

Grundlagen zum Kohlenstoffhaushalt von Waldböden

Felix Heitkamp

Sachgebiet Nährstoffmanagement

felix.heitkamp@nw-fva.de



NW-FVA

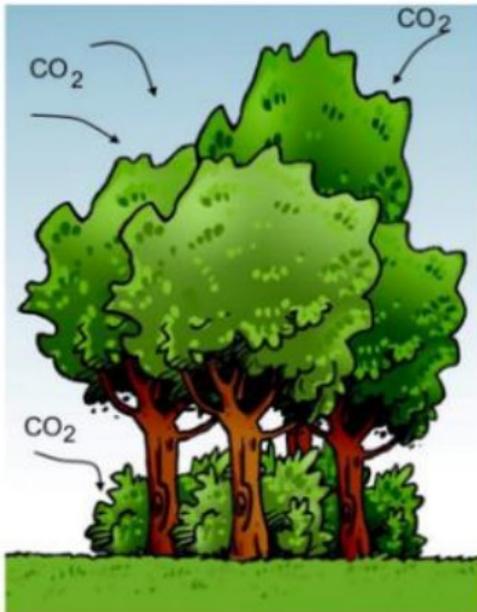
Nordwestdeutsche
Forstliche Versuchsanstalt

Fortbildung der NW-FVA
Wasser- und Kohlenstoffhaushalt von Wäldern im Klimawandel
Quarnebeck, 22.06.2023

- **Einleitung**
Globale Bedeutung, Landnutzung, Speichergrößen
- **Kohlenstoffkreislauf in Ökosystemen**
- **Auswirkungen des Klimawandels auf**
Bodenkohlenstoffvorräte
- **Effekte von Baumarten**
- **Kalamitäten**
- **Diskussion: Maßnahmen**

Forstlich relevante Sektoren

1. CO₂ Sequestrierung im Wald



2. CO₂ Speicherung in Holzprodukten



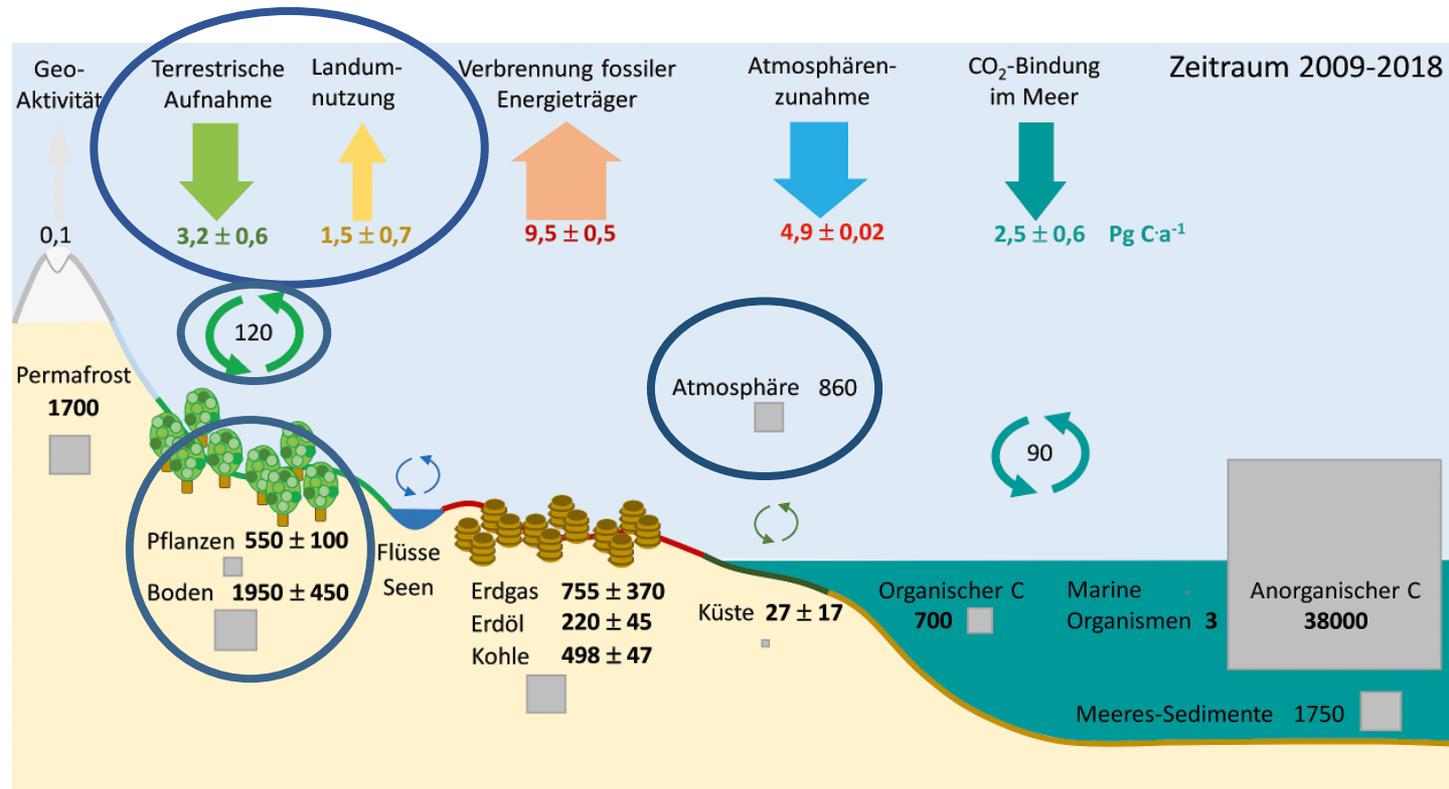
3. CO₂ Substitution materielle u. energetische



Anpassung des Waldes an den Klimawandel

Fokus des Vortrags

Kohlenstoffspeicher und -flüsse: Global



Vorrat:

Aktuelle Menge in einem Speicher

Fluss:

Aufnahme und Abgabe zwischen Speichern

Senke:

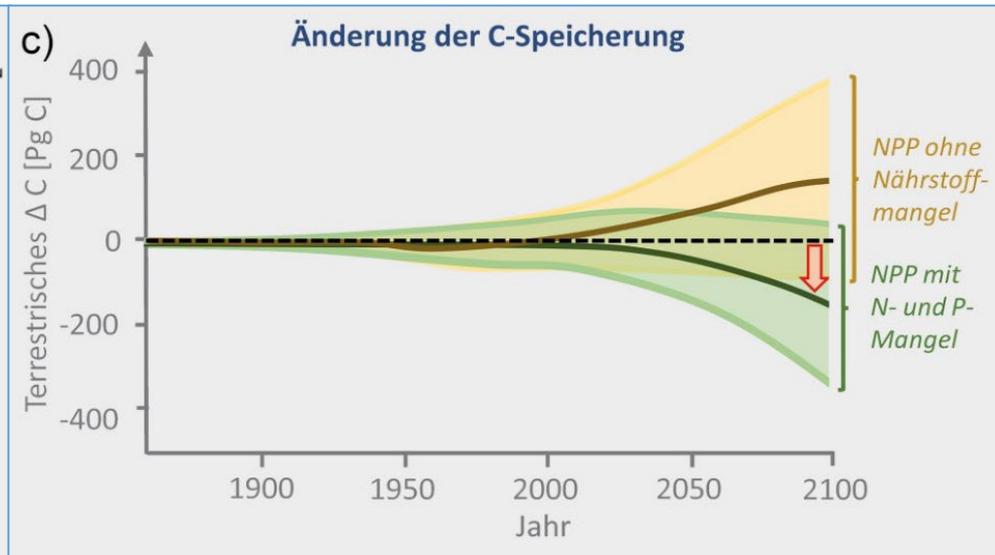
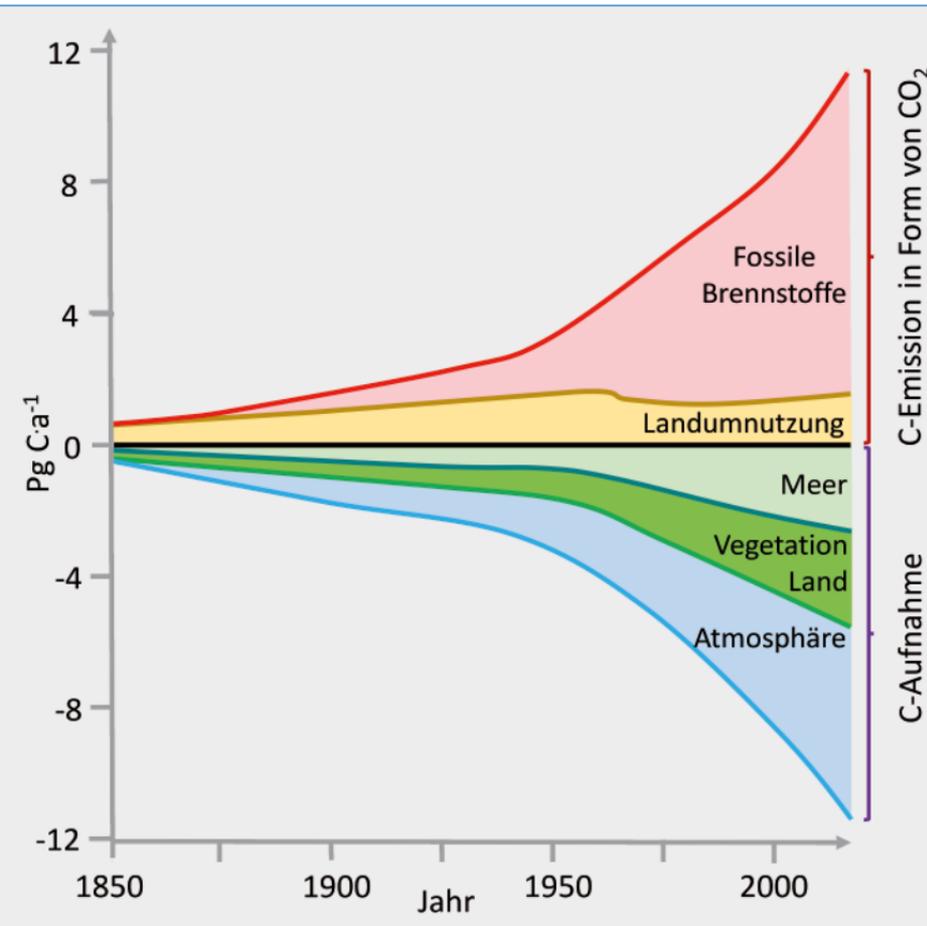
Netto-Aufnahme aus der Atmosphäre

Quelle:

Netto-Abgabe an die Atmosphäre

Jährliche **globale** Kohlenstoff Vorräte und Flüsse (Dietz 2021). Pg (Peta-Gramm) = 1 Gt (Gigatonne)

Entwicklung von Quellen und Senken seit der Industrialisierung



Durch potentielle **Nährstofflimitierung** der Primärproduktion, könnte die Biosphäre zu einer **Treibhausgasquelle** werden.
 NPP = Nettoprimärproduktion, also C Aufnahme der Biomasse abzüglich der Atmung

Globale Entwicklung von **Quellen** und **Senken** seit der Industrialisierung. **Fossile Brennstoffe** sind die größte Quelle, die **Atmosphäre** die größte Senke von CO₂.

Kohlenstoffspeicher und -flüsse in Deutschland

Vorräte und deren Änderungsraten (Flüsse) in deutschen Waldökosystemen

Vorräte lebende **Biomasse: 1230 Mio t C**

-> Änderung von **1.1 t/ha*Jahr** (2012 – 2017)

Vorräte **Totholz: 33,6 Mio t C**

-> Änderung von **0.08 t/ha*Jahr** (2012 – 2017)

Vorräte im **Boden: 1215 Mio t C**

-> Änderung von **0.3 - 0.7 t/ha*Jahr** (1990 – 2007)

Verhältnisse
Vorräte Biomasse:Boden
ca. **1:1**
Senke Biomasse:Boden
ca. **3:2**

Treibhausgasemissionsminderung „Wald“ in Deutschland

ca. 60 Mio. t CO₂-Äquivalente (C * 3.67 = CO₂)

ca. 7% Minderung der Gesamtemissionen (860 Mio t in 2018)

Bedeutung für die Praxis

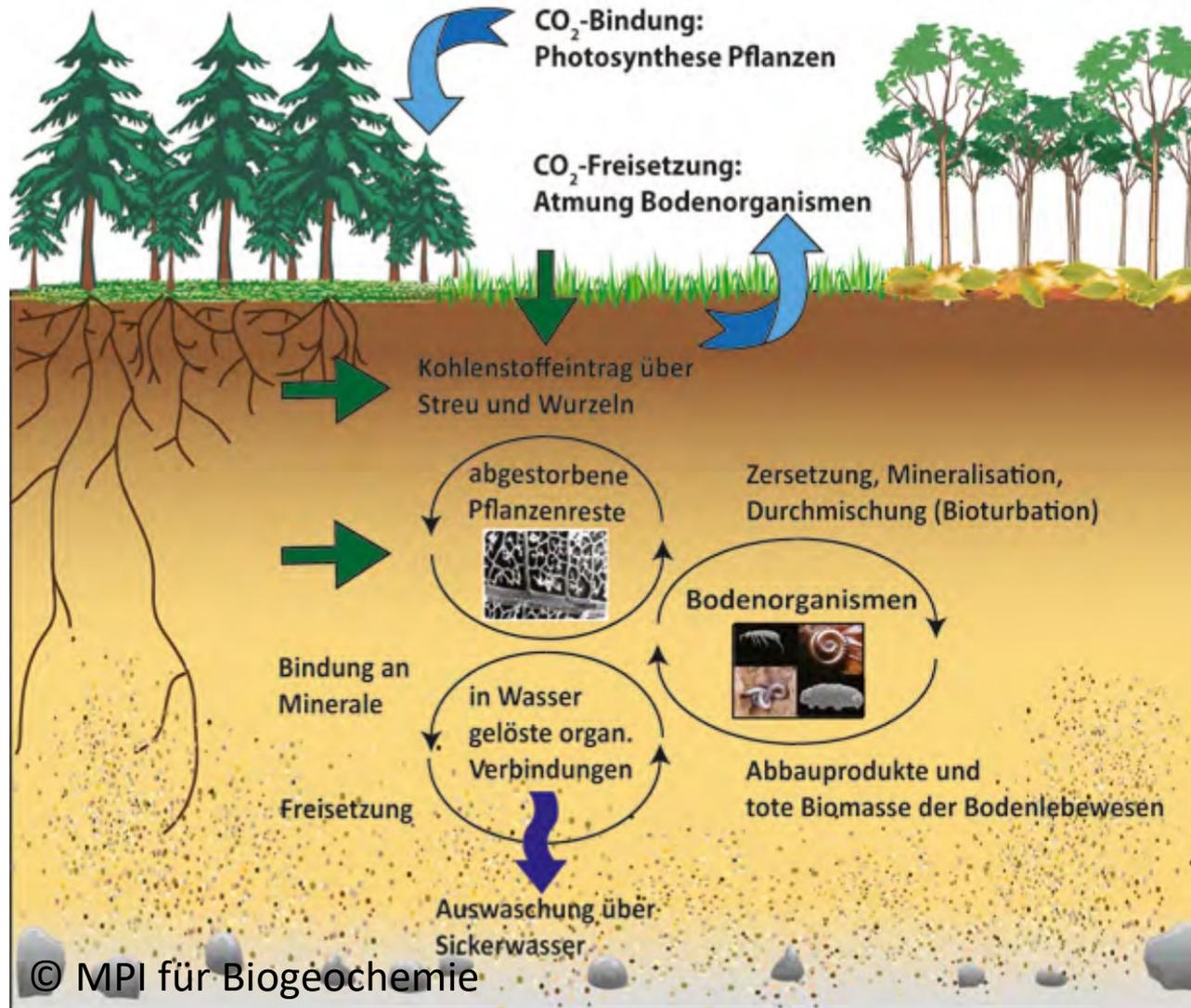
- Das Ökosystem Wald ist momentan (2012-2017) eine relevante Treibhausgassenke
- Politik und Gesellschaft stellen hohe Erwartungen an den Erhalt, und sogar den Ausbau der Waldsenke
- **Stabilität der Waldsenke?**
 - Produktivität der Bestände (Vortrag Ralf Nagel)
 - **Waldboden als Kohlenstoffspeicher**
- Diese Frage ist auch in der Politik angekommen:

„Natürliche Senken sind gleichfalls im Potential begrenzt. Die Einbindungen von Kohlenstoff in natürlichen Senken sind zudem nicht von unbegrenzter Dauer und vollständig reversibel (z. B. durch Waldbrände).“

„Senken sind deshalb nicht geeignet, Versäumnisse in den Emissionsminderungsanstrengungen anderer Sektoren unbegrenzt umweltinteger auszugleichen.“

UBA Position September 2021, S. 37

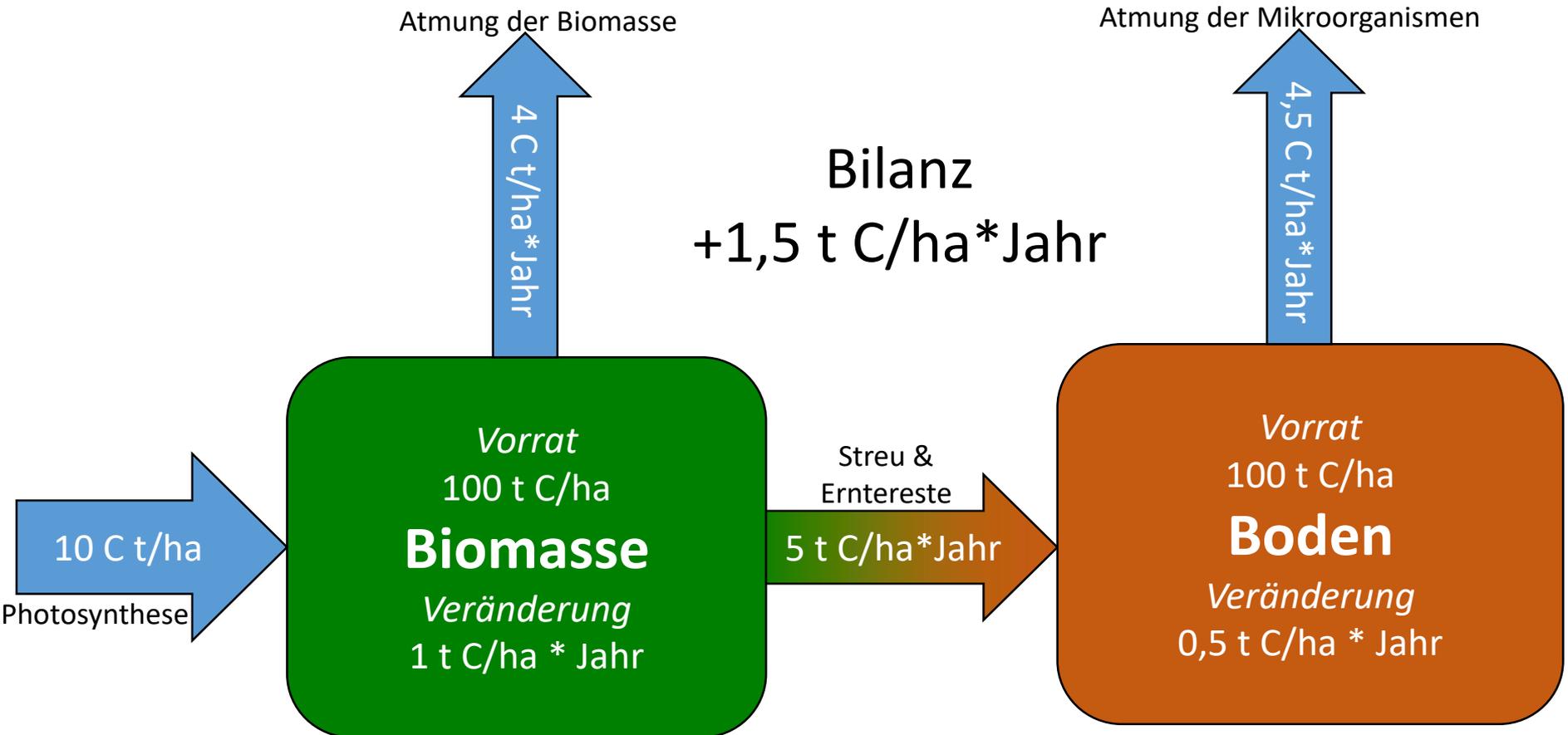
Der Kohlenstoffkreislauf in Ökosystemen



Veränderung der Vorräte im Boden

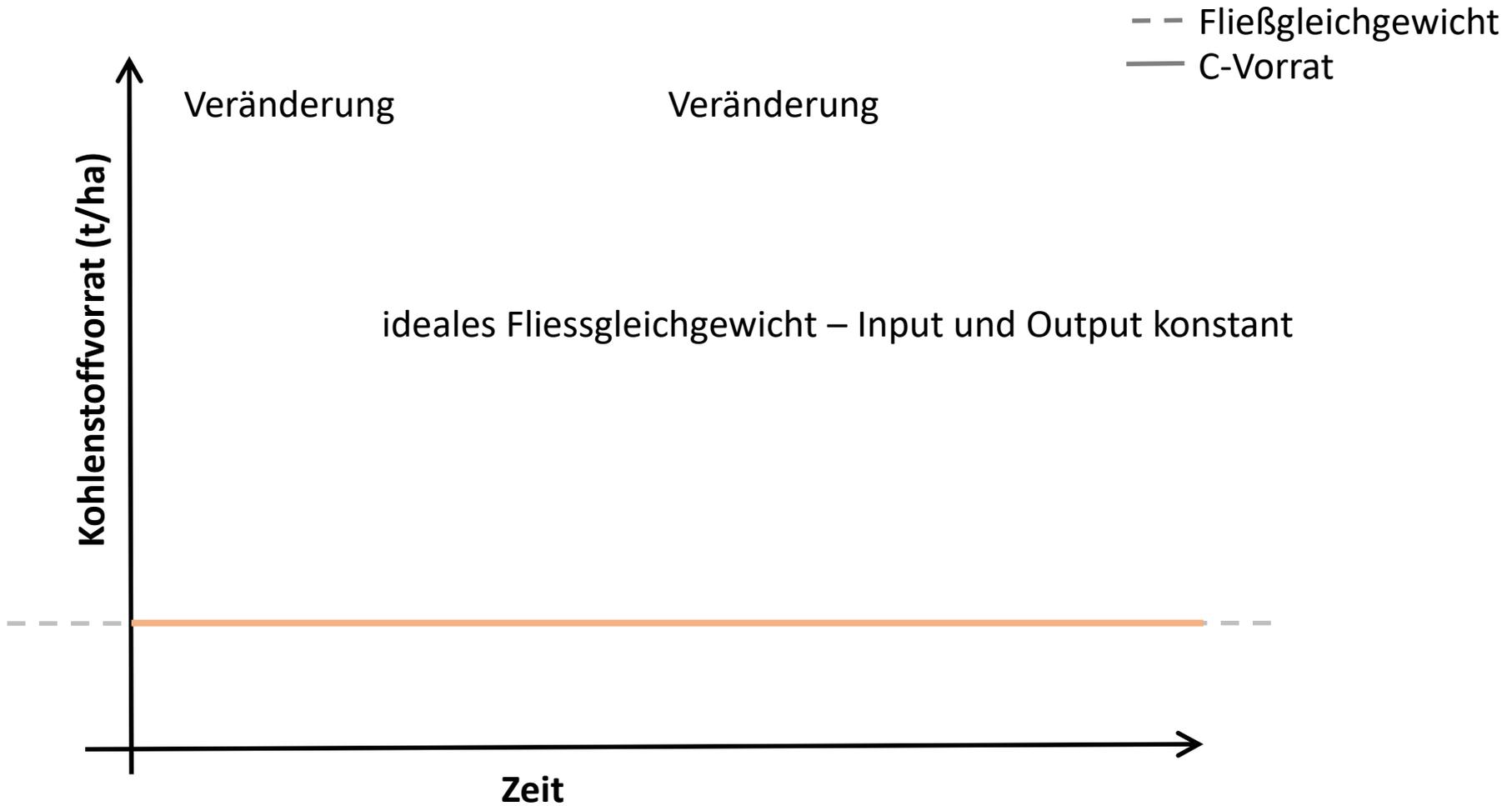


Veränderung der Vorräte im Boden

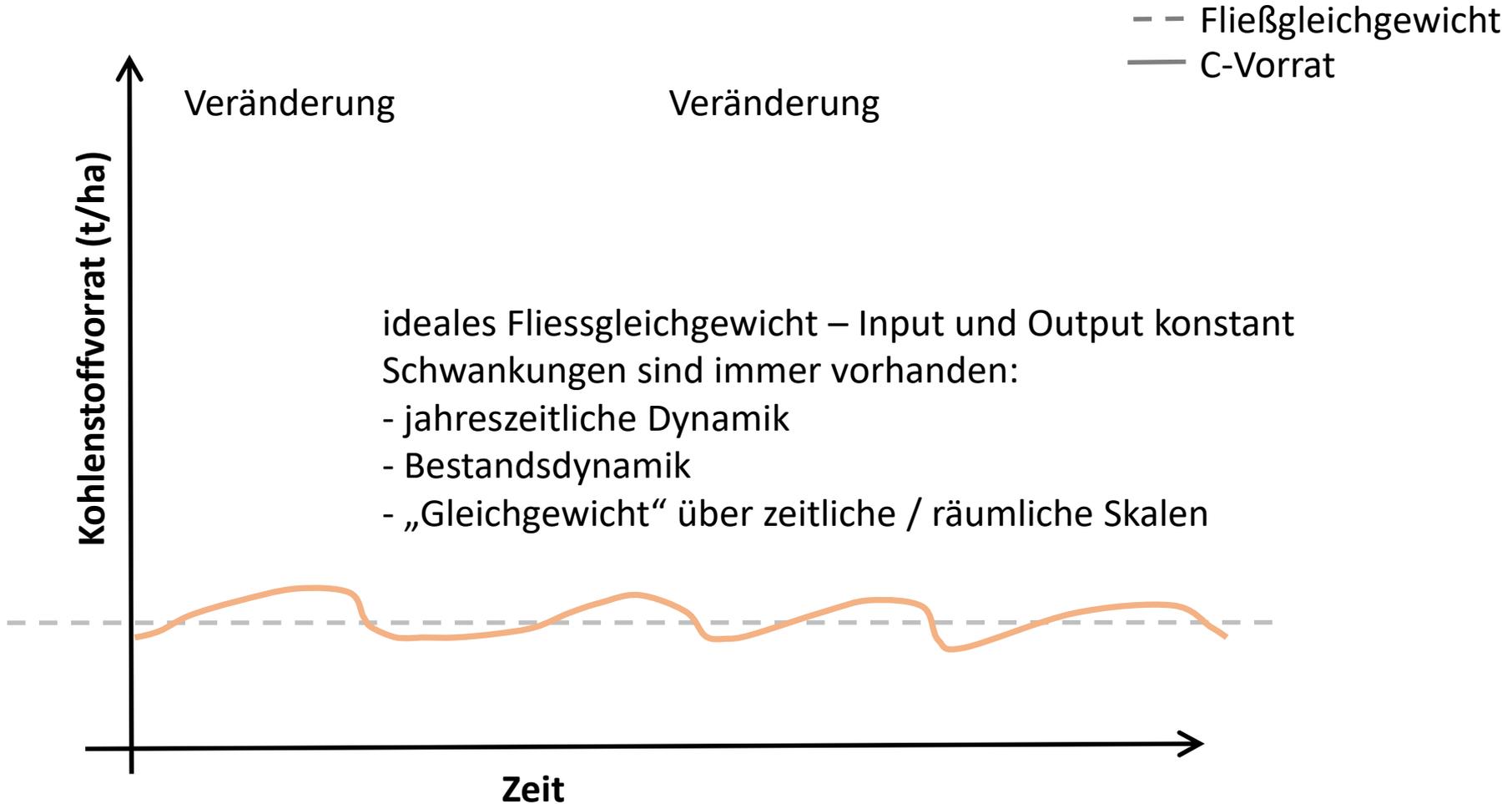


Faustformel für Größenordnungen:
Vorrat : Fluss : Bilanz \approx 100:10:1

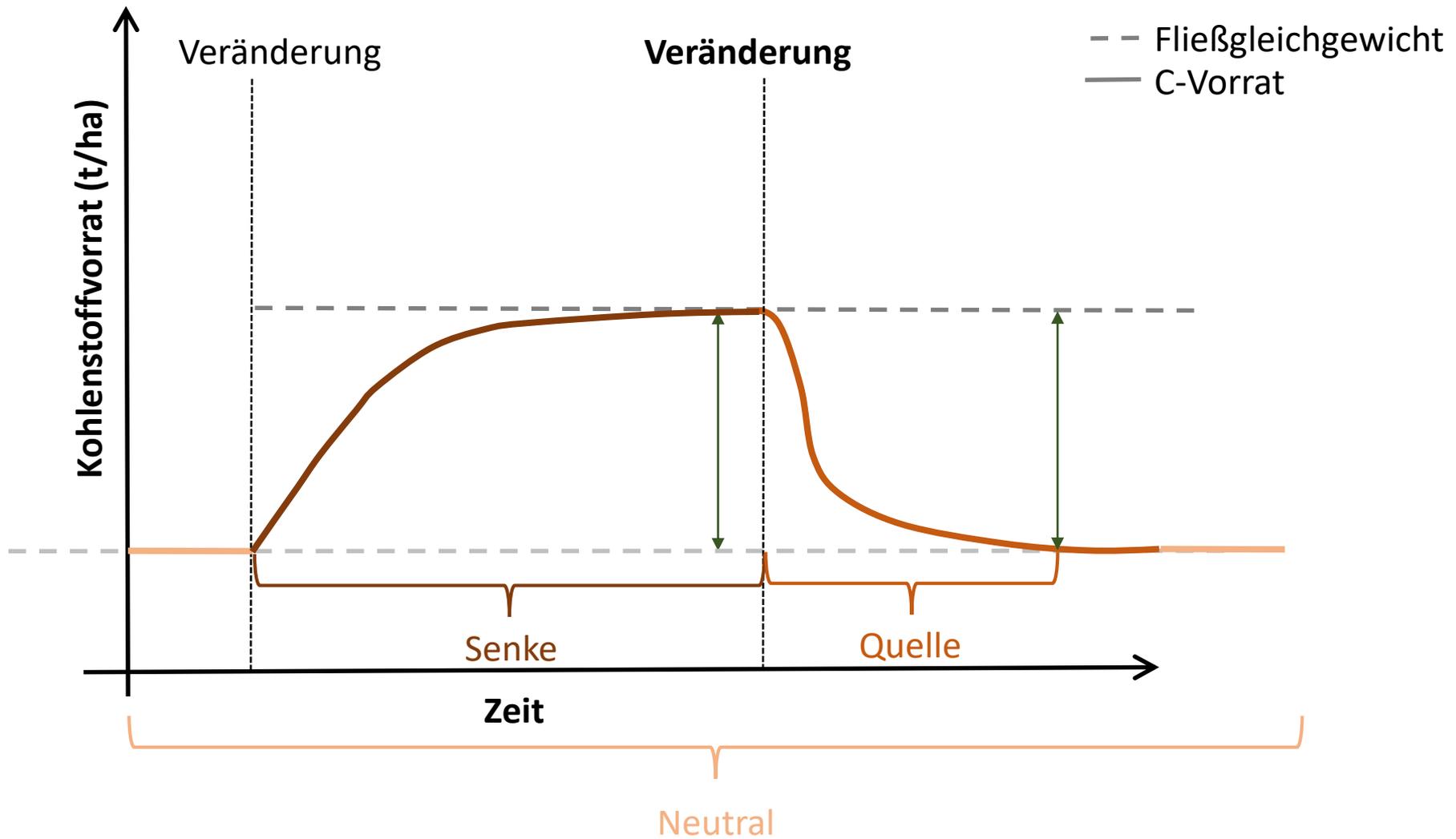
Bodenkohlenstoff – Fließgleichgewicht



Bodenkohlenstoff – Fließgleichgewicht



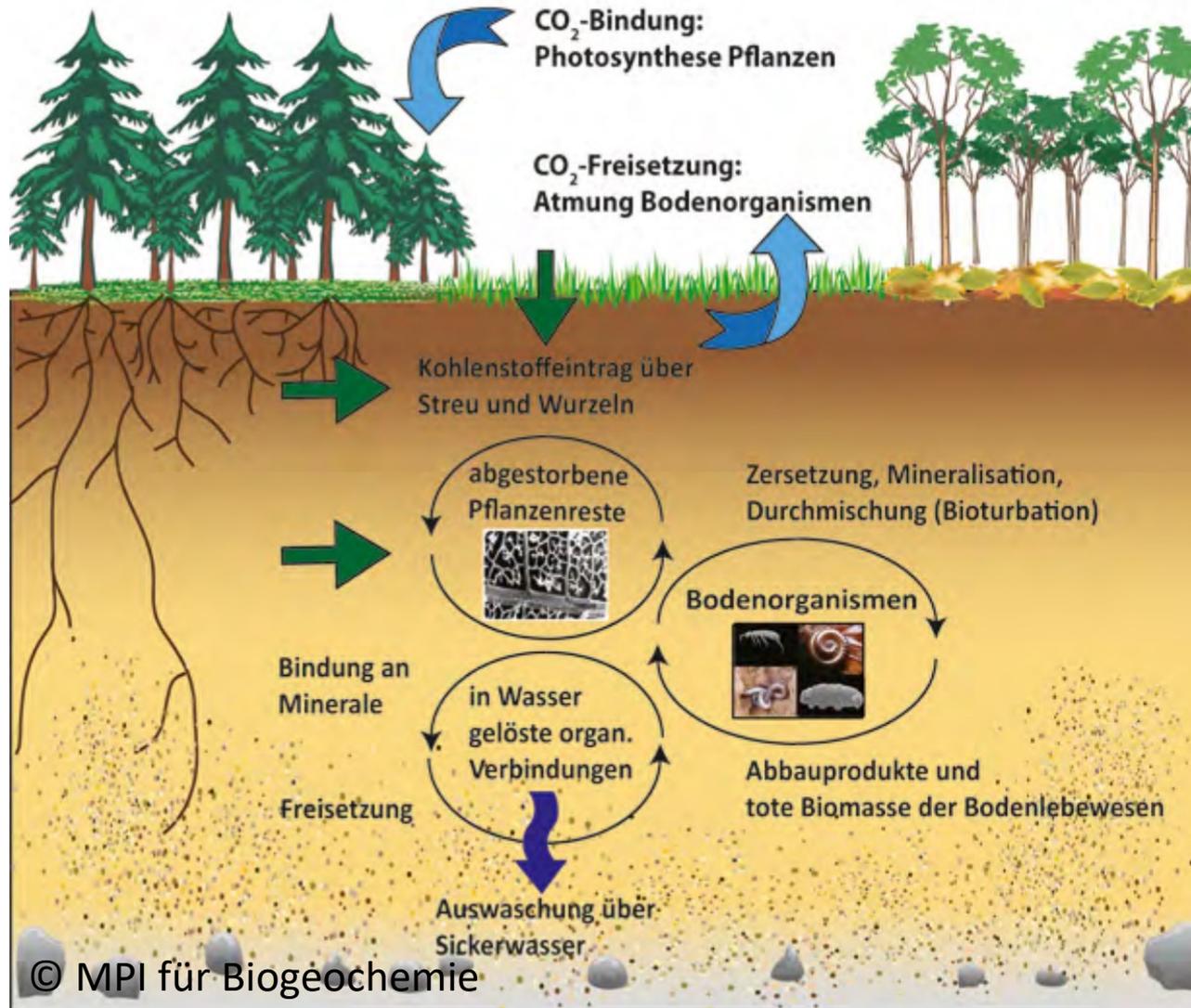
Bodenkohlenstoff – Fließgleichgewicht



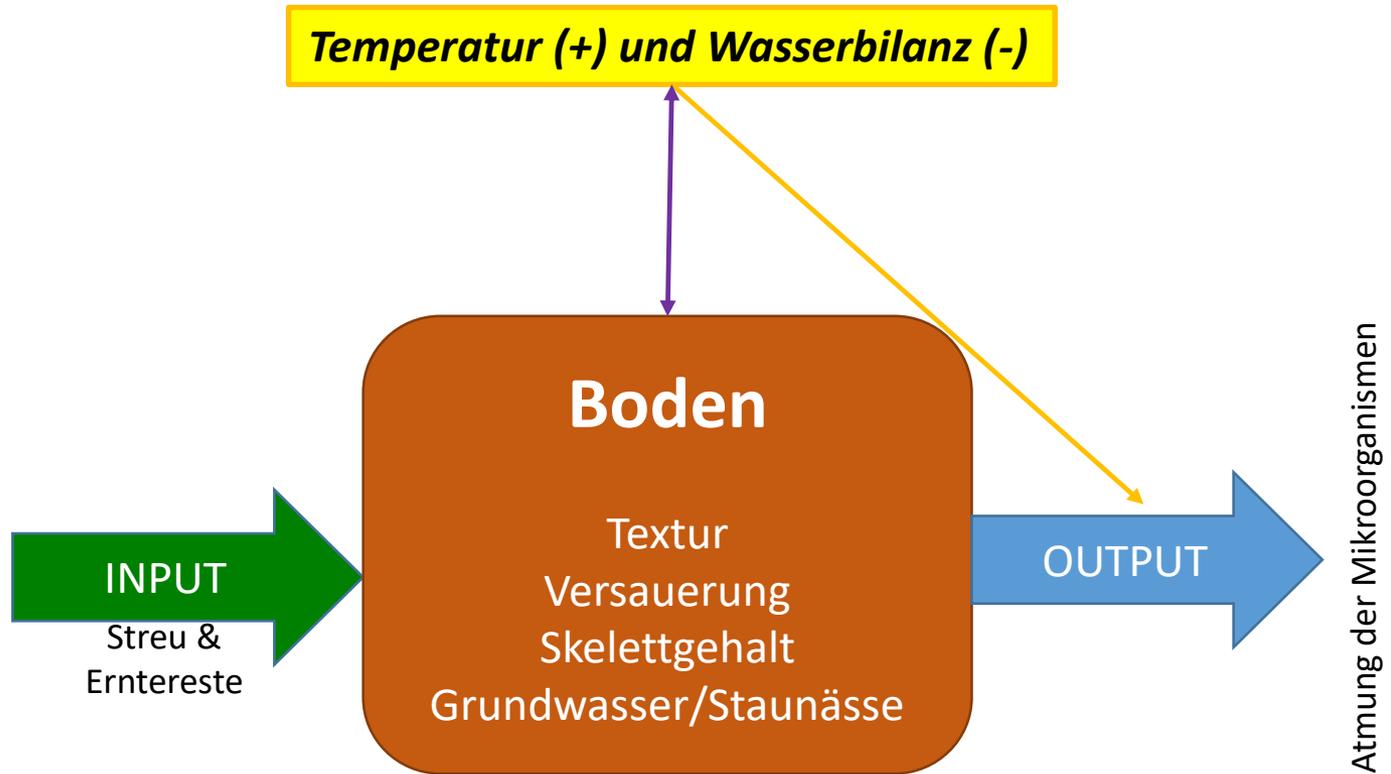
Was bedeutet das für den Waldboden?

- Die Senke „Waldboden“ ist endlich (“Fließgleichgewicht“)
 - Veränderungen der Speichergröße bedürfen Veränderung des Inputs oder Outputs
 - Um ein Vorratsniveau zu halten, müssen die entsprechenden Faktoren konstant bleiben
 - Ein Aufbau dauert viel länger als ein Verlust („**slow in – rapid out**“, Körner 2003)
 - Ein Aufbau von C-Vorräten („biologische Senke“) ist reversibel
-
- Eine Nutzung von biologischen Senken birgt das **Risiko** durch Veränderung der Bedingungen (Klimawandel, Kalamitäten, Altersstruktur) zu einer **Quelle** zu werden
 - Nutzung von biologischen Senken allenfalls **Zwischenlösung** -> Quellen müssen reduziert werden

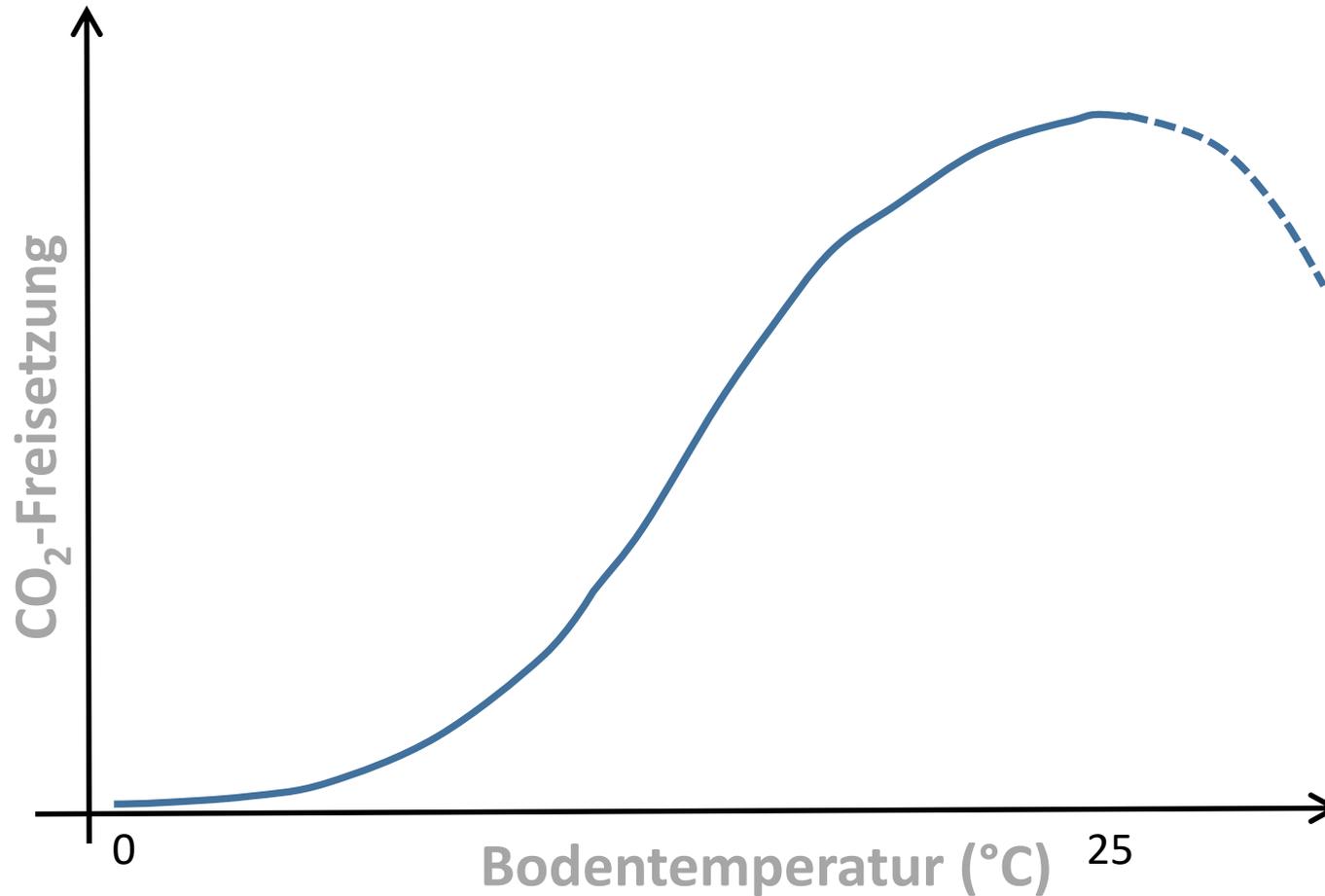
Auswirkungen des Klimawandels auf Kohlenstoffvorräte im Boden



Faktoren für die Veränderung der Vorräte im Boden



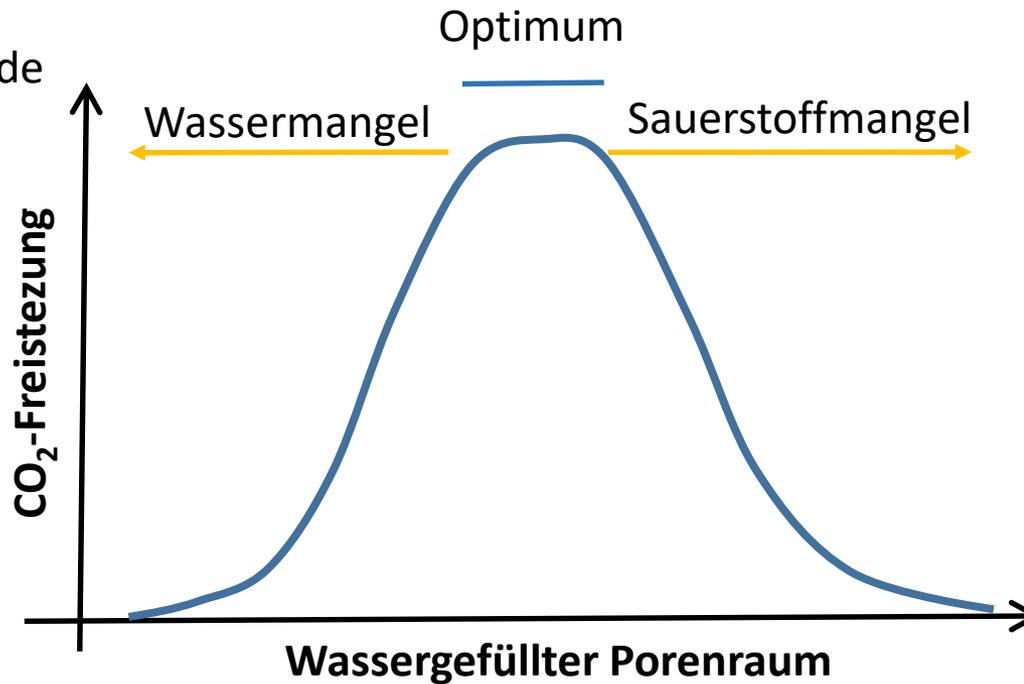
Faktor Temperatur: Einfluss auf die CO₂-Freisetzung



Veränderung der mikrobiellen Atmungsrate bei **optimalen Feuchtebedingungen** und **gleichem Substratangebot** in Abhängigkeit der Temperatur.

Faktor Wasser: Einfluss auf die CO₂-Freisetzung

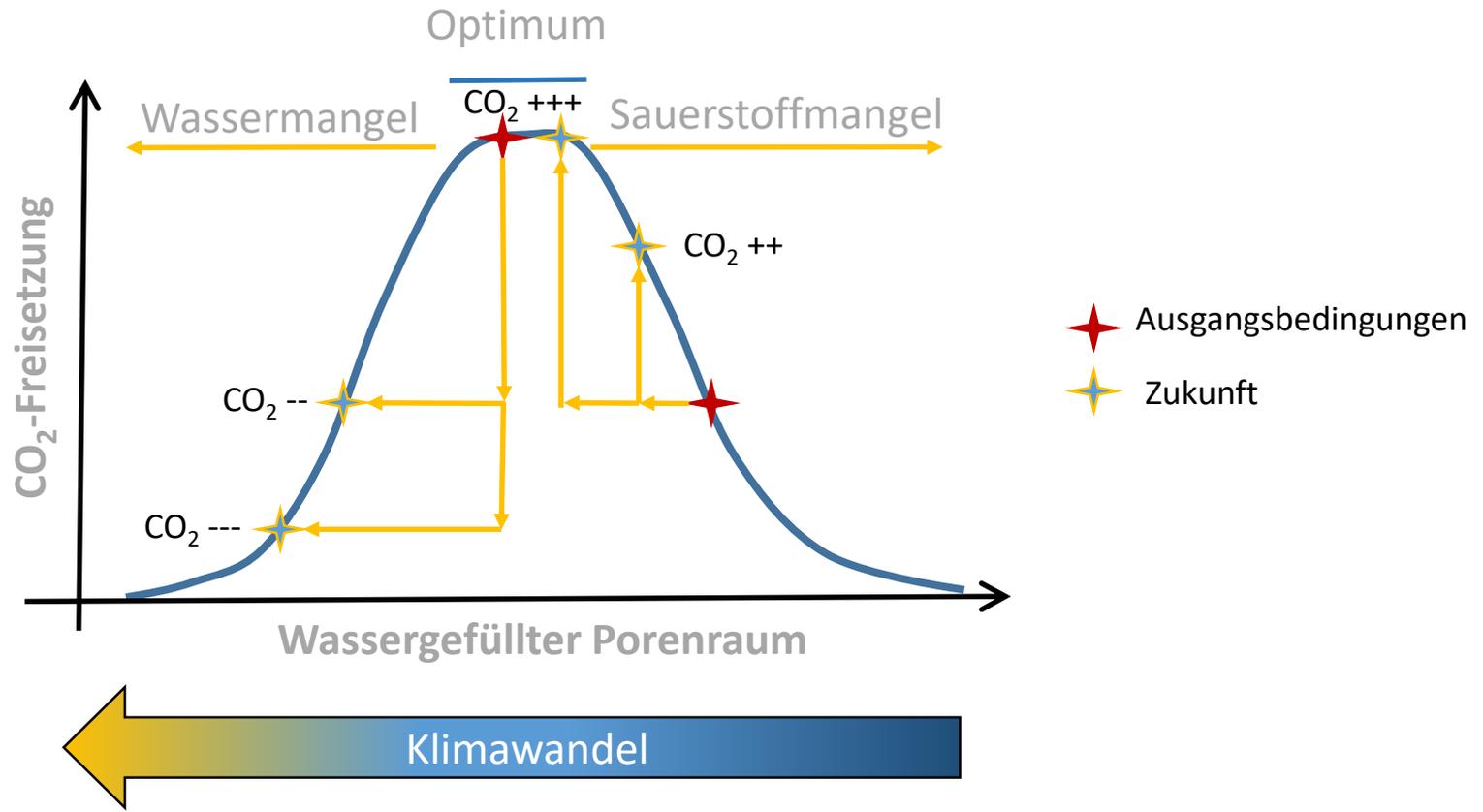
Extrem: Schwarzerde



Extrem: Moore

Was bedeutet das für den Bodenkohlenstoff?

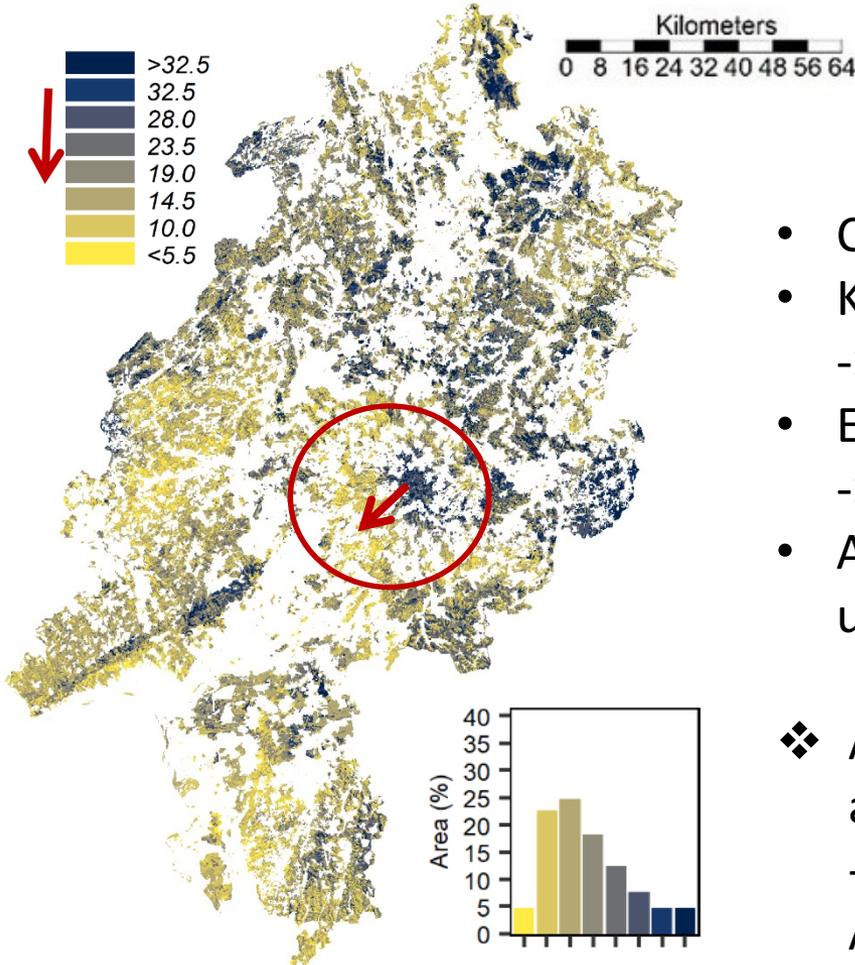
- Höhere Temperatur = mehr CO₂-Freisetzung
- Bodenfeuchte:



Was bedeutet das für den Bodenkohlenstoff?

- Höhere Temperatur = mehr CO₂-Freisetzung, **aber:**
 - ❖ Der am stärksten limitierende Faktor begrenzt dabei die Freisetzung von CO₂
- Bodenfeuchte: je nach Ausgangsbedingungen
 - Bei Verschiebung in den Optimalbereich: Anregung der CO₂-Freisetzung
 - Bei Verschiebung aus dem Optimalbereich: Hemmung der CO₂-Freisetzung
- Optimale Bedingungen von Bodenfeuchte und Temperatur sind im Jahresverlauf häufig verschoben
- Generelle Aussage der Wirkung daher problematisch
- Höhenlagen sind prädestiniert für C-Verlust durch Erwärmung

C-Vorräte in der organischen Auflage

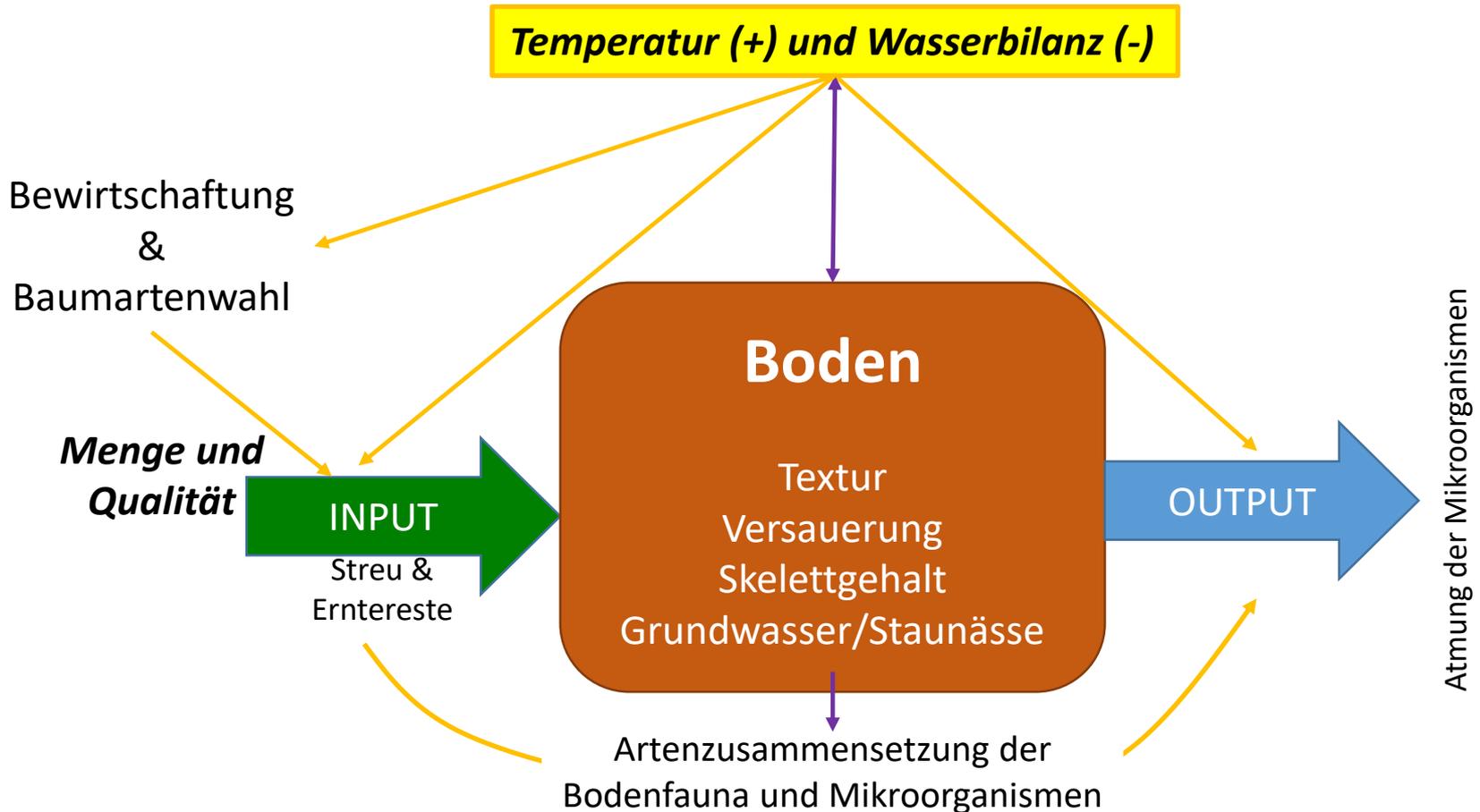


- C-Vorräte in Höhenlagen sind hoch
- Kühle und feuchte Bedingungen
-> suboptimale Abbaubedingungen
- Erwärmung führt zu höherer Verdunstung
-> bessere Abbaubedingungen
- Analogie: Höhenstufen verschieben sich nach unten

❖ Allerdings verbessern sich voraussichtlich auch die Wachstumsbedingungen
-> dies wird wahrscheinlich den erhöhten Abbau nicht kompensieren

Regionalisierte Kohlenstoffvorräte (t ha⁻¹) in der organischen Auflage hessischer Waldböden.

Veränderung der Kohlenstoffvorräte im Boden



Effekt von Baumarten auf Bodenkohlenstoffvorräte

Organische Auflage (Sachsen-Anhalt \emptyset ca. 25 t C/ha)

- Vorräte unter Nadelwald ca. 2 bis 4 mal so hoch wie unter Laubwald. Sachsen-Anhalt: ca. 30 vs. 5-10 t C/ha (Evers et al. 2022)

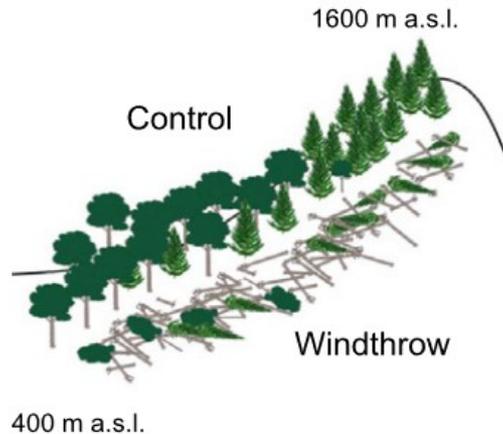
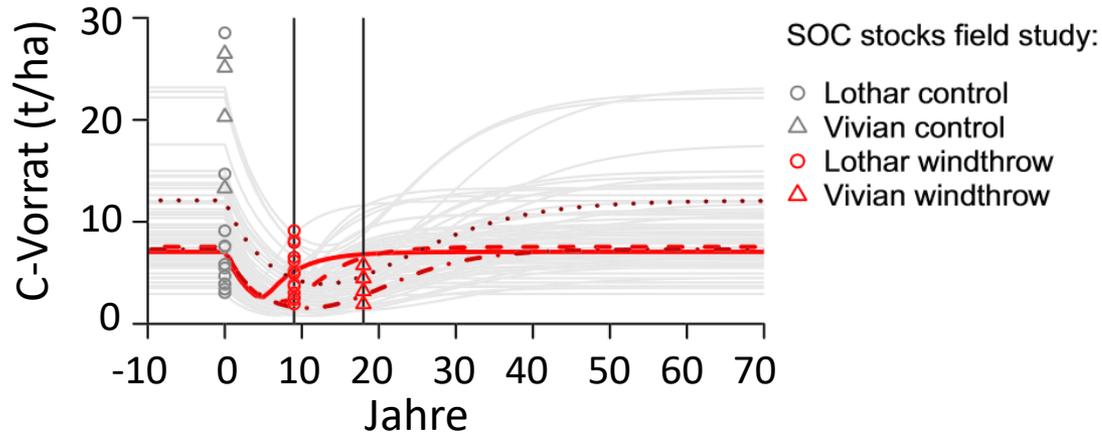
Mineralboden (Sachsen-Anhalt \emptyset ca. 120 t C/ha, 90 cm Tiefe)

- Unter Mischbeständen ca. +10% der Vorräte (bis 50 cm, Rehschuh et al. 2021, Heitkamp et al. 2021).
- Unter Laubwald ca. +10% der Vorräte im Vergleich zu Nadelwald (Metaanalyse, Tiefe je nach Studie; Peng et al. 2021)
- BZE-Daten: Keine Unterschiede über das gesamte Profil (1m, Ausgleich des Befunds in 50-100 cm Tiefe , Heitkamp et al. 2021).
- Insgesamt unsichere Datenlage, da Bestand und Standort abhängig sind

Was bedeutet das für den Boden bei Entwicklung von Nadelwald in Mischwald?

- Vorräte der organischen Auflage werden wahrscheinlich sinken
-> CO₂-Freisetzung
 - Ob dies durch mehr Kohlenstoff im Mineralboden kompensiert wird, ist unsicher
-> Wenn, dann eher langfristig („**slow in – rapid out**“)
 - Humusabbau setzt Nährstoffe frei – Wirkung auf Biomassewachstum und Vitalität???
-
- Zunächst konträr zur gesellschaftlich-politischen Erwartung ansteigender Senkenstärke von Waldökosystemen
 - Auch die Idee einer „temporären Zwischenlösung als biologische Senke“ ist damit für den Waldboden fraglich
 - **Stabile Bestände sind für den Erhalt von Bodenkohlenstoffvorräten entscheidend**

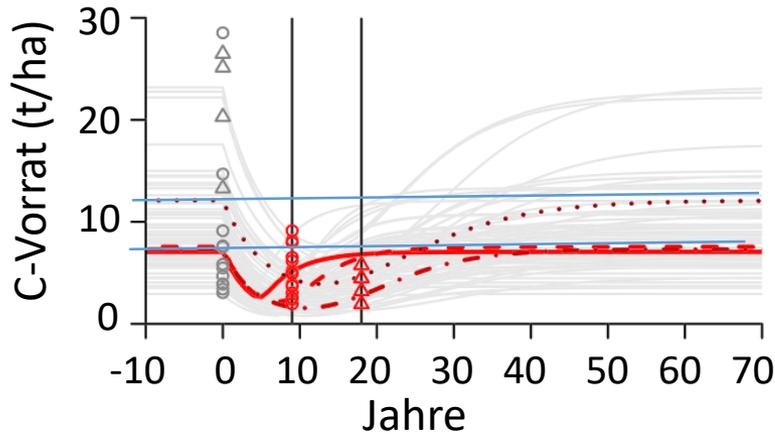
Kalamitäten – Sturmwurf Schweiz



Entwicklung der C-Vorräte im Boden nach Sturmwurf über einen Höhengradienten (400 – 1600 m)

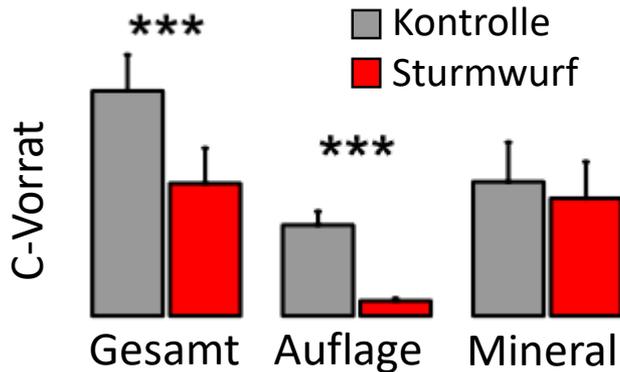
- Schneller Verlust von Kohlenstoff (Minimum nach 5-10 Jahren)

Kalamitäten – Sturmwurf Schweiz



SOC stocks field study:

- Lothar control
- △ Vivian control
- Lothar windthrow
- △ Vivian windthrow



Entwicklung der C-Vorräte im Boden nach Sturmwurf über einen Höhengradienten (<500 – 1500 m)

- Schneller Verlust von Kohlenstoff (Minimum nach 5-10 Jahren)
- Langsame Regeneration: nach 20-50 Jahren ist Ausgangszustand nur annähernd erreicht
- **Slow in – rapid out!**

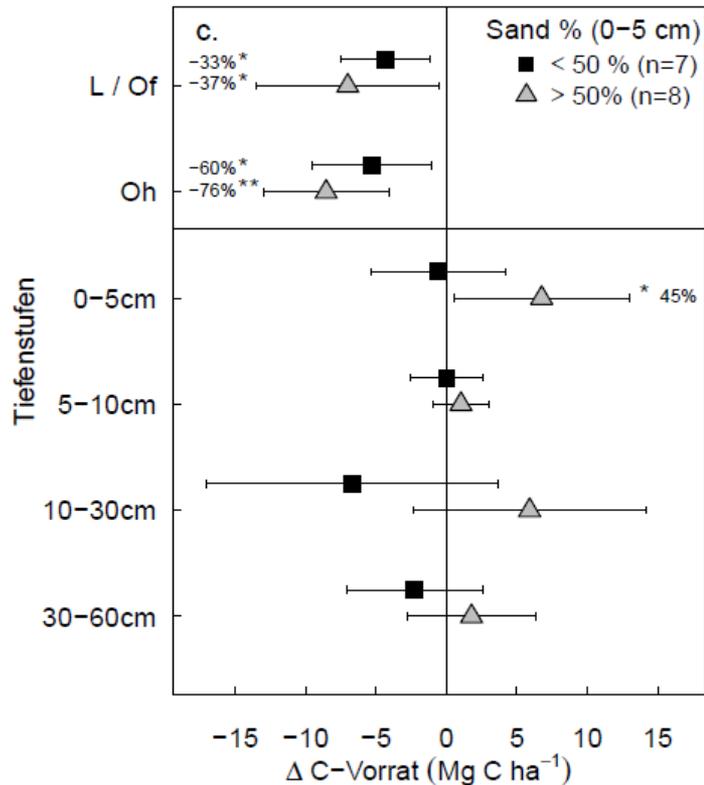
Mineralboden kaum betroffen – starke Verluste in der organischen Auflage

➤ **Auflagehumus ≠ verlässliche Senke**

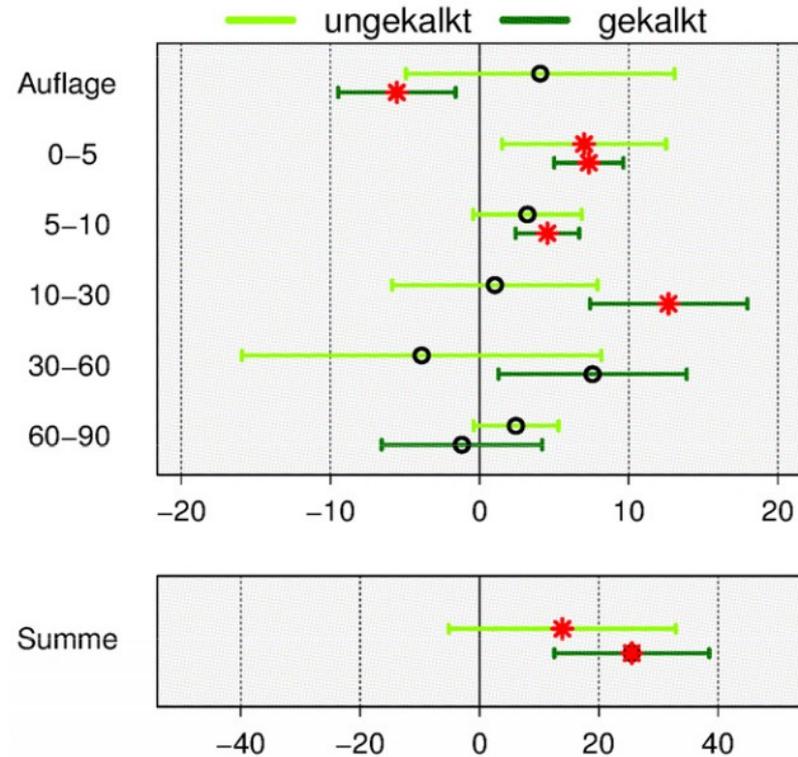
Zwischenfazit

- Biologische Senken sind endlich und reversibel
 - **Slow in – rapid out**
 - Wirkung von höheren Temperaturen und weniger Wasserverfügbarkeit sind standortabhängig
-> Höhenlagen sind besonders gefährdet
 - Entwicklung von Nadelholz -> Laubholz wird wahrscheinlich zunächst C-Verluste aus der organischen Auflage verursachen
 - Die organische Auflage ist keine verlässliche Senke und extrem anfällig gegenüber Kalamitäten (Sturm, Feuer, etc.)
- Verluste in der Humusaufgabe zugunsten stabilerer organischer Substanz sind auch eine Risikovorsorge

Bodenschutzkalkung – Gewinne im Mineralboden?



Differenz von Kontrolle zu gekalkter Parzelle, differenziert nach Sandgehalt. Ergebnisse aus langjährigen Kalkungsversuchen.



Differenz von C-Vorräten (t/ha) im Boden zwischen BZE I und BZE II, getrennt nach gekalkten und ungekalkten Standorten (Niedersachsen)

Entwicklung der C-Vorräte im Boden, Sachsen-Anhalt

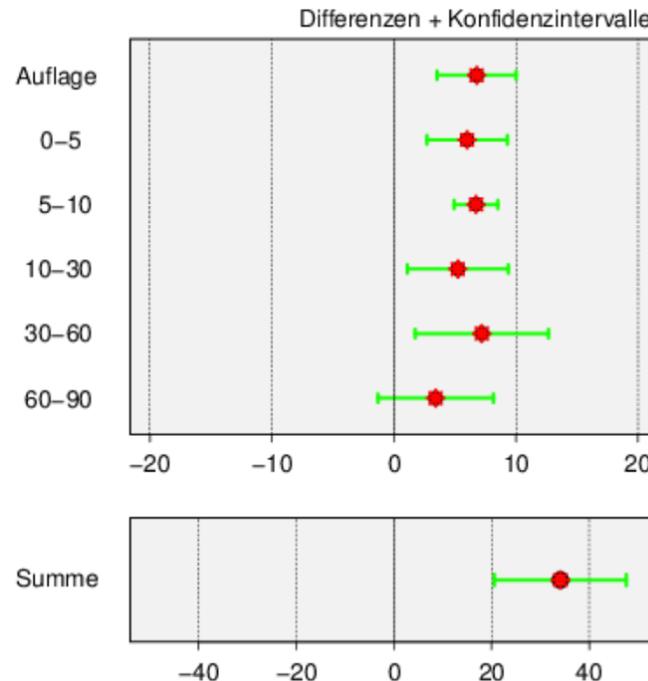


Entwicklung der Kohlenstoffvorräte BZE I und BZE II (1993 – 2007)

BZE: Bodenzustandserhebung

Entwicklung der C-Vorräte im Boden, Sachsen-Anhalt

- Sehr starker Anstieg der Vorräte um $\bar{\Delta}$ 34 t/ha (+40%) auf 130 t/ha in 15 Jahren
- Entspricht einer Zunahme von ca. 2,5 t/ha*Jahr (Deutschland: 0,3 – 0,7 t/ha*Jahr)!



Entwicklung der C-Vorräte im Boden, Sachsen-Anhalt

- Sehr starker Anstieg der Vorräte um \emptyset 34 t/ha (+40%) auf 130 t/ha in 15 Jahren
- Entspricht einer Zunahme von ca. 2,5 t/ha*Jahr (Deutschland: 0,3 – 0,7 t/ha*Jahr)!
- Die Zunahme unter 30 cm Tiefe ist unrealistisch und vermutlich auch methodisch bedingt:

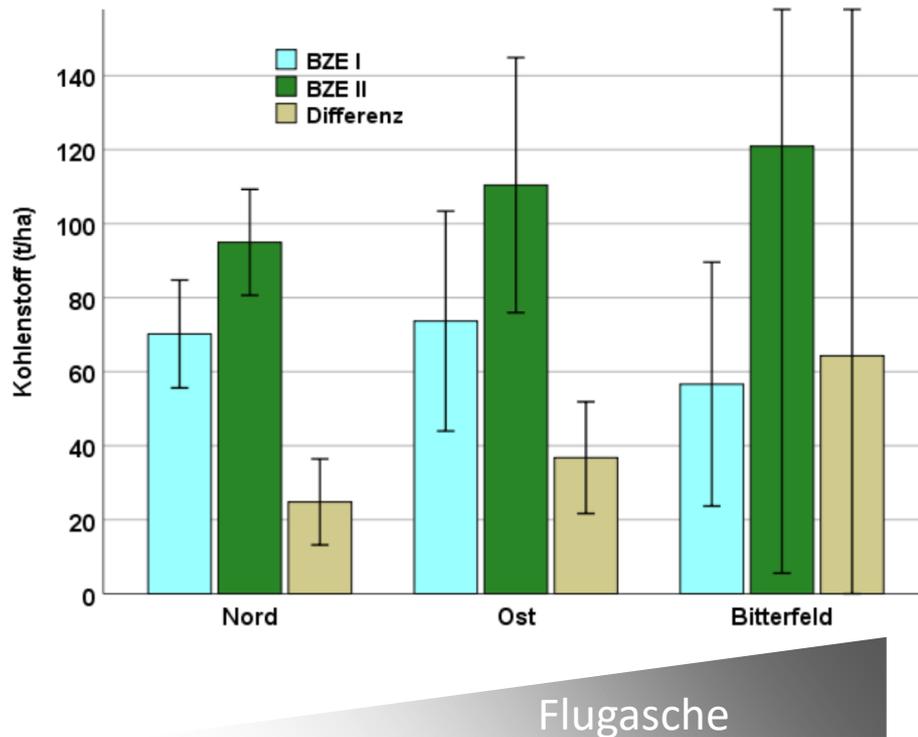
BZE I: nasse Veraschung – problematisch bei geringen C-Gehalten, erfasst kein „Black Carbon“ (aus Ruß/Kohle)

BZE II: Elementar Analysator erfasst C-Gehalte komplett

- Berücksichtigung der Veränderung bis 30 cm Tiefe: Anstieg von ca. 1,5 t/ha*Jahr (immer noch Einfluss der Flugaschen enthalten)

Konsequenz der methodischen Unterschiede

- Abschätzung der Entwicklung der C-Vorräte sehr unsicher
- Je nach Beeinflussungsgrad mit Flugasche standörtlich sehr unterschiedlich



Konsequenz der methodischen Unterschiede

- Abschätzung der Entwicklung der C-Vorräte sehr unsicher
 - Je nach Beeinflussungsgrad mit Flugasche standörtlich sehr unterschiedlich
-
- Abwarten der Ergebnisse der BZE III mit vergleichbarer Methodik
 - Lesen Sie vor der Beschäftigung mit Bodenkohlenstoff in Sachsen-Anhalt den Waldzustandsbericht (Evers et al., 2022), Kapitel 7 (S. 234)

7 Flugasche, Düngung, Waldkalkung und Bodenbearbeitung

Jan Evers, Bernd Abrends

Diskussion: Maßnahmen

Mischbestände	Bodenbearbeitung
Kalkung	Flächenräumung
Waldmoorrevitalisierung	Stubbentnahme
	Vollbaumernte

Vielen Dank für Ihr Interesse!

Moorrevitalisierung

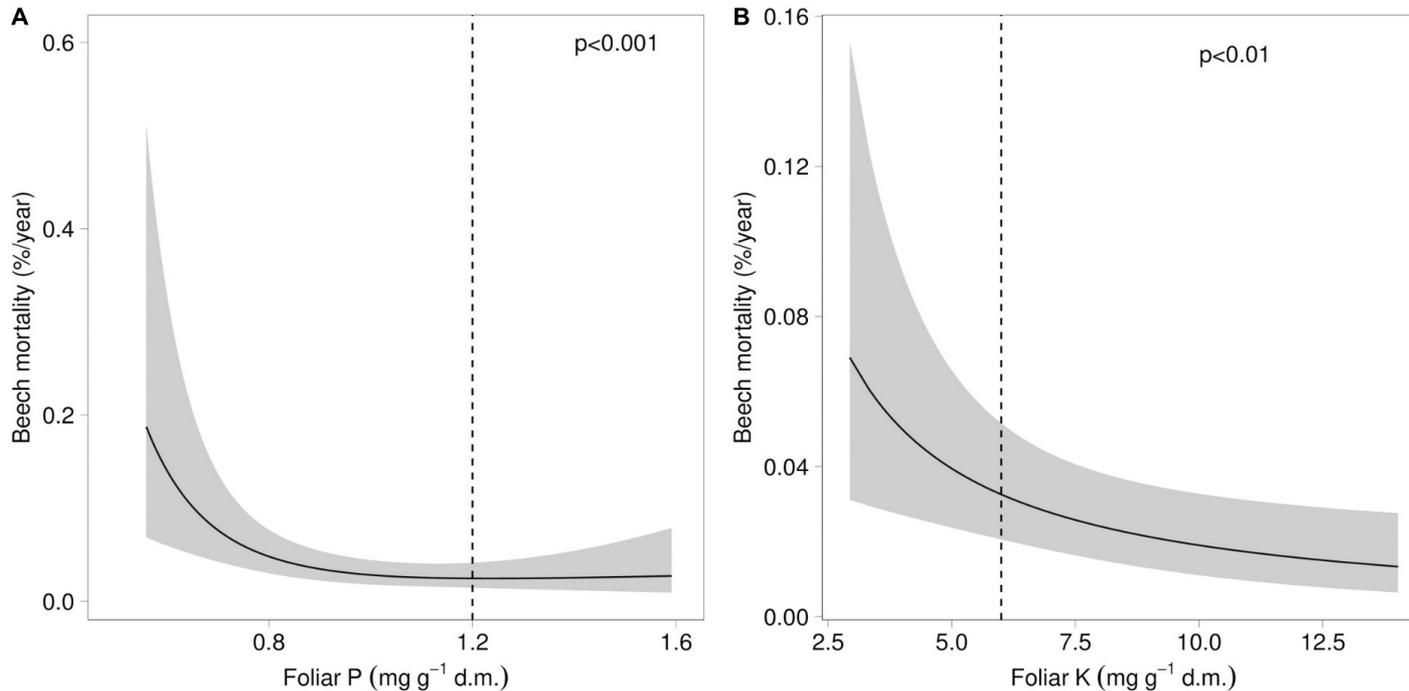
- Großes Thema in der Landwirtschaft
 - Drainierte Moore als CO₂-Quelle
3 bis 7 t C / ha an Verlusten pro Jahr
47 Mio t CO₂-Äquivalente pro Jahr (5,4% der Emissionen!)
 - Intakte Moore: Speicherraten von 0 bis 1 t C / ha*Jahr (also weniger als derzeit Waldökosysteme)
 - Bei gut durchgeführter Wiedervernässung 1 bis 4 t C/ha*Jahr an Aufnahme
-
- Vor allem im Staatsforst vergleichsweise* einfach durchzuführende Maßnahme
 - Reduzierung einer Treibhausgasquelle, ggf. sogar mit Senkenwirkung

*im Vergleich zu landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Klärung von Entschädigungen etc.

Bodenbearbeitung, Flächenräumung, Vollbaumnutzung

- Störung der Bodenstruktur: Beschleunigung der Mineralisierung („Output“) und je nach Methode auch:
 - Entzug organischer Substanz („Input“) von der Fläche
 - Wälle und Haufenbildung vermeiden: kein Kontakt mit mineralischer Bodensubstanz -> fehlende Stabilisierungsmechanismen
 - Entzug von Nährstoffen -> Wachstum der Bestände und Resilienz und Resistenz gegen Trockenheit beeinträchtigt
- Vermeidung auf mittleren und insbesondere ziemlich armen Standorten
- Bei Dokumentation einmalig auf kräftigen und reichen Standorten u.U. akzeptabel

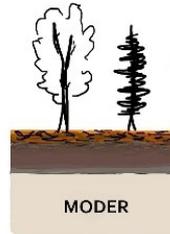
Mortalität und Ernährung



Zusammenhang von Mortalität und P bzw. K Ernährung von Buchen (Schweiz).
Mortalitätspeak 2019: 0,5%

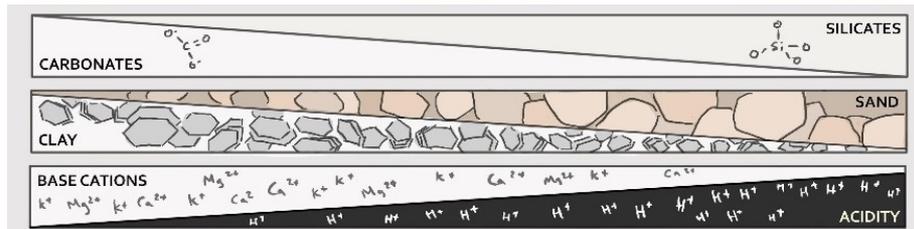
Stabilität organischer Substanz – Streuqualität und Standort

Eher Laubwald



Eher Nadelwald

Basenreich
Lehmig - tonig



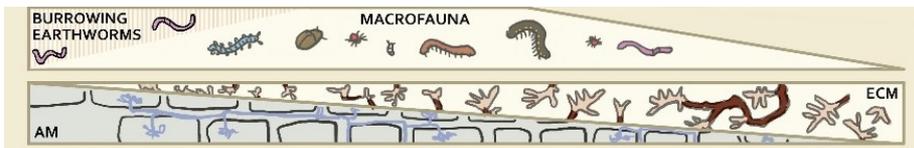
Basenarm
Sandig

Streu: leicht umsetzbar
C als Mikrobenreste



Streu: schwer umsetzbar
C als Pflanzenreste

Aktive Fauna &
Bioturbation



Wenig aktive Fauna &
Anreicherung als Auflage

Stabile organische Substanz
(wenig organische Auflage
und mineralassoziierte
Organik im Mineralboden)



Labile organische Substanz
(organische Auflage und
partikuläre Organik im
Mineralboden)

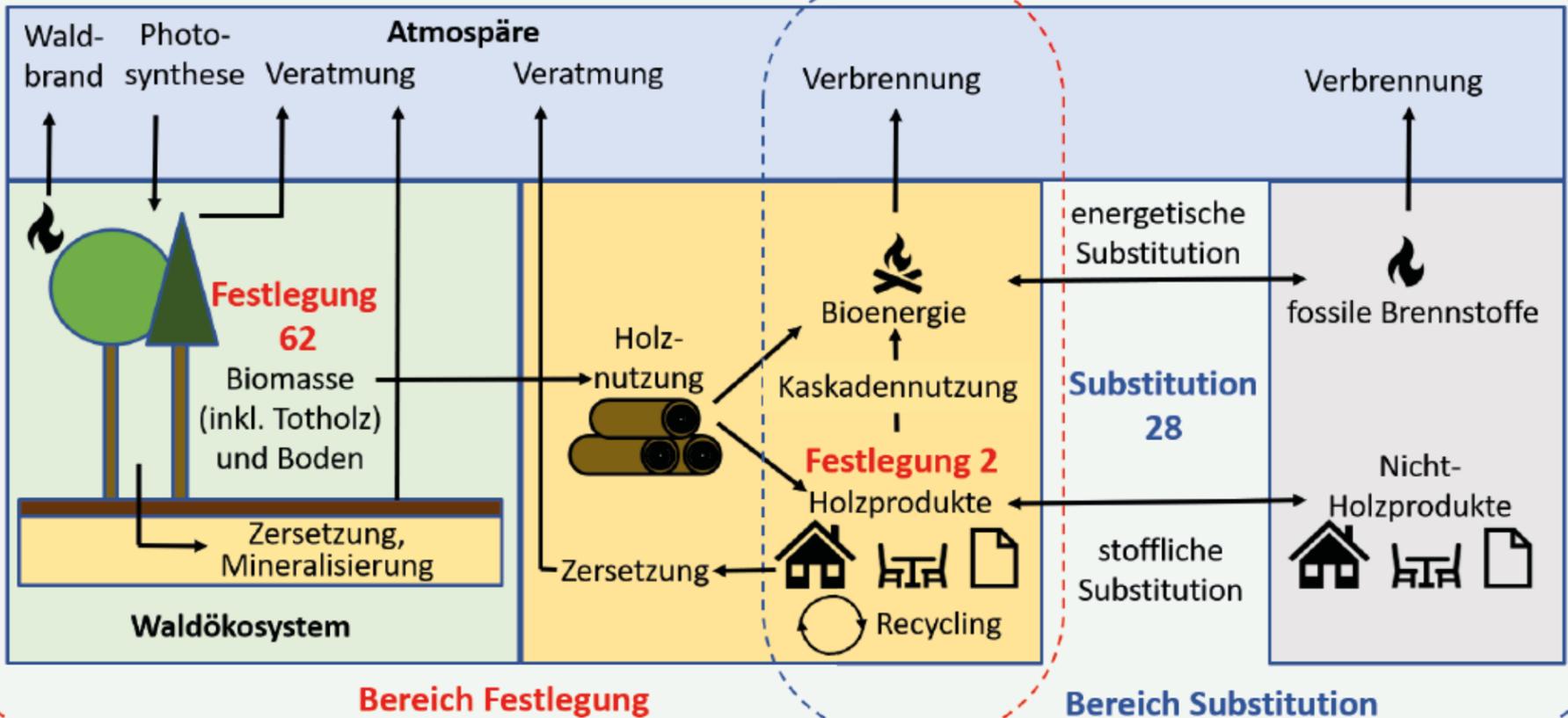
Dekaden –
Jahrhunderte? Umsatzzeit Dekaden?

Was bedeutet das für den Bodenkohlenstoff?

- Klima ist ein wichtiger Faktor, **aber:**
 - ❖ Standort und Bestockung sind entscheidende Modifikatoren
- **Sandige** und **saure** Böden: Anreicherung von relativ **schnell umsetzbarer** organischer Substanz. Vor allem unter Nadelwald Bildung mächtiger Auflagehorizonte (Moder/Rohhumus)
- Ausnahmen bestätigen die Regel: Heidenutzung / starke Podsolierung kann zu sehr stabilen Aluminium-Humus Komplexen führen
- **Lehmige** und **basenreiche** Böden: **Stabilisierung** durch die mineralische Matrix („Ton-Humus-Komplexe“). Vor allem unter Laubwald kaum Auflagehorizonte (Mullhumus)
 - Nicht nur die Vorräte, auch Eigenschaften der organischen Substanz müssen berücksichtigt werden
 - Verluste in der Humusaufgabe zugunsten stabilerer organischer Substanz sind auch eine Risikovorsorge

Forstlich relevante Sektoren

Klimaschutzbilanz Wälder und nachgelagerter Holzverwendung in Deutschland:
C-Festlegung und **C-Emissionsminderung durch Substitution** [Mio. t CO₂-Äquivalente pro Jahr]



Gesamtbilanz Deutschland: Festlegung + Substitution = 92 Mio. t CO₂-Äquivalente pro Jahr

Literatur

- Bolte et al. (2021): Fakten zum Thema: Wald und Klimaschutz. AFZ-DerWald 11, 12-15
- Braun et al. (2021): 37 Years of Forest Monitoring in Switzerland: Drought Effects on *Fagus sylvatica*. *Frontiers in Forests and Global Change* 4
- Dietz K.-J. (2021): Der Kohlenstoffkreislauf im globalen Wandel: Über den Beitrag der Biomasse zur Nachhaltigkeit. *Biologie unserer Zeit* 51, 38-45
- Evers et al. (2019) Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen. Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 19. Universitätsverlag Göttingen. 498 S
- Evers et al. (2022): Waldbodenzustandsbericht für Sachsen-Anhalt. Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Universitätsverlag Göttingen. 456 S
- Grüneberg E. et al. (2019): Carbon Stocks and Carbon Stock Changes in German Forest Soils. In: Wellbrock N. & Bolte A.: Status and Dynamics of Forests in Germany : Results of the National Forest Monitoring, 167-198
- Heitkamp F. et al. (2021): Spatial 3D mapping of forest soil carbon stocks in Hesse, Germany. *Journl of Plant Nutrition and Soil Science* 184, 635-656
- Huber M., Kirchmeir H., Fuchs A. (2021): Die Rolle des Waldes im Klimaschutz – Wie wird unser Wald klimafit? Studie im Rahmen von Mutter Erde, Bearbeitung: E.C.O. Institut für Ökologie, Klagenfurt, 105 S
- Jungkunst H. F. et al. (2012): Accounting More Precisely for Peat and Other Soil Carbon Resources. In: Lal R. et al.: Recarbonization of the Biosphere: Ecosystems and the Global Carbon Cycle. 127-157
- Körner C. (2003): Slow in, Rapid out - Carbon Flux Studies and Kyoto Targets. *Science* 300, 1242-1243
- Mayer M. et al. (2023): Elevation dependent response of soil organic carbon stocks to forest windthrow. *Science of the Total Environment* 857, 159694
- Peng Y. et al. (2021): Tree species effects on soil carbon stock and concentration are mediated by tree species type, mycorrhizal association, and N-fixing ability. *Forest Ecology and Management* 478, 118510
- Prescott C., Vesterdal L. (2021): Decomposition and transformations along the continuum from litter to soil organic matter in forest soils. *Forest Ecology and Management* 498, 119552
- Rehschuh S. et al. (2021): Impact of European Beech Forest Diversification on Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Stocks–A Meta-Analysis. *Frontiers in Forests and Global Change* 4
- Riedel T et al. (2019): Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsенke. AFZ-DerWald 14, 14-18
- Tanneberger F. et al (2021): Towards net zero CO₂ in 2050: An emission reduction pathway for organic soils in Germany. *Mires and Peat* 27, 1-17
- van Straaten O. et al. (2023): Forest liming in the face of climate change: the implications of restorative liming for soil organic carbon in mature German forests. *SOIL* 9, 39-54