



Photo: K. Nätke



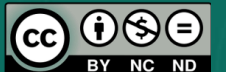
Forstliche Versuchs-  
und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg

# Kohlenstoffbilanzierung für die Level-II- Intensivmessflächen Baden-Württembergs – erste Schritte zur Bewertung ökosystemarer Prozesse in typischen Waldökosystemen

Kerstin Nätke, Andrea Hölscher, Peter Hartmann, Heike Puhlmann

*Kohlenstoff-Tagung Göttingen 12.-14. März 2025*

© 2025 by FVA Baden-Württemberg/Kerstin  
Nätke is licensed under CC BY-NC-ND 4.0



# Einleitung

## Kohlenstoffbilanzierung in Waldökosystemen

- Bilanzierung: zentraler Ansatz für Bewertung Dynamik von Stoffvorräten / stoffliche Entwicklung
- bedeutende Speicher für C: oberirdische Biomasse und Boden
- (langfristige) Speicherung oder Abgabe?

→ Vergleich **Einträge** mit **Austrägen**

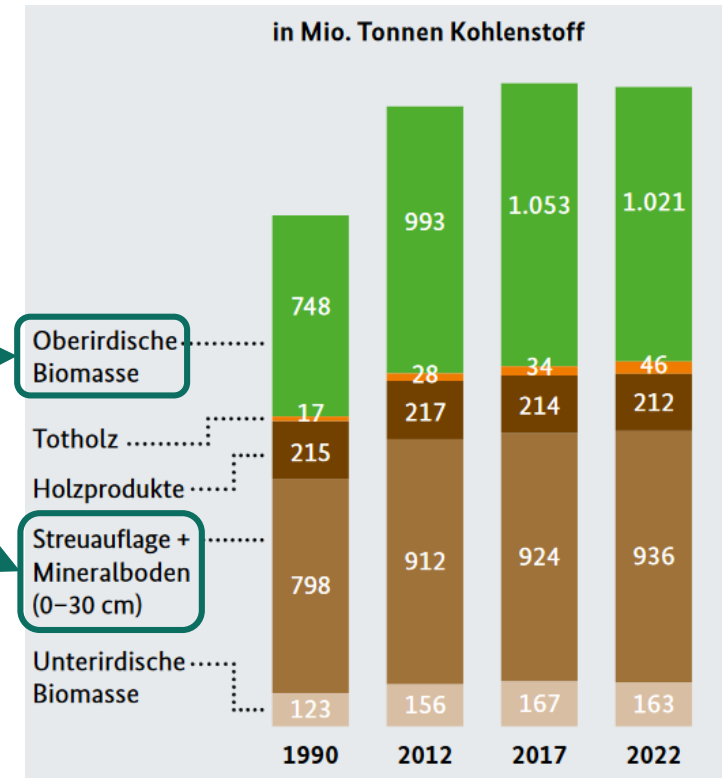
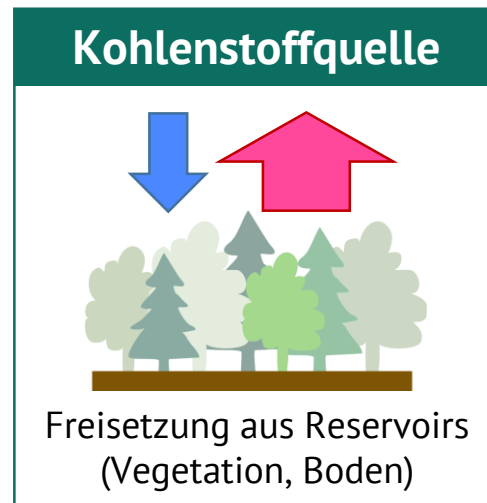
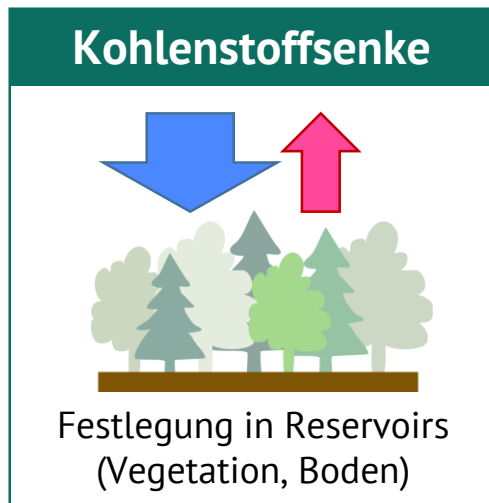


Abb.: Kohlenstoffvorräte (Mio. Tonnen) in Wald und Holzprodukten in Deutschland von 1990 bis 2022 (BMEL 2024 – Vierte Bundeswaldinventur, S. 46, Ausschnitt).

- für genauere Abschätzung Quell- und Senkenfunktion:  
→ **Zusammenhängende Betrachtung der Bilanzterme** in der Kohlenstoffdynamik notwendig

Janssens *et al.* 2003, Siemens 2003, Kindler *et al.* 2010, Hansson *et al.* 2013, Oulehle *et al.* 2016, Yu *et al.* 2024

## Eintrags-Bilanzterme

- Niederschlag/Deposition
- Photosynthese
- Oberirdische/unterirdische Streu
- Wurzelexudate
- Verwitterung
- etc.

## Austrags-Bilanzterme

- Photorespiration, Bodenatmung
- Auswaschung
- Adsorption/ Immobilisierung
- Bodenerosion
- Abfluss
- etc.

$C_{org}$   
 $CO_2/CH_4$   
DOC/POC

**DOC** - dissolved organic carbon,  $<0.45 \mu m$

**POC** - particulate organic carbon,  $0.45 - \sim 500 \mu m$

DOC + POC = **TOC** (total organic carbon)

### Einflussfaktoren:

- Klima
- Standort
- Vegetation
- Störungen
- **Totholz**
- etc.



Poster #31:  
Lisa Rubin - TotC-  
Projekt

# Datengrundlage | Standorte

## Daten der FVA Baden-Württemberg 6 Standorte

### Hauptbodentypen,-textur, -humusform:

Braunerde, Pseudogley  
mit C/N 14 – 26, pH (CaCl<sub>2</sub>, 0-30 cm) 3,1 – 4,1  
sandig, lehmig  
Moder, Mull  
mit C/N 20 – 30, pH (CaCl<sub>2</sub>) 2,8 – 4,6

### Höhenlage:

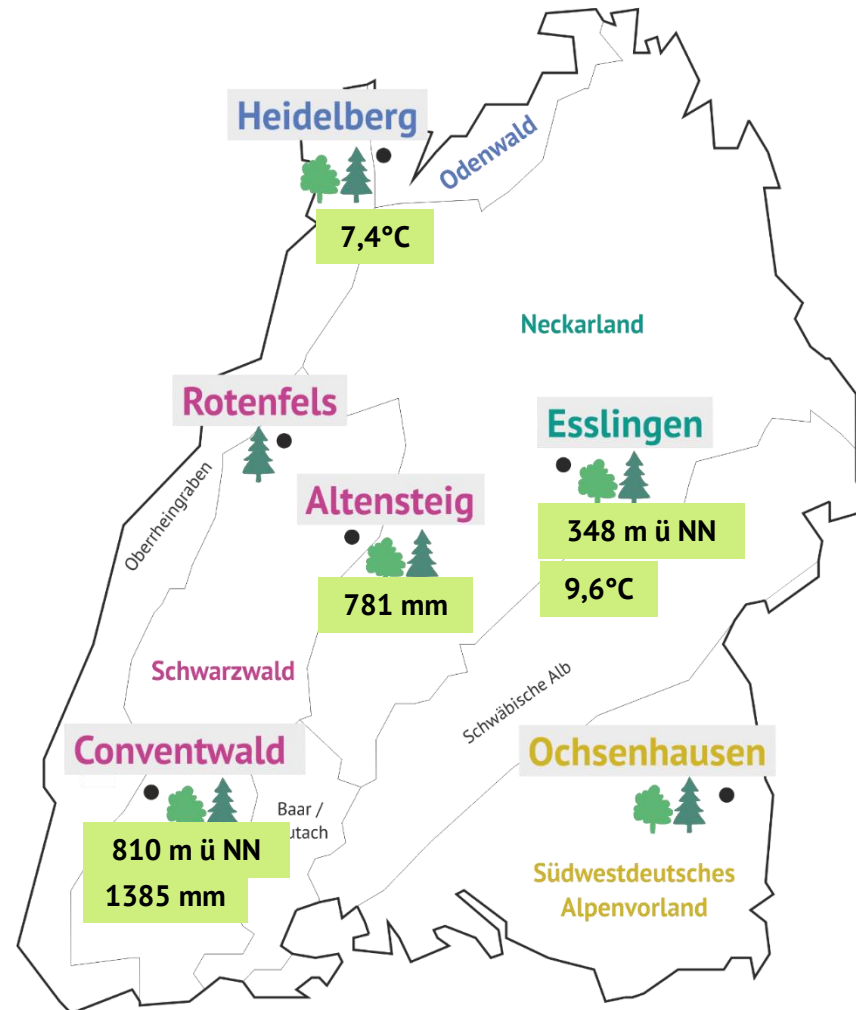
348 – 810 m üNN

### mittlere jährliche Niederschlagshöhe:

781 – 1385 mm

### mittlere Durchschnittstemperatur:

7,4 – 9,6°C



### Hauptbaumarten:

- Buche**  
(*Fagus sylvatica* L.)  
Alter: 88 - 134 Jahre  
Messung seit 2010  
n = 5
- Fichte**  
(*Picea abies* (L.) H.KARST.)  
Alter: 104 - 144 Jahre  
Messung seit 1998  
n = 6

inkl. Freifläche (Messturm)

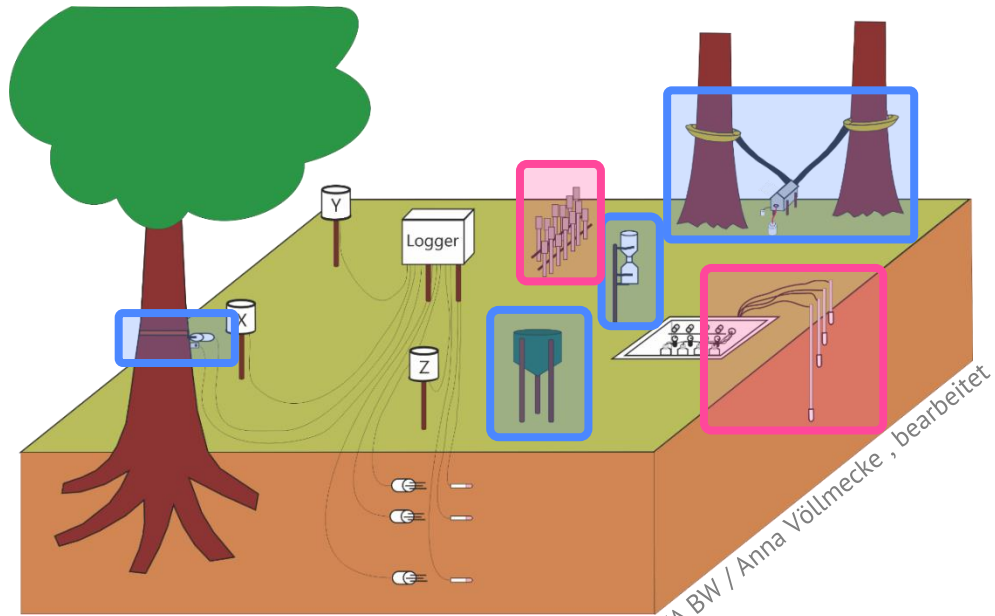
Entwicklung in Mischbestände mit u.a. Tanne, Eiche, Roteiche, Kiefer, Douglasie

Bu- und Fi-Flächen eines Standortes liegen in unmittelbarer Nähe zueinander

Abb.: Level II Flächen in Baden-Württemberg inkl. Wuchsgebiet.  
(FVA BW/ Abteilung BU, bearbeitet).

- Standorte/Flächen als Level II-Flächen definiert
- **Level II:** zeitlich und räumlich hochaufgelöstes Umweltmonitoring → Zusammenhänge Ursache-Wirkung [ICP Forests = internationales Kooperationsprogramm Wälder]

# Flächendesign | Datenerhebung | Bilanzterme



0,25 ha  
Buchen- und Fichtenflächen

### weitere Messgrößen:

Bodenmeteorologie	Nadel- und Blattanalysen
Meteorologie	Bodenvorräte
Phänologie	Vegetation
Kronenzustand	Totholz-CO <sub>2</sub> -Veratmung



**Freilandniederschlag**

2 Wo  
n = 3  
Vol, Konz  
DOC-Fluss



**Kronendurchlass**

2 Wo  
n = 15  
Vol, Konz  
DOC-Fluss



**Stammabfluss (Buche)**

2 Wo  
n = 2-3  
Vol, Konz  
DOC-Fluss  
*Kronenraum-Bezug*



**Streufall**

mehrmals pro Jahr  
n = 16  
Gewicht, Gehalt  
C-Gehalt  
*keine Streutrennung*



**BHD/ Baumhöhe**

jährlich/alle 5 Jahre  
(Vollaufnahme)  
alle Baumarten  
für Biomassezuwachs  
TapeS R-Package  
(**C. Vonderach FA**, **E. Kublin**, **G. Kändler**)



**Sickerwasser**

2 Wo  
Saugkerzen in  
0, 15, 30, 60 cm  
n = 3 pro Tiefenstufe  
mod LWF Brook90  
(**R. Habel FA**)  
DOC-Fluss



**Bodenatmung**

4 Wo  
passive Gassammler  
(bis 10 cm Bodentiefe)  
CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>-Flüsse  
ConFluxPro R-Package  
(**V. Gartiser FA**)  
SaMS Projekt (**V. Lang FA**)

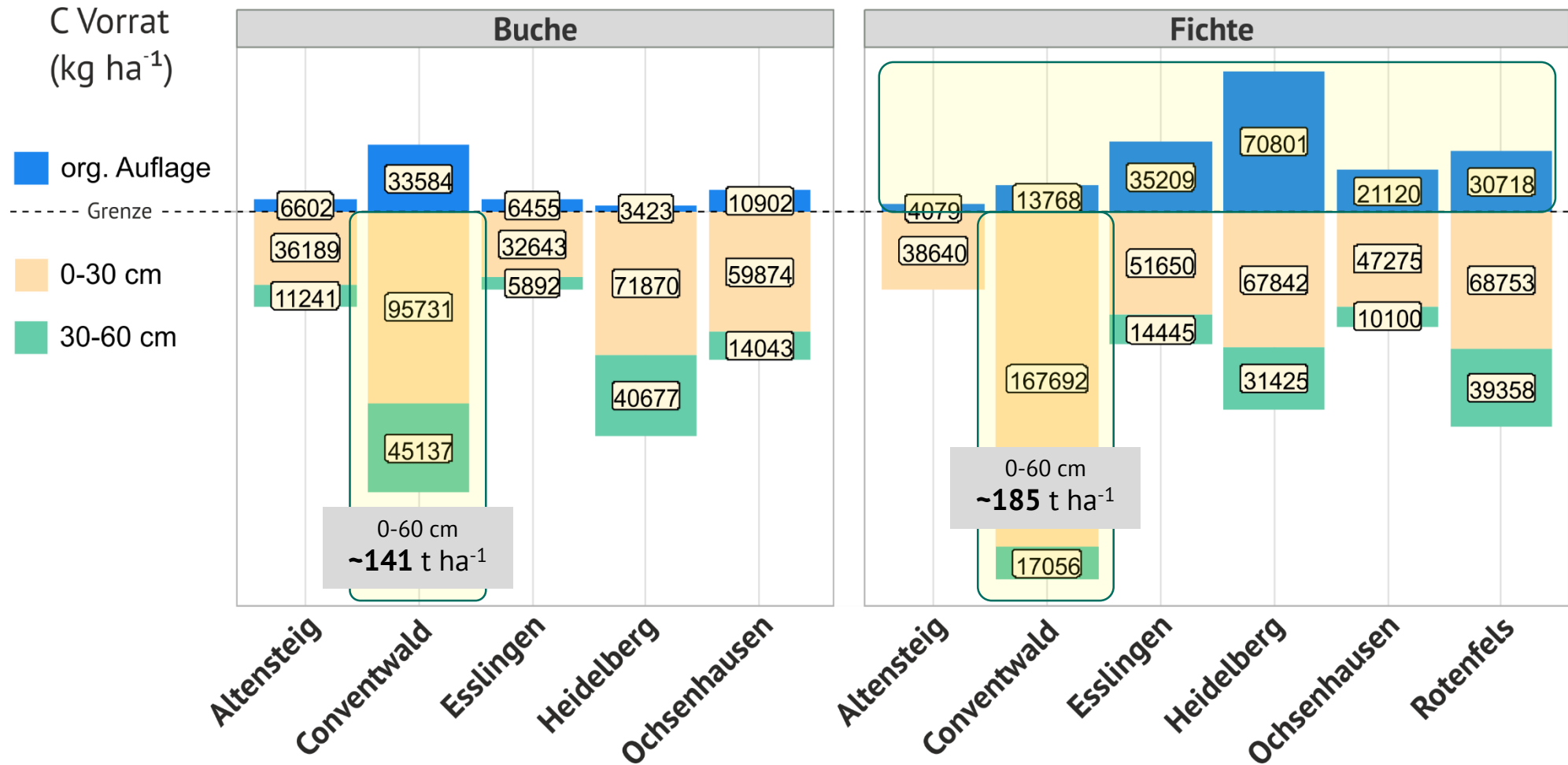


1) Wie viel  $C_{org}$  ist im **Waldboden gespeichert?**

2) In welcher Größenordnung liegen die **Bilanzen im Zeitraum 2012-2022?**

3) Reicht die Betrachtung von DOC als Bilanzterm aus oder muss **POC berücksichtigt** werden?

# 1. Kohlenstoffspeicherung im Boden



Erhebung der Bodendaten:  
2012/ 2013/ 2014



Poster #44:  
Peter Jost –  
Bodenmonitoring  
BWI Vergleich

# 2. Größenordnung der Bilanzen

vorläufige Ergebnisse

Mittelwerte (kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ) (aufgerundet, ohne Streuung) 2012-2022	Altensteig		Conventwald		Esslingen		Heidelberg		Ochsenhausen		Rotenfels
Kronendurchlass	43	86	90	101	59	82	45	91	46	96	82
Stammabfluss	3		6		4		4		5		
Streufall oberirdisch	3017	2850	2228	2614	3206	2314	2607	2212	3099	2784	727
Biomassezuwachs oberirdisch	3274	2194	1647	3497	3086	3128	4110	1536	2853	3342	1901
<b>Σ Einträge</b>	<b>6337</b>	<b>5131</b>	<b>3970</b>	<b>6212</b>	<b>6354</b>	<b>5523</b>	<b>6766</b>	<b>3839</b>	<b>6003</b>	<b>6222</b>	<b>2710</b>
Bodenvorräte (kg ha <sup>-1</sup> ) (Σ org. Auflage bis 30 cm)	42791	42719	129315	181460	39098	86859	71870	138643	70776	68395	99470
Sickerwasser (30 cm)	19	31	18	72	16	78	2	72	8	18	96
CO <sub>2</sub>	7293	7052	3476	4731	4883	3061	5945	3868	10332	3559	1558
CH <sub>4</sub>	-10	-8	-12	-7	-5	-5	-6	-7	-9	-3	-2
<b>Σ Austräge</b>	<b>7302</b>	<b>7075</b>	<b>3482</b>	<b>4796</b>	<b>4895</b>	<b>3135</b>	<b>5942</b>	<b>3934</b>	<b>10331</b>	<b>3574</b>	<b>1651</b>
<b>Speicherung + Bilanz</b>	<b>-965</b>	<b>-1944</b>	<b>+489</b>	<b>+1415</b>	<b>+1459</b>	<b>+2389</b>	<b>+824</b>	<b>-94</b>	<b>-4328</b>	<b>+2648</b>	<b>+1059</b>
<b>Freisetzung -</b>											

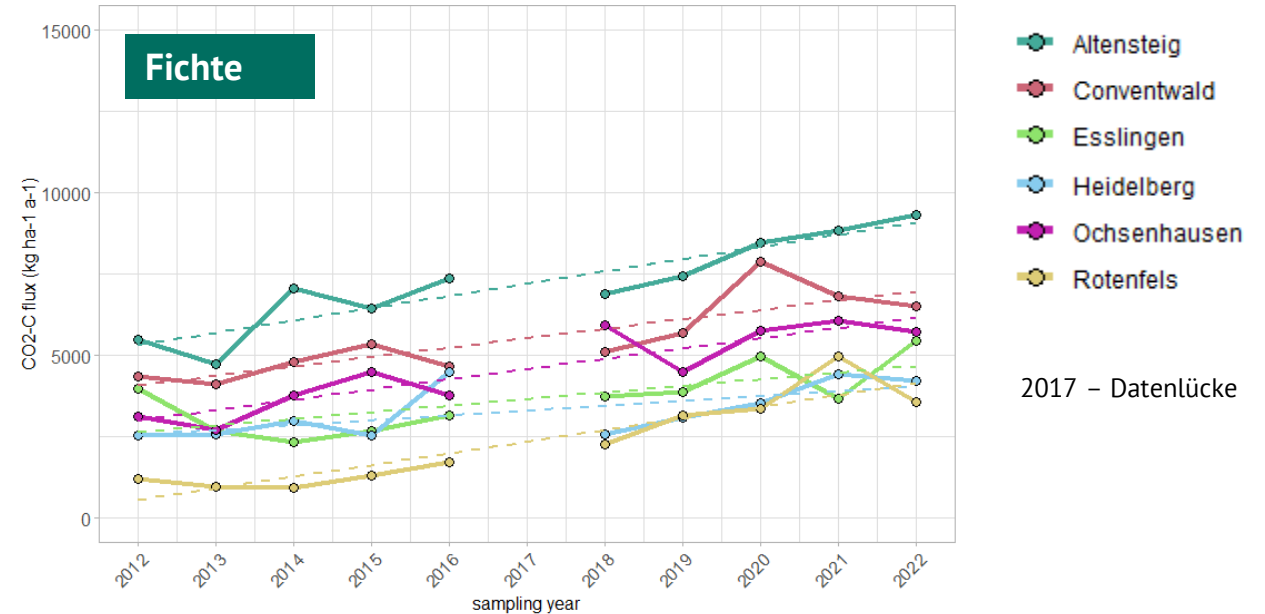
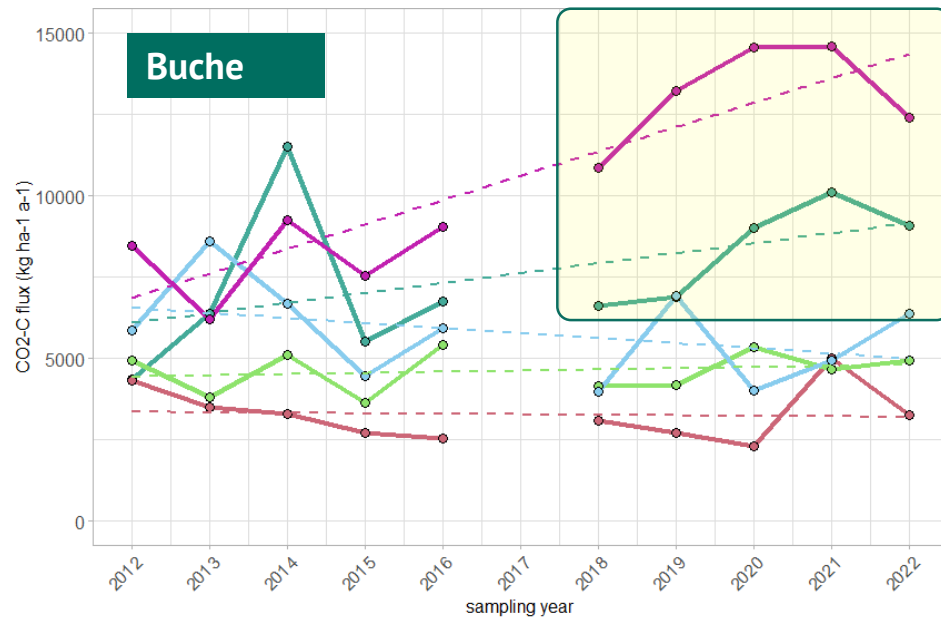
**Einträge** ähnlich (~5000 – 7000 kg C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>)  
für 8 von 11 Flächen  
→ Mastjahre, Pollendeposition, Trockenjahre, Sturmereignisse

**Austräge** sehr hohe Variabilität (~2000 – 10000 kg C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>)  
→ hohe Variabilität der CO<sub>2</sub>-Austräge spiegelt sich in Bilanzen wider



# → Austragspfad: CO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub>-C Jahressummen [kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>], 2012 – 2022



- Buchenflächen: keine Hinweise auf Störungen

512 m üNN	680 m üNN
Ø 8,6°C	Ø 8,5°C
Ø 1111 mm	Ø 817 mm

→ pseudovergleyte Standorte

## hoher Kohlenstoffumsatz:

- wechselfeuchte Bedingungen → Beschleunigung von Abbau organischer Substanz in Kombination mit wärmeren Temperaturen ?
- Ökosystemzustand, LAI, Verjüngung, Entwicklung in Mischbestände, Totholz ?
- Nährstoffversorgung ?

# 2. Größenordnung der Bilanzen

vorläufige Ergebnisse

Mittelwerte (kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>)  
(aufgerundet, ohne Streuung)  
2012-2022

	Altensteig		Conventwald		Esslingen		Heidelberg		Ochsenhausen		Rotenfels
Kronendurchlass	43	86	90	101	59	82	45	91	46	96	82
Stammabfluss	3		6		4		4		5		
Streufall	3017	2850	2228	2614	3206	2314	2607	2212	3099	2784	727
Biomassezuwachs oberirdisch	3274	2194	1647	3497	3086	3128	4110	1536	2853	3342	1901

**Einträge**

**-Bodencharakteristika (Bodentyp, Textur, Substratverfügbarkeit, Feuchteregime, pH-Wert)**

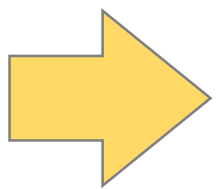
**-Höhenlage → Temperatur, Niederschlag**

**-Bestandeseigenschaften → Alter, Verjüngungszustand, Ökosystemproduktivität**

Bodenvorräte (kg ha<sup>-1</sup>)  
(Σ org. Auflage bis 30 cm)

Sickerwasser (30 cm)

CO <sub>2</sub>	7293	7052	3476	4731	4883	3061	5945	3868	10332	3559	1558
CH <sub>4</sub>	-10	-8	-12	-7	-5	-5	-6	-7	-9	-3	-2
<b>Σ Austräge</b>	<b>7302</b>	<b>7075</b>	<b>3482</b>	<b>4796</b>	<b>4895</b>	<b>3135</b>	<b>5942</b>	<b>3934</b>	<b>10331</b>	<b>3574</b>	<b>1651</b>
<b>Bilanz</b>	<b>-965</b>	<b>-1944</b>	<b>+489</b>	<b>+1415</b>	<b>+1459</b>	<b>+2389</b>	<b>+824</b>	<b>-94</b>	<b>-4328</b>	<b>+2648</b>	<b>+1059</b>



Betrachtung von DOC und POC in Bilanzierung?

# 3. POC als Bilanzterm

## POC

particulate organic carbon in  
Lösungsproben  
(Niederschlag, Bodenlösung)

0,45 µm bis ~500 µm

$$\text{TOC} = \text{DOC} + \text{POC}$$

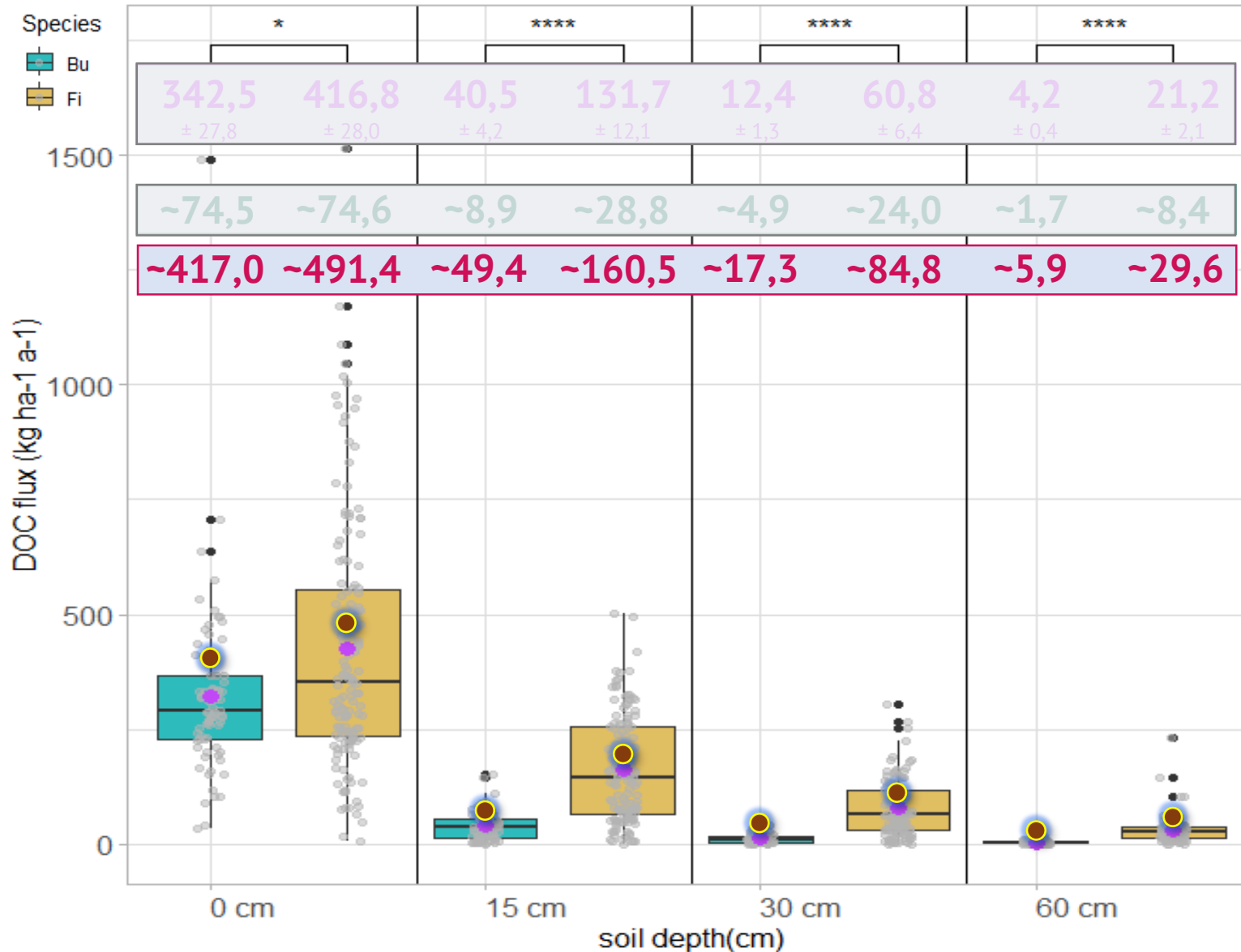
Total organic carbon (in Lösungsproben: Niederschlag, Bodenlösung)

→ mobilste Fraktion im Boden Kalbitz *et al.* 2000

- **Vernachlässigung der POM Fraktion** kann zu irreführenden Schlussfolgerungen und **Lücken in der Bilanzierung** führen

Michalzik und Stadler 2005, Stadler *et al.* 2006, Le Mellec *et al.* 2010

# 3. DOC und POC im Sickerwasser



Mittelwerte der DOC-Jahresflüsse [kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>] mit ±SE, 2012 – 2022

POC-Flüsse [kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>] *Annahmen!!!*

● TOC-Flüsse [kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>] *Annahmen!!!*

### POC

org. Auflage  
 Ki/Podsol-Braunerde/Mo-Roh: ~ 17.9% <sup>1</sup>  
 Ei/Stagnogley/Mo: ~4.6% <sup>2</sup>  
Bodenlösung (4 cm)  
 Bu/Kalkbraunerde/Mu: ~ 21.7% <sup>3</sup>  
A Horizont  
 Ki/Podsol-Braunerde/Mo-Roh: ~21.9% <sup>1</sup>  
B Horizont  
 Ki/Podsol-Braunerde/Mo-Roh: ~39.4% <sup>1</sup>

*bezogen auf DOC Fluss*

<sup>1</sup> Näthe et al. 2018, <sup>2</sup> Le Mellec et al. 2011, <sup>3</sup> Potthast et al. 2017

# 2. Größenordnung der Bilanzen

vorläufige Ergebnisse

Mittelwerte (kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>)  
(aufgerundet, ohne Streuung)  
2012-2022

	Altensteig		Conventwald		Esslingen		Heidelberg		Ochsenhausen		Rotenfels
Kronendurchlass	43	86	90	101	59	82	45	91	46	96	82
Stammabfluss	3		6		4		4		5		
Streufall	3017	2850	2228	2614	3206	2314	2607	2212	3099	2784	727
Biomassezuwachs	3274	2194	1647	3497	3086	3128	4110	1536	2853	3342	1901

Σ Einträge

**-Bodencharakteristika (Bodentyp, Textur, Substratverfügbarkeit, Feuchteregime, pH-Wert)**  
**-Höhenlage → Temperatur, Niederschlag**  
**-Bestandeseigenschaften → Alter, Verjüngungszustand, Ökosystemproduktivität**

Bodenvorräte (kg ha<sup>-1</sup>)  
(Σ org. Auflage bis 30 cm)

Sickerwasser (30 cm)  
CO<sub>2</sub>  
CH<sub>4</sub>

Σ Austräge

bis zu ~ 75 kg C/ha (POC) im Sickerwasser zusätzlich möglich = hohe Frachten → für Bilanzdifferenzen spielt POC untergeordnete Rolle

Bilanz

-965	-1944	+489	+1415	+1459	+2389	+824	-94	-4328	+2648	+1059
------	-------	------	-------	-------	-------	------	-----	-------	-------	-------

➔ Bilanzierung noch unvollständig?  
Fehlen noch Bilanzterme?

# Ausblick / nächste Schritte

→ Ergebnisse sollen in FNR-gefördertes Forschungsprojekt (2024-2027) eingebettet werden

## - Stoffbilanz -

„Harmonisierte Bilanzierung des Nährstoffhaushaltes auf Intensivmessflächen des Forstlichen Umweltmonitoring: Bewertung der Umweltrisiken für Waldökosysteme und eine nachhaltige Waldwirtschaft“

**Ziel:** deutschlandweite Auswertung von Stoffbilanzen (N, P, Ca, Mg, K, S, C) auf Level-II-Flächen

- Erstellung Ökosystembilanzen
- Harmonisierung der Auswertungen

→ **Betrachtung weiterer Eintrags- und Austragspfade**

### beteiligte Institutionen:



**NW-FVA**  
Nordwestdeutsche  
Forstliche Versuchsanstalt



Forstliche Versuchs-  
und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg



Bayerische Landesanstalt  
für Wald und Forstwirtschaft



Landesamt für Natur,  
Umwelt und Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen



Poster #16:  
Stefan Fleck –  
Projektvorstellung

# Vielen Dank für Ihr/euer Interesse!



## **Danksagung:**

Valentin Gartiser, Raphael Habel, Verena Lang,  
Marvin Lorff, Christian Vonderach

Feldteam: Hermann Buberl, Ralph Hug, Peter  
Jost, Stefan Meining, Marlon Ponschke,  
Andreas Schupp, Constantin von Fürstenberg,  
Markus Wehrle, Leonard Wittich & HiWis

Laborteam: Martina Fehrenbach, Angelika  
Jakob, Alexander Schengel, Melanie Strecker,  
Angela Thiemann, Robert Tilch & HiWis

