

Bodenbildungsprozess: *Humusbildung*

Warum sind einige Bodenhorizonte
dunkel bis schwarz gefärbt?

Bodentyp: Podsol



Bodentyp: Schwarzerde (Tschernosem)

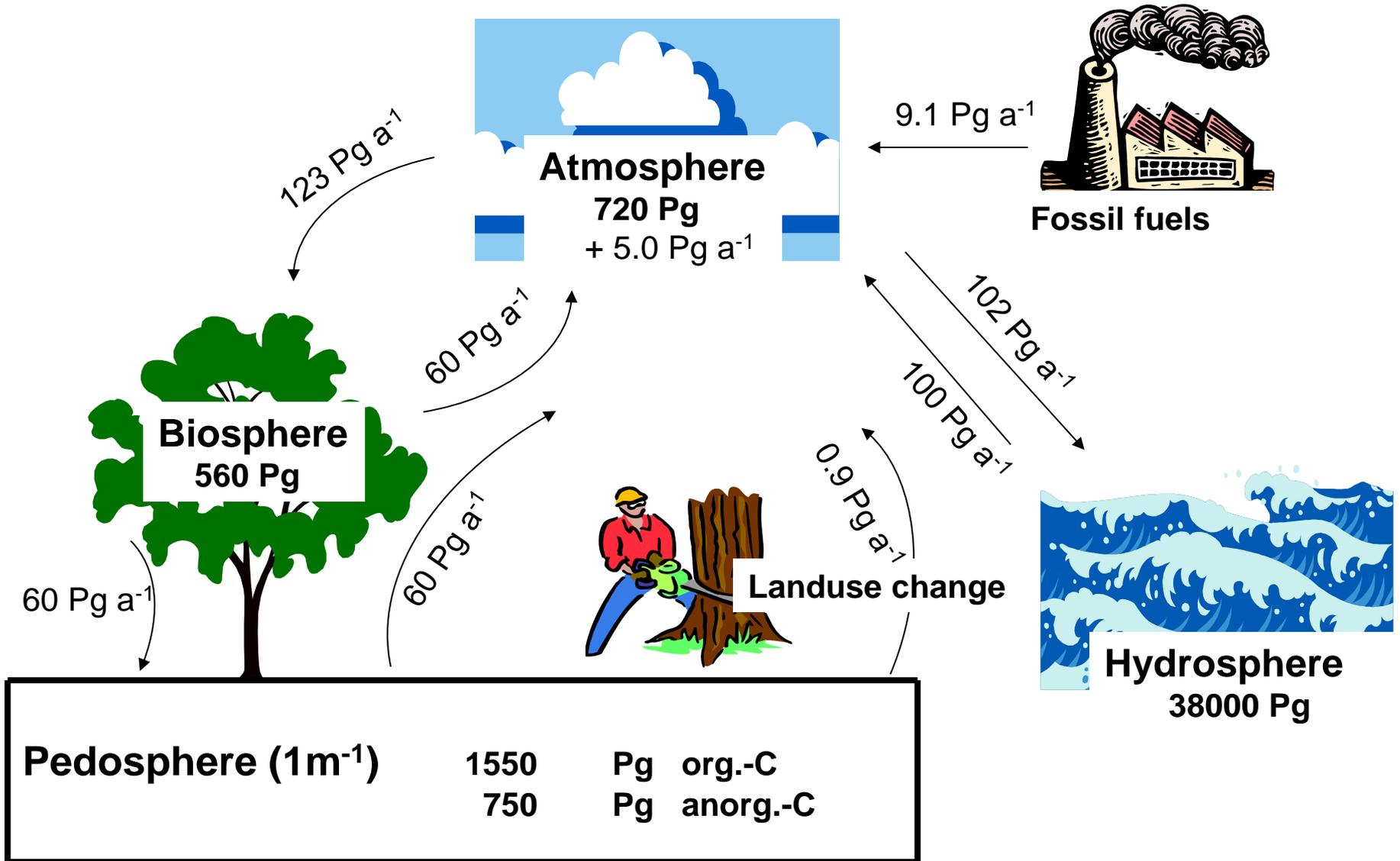


Axh

IC

Global C-Cycle

(Canadell et al. 2007, Schlesinger 2013)



Einflußfaktoren auf den Gehalt organischer Substanz in Böden

- Klima
- Vegetation
- Textur und Mineralausstattung
- Zusammensetzung und Aktivität des Edaphons
- Bewirtschaftung
- Zeit
- Feuer

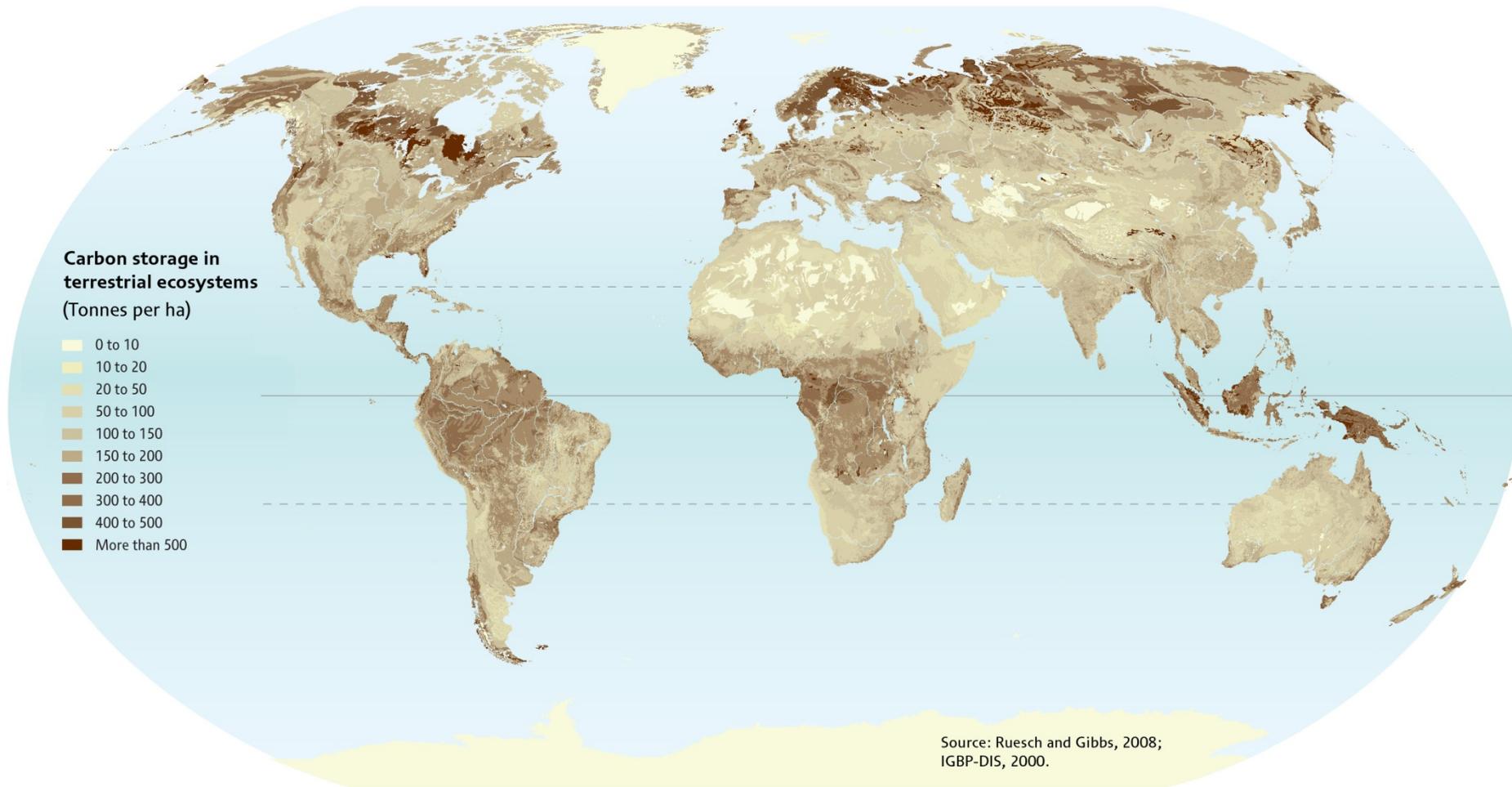
C- Vorräte in verschiedenen Biomen

(aus Haider 1996)

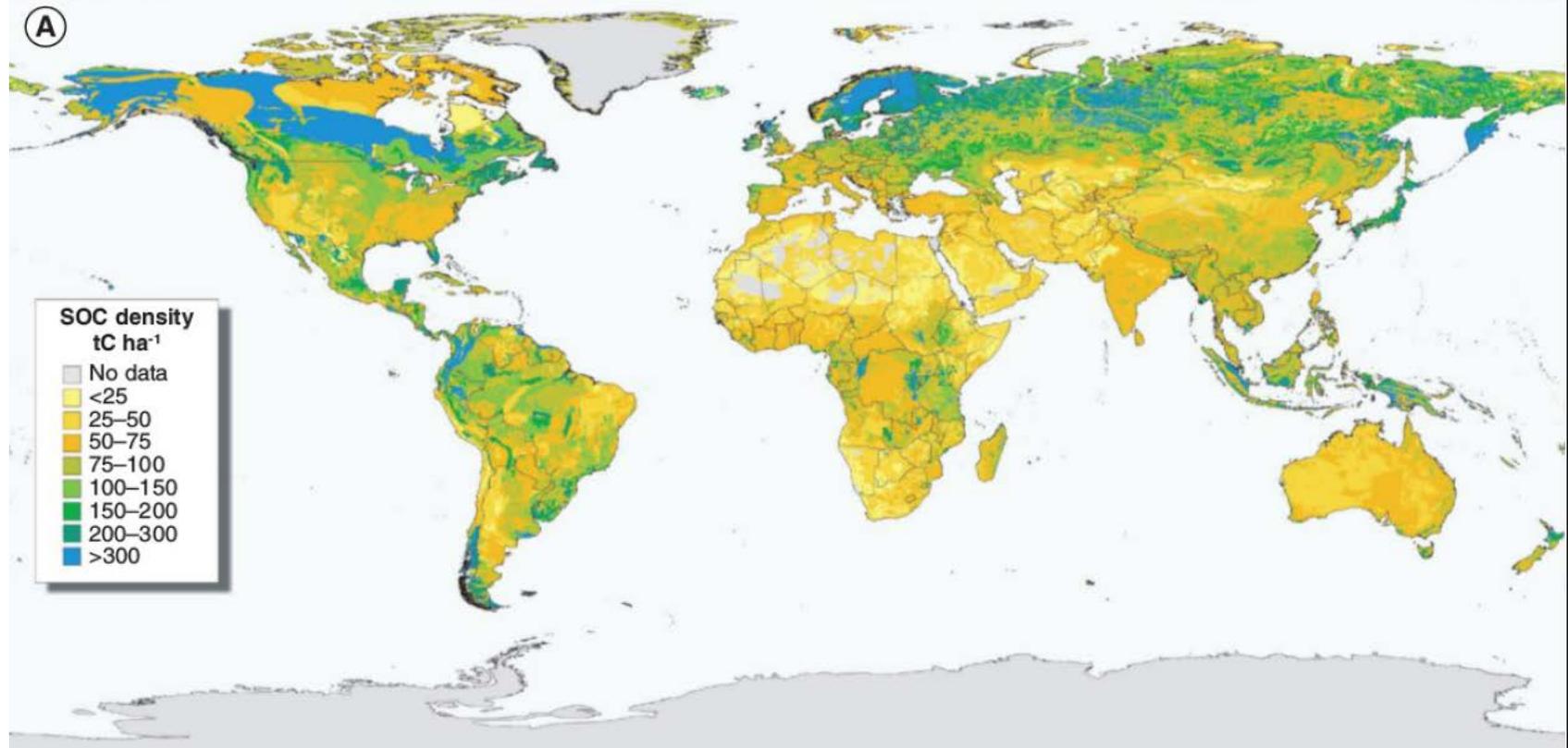
kg m⁻²

	Pflanzenbiomasse	Boden-C	Pg global
Trop. Wälder	20	10,4	260
Wälder gem. Zone	14	13,5	320
Buschland	2,7	5	120
Grasland	0,7	19	170
Tundra	0,3	22	180
Kulturland	0,5	13	180
Sümpfe und Moore	?	70	210

C-Vorräte in terrestrischen Ökosystemen (Pflanzen + Boden)

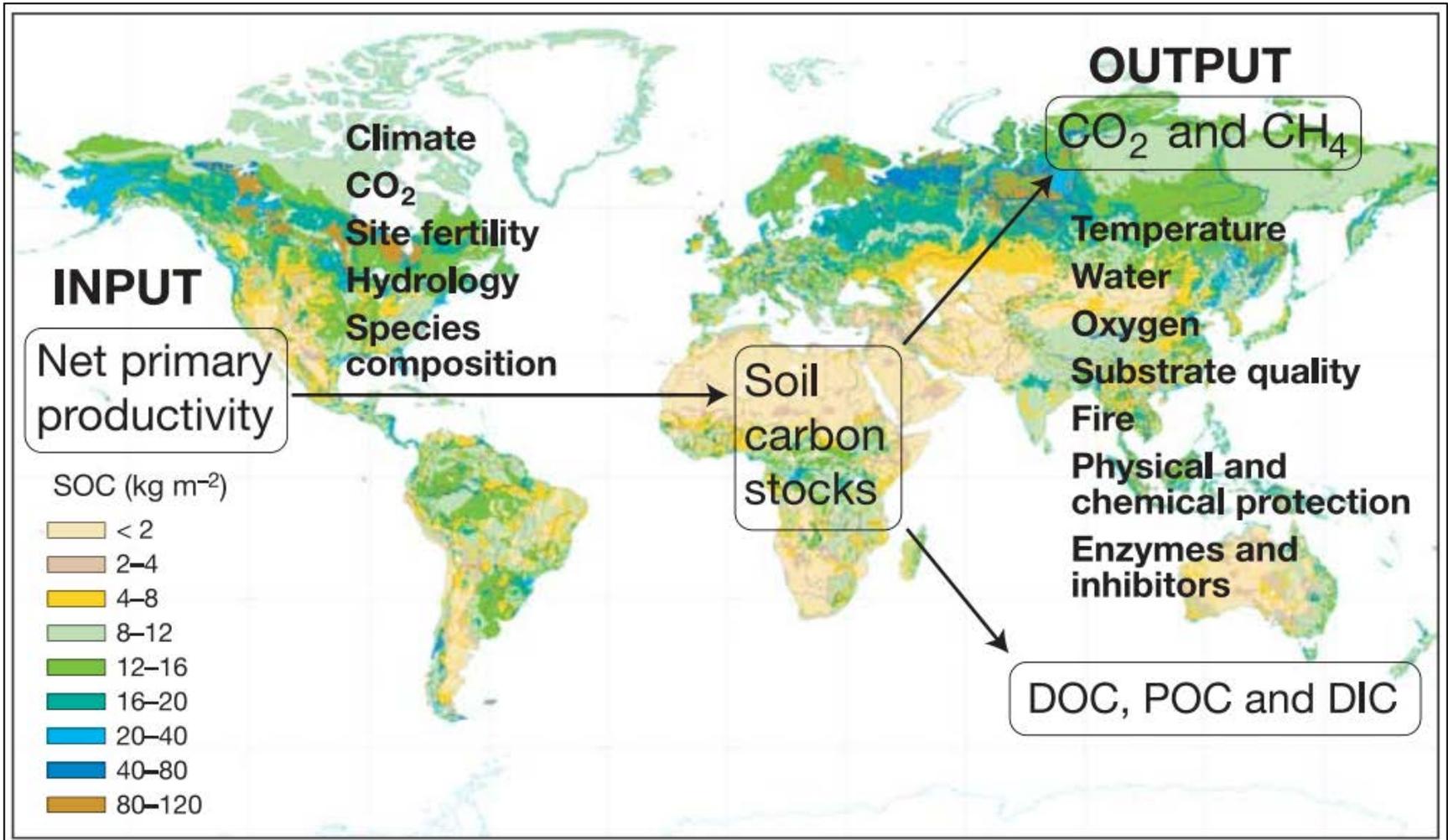


Harmonized World Soil Database



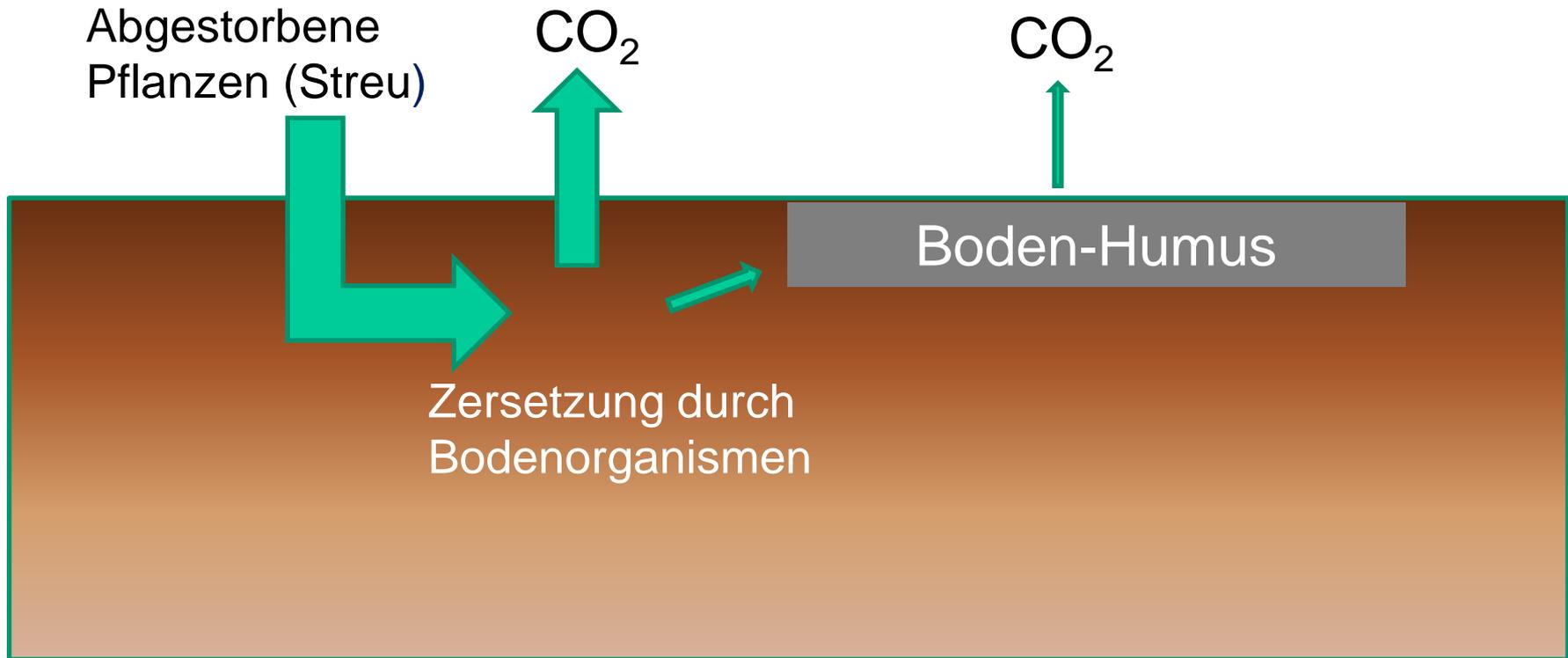
Global Soil Organic Carbon Density (Topsoil) - tC ha⁻¹

C-Vorräte in Böden und Einflussfaktoren



DOC: dissolved organic carbon; POC: particulate organic carbon
DIC dissolved inorganic carbon (phys. gelöst CO₂, HCO₃)

Humusbildung: Prinzipiell



Klassifikation der organischen Substanz in Böden: Kriterien

Physikalisch: z.B.: fest vs. gelöst
partikulär vs. Mineral-gebunden, u.a.

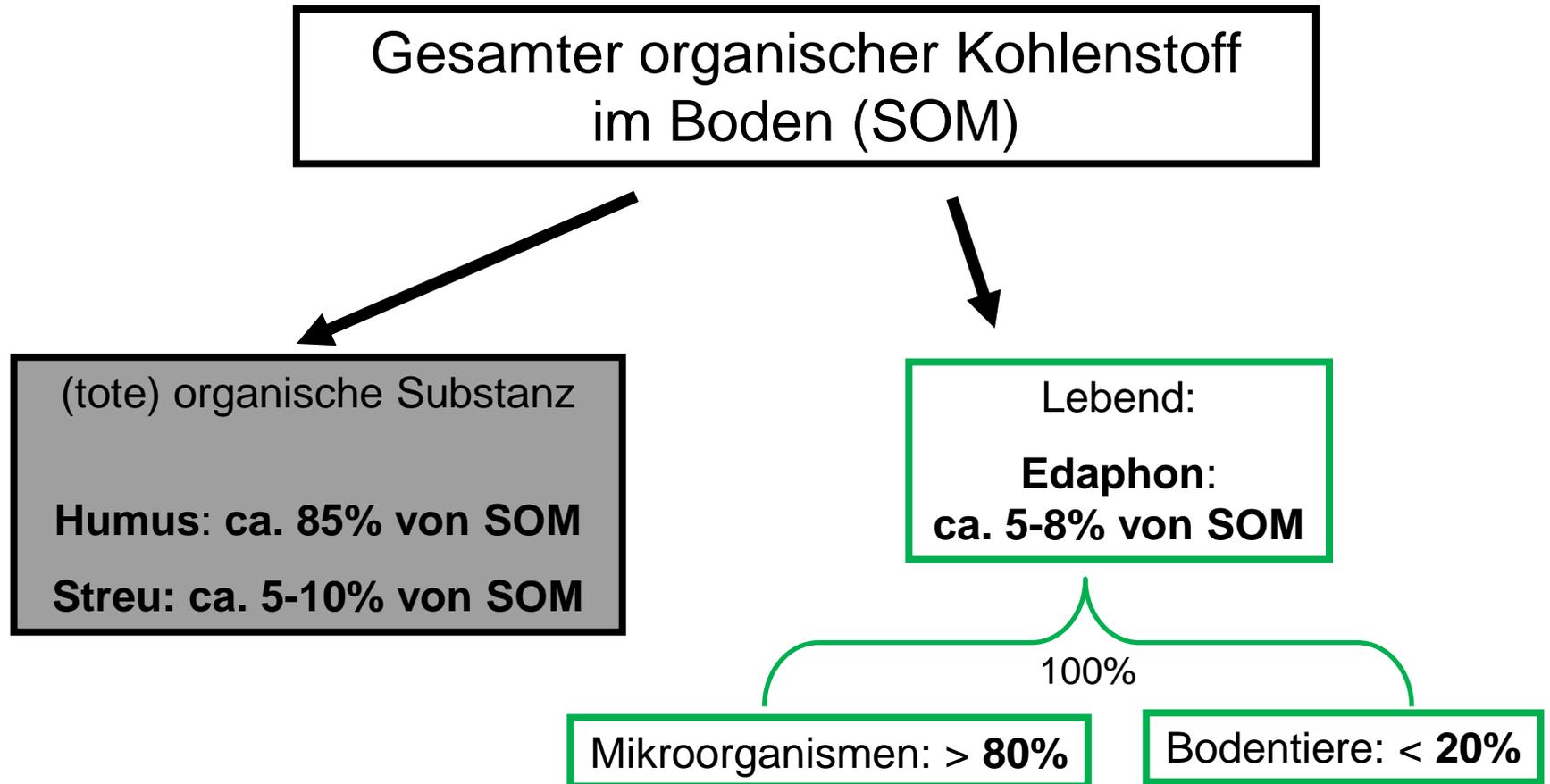
Chemisch: z.B.: Streu vs. Fulvosäuren vs.
Huminsäuren, u.a.

Biologisch: z.B.: lebend vs. tot, mittlere Verweilzeit, u.a.

Partikuläre und adsorbierte organische Substanz in Böden



Klassifikation der organischen Substanz in Böden



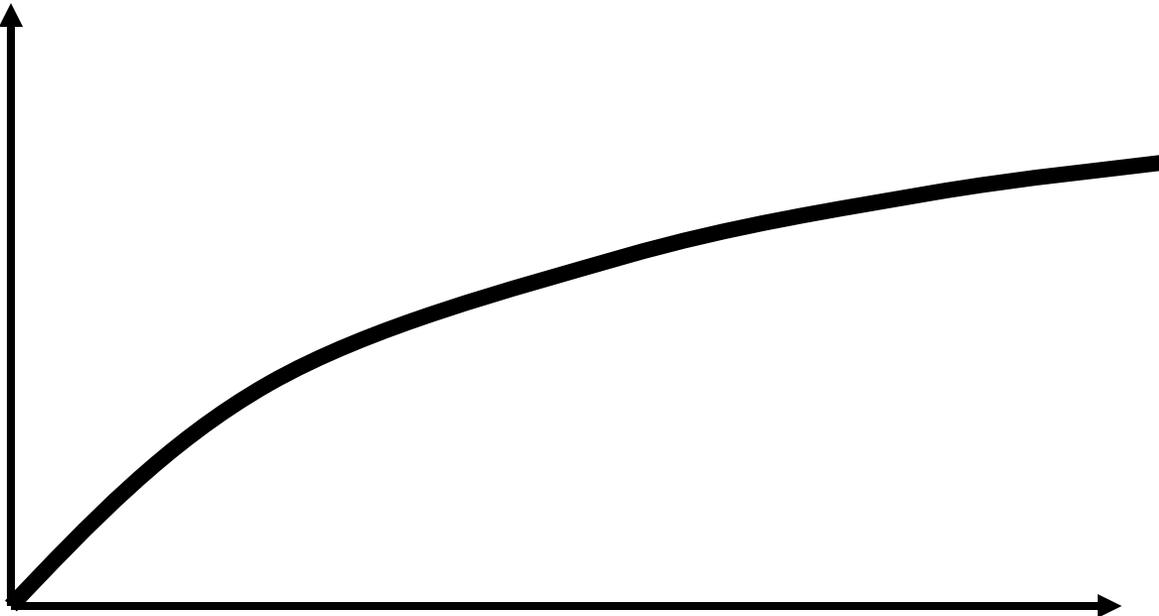
Organische Substanz in Böden

Humus: stark zersetzt, Pflanzenmaterial als solches nicht mehr zu erkennen, durch Humifizierung geprägt.

Streu: wenig zersetztes, totes Pflanzenmaterial, als solches noch zu erkennen
Blatt-/Nadelstreu (oberirdisch) + Wurzelstreu (unterirdisch)

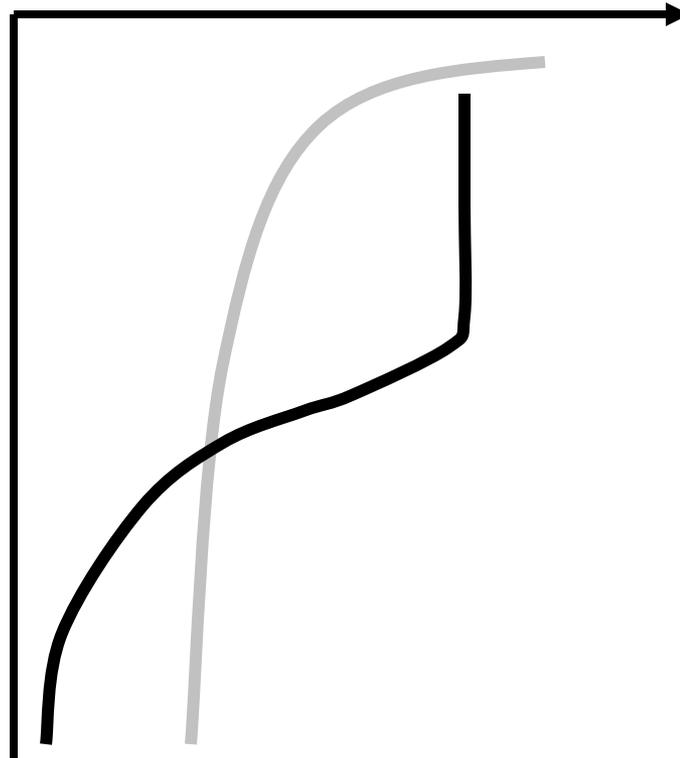
Akkumulation von organischer Substanz bei der Bodengenese

SOM Vorrat



Zeit: 1.000 – 5.000 Jahre

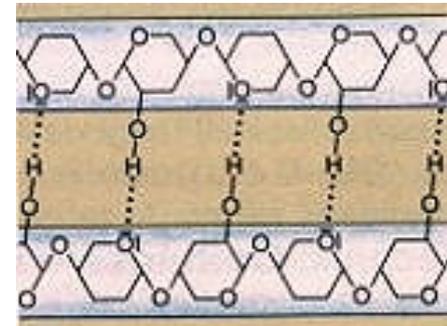
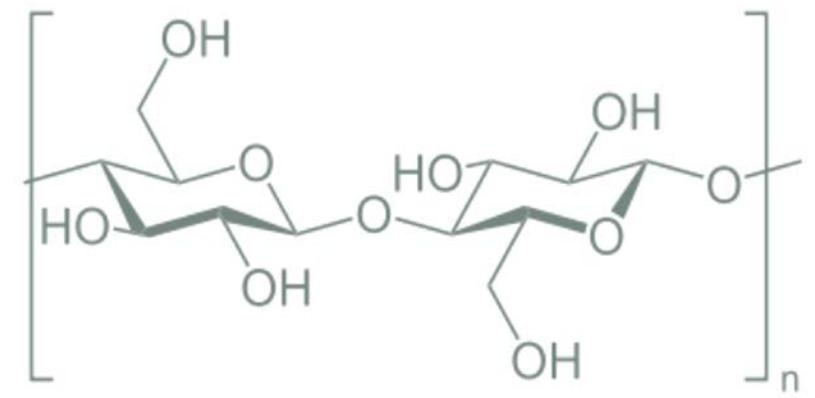
Typischer Tiefengradient der C-Gehalte in Wald- und Ackerböden



Pflanzliche Inhaltsstoffe als Ausgangspunkte für die Humifizierung

Cellulose

- unverzweigtes Polysaccharid aus mehreren Tausend Glucose-Einheiten in β -(1-4)-glycosidischer Bindung
- Verknüpfung der Glucanketten über Wasserstoffbrücken



Cellulose

- als Gerüstsubstanz in der verholzten Zellwand von Pflanzen eng mit Hemicellulosen und Lignin vergesellschaftet („Verbundwerkstoff“)
- Makromoleküle in Mikrofibrillen organisiert, die ihrerseits kristalline Fibrillen bilden
 - ⇒ Fasern für Textilien und Papier genutzt

Aufbau von Cellulose

Cellulose

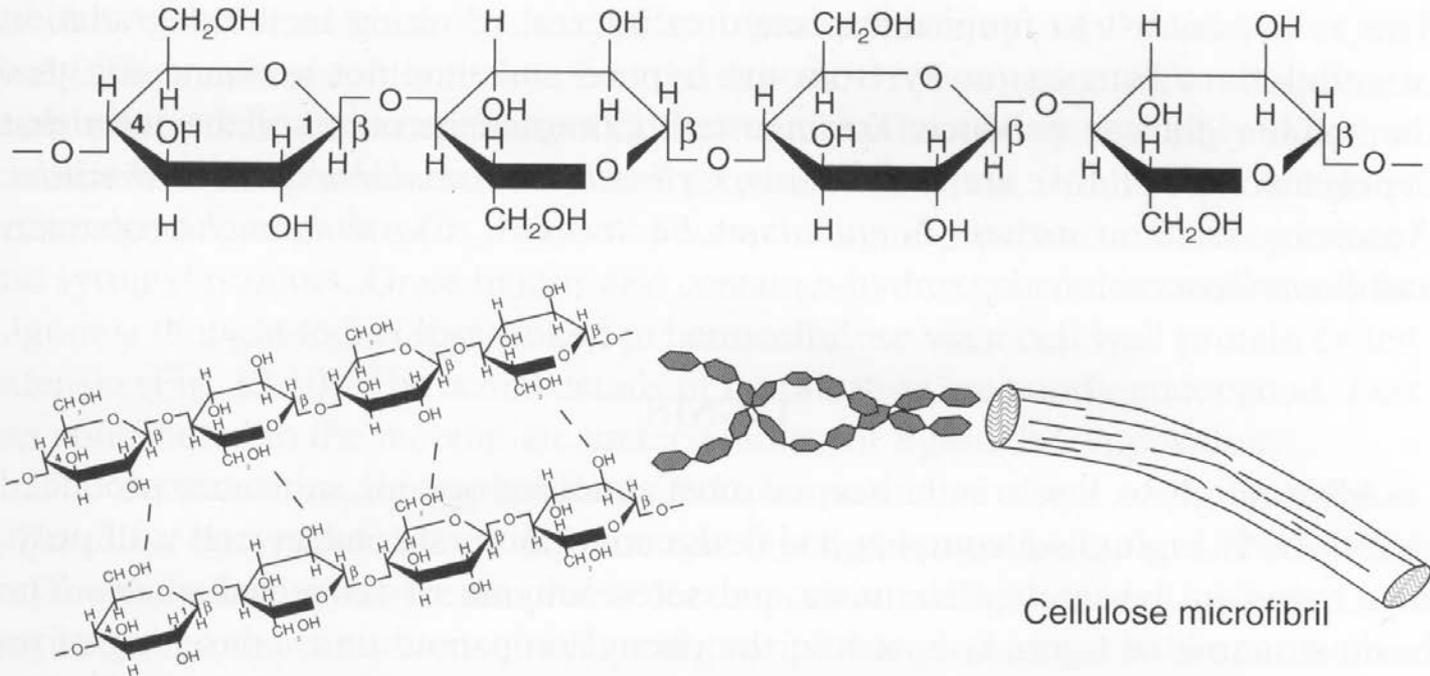


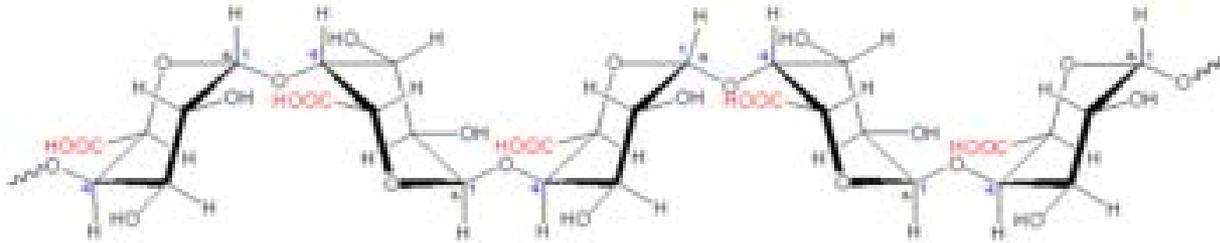
FIGURE 12.8 Cellulose structure showing $\beta(1-4)$ linkages combining glucose residues into a single chain polymer. Chains are cross-linked by hydrogen bonds to form cellulose microfibrils.

Hemicellulosen (Polyosen)

- heterogene Polysaccharide aus verschiedenen Zuckereinheiten (Pentosen, Hexosen, Uronsäuren, Desoxyhexosen)
- wie Cellulose Struktur-Kohlenhydrate (Zellwandbestandteile)
- im Unterschied zu Cellulose verzweigte Ketten und niedrigerer Polymerisationsgrad
- mit Cellulose und Lignin vergesellschaftet

Pektine

- Polysaccharide hauptsächlich aus Galacturonsäure-Einheiten:



Ausschnitt aus dem *backbone* von Pektinen:
Poly- α -1,4-Galacturonsäure

- festigende und wasserregulierende Funktion
⇒ Verwendung als Geliermittel
- quantitativ weniger bedeutend als Cellulose und Hemicellulosen ($\approx 1\%$ von verholztem Gewebe)

Speicherpolysaccharide

- Stärke: Polysaccharide aus Glucose-Monomeren
(Homoglucane Amylose und Amylopektin)
 - Zellinhaltsstoff, Funktion als Energie-Speicher
- Fructane: wasserlösliche Oligo- und Polysaccharide aus Fructose-Einheiten
 - Zellinhaltsstoffe, Speicherfunktion, Regulierung des osmotischen Potentials

Grundbausteine des Lignin

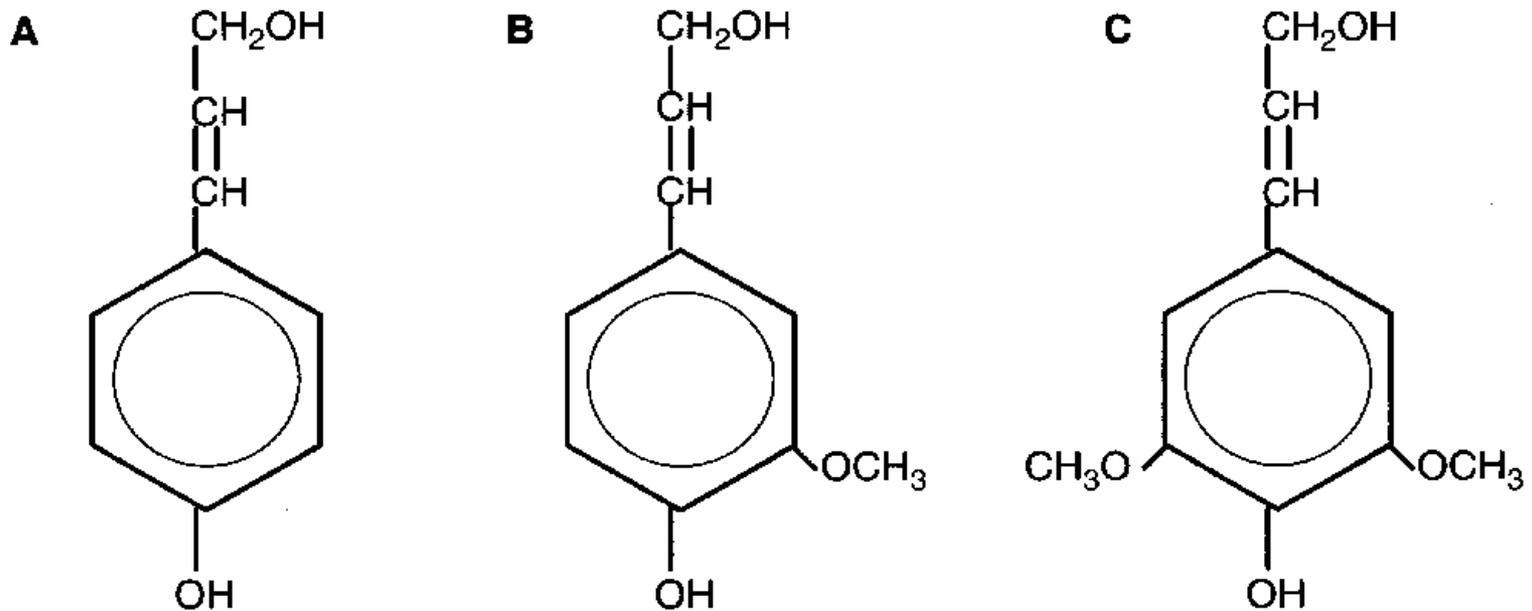
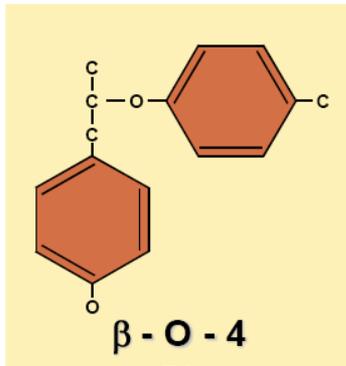
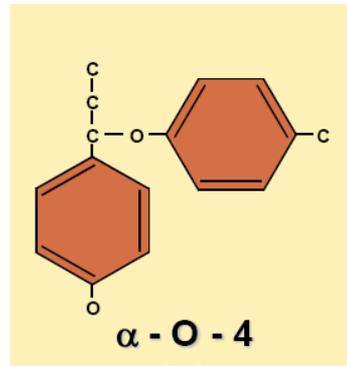


Fig. 4.7. Several lignin precursors. (A) Coumaryl alcohol. (B) Coniferyl alcohol. (C) Sinapyl alcohol.

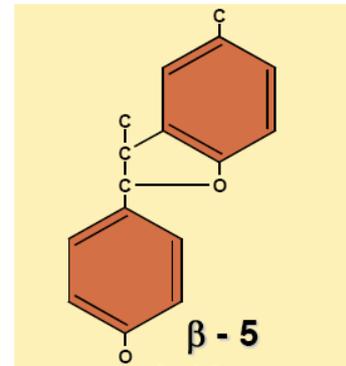
Major types of bonds in lignin



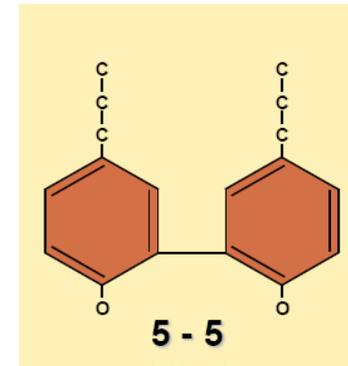
50
60



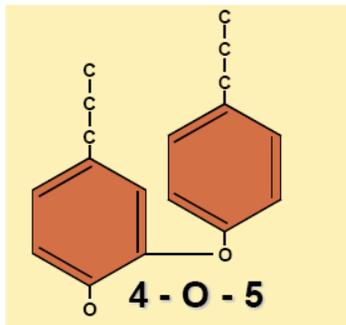
2-8
7



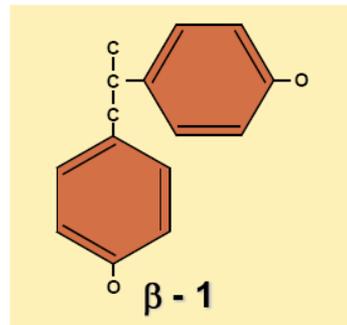
9-12
6



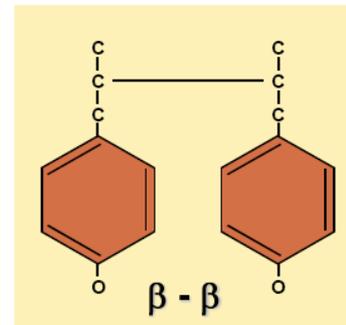
10-11
5



4
7



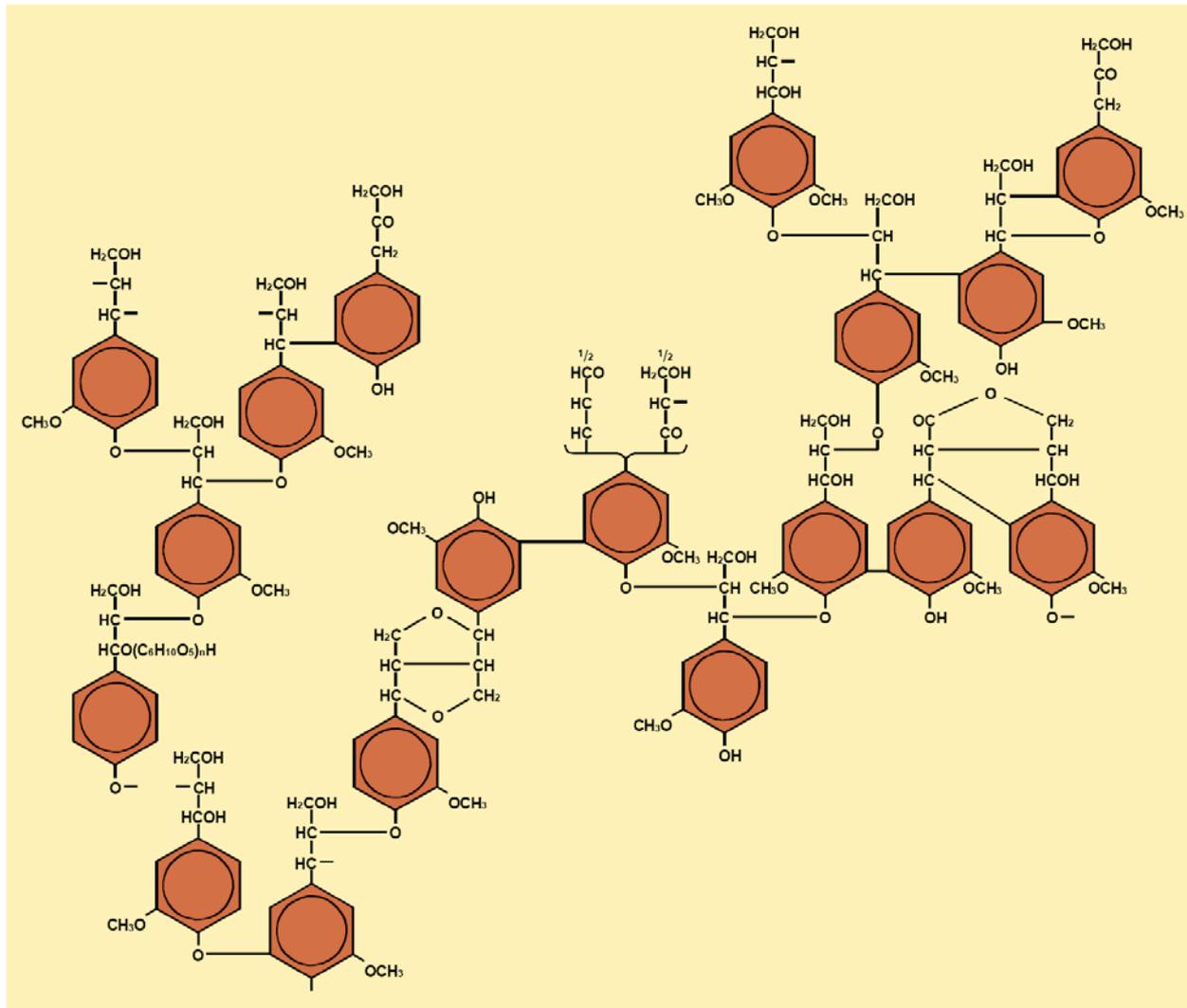
7
7



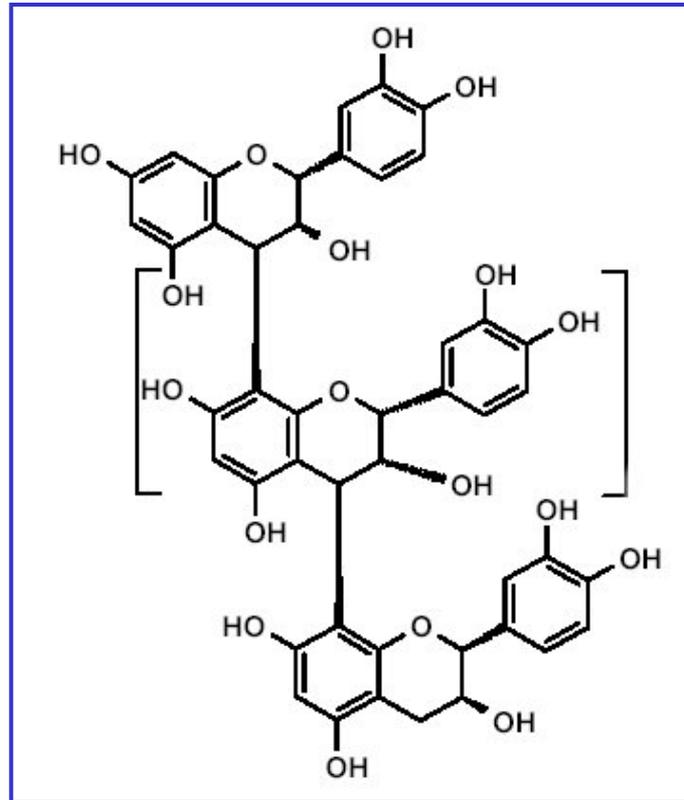
2
3

% of total bonds
Deciduous wood
Coniferous wood

Hypothetische Ligninstruktur



Tannine



Tannine = Polyphenole = Gerbstoffe!

Tab. 3-3 Häufige Zusammensetzung wichtiger C- und Energiequellen für den Abbau im Boden: pflanzliche Rückstände, Mikroorganismen; % Trockensubstanz (zusammengestellt aus HAIDER, 1992; FENGEL & WEGENER, 1984; SWIFT et al., 1979)

	Cellulose	Hemicellulose ⁺	Lignin	Protein	Lipide*	C/N
% TS						
Fichte (<i>Picea abies</i>)						
Holz	40	31	28	< 2	1,4	100...400
Rinde	48	17	38	< 2	21	
Nadeln	15	13	14...20	3...6	7	40...80
Buche (<i>Fagus sylvatica</i>)						
Holz	32	43	24	2	0,8	100...400
Rinde	38	23	39	2	11	
Blätter	20	17	11...16	6	5	30...50
Wurzelholz	33	18	22	1,6	1,3	190
Feinwurzeln	19	10	33	5,4	3,1	55
Weidelgras (Spross)	19...26	16...23	4...6	12...20		
Luzerne (Spross)	13...33	8...11	6...16	15...18		
Weizenstroh	27...33	21...26	18...21	3		50...100
Bakterien	0	4...32	0	50...60	10...35	5...8
Pilze	8...60 (Chitin)	2...15	0	14...52	1...42	10...15
Phytoplankton (Seen)		18 + 50 [#]	0	17	1,5	5...12

⁺ und andere nicht cellulose Polysaccharide

* und/oder andere mit Lösungsmitteln extrahierbare Anteile (z. B. Wachse, Harze, Chlorophyll)

[#] nichtstrukturelle Kohlehydrate

Morphologische Prozesse bei der Streuzersetzung:

Organische Horizonte

- **H** (H von „Humus“):
Organischer Horizont aus Resten torfbildender Pflanzen unter Wasserüberschuss gebildet: **Moore**
- **L** (L von englisch „litter“):
Organischer Horizont aus nicht oder wenig zersetzter Pflanzensubstanz, Feinsubstanz < 10 Vol.-%
- **Of** (f von schwedisch „förmultning“ = zersetzt):
Besteht aus Bruchstücken von Blättern, Zweigen etc., Reste der Blatt- und Nadelmorphologie noch erkennbar.
Neben Pflanzenresten 10–70 Vol.-% Feinsubstanz
- **Oh** (h von „Humus“):
Organische Feinsubstanz > 70 Vol.-%,
Pflanzenreste i.d.R. nicht erkennbar



Moder

L

Of

Oh

Morphologische Prozesse bei der Steuersetzung

L = nicht oder wenig zersetzte Pflanzensubstanz, < 10 Vol.-% Feinhumus

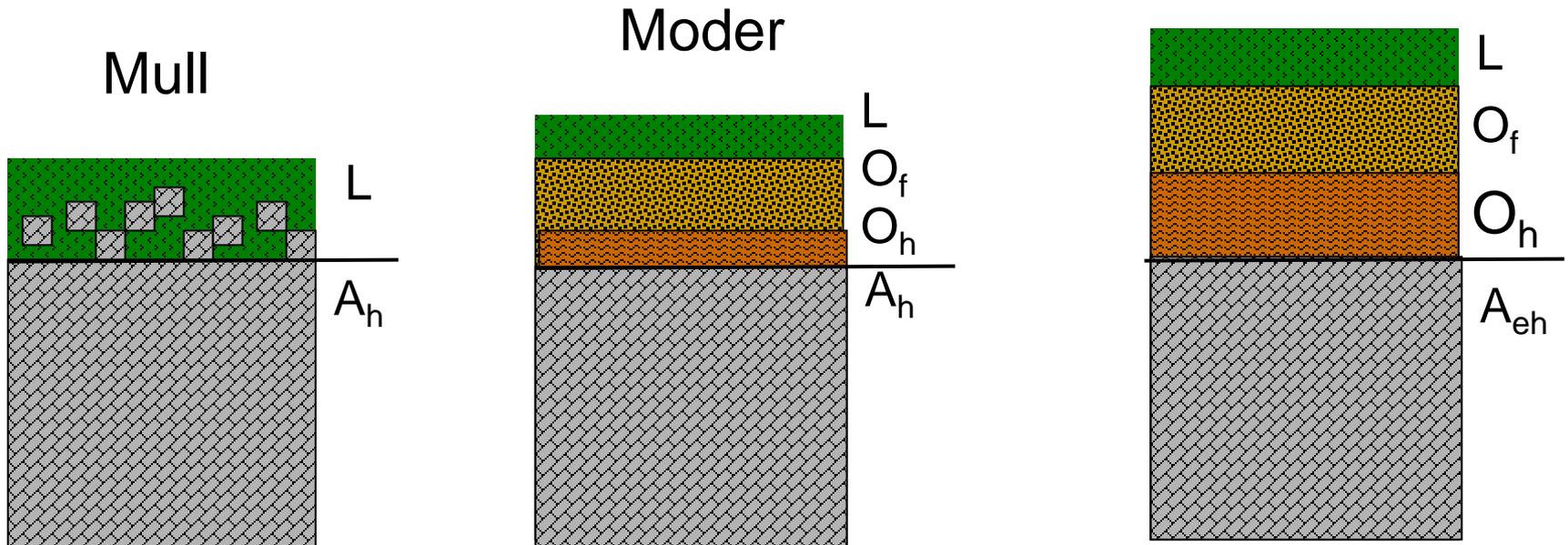
O_f = 10- 70 Vol.-% Feinhumus, Feinwurzeln und Pilzhyphen

O_h = > 70 Vol.-% Feinhumus

Humusform:

definierte Kombination verschiedener Horizonte

Waldhumusformen: Grundformen



Niedermoor, Fichtelgebirge



Horizontbezeichnung

nH

Gr

Hochmoor, Niedersachsen

Horizontbezeichnung



hH₁

Weißtorf

Schwarztorf

hH₂

Mineralisierung und Humifizierung der Streu

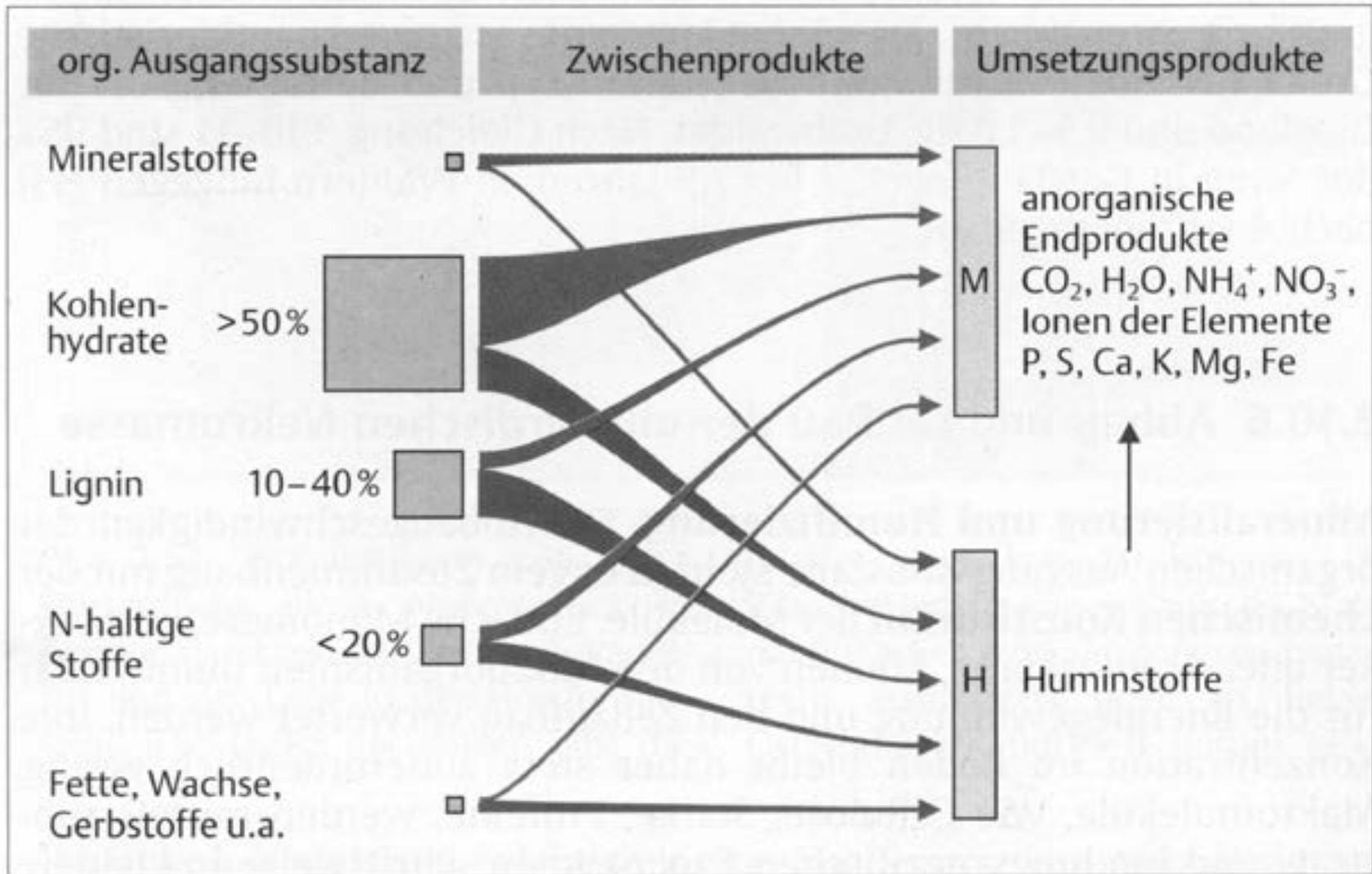
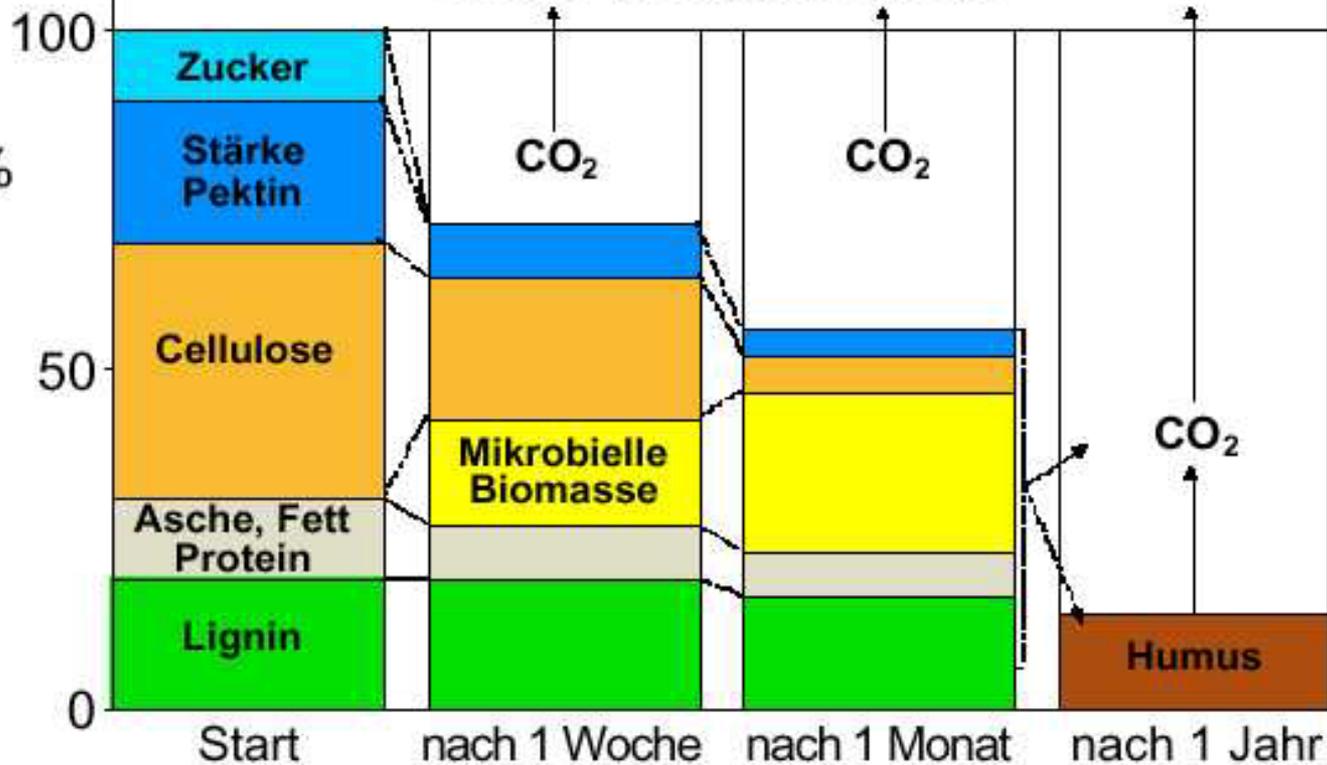


Abb. 3.58 Mineralisierung (M) und Humifizierung (H) der organischen Ausgangssubstanz im Boden (nach Schröder 1992) (Gisi, 1997)

CO₂ in die Atmosphäre

*Fortschreitende Humifizierung
von Lignocellulosen in Böden
(aus Haider, 1996)*



Eigenschaften von Huminstoffen

- amorphe organische Verbindungen,
- meist dunkle Farbe,
- Teilchen von geringer Größe ($< 2 \mu\text{m}$),
- große spezifische Oberfläche,
- können Wasser und Stoffe reversibel speichern

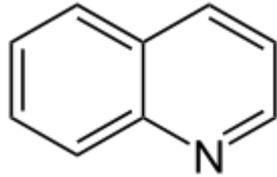
Nach der Theorie der makromolekularen Bildung sind Huminstoffe Mischpolymerisate aus:

- Kernen
- Brücken
- Reaktiven Gruppen

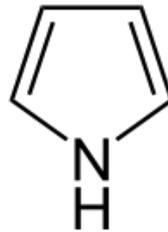
Bausteine von Huminstoffen: Aromatische Verbindungen = Kerne



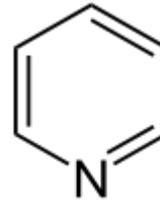
Benzol



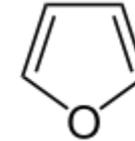
Chinolin



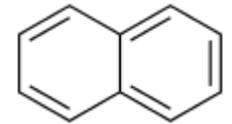
Pyrol



Pyridin



Furan

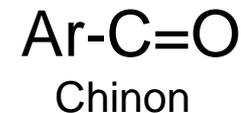


Naphtalen

Bausteine von Huminstoffen: Brücken



Bausteine von Huminstoffen: Funktionelle Gruppen



Struktur der Huminstoffe

aus Ziechmann 1996

G = Grundeinheiten: ho = homogen; he = heterogen

S = Substrate: nm = niedermolekular; hm = hochmolekular

B = Bindungsformen: ho = homogen; he = heterogen

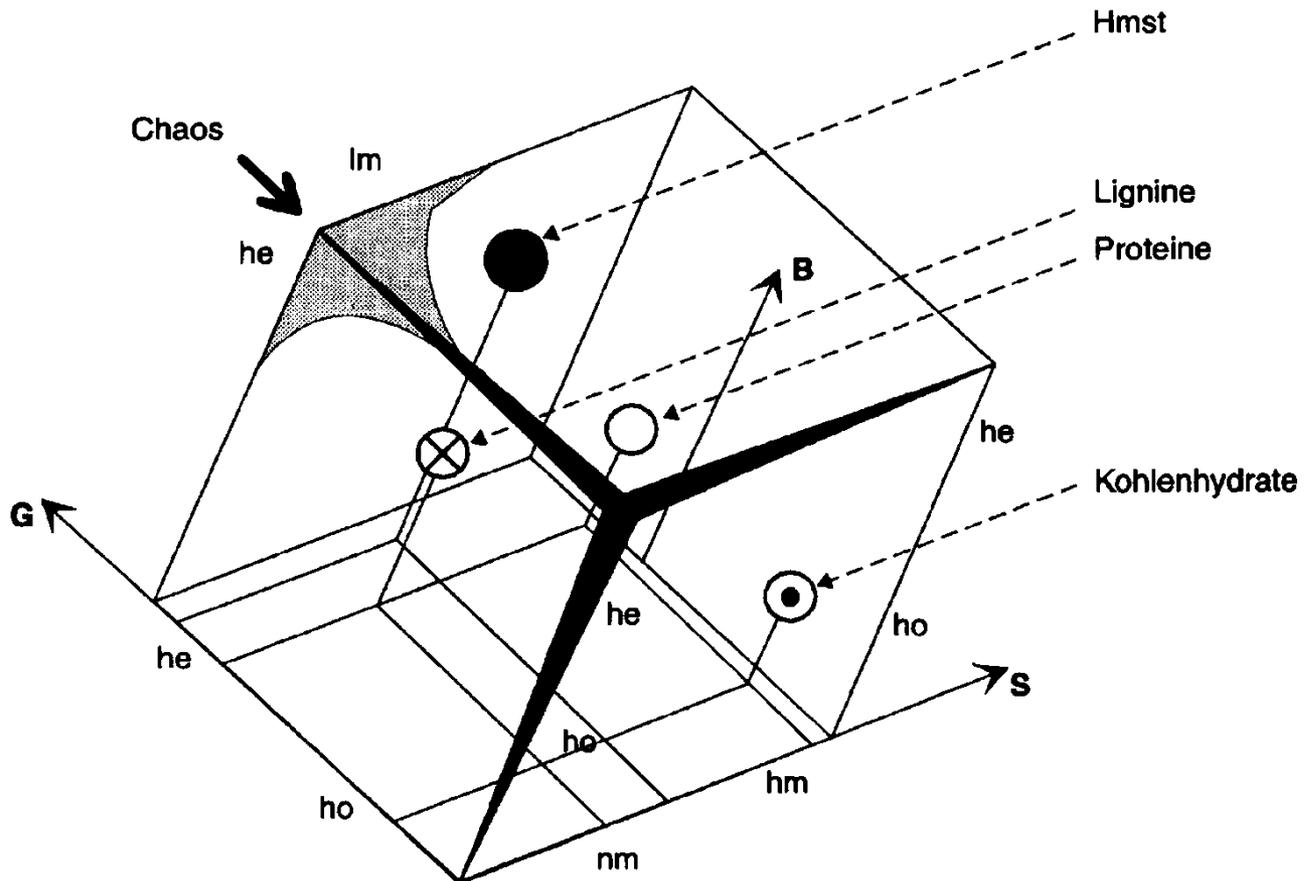


Abb. 1.7: Die strukturelle Stellung einiger höhermolekularer Naturstoffe

Hypothetische Struktur von Huminstoffen (Sparks 2003)

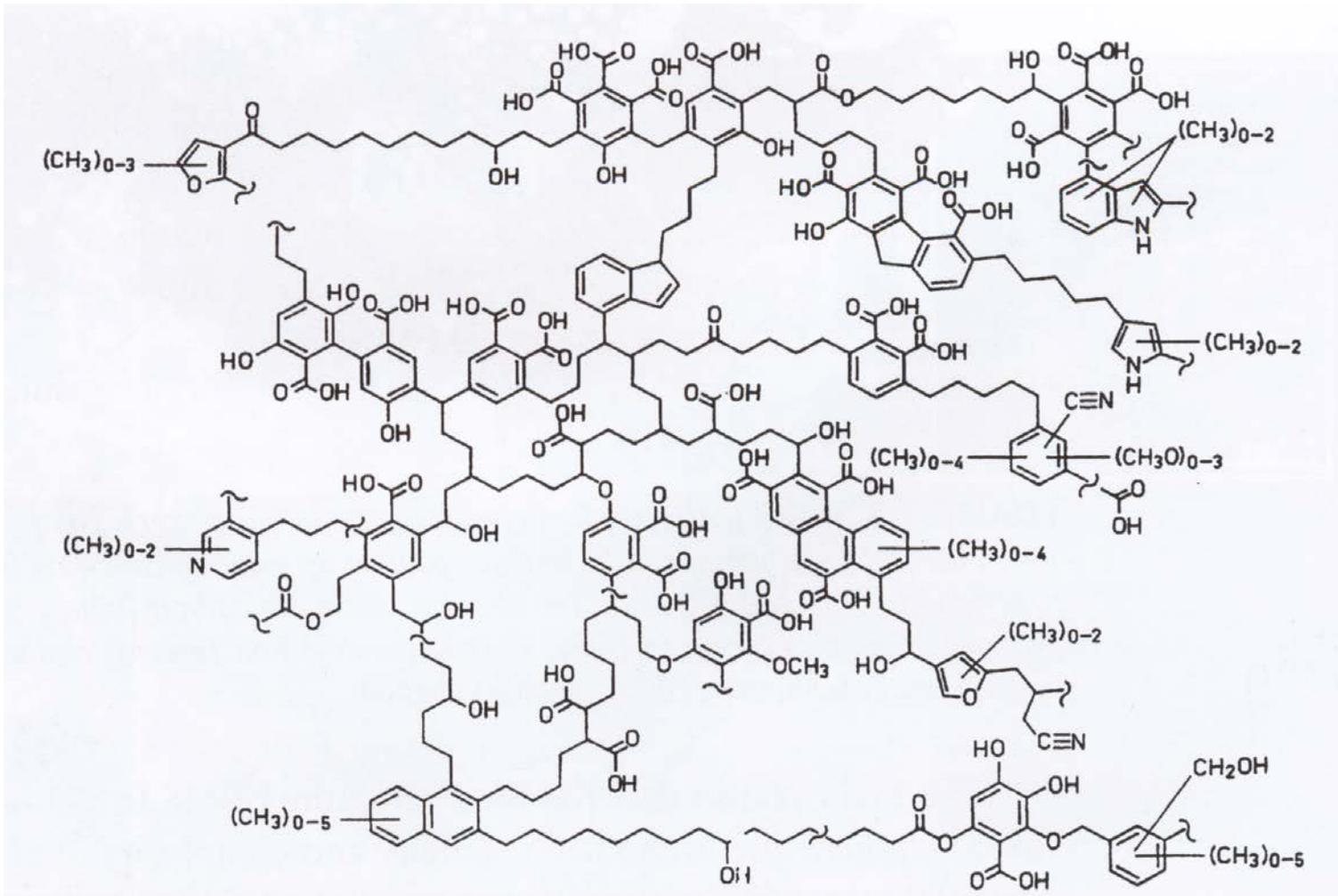
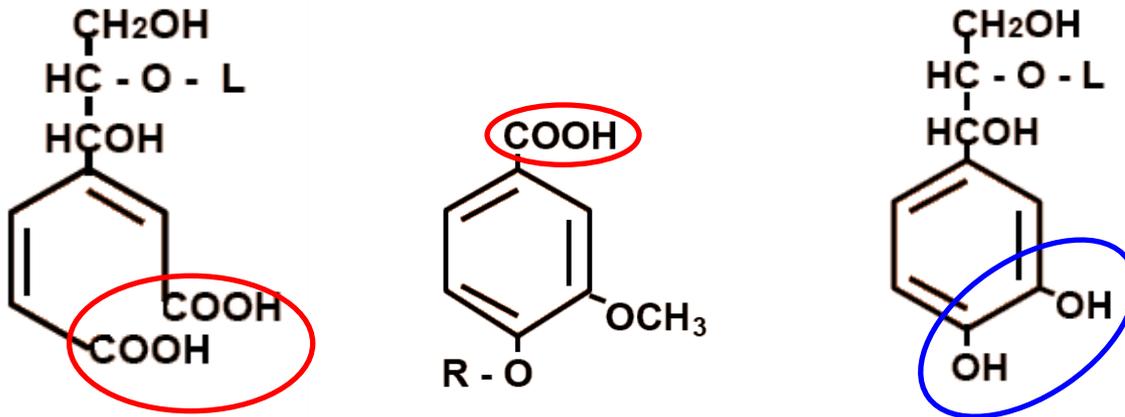


FIGURE 3.7. Two-dimensional HA model structure. From Schulten and Schnitzer (1993), with permission. Copyright 1993 Springer-Verlag GmbH.

Bildung von Huminstoffen

Lignin-Theorie

- unvollständig abgebautes Lignin ist oxidativ verändert



- o-Dihydroxy-Strukturen können zu Chinonen oxidiert werden, die mit Aminosäuren unter Bildung N-haltiger Produkte reagieren

Bildung von Huminstoffen

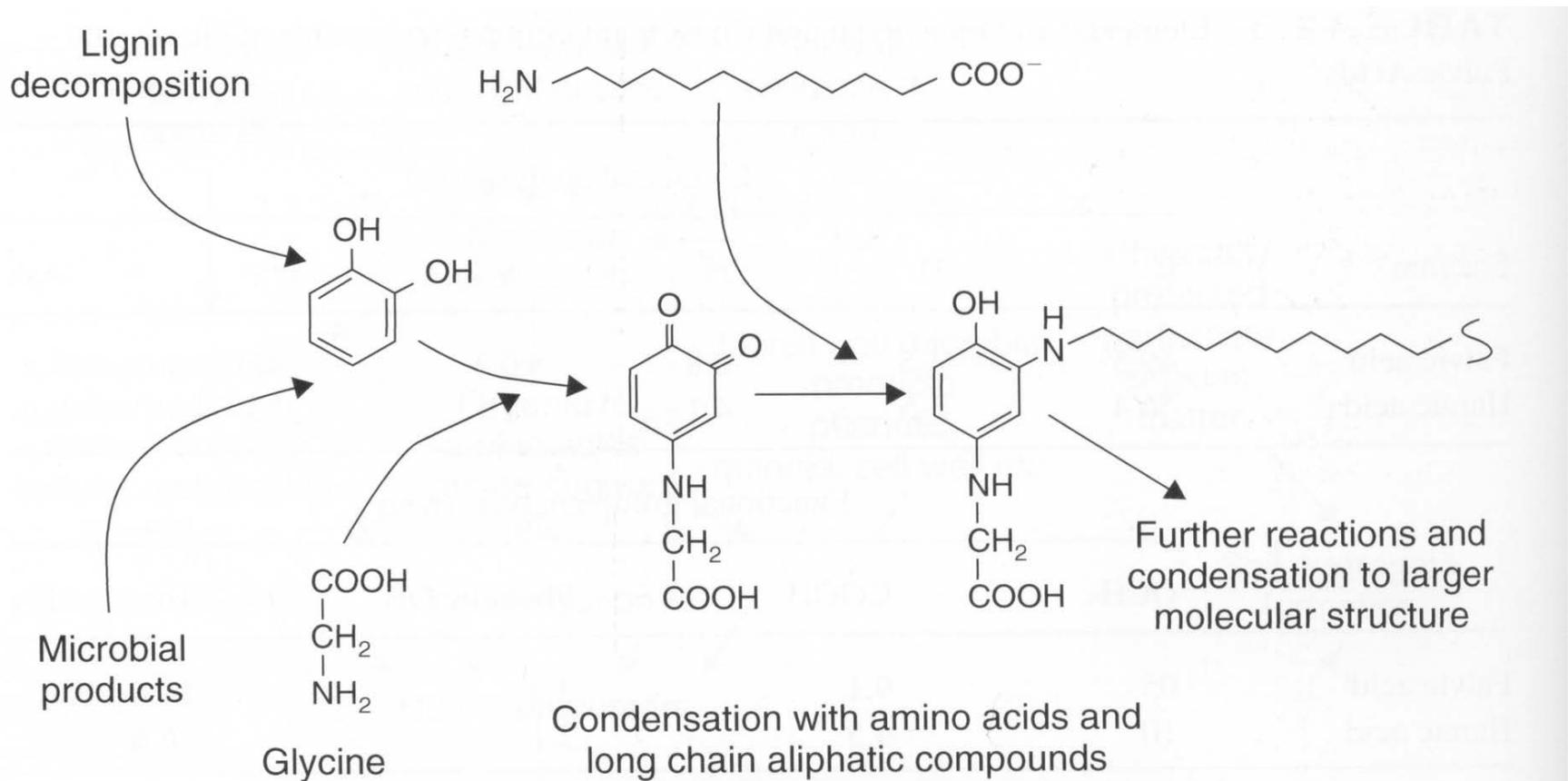


FIGURE 12.16 Hypothesized formation of a humic substance by reaction of a phenol decomposition product between an amino acid and an aliphatic substance.

Bildung von Huminstoffen

Polyphenol-Theorie

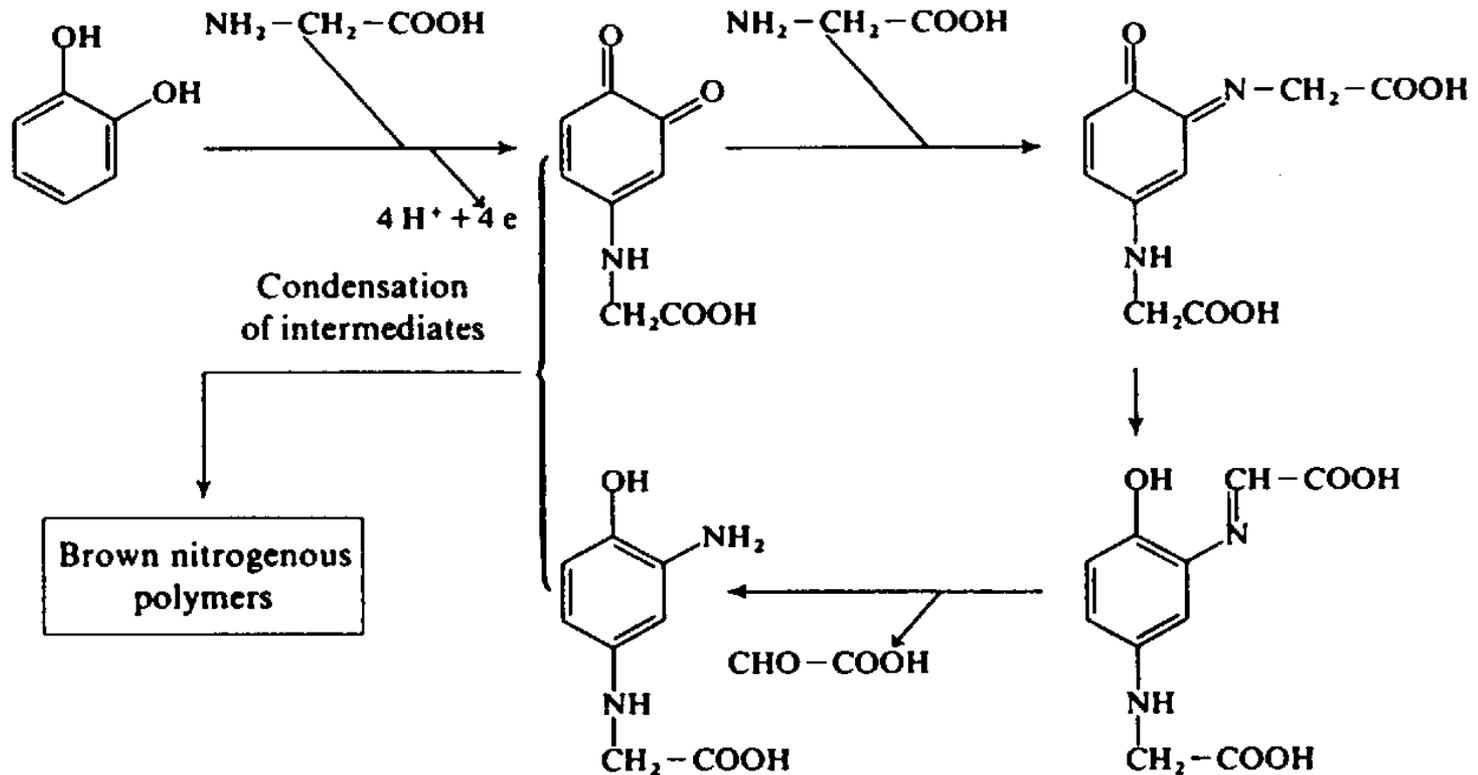


Fig. 8.11 Formation of humic substances from quinones and amino acids, as illustrated by the reaction between catechol and glycine (Stevenson 1994)

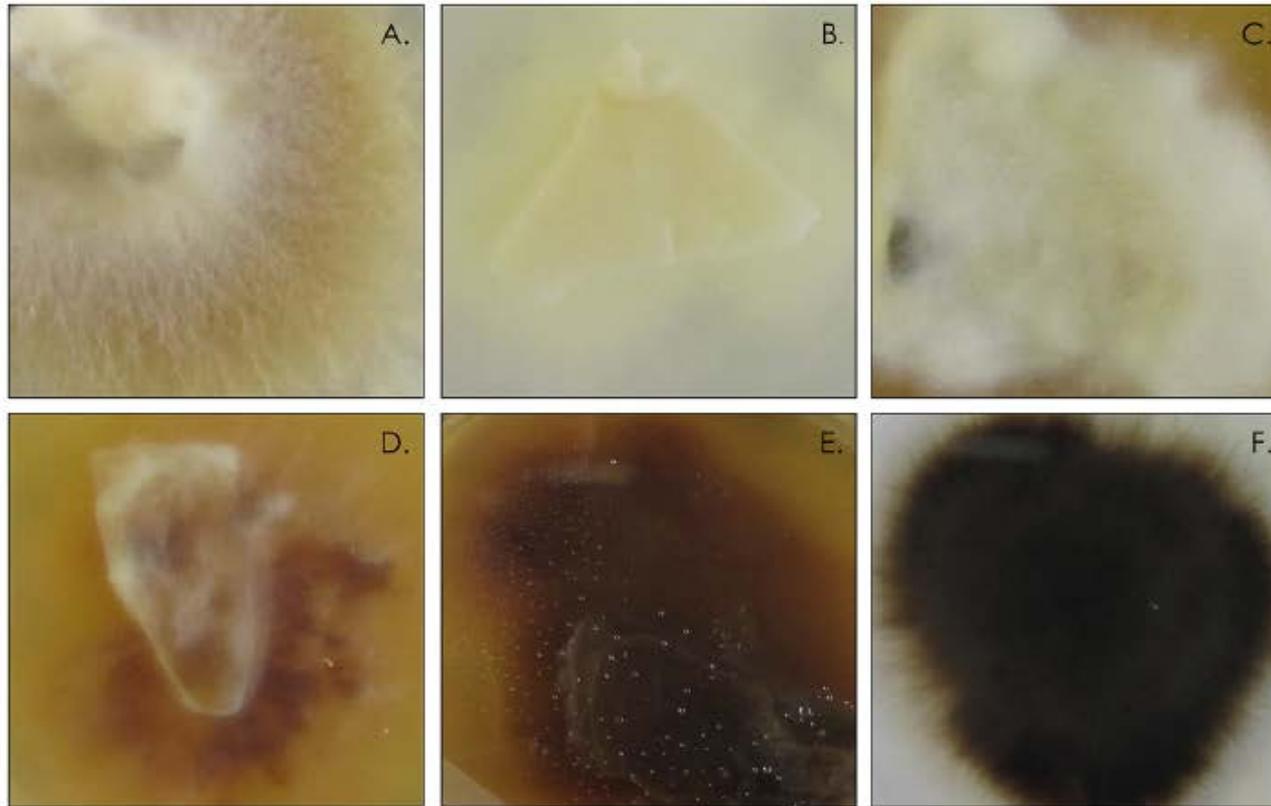


Fig. 1. Photographs of selected isolates grown on potato dextrose agar that were used in the study A. *Tylopilus felleus* (SC201), B. *Lactarius chrysorrheus* (SC016), C. *Scleroderma citrinum* (SC200), D. *Lactarius* sp. (SC202), E. *Thelephora terrestris* (TtTor103), F. *Cenococcum geophilum* (CgTor109). Two *Cenococcum geophilum* isolates (SC032 & CeG02) included in Experiment 1 are not pictured to save space but are similar in appearance to CgTor109.

Pilzkulturen von verschiedenen Ektomycorrhiza-Pilzen mit unterschiedlichem **Melanin-Gehalt**

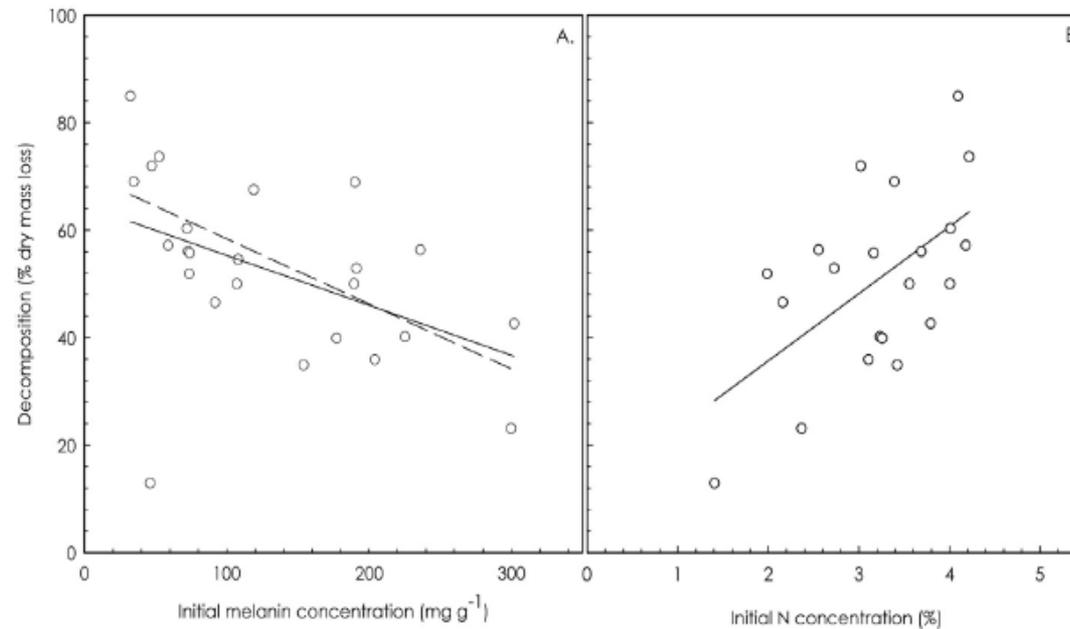


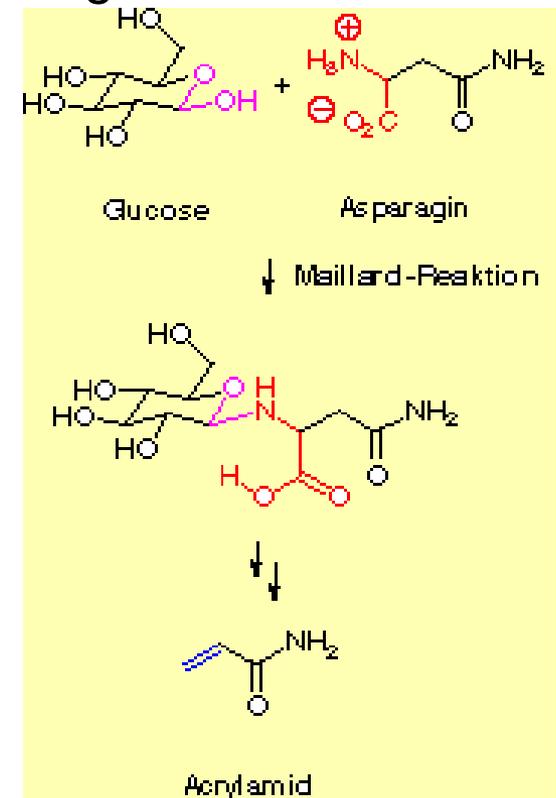
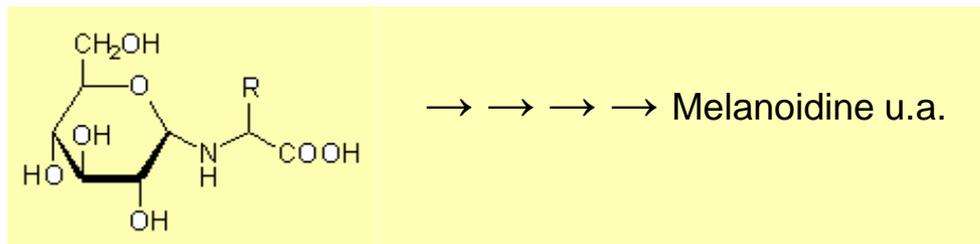
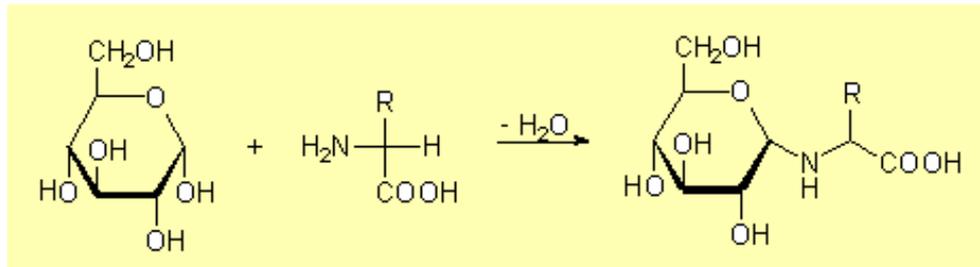
Fig. 4. A. The relationship between initial melanin concentration and decomposition (% mass loss) of EM fungal necromass in Experiment 1, after three months. Best fit line excluding the SC016 replicate c (dashed) $\text{Decomposition (\% mass loss)} = -0.00121 * \text{Melanin concentration} + 0.705$; $n = 23$; $P = 0.0003$; $R^2 = 0.48$. Best fit line including the SC016 replicate c (solid) $\text{Decomposition (\% mass loss)} = -0.00092 * \text{Melanin concentration} + 0.646$; $n = 24$; $P = 0.0219$; $R^2 = 0.22$. **B.** The relationship between initial nitrogen concentration and decomposition (% mass loss) of EM fungal necromass in Experiment 1, after three months. Best fit line $\text{Decomposition (\% mass loss)} = 0.125 * \text{Nitrogen concentration (\%)} + 0.107$; $n = 21$; $P = 0.0064$; $R^2 = 0.33$.

Zersetzung von Pilzyphen mit unterschiedlichem Melaniningehalt: Melanin ist schwer zersetzlich und ähnlich amorph aufgebaut wie Huminstoffe

Bildung von Huminstoffen:

Zucker–Amin-Kondensationstheorie

- Zucker reagieren mit Aminosäuren in einer komplexen Reaktionsfolge u.a. zu braunen Polymeren (Melanoidine)
- *Maillard-Reaktion*, „nicht-enzymatische Bräunung“



Theorien zur Bildung von Huminstoffen (Gisi, 1997)

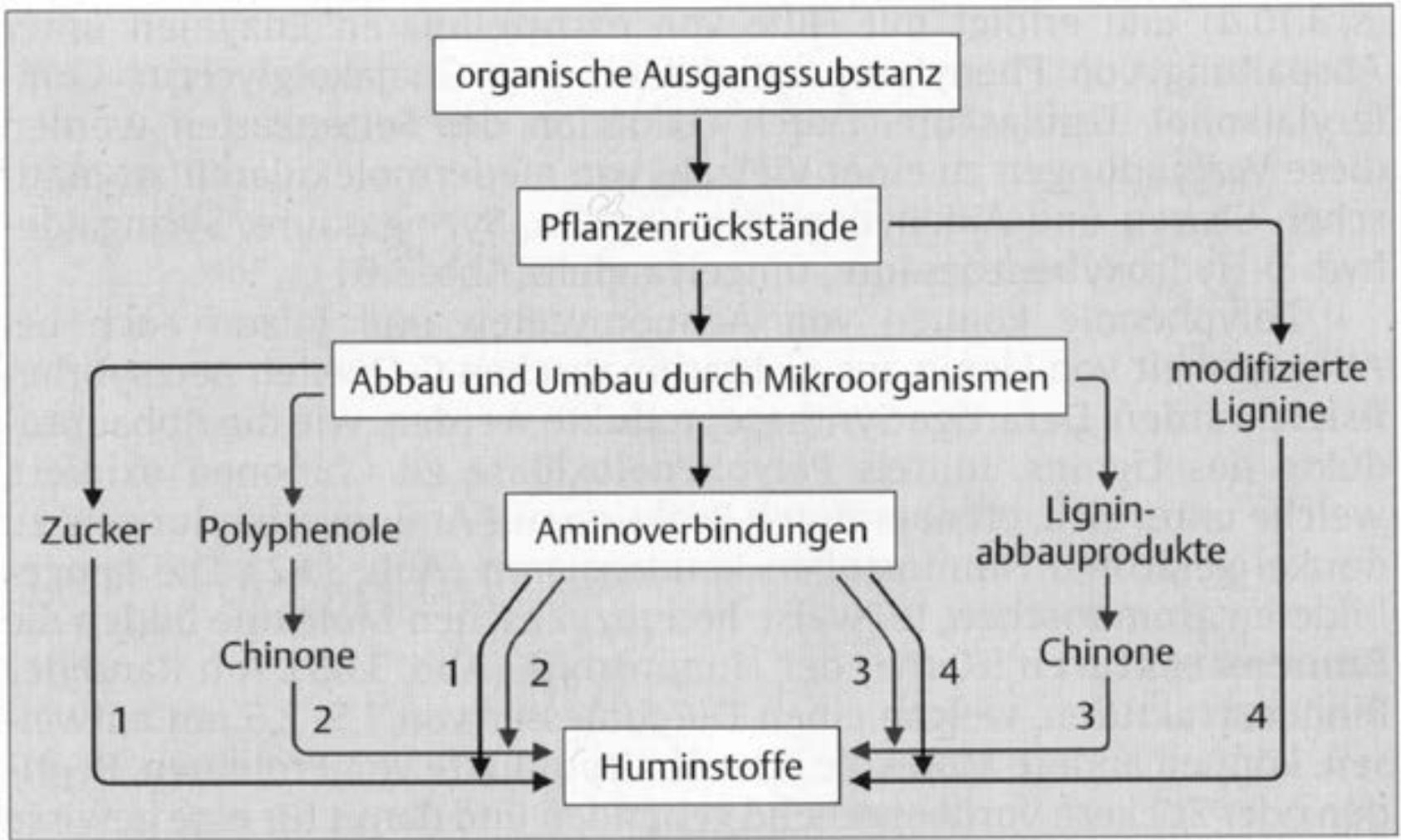


Abb. 3.59 Mögliche Wege (1, 2, 3, 4) der Huminstoffbildung (nach Steven-

son 1982) aus der organischen Ausgangssubstanz

Struktur und Genese von Huminstoffen

A: Makromolekül-Theorie

B: Aggregat-Theorie: Bruchstücke aus der Zersetzung sind über Metallkationen vernetzt

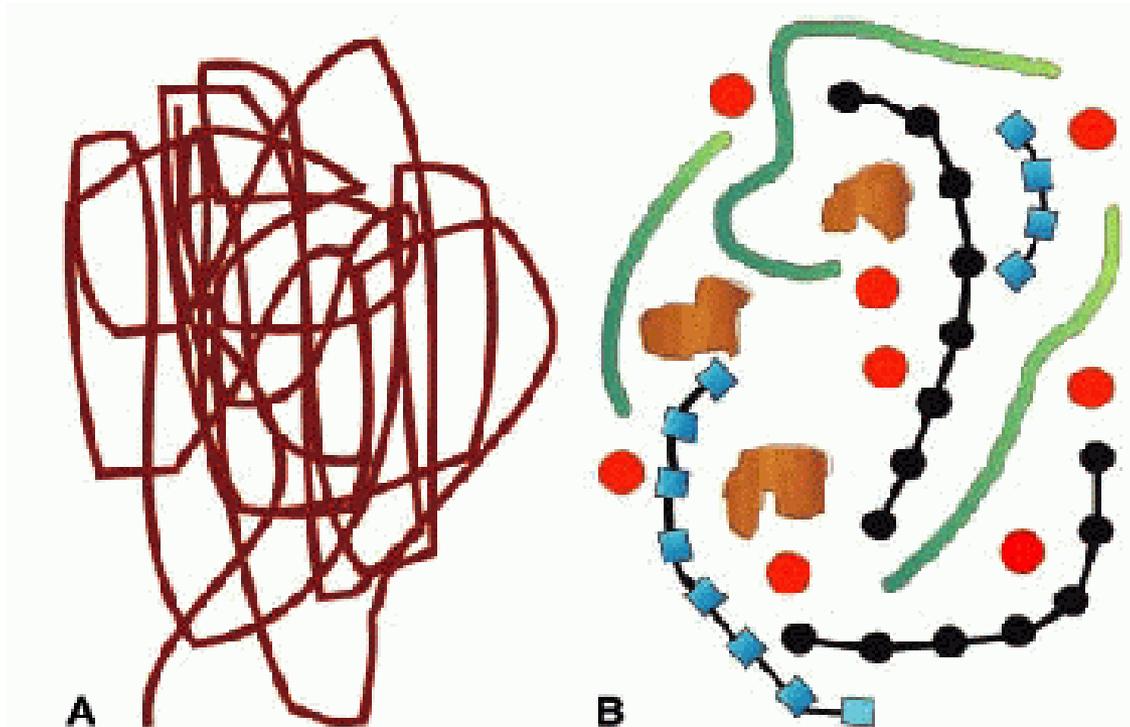
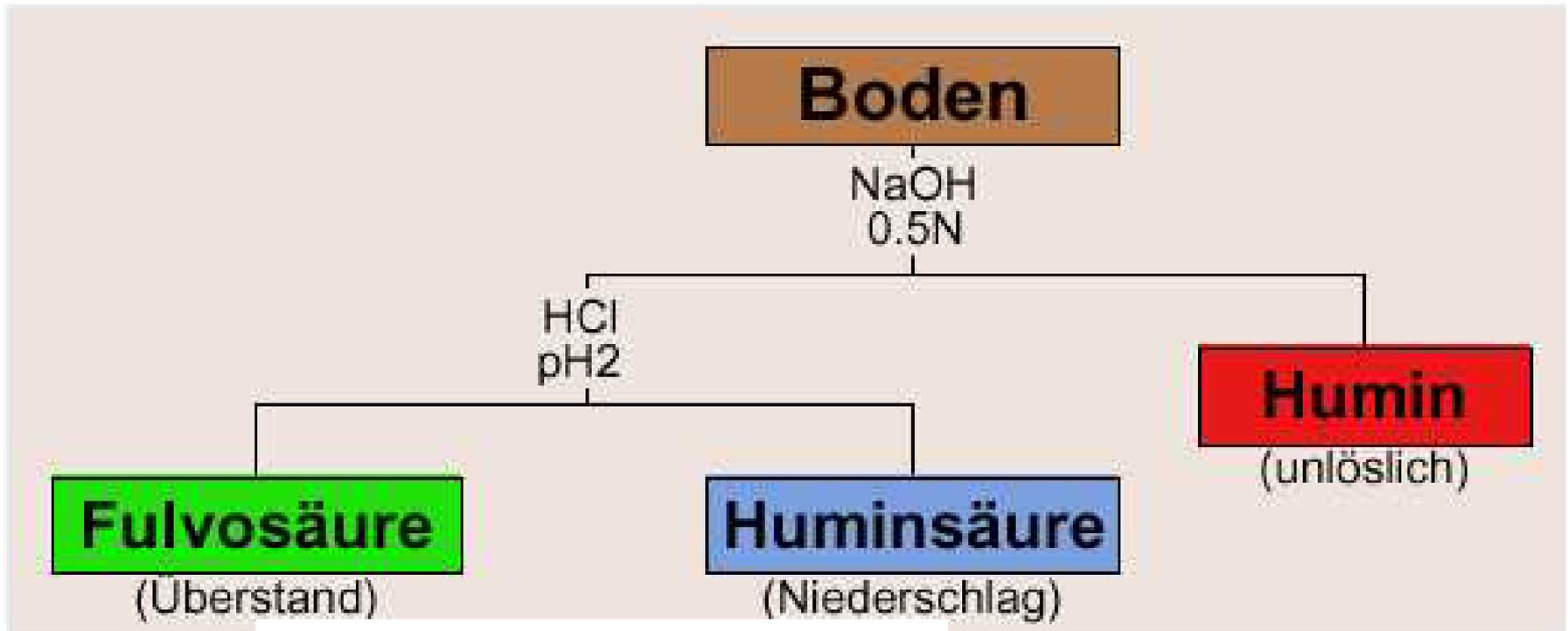


Fig. 2 **A** Depiction of the traditional concept of humic substances (*HS*) as randomly coiled macromolecules (Swift 1989). **B** A new concept, as supported by the range of NMR experiments discussed in this paper, that the major components found in alkaline extractable soil *HS* are in fact of relatively low molecular weight (<2,000 Da) and associate in the presence of metals to form an aggregate. The *red spheres* represent generic metal cations, the *black*

Simpson et al. 2002
(Naturwiss.)

Klassische chemische Fraktionierung der Huminstoffe



FULVIC ACID



HUMIC ACID

Elementare Zusammensetzung von Huminstoffen

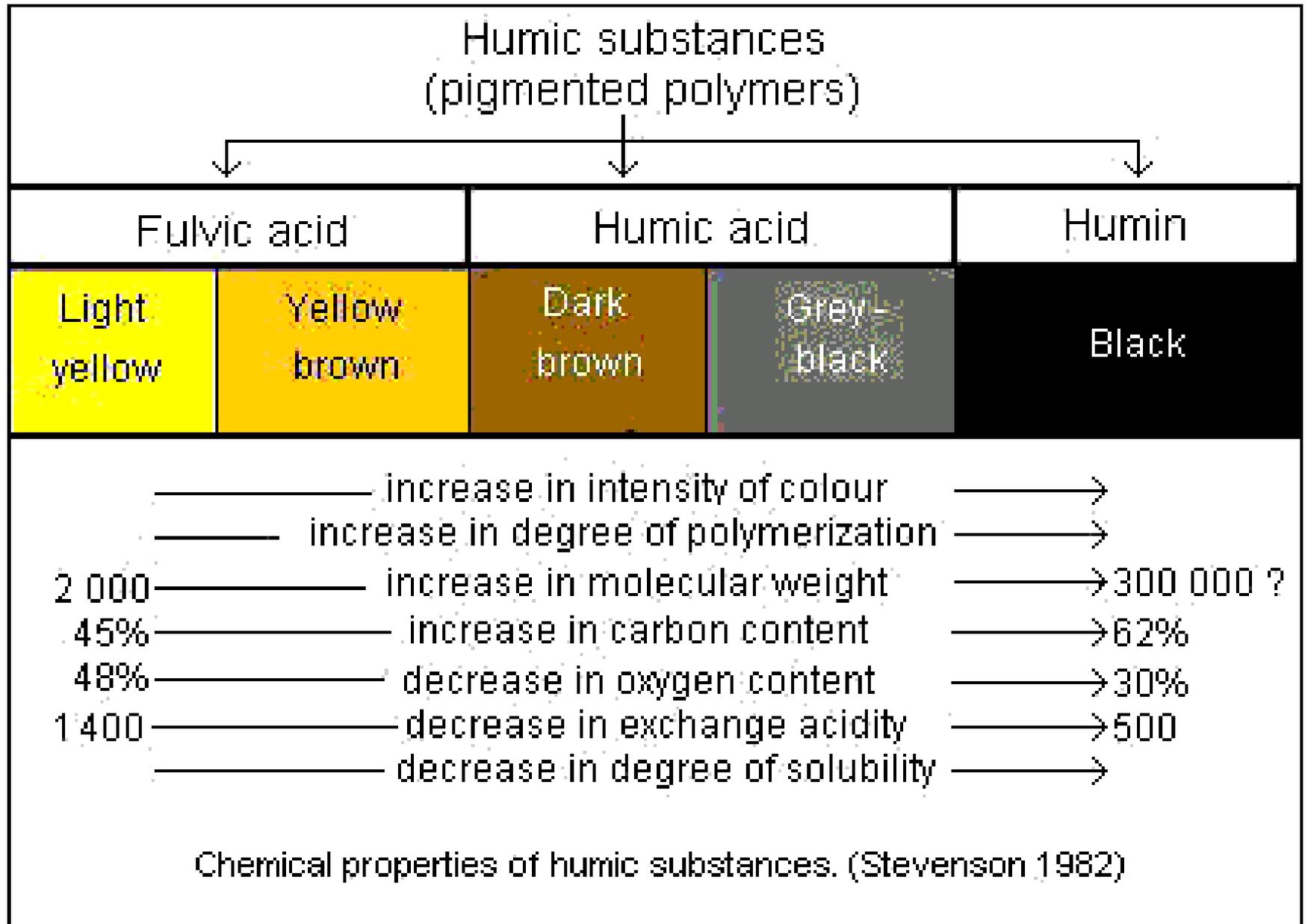
(Sparks 2003)

TABLE 3.4. *Average Values for Elemental Composition of Soil Humic Substances^a*

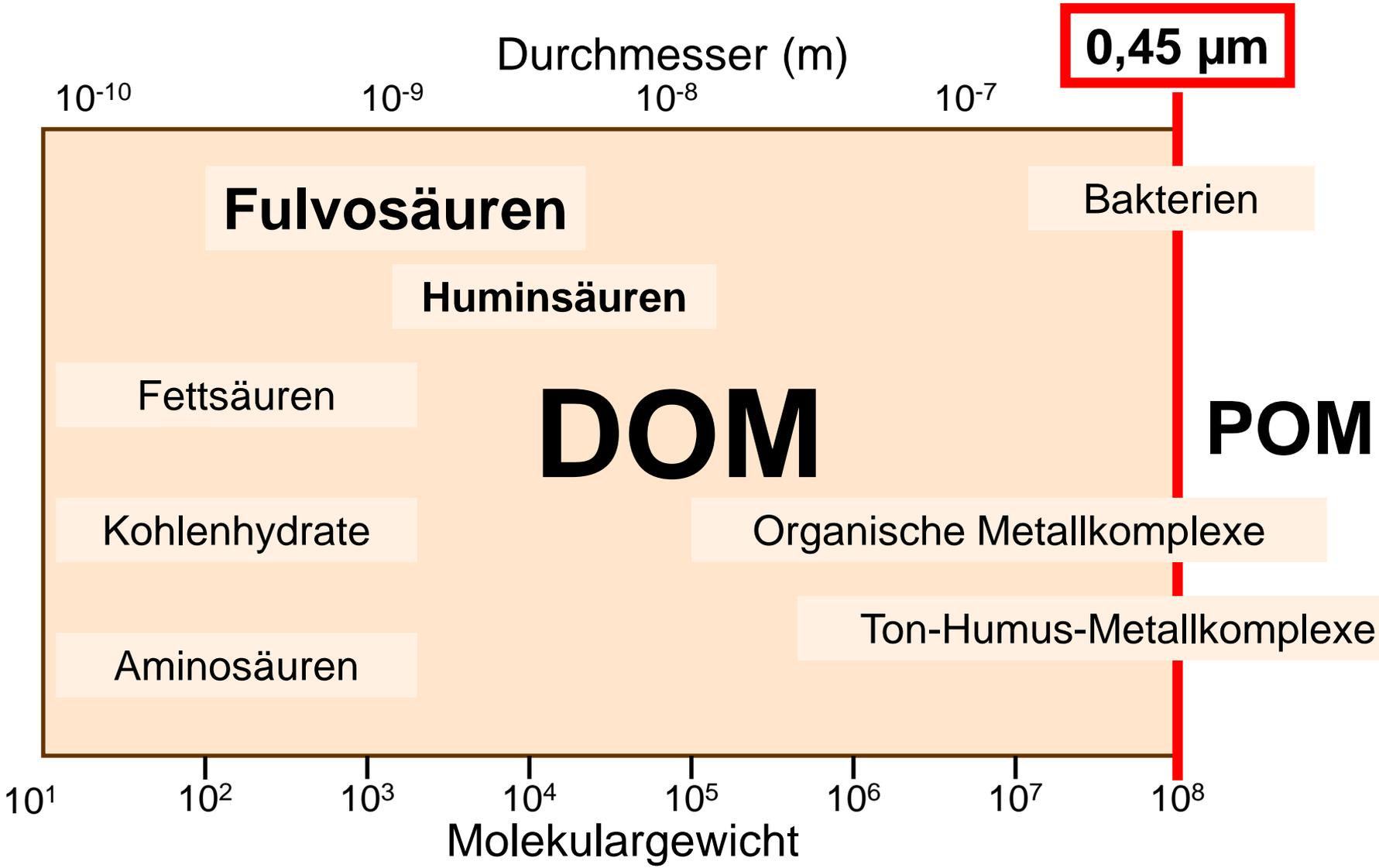
	Humic acids (%)	Fulvic acids (%)
Carbon	53.8–58.7	40.7–50.6
Hydrogen	3.2–6.2	3.8–7.0
Oxygen	32.8–38.3	39.7–49.8
Nitrogen	0.8–4.3	0.9–3.3
Sulfur	0.1–1.5	0.1–3.6

^a From C. Steelink, in “Humic Substances in Soil, Sediments, and Water” (G. R. Aiken, D. M. McKnight, and R. L. Wershaw, Eds.), pp. 457–476. Copyright © 1985 John Wiley & Sons, Inc. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

Eigenschaften von Huminstoffen

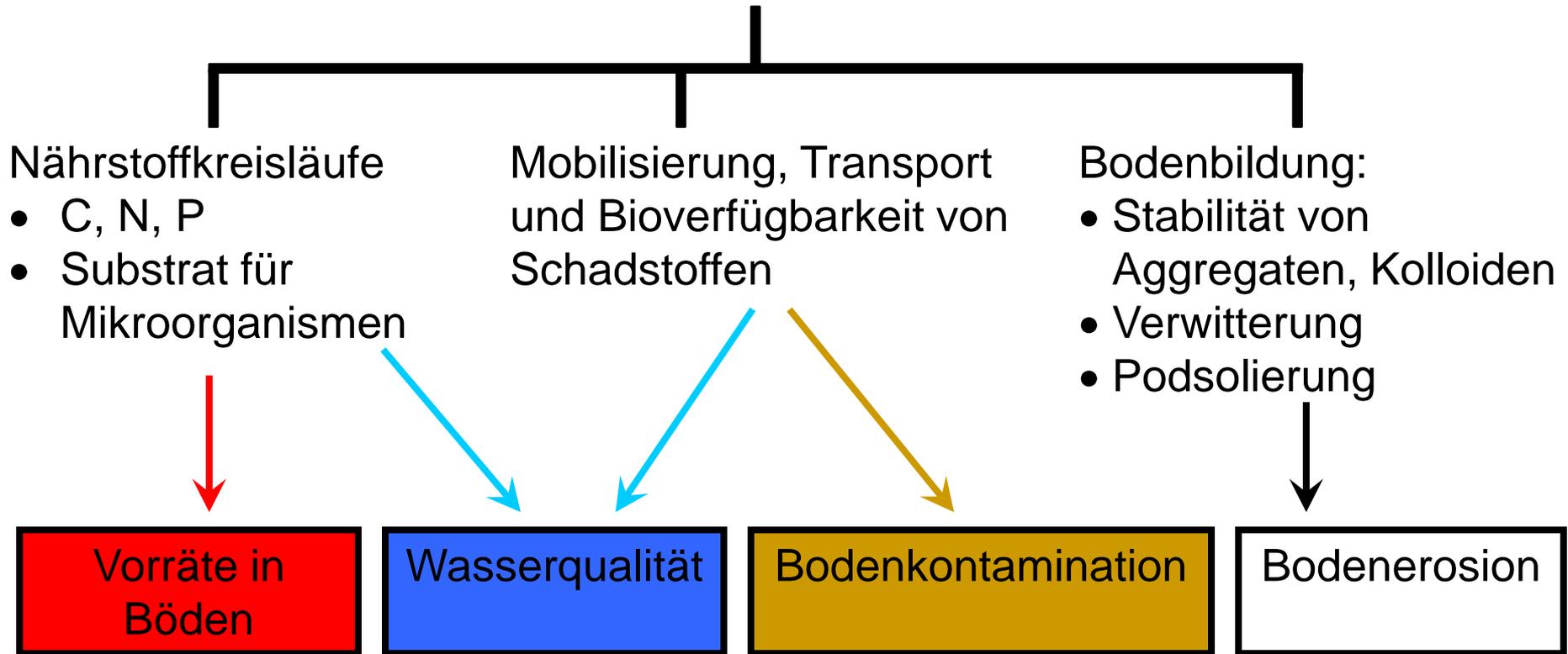


Gelöste organische Substanz: DOM

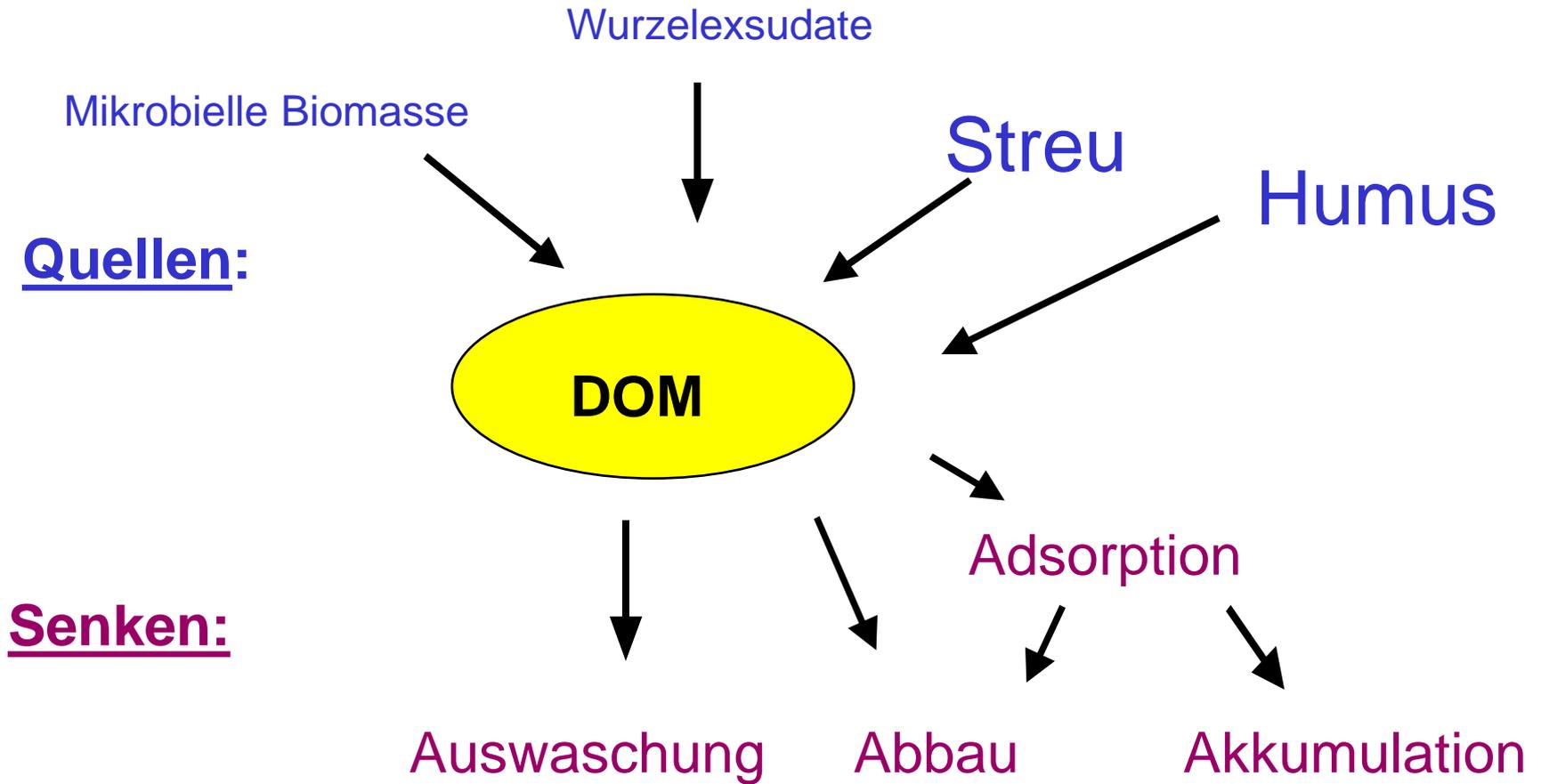




Bedeutung der gelösten organischen Substanz



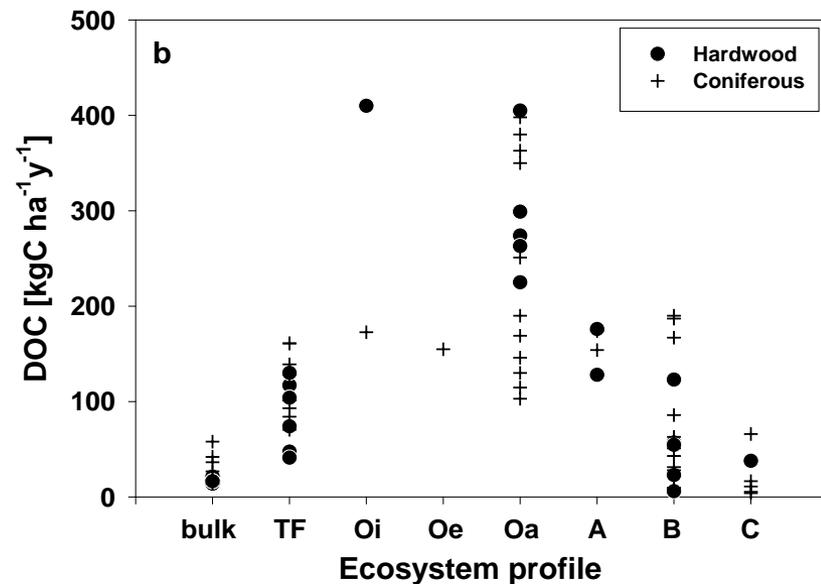
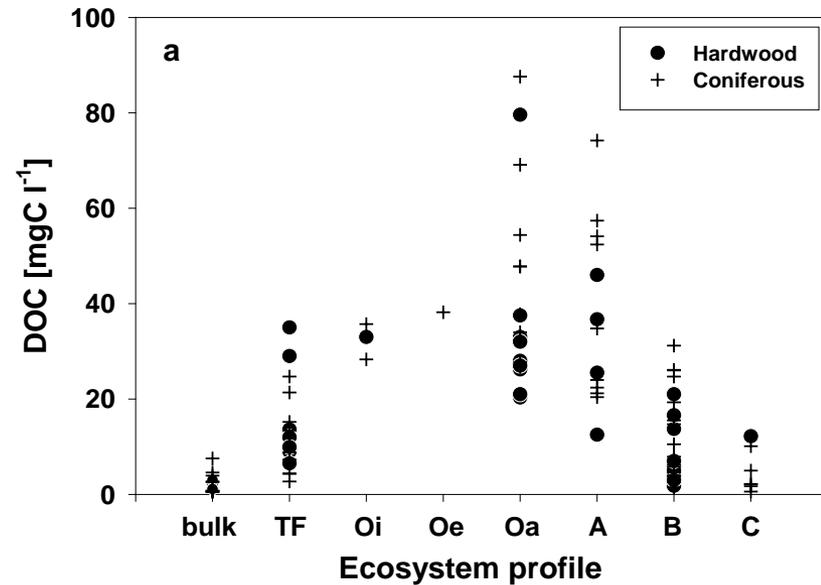
Quellen und Senken für DOM in Böden



DOC Konzentrationen und Flüsse in Waldökosystemen der temperaten Zone

Bulk: Freilandniederschlag
 TF: Kronentraufe
 Oi: Fluss aus der L-Lage
 Oe: Fluss aus der Of-Lage
 Oa: Fluss aus der Oh-Lage
 A,B,C Horizonte + Flüsse

(Michalzik et al. 2001)



Average fluxes of DOC in 22 Bavarian forest soils

(Borken et al. 2011)

