neben den Bewirtschaftungsmaßnahmen (z.B. Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Düngung) insbesondere die Standorteigenschaften (Boden, Klima, Relief) eine Rolle (Ebertseder et al. 2010b).

Nachfolgend wird als Rahmen ein DPSIR-Ansatz genutzt, innerhalb dessen die Erkenntnisse aus Kapitel 2 (Teil C – Datenauswertung) übertragen und Anpassungsmaßnahmen beschrieben und strukturiert werden können (siehe Tabelle 10).

Der DPSIR-Ansatz ist ein Modell zur Darstellung komplexer kausaler Zusammenhänge zwischen Umweltbelastungen und Umweltschutzmaßnahmen, d.h. der Wechselwirkung zwischen Gesellschaft und Umwelt (Lee 2007): Menschliche Aktivitäten (Driving Forces) üben eine Belastung auf die Umwelt aus (Pressures) und führen somit zu einer Änderung des Status der Umweltqualität bzw. der Quantität und Qualität natürlicher Ressourcen (State). Auswirkungen (Impacts) sind die spezifischen Wirkungen der Umweltbelastung, beispielsweise die veränderten mikrobiellen Abbauraten und der verstärkte Humusabbau im Boden. Die Gesellschaft/der Mensch, reagiert auf diese Änderung durch entsprechende Maßnahmen (Responses).

Den Folgen des Klimawandels auf den Boden kann die Landwirtschaft durch angepasste Bewirtschaftungsmaßnahmen begegnen und damit Einfluss auf den Humusabbau nehmen.

Tabelle 11 zeigt detailliert die Auswirkung der Klimaänderungen auf die Ressource Boden mit ihrem Humusvorrat. Die dargestellten Folgen des Klimawandels basieren auf:

1. Regionalisierten Auswertungen von DWD-Klimadaten bzw. -modellen mit den Ergebnissen:
 - flächendeckend signifikante Zunahme der Jahresmitteltemperatur,
 - regional auftretende signifikante Zunahme der Summe des Jahresniederschlags,
 - regional auftretende Unterschiede des Bodenfeuchtemaßes.
2. Ergebnissen der multivariaten statistischen Auswertung der Messergebnisse von Bodendauerbeobachtungsflächen (siehe Kapitel 2.11, Teil C – Datenauswertung).

Tabelle 10: DPSIR-Ansatz: Einfluss der Landwirtschaft auf die Bodennutzung und das Klima

Einflussgröße		Beschreibung	Indikatoren/Beispiele
Driving Forces	treibende Kräfte, die eine Auswirkung auf das Klima haben ...	Landwirtschaft Bundesweit trägt die landwirtschaftliche Nutzung organischer Böden mit etwa 3,8 % zu den Gesamtemissionen an Treibhausgasen bei. Damit zählt die Landwirtschaft zu den Haupttreibhausgasquellen nach IPCC (LABO 2010)	Landnutzungswandel Landbedeckungswandel Intensivanbau
Pressures	... der daraus resultierende Belastung ...	Freisetzung von Treibhausgasen aus dem Boden in die Atmosphäre (Treibhauseffekt)	Konzentration an klimawirksamen Gasen
State	... der Zustand des Klimas der Zustand des Bodens ...	Klimaveränderung Veränderungen im Boden	Temperatur, Niederschlag, Verdunstung Kohlenstoff- und Wasserrückhalt
Impact die spezifischen Auswirkungen ...	bodenspezifische Auswirkungen des Klimas, welche eine Veränderung der Humusvorräte bedingen	Veränderung der mikrobiellen Aktivität Verändertes Pflanzenwachstum Verschiebung/Verlängerung der Vegetationsperiode Veränderung des Bodenkohlenstoffvorrats
Response	... die Anpassung(smaßnahmen) an das veränderte Klima sowie an veränderte Kohlenstoffvorräte im Boden	Anpassungsmaßnahmen (vgl. Tabelle 12 bis Tabelle 14)	Angepasste Bewirtschaftung Bodenbearbeitung <ul style="list-style-type: none"> • Bearbeitungstiefe • Bearbeitungshäufigkeit • Technik, Geräte Nährstoffversorgung <ul style="list-style-type: none"> • Düngung • Kalkung Fruchtfolge/Ertrag <ul style="list-style-type: none"> • Hauptfrucht • Zwischenfrucht • Erntemenge

Tabelle 11: Folgen des Klimawandels und deren Einflüsse auf den Humusvorrat des Bodens¹

State Temperaturerhöhung (↑), Bodenfeuchteerhöhung (↑), Niederschlagserhöhung (↑)
Impact Erhöhung des Bodenkohlenstoffvorrats (+)
<ul style="list-style-type: none"> • längere Vegetationsperiode → erhöhte CO₂-Bindung durch die Pflanzen → verstärkte Bildung von Phytomasse und damit erhöhter Anfall von Pflanzenrückständen (Rinklebe et al. 2011a) • Zunahme der Evapotranspiration → schnellere Leerung des Bodenwasserspeichers → hemmt Pflanzenwachstum und mikrobielle Aktivität (Rinklebe et al. 2011a) • höhere Temperaturen und mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre → verminderter Proteingehalt von Blättern und Früchten (MKULNV 2011a) → Qualität der Pflanzen ändert sich (Proteingehalt sinkt) → Zusammensetzung der organischen Substanz ändert sich → Reduzierung des leichter abbaubaren labilen Kohlenstoffpools im Boden → Hemmung der mikrobiellen Aktivität (Rinklebe et al. 2011c)
Impact Verringerung des Bodenkohlenstoffvorrats (-)
<ul style="list-style-type: none"> • mikrobielle Aktivität setzt im Jahresverlauf früher ein → verstärkter Abbau der organischen Substanz (Rinklebe et al. 2011c) • Intensivierung der biologischen Prozesse im Boden: Vermehrung von Bodenorganismen und Bodentieren, Wurzelwachstum, Umsetzungsrate der organischen Bodensubstanz (MKULNV 2011b) → temperaturbedingte Erhöhung der mikrobiellen Aktivität (Q10-Regel) → Zunahme der Zersetzungs- und Mineralisierungsleistung der Bodenorganismen² → verstärkter Abbau der organischen Bodensubstanz (Gisi 1997) • Steigerung des Stoffumsatzes im Boden → Abtransport von gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC = dissolved organic matter) mit dem Sickerwasser (MKULNV 2011b)
State Temperaturerhöhung (↑), Bodenfeuchteabnahme (↓), Niederschlagsabnahme (↓)
Impact Erhöhung des Bodenkohlenstoffvorrats (+)
<ul style="list-style-type: none"> • Verringerung der Bodenfeuchte (z.B. länger andauernde Trockenphase im Sommer) führt zu Verringerung der bodenmikrobiellen Aktivität (Rinklebe et al. 2011a) (vgl. Alternative bei „Verringerung des Bodenkohlenstoffvorrats“) • auf Böden mit einem hohen pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt³ Zunahme des Pflanzenwachstums auch bei (phasenweise) steigenden Temperaturen (MKULNV 2011b) • längere Trockenphasen führen zu Verringerung der bodenmikrobiellen Aktivität und Hemmung des Abbaus der organischen Bodensubstanz → Hemmung der Bodenatmung (CO₂-Freisetzung) (Rinklebe & Prüß 2011)

¹ Die Folgen des Klimawandels sind in der Tabelle teilweise sowohl unter „Erhöhung des Bodenkohlenstoffvorrats“ als auch unter „Verringerung des Bodenkohlenstoffvorrats“ dargestellt.

² Es besteht noch ein erheblicher Forschungsbedarf zu den Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Biodiversität im Boden und zu den ökologischen Folgen einer Veränderung der Bodenfauna (LABO 2010; Schimel & Schaeffer 2012).

³ Pflanzenverfügbares Bodenwasser hängt von der Körnung des Bodens (Sand < Lehm < Ton), der Durchwurzelungstiefe und der Nachlieferung aus Grund- und Stauwasser ab. Flachgründige Sandböden müssen somit zukünftig verstärkt beregnet werden.

Impact Verringerung des Bodenkohlenstoffvorrats (-)
<ul style="list-style-type: none"> • Verringerung der Bodenfeuchte (z.B. länger andauernde Trockenphase im Sommer) führt zu Abnahme der Phytomasse und/oder Änderung der Artenzusammensetzung mit geringerem Anfall an Pflanzenrückständen (Rinklebe et al. 2011a)
State Temperaturkonstanz (→), Bodenfeuchteerhöhung (↑), Niederschlagserhöhung (↑)
Impact Erhöhung des Bodenkohlenstoffvorrats (+)
<ul style="list-style-type: none"> • erhöhte Niederschläge auf bestimmten Standorten (z.B. in Mooren, Anmooren, Auenböden, Marschen) → anaerobe Verhältnissen → Hemmung der mikrobiellen Aktivität → Humusanreicherung bis hin zu Torfbildung (Rinklebe et al. 2011a) • Anstieg Grundwasserspiegel → anaerobe Verhältnisse → Hemmung der mikrobiellen Aktivität → verlangsamter Abbau der organischen Substanz (Kaufmann-Boll et al. 2011a)
Impact Verringerung des Bodenkohlenstoffvorrats (-)
<ul style="list-style-type: none"> • Starkregenereignisse → Anstieg Wassererosion → stellenweise Verlust der organischen Substanz → Verringerung Nährstoffverfügbarkeit → Verringerung Pflanzenwachstum mit geringerem Anfall an Pflanzenrückständen (MKULNV 2011a)

Der Boden ist mit seinen Funktionen als Ausgleichskörper im Temperatur-, Wasser- und Stoffhaushalt, Pflanzenstandort und Lebensraum für Bodenorganismen Bestandteil eines komplexen Regelkreises. Bezüglich der Wirkung des Klimawandels und damit verbundener Veränderungen der Temperatur und des Niederschlags auf die mikrobielle Zusammensetzung und Aktivität in den Böden besteht z.T. noch erheblicher Forschungsbedarf (z.B. LABO 2010; Schimel & Schaeffer 2012; Hagerty et al. 2014).

Steigende Temperaturen führen bei ausreichender Bodenfeuchte zu einem verstärkten Abbau der organischen Substanz aufgrund zunehmender mikrobieller Aktivität (z.B. Gisi 1997; Qiu et al. 2005; Chan 2008; MKULNV 2011a; Rinklebe & Prüß 2011; Mi et al. 2014). Die Änderung des Bodenwassergehalts kann sich jedoch sowohl positiv als auch negativ auf die mikrobielle Aktivität und den Auf- oder Abbau der organische Bodensubstanz (OBS) auswirken (Rinklebe et al. 2011c). Eine Erhöhung der Bodenfeuchte wirkt zunächst fördernd auf den Stoffwechsel des Bodenlebens und damit auf den OBS-Abbau. Nach Überschreitung eines Grenzwertes der Bodenfeuchte nach oben wird der OBS-Abbau schließlich aufgrund von Sauerstoffmangel gehemmt (Rinklebe et al. 2011a,b).

Als Folge der Temperaturerhöhung wird mit verstärktem Pflanzenwachstum gerechnet. Allerdings stellt Degener (2013) in Untersuchungen für Niedersachsen fest, dass für alle Fruchtarten der Wasserhaushalt der limitierende Faktor für die Ertragsbildung ist. Hier spielt insbesondere die Wasserverfügbarkeit im Sommerhalbjahr eine Rolle. Einerseits kann verstärktes Pflanzenwachstum zu erhöhtem Wasserbedarf durch die Evapotranspiration führen. Dadurch steht den Bodenmikroorganismen weniger Wasser zur Verfügung, die Hemmung ihrer Aktivität ist die Folge. Dazu kann es insbesondere kommen, wenn mit der Verschiebung des Beginns der Vegetationsperiode auf einen früheren Zeitpunkt im Jahr die auflaufenden Pflanzenbestände zeitiger für Wasserentzug und Leerung des Bodenwasserspeichers sorgen. Andererseits wird erwartet, dass mit der erhöhten Phytomasseproduktion auch mehr Pflanzenreste für den Aufbau der organischen Substanz im Boden anfallen. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die veränderten Wachstumsbedingungen für Pflanzen deren Zusammensetzung (C/N-Verhältnis) beeinflussen. Die veränderte Qualität kann schließlich eine Verschiebung der Zusammensetzung der

mikrobiellen Lebensgemeinschaft hervorrufen (Schimel & Schaeffer 2012), zu veränderten Bedingungen für den Auf- oder Abbau der OBS und damit zu Veränderungen der Eigenschaften des Bodens als Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumediums führen.

Die genannten Zusammenhänge verdeutlichen einmal mehr die Klimafunktion des Bodens. Sie drückt sich zum einen in seiner Eigenschaft aus, Kohlenstoff zu speichern und damit auf Wasser- und (Nähr-)Stoffkreisläufe zu wirken; zum anderen erfüllt der Boden mit dem gespeicherten Kohlenstoff Funktionen als Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium. Die mit dem Kohlenstoffgehalt des Bodens verbundenen Eigenschaften bezüglich der Wasserspeicherfunktion und der Fähigkeit, unerwünschte Stoffe zu sorbieren und so das Grundwasser und Mensch vor dem Eintrag dieser Stoffe zu schützen, (Willand et al. 2014) seien als Beispiel genannt.

Die Klimafunktion von Böden wird noch klarer, wenn berücksichtigt wird, dass rund 80 % der derzeit weltweiten Kohlenstoffmenge, die am aktiven Kohlenstoffkreislauf in der Biosphäre beteiligt ist, in der organischen Substanz des Bodens gebunden sind (MKULNV 2011b).

Auf die landwirtschaftlich genutzten Böden wirken stets die Maßnahmen der Bodenbewirtschaftung auf das Gefüge aus Temperatur, Niederschlag, Bodenleben und Pflanzenwachstum. Dabei bietet die sinnvolle Anwendung und Kombination von Maßnahmen der Bodenbearbeitung, Fruchtfolge und Düngung die Möglichkeit, den Einfluss des Klimawandels abzuschwächen, den Humusstatus der Böden im Sinne des Bodenschutzes und nach § 17 Abs. 2 Nr. 7 BBodSchG zu erhalten oder zu verbessern und somit die Klimafunktion des Bodens zu schützen.

5.2 Vorschläge zum verbesserten Bodenschutz

Die kohlenstoffsenkende Funktion der Böden zu erhalten, wiederherzustellen und/oder zu verbessern, spielt daher sowohl für den Klimaschutz als auch für den Bodenschutz eine entscheidende Rolle. Vor dem Hintergrund der Klimaänderungen ist dies eine besondere Herausforderung (LABO 2010). Zum gegenwärtigen Stand der Bodenschutzgesetzgebung wird die Klimafunktion allerdings nur mittelbar, nämlich über den Schutz der natürlichen Bodenfunktionen geschützt (Willand et al. 2014).

Die landwirtschaftliche Bodennutzung ist in § 17 Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und § 5 Abs. 2 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) näher geregelt.

Im § 17 des BBodSchG stehen dabei sowohl die nachhaltige Sicherung der Bodenfruchtbarkeit als auch der Leistungsfähigkeit des Bodens als natürliche Ressource im Mittelpunkt. Es wird insbesondere Bezug genommen auf eine witterungs- und standortangepasste Bodenbearbeitung, den Erhalt/die Verbesserung der Bodenstruktur sowie die Vermeidung von Bodenverdichtung und Bodenabträgen. Dem Bodenschutz dienende naturbetonte Strukturelemente in der Feldflur sollen geschützt und die biologische Aktivität sowie der standorttypische Humusgehalt erhalten oder verbessert werden. Aufgrund seiner Eigenschaften im System Boden ist der Gehalt an Humus, aber auch dessen Qualität wiederum innerhalb der Punkte biologische Aktivität, Bodenstruktur, Bodenverdichtung und Bodenabtrag wirksam.

Das BNatSchG hebt in § 5 auf die standortangepasste Bewirtschaftung und nachhaltige Nutzbarkeit der Flächen ab und konkretisiert die „gute fachliche Praxis“ (gFP) der landwirtschaftlichen Bodennutzung weiter in den Forderungen nach Erhalt der Biodiversität, der Biotopvernetzung, nach einer im angemessenen Verhältnis zum Pflanzenbau stehenden Intensität der Tier-

haltung, der Unterlassung des Umbruchs von Grünland sowie der Anwendung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln nach allen fachrechtlichen Maßgaben.

Als Mittel der Verhaltenssteuerung ist sowohl im BBodSchG als auch im BNatSchG die sogenannte „gute fachliche Praxis“ (gFP) der landwirtschaftlichen Bodennutzung vorgesehen. Sie stellt nach SRU (2002) *„das von den Landwirten bei ihrer Landnutzung zwingend – und auf eigene Kosten – einzuhaltende ökologische und sicherheitstechnische Schutzniveau“* dar.

Willand et al. (2014) weisen jedoch in ihrer Defizitanalyse des Bodenschutzrechts bezüglich des Schutzes der Klimafunktion u.a. darauf hin, dass die Grundsätze der „guten fachlichen Praxis“ konkretisiert werden müssen. Die Notwendigkeit dazu wurde bereits in LABO (2010) formuliert und erneut in LABO (2014) klargestellt. Dort wird auch herausgearbeitet, dass die Erfüllung von Vorschriften im Rahmen der EU-Agrarförderung (Vorschriften zum guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand – GLÖZ) nicht ausreichend ist, um die Anforderungen des BBodSchG zu erfüllen: Die Vorschriften zum GLÖZ sind beispielsweise weniger anspruchsvoll als die Anforderungen der gFP und beschränken sich nicht auf alle Bereiche der landwirtschaftlichen Bodennutzung (LABO 2014). Sie sind darüber hinaus nur für die Landwirte relevant, die die Förderung in Anspruch nehmen.

Anwendung der gFP

Der Gesetzgeber hat in der Formulierung der Grundsätze der „guten fachlichen Praxis“ im Bodenschutzrecht (§ 17 Abs. 2 Nr. 7 BBodSchG) zwei Maßnahmen besonders betont: Einerseits soll durch eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz, andererseits durch die Reduzierung der Bearbeitungsintensität die Humuserhaltung gewährleistet werden.

Da der umsetzbare Teil des Humusgehalts überwiegend dem Eingriff des Bewirtschafters unterliegt, sollen im Folgenden angepasste Bewirtschaftungsmaßnahmen dargestellt werden, durch welche die Landwirtschaft den Folgen einer veränderten Bodennutzung, des Klimawandels und einem damit einhergehenden Humusabbau begegnen kann.

Die Möglichkeit, abgesicherte Empfehlungen zu Bodenschutzmaßnahmen zu benennen, hing im Wesentlichen von den Ergebnissen der multivariaten statistischen Auswertung der Analyse- und Bewirtschaftungsdaten (Kapitel 2.8 Teil C – Datenauswertung) ab. Bei der Formulierung von Empfehlungen für den Bodenschutz wurden folgende Informationen berücksichtigt:

- identifizierte Trends in Daten der BDF und DFV,
- prognostizierte Klimaveränderungen (siehe Tabelle 10),
- ggf. identifizierte Einflüsse von Bewirtschaftungsmaßnahmen,
- ggf. identifizierte flächenhafte Einflüsse (Standortfaktoren).

Als Standortfaktoren für die Gehalte an organischer Substanz spielen vor allem das Klima (Niederschläge und Temperatur) und die Bodenart (v.a. der Tongehalt im Oberboden) eine wichtige Rolle. Darüber hinaus ist das Wasserregime am Standort von Bedeutung, insbesondere der Grundwasserstand sowie Art und Dauer des Auftretens von Stauwasser (Höper & Schäfer 2012).

Nachfolgend sind Maßnahmensteckbriefe zur Konkretisierung der gfp bezüglich des Erhalts eines standorttypischen Humusstatus durch Bewirtschaftungsmaßnahmen aufgeführt. Sie unterscheiden nach Bodenbearbeitung, Düngung sowie Pflanzenbau. Grundsätzlich soll die Anwendung der gfp im Sinne der Vorsorge nach BBodSchG dienen. Im Fall von schädlichen Bodenveränderungen, die von der landwirtschaftlichen Nutzung ausgehen, ist der Übergang zur Gefährdung bezüglich des Humusstatus allerdings in der Regel schleichend. Der Anwendungsfall der Maßnahmen orientiert sich daher an den Grundsätzen der gfp des § 17 BBodSchG und ist im Feld „Indikation“ formuliert. Es zeigt sich, dass Bedarf an der Weiterentwicklung von praxisnah zu ermittelnden Parametern und Grenzwerten besteht, die die Schwelle zwischen Vorsorge und Gefahrenabwehr beschreiben. Zur Bestimmung der Parameter kommen zuerst Feldmethoden in Frage (z.B. Spatendiagnose nach LfL 2012) und ergänzend die regelmäßigen landwirtschaftlichen Untersuchungen.

Die Maßnahmen entfalten fast ausschließlich in ihrer kombinierten Anwendung die größten positiven Wirkungen. Maßnahmen zum Erhalt eines standorttypischen Humusgehalts üben zudem immer eine positive Wirkung auf die anderen Grundsätze der gfp des § 17 BBodSchG aus. Sie sind dann im Steckbrief *kursiv* aufgeführt.

Maßnahmenfeld „Bodenbearbeitung“

Maßnahmensteckbrief BB_M1

Maßnahme
Konservierende Bodenbearbeitung
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
<p>Ziele Standorttypischen Humusstatus erhalten oder verbessern <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenverdichtung vermeiden</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i> <i>Förderung der biologischen Aktivität des Bodens</i></p> <p>Hintergrund + Im Vergleich zur wendenden Bodenbearbeitung geringere Belüftung des Bodens (Förderung der Oxidation organischer Substanz) und geringerer Mischungsgrad von Ernteresten mit Mineralboden (verringerte Mineralisierung), deshalb ist bei reduzierter Bearbeitung die Erhöhung des Kohlenstoffgehalts im Boden möglich (Höper & Schäfer 2012) ! Humusanreicherung jedoch auf Oberkrume beschränkt, da keine Einarbeitung bis in 30 cm Tiefe wie bei wendender Bodenbearbeitung (Hofmann et al. 2013; Höper & Schäfer 2012) + Höhere biologische Aktivität (mikrobiell und Regenwürmer) und höhere Humusgehalte in der Oberkrume (Ulrich et al. 2010; Corsi et al. 2012; Leithold et al. 2014) + Mulchschicht an der Bodenoberfläche und Humusanreicherung sowie Ausbildung von Makroporen durch erhöhte Regenwurmaktivität verbessern die Infiltration und vermindert deutlich die Erosion (Linsler et al. 2014; MKULNV 2011a). - Wegen verbesserter Durchlüftung durch Regenwürmer jedoch gleichzeitig verstärkter Abbau der organischen Substanz möglich (Wessolek et al. 2008)</p>
Indikation
Gefahr der Absenkung des Humusgehalts als Ergebnis der Humusbilanzierung bzw. Verminderung des TOC-Gehalts unterhalb einer bundes- oder landesweiten Erwartungsspanne (Kap.3) Verminderte Aggregatstabilität (z.B. Prüfung mit Spatendiagnose nach LfL 2012) Erhöhte Verdichtungsanfälligkeit Verstärkte Bodenerosionsanfälligkeit
Erläuterung der Maßnahmen
Gefügeschonende Bodenbearbeitung durch Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung, Einsatz des Schälpluges oder der Kreiselegge Umstellung auf Direktsaat-/Mulchsaatverfahren Ergänzend Hecken und Feldgehölze zum Schutz vor Wind und Austrocknung anpflanzen
Erwartete Wirksamkeit bezüglich Erhalt des standorttypischen Humusgehalts
Hoch. In Kombination mit Maßnahmen PB_M1 und PB_M2 anzuwenden.

Maßnahmensteckbrief BB_M2

Maßnahmengruppe/Maßnahme
Konventionelle (wendende) Bodenbearbeitung
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
<p>Ziele Standorttypischen Humusstatus erhalten <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenverdichtung vermeiden</i> <i>Förderung der biologischen Aktivität des Bodens</i></p> <p>Hintergrund + Ermöglicht die tiefere Einarbeitung von Ernteresten und OBS und damit eine Erhöhung des Humusvorrats. + Bei wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug entsteht eine gleichmäßige Dichtelagerung. Erhöhte Dichtelagerung des Bodens kann jedoch eine scheinbare Humusanreicherung vortäuschen (MKULNV 2011b). - Je häufiger ein Boden bearbeitet wird und je mehr wendende Geräte eingesetzt werden (Durchlüftung), umso stärker steigt die Mineralisierungsrate der OBS (Wessolek et al. 2008). - Aggregate werden zerkleinert oder zerstört und geschützte OBS dem Angriff der Mikroorganismen ausgesetzt (Wessolek et al. 2008). - Verstärkung der Erosion durch Bodenbearbeitung trägt indirekt auch zu einem Verlust an OBS bei (Wessolek et al. 2008).</p>
Indikation bei
Gefahr der Absenkung des Humusgehalts als Ergebnis der Humusbilanzierung bzw. Absenkung des TOC-Gehalts unterhalb einer bundes- oder landesweiten Erwartungsspanne (Kap. 3) Verminderte Aggregatstabilität (z.B. Prüfung mit Spatendiagnose nach LfL 2012) Erhöhte Verdichtungsanfälligkeit Verstärkte Bodenerosionsanfälligkeit
Erläuterung der Maßnahmen
Pflanzenresten und Dünger gleichmäßig verteilen und einarbeiten Geeignete landwirtschaftliche Techniken mit angepasstem Fahrwerk auf sensiblen Böden auswählen Beachten der Witterung, d.h. der Bodenfeuchte in Abhängigkeit von Bodenart und Verdichtungsempfindlichkeit Hecken und Feldgehölze zum Schutz vor Wind und Austrocknung anpflanzen
Erwartete Wirksamkeit bezüglich Erhalt des standorttypischen Humusgehalts
Hoch. In Kombination mit Maßnahmen PB_M1 und PB_M2 anzuwenden.

Maßnahmensteckbrief BB_M3

Maßnahmengruppe/Maßnahme
Kombination konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
<p>Ziele Standorttypischen Humusgehalt erhalten oder verbessern <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenverdichtung vermeiden</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i> <i>Förderung der biologischen Aktivität des Bodens</i></p> <p>Hintergrund Bodenbearbeitung führt zur qualitativen Veränderung der OBS: Konventionelle Bodenbearbeitung: Abbau der OBS erfolgt überwiegend bakteriell Konservierender Bearbeitung: Abbau der OBS erfolgt überwiegend durch Pilze (Wessolek et al. 2008). Der durch Aggregation/Okklusion gegen Abbau geschützte Anteil der labilen organischen Substanz wird durch Bodenbearbeitung für mikrobiellen Abbau zugänglich (Wessolek et al. 2008). Labile C-Verbindungen sind unter Direktsaat stabiler als unter konventioneller Bodenbearbeitung (Wessolek et al. 2008).</p>
Indikation
<p>Gefahr der Absenkung des Humusgehalts als Ergebnis der Humusbilanzierung bzw. Verminderung des TOC-Gehalts unterhalb einer bundes- oder landesweiten Erwartungsspanne (Kap. 3) Verminderte Aggregatstabilität (z.B. Prüfung mit Spatendiagnose nach LfL 2012) Erhöhte Verdichtungsanfälligkeit Verstärkte Bodenerosionsanfälligkeit Einschalten wendender Bodenbearbeitung z.B. bei/mit Verdichteter Krume (Direktsaat/Mulchsaatverfahren) Erforderlichen Maßnahmen zur Phytohygiene (Schaderreger, erhöhter Unkrautbesatz) Ziel der Vergrößerung des Humusvorrats durch Einpflügen von OBS in den unteren Krumbereich Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung in Betrieben mit Spezialisierung auf hohen Hackfruchtanteil in der Fruchtfolge (humuszehrende Fruchtfolgen!)</p>
Erläuterung der Maßnahmen
<p>Siehe Maßnahmensteckbriefe BB_M1 und BB_M2 Auswahl und Ausführung der Bodenbearbeitung (konservierend oder konventionell) orientierend an Standorteigenschaften und pflanzenbaulichen Erfordernissen</p>
Erwartete Wirksamkeit bezüglich Erhalt des standorttypischen Humusgehalts
Hoch. In Kombination mit Maßnahmen PB_M1 und PB_M2 anzuwenden.

Maßnahmensteckbrief BB_M4

Maßnahme
Anpassung der Bearbeitungshäufigkeit
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
<p>Ziele Standorttypischen Humusgehalt erhalten oder verbessern <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenverdichtung vermeiden</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i></p> <p>Hintergrund - Je häufiger ein Boden bearbeitet wird und je mehr wendende Geräte dabei eingesetzt werden, umso stärker steigt die Mineralisierungsrate der OBS (Wessolek et al. 2008). - Verschlammungsgefahr zur starke Zerkleinerung der Aggregate</p>
Indikation bei
Gefahr der Absenkung des Humusgehalts als Ergebnis der Humusbilanzierung bzw. Absenkung des TOC-Gehalts unterhalb einer bundes- oder landesweiten Erwartungsspanne (Kap.3) Verminderte Aggregatstabilität (z.B. Prüfung mit Spatendiagnose nach LfL 2012) Erhöhte Verdichtungsanfälligkeit Verstärkte Bodenerosionsanfälligkeit
Erläuterung der Maßnahmen
Standort- und bedarfsgerechte Frequenz der Bodenbearbeitung
Erwartete Wirksamkeit bezüglich Erhalt des standorttypischen Humusgehalts
Hoch

Maßnahmensteckbrief BB_M5

Maßnahme
Anpassung der Bearbeitungstiefe (mit konventioneller oder konservierender Bodenbearbeitung)
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
<p>Ziele Bodenstruktur erhalten oder verbessern <i>Bodenverdichtung vermeiden</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i> <i>Standorttypischen Humusstatus erhalten oder verbessern</i></p> <p>Hintergrund Veränderung der Tiefenverteilung der im Boden gespeicherten organischen Substanz (MKULNV 2011b): ! Eine Krumenvertiefung führt zu abnehmenden Kohlenstoffgehalten bei zunächst gleichen Kohlenstoffvorräten. Da sich mit der Zeit wieder ein neues Humusgleichgewicht am Standort einstellt, ist auf Dauer mit höheren Kohlenstoffvorräten zu rechnen (Höper & Schäfer 2012). ! Verringerung der Bearbeitungstiefe bei Mulchsaat führt zur Erhöhung des Kohlenstoffgehalts in der oberen Krume bis zu einem neuen Humusgleichgewicht. (Hofmann et al. 2013, Höper & Schäfer 2012; s. auch Maßnahmensteckbrief BB_M3 - Durchführung von Maßnahmen zur Krumenvertiefung regelmäßig erforderlich, um langanhaltenden Effekt zu erzielen - Kurzfristig keine oder kaum Auswirkungen bezüglich Netto-C_{org}-Vorräte</p>
Indikation
Erhöhung des Humusstatus Erhöhte Verdichtungsanfälligkeit
Erläuterung der Maßnahmen
Gleichmäßige Einarbeitung von Erntereste und Oberkrume mit Pflug in größere Tiefen
Erwartete Wirksamkeit
Mittel. Eher langfristige Ausrichtung.

Maßnahmenfeld „Düngung und Kalkung“

Maßnahmensteckbrief DK_M1

Maßnahme
Anwendung organischen Düngers
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
Ziele Standorttypischen Humusstatus erhalten oder verbessern <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i>
Hintergrund + Direkte Erhöhung des Gehalts der OBS über den Eintrag von organischen Düngemitteln (Gülle, Mist, Kompost, Klärschlamm) oder über Gründüngung in den Boden (Wessolek et al. 2008) + Günstige physikalische, chemische und bodenbiologische Wirkung + Stabilisiert damit die Ertragsbildung unter extremen klimatischen Bedingungen - CH ₄ -, NH ₃ - und N ₂ O-Emissionen bei Ausbringung von Wirtschaftsdünger ! Humuswirksamkeit (kurz-/langfristig) organischer Dünger wird durch deren C:N-Verhältnis beeinflusst
Indikation
Erhöhung des Humusstatus Verdichtungsanfälligkeit Verstärkte Bodenerosionsanfälligkeit
Erläuterung der Maßnahmen
Grundsätze und Vorgaben zur Anwendung nach DüV beachten! Düngebedarf ermitteln! Emissions- und verlustarme Ausbringung nach neuestem Stand der Technik sowie unmittelbare Einarbeitung Ausreichende Versorgung des Bodens mit organischer Substanz durch Wirtschaftsdünger (Stallmist, Gülle, Kompost) und durch auf dem Feld verbleibende Ernterückstände (Wurzel, Stoppel, Stroh, Sprossmasse)
Erwartete Wirksamkeit
Hoch. In Kombination mit Maßnahmen BB_M1, BB_M2, PB_M1 und PB_M2 auszuführen.

Maßnahmensteckbrief DK_M2

Maßnahme
Anwendung mineralischen Düngers
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
<p>Ziele Standorttypischen Humusstatus erhalten oder verbessern <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i></p> <p>Hintergrund - Mineralische Dünger, insbesondere Stickstoffdünger, bewirken zunächst einen zusätzlichen Humusabbau (Priming-Effekt) + Durch höhere Erträge dann aber anhaltende Humusanreicherung aufgrund vermehrten Anfalls von Ernterückständen - Mineralischer N-Dünger: Stickstoffüberschuss wird als N₂O an die Atmosphäre abgegeben</p>
Indikation
Gefahr der Absenkung des Humusgehalts als Ergebnis der Humusbilanzierung bzw. Verminderung des TOC-Gehalts unterhalb einer bundes- oder landesweiten Erwartungsspanne (Kap.3)
Erläuterung der Maßnahmen
Grundsätze und Vorgaben zur Anwendung nach DüV beachten! Düngebedarf ermitteln!
Erwartete Wirksamkeit
Hoch. In Kombination mit Maßnahmen BB_M1, BB_M2, PB_M1 und PB_M2 auszuführen.

Maßnahmensteckbrief DK_M3

Maßnahme
Kombination von Mineral- und organischem Dünger in angepasster Art und Menge
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
<p>Ziele Standorttypischen Humusstatus erhalten oder verbessern <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i> <i>Förderung der biologischen Aktivität des Bodens</i></p> <p>Hintergrund + Bewirtschaftungen mit kombinierter organischer und mineralischer Düngung weisen aufgrund der höheren Erträge eine gesteigerte Versorgung des Bodens mit Ernte- und Wurzelrückständen und so i.d.R. eine bessere Humusreproduktionsleistung als rein organisch gedüngte Böden auf (Brock et al. 2008). ! Je größer das C:N-Verhältnis eines Düngers ist, desto langsamer erfolgt der Abbau im Boden und die Nachlieferung der Nährstoffe ! Humusqualität im Boden ist umso höher, je enger das C:N-Verhältnis ist.</p>
Indikation
Gefahr der Absenkung des Humusgehalts als Ergebnis der Humusbilanzierung bzw. Verminderung des TOC-Gehalts unterhalb einer bundes- oder landesweiten Erwartungsspanne (Kap.3) Verminderte Aggregatstabilität (z.B. Prüfung mit Spatendiagnose nach LfL 2012) Erhöhte Verdichtungsanfälligkeit Verstärkte Bodenerosionsanfälligkeit
Erläuterung der Maßnahmen
Beurteilung des betrieblichen Nährstoffmanagements durch eine weiterentwickelte Hoftor-Bilanzierung (mit TOC-Gehaltsmessung auf den bewirtschafteten Böden) Mineralischen und organischen Dünger in einem ausgewogenen Verhältnis anwenden C:N-Verhältnis beachten Nur bei ausreichender Stickstoffversorgung ist der mikrobielle Abbau der OBS und damit die Stickstoffnachlieferung für die Pflanzen möglich (C:N-Verhältnis < 20)
Erwartete Wirksamkeit
Hoch. In Kombination mit Maßnahmen BB_M1, BB_M2, PB_M1 und PB_M2 auszuführen.

Maßnahmensteckbrief DK_M4

Maßnahme
Kalkung
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
<p>Ziele Standorttypischen Humusstatus erhalten oder verbessern <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenverdichtung vermeiden</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i> <i>Förderung der biologischen Aktivität des Bodens</i></p> <p>Hintergrund Kalk stabilisiert das Bodengefüge Erhöhung der mikrobiellen Aktivität sowie der Regenwurm-Aktivität Aufbau wertvollen Dauerhumus Verbesserung des Luft- und Wasserhaushalts Gesteigerte Nährstoffverfügbarkeit führt zu Ertragszuwachs</p>
Indikation
<p>Gefahr der Absenkung des Humusgehalts als Ergebnis der Humusbilanzierung bzw. Verminderung des TOC-Gehalts unterhalb einer bundes- oder landesweiten Erwartungsspanne (Kap. 3) Verminderte Aggregatstabilität (z.B. Prüfung mit Spatendiagnose nach LfL 2012) Erhöhte Verdichtungsanfälligkeit Verstärkte Bodenerosionsanfälligkeit Reduziertes Bodenleben</p>
Erläuterung der Maßnahmen
<p>Regelmäßige Kontrolle des pH-Werts Gekalkte Standorte können im Frühjahr häufig früher Befahren werden Zeitfenster für Bewirtschaftung und Bestellung wird ausgedehnt (Verlängerung der Vegetationsperiode durch Klimawandel)</p>
Erwartete Wirksamkeit
Hoch. In Kombination mit Maßnahmen BB_M1, BB_M2, PB_M1 und PB_M2 auszuführen.

Maßnahmenfeld „Pflanzenbau“

Maßnahmensteckbrief PB_M1

Maßnahme
Anwendung vielfältiger Fruchtfolge
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
Ziele Standorttypischen Humusstatus erhalten oder verbessern <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenverdichtung vermeiden</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i> <i>Förderung der biologischen Aktivität des Bodens</i>
Hintergrund ! Großen Einfluss auf die OBS haben Menge und Qualität der Ernte- und Wurzelrückstände und damit die Fruchtfolge (Wessolek et al. 2008). ! Die Menge des organischen Materials im Boden ist abhängig von den Hauptfrucht- und Zwischenfrüchten (kulturspezifische Mengen der Wurzeln, Ernte- und Wurzelrückstände). - Enge Fruchtfolgen mit Hackfrüchten (z.B. Silomais alle drei Jahre) verursachen schnell eine negative Humusbilanz (MKULNV 2011b). ! Zum Schutz vor Erosion sollte ein Brachliegen von Ackerböden weitgehend vermieden werden. + Fruchtfolgen die den Boden ganzjährig begrünen, tragen zum Schutz vor Erosion bei. + Gute Humusversorgung reduziert das Erosionsrisiko. + Eingrenzung von Schädlings- und Krankheitsbefall + Minimierung der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen von Ernteausfällen
Indikation
Gefahr der Absenkung des Humusgehalts als Ergebnis der Humusbilanzierung bzw. Verminderung des TOC-Gehalts unterhalb einer bundes- oder landesweiten Erwartungsspanne (Kap.3) Verminderte Aggregatstabilität (z.B. Prüfung mit Spatendiagnose nach LfL 2012) Erhöhte Verdichtungsanfälligkeit Verstärkte Bodenerosionsanfälligkeit Reduziertes Bodenleben
Erläuterung der Maßnahmen
Standortgerechte vielfältige Fruchtfolge mit einem ausgewogenen Verhältnis zwischen humuszehrenden (z.B. Zuckerrüben, Kartoffel, Mais, Raps, Sonnenblume, Getreide mit Strohabfuhr) und humusmehrenden (z.B. Klee gras, Luzerne, Körnerleguminosen, Zwischenfrüchte) Fruchtarten (MKULNV 2011b) Zwischenbegrünung nach der Ernte im August und September Gras-Untersaat frühräumender Getreidebestände bei Futtermittelproduktion mit. Ganzpflanzensilage und in Bioenergiepflanzenbeständen Aussaat- und Anbautechniken an steigende Erosionsgefahr anpassen
Erwartete Wirksamkeit
Hoch. In Kombination mit Maßnahmen BB_M1, BB_M2, DK_M1 und DK_M2 auszuführen.

Maßnahmensteckbrief PB_M2

Maßnahme
Angepasste Auswahl von Sorten und Fruchtarten
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
<p>Ziele Standorttypischen Humusstatus erhalten oder verbessern <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenverdichtung vermeiden</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i> <i>Förderung der biologischen Aktivität des Bodens</i></p> <p>Hintergrund ! Infolge steigender Temperaturen wird für die Zukunft ein erhöhter Schädlings- und Krankheitsbefall erwartet (MKULNV 2011b) + Standort- und klimaangepasste Sorten und Arten sind resistenter gegenüber Krankheitserregern und Schädlingsbefall und liefern auch bei Hitze und Trockenheit ausreichend Biomasse + Trägt somit zur Humusversorgung der Böden bei (MKULNV 2011b)</p>
Indikation
Gefahr der Absenkung des Humusgehalts als Ergebnis der Humusbilanzierung bzw. Verminderung des TOC-Gehalts unterhalb einer bundes- oder landesweiten Erwartungsspanne (Kap.3) Verminderte Aggregatstabilität (z.B. Prüfung mit Spatendiagnose nach LfL 2012) Erhöhte Verdichtungsanfälligkeit Verstärkte Bodenerosionsanfälligkeit Reduziertes Bodenleben
Erläuterung der Maßnahmen
Bevorzugt solche Pflanzensorten und -arten anbauen, die Hitze und Trockenheit besser vertragen Wintergetreide sind z.B. weniger anfällig gegen Frühjahrs- und Sommertrockenheit Sommergetreide kommt z.B. aufgrund des früheren Beginns der Vegetationsperiode in Frage Verzicht auf hackfruchtreiche Fruchtfolgen (Höper & Schäfer 2012) Anbau von Silomais als Energiepflanze ist möglicherweise kontraproduktiv für den Klimaschutz, da davon auszugehen ist, dass die Humusgehalte im Boden bei Maismonokultur abnehmen (Höper & Schäfer 2012).
Erwartete Wirksamkeit
Hoch.

Maßnahmensteckbrief PB_M3

Maßnahme
Angepasste Aussaattermine
Ziele und Hintergrund der Maßnahme
<p>Ziele Standorttypischen Humusstatus erhalten oder verbessern <i>Bodenstruktur erhalten oder verbessern</i> <i>Bodenverdichtung vermeiden</i> <i>Bodenabträge vermeiden</i> <i>Förderung der biologischen Aktivität des Bodens</i></p> <p>Hintergrund ! Durch frühere Aussaat sind die Pflanzen im Lauf des Jahres schon weiter entwickelt und haben den Boden tiefer durchwurzelt, sodass sie, wenn es im auslaufenden Frühjahr oder Frühsommer zu Trockenheit kommt, dieser besser standhalten können (MKULNV 2011b).</p>
Indikation
Gefahr der Absenkung des Humusgehalts als Ergebnis der Humusbilanzierung bzw. Verminderung des TOC-Gehalts unterhalb einer bundes- oder landesweiten Erwartungsspanne (Kap.3) Verminderte Aggregatstabilität (z.B. Prüfung mit Spatendiagnose nach LfL 2012) Erhöhte Verdichtungsanfälligkeit Verstärkte Bodenerosionsanfälligkeit Reduziertes Bodenleben
Erläuterung der Maßnahmen
Längere Vegetationsperioden erlauben die frühere Aussaat von Sommerungen Häufigere Trockenheit ist eine Gefahr für die Pflanzenproduktion, die Bodenfruchtbarkeit und somit die OBS
Erwartete Wirksamkeit
Hoch. Maßnahmen BB_M1, BB_M2, DK_M1 und DK_M2 entsprechend anpassen.

6 Anforderungen an die Daten und Auswertungsmethoden

Von den bundesweit vorhandenen etwa 800 BDF sind in diesem Vorhaben 312 Acker-BDF hinsichtlich der TOC-Entwicklung betrachtet worden. Von diesen gab es wiederum 171 BDF, an denen mindestens vier TOC-Messwerte vorlagen. An nur 35 dieser BDF standen geschlossene Datensätze für die statistische Auswertung mittels Support Vector Machines zur Verfügung. Aus der Auswertung dieses vergleichsweise kleinen Datenausschnitts konnten dennoch wichtige Steuergrößen des TOC-Status und der TOC-Entwicklung abgeleitet werden. Die eingeschränkte Datenlage erschwert jedoch die Ableitung allgemeingültiger Aussagen und Empfehlungen.

Die derzeit laufende Bodenzustandserhebung landwirtschaftlich genutzter Böden Deutschlands erfasst deren aktuelle Vorräte an organischem Kohlenstoff. Mit Hilfe eines dichten Messnetzes wird versucht, die Datengrundlage, vor allem für klimabezogene Aufgaben und Fragestellungen, flächenhaft zu verbessern.

Für die auf regelmäßige Beprobung mit einer Erhebung einer Vielzahl an Parametern angelegten BDF und DFV werden nachfolgend Anforderungen mit Blick auf die weiterführende Datenerfassung und -auswertung formuliert. Dies dient dem übergeordneten Ziel, zukünftig die Öffentlichkeit über die Auswirkungen des Klimawandels auf den Humus in Ackerböden aufzuklären und entsprechende Handlungsempfehlungen für die Landwirtschafts- und Umweltpolitik entwickeln zu können.

6.1 Boden-Dauerbeobachtung und Dauerfeldversuche

Die Boden-Dauerbeobachtung (BDF) in Deutschland fokussiert auf die frühzeitige Erkennung schädlicher Bodenveränderungen anhand langjähriger Zeitreihen und damit auf Fragestellungen des vorsorgenden Bodenschutzes. Einrichtung und Betrieb der Messflächen sind in den Landesbodenschutzgesetzen verankert und damit Ländersache. Zwischen den Bundesländern besteht jedoch seit den 1990er Jahren ein intensiver fachlicher Austausch. Durch Abstimmung und Berücksichtigung konzeptioneller und methodischer Empfehlungen konnte bislang eine weitgehende länderübergreifende Vereinheitlichung der Vorgehensweise bei Auswahl, Einrichtung und Betrieb der BDF im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtungsprogramme gewährleistet werden. Allerdings weist dieses Harmonisierungsbestreben einen nur empfehlenden Charakter auf. Deshalb gibt es bis jetzt keine einheitlichen und verbindlichen Vereinbarungen zu Untersuchungsmethoden, zum datenverarbeitungstechnischen Austausch (Kaufmann-Boll et al. 2011) sowie zu einheitlichen Methoden bezüglich statistisch-mathematischer Auswertungsverfahren und damit verbundener Daten(vor)behandlung.

Die Standortwahl für die Anlage von BDF richtet sich in der Regel nach der Landschaftsrepräsentanz (Barth et al. 2001). Bei der Auswertung eines bundesweiten Datensatzes kann dadurch von einer gewissen Flächenrepräsentanz bezüglich der wichtigsten Bodenformen ausgegangen werden. Einschränkend wirkt jedoch die Verfügbarkeit von Flächen mit vergleichbaren Mindestlaufzeiten, entsprechenden Wiederholungszahlen der Beprobung sowie der Bewirtschaftungsdaten.

Aus den landwirtschaftlichen Dauerfeldversuchen (DFV) liegen sehr lange Datenreihen in hoher zeitlicher Auflösung vor. Es bestehen kontrollierte Versuchsbedingungen im Freiland in

ausreichender Wiederholungszahl über Zeiträume von mehr als 30 Jahren. Untersucht werden im Boden i.d.R. Eigenschaften wie Humus- und Nährstoffgehalte und -vorräte, physikalische Bodeneigenschaften wie Dichte und Wasserhaushalt sowie in einigen Fällen bodenbiologische Parameter. Die Untersuchungshäufigkeit variiert an den einzelnen Standorten, die Auswertung und Erhebung von Parametern obliegt verschiedenen agrarwissenschaftlichen Forschungseinrichtungen von Bund, Ländern oder Universitäten (Kaufmann-Boll et al. 2011).

Die Kombination von Daten der BDF und DFV ist deshalb optimal geeignet, um belastbare Informationen zum Status der Humusgehalte der Ackerböden Deutschlands zu gewinnen und daraus langfristige Aussagen zur Entwicklung der Humusgehalte ableiten zu können. Hierzu sind engmaschige, möglichst jährliche Erhebungen der C-Gehalte auch auf den BDF notwendig. Ergänzend ist die Erfassung klimatologischer Parameter auch an Basis-BDF wünschenswert.

Aus dem Vorgenannten ergeben sich folgende Anforderungen:

6.2 Datenqualität

Um Änderungen von Humusvorräten auf Grundlage der TOC-Gehalte und Trockenrohdichten statistisch abzusichern, muss die Genauigkeit der TOC-Gehaltsänderung 0,01 % betragen. TOC-Gehaltsunterschiede mit einer Genauigkeit von 0,1 % führen bei der Vorratsberechnung (in t/ha) zu sehr großen Unterschieden im Vergleich zu Berechnungen mit höherer Genauigkeit.

Die Ergebnisse der Dauerfeldversuche (DFV), die unter kontrollierten und zeitlich hochauflösenden Bedingungen erzielt wurden, sind ideal geeignet, um die Auswertungen der BDF-Daten zu ergänzen und sachgerecht zu interpretieren. So besteht beispielsweise die Möglichkeit, die intraannuelle Varianz der TOC-Daten der DFV zu bestimmen und diese bei den BDF-Daten zu bereinigen. Mit dieser Verbesserung der Auswertung können Aussagen zu den TOC-Veränderungen an den BDF verlässlicher getroffen werden.

Auch bei der Optimierung des vorgestellten Ansatzes zur Ableitung von TOC-Erwartungsspannen können die DFV-Daten wertvolle Ergänzungen liefern, da hier bereits langjährige lückenlose Studien vorliegen. Es sollte daher überprüft werden, in welcher Form der DFV-Datenbestand geeignet ist, die vorliegenden Erwartungsspannen zu validieren und ggf. anzupassen. Die statistischen Auswertungen zeigten, dass neben dem Anfangs-TOC mehrere Faktoren den TOC-Gehalt steuern. Die vorgestellten methodischen Ansätze zur Ableitung von Erwartungsspannen sollten so weiterverfolgt werden, dass u.a. die Steuergrößen des TOC in bestimmten Regionen berücksichtigt werden. Eine Optimierung der Methode kann erfolgen, wenn sie kontinuierlich mit Messungen in den jeweiligen Regionen abgeglichen bzw. validiert wird. Aus verlängerten Messkampagnen des BDF-Programms mit geschlossenen Datenbeständen können Schwellenwerte der Erwartungsspannen genauer abgeleitet werden.

Letztlich wird hier der gleiche Messabstand wie bei den DFV-Untersuchungen für ein weitergeführtes Datenmonitoring an den BDF empfohlen: Der Nachweis von Veränderungen des TOC-Gehalts im Boden erfordert Untersuchungen in regelmäßigen, d.h. möglichst jährlichen Abständen über einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren. Aussagen auf der Grundlage von nur zwei oder drei TOC-Messungen in kleineren oder größeren Abständen können nicht wissenschaftlich abgesichert werden. Die Messabstände an den meisten BDF sind für gesichtete Aussagen über die TOC-Entwicklung zu groß; jährliche Messungen an BDF sind also erforderlich, um zu fachlich fundierten Aussagen zu gelangen.

Die BDF sind für klimatische Auswertungen derzeit noch nicht ausreichend ausgerichtet (s.a. Lazar et al. 2014). Wünschenswert wären Wetterstationen an jeder Fläche, um standortspezifische, exakte Daten zu erhalten und nicht auf modellierte Klimawerte des DWD angewiesen zu sein.

Mit Blick auf die verfügbaren Parameter empfehlen auch Lazar et al. (2014) die Kombination von BDF- und DFV-Daten, um das Thema organische Bodensubstanz (im Rahmen eines Klimafolgen-Monitoring-Verbundes) qualifiziert zu bearbeiten.

Damit die Daten sowohl der BDF als auch der DFV miteinander und untereinander verglichen, ausgetauscht und ausgewertet werden können, ist obligatorisch, dass sie in einer vereinheitlichten Struktur vorliegen. Nur auf diese Weise ist ein Vorhalten qualitätsgesicherter Daten in einer zentralen Datenbank möglich. Um zu diesem Ziel zu gelangen, muss eine vereinfachte und einheitliche Datenstruktur festgelegt und insbesondere von den jeweiligen Betreibern umgesetzt werden.

Um ein standardisiertes Verfahren der BDF-Auswertung zu erreichen, sind die Parameter aus der länderübergreifenden Abfrage (s. Kapitel 3) als Mindestdatensatz empfohlen. Nur wenn diese Daten zur Verfügung stehen, ist eine parameterübergreifende Auswertung mit nicht-linearen multivariaten statistischen Verfahren möglich. Wichtig dabei sind v.a. die zyklische Messung der Trockenrohdichte und Angaben zur Veränderung der Pflugtiefe, um zukünftig von den TOC-Gehalten auf TOC-Vorräte umrechnen zu können. Ebenfalls unabdingbar sind die Bewirtschaftungsdaten, besonders Angaben zu Düngemengen und Fruchtfolgen, um Entwicklungen des TOC-Gehalts zu beantworten. Auch der Grundwasserflurabstand und seine Veränderung sind bedeutende Informationen, weil diese Parameter den Abbau von organischer Substanz im Boden beeinflussen und damit auf den TOC-Gehalt wirken.

Perspektivisch sollten Parameter, die die Mikroorganismen-tätigkeit und -aktivität beschreiben, in die Abfrage aufgenommen werden. Auch die Werte zur Kohlenstoff-Fraktionierung können hilfreich sein, um den Verbleib des TOC in Verbindung mit seiner physikalischen Stabilisierung gegen mikrobiellen Abbau zu erklären. Solche Informationen sollten daher auch zukünftig – zumindest optional – abgefragt werden.

6.3 Datenauswertung

Wie schon bei der Datenqualität wird auch bei der Datenauswertung ein einheitliches Vorgehen mit besonderer Dringlichkeit empfohlen. So sollen mit Hilfe nicht-linearer Regressionen (Support Vector Machines) die steuernden Einflussfaktoren der TOC-Entwicklung aufgedeckt werden. Beziehungen zwischen den Klimafaktoren und der Zeit sollen nach Trendbereinigung der Daten analysiert werden.

Für die statistische Auswertung der TOC-Gehalte über die Zeit sind deutlich mehr Wiederholungen nötig, als bisher zur Verfügung stehen. Vier Wiederholungen stellen die unterste Grenze der Auswertbarkeit dar. In Ausnahmefällen können wenige Messungen über einen längeren Zeitraum zur allgemeinen Identifizierung von Einflussgrößen geeignet sein, wenn deutliche Niveauänderungen im TOC-Gehalt festgestellt wurden.

Die Datenauswertungen von BDF und DFV haben ergeben, dass bisher keine gerichtete Entwicklung der Humusgehalte als Folge von Klimaänderungen aufzeigbar ist. Dass längerfristige

Klimaänderungen einen Einfluss auf die TOC-Entwicklung haben, kann dennoch nicht ausgeschlossen werden.

7 Anforderungen an die Verbesserung des Vollzugs der „guten fachlichen Praxis“

Um den Vollzug der Grundsätze der „guten fachlichen Praxis“ als Vorsorgeinstrument des BBodSchG zu konkretisieren, wurden Maßnahmensteckbriefe erarbeitet, in denen mögliche Bewirtschaftungsmaßnahmen enthalten sind, die dem Erhalt eines standorttypischen Humusgehalts dienen. Für standorttypische Humusgehalte gibt es eine große Spannweite, und Humusgehalte verändern sich – außer im Fall von Landnutzungsänderungen – sehr langsam. Daher ist nicht immer erkennbar, wann der Fall einer nötigen Gefahrenabwehr eintritt. Hieraus ergibt sich ein Bedarf an praxisnahen Parametern und Grenzwerten, die die Schwelle zwischen Maßnahmen zur Vorsorge und zur Gefahrenabwehr beschreiben.

Die in Kapitel 3 untersuchte Methode zur Bestimmung eines TOC-Erwartungswertes wird hierbei als vielversprechendes Instrument für den Vollzug der gFP gesehen und sollte deshalb weiter entwickelt werden. Um die TOC-Gehalte direkt mit den C-Entzügen und C-Zugaben aus der Bewirtschaftung (Hauptfrucht, Zwischenfrucht, organische Düngung) zu bilanzieren, sind konkretere Werte notwendig als diejenigen aus den Tabellenwerken der VDLUFA-Humusbilanzierung. Der TOC-Gehalt der Böden könnte z.B. obligatorisch regelmäßig im Rahmen der Untersuchungen für die Grundnährstoffe und Erstellung der Düngeempfehlung untersucht werden. Möglicherweise kann dies auch die Akzeptanz des im Entwurf der Düngeverordnung (DüV Entwurf, Stand 18.12.2014) vorgesehenen Nährstoffvergleichs in Form einer „Hoftor-Bilanz“ (DüV Entwurf § 15 Abs. 2) erhöhen, wenn der Beitrag des Betriebs zur Erhöhung des Humusgehalts miterfasst und dann auch der Stickstoffbedarf für den Humusaufbau in der Bilanz berücksichtigt wird.

Um die Beurteilung und Einstufung der Gefügestabilität sowie der Verdichtungs- und Erosionsanfälligkeit mit dem Ziel der Kontrolle des Wirtschaftens nach gFP zu erleichtern, können einfache, bereits vorhandene (Feld-)Methoden geprüft, bundesweit systematisiert und zur Anwendung gebracht werden.

Der Erhalt des standorttypischen Humusgehalts trägt auch zum Erhalt der Klimafunktion des Bodens bei. Daher sollte die Klimafunktion im Bodenschutzgesetz als eigene Bodenfunktion verankert werden, um den Boden als klimawirksamen Kohlenstoffspeicher besser schützen zu können.

8 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

In der Diskussion um die Entwicklung einer zukunftsfähigen und nachhaltigen landwirtschaftlichen Bodennutzung unter den Bedingungen des Klimawandels werden auch zukünftig systematisch und dauerhaft erhobene Bodendaten notwendig sein, um umweltpolitische Argumente fachlich abzusichern und steuernde Instrumente entwickeln zu können.

Um einen Beitrag zu diesem Ziel zu leisten, werden folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet:

Es sollte eine Vereinbarung der BDF-Betreiber zur Erhebung eines bundesweit einheitlichen Mindestdatensatzes für standardisierte BDF-Auswertungen auf Grundlage des vorliegenden Berichts erarbeitet werden. Um perspektivisch die Belange des Klimaschutzes und der Klimaanpassung berücksichtigen zu können, wird empfohlen, die Ergebnisse aus Kaufmann-Boll et al. (2011) und Lazar et al. (2014) zu integrieren.

Zur Erleichterung des Datenaustauschs und von Auswertungen sollten Datenstrukturen innerhalb der BDF sowie von BDF und DFV vereinheitlicht werden. Dies schließt auch die Etablierung bundesweit einheitlicher statistischer Verfahren zur Auswertung von BDF-Daten ein.

Für den Vollzug des vorsorgenden Bodenschutzes in der landwirtschaftlichen Bodennutzung müssen die Grundsätze der „guten fachlichen Praxis“ nach § 17 BBodSchG weiter konkretisiert werden. Hier wird die Methode der TOC-Erwartungsspannen als ein geeigneter Ansatz bewertet, der weiterentwickelt werden muss, um die standortspezifischen Steuergrößen besser berücksichtigen zu können. Darüber hinaus wäre die Bodenschutzgesetzgebung um geeignete Instrumente des Bodenschutzes und zum Vollzug der „guten fachlichen Praxis“ der landwirtschaftlichen Bodennutzung zu ergänzen.

Erste Ergebnisse aus dem Vergleich der BZE I und BZE II im Wald deuten darauf hin, dass regional klimatische Veränderungen auf den Kohlenstoffgehalt der Böden wirken. Überregional wird jedoch die Nutzung(-intensität) als die wichtigste Einflussgröße für Kohlenstoffumsatz und -speicherung in Forstböden identifiziert. Es ist bekannt, dass Dauergrünland- und Moorböden bedeutende Kohlenstoffsinken und die landwirtschaftliche Nutzung letzterer für etwa ein Drittel der Treibhausgas-Emissionen der Landwirtschaft in Deutschland verantwortlich sind. Für den Schutz der Böden gegenüber Landnutzungsänderungen und Grünlandumbruch, als Grundlage für die Rekultivierung von Moorböden und für die Verbesserung des Vollzugs der „guten fachlichen Praxis“ auf Ackerböden wird deshalb die Verankerung der Klimafunktion des Bodens im BBodSchG mit dem unmittelbaren Schutz des Bodens als klimawirksamer Kohlenstoffspeicher als relevant und überfällig angesehen.

Der Betrieb von BDF und DFV ist langfristig sicherzustellen, da die Kombination dieser erhobenen Daten optimal geeignet ist, um belastbare Informationen zum Status der Humusgehalte der Böden Deutschlands zu gewinnen und langfristige Aussagen zur Entwicklung der Humusgehalte abzuleiten. Daher sollte an politische und sonstige Entscheidungsträger die Notwendigkeit herangetragen werden, dass zukünftig harmonisierte und langfristige Finanzierungs- und Betreiber-Programme zum Ausbau der Datenerhebungen auf den BDF in Kombination mit den DVF sowie zu deren Verstetigung entwickelt und realisiert werden müssen.

9 Danksagung

Wir bedanken uns bei den zahlreichen Betreibern der Boden-Dauerbeobachtung und beim Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die zur Verfügung gestellten Daten, ohne die eine Bearbeitung des Projekts nicht möglich gewesen wäre. Weiterer Dank gilt allen Vertretern der beteiligten Bundesländer, die an den Fachgesprächen im Laufe des Projekts teilgenommen haben und für betreffende Rückfragen zur Verfügung standen.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Stephan Marahrens und Herrn Dr. Frank Glante für die tatkräftige Unterstützung im Verlauf des Projekts sowie dem UBA für die Förderung.

Literatur

- AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). 5. Aufl. Herausgegeben von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Albert, E.; Grunert, M. (2013) Wirkung einer langjährig differenzierten mineralisch-organischen Düngung auf Ertrag, Humusgehalt, N-Bilanz und Nährstoffgehalte des Bodens. Archives of Agronomy and Soil Science 59, 1073-1098.
- Barkusky, D.; Baumecker, M.; Chmielewski, F.-M.; Ellmer, F.; Gagern, W. von; Hierold, W.; Käding, H.; Köhn, W.; Rühlmann, J.; Zimmer, J. (2009): Dauerfeldversuche in Brandenburg und Berlin - Beiträge für eine nachhaltige landwirtschaftliche Bodennutzung,- Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurerneuerung, Reihe Landwirtschaft, Band 10/4, Frankfurt a. d. Oder.
- Barth, N.; Brandtner, W.; Cordsen, E.; Dann, T.; Emmerich, K.-H.; Feldhaus, D.; Kleefisch, B.; Schilling, B.; Utermann, J. (2001): Boden-Dauerbeobachtung. Einrichtung und Betrieb von Boden-Dauerbeobachtungsflächen.- In: Rosenkranz, D.; Bachmann, G.; König, W.; Einsele, G. (Hrsg.): Bodenschutz - Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser, Loseblattsammlung.
- Baumecker M.; Ellmer F.; Köhn W. (2009): Statischer Nährstoffmangelversuch Thyrow,- In: Barkusky et al., Dauerfeldversuche in Brandenburg und Berlin - Beiträge für eine nachhaltige landwirtschaftliche Bodennutzung,- Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurerneuerung, Reihe Landwirtschaft, Band 10/4, Frankfurt a. d. Oder.
- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz) vom 17.3.1998,-BGBl. I, Nr. 36, Seite 502-510.
- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12.7.1999, BGBl. I, Nr. 36, 1554-1582.
- BGK – Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. (2011): Was ist Humus-C? Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. URL: <http://www.kompost.de/index.php?id=624&L=0> (letzter Abruf 18.02.2015)
- Blume, H.-P.; Brümmer, G.W.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretschmer, R.; Stahr, K.; Wilke, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Heidelberg.
- Blume, H.-P.; Stahr, K.; Leinweber, P. (2011): Bodenkundliches Praktikum, 3. Auflage, Spektrum Verlag, Heidelberg.
- Borken, W.; Matzner, E. (2009): Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. Global Change Biology, 15, 808-824.
- Brock, C.; Hoyer, U.; Leithold, G.; Hülsbergen, K.-J. (2008): Entwicklung einer praxisanwendbaren Methode der Humusbilanzierung im ökologischen Landbau, Abschlussbericht vom 31.April 2008 Projekt-Nr. 03OE084 im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau (BÖL), Gießen.
- Bronaugh, D. & Werner, A. (2013): zyp: Zhang + Yue-Pilon trends package. R package version 0.10-1, URL: <http://CRAN.R-project.org/package=zyp>

- Brookes, P.C.; Kragt, J.F.; Powlson, D.S.; Jenkinson, D.S. (1985): Chloroform Fumigation and the release of soil nitrogen: The effects of fumigation time and temperature. *Soil Biology and Biochemistry* 17, S. 831-835.
- Capriel P. (2010): Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 8/2005, Freising-Weihenstephan.
- Capriel, P. & Seiffert, D. (2009): 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern - Teil 3: Entwicklung der Humusgehalte zwischen 1986 und 2007, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 10/2009, Freising-Weihenstephan.
- Carter, M.R. (1996): Analysis of soil organic matter storage in agroecosystems. In: Carter, M.R. and B.A. Stewart (Hrsg.): Structure and organic matter storage in agricultural soils. *Advances in Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, FL
- Chan, Y. (2008): Increasing soil organic carbon of agricultural land. Primefact 735 (1) New South Wales Department of Primary Industries.
- Corsi, S.; Friedrich, T.; Kassam, A.; Pisante, M.; Sà, João de Moraes (2012): Soil Organic Carbon Accumulation and Greenhouse Gas Emission Reductions from Conservation Agriculture: A Literature Review. *Integrated Crop Management Vol.16-2012*. Plant Production and Protection Division Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.
- Davidson, E.A.; Ackermann, I.L. (1993): Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry* 20,161-193.
- Degener, J.F. (2013): Auswirkungen des regionalen Klimawandels auf die Entwicklung der Biomasseerträge ausgewählter landwirtschaftlicher Nutzpflanzen in Niedersachsen. Dissertationsschrift. Promotionsprogramm Geologie/Geographie der Georg-August-Universität Göttingen.
- Del Moral, F.; Gonzalez, V.; Simon, M.; Garcia, I.; Sanchez, J.A.; De Haro, S. (2013): Soil properties after 10 years of organic versus conventional management in two greenhouses in Almeria (SE Spain), *Archives of Agronomy and Soil Science* 58, S. 226-231.
- Deutsche Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel vom 17. Dezember 2008 – Kabinettsbericht und Hintergrundpapier, Berlin.
- Diaz-Ravifina, M.; Acea, M.J.; Carballas, T. (1993): Seasonal fluctuations in microbial populations and available nutrients in forest soils, *Biology and Fertility of Soils* 16, 205-210.
- Düwel, O.; Siebner, S.; Utermann, J.; Krone, F. (2007): Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands. Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo BGR, Archivbericht BGR 0126616, Hannover und Berlin.
- Ebertseder, T.; Munzert, M.; Horn, D.; Maier, H. (2010a): Ableitung von Einflussfaktoren auf die Humusgehalte von Böden durch flächenbezogene Auswertung von Bodenuntersuchungsdaten,- In Engels et al.: Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden – Einflussfaktoren und deren Auswirkungen; Bericht der VDLUFA an die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Speyer, S. 252-278.
- Ebertseder, T.; Munzert, M.; Horn, D.; Maier, H. (2010b): Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden – Einflussfaktoren und deren Auswirkungen. BLE-Forschungsprojekte (AZ.: 514-06.01-2808HS16).
- Ellmer, F. & Baumecker, M. (2008): Soil Organic Matter of a Sandy Soil Influenced by Agronomy and Climate, *Proceedings of International Meeting on Soil Fertility Land Management and Agroclimatology in Turkey*, S. 1-10.

- Ellmer, F. & Gäbert, T. (2009). Dauerfeldversuche als Forschungsbasis zur Kohlenstoffdynamik ackerbaulich genutzter Böden. 12.
- Epperlein, J. (2002): Vergleichende Untersuchungen zum Einfluss konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung auf ausgewählte biologische und physikalische Bodenparameter im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin, Aachen.
- Franzlubbers, A.J.; Arshad, M.A. (1997): Particulate Organic Carbon Content and Potential Mineralization as Affected by Tillage and Texture. *Soil Science of America Journal* 61, 1382-1386.
- Gisi, U. (1997): *Bodenökologie*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Hagerty, S.B.; van Groenigen, K.J.; Allison, S.D.; Hungate, B.A.; Schwartz, E.; Koch, G.W.; Kolka, R.K.; Dijkstra, P. (2014): Accelerated microbial turnover but constant growth efficiency with warming in soil. *Nature Climate Change* 4, 903-906.
- Hedlund, K. (Hrsg.) (2012): *Conflicting demands of land use, soil biodiversity and the sustainable delivery of ecosystem goods and services in Europe*, Abschlussbericht zum EU Forschungsprojekt SOILSERVICE, Lund.
- Heinemeyer, O.; Gensior, A. (2008): C-Sequestrierung im Boden, CO₂-Bilanzierung und Klimaschutz?, In: Hüttl, R. F.; Prechtel, A.; Bens, O. (Hrsg.): *Zum Stand der Humusversorgung von Böden in Deutschland*. Cottbuser Schriften zur Ökosystemgenese und Landschaftsentwicklung, Band 7, Cottbus. S. 185-189.
- Heitkamp, F.; Raupp, J.; Ludwig, B. (2011): Soil organic matter pools and crop yields as affected by the rate of farmyard manure and use of biodynamic preparations in a sandy Cambisol. *Organic Agriculture* 1, 111-124.
- Hofmann, B.; Bischoff, J.; Rücknagel, J.; Christen, O. (2013): Einfluss langjähriger Bodenbearbeitung auf C_{org}-Gehalte bei Löß-Schwarzerde und pseudovergleyter Parabraunerde. Tagungsbeitrag zu: Postverstellung der Kommission VI Titel der Tagung: Böden – eine endliche Ressource Jahrestagung der DBG, 05. -13. Sept. in Bonn Berichte der DBG.
- Höper, H. (2007): Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. *Berichte der Deutschen Gesellschaft für Moorkunde, Telma* 37, 85-105
- Höper, H. (2012): projektbegleitender Vortrag am 24.04.2012 im Umweltbundesamt in Berlin
- Höper, H. & Schäfer W. (2008): Problematik der Identifikation von Risikogebieten bzw. prioritären Gebieten im atlantisch geprägten Klimaraum, In: Lee, Y.H.; Bückmann, W. (Hrsg.): *Europäischer Bodenschutz: Schlüsselfragen des nachhaltigen Bodenschutzes*, Berlin, S. 253-270.
- Höper, H. & Schäfer, W. (2012): Die Bedeutung der organischen Substanz von Mineralböden für den Klimaschutz. *Bodenschutz* 3, S. 72-80.
- Hoyer, U. (2008): Analyse der Humusreproduktion in ökologischen und konventionellen Praxisbetrieben, In: Brock, C.; Hoyer, U.; Leithold, G.; Hülsbergen, K.-J. (2008): *Entwicklung einer praxisanwendbaren Methode der Humusbilanzierung im ökologischen Landbau*, Abschlussbericht vom 31. April 2008 Projekt-Nr. 03OE084 im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau (BÖL), Gießen. 35-63.
- Hüttl, R.F.; Prechtel, A.; Bens, O. (Hrsg.) (2008): *Zum Stand der Humusversorgung von Böden in Deutschland*. Cottbuser Schriften zur Ökosystemgenese und Landschaftsentwicklung, Band 7, Cottbus.
- Jenkinson, D.S. & Rayner, J.H. (1977): The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*. 123, 298-305.

- Kaufmann-Boll, C.; Kappler, W.; Lazar, S.; Meiners, G.; Tischler, B.; Baritz, R.; Düwel, O., Hoffmann, R.; Utermann, J.; Makeschin, F.; Abiy, M.; Rinklebe, J.; Prüß, A.; Schilli, C.; Beylich, A.; Graefe, U. (2011): Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung, UBA-Texte Nr. 65/2011, Dessau-Roßlau.
- Klimanek, E.-M. (1997): Bedeutung der Ernte- und Wurzelrückstände landwirtschaftlich genutzter Pflanzenarten für die organische Substanz des Bodens. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 41, 485-511.
- Köhn, W. & Ellmer, F. (2009): Statischer Dauerversuch Bodennutzung Berlin Dahlem,- In: Barkusky et al., Dauerfeldversuche in Brandenburg und Berlin - Beiträge für eine nachhaltige landwirtschaftliche Bodennutzung,- Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurerneuerung, Reihe Landwirtschaft, Band 10/4, Frankfurt a. d. Oder.
- Kolbe, H. (2008): Schutz der organischen Substanz in Deutschland: Erhalt standorttypischer Humusgehalte versus Humusbilanzierung als verbreitete Methode in der Landwirtschaft ,-In: Hüttl, R. F.; Prechtel, A.; Bens, O. (Hrsg.): Zum Stand der Humusversorgung von Böden in Deutschland. *Cottbuser Schriften zur Ökosystemgenese und Landschaftsentwicklung*, Band 7, Cottbus. S. 185-189.
- Körschens, M. (1980): Die Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz von Standortfaktoren und acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen, ihre Beziehungen zu Bodeneigenschaften und Ertrag sowie Ableitung von ersten Bodenfruchtbarkeitskennziffern für den Gehalt des Bodens an organischer Substanz. Dissertation vorgelegt an der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Berlin.
- Körschens, M. (1997): Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) von Standort und Bewirtschaftung sowie ihr Einfluss auf Ertrag und Bodeneigenschaften, *Archives of Agronomy and Soil Science* 41, S. 435-463.
- Körschens, M. (1998): Die wichtigsten Dauerfeldversuche der Welt - Übersicht, Bedeutung, Ergebnisse, *Archives of Agronomy and Soil Science* 42, 157-168.
- Körschens, M. (2005): Globale und regionale Bedeutung von Dauerfeldversuchen. *Archives of Agronomy and Soil Science* 51, S. 111-117.
- Körschens, M. (2010): Der organische Kohlenstoff im Boden (C_{org}) – Bedeutung, Bestimmung, Bewertung. *Archives of Agronomy and Soil Science* 56, S. 375-392.
- Körschens, M.; Frielinghaus, M.; Klimanek, E.M.; Siemens, H.; Encke, O. (1986): Einsatz organischer Dünger zur Agromelioration, *Feldwirtschaft* 1, 27, 21-22.
- Körschens, M.; Franko, U.; Klimanek, E.-M.; Schulz, E.; Siewert, C.; Eich, D.; Wrankmore, U.; Wedekind, I.; Pfefferkorn, A. (1989): Modell und Parameter des Einflusses der Wurzelmasseentwicklung auf die C- und N-Dynamik im Boden. Forschungsbericht aus dem Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg, Bereich Bad Lauchstädt. Leistungsstufe : G 4
- Körschens, M.; Albert, E.; Armbruster, M.; Barkusky, D.; Baumecker, M.; Behle-Schalk, L.; Bischoff, R.; Cergan, Z.; Ellmer, F.; Herbst, F.; Hoffmann, S.; Hofmann, B.; Kismanyoky, T.; Kubat, J.; Kunzova, E.; Lopez-Fando, C.; Merbach, I.; Merbach, W.; Pardo, M.T.; Rogasik, J.; Rühlmann, J.; Spiegel, H.; Schulz, E.; Tajnsek, A.; Toth, Z.; Wegener, H.; Zorn, W. (2013): Effect of different mineral and organic fertilization on yield, N-uptake, C- and N-balance, as well as C- content and C-dynamics in the soil, derived from the results of 21 long-term field experiments in the 21th century. *Archives of Agronomy and Soil Science*, DOI: 10.1080/03650340.2012.704548

- Körschens, M.; Albert, E.; Baumecker, M.; Ellmer, F.; Grunert, M.; Hoffmann, S.; Kismanyoky, T.; Kubat, J.; Kunzova, E.; Marx, M.; Rogasik, J.; Rinklebe, J.; Rühlmann, J.; Schilli, C.; Schröter, H.; Schroetter, S.; Schweizer, K.; Toth, Z.; Zimmer, J.; Zorn, W. (2014): Humus und Klimaänderung - Ergebnisse aus 15 langjährigen Dauerfeldversuchen. *Archives of Agronomy and Soil Science* 60 (11), S. 1485-1517.
- Kuka, K. (2005): Modellierung des Kohlenstoffhaushalts in Ackerböden auf der Grundlage bodenstrukturabhängiger Umsatzprozesse. Dissertation vorgelegt an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Technischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- LABO (2010): Positionspapier Klimawandel – Betroffenheit und Handlungsempfehlung des Bodenschutzes.
- LABO (2014): Positionspapier der LABO zur „Guten fachlichen Praxis“ der landwirtschaftlichen Bodennutzung. 83. Sitzung am 24. Oktober 2014 in Heidelberg der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO).
- Lazar, S.; Kaufmann-Boll, C.; Kastler, M.; Molt, C. (2014): Konzeption eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbundes „Bodendaten – Umsetzung der Handlungsempfehlungen aus dem BOKLIM-Projekt“. Bericht zum UFOPLAN-Vorhaben FKZ 3712 72 280 (unveröffentlicht)
- LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen, Hannover.
- Lee, Y.H. (2007): Die Thematische Strategie für den Bodenschutz. Beitrag „Thematic Strategy for Soil Protection“ vom 23.-24. März 2007 des Instituts für Stadt- und Regionalplanung und der interdisziplinären Forschungs-Arbeitsgemeinschaft für Gesellschaft, Umwelt und Siedlung der Technischen Universität Berlin. URL: http://www.fagus-berlin.de/abstracts/pdf/07_Die_Thematische_Strategie_fuer_den_Bodenschutz_Workshop.pdf (letzter Abruf: 13.02.2015)
- Leithold, G.; Hülsbergen, K.-J.; Brock, C. (2014): Organic matter returns to soils must be higher under organic compared to conventional farming. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2014, 000, 1–9.
- LfL (2014): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. Anleitung zur Bodenuntersuchung mit dem Spaten. Bearbeitet von Diez, T.; Weigelt, H.; Brandhuber, R. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.) 7. Auflage. URL: <http://www.lfl.bayern.de/publikationen/informationen/040146/index.php> (letzter Abruf 17.02.2015).
- Linsler, D.; Geisseler, D.; Loges, R.; Taube, F.; Ludwig, B. (2014): Effects of tillage and application of cattle slurry on carbon pools and aggregate distribution in temperate grassland soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2014, 177, 388–394.
- Mi, Jia; Li, Jianjun; Chen, Dima; Xie, Yichun; Bai, Yongfei (2014): Predominant control of moisture on soil organic carbon mineralization across a broad range of arid and semiarid ecosystems on the Mongolia plateau. *Landscape Ecology* 29 (5).
- MKUNLV – Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2011): Klimawandel und Boden – Auswirkungen der globalen Erwärmung auf den Boden als Pflanzenstandort, Düsseldorf.
- MKULNV – Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2011a): Klimawandel und Landwirtschaft. Auswirkung der globalen Erwärmung auf die Entwicklung der Pflanzenproduktion in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.

- MKULNV – Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2011b): Klimawandel und Boden. Auswirkung der globalen Erwärmung auf den Boden als Pflanzenstandort. Düsseldorf.
- Möller, A. & Kennepohl, A. (2014): Abschätzung von CO₂-Emissionen und -Retentionen durch Landnutzungsänderungen anhand regionalisierter Kohlenstoffvorräte auf landwirtschaftlich genutzten Böden Niedersachsens. *GeoBerichte* 27, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.).
- Nieder, R. & Richter, J. (2000): C and N accumulation in arable soils of West Germany and its influence on the environment - Developments 1970 to 1998, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, 65-72.
- NLFB – Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (2001): Untersuchung bodenbiologischer Parameter im Rahmen der Boden-Dauerbeobachtung, Arbeitshefte Boden, Heft 4, Hannover.
- Paul, E.A. & Clark, F.E. (1996): *Soil microbiology and biochemistry*, Academic Press, Second Edition, San Diego.
- Penman, H.L. (1956): Estimating evaporation. *Trans. Amer. Geophys. Union.* 37: 43-46.
- Poulton, P.R. (1996): The Rothamsted long-term experiments: Are they still relevant? *Canadian Journal of Plant Science* 76, 559-571.
- Qiu, S.; McComb, A.J.; Bell R.W.; Davis, J.A. (2005): *Wetlands Ecology and Management* 13: 43–54.
- R Core Team (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reinhold, J. (2011): Definitionen zur Humusreproduktion auf Ackerflächen. Mündliche Mitteilung. In: Lazar, S.; Höke, S.; Knappe, F.; Vogt, R. (2012): Optimierung der Verwertung organischer Abfälle Materialband „Wirkungsanalyse Boden“. Schlussbericht zum UBA-F+E-Projekt FKZ 3709 33 340. UBA-Texte 32/2012. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4311.pdf> (letzter Abruf 18.02.2015)
- Rinklebe, J. (2004): Differenzierung von Auenböden der Mittleren Elbe und Quantifizierung des Einflusses von deren Bodenkennwerten auf die mikrobielle Biomasse und Bodenenzymaktivitäten von β -Glucosidase, Protease und alkalischer Phosphatase. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Landwirtschaftliche Fakultät, Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Halle (Saale).
- Rinklebe, J. & Makeschin, F. (2003): Der Einfluss von Acker- und Waldnutzung auf Boden und Vegetation - ein Zeitvergleich nach 27 Jahren. *Forstwissenschaftliches Centralblatt.* 122. 2. 81-98.
- Rinklebe, J.; Prüß, A.; Schilli, C. (2011a): Wasserhaushalt. In: Kaufmann-Boll, C.; Kappler, W.; Lazar, S.; Meiners, G.; Tischler, B.; Baritz, R.; Düwel, O., Hoffmann, R.; Utermann, J.; Makeschin, F.; Abiy, M.; Rinklebe, J.; Prüß, A.; Schilli, C.; Beylich, A.; Graefe, U. (2011): Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung, UBA-Texte Nr. 65/2011, Dessau-Roßlau. S.117-139.
- Rinklebe, J.; Utermann, J.; Prüß, A.; Frohne, T. (2011b): Bodenstoffhaushalt, stoffliche Bodenbelastungen. In: Kaufmann-Boll, C.; Kappler, W.; Lazar, S.; Meiners, G.; Tischler, B.; Baritz, R.; Düwel, O., Hoffmann, R.; Utermann, J.; Makeschin, F.; Abiy, M.; Rinklebe, J.; Prüß, A.; Schilli, C.; Beylich, A.; Graefe, U. (2011): Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung, UBA-Texte Nr. 65/2011, Dessau-Roßlau. S.139-174.

- Rinklebe, J. & Prüb, A. (2011): Bodenmikrobiologie. In: Kaufmann-Boll, C.; Kappler, W.; Lazar, S.; Meiners, G.; Tischler, B.; Baritz, R.; Düwel, O., Hoffmann, R.; Utermann, J.; Makeschin, F.; Abiy, M.; Rinklebe, J.; Prüb, A.; Schilli, C.; Beylich, A.; Graefe, U.: Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung, UBA-Texte Nr. 65/2011, Dessau-Roßlau. 175-193.
- Rühlmann, J.; Körschens, M.; Graefe, J. (2006): A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix. *Geoderma* 130, 272-283.
- Rühlmann, J. & Ruppel, S. (2005): Effects of organic amendments on soil carbon content and microbial biomass – results of the long-term box plot experiment in Grossbeeren. *Archives of Agronomy and Soil Science* 51, S. 163-170.
- Schilling, B. (1997): Wiederholungsuntersuchungen an Boden-Dauerbeobachtungsflächen in Bayern – GLA-Fachbericht 14, München.
- Schimel, J.P. & Schaeffer, S.M. (2012): Microbial control over carbon cycling in soil. *Front. Microbiol.*, 26 September 2012. URL: <http://journal.frontiersin.org/Journal/10.3389/fmicb.2012.00348/full> (letzter Abruf: 13.02.2015)
- Schlichting, E.; Blume, H.-P.; Stahr, K. (1995): *Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 2., neu bearbeitete Auflage, Pareys Studientexte 81, Berlin/Wien.*
- Seyfarth, W.; Joschko, M.; Rogasik, J.; Höhn, W.; Augustin, J.; Schroetter, S., Brunotte, J.; Ellerbrock, R.; Hierold, W.; Höflich, G.; Rogasik, H.; Tauschke, M.; Wendroth, O.; Schulze, M. (1999):- In: Seyfarth, W.; Joschko, M.; Rogasik, J.; Höhn, W.; Augustin, J.; Schroetter, S. : *Bodenökologische und pflanzenbauliche Effekte konservierender Bodenbearbeitung auf sandigen Böden. ZALF-Bericht 39. Münchenberg.*
- Spatz, P. (2001): *Möglichkeiten der länderübergreifenden Auswertung an Standorten Bodendauerbeobachtung, ausgehend von der Zusammenstellung der Metadaten aus den Ländern, uba texte 22/01, Berlin.*
- Springob, G.; Brinkmann, S.; Engel, N.; Kirchmann, H.; Böttcher, J. (2001): Organic C levels of Ap horizons in North German Pleistocene sands as influenced by climate, texture, and history of land-use, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 164, 681-690.
- SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen (2002): *Für eine Stärkung und Neuorientierung des Naturschutzes. Sondergutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Drucksache 14/9852. 05.08.2002. URL: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2002_SG_Naturschutz.pdf?__blob=publicationFile (letzter Abruf: 13.02.2015)*
- SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen (2012): *Umweltgutachten 2012 – Verantwortung in einer begrenzten Welt. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Juni 2012 Berlin. URL: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2012_06_04_Umweltgutachten_HD.pdf?__blob=publicationFile (letzter Abruf: 13.02.2015)*
- Ulrich, S.; Tischer, S.; Hofmann, B.; Christen, O. (2010): Biological soil properties in a long-term tillage trial in Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2010 173(4)483-489.

- Utermann, J.; Düwel, O.; Fuchs, M.; Hoffmann, R. (2009): Status des C-Gehalts in Böden Deutschlands – Vortrag bei der KBU-Tagung „Schließung von Stoffkreisläufen“ am 19./20.11.2009 in Dessau. URL: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/02_utermaann_cstatus.pdf (letzter Abruf 013.02.2015)
- van Wesemael, B.; Lettens, S.; Roelandt, C.; van Orshoven, J. (2004): Changes in soil carbon stocks from 1960 to 2000 in the main Belgian cropland areas, *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 8, 133-139
- VDLUFA – Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (2004): Humusbilanzierung Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland, Standpunkt des VDLUFA vom 30. April 2004, Bonn
- Walther U.; Weisskopf P.; Oberholzer H.R.; Knecht K. (2001): 50 Jahre organische und mineralische Düngung: Humusgehalte, N-Ausnutzung und N-Bilanzen. *Archives of Agronomy and Soil Science* 46, 265-280.
- Warnecke, S.; Overesch, M.; Brauckmann, H.-J.; Broll, G.; Höper, H. (2008): Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus und der Düngung mit Gärresten auf den Kohlenstoffgehalt im Boden – erste Modellierungsergebnisse.- Berichte der DBG - <http://eprints.dbges.de/37/1/Warnecke%20et%20al%20DBG%20Komm%20III%202008%20Beitrag.pdf> (letzter Abruf 13.02.2015)
- Wessolek, G.; Kaupenjohann, M.; Dominik, P.; Ilg, K.; Schmitt, A.; Zeitz, J.; Gahre, F.; Schulz, E.; Ellerbrock, R.; Utermann, J.; Düwel, O.; Siebner, C. (2008): Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG Boden- Grundwasser, Schlussbericht zum F&E-Vorhaben FKZ 202 71 264, Berlin.
- Yue, S.; Pilon, P.; Phinney, B.; Cavadias, G. (2002): The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes* 16, 1807-1829.
- Zimmer, J.; Roschke, M.; Schulze, D. (2005): Einfluss unterschiedlicher organischer und mineralischer Düngung auf Ertragsleistung, organische Bodensubstanz und N-Bilanz eines diluvialen Sandbodens – Ergebnisse nach 45 Jahren Dauerfeldversuch P60 (Groß Kreutz, 1959 – 2003) *Archives of Agronomy and Soil Science* 51, S. 135-149.

Anhang

Zusammenfassung des Artikels *Humus und Klimaänderung - Ergebnisse aus 15 langjährigen Dauerfeldversuchen* von Körschens, M.; Albert, E.; Baumecker, M.; Ellmer, F.; Grunert, M.; Hoffmann, S.; Kismanyoky, T.; Kubat, J.; Kunzova, E.; Marx, M.; Rogasik, J.; Rinklebe, J.; Rühlmann, J.; Schilli, C.; Schröter, H.; Schroetter, S.; Schweizer, K.; Toth, Z.; Zimmer, J.; Zorn, W. erschienen 2014 in *Archives of Agronomy and Soil Science* 60 (11), S. 1485-1517.

<http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2014.892204>

Die Quantifizierung des Einflusses von Klimaänderungen auf den Humusgehalt des Bodens ist von großer wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Bedeutung. Eine Möglichkeit dieser Quantifizierung besteht in der Auswertung von Dauerfeldversuchen mit der kontinuierlichen Bestimmung des Kohlenstoff- und Stickstoffgehalts von Böden über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten unter Wahrung des Ceteris-Paribus-Prinzips. Für die vorliegende Arbeit wurden die Ergebnisse von insgesamt 15 Dauerfeldversuchen an 10 verschiedenen Standorten mit rund 150 unterschiedlichen Düngungsvarianten ausgewertet. Die Versuchsdauer lag mit einer Ausnahme zwischen 40 und 110 Jahren. Die C_{org} -Daten konnten nahezu lückenlos über einen Zeitraum von jeweils 20 Jahren einbezogen werden. Die N_t -Gehalte wurden in 6 Versuchen berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei allen Prüfgliedern mit kombinierter organisch-mineralischer Düngung in der Größenordnung, wie sie der „guten fachlichen Praxis“ bzw. auch der Humusbilanzmethode entspricht, keine Verringerung der C_{org} -Gehalte eingetreten ist. In einigen Fällen waren signifikante Erhöhungen zu verzeichnen. In 11 von 15 Versuchen war auch ohne Düngung bzw. mit ausschließlicher Mineraldüngung keine Reduzierung und somit keine klimabedingte Verringerung der Humusgehalte im Untersuchungszeitraum nachweisbar. Auch bei den N_t -Gehalten war in keinem Fall eine signifikante Verringerung festzustellen. Umfangreiche Großzahlanalysen und Dauerfeldversuchsauswertungen anderer Autorinnen/Autoren bestätigen uneingeschränkt die Ergebnisse.

