

Felix Heitkamp, Bernd Ahrends, Jan Evers & Henning Meesenburg

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Umweltkontrolle, Grätzelstrasse 2, 37079 Göttingen. E-Mail: felix.heitkamp@nw-fva.de

## Hintergrund

- Wälder sind in Europa die Landnutzung mit der größten CO<sub>2</sub>-Senke
- Die C-Flüsse sind sehr hoch
- Die Änderung im gesamten System (Vegetation & Boden) sind vergleichsweise klein  
-> ca. 10 t ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup> In- und Output; Änderung von 0.75 t/ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>  
-> Änderung ca. +3% (Luysaert et al. 2010)
- Jährliche Veränderung des Boden-C-Vorrates deutschlandweit Ø 0.25-0.4 t ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup> (Grüneberg et al. 2014, Ziche et al. 2019)
- Hessen: ca. 0.3 t ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup> (Paar et al. 2016)

- Ca. 30-50% der Senke liegt im Boden
- Sehr variabel, je nach Standort auch Verluste (Ziche et al. 2019)
- Zunächst räumliche Grundlage für standortabhängige Schätzung der C-Dynamik im Boden unter Klimawandel und Bestandsumbau notwendig

## Ziele

- Regionalisierung von C-Vorräten in der organischen Auflage und im Mineralboden von Hessen unter Wald
- Modellierung des Tiefenverlaufs in 5 cm Schritten für eine flexible Auswahl der benötigten Tiefen
- Quantifizierung der räumlichen Unsicherheiten
- Schaffung einer räumlichen Grundlage für die dynamische C-Modellierung und Risikoabschätzung von Bewirtschaftungsmaßnahmen (z. B. Kalkung, Vollbaumnutzung)

## Schlußfolgerungen

- Erstmals **vollflächige Regionalisierung** für Kohlenstoffvorräte in hessischen Waldböden (Abb. 1) im mittleren Maßstab (1:50,000).
- Räumliche Darstellung zeigt die größten **Unsicherheiten** (Abb. 2) in einigen Hochlagen (z.B. Rhön, Hoher Meißner), sowie auf Böden mit Wassereinfluss (z.B. Hessisches Ried). Da sich der Datenraum der Klimadaten zwischen Bodenzustandserhebung (BZE) und Bodenkarte nicht vollständig überschneidet, führte auch dies zu Unsicherheiten in klimatischen Randbereichen von Hessen (z.B. Odenwald).
- Die flexible Abfrage von Vorräten entlang des **Tiefengradienten** in 5 cm Schritten ermöglicht die Integration der Daten in unterschiedliche Systeme, z.B. Übertragung der unterschiedlichen Tiefenstufen der Bodenzustandserhebung und der Global Soil Map (Tab. 1).
- Die **Güte der Vorhersage** ist gut bis befriedigend, je nach betrachteter Tiefe (Abb. 3, 4). Im Mineralboden wurden die besten Ergebnisse zwischen 20 und 60 cm Tiefe erzielt (Abb. 4). Für die organische Auflage waren die Unsicherheiten vergleichsweise hoch (AVE: 0.37, RMSE 13.7 t ha<sup>-1</sup>). Eine Integration von Baumart, Mischungsanteil und Alter würde die Ergebnisse verbessern, jedoch liegen die Daten nicht komplett flächendeckend vor.
- Anhand einer **Sensitivitätsanalyse** (Abb. 5) wurden „idealisierte Profile“ des Mineralbodens dargestellt. Hierbei wurden alle geprüften Parameter konstant gehalten, was zu „unrealistischen“ Profilverläufen führt (z.B. kein steigender Skelettgehalt mit der Tiefe). Es zeigte sich, dass sowohl die potentielle Kationenaustauschkapazität (als Proxy für die *Textur*), als auch dass *Ausgangsmaterial* der Bodenbildung einen hohen Einfluss auf die Vorräte von Kohlenstoff hatten (Abb. 5 c, g). *Grobbodenanteile* von z.B. 10 bzw. 25% reduzierten die C-Vorräte entsprechend auf 89 bzw. 75%, und erfüllen somit die Erwartungen. Die *Bodenklasse* hatte den stärksten Einfluss auf die Tiefenverteilung von Kohlenstoff. Gleye zeigten auch in unteren Tiefe hohe C-Vorräte (erklärbar durch Grundwassereinfluss), bei Pseudogleyen waren die C-Vorräte im Oberboden stark erhöht (Stauwasser) und Podsole zeigten erhöhte Vorräte im oberen Drittel (B<sub>n</sub>-Horizont). Der *Waldtyp* zeigte im Mineralboden nur sehr schwache Effekte.
- Anhand der Nutzung von bekannten bodenbildenden Faktoren und Umweltbeziehungen wurden C-Vorräte für Hessens Waldböden entlang eines flexibel abfragbaren Tiefengradienten regionalisiert.

## Ergebnisse

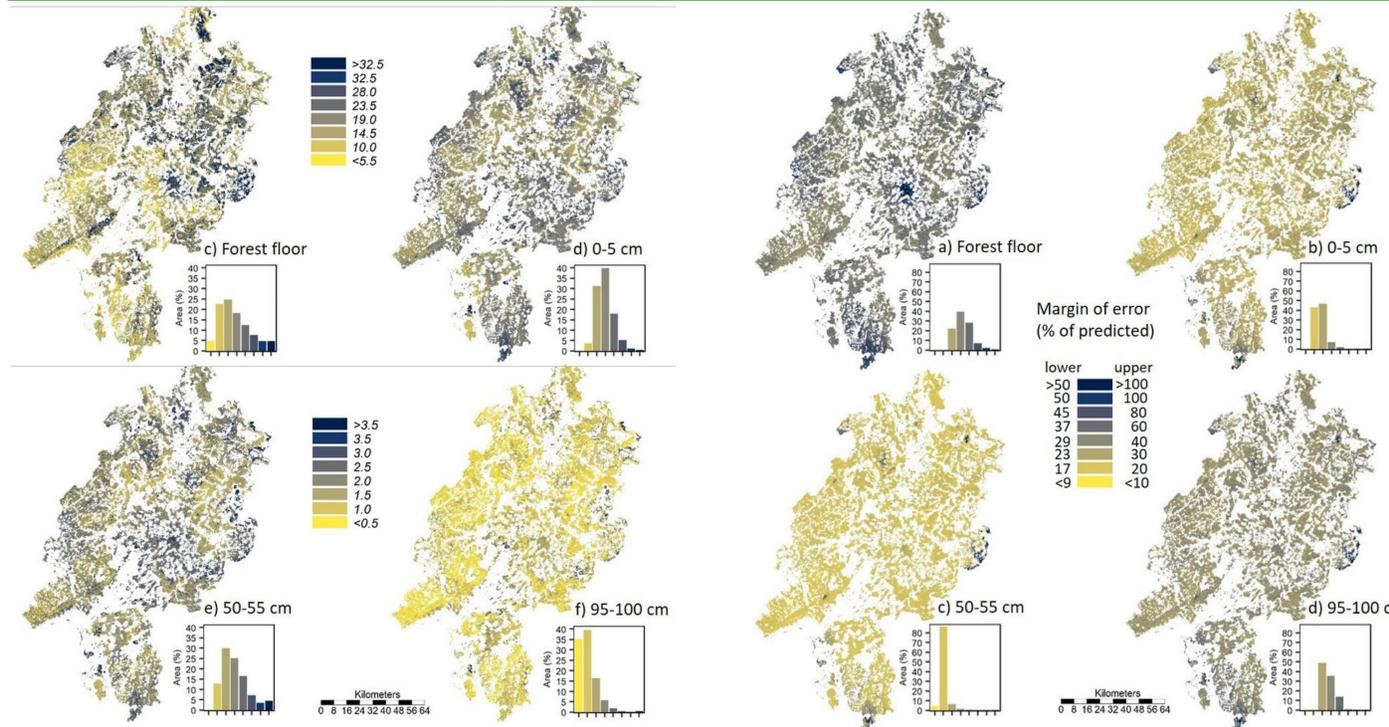


Abb. 1: Karten der C-Vorräte (t ha<sup>-1</sup>) in ausgewählten Tiefen der Waldböden von Hessen. Histogramme zeigen die prozentuale räumliche Verteilung.

Tab. 1: Spannweiten der C-Vorräte als flächengewichtetes Mittel (a) und Summe der gesamten Waldfläche (b, 8690 km<sup>2</sup>). Die Spannweiten sind die 95% Konfidenzintervalle der Modellunsicherheit, Werte in Klammern sind die modellierten Werte.

Schicht	C-Vorrat (t ha <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	Gesamtvorrat (Mt) <sup>b</sup>	Anteil (%)
Gesamt	78.0 – 92.5 (84.1)	67.6 – 80.1 (72.9)	100
Auflage	12.0 – 22.9 (16.5)	10.4 – 19.9 (14.3)	16 – 24 (20)
Mineralboden	63.9 – 72.4 (67.7)	55.3 – 62.7 (58.6)	76 – 84 (80)
<i>Mineralischer Ober- und Unterboden:</i>			
0-30 cm	42.7 – 51.0 (46.4)	37.0 – 44.1 (40.2)	68 – 69 (69)
30-100 cm	20.4 – 22.4 (21.3)	17.6 – 19.4 (18.4)	31 – 32 (31)
<i>Stufen der „Global Soil Map“ (Mineralboden)</i>			
0-5 cm	13.6-20.3 (16.5)	11.7-17.6 (14.3)	22-27 (24)
5-15 cm	13.8-17.7 (15.5)	11.9-15.3 (13.5)	23 (23)
15-30 cm	13.2-15.7 (13.6)	11.4-13.6 (12.4)	21-22 (22)
30-60 cm	12.9-14.6 (13.6)	11.1-12.6 (11.8)	19-21 (20)
60-100 cm	7.2-8.2 (7.7)	6.2-7.1 (6.6)	11-12 (11)

## Literatur

Grüneberg E, Ziche D, Wellbrock N (2014): Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. *Global Change Biology* 20, 2644-2662. doi.org/10.1111/gcb.12558

Heitkamp F, Ahrends B, Evers J, Meesenburg H (2021): Spatial three-dimensional mapping of forest soil carbon stocks in Hesse, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. DOI: 10.1002/jpln.202100138

Heuvelink G. B. M. (2018). Uncertainty in Y Yigini, GF Olmedo, S Reiter, R Baritz, K Viatkin & R Vargas (Eds.), *Soil organic carbon mapping cookbook* (pp. 109-121). FAO.

Luysaert S, et al. (2010). The European carbon balance. Part 3: forests. *Global Change Biology* 16, 1429-1450. doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02056.x

Paar U, Evers J, Damman I, König N, Schulze A, Schmidt M, Schenfelder E, Scheeler B, Ullrich T, Eichhorn J (2016): *Waldbodenzustandsbericht für Hessen. Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)*. Universitätsverlag Göttingen, Göttingen.

Pedersen EJ, Miller DL, Simpson GL, Ross N (2019): Hierarchical generalized additive models in ecology: an introduction with mgcv. *PeerJ* 7, e6876-e6876. doi.org/10.1515/peerj-2017-0013

Wellbrock N, Grüneberg E, Riedel T, Polley H (2017): Carbon stocks in tree biomass and soils of German forests. *Central European Forestry Journal* 63, 105-112. doi.org/10.1515/cefor-2017-0013

Wood S (2017). Generalized additive models: an introduction with R. CRC Press.

Wood S (2019). *Mixed GAM computation vehicle with automatic smoothness estimation*. R package version 1.8-12. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/mgcv/>

Ziche D, Grüneberg E, Hilbrig L, Höhle J, Kompa T, Liski J, Repo A, Wellbrock N (2019): Comparing soil inventory with modelling: Carbon balance in central European forest soils varies among forest types. *Science of The Total Environment* 647, 1573-1585. doi.org/10.1016/j.scotenv.2018.07.327

## Methoden

- Untersuchungsgebiet**
- Bundesland Hessen (8690 km<sup>2</sup> Wald), 80-950 ü.d.M.
  - Jahresmitteltemperatur: 5.2–10.6°C
  - Jahresniederschlag: 537-1385 mm
  - Buche (31%), Fichte (22%), Eichen (14%), Kiefern (10%); häufig Mischwald
- Regionalisierungsmethode**
- Generalisiertes additives Modell zur 3D-Regionalisierung (Wood 2017, 2019)
  - Geeignet für Faktorvariablen und nicht-lineare Beziehungen
  - Berücksichtigt „hierarchische Effekte“ (Pedersen et al. 2019): Ausgangsmaterial, Bodenklasse, Podsolierungsgrad, Waldtyp beeinflussen den „globalen“ Tiefenverlauf (Abb. 5)
  - Exakte Modellformulierung, siehe Heitkamp et al. (2021)
- Datengrundlage**
- Bodenprofile der Bodenzustandserhebung (BZE) Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, ohne organisches Ausgangsmaterial (n = 355 Profile)
  - Bodenkarte Hessen 1:50000 (Bodenklasse, Ausgangsmaterial; Profildaten: Textur, Skelett, Podsolierung)
  - ATKIS Vegetation (Laub-, Misch-, Nadelwald)
  - Klima (langjährige Mittel Temperatur & Niederschlag)
  - Stickstoffdeposition
- Validierung**
- 10-fache Kreuzvalidierung in 10-facher Wiederholung (Zufallsauswahl)
  - Validierungsmaße nach Heuvelink et al. (2018)

## Sensitivitätsanalyse

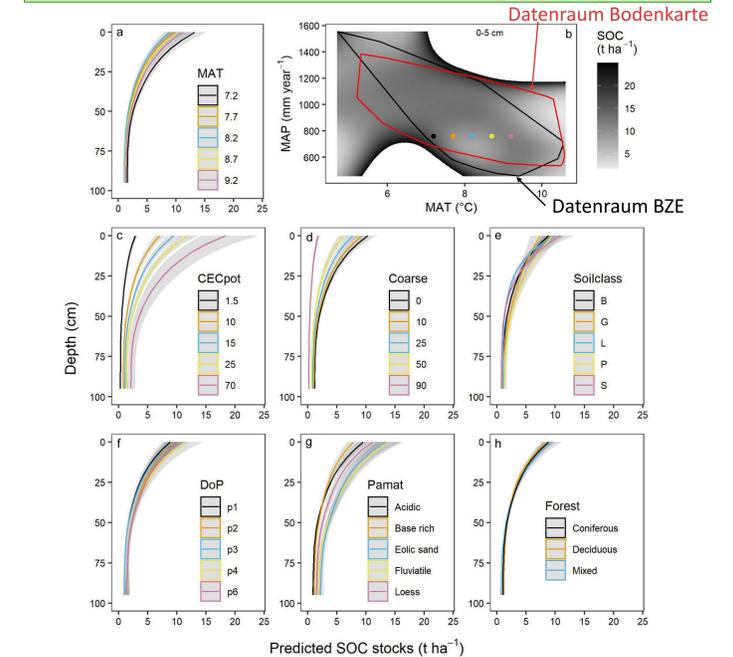


Abb. 5: Idealisierte Profile (Mineralboden) als Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse. Nur der angegebene Modellparameter wurde variiert, alle anderen Parameter wurden auf dem median oder der dominanten Klasse gehalten. Die Bänder zeigen die 95% Konfidenzintervalle (Modellunsicherheit) an. SOC: organische Kohlenstoff im Boden; MAT: mittlere Jahrestemperatur; MAP: mittlerer Jahresniederschlag; CECpot: berechnete potentielle Kationenaustauschkapazität (Texturderivat); Coarse: Grobboden; Soilclass: Bodenklasse; DoP: Grad der Podsolierung; Pamat: Ausgangsmaterial.