

Regionalisierung von organischem Kohlenstoff in Böden Deutschlands – eine Annäherung

Michael Fuchs, Jens Utermann & Rainer Hoffmann

Zusammenfassung

Die organische Substanz der Böden ist eine Größe, die durch das Klima maßgeblich gesteuert wird. Um den Parameter „organischer Kohlenstoff“ zur regionalen Bewertung der Bodeneigenschaften und deren Veränderungspotentials – z.B. für die Klimafolgenforschung – einsetzen zu können, sind die Darstellung der räumlichen Verteilung, die Beschreibung der Zusammenhänge mit Klimavariablen und Bodenparametern sowie die Interpretation der räumlichen Muster die Voraussetzung.

Bei der Regionalisierung und multivariaten Analyse der Zusammenhänge zwischen den Faktoren, die den Kohlenstoffgehalt im Boden beeinflussen, wurde ausschließlich mit Software aus Open Source Projekten gearbeitet. Zum Einsatz kamen: GRASS GIS, PostgreSQL, PostGIS, R und gstat. Neben der Ergebnisdarstellung und -diskussion der Regionalisierung mit Simple Kriging und Inverse Distanz Wichtung, geht es auch um die Beurteilung der Arbeitsweise mit Open Source Software (Kommando-Dateien, Skripttechnik, Reproduzierbarkeit), die sich von der mit proprietären Softwareprodukten unterscheidet.

Die Daten zu organischem Kohlenstoff in Böden stammen aus der BGR-Profil- und Labordatenbank, aus der 10.100 Bodenprofile herangezogen wurden..

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff in den Böden lässt sich nicht mit den verwendeten Klimavariablen Niederschlag und Temperatur sowie dem Ton- und Schluffgehalt erklären. Es sollten weitere Proxy-Variable hinzugezogen werden.

Einleitung

Die Bedeutung der organischen Substanz in Böden als Nährstoffquelle, Puffer, Aggregatstabilisator und den Wasser- und Lufthaushalt beeinflussende Größe ist seit langem bekannt [1, 6]. Humus wird in der landwirtschaftlichen Praxis bilanziert [4]. Auch die Kohlenstoffvorräte in Waldböden rückten im Zuge der Klimadebatte [9] in den Fokus des Interesses. Die Bodenzustandserhebung in Wald (BZE II) wird neben der Berechnung von Kohlenstoffvorräten auch deren Änderung betrachten und bewerten [2].

Der Gehalt und die Eigenschaften der organischen Substanz im Boden werden durch klimatische Faktoren beeinflusst bzw. gesteuert wobei Böden mit hohem Feinanteil (Schluff, Ton) der Anreicherung förderlich sind. Die Nutzungsform und der Wasserhaushalt haben entscheidenden Einfluss auf die Höhe des Humusgehaltes. Böden unter Grünland und Wald enthalten mehr organische Substanz im Oberboden als Böden unter ackerbaulicher Nutzung. Die durchschnittlichen Humusgehalte der mineralischen Oberböden liegen in Deutschland unter Ackerland bei 1,3% (0 – 30 cm Tiefe), unter Grünland bei 3,0% (0 – 10 cm Tiefe) und unter forstlicher Nutzung bei 3,4% (0 – 10 cm Tiefe) [10].

Die mittlere Verweildauer von Kohlenstoff in der organischen Substanz (turn over) wird weltweit auf durchschnittlich 30 Jahren geschätzt. Die Bildungsrate stabiler Humussubstanz, die

in den Böden eingespeichert wird, ist relativ gering. Spannen von 0,2 bis 12 g C/m²/a werden angegeben [7]. Auch Verweildauer und Bildungsrate sind stark an klimatische Faktoren gekoppelt. Feinstboden (Ton und Schluff) kann für Anreicherung/Festlegung von organischer Substanz förderlich sein. Die Nutzungsform und Nutzungsgeschichte haben entscheidenden Einfluss auf Humifizierungs- und Mineralisierungsraten.

Datengrundlage

Die Daten zu organischem Kohlenstoff in Böden sind der Profil- und Labordatenbank der BGR [10] entnommen. Aus der Datenbank werden 10.100 Profile herangezogen, die den Mindestanforderungen an den Datensatz entsprechen. Das sind erstens die notwendigen Profilangaben:

- Lage des Profils (Lagekoordinaten)
- Profilbezeichnung (Bodentyp)
- Horizontbezeichnung
- Obere / untere Horizonttiefe
- Obere / untere Probtiefe
- Gemessene C_{org} Gehalte einschl. des Laborverfahrens
- Substrattyp bzw. Bodenausgangsgestein
- Nutzung

und zweitens die Verfahren zur Bestimmung der organischen Substanz:

- Bestimmung mit Kalium-Dichromat (DIN 19684-2)
- Bestimmung mit Wösthoff-Apparatur
- Titration Phenylantranil-Ammoniumeisen(II)-sulfat (TGL 25418/04) nach Chromschwefelsäurebehandlung
- Elementaranalyse: C_{org} berechnet aus C_{ges} (CNS) abzüglich Karbonat-C

und drittens das Datum der Aufnahme.

Die Klimaparameter Niederschlag und Temperatur gehen aus dem global frei verfügbaren Datensatz von Hijmans et al. [11] als mehrjährige Mittel des Zeitintervalls 1950-2000 ein.

Zur Maskierung der Hauptnutzungsarten wird der frei verfügbare PELCOM-Datensatz verwendet [12].

Beide Datensätze bieten die diskreten Werte in einer Zellengröße von 1 km an.

Die Daten zu Ton und Schluffgehalten entstammen der Profil- und Labordatenbank der BGR [10].

Als Höhenmodell wurde das DGM-D eingesetzt [17].

Open Source Projekte / Methoden

Die Software aus Open Source Projekten wurde eingesetzt. Die Punktdatensätze wurden in einer PostgreSQL Datenbank [13] mit der aus der bodenkundlichen Beschreibung resultierenden typischen 1 : n Relation bereitgestellt. Damit werden redundanzfrei Profil und Horizont bezogene Attributdaten vorgehalten. Die Topologien und assoziierte Attributdaten wurden in der PosGIS Erweiterung [13, 14] gespeichert, die mit rund 670 Funktionen alle notwendigen Management- und Analysewerkzeuge für Simple Features bietet. GRASS GIS [15], eines der bekanntesten und ältesten Open Source GIS, bildete eine Art von Kern. Darin wurden neben der Projektverwaltung die umfangreichen und fortgeschrittenen Werkzeuge zum Management und Analyse der Rasterdaten eingesetzt. Gstat [16] bot die notwendigen Werkzeuge zur geostatistischen Bewertung (Semivariographie) und Regionalisierung (inverse distanzen, simple, ordinary kriging). Mit dem base package von R erfolgte die statistische univariate und multivariate Analyse.

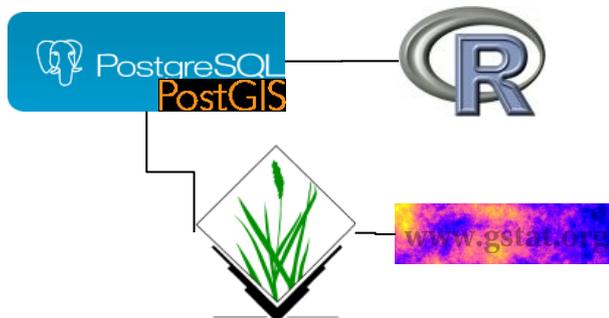


Abb. 1: Software der eingesetzten Open Source Projekte.

Alle Projekte bieten neben den intuitiv nutzbaren Oberflächen die Möglichkeit mit Skripten resp. Kommandodateien zu arbeiten. In PostgreSQL und PostGIS ist das die Structured Query Language (SQL). In GRASS GIS kann mit den Shell

Scripts gearbeitet werden. R bietet eine komplette Interpreter-Programmierungsumgebung und in gstat (Stand-Alone-Version) wird mit Kommandodateien gearbeitet. Die Arbeit mit Skript- und Kommandodateien hat sich für wissenschaftlich-technische Zielsetzungen als die geeignete Methode herausgestellt. Sie bietet gegenüber der Arbeit mit Oberflächen Vorteile, da Transparenz, Nachvollziehbarkeit, Übertragbarkeit und Modifikation der einzelnen Arbeitsschritte gegeben sind.

Folgende Werkzeuge waren für die Regionalisierung des organischen Kohlenstoffs und der Analyse der Zusammenhänge und Muster von besonderem Wert:

- v.kernel (GRASS) – Berechnung der Raster-Dichtekarten von Punkten mit einem 2D isotropen Gauss'schen Kern
- variogram modelling (gstat) – Semivariographie, Anpassung eines Modells an die regionalisierte Variable organischer Kohlenstoff
- simple kriging on a mask map (gstat) – Regionalisierung organischen Kohlenstoffs
- inverse distance interpolation (gstat) – Regionalisierung organischen Kohlenstoffs
- linear multiple regression (R) – Erklärung des organischen Kohlenstoffs im Boden durch Proxy-Variablen (Niederschlag, Temperatur, Ton-, Schluffgehalt, Höhe über NN)
- agglomerative nesting, hierachical clustering (R) – Klassenbildung mit Proxy-Variablen (Niederschlag, Temperatur, Ton- und Schluffgehalt, Höhe über NN) und organischem Kohlenstoff

Verfahren

Die Auswahl der Daten erfolgte unter dem Gesichtspunkt, die Gehalte organischen Kohlenstoffs in mineralischen Böden darzustellen. Moor- und Anmoorböden wurden daher ausgeschlossen.

Bei der Bildung der Layer [3] Oberboden, Unterboden und Untergrund wurden die Werte organischen Kohlenstoffs mit der Horizontmächtigkeit im Layer gewichtet berechnet.

Eine Voraussetzung für die Regionalisierung besteht in der Eindeutigkeit der Lageverortung des Profils. In der Datenbank werden viele Profile mit gerundeten Koordinaten geführt. Im Fall der Überlagerung wurden die Gehalte organischen Kohlenstoffs in Profilabschnitten gleicher Stratenzugehörigkeit und Nutzung pro Koordinatenpunkt gemittelt. Die Regionalisierung erfolgte mit den pro Strate (Nutzung, Bodenlayer) vorgehaltenen Punktdaten (Tab. 1).

Layer	Nutzung	Datensätze
Auflage	Forst	793
Oberboden	Ackerland	2996
	Grünland	862
	Forst	2023
Unterboden	Ackerland	1929
	Grünland	820
	Forst	2455
Untergrund		2232

Tab. 1: Zahl der in die Regionalisierung eingeflossenen Punkt bezogenen Gehalte an organischem Kohlenstoff.

Die Abhängigkeit in der Fläche wurde mit experimenteller Semivariographie untersucht. Hierbei wurde unterteilt durch Nutzungsart und Bodenlayer die ortsabhängige Struktur in allen vier Hauptrichtungen (45°, 90°, 135° und 180°) mit einem Öffnungswinkel von 30° charakterisiert.

Die Regionalisierung der Punkt bezogenen Information erfolgte mit Simple Kriging und Inverse Distanz Wichtung. Die Übertragung in die Fläche wurde für Ober -und Unterboden in den drei Hauptnutzungsklassen separat durchgeführt, wobei mit den Daten zur Bodenbedeckung (PELCOM) maskiert wurde [12]. Die Berechnung erfolgte für eine Rasterzellenweite von 1 km.

Die Ergebnisse der Regionalisierung gingen in die multivariate Analyse ein. Mit den Proxy-Variablen Jahresniederschlag, Durchschnittstemperatur, Ton- und Schluffgehalt sowie Höhe über NN wurde der Anteil an Varianz, der mit multipler linearer Regression beschrieben werden kann, bestimmt. Mit dem regionalisierten organischen Kohlenstoff und den Proxy-Variablen wurden durch hierarchisches Clustern homogene Gruppen gebildet, die in ihrer Ausprägung fachlich interpretierbare Muster bilden.

Ergebnisse

Durch Semivariogrammanalyse können für die folgenden Unterteilungen Modelle angepasst werden:

- Auflage, Wald variogram(corg): $46.3 \text{ Nug}^*(0) + 50.1 \text{ Sph}^{**}(26000)$
- Oberboden, Ackerland variogram(corg): $0.37 \text{ Nug}(0) + 0.6 \text{ Sph}(40000)$ (Abb. 2)
- Oberboden, Grünland variogram(corg): $1.8 \text{ Nug}(0) + 3.7 \text{ Sph}(34000)$
- Oberboden, Wald variogram(corg): $5.6 \text{ Nug}(0) + 2.5 \text{ Sph}(15000)$
- Unterboden, variogram(corg): $1.0 \text{ Nug}(0) + 0.69 \text{ Sph}(16000)$

* Nug – Nuggetvarianz, **Sph – Sphärisches Modell

Während für das Acker- und Grünland die Variogramme durchaus regionale Trends in den Oberböden widerspiegeln, sind die Nuggetvarianzen unter Wald, im Unterboden und im Untergrund in den angepassten Funktionen bestimmend. Diese stellen reine Zufallsrealisationen ohne räumliche Abhängigkeiten dar.

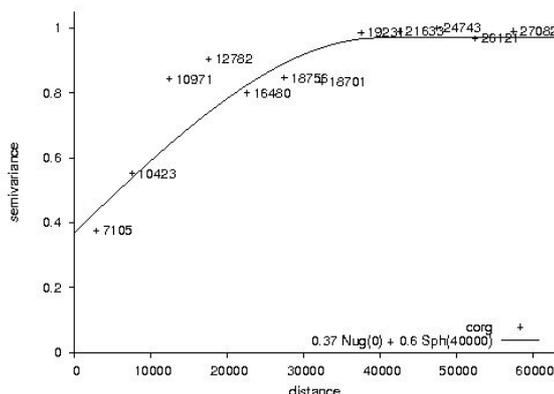


Abb. 2: Omnidirektionales Semivariogramm für organischen Kohlenstoff im Oberboden unter Ackerland.

Die Probennahmepunkte haben eine ungleichmäßige Verteilung (Abb. 3). Gebiete mit Schwerpunktuntersuchungen und Regionen, die durch Monitoringnetze abgedeckt sind, stehen Gebieten mit geringer Punktdichte gegenüber.

Die Regionalisierung mit dem sphärischen Modell für Oberböden unter Ackerland reicht nicht aus, um für die gesamte landwirtschaftliche Fläche den organischen Kohlenstoff mit Kriging zu schätzen. Die ungleichmäßige Verteilung der Punktinformation hinterlässt Lücken (Abb. 4). Deshalb muss auf die Schätzung mit der Inversen Distanz Wichtung (IDW) zurückgegriffen werden. Der Vergleich zwischen den beiden Ergebnislayern zeigt dieselben räumlichen Muster, wobei das markante West-Ost Gefälle besonders hervorsticht. Der kontinental beeinflusste Ostteil Deutschlands weist deutlich geringere Gehalte an organischem Kohlenstoff auf.

Der mit IDW regionalisierte organische Kohlenstoffgehalt wird für die Oberböden unter landwirtschaftlicher Nutzung leicht überschätzt. Mit Simple Kriging kann für 2/3 der landwirtschaftlichen Fläche der beste Mittelwert mit Aussage über den Schätzfehler auf Grundlage des Modells erreicht werden. Mit IDW kann der organische Kohlenstoff für die gesamte land-

Fuchs, Utermann, Hoffmann: Regionalisierung von organischem Kohlenstoff in Böden Deutschlands

wirtschaftliche Nutzfläche geschätzt werden. Das Modell der innewohnenden ortsabhängigen Struktur, wie sie im Kriging einfließt, wird dabei nicht berücksichtigt. In der Berechnung mit IDW fließt nur der Abstand zwischen den Messdaten ein.

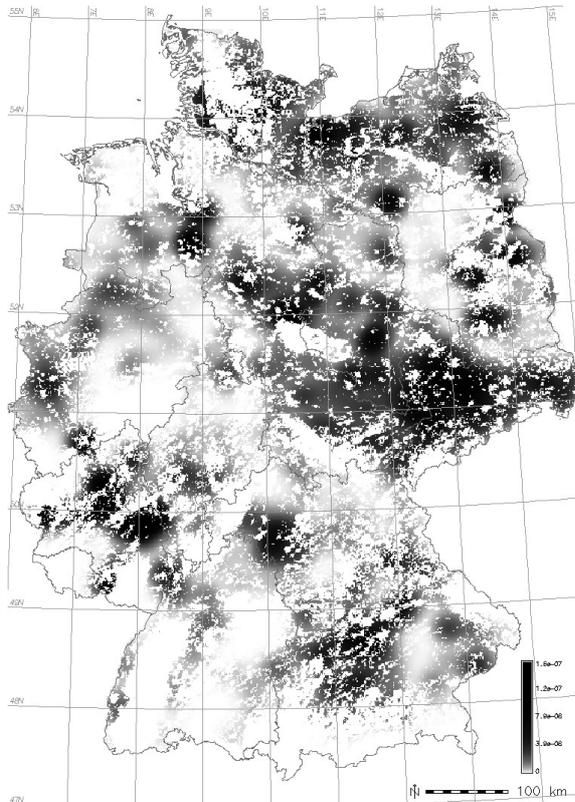


Abb. 3: Punktdichte-Messung mit v.kernel (GRASS) für Profile unter Ackerland.

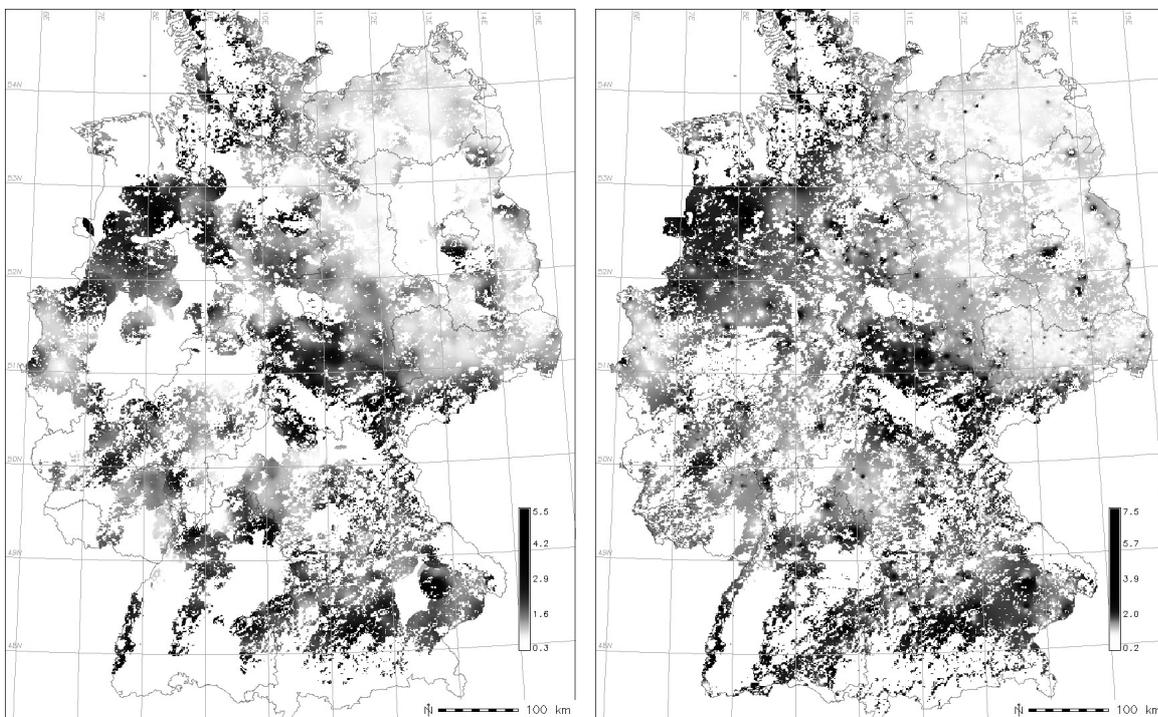


Abb. 4: Regionalisierter organischer Kohlenstoff [Masse-%] in Oberböden unter landwirtschaftlicher Nutzung, links mit Simple Kriging [0.3-5.5%], rechts mit IDW [0.2-7.5%].

Für die regionalisierten Kohlenstoffgehalte wurde mit der multiplen linearen Regression nach erklärbaren Varianzanteilen gesucht. Mit den Proxy-Variablen Jahresniederschlag, Temperatur, Schluff- und Tonanteil, Höhenmodell lässt sich für die Oberböden in den Hauptnutzungen ~1/3 der Varianz erklären (Tab. 1).

```
# arable land pelcom mask
lm(formula = grid.arable$scorg_top ~
grid.arable$prec + grid.arable$temp + grid.arable$day + grid.arable$silt)
Residuals:
  Min    1Q  Median    3Q   Max
-1.95470 -0.23954 -0.06204  0.17241  9.49066

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      5,47E+002   1,36E+001   40,32 <2e-16 ***
grid.arable$prec  1,23E+000   7,56E-003  162,05 <2e-16 ***
grid.arable$temp -4,93E+001   1,30E+000  -37,93 <2e-16 ***
grid.arable$day   1,70E+001   1,06E-001  159,94 <2e-16 ***
grid.arable$silt  8,03E+000   7,70E-002  104,29 <2e-16 ***

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3886 on 188525 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3299 , Adjusted R-squared: 0.3299
F-statistic: 2.32e+04 on 4 and 188525 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Tab. 1: R Ausgabe der Multiplen Regression zur Erklärung der Varianz des regionalisierten organischen Kohlenstoffs in Oberböden unter Ackerland. Alle Variablen sind signifikant. 1/3 der Varianz kann durch die Variablen erklärt werden.

Die Gruppierung durch das Hierarchische Clustern (Abstandsmaß: Euklidische Distanz, Methode: WARD) mit den Variablen organische Substanz, Jahresniederschlag, Durchschnittstemperatur, Ton- und Schluffgehalt und Höhe über NN für Oberböden unter landwirtschaftlicher Nutzung führte zu sechs nahezu räumlich scharf getrennten Gruppen. Diese Gruppen wurden nach den in der Trennung dominierenden Variablen benannt. Die Ausprägung der Variable organischer Kohlenstoff wurde durch die t-Werte Skala von -1 bis 1 abgebildet und benannt.

- Ton-Cluster mit durchschnittlichen bis ausgeprägten Gehalten an organischem Kohlenstoff (t=0,31)
- Wärme-Cluster mit durchschnittlichen Gehalten an organischem Kohlenstoff (t=-0,04)
- Trockenheits-Cluster mit sehr geringen Gehalten an organischem Kohlenstoff (t=-1,11)
- Schluff-Cluster mit durchschnittlichen bis ausgeprägten Gehalten an organischem Kohlenstoff (t=0,32)
- Berg- und Hügelland Cluster mit ausgeprägten Gehalten an organischem Kohlenstoff (t=0,5)
- Niederschlags (Höhen-) Cluster mit ausgeprägten bis überdurchschnittlichen Gehalten an organischem Kohlenstoff (t=0,77)

Diskussion/Ausblick

Die bekannten Zusammenhänge zwischen:

- Klima und organischem Kohlenstoff
- Feinbodenanteil und organischem Kohlenstoff
- Nutzung und organischem Kohlenstoff

werden durch die Regionalisierung und multivariate Analyse bestätigt. Die in diese Arbeit eingeflossenen Faktoren zum Klima und Feinbodenanteil genügen jedoch nicht, um den Gehalt organischen Kohlenstoffs zu erklären. Es ist notwendig weitere Proxy-Variablen in die Analyse einzubeziehen. Das sind:

- der Wasserhaushalt im Boden in Form von Grundwassereinfluss und Staunässe
- die historischen Bewirtschaftungsformen und die Nutzungsgeschichte
- die Agrarstatistiken der NUTS *
- die aktuellen Bewirtschaftungsformen der Land- und Forstwirtschaft
- die Net Primary Productivity (NPP) und Net Ecosystem Productivity (NEP) [g C/m²/d] aus Satellitendaten abgeleitet [5]
- mikrobielle Prozessgrößen, die mit Humifizierungs- und Mineralisierungsraten gekoppelt sind

Die Bewertung der Unterböden hinsichtlich ihres Gehaltes an organischem Kohlenstoff gewinnt ebenfalls an Bedeutung. Diese weisen zwar geringe Konzentrationen auf, führen aber auf Grund der größeren Mächtigkeit im Vergleich mit den Oberböden erhebliche Mengen organischen Kohlenstoffs.

Die vorliegenden Arbeiten [3, 8] zur Regionalisierung organischen Kohlenstoffs sind auch in die Richtung der Ausweisung von Vorräten weiterzuführen. Neben der Erarbeitung der Konzentrationsverbreitungsmuster ist hierfür auch die Ableitung von Tiefenfunktionen organischen Kohlenstoffs notwendig. Hierfür werden die Daten aus Deutschland weiten Monitoringnetzen BDF ** und BZE *** wichtige Bausteine liefern.

Die Software der Open Source Projekte PostgreSQL, PostGIS, GRASS GIS, gstat und R bietet die Voraussetzung und ermöglicht die vielschichtige Analyse und Weiterführung des Projektes „Organischer Kohlenstoff in Böden Deutschlands“.

* *NUTS* – (*Nomenclature des unités territoriales statistiques*) bezeichnet eine hierarchische Systematik zur eindeutigen Identifizierung und Klassifizierung der räumlichen Bezugseinheiten der Amtlichen Statistik in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union.

** *BDF* – Bodendauerbeobachtungsflächen dienen dazu, die zeitliche Veränderung der Böden zu dokumentieren und die diese Veränderungen bedingende Prozesse zu ermitteln und zu verstehen.

*** *BZE* – Die bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) untersucht an ca. 2.000 Stichprobenpunkten den Zustand und die Veränderungen von Waldböden.

Kontakt zum Autor:

Dr. Michael Fuchs
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Stilleweg 2, 30655 Hannover
0511.643.2886

michael.fuchs@bgr.de

Literatur

- [1] *Ad-hoc-AG Boden* (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl., 438 S., Hannover.
- [2] *Bussian* (2009); Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) , Schnittstellen zur Klimaforschung, Synergien und Handlungsbedarf . Schließung von Stoffkreisläufen, Kohlenstoffkreislauf – Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt, Dessau.
- [3] *Düwel, O.; Siebner, C.S.; Utermann, J.; Krone, F.* (2007): Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands -Bericht über länderübergreifende Auswertung von Punktinformationen im FISBo BGR, Hannover.
- [4] *Kolbe, H.; Prutzer, I.* (2004): Überprüfung und Anpassung von Bilanzierungsmodellen für Humus an Hand von Langzeitversuchen des Ackerlandes. Abschlussbericht zum Projekt. Fachmaterial Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig.
- [5] *Sabbe, H.; Veroustraete, F.* (1999): Estimation of Net Primary and Net Ecosystem Productivity of European Terrestrial Ecosystems by Means of the C-Fix Model and NOAA/AVHRR Data . In: The 1999 EUMETSAT METEOROLOGICAL SATELLITE DATA USERS' CONFERENCE, Copenhagen, Denmark.
- [6] *Scheffer, F.* (2002): Lehrbuch der Bodenkunde / Scheffer/Schachtschabel. - 15. Aufl., Heidelberg.
- [7] *Schlesinger, W. H.; Winkler, J. P.; Megonigal, J. P.* (2000): Soils and the Global Carbon Cycle. 93-102. In: The Carbon Cycle, eds. Wigley, T. M. L., Schimel, D. S., Cambridge University Press.
- [8] *Utermann, J.; Düwel, O.; Fuchs, M.; Hoffmann, R.* (2009): Status des C-Gehalts in Böden Deutschlands. Schließung von Stoffkreisläufen, Kohlenstoffkreislauf – Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt, Dessau.
- [9] *Zeit Online.* Kohlenstoff – Einmal Atmosphäre und zurück. <http://www.zeit.de/2009/30/GSP-Kohlenstoffkreislauf>.
- [10] *FISBo.* Informationsgrundlagen im Fachinformationssystem Bodenkunde (FISBo BGR). http://www.bgr.bund.de/nn_325378/DE/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/informationsgrundlagen_inhalt.html
- [11] *Hijmans, R. J.; Cameron, S. E.; Parra, J. L.; Jones, P. G.; Jaervis, A.* (2005): Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Gobar Land Areas , Int. J. Climatol. 25: 1965–1978
- [12] *Mücher, C. A. (ed.)*, 2000: PELCOM project - Development of a consistent methodology to derive land cover information on a European scale from remote sensing for environmental modelling, PELCOM FINAL REPORT- DGXII, EUROPEAN COMMISSION.
- [13] PostgreSQL. <http://www.postgresql.org/>
- [14] PostGIS. <http://postgis.refractions.net/>
- [15] GRASS GIS. <http://grass.osgeo.org/>
- [16] gstat. <http://www.gstat.org/index.html>
- [17] DGM-D, <http://www.bkg.bund.de>