

## **Stoffhaushalt von Waldökosystemen**

Dr. Guntars Martinson, Prof. Heiner Flessa, Prof. Edzo Veldkamp

WS 17/18    Do: 11:15 – 13:00 F03



19.10.2017	Einführung (GM)
26.10.2017	Wasser (GM)
02.11.2017	Kohlenstoff (GM)
09.11.2017	Stickstoff (GM)
16.11.2017	Schwefel (GM)
23.11.2017	Spurenelemente (GM)
30.11.2017	Vergleich Stoffhaushalt in Wälder der gemäßigte Breiten und der Tropen (GM)
07.12.2017	Berechnungen und BZE; Feldversuche zum Wasser- und Stoffhaushalt von Waldökosystemen: Strategie und Instrumentierung (GM)
14.12.2017	Stofftransport zur Wurzel, Phosphor (HF)
21.12.2017	Phosphor (HF)

28.12.2017 - 04.01.2018      Vorlesungsfreie Zeit

- 11.01.2018      Kalium (HF)
- 18.01.2018      Magnesium und Calcium (HF)
- 25.01.2018      Protonenumsetzung in Böden (HF)
- 01.02.2018      Ausweichtermin / Fragenstunde (GM/HF)

## 2 PROZESSE IM WALD

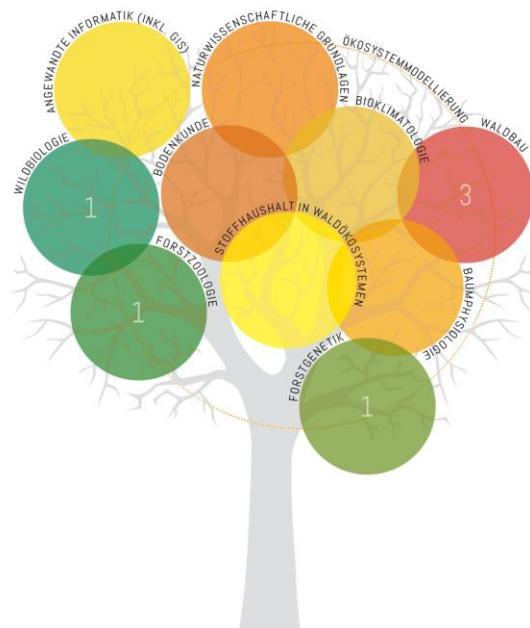
### STOFFHAUSHALT IN WALDÖKOSYSTEMEN

Wie regulieren Wäldern

Wasser- und

Stoffkreisläufe?

Wie beeinflussen globale  
Änderungen (Stoffeinträge,  
Temperatur, Niederschlag)  
den Wald?



### Lernziele:

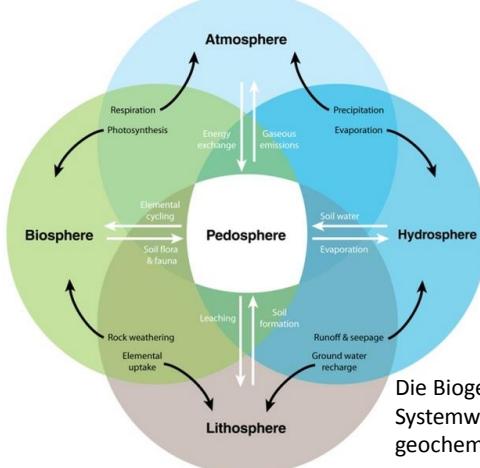
Kenntnis und Bewertung des Wasser- und Nährstoffhaushalts von Waldökosystemen, der Bodenversauerung, sowie der Funktion von Waldökosystemen als Kohlenstoffsenke mit speziellem Fokus auf die Rolle des Bodens.

Aufbauend auf der Bodenkunde-Vorlesung wird in dieser Vorlesung der Wasserhaushalt, Nährstoffhaushalt und Nährstoffkreislauf der wichtigsten Elemente in Waldökosystemen besprochen (Stickstoff, Phosphat, Schwefel, Magnesium, Kalzium, Kalium). Bodenversauerung durch ökosysteminterne Protonenproduktion und externe Einträge werden in Beziehung gesetzt. Weiterhin wird auf den Kohlenstoffhaushalt von Waldökosystemen und deren Bedeutung im globalen Kohlenstoffhaushalt eingegangen.

Dabei werden die Grundlagen und Methoden der **Biogeochemie** angewendet

### Biogeochemie

Die **Biogeochemie** (altgriechisch bios = Leben, ge = Erde, geo- = Erde betreffend, chemeia = Chemie) befasst sich mit den chemischen, biologischen und physikalischen Prozessen, welche dem Aufbau und den Funktionen von Ökosystemen zu Grunde liegen.



Die Biogeochemie ist eine interdisziplinäre Systemwissenschaft, deren Themenkreis alle fünf geochemischen Sphären umfasst

## Elemente für das Leben

<b>H</b>	Wasserstoff	1	1.07 -259.14 -252.87 2.2	Relative Atommasse (g/mol) Schmelzpunkt Siedepunkt Elektronegativität	<b>He</b>
<b>Li</b>	Metalle	3	7.01 -110.0 -97.8 1.0		<b>Be</b>
<b>Be</b>	Metalle	4	9.01 -96.6 -92.5 1.5		<b>C</b>
<b>Na</b>	Metalle	11	22.99 -97.8 -92.0 0.96		<b>O</b>
<b>Mg</b>	Metalle	12	24.31 -97.8 -92.0 0.96		<b>F</b>
<b>K</b>	Kalzium	19	39.10 -97.8 -92.0 0.96		<b>Ne</b>
<b>Ca</b>	Kalzium	20	40.08 -97.8 -92.0 0.96		<b>Ar</b>
<b>Sc</b>	Kalziumketale	21	44.96 -97.8 -92.0 0.96		<b>B</b>
<b>Ti</b>	Transitionsmetalle	22	47.87 -97.8 -92.0 0.96		<b>P</b>
<b>V</b>	Transitionsmetalle	23	50.94 -97.8 -92.0 0.96		<b>N</b>
<b>Cr</b>	Transitionsmetalle	24	51.99 -97.8 -92.0 0.96		<b>S</b>
<b>Mn</b>	Transitionsmetalle	25	54.94 -97.8 -92.0 0.96		<b>Cl</b>
<b>Fe</b>	Transitionsmetalle	26	55.85 -97.8 -92.0 0.96		<b>Br</b>
<b>Co</b>	Transitionsmetalle	27	58.93 -97.8 -92.0 0.96		<b>Kr</b>
<b>Ni</b>	Transitionsmetalle	28	58.93 -97.8 -92.0 0.96		<b>Ga</b>
<b>Zn</b>	Transitionsmetalle	29	65.41 -97.8 -92.0 0.96		<b>Ge</b>
<b>Al</b>	Alkalimetalle	30	69.72 -97.8 -92.0 0.96		<b>As</b>
<b>Si</b>	Alkalimetalle	31	70.90 -97.8 -92.0 0.96		<b>Se</b>
<b>P</b>	Alkalimetalle	32	74.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Br</b>
<b>S</b>	Alkalimetalle	33	78.96 -97.8 -92.0 0.96		<b>I</b>
<b>Cl</b>	Alkalimetalle	34	79.90 -97.8 -92.0 0.96		<b>Xe</b>
<b>Ar</b>	Alkalimetalle	35	83.80 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Y</b>	Vanadium	39	88.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Zr</b>
<b>Zr</b>	Vanadium	40	91.24 -97.8 -92.0 0.96		<b>Mo</b>
<b>Rf</b>	Rhenium	41	91.24 -97.8 -92.0 0.96		<b>Tc</b>
<b>Hf</b>	Hafnium	72	100.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Ta</b>
<b>Ta</b>	Hafnium	73	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>W</b>
<b>Db</b>	Dysprosium	105	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Os</b>
<b>Sg</b>	Samarium	106	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Ir</b>
<b>Bh</b>	Berkelium	107	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Pt</b>
<b>Hs</b>	Hahnium	108	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Au</b>
<b>Mt</b>	Mithibium	109	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Hg</b>
<b>Ds</b>	Darmstadtium	110	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Tl</b>
<b>Rg</b>	Rutherfordium	111	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Pb</b>
<b>Cn</b>	Curium	112	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Bi</b>
<b>Uut</b>	Ununtrium	113	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Po</b>
<b>Uuo</b>	Ununquadium	114	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>At</b>
<b>Fr</b>	Francium	115	101.92 -97.8 -92.0 0.96		<b>Rn</b>
<b>Ra</b>	Radium	116	101.92 -97.8 -92.0 0.96		
<b>[87]</b>		117			
<b>[88]</b>		118			
<b>[104]</b>					
<b>[105]</b>					
<b>[106]</b>					
<b>[107]</b>					
<b>[108]</b>					
<b>[109]</b>					
<b>[110]</b>					
<b>[111]</b>					
<b>[112]</b>					
<b>[113]</b>					
<b>[114]</b>					
<b>[115]</b>					
<b>[116]</b>					
<b>[117]</b>					
<b>[118]</b>					
<b>La</b>	Lanthanide	57	138.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Lu</b>
<b>Ce</b>	Cerium	58	140.12 -97.8 -92.0 0.96		<b>Yb</b>
<b>Pr</b>	Praseodym	59	140.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Tm</b>
<b>Nd</b>	Nd	60	142.01 -97.8 -92.0 0.96		<b>Er</b>
<b>Pm</b>	Promethium	61	144.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Dy</b>
<b>Sm</b>	Samarium	62	144.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Tb</b>
<b>Eu</b>	Europium	63	145.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Tb</b>
<b>Gd</b>	Gadolinium	64	147.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Dy</b>
<b>Tb</b>	Terbium	65	148.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Er</b>
<b>Dy</b>	Dysprosium	66	149.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Er</b>
<b>Tm</b>	Thulium	67	149.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Yb</b>
<b>Lu</b>	Lutetium	68	150.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Tm</b>
<b>Yb</b>	Ytterbium	69	151.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Lu</b>
<b>Er</b>	Erbium	70	152.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Yb</b>
<b>Tb</b>	Terbium	71	154.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Lu</b>
<b>Ac</b>	Actinium	89	158.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Es</b>
<b>Th</b>	Thorium	90	158.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Fm</b>
<b>Pa</b>	Protactinium	91	158.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Md</b>
<b>U</b>	Uranium	92	158.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>No</b>
<b>Np</b>	Nepalium	93	158.91 -97.8 -92.0 0.96		<b>Lr</b>
<b>Pu</b>	Plutonium	94	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Cm</b>	Curium	95	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Blk</b>	Berkelium	96	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Cf</b>	Cf	97	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Es</b>	Es	98	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Fm</b>	Fm	99	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Md</b>	Md	100	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>No</b>	No	101	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Uuo</b>	Ununquadium	102	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Uup</b>	Ununpentium	103	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Uuh</b>	Ununhexium	104	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Uus</b>	Ununseptium	105	158.91 -97.8 -92.0 0.96		
<b>Uuo</b>	Ununoctium	106	158.91 -97.8 -92.0 0.96		

Nur 6 Elemente bilden 95% der Masse der Biosphäre:

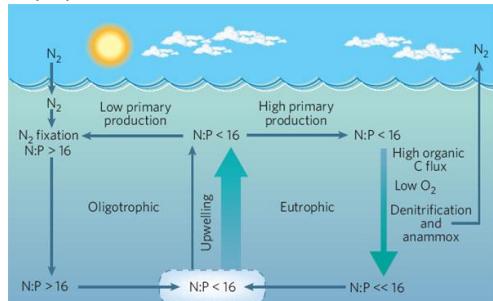
Einige Grundlagen der Biogeochemie: Elementverhältnisse

## Nährstoffverhältnisse („Stöchiometrie“)

Organismen haben eine relativ konstante Verhältnis der Elemente C, N & P

Ursprung: Redfield-Verhältnis (engl. „Redfield Ratio“)

maritime Phytoplankton: C:N:P = 106 Mol C : 16 Mol N : 1 Mol P



Die durchschnittlichen C:N:P Verhältnisse für Landpflanzen sind etwa 200:13:1

### Einige Grundlagen der Biogeochemie: Elementverhältnisse

Waldbiome (Vitousek et al. 1988)	Biomasse t/ha	% Gesamtbiomasse			Element- verhältnisse		
		Stamm	Ast	Blatt	Wurzel	C:N	N:P
Borealer Wald	233	62.8	10.2	4.5	22.6	143	8.7
Gemäßiger Laubwald	286	63.1	16.2	1.1	19.5	165	8.4
Tropischer Wald	494	59.8	21.8	1.9	16.4	161	8.6

**Elementverhältnisse** – Variation innerhalb relativ enger Grenzen

**Pass auf!** C/N Verhältnisse werden errechnet für Gesamtbiomasse: C/N Verhältnisse werden grösser, wenn Anteil an Holz zunimmt.

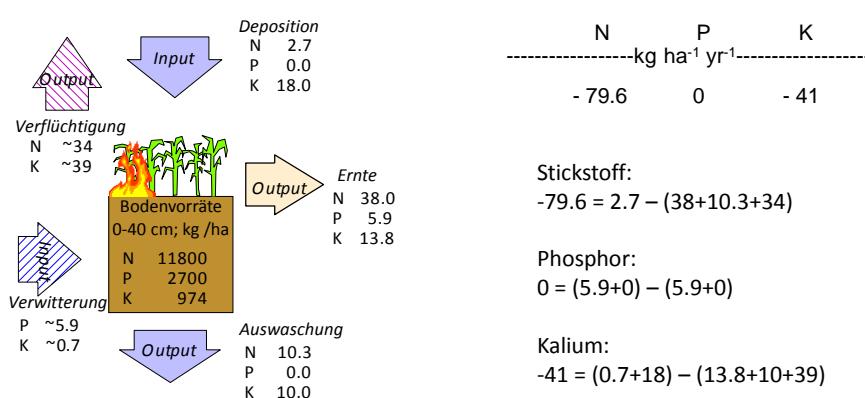
**Bedeutung:** Stoffzyklen sind durch von lebenden Organismen produzierte organische Moleküle untrennbar verbunden. Störung eines Kreislaufs (z.B. Stickstoff), führt häufig zu einer Störung eines anderen Kreislaufs (z.B. Phosphor)!

→ Aus Elementverhältnisse kann man die Nährstoffverfügbarkeit und eventuelle Störungen in der Nährstoffversorgung ablesen

### Einige Grundlagen der Biogeochemie: Massenbilanzen

Nettoveränderung ( $T_0-T_1$ ) = Input – Output  $\pm$  interne Veränderungen

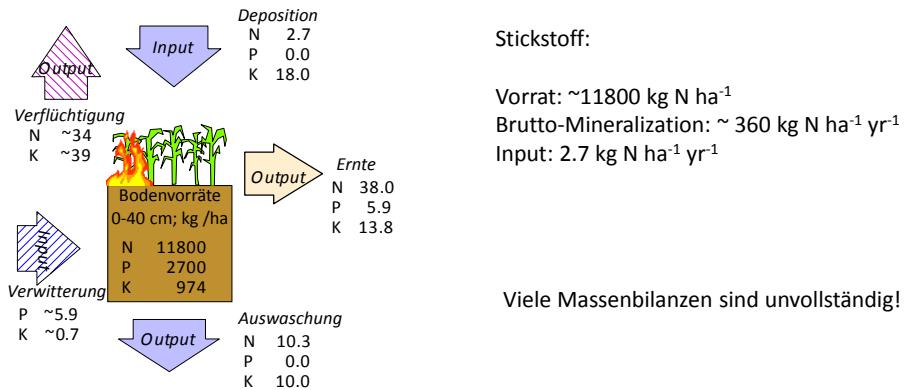
$T_0-T_1$  = Periode



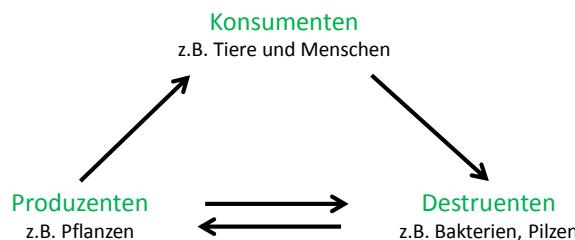
### Einige Grundlagen der Biogeochemie: Massenbilanzen

Vorräte der meisten Elemente im Boden >>> Stoffumsetzungen im Boden

Stoffumsetzungen im Ökosystem >> Einträge bzw. Austräge



### Einige Grundlagen der Biogeochemie: Stoffkreisläufe

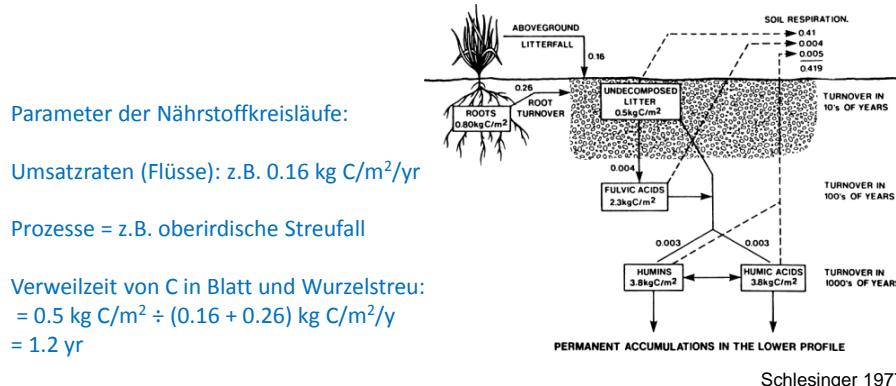


Einfaches Beispiel eines Stoffkreislaufs

## Einige Grundlagen der Biogeochemie: Stoffkreisläufe

Ein (Nähr-)stoffkreislauf beschreibt, wo und wie schnell Elemente sich in ein Ökosystem bewegen

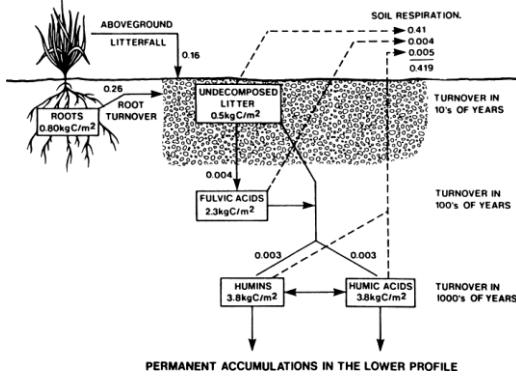
Beispiel: Umsatz von Streu und Humusfraktionen eines Grünlands in den USA.  
Vorräte („pools“) in Rechtecken: kg C/m<sup>2</sup>; Flüsse als Pfeile: kg C/m<sup>2</sup>/yr



## Methoden der Biogeochemie: Feldexperimente

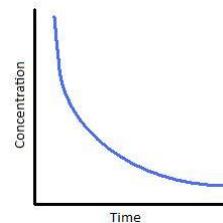


## Methoden der Biogeochemie: Modelle



$$\frac{dC}{dt} = -kC$$

Abbaurate abhängig von Vorrat:  
'Kinetik erster Ordnung'

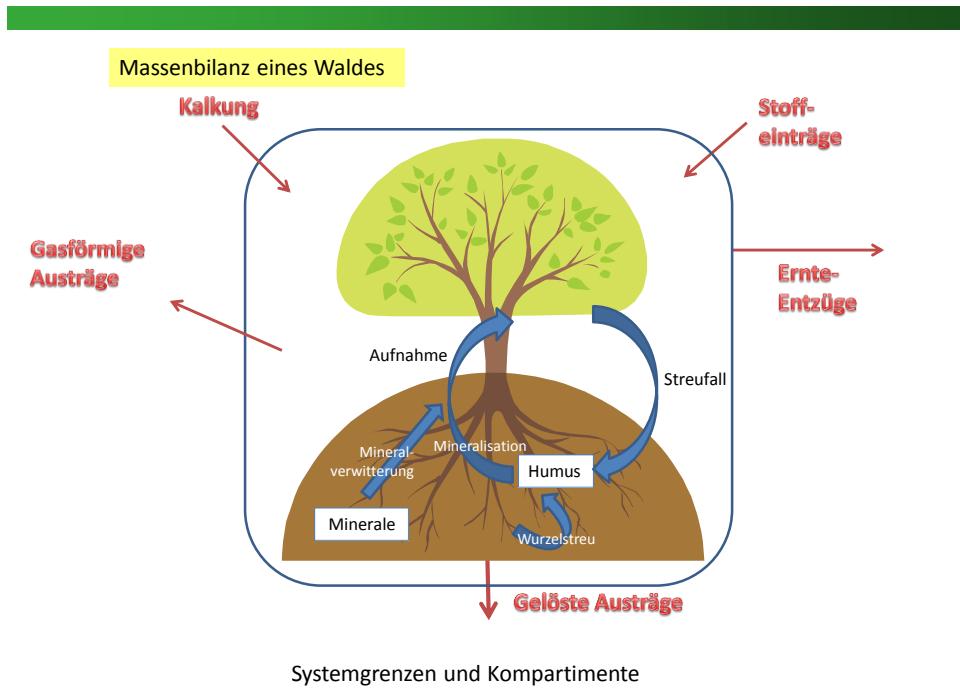


Einbau Randbedingungen: z.B. der Thermodynamik oder Stöchiometrie

## Umweltproblemfelder

Einige wichtige aktuelle Umweltproblemfelder werden mit Hilfe von biogeochemischen Ansätzen untersucht:

- Bodenversauerung und Gewässerversauerung
- terrestrische und aquatische Eutrophierung
- Waldzustand und Waldschäden
- Bodeneintrag aus der Atmosphäre und Prozesse im Boden
- Klimawandel, Ursache und Folge, CO<sub>2</sub>-Kreislauf
- Die chemische Veränderung der Atmosphäre und ihre Folgen für die Vegetation



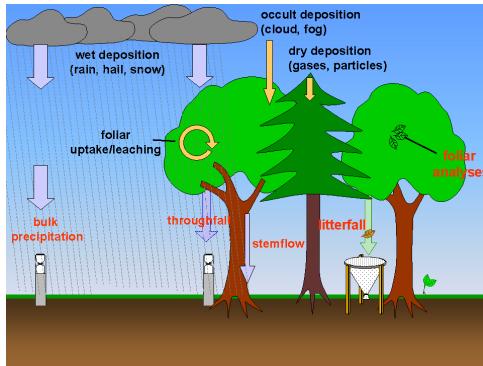
**Einträge:** Atmosphärische Depositionen, Mineralverwitterung, Kalkung  
**Austräge:** Austräge mit dem Sickerwasser, gasförmige Austräge, Ernteentzüge (in bewirtschafteten Beständen)

Weiterhin müssen bei der Input/Output Bilanz die Veränderungen im Boden und Vegetation berücksichtigt werden:

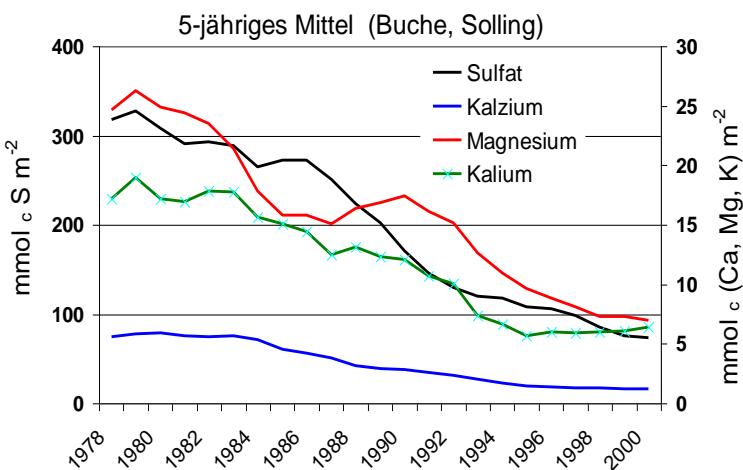
$$\text{Atmosphärische Einträge} + \text{Mineralverwitterung} = \text{Gasförmige Austräge} + \text{Sickerwasserausträge} + \text{Ernteasträge} + \Delta \text{Boden} + \Delta \text{Vegetation}$$

Input: atmosphärische Depositionen (naß und trocken)

Wichtig für:  $\text{H}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , DON,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , DOC

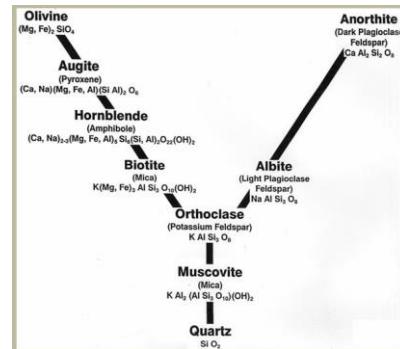


Input: atmosphärische Depositionen (naß und trocken)



Input: Mineralverwitterung

Wichtig für:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$



Basalt-Verwitterung (Australien)

Input: Mineralverwitterung

Minerals	Solid weathering products	Soluble ions in solution
Feldspar	Clay minerals	+ $\text{Na}^{1+}$ and $\text{Ca}^{2+}$
Fe-Mg mineral	Clay minerals	+ $\text{Mg}^{2+}$
Magnetite	Goethite	
Feldspar	Clay minerals	+ $\text{Na}^{1+}$ and $\text{K}^{1+}$
Mica	Clay minerals	+ $\text{K}^{1+}$
Fe-Mg mineral	Clay minerals and goethite	+ $\text{Mg}^{2+}$
Quartz	Quartz	

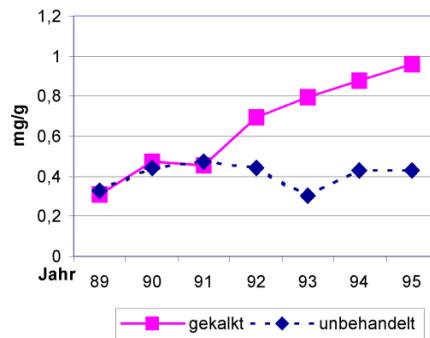
Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

**Input: Kalkung**

Wichtig für:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$



Magnesiumgehalt in 2-jährigen Fichtennaden

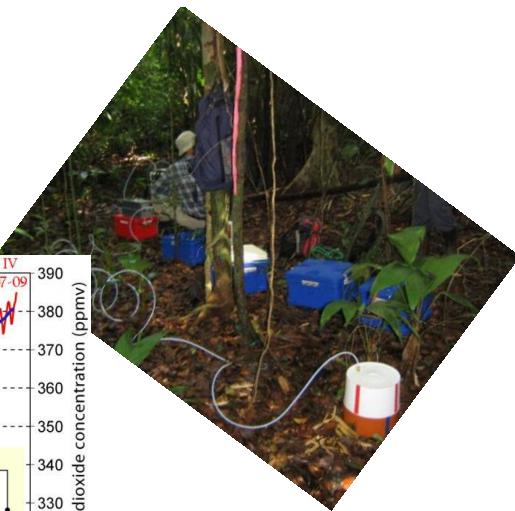
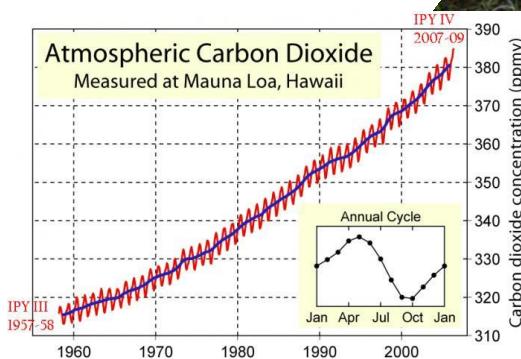


Bodenschutzkalkung 1991

**Output: Austräge mit dem Sickerwasser**

Wichtig für:  $\text{NO}_3^-$ , DON,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , DOC



**Output: gasförmige Austräge**Wichtig für:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , NO,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ **Output: Ernteentzüge**

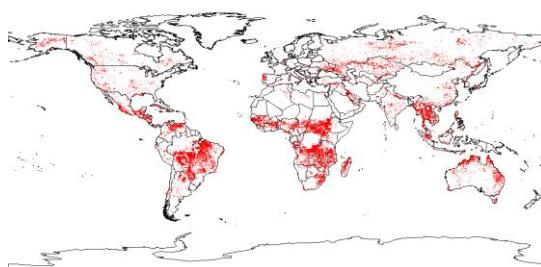
Output: Feuer (unbedeutend in deutschen Wäldern)

Wichtig für: C, N, S, Ca, Mg, K, P

Nährstoffverluste durch Feuer in einem borealer Wald (Kanada)

	Concentration (g/m <sup>2</sup> )						
	SOM	C	N	Ca	K	Mg	P
Tau-based loss	-2988 (390)	-1421 (267)	-27 (10)	-3 (29)	-6 (1)	-3 (2)	-11 (3)
Change in stock	-2384 (815)	-1071 (537)	-17 (15)	19 (90)	-2 (49)	-2 (24)	-0 (3)

Note: Tau-based loss estimates are based on composite fuel calculations of six replicate profiles using Al as the stable constituent. See



Output: Erosion (eher unbedeutend in den meisten Wäldern)

Potentiell wichtig für alle Nährstoffe aber im Wald selten



## Zusammenfassung

- 1) Biogeochemie: befasst sich mit den chemischen, biologischen und physikalischen Prozessen, welche dem Aufbau und den Funktionen von Ökosystemen zu Grunde liegen.
- 2) Biogeochemische Ansätze sind unverzichtbar bei der Analyse und Lösung wichtiger Umweltprobleme wie z.B. Bodenversauerung, Waldschäden und Klimawandel
- 3) Biogeochemische Grundlagen:
  - Aus Elementverhältnisse kann man die Nährstoffverfügbarkeit und eventuelle Störungen ablesen
  - Massenbilanzen weisen auf gestörte Nährstoffbilanzen hin und geben Einsicht in die zentrale Rolle des Bodens
  - Stoffkreisläufe beschreiben, welche Prozesse wichtig sind und wo und wie schnell Elemente sich in einem Ökosystem bewegen. Ermöglicht die Berechnungen wichtiger Größen (z.B. Verweilzeit in einem Pool, etc.)

- 4) Massenbilanz eines deutschen Waldes:

Atmosphärische Einträge + Mineralverwitterung + Kalkung =  
Gasförmige Austräge + Sickerwasserausträge + Ernteasträge +  $\Delta$  Boden +  $\Delta$  Vegetation

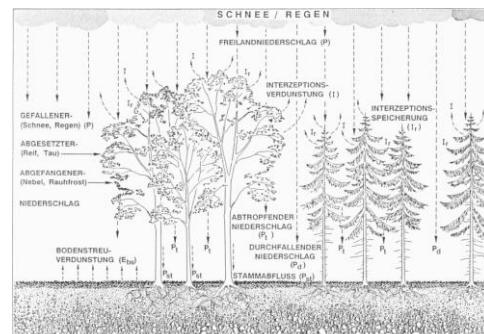


# Stoffhaushalt von Waldökosystemen

## Wasserhaushalt



E. Veldkamp  
Ökopedologie, Uni-Göttingen



### Vorlesungsgliederung

#### A. Globaler Wasserkreislauf

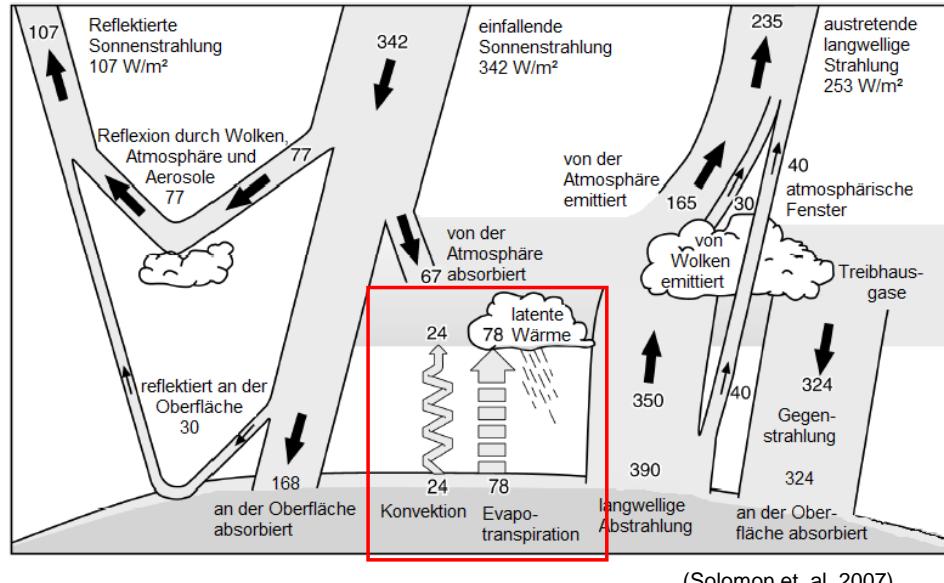
#### B. Wasserhaushalt (Wald)

#### C. Wasserhaushaltskomponenten

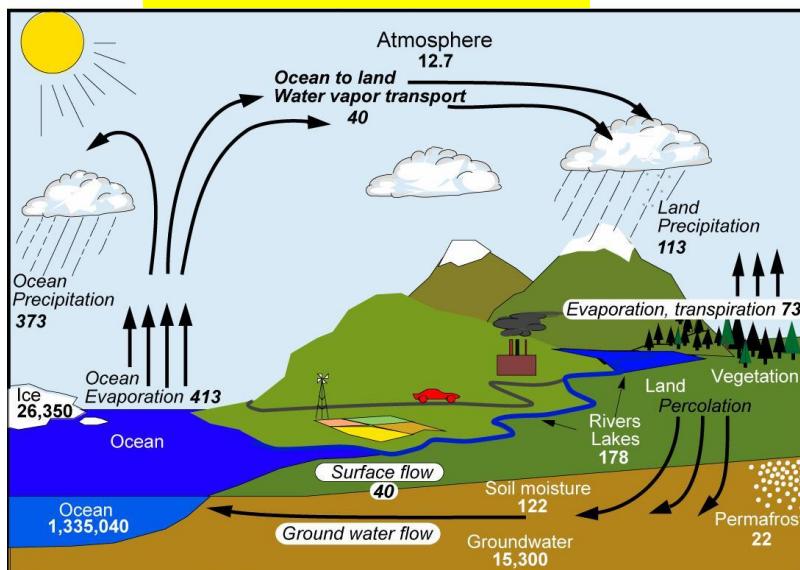
#### D. Flüsse

#### E. Wasserbilanzen

### A: Globale mittlere Energiebilanz

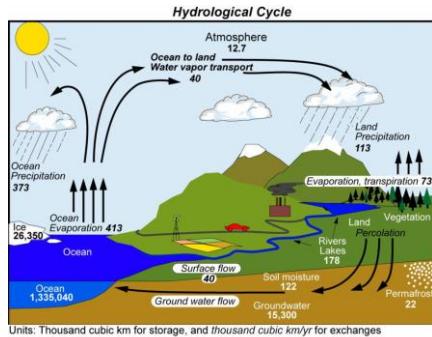


### A: Globaler Wasserkreislauf



(Trenberth, 2007)

## A: Globaler Wasserkreislauf



	Wassermenge [km³]	Anteil [%]
Gesamt	1.384 120 000	100,00
Salzwasser (Meer)	1.348 000 000	97,39
Süßwasser (gesamt)	36 020 000	100,2,60
Süßwasser		
Wasser in Polareis, Meereis, Gletschern	27 820 000	77,23 2,01
Grundwasser, Bodenfeuchte	8 062 000	22,38 0,58
Wasser in Flüssen und Seen	225 000	0,62 0,02
Wasser in der Atmosphäre	13 000	0,04 0,001

	Mittlere Verweilzeit $t_0$
verdunstendes Regenwasser	s - min
biologisches Wasser	einige h
Atmosphäre	9,5d
flusswasser	16d
Bodenfeuchte	1a
"Sumpfwasser"	5a
Seewasser	17a
Oberflächengrundwasser	1400a
außerpolare Gletscher	1600a
Weltmeere	2500a
polare Eiskappe	9700a
Tiefengrundwasser	10000a
Eis im Permafrost	10000a

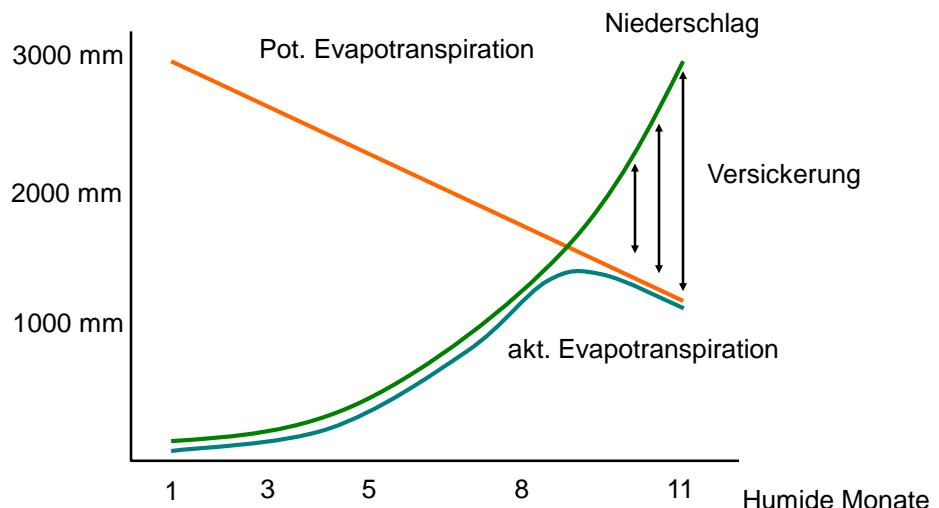
## A: Beitrag der „Wasserfliesswege“

Relativer Beitrag der Wasserfliesswege in verschiedenen Waldbiome

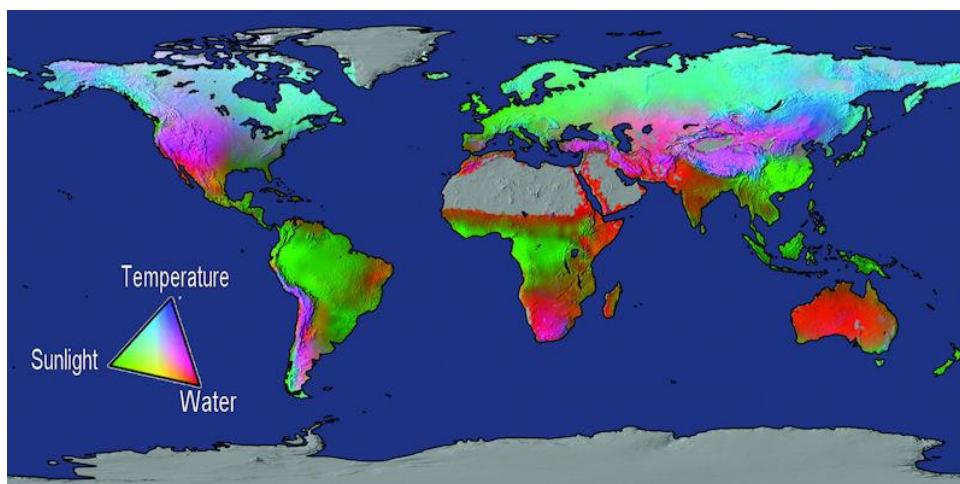
Waldbiome	Niederschlag mm/Jahr	Transpiration %	Evaporation %	Versickerung %	T/ET
Borealer Wald	502	39	35	26	53%
Gemäßiger Nadelwald	725	37	22	41	63%
Gemäßiger Laubwald	763	33	15	52	69%
Tropischer Wald	2209	56	11	32	84%

(Schlesinger & Bernhardt, 2013)

## A: Welche Faktoren kontrollieren die Verdunstung?



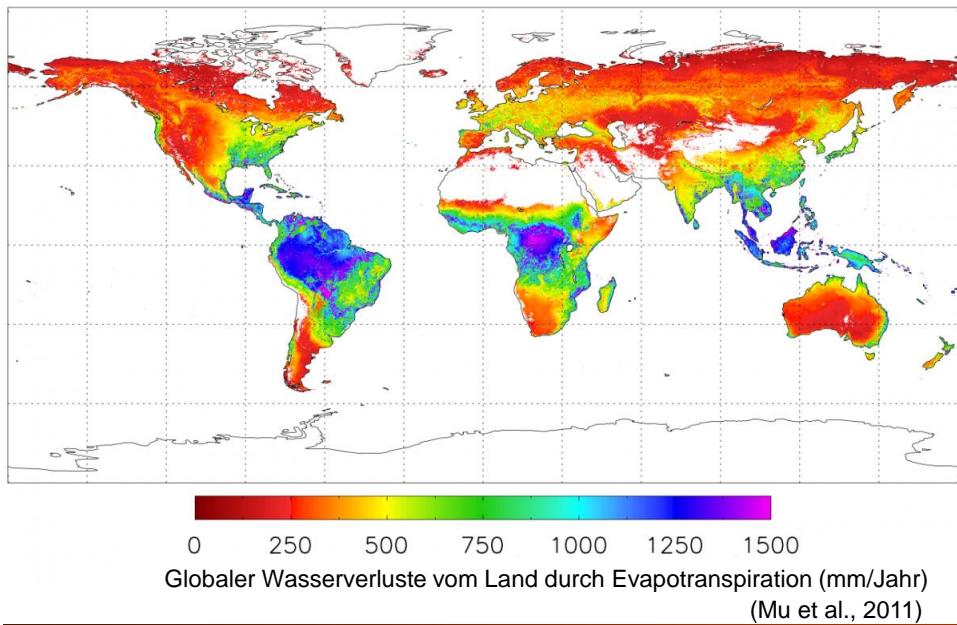
## A: Welche Faktoren kontrollieren die Verdunstung?



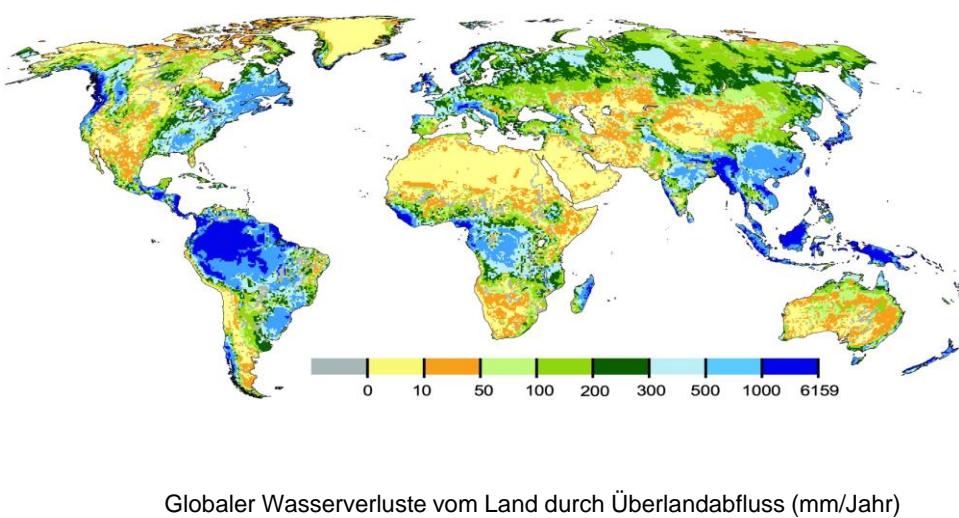
Hauptkontrollfaktoren der Wasserflüsse im globalen Wasserkreislauf

(Churkina & Running, 1998)

A: aktuelle Evapotranspiration



A: Überlandabfluss



(Döll et al., 2003)

## B. Wasserhaushalt

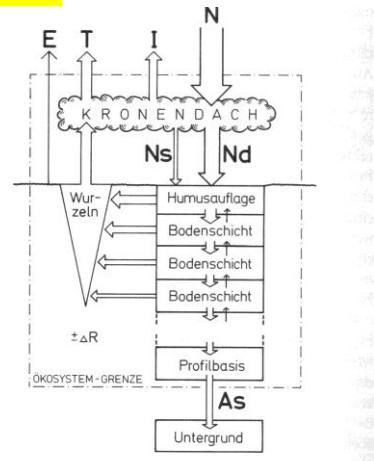
Wasserhaushalt von Wäldern:

N: Niederschlag  
 Nd: Kronendurchlass; Kronentraufe  
 Ns: Stammablauf  
 Nd + Ns: Bestandesniederschlag

E: Evaporation (vom Boden)  
 T: Transpiration  
 I: Interzeption

As: Tiefensickerung

$\Delta R$ : Rücklage im Boden



Ellenberg et al. 1986

$$N - ET - I - As - \Delta R = 0$$

## B. Wasserhaushalt

$$N = N_d + N_s + I$$



$$N = N_B + I$$

$N$  = Freilandniederschlag

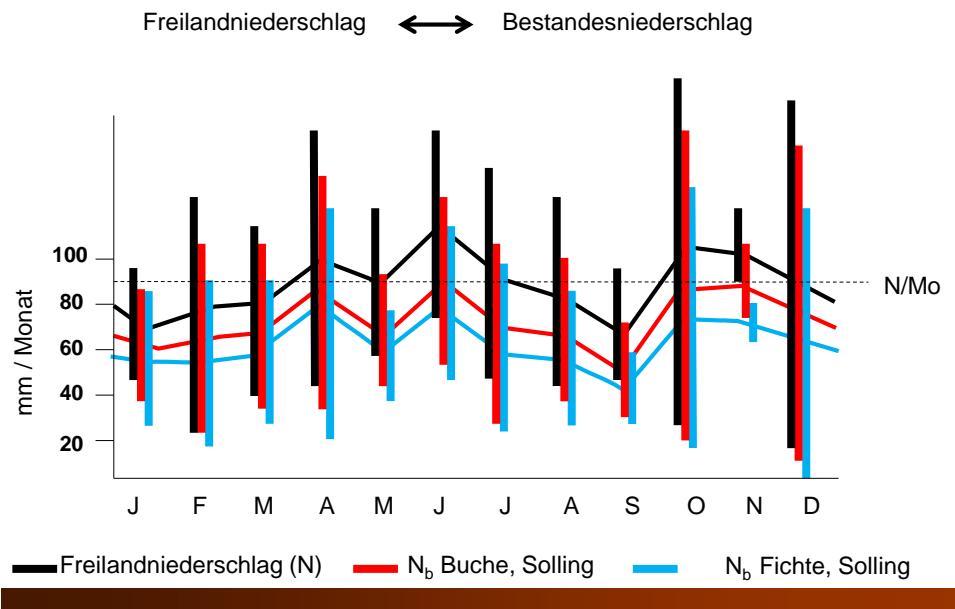
$N_d$  = Kronentraufe

$N_s$  = Stammablauf

$I$  = Interzeption

$N_B$  = Bestandesniederschlag

### C. Komponenten des Wasserhaushalts: Niederschlag



### C. Komponenten: Interzeption

Interzeption: Niederschlagsbilanz von Vegetationsdecken

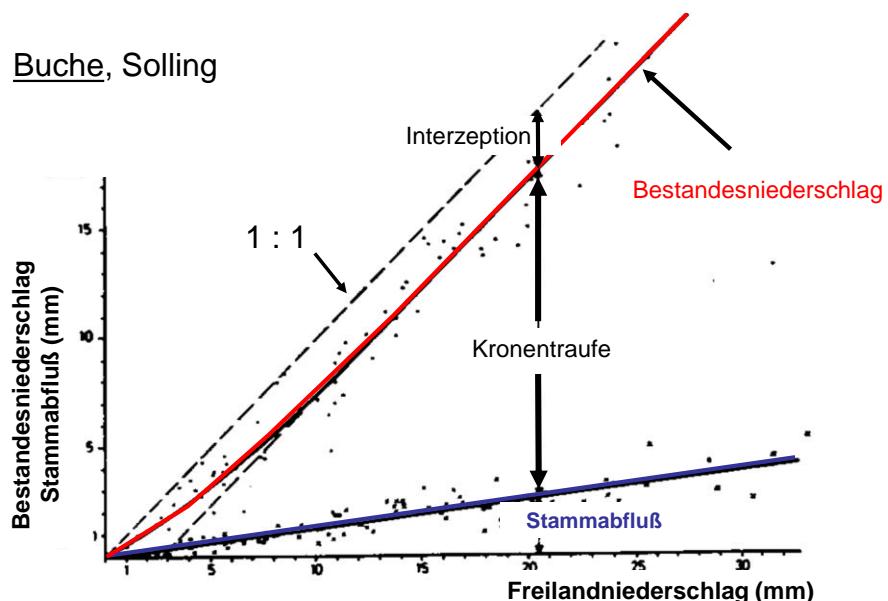
1. Horizontale Interzeption (Nebelauskämmung)
2. Vertikale Interzeption

$$I = N - N_B$$



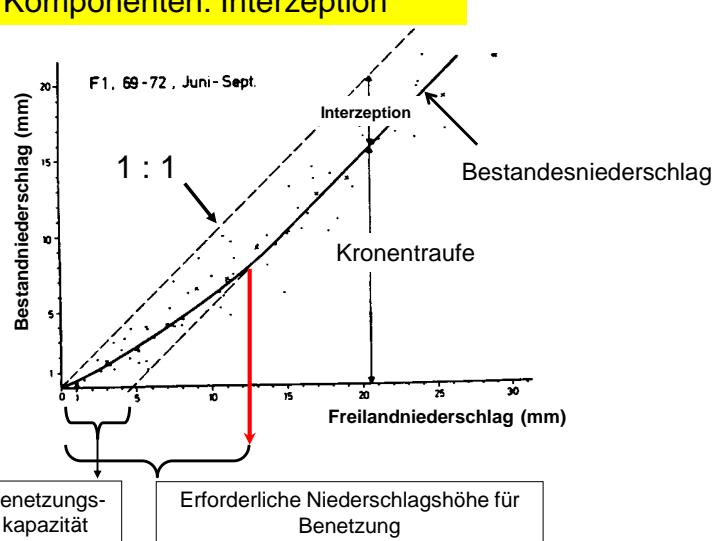
### C. Komponenten: Interzeption

Buche, Solling



### C. Komponenten: Interzeption

Fichte, Solling



Buchenbestand	2.6 mm	9 mm
Fichtenbestand	4.7 mm	12 mm

### C. Komponenten: Interzeption

$$I = N - N_B$$

$$I = b + at$$

b = Benetzungskapazität (mm)

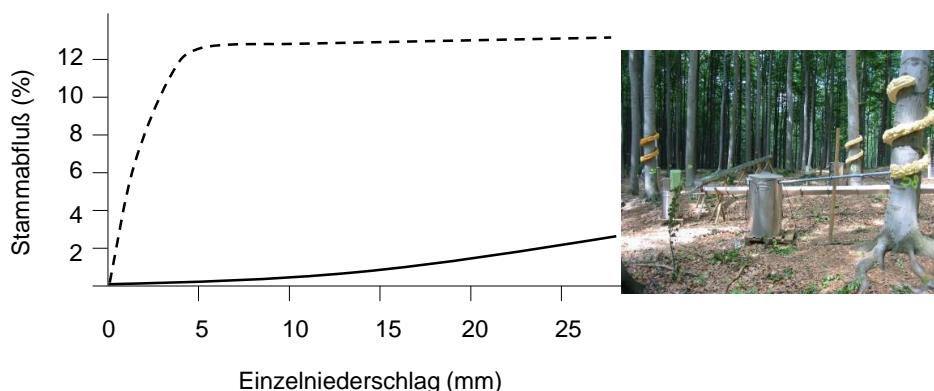
a = Ø Verdunstungsrate (mm/min)

t = Zeit (min)

Benetzung = f (Blattgröße, -stellung,  
Oberflächenbeschaffenheit, ...)

N mm/Jahr	Interzeption % von N			
	Ki	Bu	Fi	Ta
500	35	43	60	80
700	25	39	43	57
1000	17	20	30	40

Buchenbestand, Solling (1969-1972)



### C. Komponenten: Bestandesniederschlag

$$N = N_B + I$$

$$N_B = E + T + A_S + \Delta R$$

$N$  = Freilandniederschlag

$N_B$  = Bestandesniederschlag

$I$  = Interzeption

$E$  = Evaporation (Bodenverdunstung)

$T$  = Transpiration

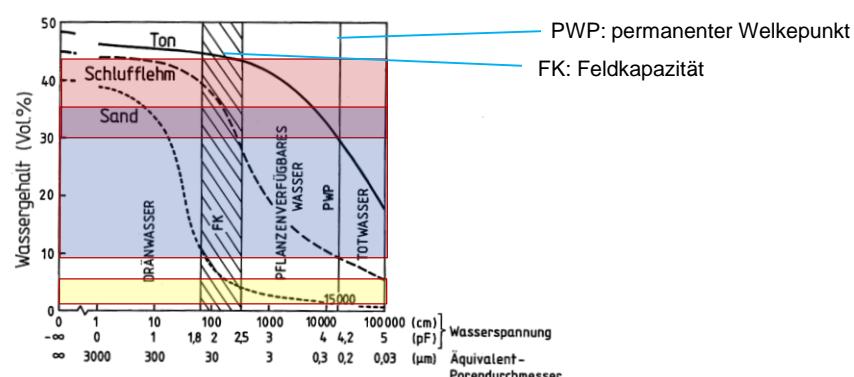
$A_S$  = Sickerabfluß (Tiefenversickerung)

$\Delta R$  = Wasservorratsänderung im Boden

### C. Komponenten: Bodenwasserhaushalt

Zusammenhang zwischen Bodenwassergehalt  $\theta_v$  und Matrixpotenzial  $\psi_m$

Bodenwassercharakteristik, pF-Kurve

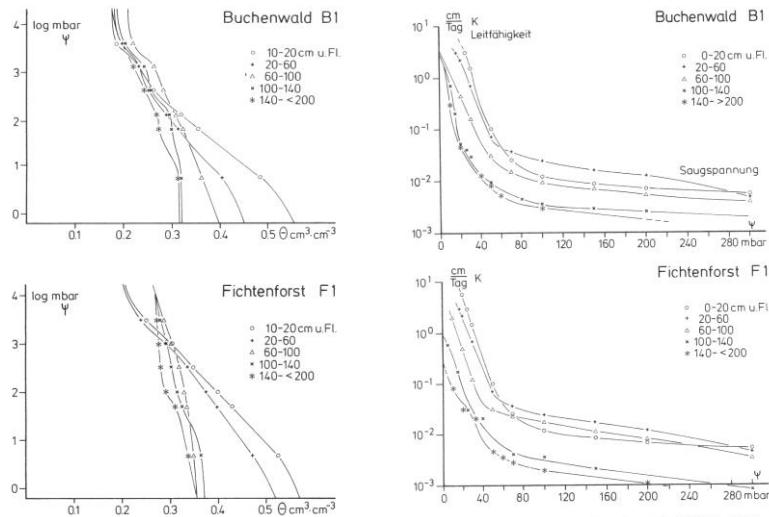


$1 \text{ cm } H_2O \approx 1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$

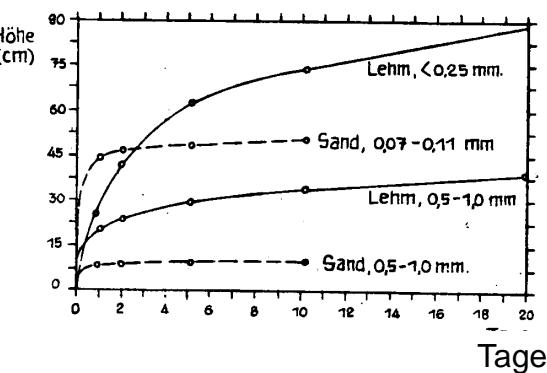
$1 \text{ cm } H_2O = 1 \text{ mbar}$

## C. Komponenten: Bodenwasserhaushalt

Zusammenhang zwischen Matrixpotenzial  $\psi_m$  und Leitfähigkeit K [cm/t]



## C. Komponenten: Bodenwasserhaushalt



Kapillaranstieg bei verschiedenen Bodenarten

## Böden auf....



F-Mull

Rendzina über Muschelkalk

## Böden auf....



Rohhumusartiger  
Moder

Podsol über Buntsandstein / Tertiäre Sände

## Böden auf....



L-Mull

Pelosol über Röth / Keuper

## Böden auf....



Mullartiger Moder

Parabraunerde Pseudogley-Parabraunerde über Löß-Fließerde

## Böden auf....



F-Mull

Skeletthumus boden/Humus Braunerde über Basaltschutt

## C. Komponenten: Evaporation (Verdunstung)

Definition:

*Die Verdunstung (=Evaporation) beruht auf dem physikalischen Vorgang der Verdampfung, bei welchem die einzelnen Wassermoleküle aus dem Molekülverband des Kontinuums Wasser herausgelöst werden. (Baumgarten & Liebscher 1996)*

Die Verdunstung hängt im Wesentlichen ab von:

- Differenz zwischen dem Dampfdruck an der Oberfläche und dem der oberflächennahen Luft;
- an der Oberfläche zur Verfügung stehenden Energie;
- Menge des in der Luft abtransportierten Wasserdampfes;
- Menge des an der Oberfläche vorhandenen oder dorthin transportierten Wassers.

## C. Komponenten: Evaporation

Die Verdunstung ist ein wesentlicher Teil des Wasser- und Wärmehaushalts der Erde.

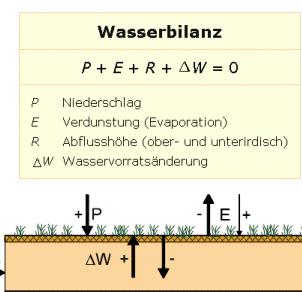


Abb. 5.1: Schematische Darstellung der Wasserbilanz

[www.hydroskript.de](http://www.hydroskript.de)

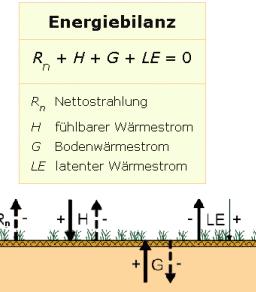


Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Energiebilanz

## C. Komponenten: Evaporation

Teilprozesse:

- Verdunstung von Wasseroberflächen ( $E_o$ )
- Verdunstung von Bodenoberflächen ohne Vegetationsdecke ( $E_B$ )
- Verdunstung von vegetativen Bodendecken ( $E_V$ )

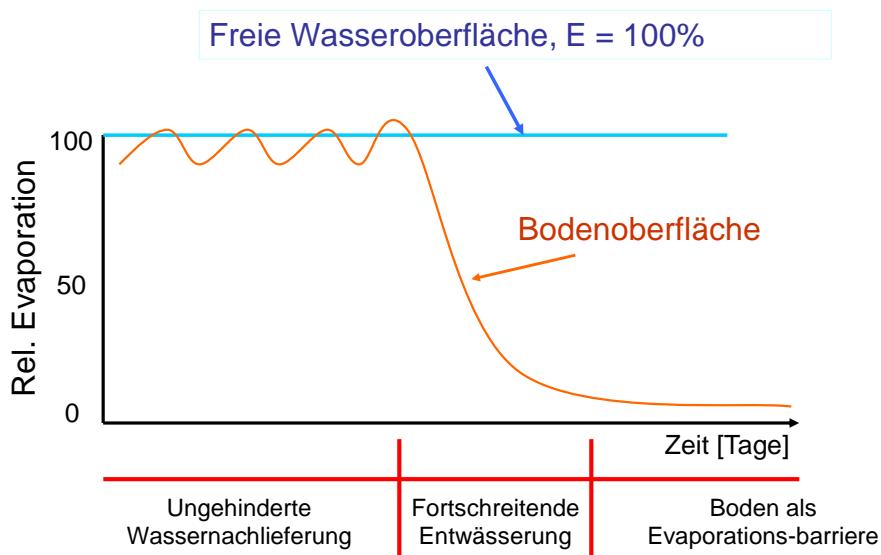
Die Verdunstung von Wasseroberflächen ( $E_o$ ) hat einen bevorzugten Stellenwert als Normwert, weil bei diesen die „Transportkapazität der Atmosphäre für Wasserdampf“ immer voll befriedigt wird. Sie entspricht dem Begriff der **potentielle Verdunstung über Wasserflächen ( $E_p$ )**.

Bei den Landflächen ist die reale Verdunstung zumindestens zeitweise durch Wassermangel oder Verdunstungswiderstände eingeschränkt. Sie wird daher als **tatsächliche oder aktuelle Verdunstung** bezeichnet ( $E_a$ )

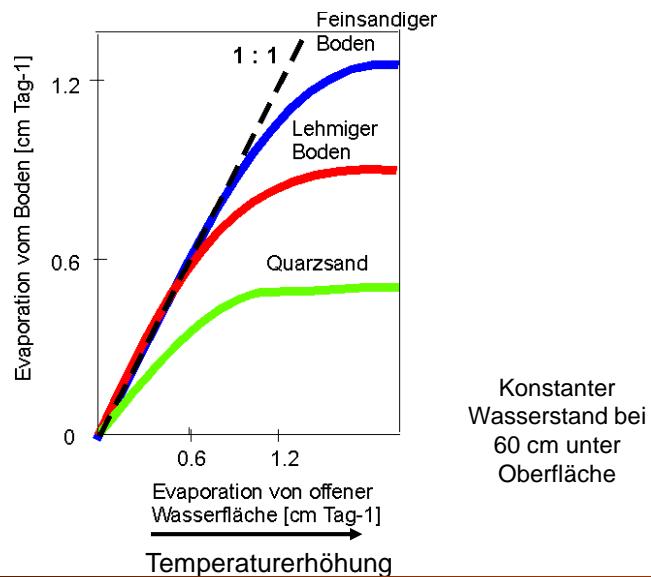
### C. Komponenten: Evaporation

<i>E</i> (mm/d)	<i>unbewachsener Boden</i>	Wasseroberfläche
am Tage nach Regen	2.4	2.2
am Schönwettertag	0.5	3.6
an Dürretagen	0.3	3.8

### C. Evaporation von einer Wasseroberfläche und Bodenoberfläche



### C. Evaporation von Böden unterschiedlicher Textur



### C. Komponenten: Evapotranspiration

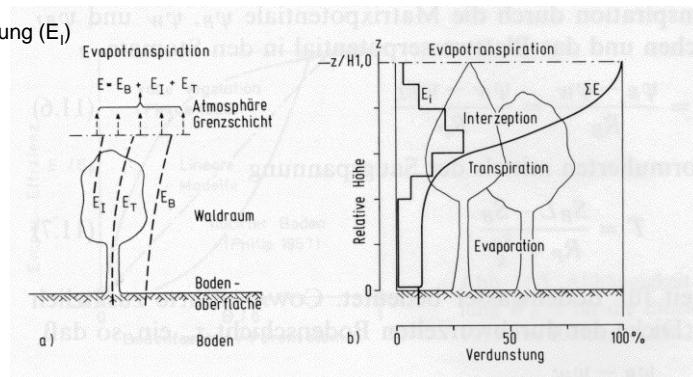
Verdunstung Pflanzendecken: Evapotranspiration ( $E_v$ )

setzt sich zusammen aus:

Evaporation ( $E_B$ )

Interceptionsverdunstung ( $E_I$ )

Transpiration ( $E_T$ )



## C. Komponenten: Evapotranspiration

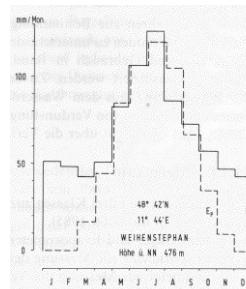
### Pflanzendecken: potentielle Evapotranspiration ( $E_{v,P} = E_p$ )

Def. (Baumgarten & Liebscher 1996):

Die potentielle Evapotranspiration ( $E_p$ ) wird definiert als:

„das Wasservolumen, das eine ganz oder teilweise mit Vegetation bedeckte, unter optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung stehende Fläche bei ungehindertem Wassernachschub unter den gegebenen meteorologischen, bodenphysikalischen und vegetationsspezifischen pflanzenbaulichen Randbedingungen pro Zeiteinheit maximal an die Atmosphäre abgibt.“

Jahresgang der mittleren monatlichen  
Niederschlagshöhen P und der potentielle Verdunstung  $E_p$   
(nach Henning & Liebscher 1997 zit. nach Baumgartner & Liebscher 1996)



## C. Komponenten: Evapotranspiration

### Potentielle Evapotranspiration $ET_p$ : Berechnungsverfahren

#### 1. Haude (empirisch)

Eingangsgrößen:

$rF_{14}$  = relative Luftfeuchte um 14.00 Uhr (%)

$T_{14}$  = Temperatur um 14.00 Uhr (°C)

$k$  = Haude-Faktoren

$e_s$  = Sättigungsdampfdruck 14.00 Uhr (hPa)

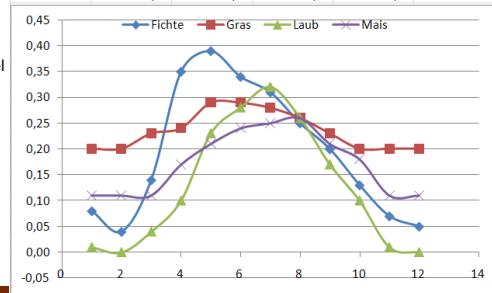
$$ET_{p(Haude)} = k * e_s \left( 1 - \frac{rF_{14}}{100} \right)$$

$$e_s = 6,11 * 10^{\frac{17,62 * T_{14}}{243,12 + T_{14}}}$$

#### Haudefaktoren

	Fichte	Gras	Laub	Mais
1	0,08	0,20	0,01	0,11
2	0,04	0,20	0,00	0,11
3	0,14	0,23	0,04	0,11
4	0,35	0,24	0,10	0,17
5	0,39	0,29	0,23	0,21
6	0,34	0,29	0,28	0,24
7	0,31	0,28	0,32	0,25
8	0,25	0,26	0,26	0,26
9	0,20	0,23	0,17	0,21
10	0,13	0,20	0,10	0,18
11	0,07	0,20	0,01	0,11
12	0,05	0,20	0,00	0,11

Magnus-Formel



$$rF = \frac{\text{Dampfdruck}}{\text{Sättigungsdampfdruck}} \cdot 100$$

HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. – Mitt. d. DWD, 11: 1–24; Bad Kissingen.

## C. Komponenten: Evapotranspiration

### Potentielle Evapotranspiration: Berechnungsverfahren

2. Penman/Monteith

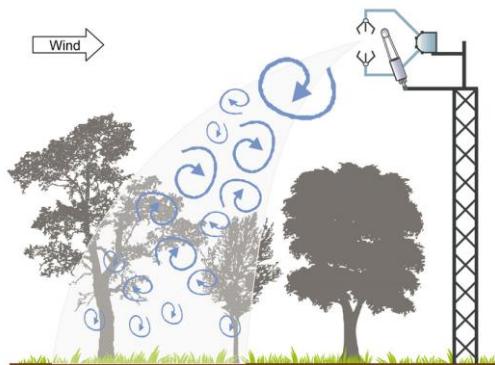
$\delta$ : Steigung VPD Kurve  
 $h_0$ : Strahlungsbilanz  
 $G$ : Bodenwärmefluss  
 $AD$ : Air density  
 $VPD$ : Vapor press. differ.  
 $AR$ : Aerodyn. Widerstand  
 $HV$ : Verdunstungswärme  
 $\gamma$ : Psychrometerkonstante  
 $CR$ : Bestandeswiderstand

Eingabewerte berechnet oder gemessen

$$\begin{aligned}
 \delta &= \left( \frac{e_a}{T+273} \right) \left( \frac{6791}{T+273} - 5.03 \right) \\
 G &= 0.12 \cdot \left( T_i - \left( \frac{T_{i-1} + T_{i-2} + T_{i-3}}{3} \right) \right) \\
 AD &= \frac{0.01276 \cdot PB}{1 + 0.0367 \cdot T} \\
 E_p &= \frac{\delta \cdot (h_0 - G) + 86.7 \cdot AD \cdot VPD}{HV \cdot (\delta + \gamma \cdot (1 + CR))} \\
 CR &= \frac{p_1}{LAI \cdot g_0^* \cdot (1.4 - (0.00121 \cdot CO_2))} \\
 g_0^* &= g_0 \cdot FV \\
 FV &= 1 - (b_v \cdot (VPD - VPD_t)) \geq 0.1 \\
 HV &= 2.5 - (0.0022 \cdot T) \\
 AR &= \frac{6.25 \cdot \left( \ln \left( \frac{10 - ZD}{Z0} \right) \right)^2}{V} \\
 h_{oi} &= RA_i \cdot (1.0 - AB_i) - RAB_i \cdot \left( \frac{0.9 \cdot RA_i}{RAMX_i} + 0.1 \right) \\
 AB &= AB_p \cdot (1 - SC) + AB_s \cdot SC \\
 SC &= \min \left( 1; \frac{LAI_i}{LAI_{SC}} \right) \\
 RAB_i &= 4.9 \cdot 10^{-9} \cdot 0.34 - (0.14 \cdot \sqrt{e_d} \cdot (T_i + 273)^4) \\
 Z0 &= 0.131 \cdot CHT^{0.997} \\
 ZD &= 0.702 \cdot CHT^{0.979}
 \end{aligned}$$

## C. Komponenten: Evapotranspiration

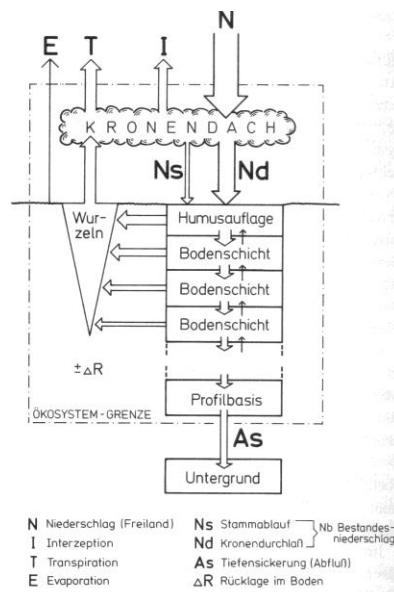
Aktuelle Evapotranspiration: Messung mittels „eddy covariance“



### C. Komponenten: Tiefensicherung

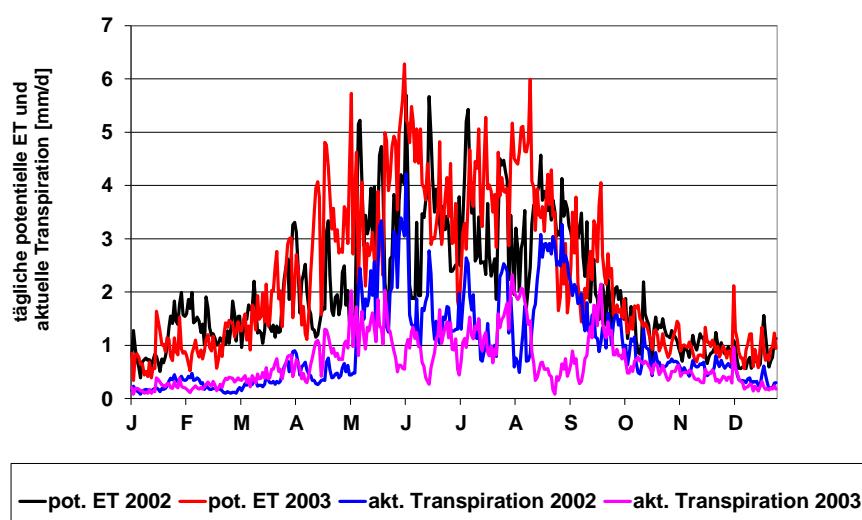
Tiefensicherung:

Wird errechnet mit Hilfe  
Bodenwassерmodelle



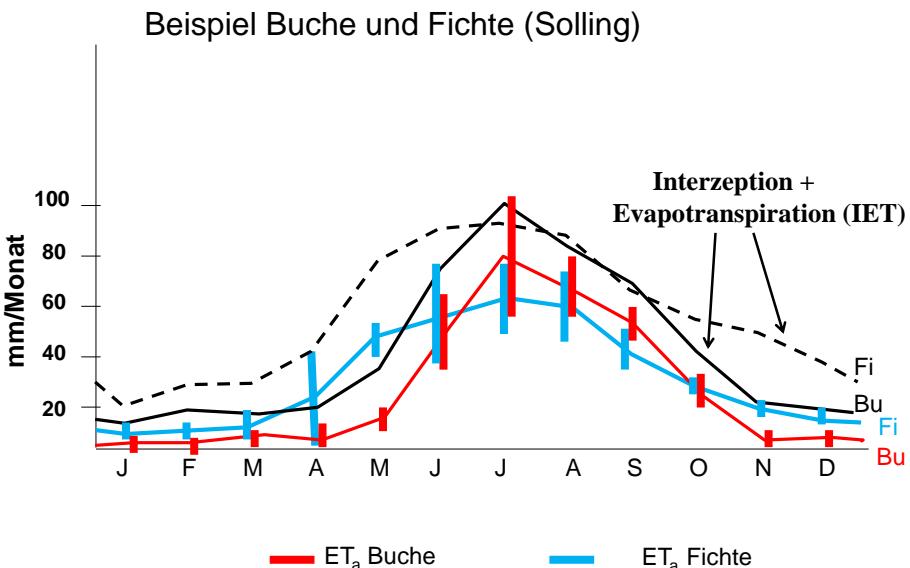
### D. Flüsse: ET<sub>p</sub> und aktuelle Transpiration

Beispiel Kiefer auf Sand (Neublobosow)

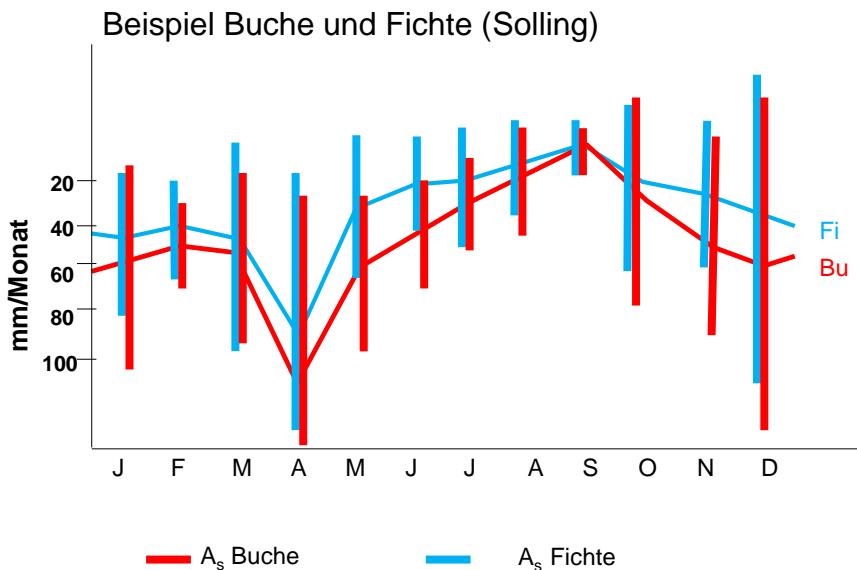


—pot. ET 2002 —pot. ET 2003 —akt. Transpiration 2002 —akt. Transpiration 2003

## D. Flüsse: ET<sub>a</sub>

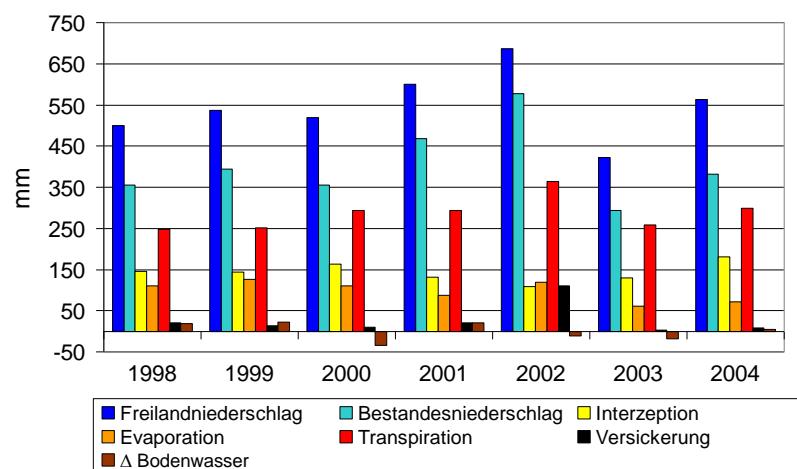


## D. Flüsse: Tiefenversickerung



## E. Wasserbilanz

### Beispiel Kiefer auf Sand (Neublobosow)



## E. Wasserbilanz

### Vergleich Solling und Neuglobsow

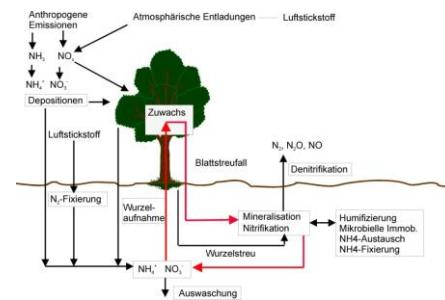
	Baumart	N [mm/a]	I [mm/a]	N <sub>B</sub> [mm/a]	akt. ET [mm/a]	As [mm/a]	ΔR [mm/a]
Solling 1969 -1975							
	Buche	1064	152 14%	912 85%	307 29%	583 54%	+22
	Fichte	1064	320 30%	744 70%	384 36%	384 36%	-24
Neuglobsow 1998 - 2004							
	Kiefer/ Buche	547	142 25%	404 74%	385 70%	26 5%	0



# Stoffhaushalt von Waldökosystemen

## Stickstoff

 E. Veldkamp  
Ökopedologie, Uni-Göttingen

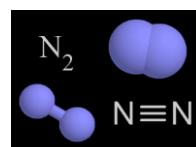


## Vorlesungsgliederung

- A. Stickstoff; Globaler Stickstoffkreislauf
- B. Stickstoffhaushalt (Wald)
- C. Stickstoffhaushaltskomponenten
- D. Stickstoffflüsse & bilanzen und Einfluß N-Depositionen
- E. Critical loads

## A: Stickstoff (N)

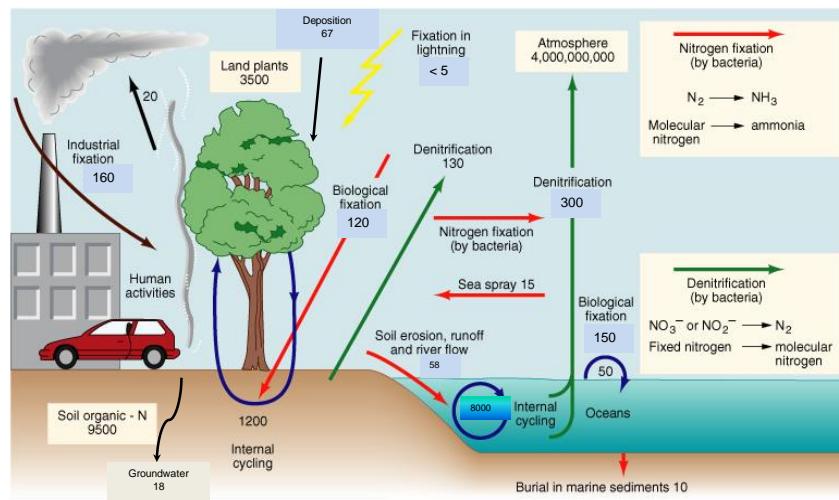
- Essentieller Bestandteil von Lebewesen, z.B. Aminosäuren in Proteinen, Nukleinsäuren, Chlorophyll
- In vor-industrielle Zeiten war N oft limitierend
- 78% der Atmosphäre ist Luftstickstoff  $N_2$  das aus zwei stabil miteinander verbundenen Stickstoffatomen besteht. Da diese Bindung nur unter sehr hohem Energieaufwand aufgebrochen werden kann, kann  $N_2$  nicht von Pflanzen für die Biosynthese genutzt werden.
- Pflanzen sind deshalb auf Ammonium ( $NH_4^+$ )- und Nitrat ( $NO_3^-$ )-Ionen als Stickstoffquelle angewiesen
- Da neben N auch C, P und andere Nährstoffe für organische Moleküle benötigt werden sind die entsprechend Kreisläufe eng mit einander verbunden.



## A: Stickstoffverbindungen

Vorkommen	Formel	Name	Herkunft
Gase	$N_2$	Distickstoff	Denitrifikation
	$NH_3$	Ammoniak	Landwirtschaft (Zersetzung)
	$N_2O$	Lachgas	Denitrifikation, Industrie, Verkehr
	$NO$ $NO_2$	Stickstoffmonoxid Stickstoffdioxid	
Aerosole	$NH_4^+$	Ammonium	Hochtemperatur-verbrennung, Verkehr elektr. Entladungen Nitrifikation $NH_3$ , Landwirtschaft
	$NO_2^-$	Nitrit	
	$NO_3^-$	Nitrat	
Bodenlösung	$NO_3^-$	Nitrat	$NO, NO_2$ , Hochtemperatur-verbrennung, Verkehr elektr. Entladungen $NH_4^+$ , Nitrifikation, Depositionen organische Substanz, Depositionen Organische Substanz, Auswaschung, Exudate
	$NH_4^+$	Ammonium	
	$N_{org}$	gelöster organischer N	
Bodenfest-phase	$NH_4^+ a$	austauschbares Ammonium	organische Substanz, Depositionen organische Substanz, Depositionen Lebewesen
	$NH_4^+ fix$	fixiertes Ammonium	
	$N_{org}$	organischer N	

## A: Globaler Stickstoffkreislauf

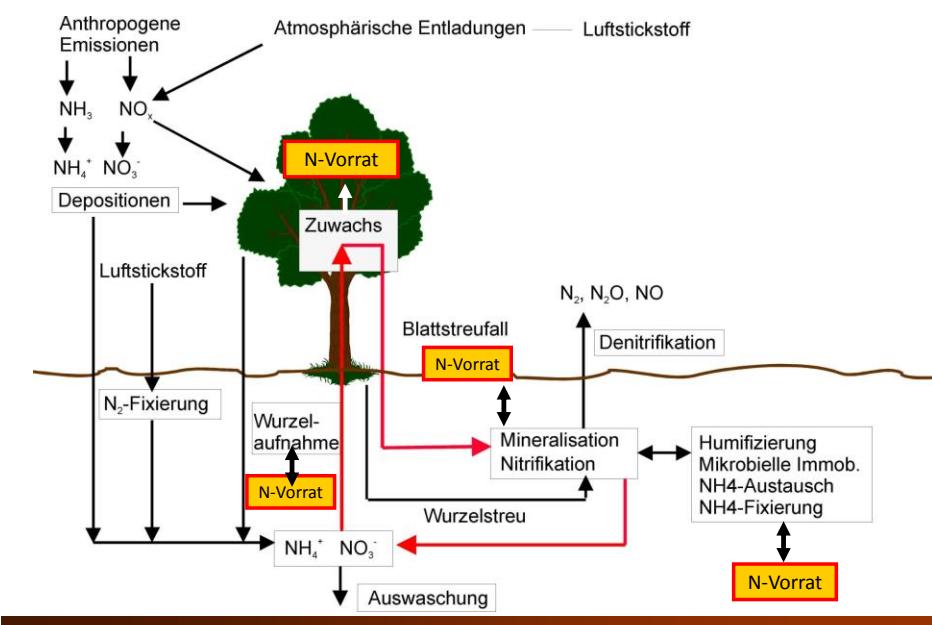


Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

Flüsse in  $10^{12} \text{ g N/Jahr}$  (oder  $10^6 \text{ Mg / Jahr}$ )

(Schlesinger & Bernhardt, 2013)

## B: Stickstoffhaushalt



## B: Stickstoffhaushalt

### N- Vorratsverteilung in Wäldern

#### Gemäßigte Laubwälder



N-Vorräte (kg/ha)	
440 (6%)	Oberirdische Biomasse
380 (5.1%)	Organische Auflage
130 (1.8%)	Wurzeln
6440 (87.1%)	Mineralboden
7390 (100%)	Summe

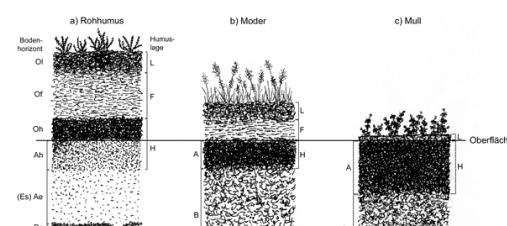
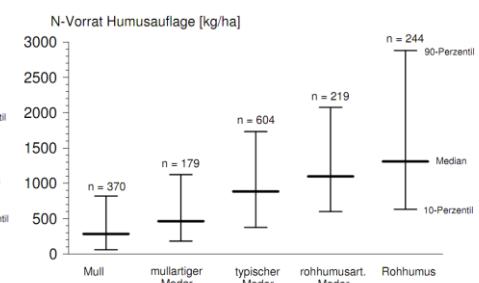
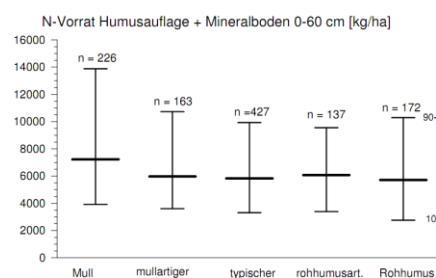
#### Gemäßigte Nadelwälder



N-Vorräte (kg/ha)	
480 (6%)	Oberirdische Biomasse
680 (7.5%)	Organische Auflage
180 (1.9%)	Wurzeln
7770 (85.3%)	Mineralboden
9110 (100%)	Summe

## B: Stickstoffhaushalt

### N-Vorräte im Wurzelraum und in der Humusaufklage in Deutschland



(BZE, 1996)

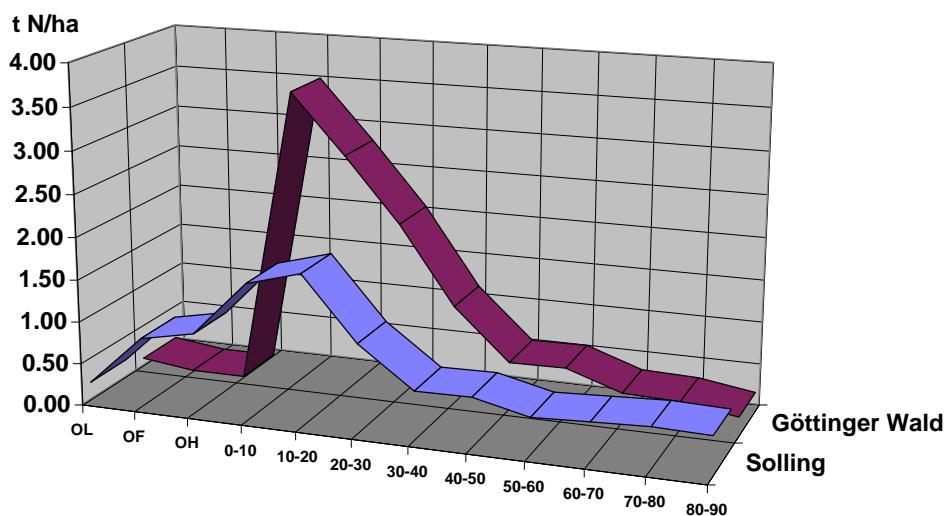
## B: Bindungsformen von N im Boden

(N Vorräte in kg ha<sup>-1</sup>)

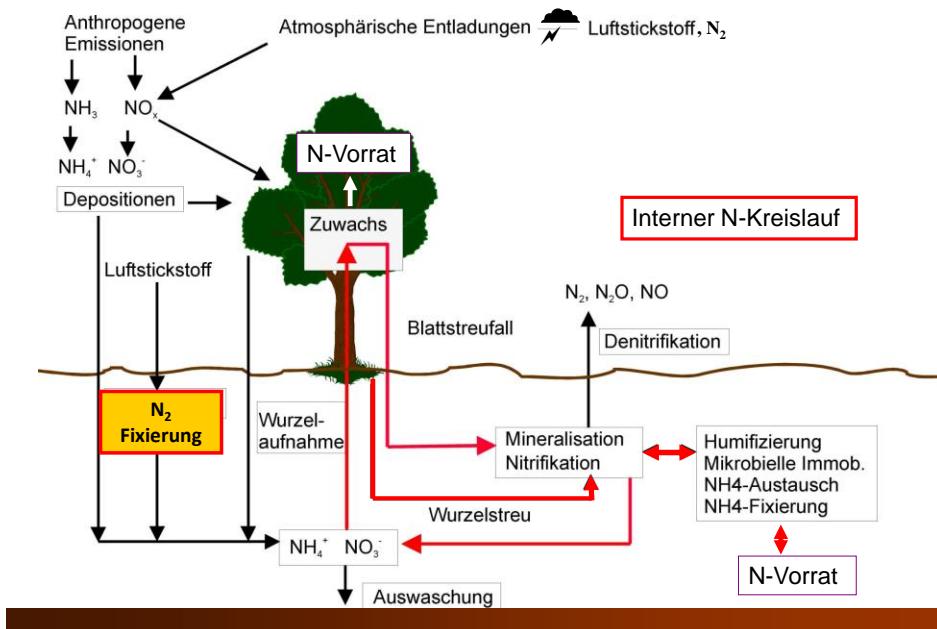
Moder	Solling (0-90 cm)		
N <sub>ges</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> fix	N <sub>org</sub>	N <sub>mic</sub> (0-20cm)
8168	1892	6276	75
100%	23,1%	76,0%	0,9%

Mull	Göttinger Wald (0-90 cm)		
N <sub>ges</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> fix	N <sub>org</sub>	N <sub>mic</sub> (0-20cm)
11534	1509	9948	160
100%	13,1%	85,5%	1,4%

## B: Gesamt-N Verteilung im Boden

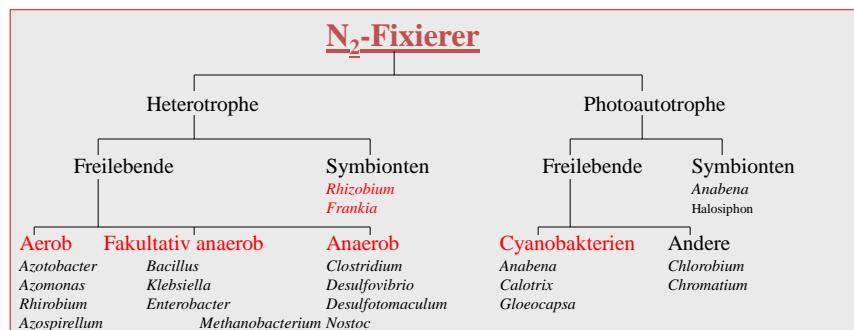


### C. Stickstoffhaushaltskomponenten



### C. Luftstickstoffbindung

- Pflanze - Boden: >95% des N-Umsatzes (Zuwachs, Streuproduktion)
- Boden - Atmosphäre: <5% des N-Umsatzes ( $\text{N}_2$ -Bindung, Denitrifikation)
- Durch Nitrogenase (Fe-Protein, Molybdän-Fe-Protein) wird  $\text{N}_2$  reduziert:



## C. Luftstickstoffbindung

### 1. Freilebende Mikroorganismen

- Nicht-symbiotische Luftstickstoffbindung
- Energiebedarf: 0.5 - 1 g N/100 g C-Quelle
- $N_2$ -Bindung: 0 - 25 kg N  $ha^{-1} Jahr^{-1}$ , Mittel:  $\approx 1 \text{ kg N } ha^{-1} Jahr^{-1}$   
(Waldböden)
- extrem versauerte Waldböden fixieren nicht (Molybdänverfügbarkeit, Al-Toxizität, geringe bakterielle Biomasse)
- Kalkung erhöht das  $N_2$ -Fixierungsvermögen
- Waldböden besitzen das höchste  $N_2$ -Fixierungsvermögen unter anaeroben Bedingungen ( $O_2$ -Empfindlichkeit der Nitrogenase)
- Hohe Konzentrationen von Ammonium und Nitrat hemmen die  $N_2$ -Fixierung

## C. Symbiotische Luftstickstoffbindung

### 2. Knöllchenbakterien in Symbiose mit Leguminosen

(z.B. Bakterien der Gattung Rhizobium)

Bakterien leben in Symbiose mit Wirtspflanze:

1. Bakterien fixieren Luftstickstoff und liefern der Pflanze mineralischen Stickstoff
2. Die Pflanze liefert den Bakterien Kohlehydrate
  - 1 g N/5 - 20 g C-Quelle
  - $N_2$  Bindung < 250 kg N  $ha^{-1} Jahr^{-1}$
  - bei hohem N-Angebot im Boden werden die in die Wurzeln transportierten Kohlenhydrate zu Aminosäuren umgebaut und gelangen nicht in die Wurzeln

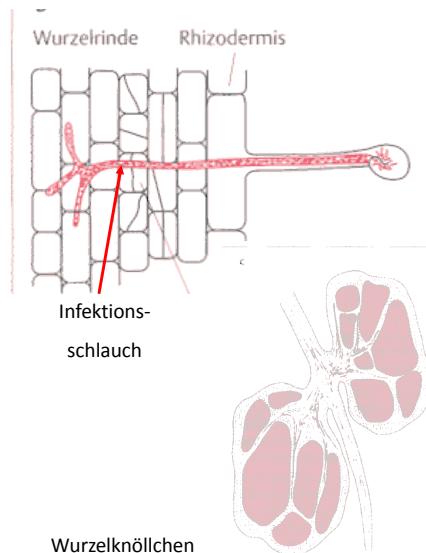
## C. Symbiotische Luftstickstoffbindung

### 2. Knöllchenbakterien in Symbiose mit Leguminosen

**Signalaustausch → Zellerkennung → Infektion → Zellvermehrung**

1. Wirtspflanze scheidet Signalsubstanz an Bakterium aus
2. Stimuliertes Bakterium schüttet Morphogene (Signalmoleküle) aus
3. Morphogene werden von Wirtspflanze aufgenommen und initiieren den Differenzierungsprozess der Zellen der zu einer Aufnahme (Infektion) der Bakterien führt.
4. Es bildet sich ein Infektionsschlund im Wurzelhaar, durch den die Bakterien in das innere der Wurzelrinde vordringen können
5. Es bilden sich wucherartige Verdickungen (Wurzelknöllchen) (bis 0.5 cm Durchmesser)

## C. Symbiotische Luftstickstoffbindung



## C. Symbiotische Luftstickstoffbindung

### 3. Knöllchenbakterien in Symbiose mit *Alnus spp.*

(Actinomyceten *Frankia*)

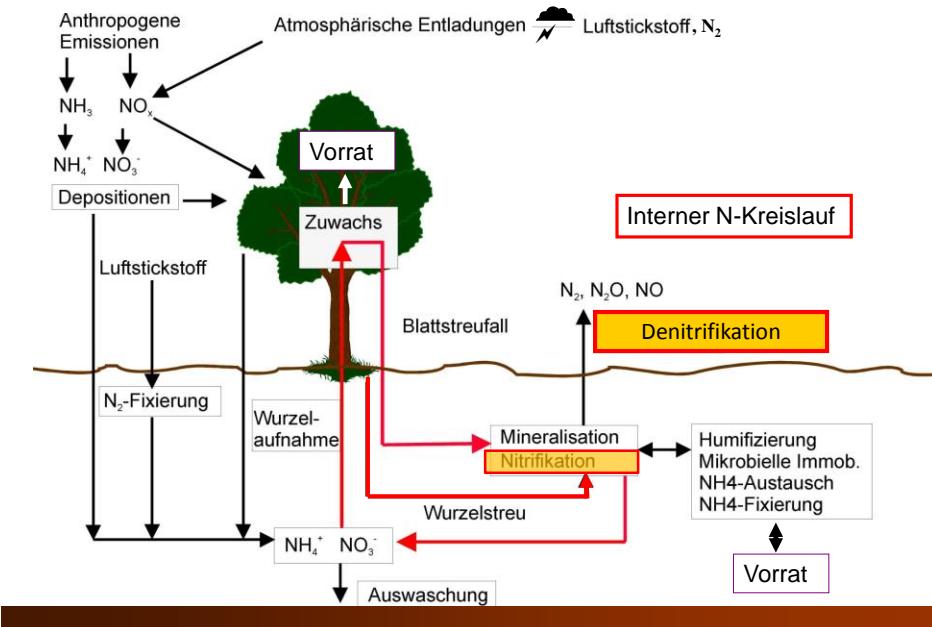
- wucherartige Verdickungen von  $\approx 4$  cm Durchmesser (Wurzelknöllchen)
- **stark entwässerter Erlenwald:**  
45 % des Gesamtstickstoffs der Biomasse aus N<sub>2</sub>-Fixierung  
 $\Rightarrow$  jährliche Stickstofffixierung von  $\approx 40 - 45 \text{ kg N ha}^{-1}$
- **schwach entwässerter Erlenwald:**  
70 % des Gesamtstickstoffs der Biomasse aus N<sub>2</sub>-Fixierung  
 $\Rightarrow$  jährliche Stickstofffixierung von  $\approx 70 - 85 \text{ kg N ha}^{-1}$

## C. Symbiotische Luftstickstoffbindung



*Alnus glutinosa-Frankia* Knöllchen

### C. Nitrifikation, Denitrifikation



### C. Nitrifikation, Denitrifikation

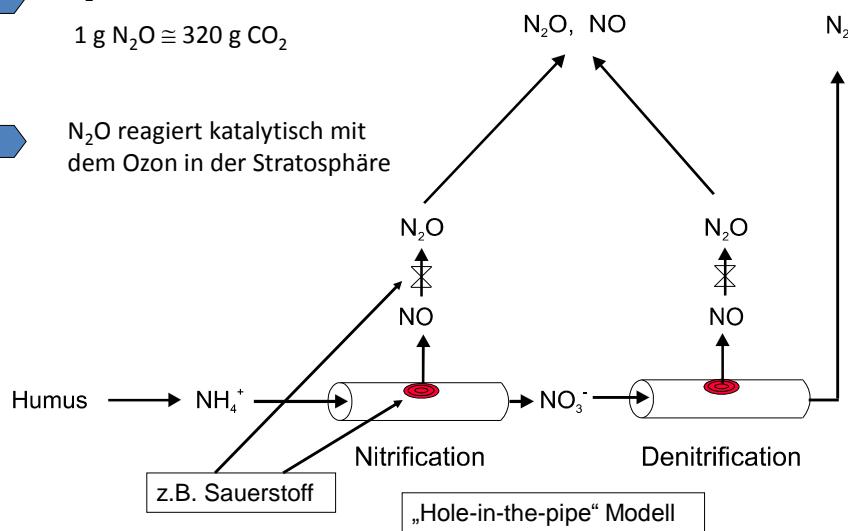
Reaktion	kJ pro mol substrat	Konditionen	Ziel
<b>Nitrifikation</b>			
$2NH_3 + 3O_2 \Rightarrow 2HNO_2 + 2H_2O$	276	aerob	energie
$2NO_2^- + O_2 \Rightarrow 2NO_3^-$	73	aerob	energie
<b>Denitrifikation</b>			
$C_6H_{12}O_6 + 6KNO_3 \Rightarrow 6CO_2 + 3H_2O + 6KOH + 3N_2O$	2280	anaerob	energie
$5C_6H_{12}O_6 + 24KNO_3 \Rightarrow 30CO_2 + 18H_2O + 24KOH + 12N_2$	2380	anaerob	energie

### C. Nitrifikation, Denitrifikation

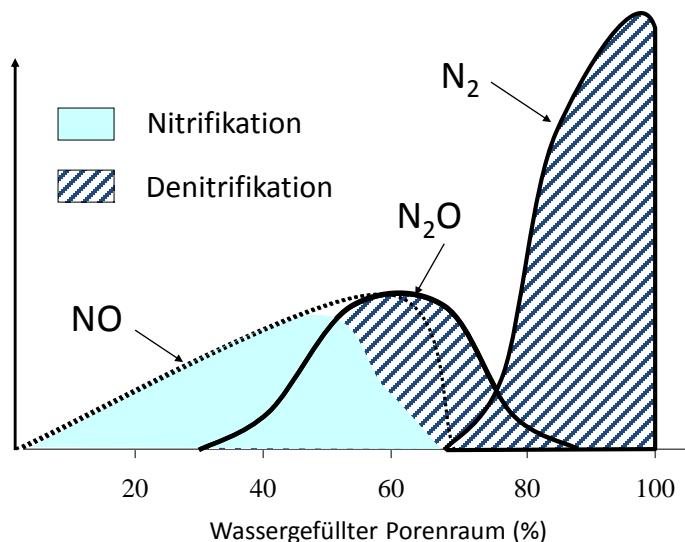
→  $\text{N}_2\text{O}$  ist ein Treibhausgas:

$$1 \text{ g } \text{N}_2\text{O} \approx 320 \text{ g } \text{CO}_2$$

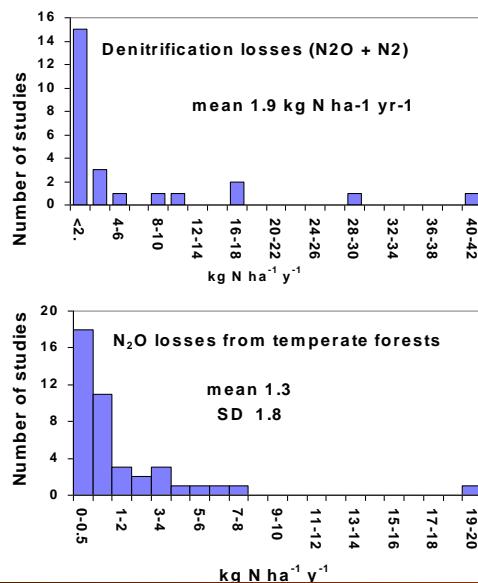
→  $\text{N}_2\text{O}$  reagiert katalytisch mit dem Ozon in der Stratosphäre



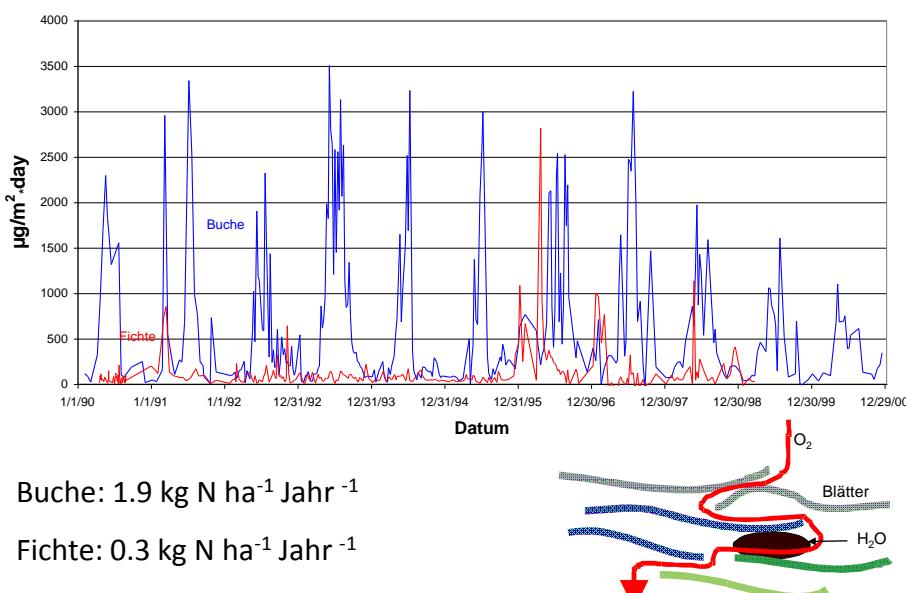
### C. Nitrifikation, Denitrifikation



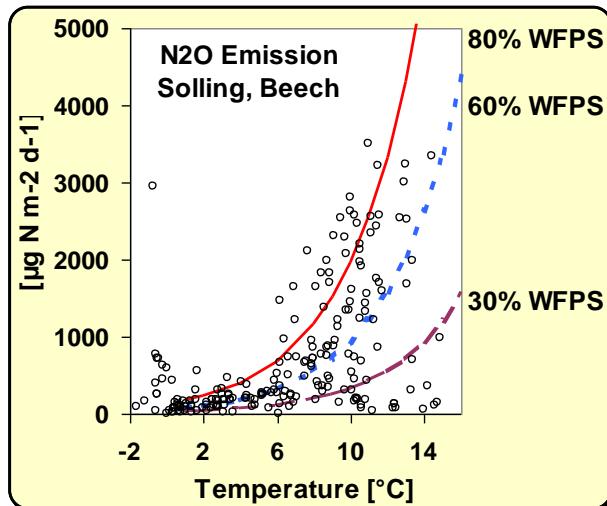
### C. Denitrifikation



### C. $\text{N}_2\text{O}$ Emission im Solling

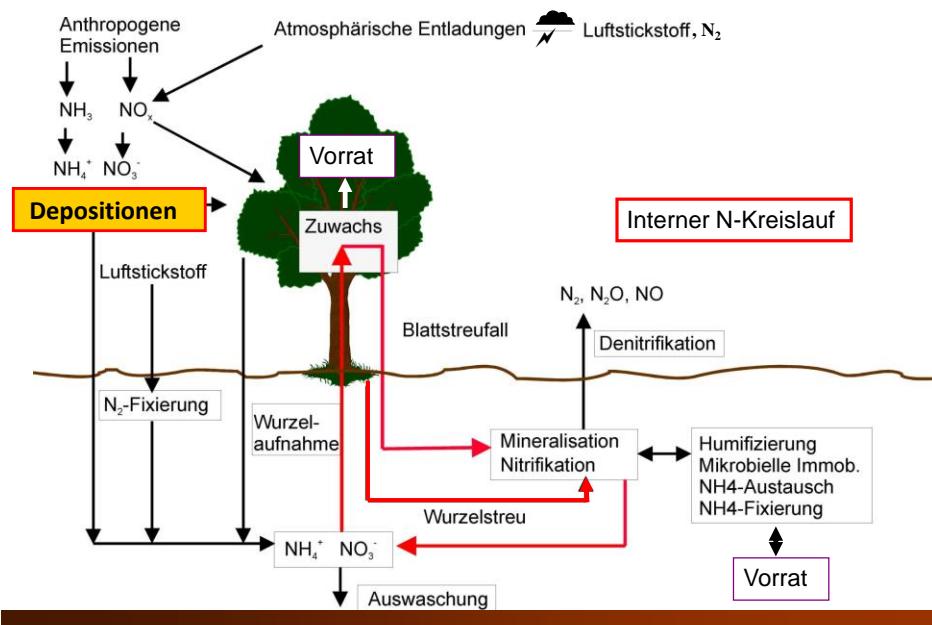


### C. N<sub>2</sub>O Emission im Solling

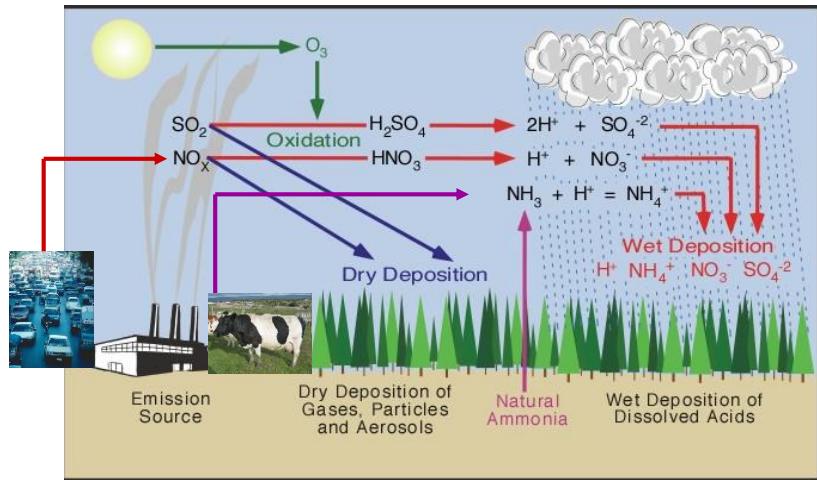


WFPS:  
wassergefüllter  
Porenraum

### C. N-Deposition

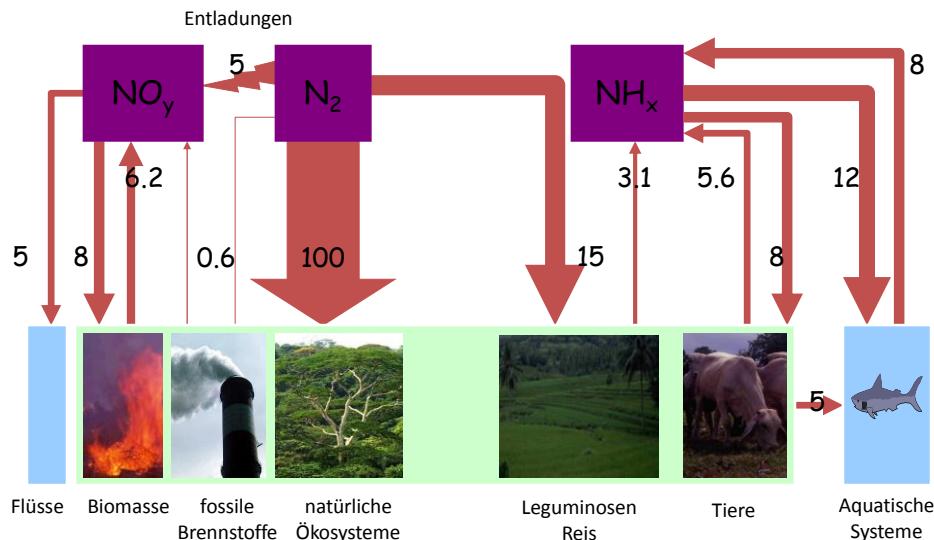


### C. N-Deposition



### C. Globaler N-Haushalt

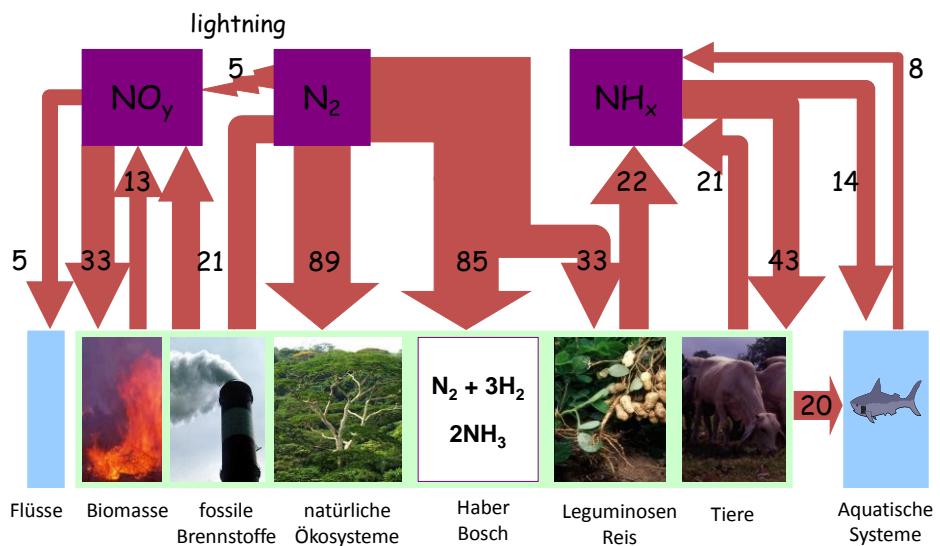
1890 (in Tg N Jahr $^{-1}$ )



(Galloway & Cowling, 2002)

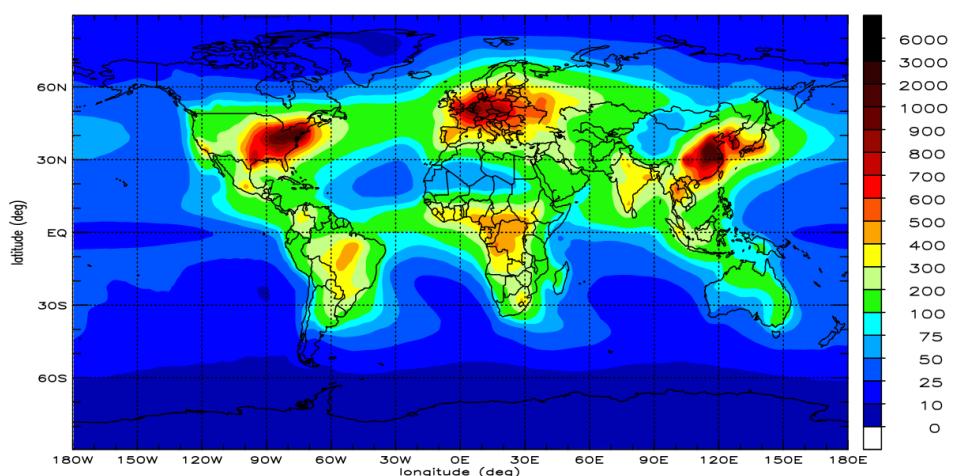
### C. Globaler N-Haushalt

1990 (in Tg N Jahr<sup>-1</sup>)



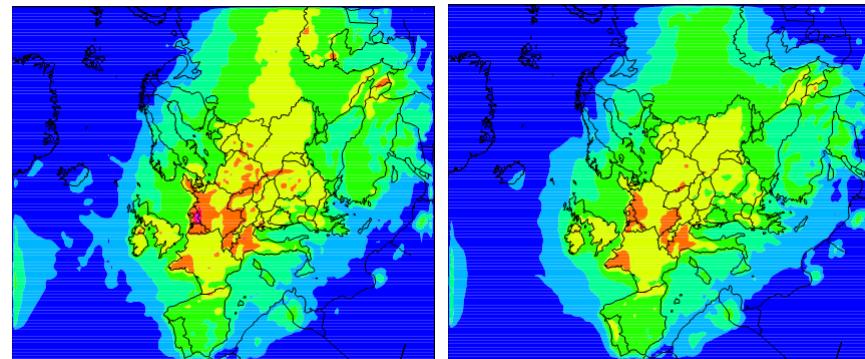
### C. Globale N-Deposition

mg N m<sup>-2</sup> Jahr<sup>-1</sup>



(Dentener et al., 2006)

### C. N-Deposition in Europa



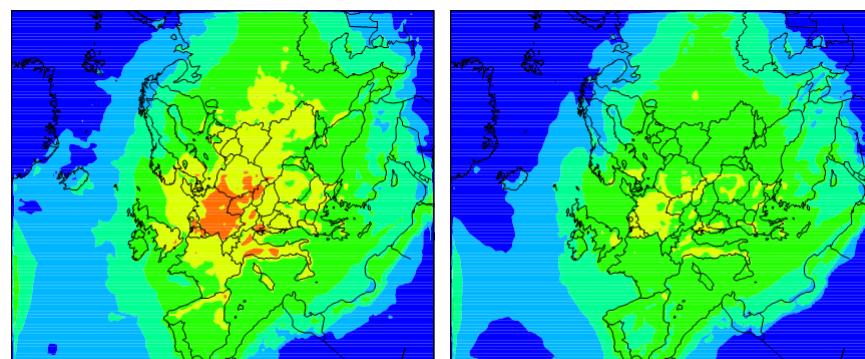
(a) 1990

(e) 2010 Gothenburg protocol



Deposition von reduziertem N (mg/m<sup>2</sup>)

### C. N-Deposition in Europa



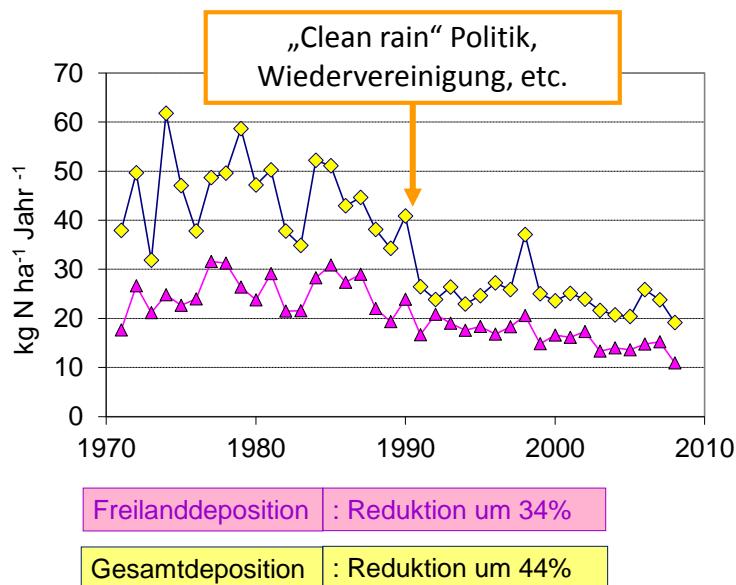
(a) 1990

(e) 2010 Gothenburg protocol



Deposition von oxidiertem N (mg/m<sup>2</sup>)

## D. N-Einträge in den Buchenbestand im Solling

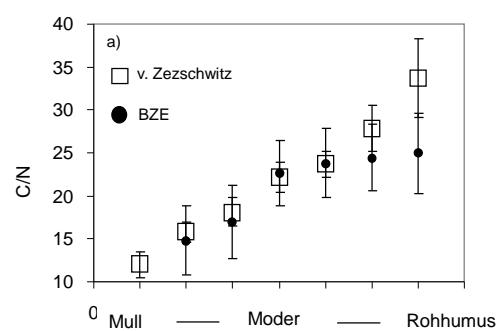


## D. Auswirkungen von N-Depositionen

Einengung der C/N Verhältnisse im Humus durch N-Depositionen

v. Zezschwitz:  
analysiert zwischen 1976-1980

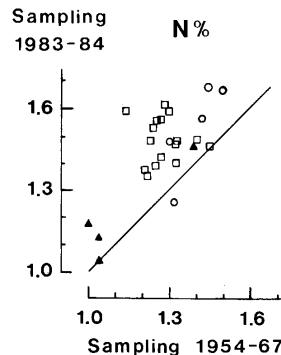
BZE:  
analysiert zwischen 1987-1993



Fazit:  
Die C/N Verhältnisse in  
organischen Auflagen sind durch  
N-Aufnahme sehr niedrig und  
eignen sich nicht mehr zur  
Beurteilung der Zersetzbarmkeit.

## D. Auswirkungen von N-Depositionen

Zeitliche Veränderung der N-Konz. in Nadeln/Blattspiegelwerte



**Fig. 1.4.** Concentrations (percent dry weight) of nitrogen in exposed current spruce needles, sampled in autumn from the same forest plots on different occasions. *Squares* Tönnersjöboden Experimental Forest, SW Sweden. *Circles* Other sites in south Sweden (Götaland). *Filled triangles* sites in middle and north Sweden (Aronsson 1985a)

Tamm, Ecological Studies 81, 2002

### Nadel-, Blattgehalte (mg N/g) (BZE, 1997)

	Fichte	Kiefer	Buche
10%Perzentil, Median, 90% P.	11.8, 13.9, 16.2	13.1, 15.9, 19.2	20.8, 24.3, 26.2
Sehr gering, mittel, sehr hoch	<13, 14.5, >17	<13, 14.5, >17	<18, 21, >25

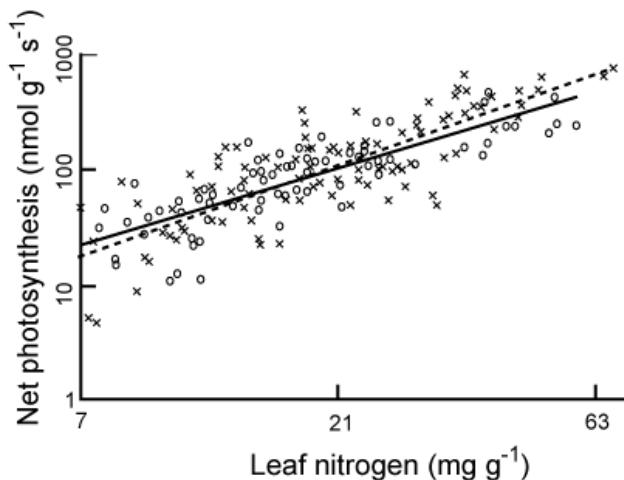
## D. Auswirkungen von N-Depositionen

N-Anreicherung in Assimilationsorganen erhöht die Fotosynthese und steigert das Wachstum



N-Düngerversuch in Schweden und Veränderungen der Blattorgane und der Jahrringbreiten

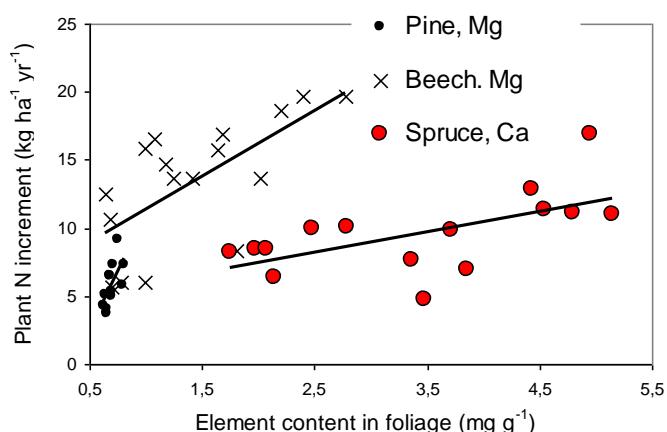
## D. Auswirkungen von N-Depositionen



N-Anreicherung in Assimilationsorganen erhöht die Fotosynthese

## D. Auswirkungen von N-Depositionen

Nicht Stickstoff sondern Ca und Mg begrenzen das Wachstum. Gegenmaßnahme: Kalkung



Einfluß der Mg und Ca Gehalte auf das Wachstum, ausgedrückt durch die jährliche N-Aufnahme

## D. Auswirkungen von N- und P-Düngungen

Phosphor könnte in gekalkten Beständen das limitierende Element für das Wachstum von Bäumen sein.

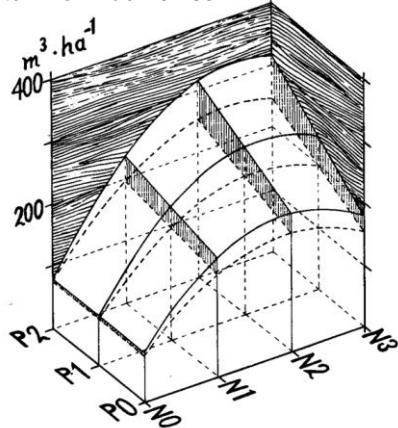


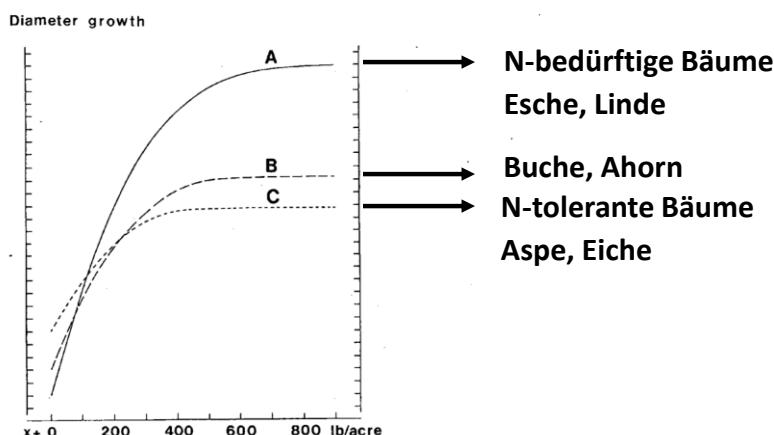
Fig. 4.8. Total stem volume production over bark in Experiment E 26 A Străsan, as affected by fertilizer regime. The *upper surface* represents plots with KMgMicro given in addition to the N and P levels noted (cf. Table 4.1). The *dotted surface* stands for plots without KMgMicro. All treat-

Einfluß von N, P, und Mikroelement-Düngung auf das Wachstum

Tamm, 2002

## D. Auswirkungen von N-Düngungen

Der N-Bedarf der Bäume ist unterschiedlich

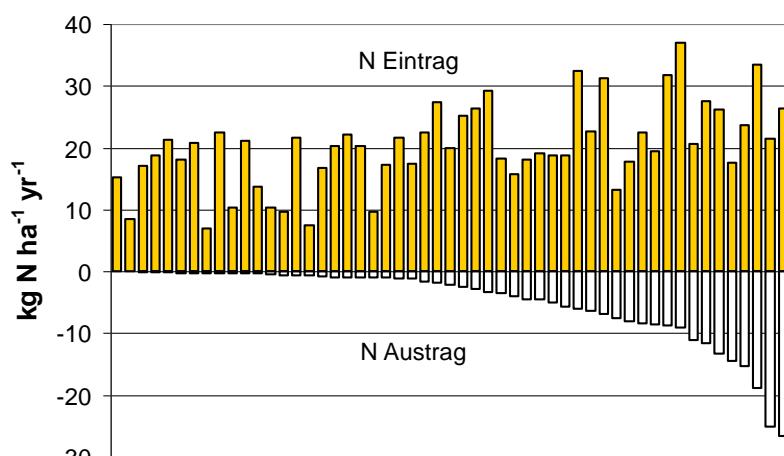


Einfluß von N-Düngung auf das Wachstum nordamerikanischer Baumarten

## D. Auswirkungen von N-Depositionen

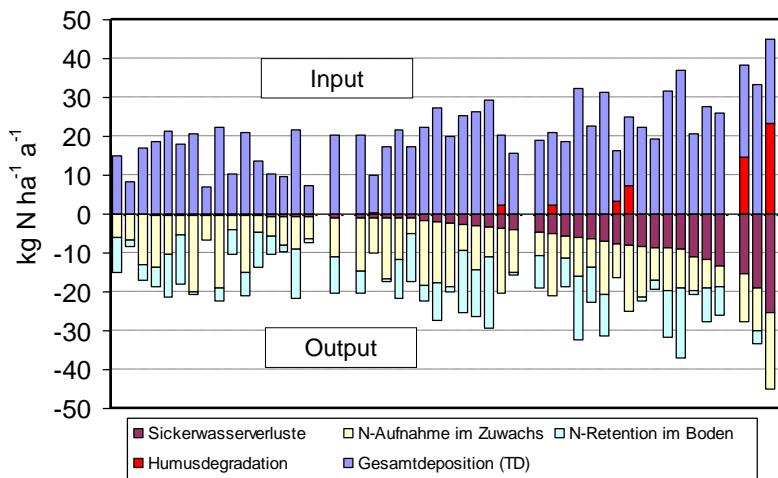
1. Veränderung der Bodenvegetation → nitrophile Pflanzen ☺
2. Erhöhung des Baumwachstums und zusätzliche Aufnahme von CO<sub>2</sub>☺
3. Bodenversauerung (siehe H-Umsetzungen) ☺
4. Anreicherung von N in Bäumen und Boden → Einengung der C/N Verhältnisse ☺
5. N-Sättigung von Waldökosystemen ? ☺
6. Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser ? ☺
7. Freisetzung von Lachgas (N<sub>2</sub>O)? ☺

## D. N-Bilanzen von Waldökosystemen in Deutschland



Ursache für Eintrag ≠ Austrag:  
-Denitrifikation  
-Pflanzenaufnahme (Ernteentzüge)  
-Immobilisation im Boden

## D. N-Bilanzen von Waldökosystemen in Deutschland



- Hohe Nitratausträge werden auch durch Humusdegradation verursacht
- N-Aufnahme wird durch die Baumart und das Wachstum bestimmt
- N-Retention im Boden sehr heterogen

## E. Critical loads (CL)

CL für Stickstoff sind Stofffrachten, die angeben, welche Menge pro Fläche und Zeitraum in einem Ökosystem deponiert werden kann, ohne dass nach bisherigem Wissensstand langfristig deutliche Schadwirkungen auftreten

$$CL \text{ oder } CDL_{nut(N)} = N_i + N_u + N_{de} + N_{le(acc)}$$

$N_i$  = Stickstoff-Immobilisierungsrate [kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

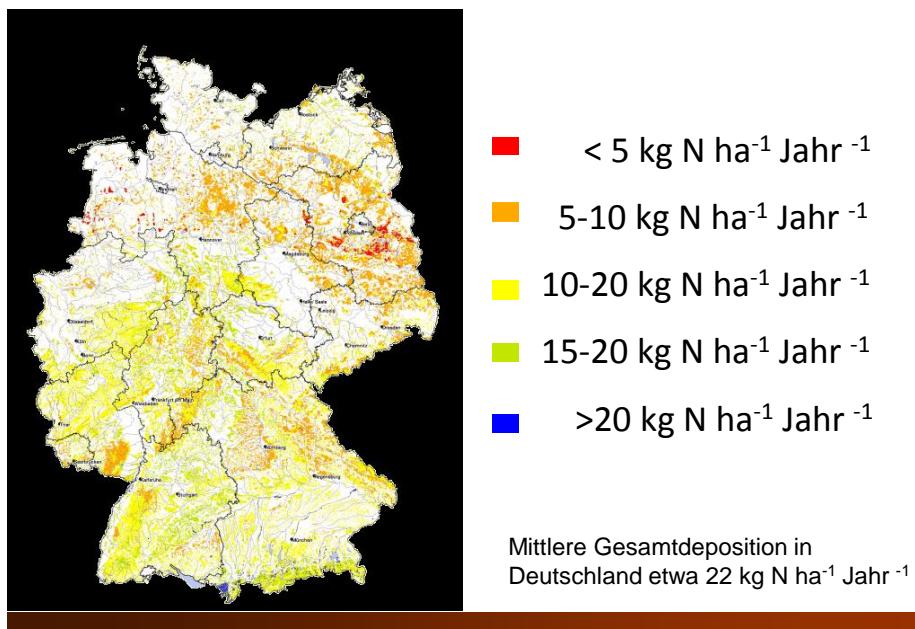
$N_u$  = Netto-Stickstoff-Aufnahmerate im Baumbestand [kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$N_{de}$  = Stickstoff-Denitrifikationsrate [kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

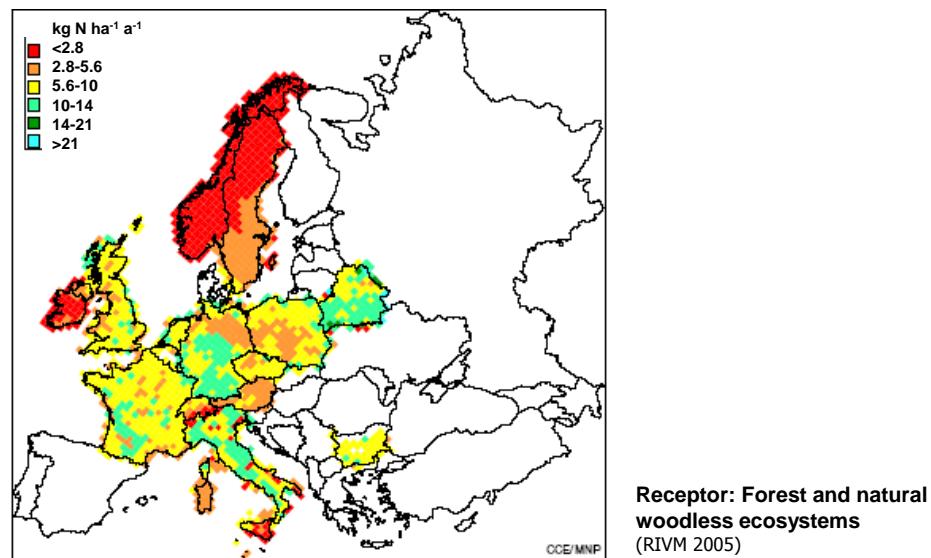
$N_{le(acc)}$  = Tolerierbarer Stickstoff-Austrag mit dem Sickerwasser [kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>]

$CDL_{nut(N)}$  = 'critical deposition level'

### E. Critical Loads für N in Deutschland (2000)



### E. Critical Loads für N in Europa (2000)





Böden auf....



F-Mull



Rendzina über Muschelkalk

## Böden auf....

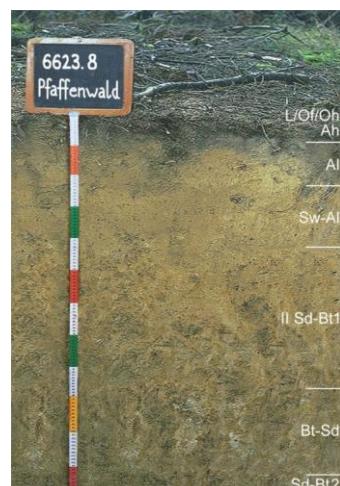


L-Mull



Pelosol über Röth / Keuper

## Böden auf....



Mullartiger Moder



Parabraunerde Pseudogley-Parabraunerde über Löß-Fließerde

## Böden auf....



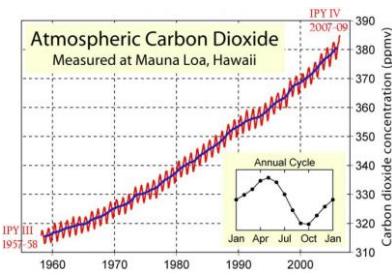
Rohhumusartiger  
Moder



Podsol über Buntsandstein / Tertiäre Sände

# Stoffhaushalt von Waldökosystemen

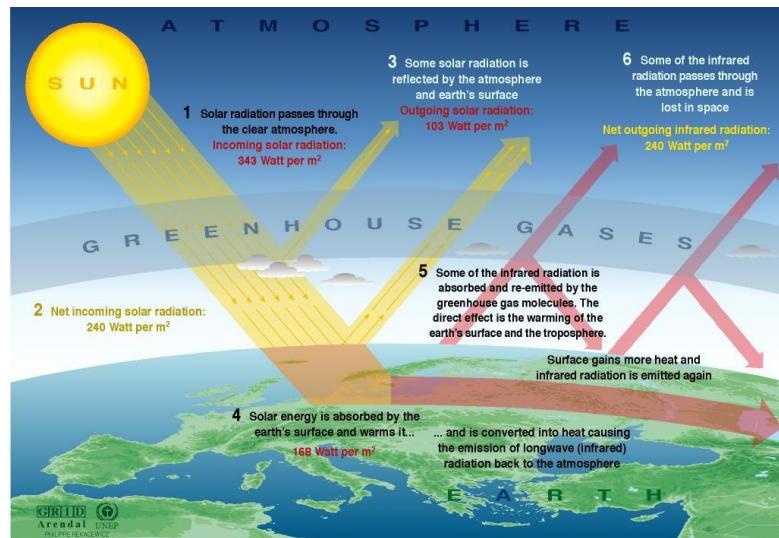
## Kohlenstoff



### Vorlesungsgliederung

- A. Treibhauseffekt, Treibhausgase
- B. Globale C Bilanz
- C. Kohlenstoffbilanzen von Wäldern
- D. Die Rolle des Bodens im Kohlenstoffkreislauf
- E. Mitigation of Climate Change

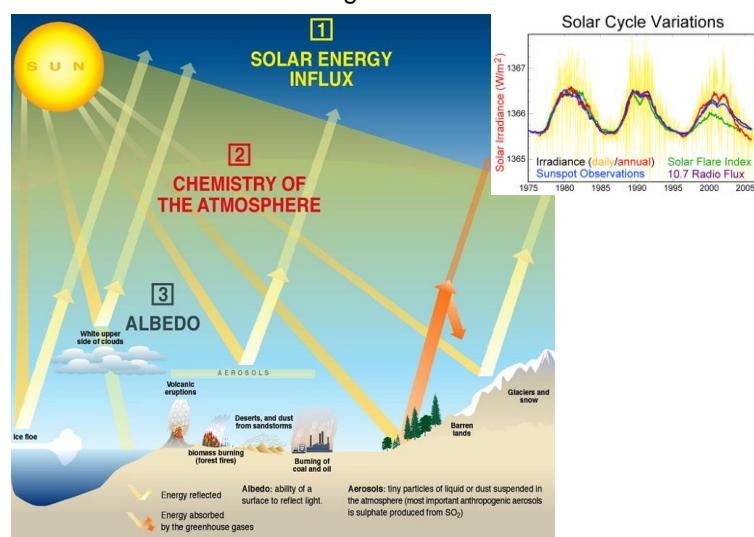
## A. Treibhauseffekt



Sources: Okanagan university college in Canada, Department of geography, University of Oxford, school of geography, United States Environmental Protection Agency (EPA), Washington, Climate change 1995. The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge university press, 1996.

## A. Treibhauseffekt

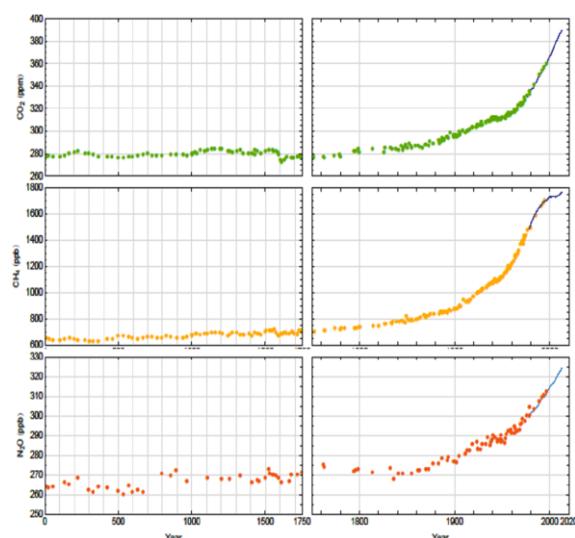
Welche Faktoren bestimmen die Energiebilanz der Erde?



## A. 'natürlicher' Treibhauseffekt

	Atmospheric composition		Contribution to 'natural' Greenhouse effect
N <sub>2</sub>	78.	%	---
O <sub>2</sub>	20.	%	---
Ar	1.	%	---
H <sub>2</sub> O	1.	%	20.6 °C
CO <sub>2</sub>	0.037	%	7.2 °C
CH <sub>4</sub>	0.00018	%	0.8 °C
N <sub>2</sub> O	0.000032%		1.4 °C
Trop. ozone	variable		2.4 °C
Total	100.	%	32.4 °C

## A. Treibhausgase



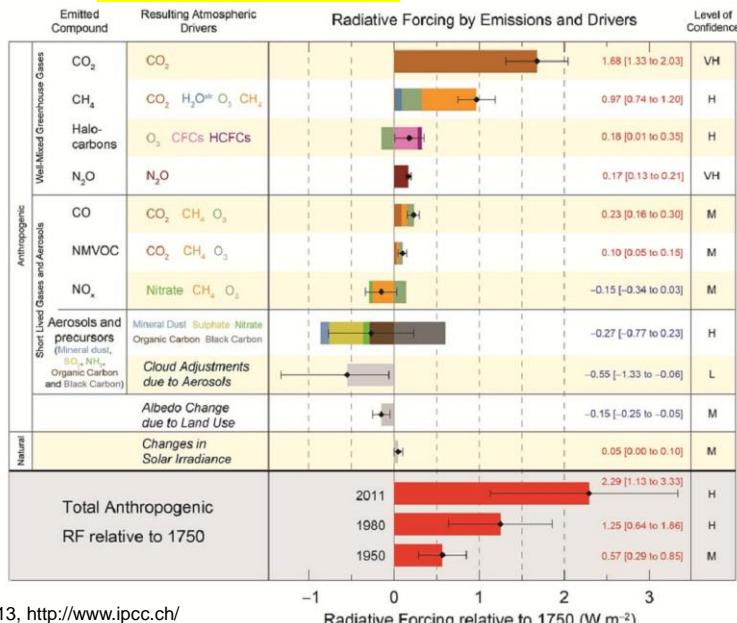
Zunahme vorindustriell (vor 1750) bis 2011:  
280 auf 390,5 ppm

715 auf 1803 ppb

270 auf 324 ppb

Atmosphärische Konzentration von CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> über die letzten 2 000 Jahre

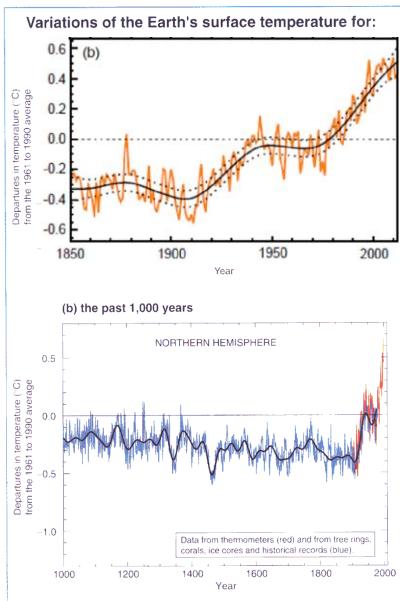
## A. Treibhausgase



IPCC 2013, <http://www.ipcc.ch/>

Radiative Forcing relative to 1750 (W m<sup>-2</sup>)

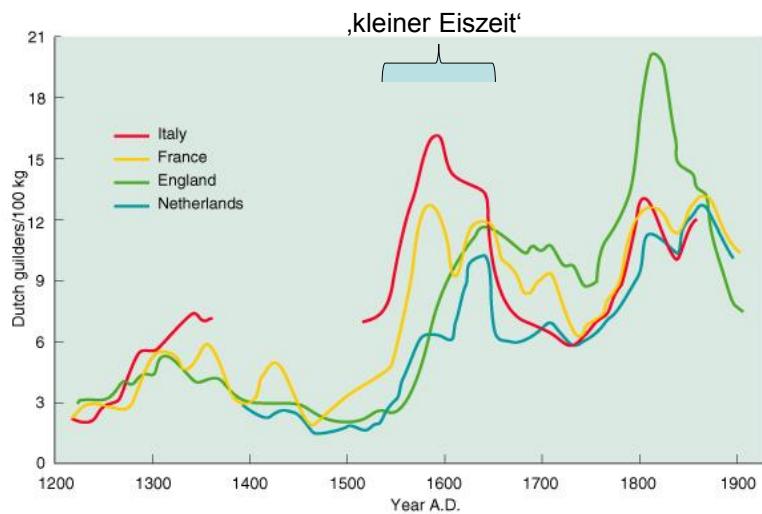
## A. Temperaturrentwicklung auf der Erde



Zunahme der globalen Temperatur (1880-2012): +0.85°C

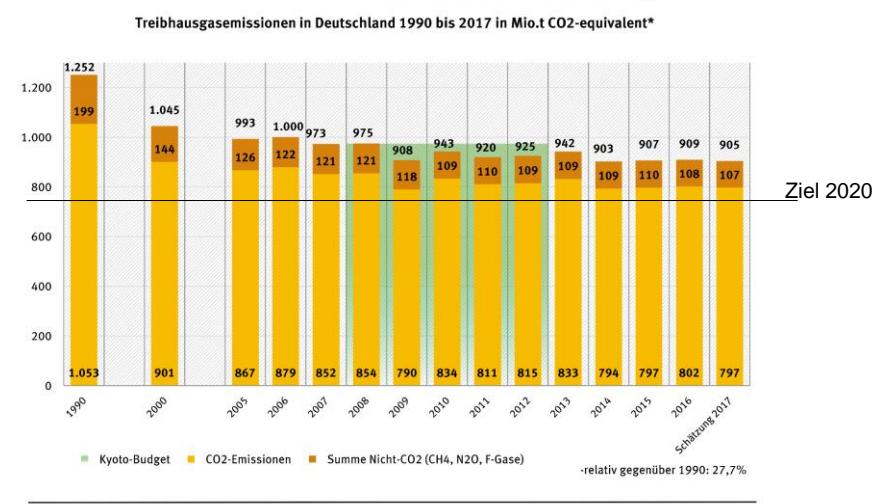
In der letzten Eiszeit war es 4.5° kälter als heute!

## A. Die Temperatur verändert die Welt



Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

## A. Treibhausgase: Deutschland



\* alle Angaben ohne Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen

Quelle: UBA Emissionssituation; Stand: 06.03.2018

## A. Verursacher der CO<sub>2</sub> Emissionen in Deutschland

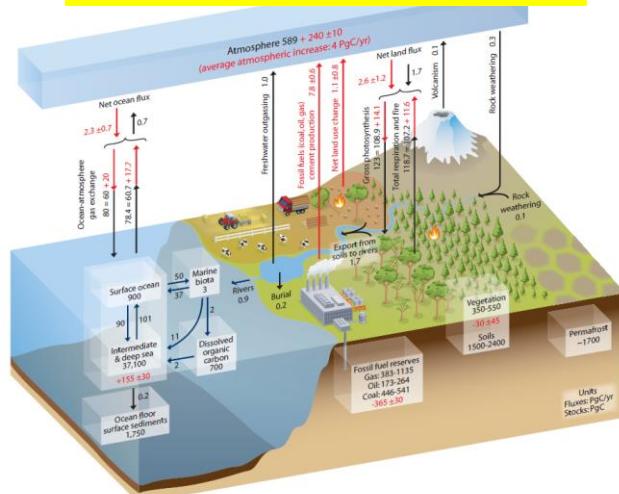
Treibhausgasemissionen nach Sektoren in Deutschland\*



Quelle: Umweltbundesamt 2015

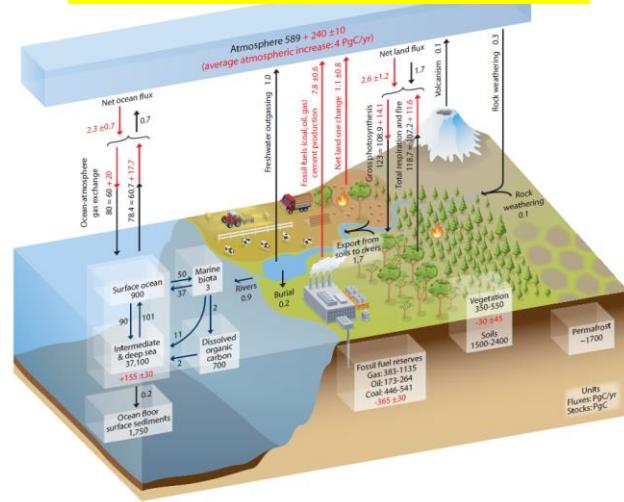
\*nach Schätzung für 2014

## B. Globaler C-Kreislauf (2007)



Kohlenstoffkreislauf: das System der chemischen Umwandlungen kohlenstoffhaltiger Verbindungen in den globalen Systemen Lithosphäre, Hydrosphäre, Erdatmosphäre und Biosphäre sowie den Austausch dieser Verbindungen zwischen diesen Erdsphären.

## B. Globaler C-Kreislauf (2007)



Schwarz: vorindustrielle Flüsse, rot: anthropogene Flüsse (Pg = Gt =  $10^9$  Tonnen)

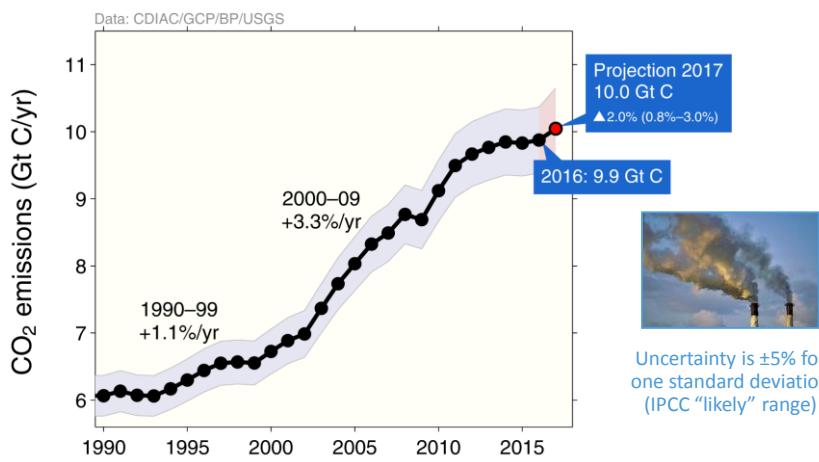
IPCC 2007, <http://www.ipcc.ch/>



## B. Fossile Brennstoff & Zement CO<sub>2</sub> Emissionen

Global emissions from fossil fuel and industry:  $9.9 \pm 0.6$  GtC in 2016, 62% over 1990

● Projection for 2017:  $10.0 \pm 0.6$  GtC, 2.0% higher than 2016

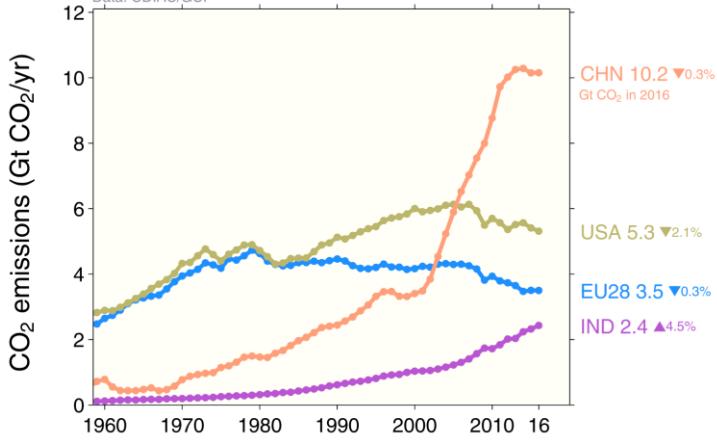


Source: [CDIAC](http://cdiac.ornl.gov/); [Le Quéré et al 2017](https://doi.org/10.5281/zenodo.102303); [Global Carbon Budget 2017](http://cdiac.ornl.gov/)

**B. Fossile Brennstoff CO<sub>2</sub> Emissionen**

The top four emitters in 2016 covered 59% of global emissions  
 China (28%), United States (15%), EU28 (10%), India (7%)

Data: CDIAC/GCP



Global Carbon Project

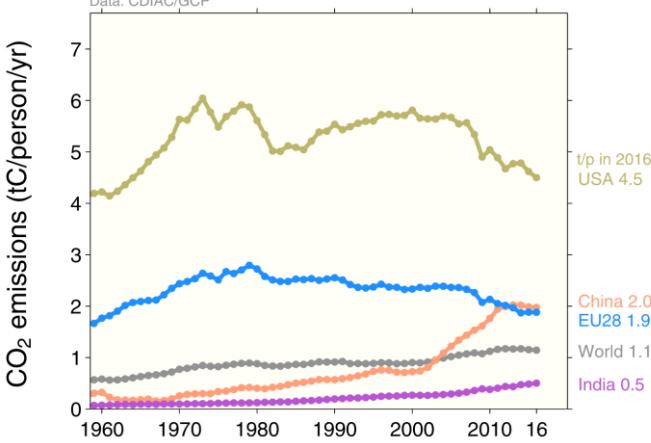
Bunker fuels are used for international transport is 3.1% of global emissions.

Statistical differences between the global estimates and sum of national totals are 0.6% of global emissions.

Source: [CDIAC](#); [Le Quéré et al 2017](#); [Global Carbon Budget 2017](#)**B. Fossile Brennstoff CO<sub>2</sub> Emissionen (pro capita)**

Countries have a broad range of per capita emissions reflecting their national circumstances

Data: CDIAC/GCP



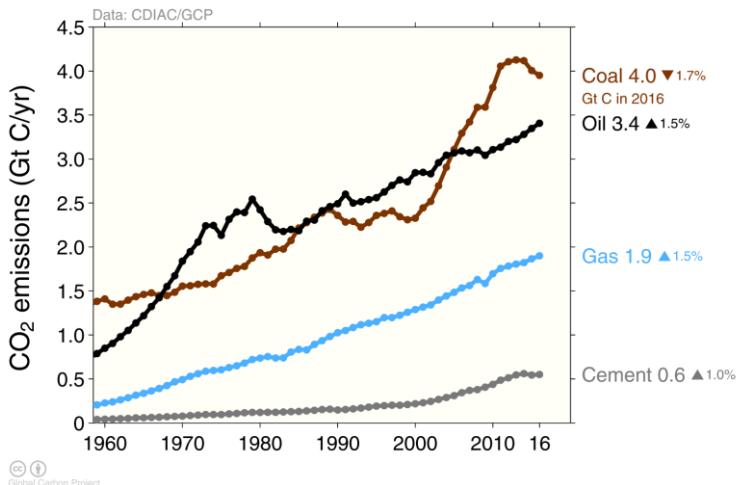
Global Carbon Project

Source: [CDIAC](#); [Le Quéré et al 2017](#); [Global Carbon Budget 2017](#)

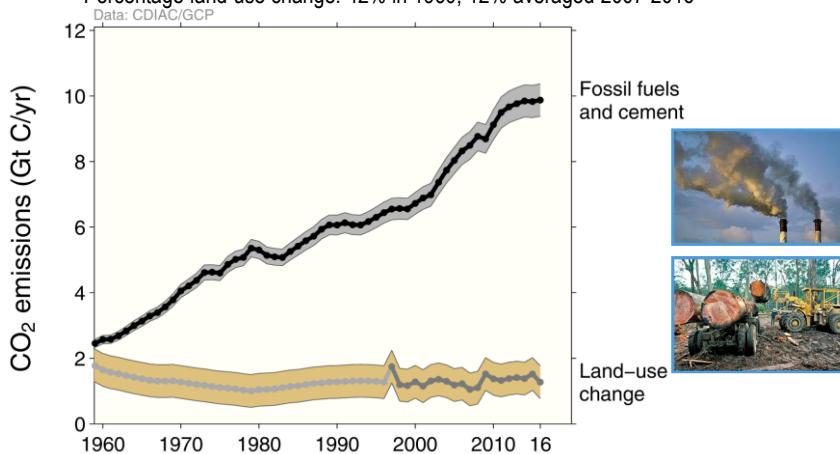
**B. Fossile Brennstoff CO<sub>2</sub> Emissionen**

Share of global emissions in 2016:

coal (40%), oil (34%), gas (19%), cement (6%), flaring (1%, not shown)

Source: [CDIAC](#); [Le Quéré et al 2017](#); [Global Carbon Budget 2017](#)**B. Gesammte globale CO<sub>2</sub> Emissionen**Total global emissions:  $10.6 \pm 0.7$  GtCO<sub>2</sub> in 2016, 52% over 1990

Percentage land-use change: 42% in 1960, 12% averaged 2007-2016

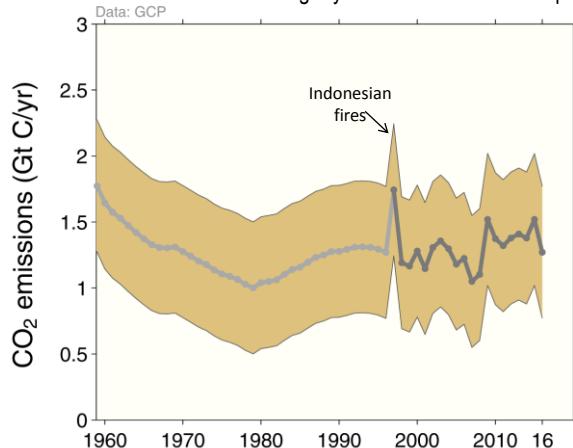


Land-use change estimates from two bookkeeping models, using fire-based variability from 1997

Source: [CDIAC](#); [Houghton and Nassikas 2017](#); [Hansis et al 2015](#); [van der Werf et al. 2017](#); [Le Quéré et al 2017](#); [Global Carbon Budget 2017](#)

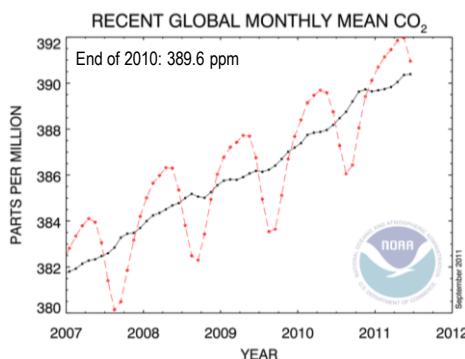
**B. CO<sub>2</sub> Emissionen durch Landnutzungsänderungen**

Land-use change emissions are highly uncertain. Higher emissions in 2016 are linked to increased fires during dry El Niño conditions in tropical Asia



Estimates from two bookkeeping models, using fire-based variability from 1997

Source: [Houghton and Nassikas 2017](#); [Hansis et al 2015](#); [van der Werf et al. 2017](#); [Le Quéré et al 2017](#); [Global Carbon Budget 2017](#)

**B. Wo bleibt der CO<sub>2</sub>?**

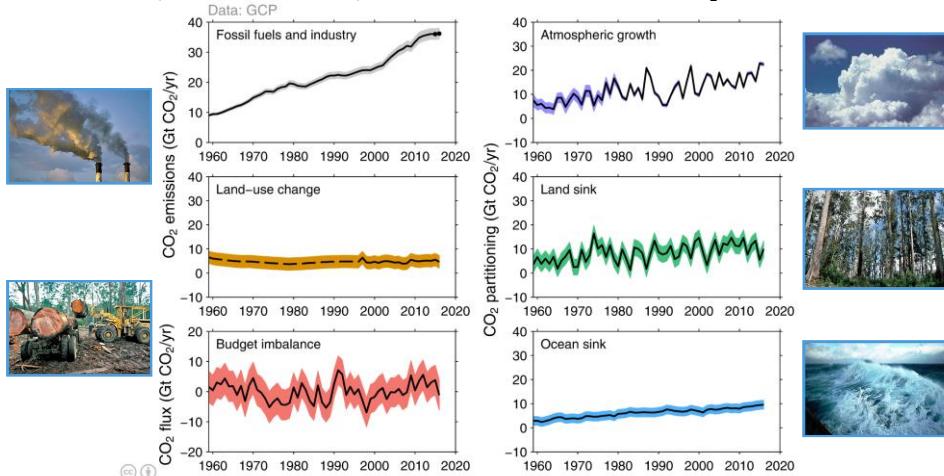
Annual Growth Rates (decadal means)
1970 – 1979: 1.3 ppm y <sup>-1</sup>
1980 – 1989: 1.6 ppm y <sup>-1</sup>
1990 – 1999: 1.5 ppm y <sup>-1</sup>
2000 – 2010: 1.9 ppm y <sup>-1</sup>

Annual Mean Growth Rate (ppm y <sup>-1</sup> )	
2010	2.36
2009	1.63
2008	1.81
2007	2.11
2006	1.83
2005	2.39
2004	1.58
2003	2.20
2002	2.40
2001	1.89
2000	1.22

Data Source: Thomas Conway, 2011, NOAA/ESRL + Scripts Institution

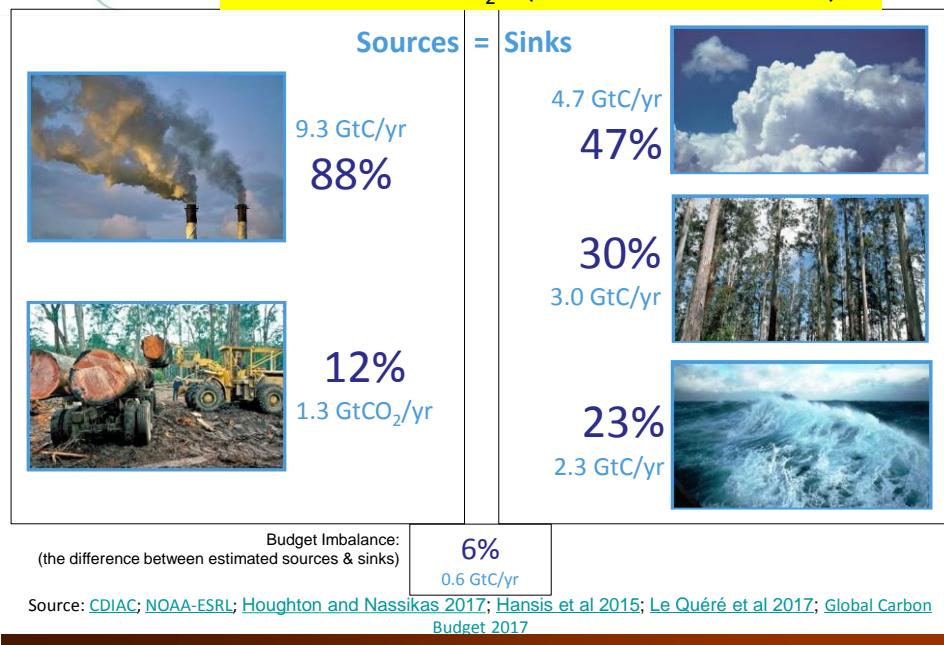
**B. Wo bleibt der CO<sub>2</sub>?**

The sinks have continued to grow with increasing emissions, but climate change will affect carbon cycle processes in a way that will exacerbate the increase of CO<sub>2</sub> in the atmosphere



The budget imbalance is the total emissions minus the estimated growth in the atmosphere, land and ocean.  
It reflects the limits of our understanding of the carbon cycle.

Source: [CDIAC](#); [NOAA-ESRL](#); [Houghton and Nassikas 2017](#); [Hansis et al 2015](#); [Le Quéré et al 2017](#); [Global Carbon Budget 2017](#)

**B. Wo bleibt der CO<sub>2</sub>? (Mittelwert 2007 -2016)**

## B. Terrestrische Ökosysteme sind eine Senke für Kohlenstoff

Quellen an Land ( $1.3 \text{ Gt C a}^{-1}$ )

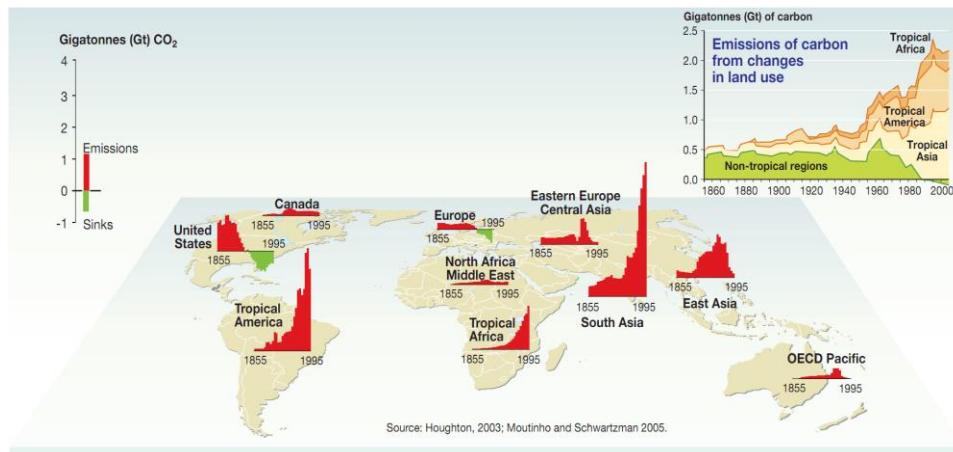
- Landnutzungsänderung (Tropen)
- Erhöhte Temperatur steigert die heterotrophe Respiration im Boden



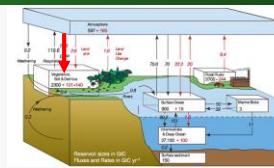
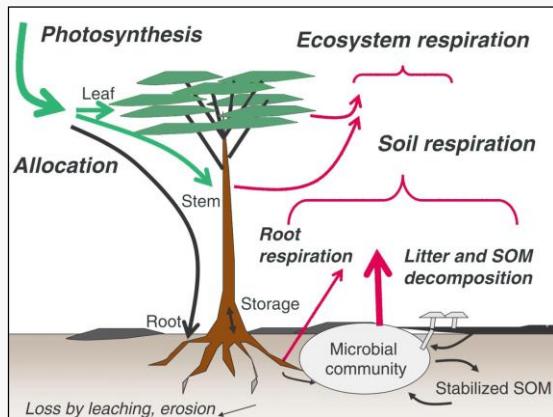
Senken an Land ( $3.0 \text{ Gt C a}^{-1}$ )

- Senke an Land (2007-2016)  $\approx 3.0 \text{ Gt C a}^{-1}$
- Aufforstungen > Entwaldung  $\rightarrow$  Senke an Land
- Landnutzung
  - reduzierte Bodenbearbeitung (Landwirtschaft)
  - Böden mit historischer Streunutzung binden C
  - Biomassevorratserhöhung im Wald
- Erhöhtes Pflanzenwachstum durch  $\text{CO}_2$ -Anstieg
  - Assimilation und Sequestrierung steigen (Limitierung durch Nährstoffe und Gene möglich)
  - Zunahme der NPP in FACE Experimenten (+50%  $\text{CO}_2$ ): verholzte Pflanzen (+23% - +25%), Getreide (<<geringer)
- Erhöhtes Pflanzenwachstum durch Stickstoffdepositionen

## B. Historische C Bilanz für Wälder



### C. Kohlenstoffbilanzen von Wäldern



$$\text{Netto-primärproduktion (NPP)} = \text{Brutto-primärproduktion (GPP)} - \text{autotrophe Respiration (R}_a\text{)}$$

Baum & Wurzelzuwachs

Photosynthese

Blatt + Stamm + Wurzelrespiration

Trumbore, 2006

### C. Kohlenstoffhaushalt von 2 Buchenbeständen

#### A. Standortkenngrößen

	Göttinger Wald	Solling
Alter (2000) (Jahre)	132	153
Bäume/ha	245	199
Durchmesser (cm)	46	47
Höhe (m)	34	30
Nutzholzvolumen ( $m^3/ha$ )	686	519
Niederschlag (1990-2003) (mm)	709	1193
Temperatur (1990-2003) ( $^{\circ}C$ )	7.4	6.9
Geologisches Substrat	Kalk	Löß über Buntsandstein
pH( $H_2O$ )	6.1 – 7.8	3.5 – 4.3
Basensättigung (%)	>95%	4 – 7

### C: Kohlenstoffhaushalt von 2 Buchenbeständen

#### B. Vorräte

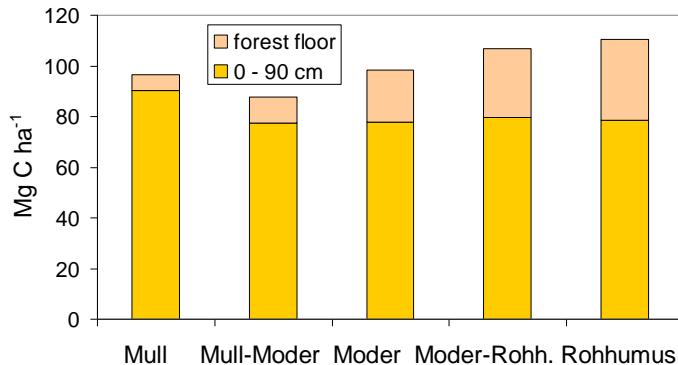
	Göttinger Wald	Solling
C-Vorrat Bäume (t/ha)	208	186
Blätter (%)	0.7	0.9
Zweige <7 cm (%)	7.0	18
Borke <7 cm (%)	4.1	4.5
Holz >7 cm (%)	73	69
Wurzeln >0.2 cm (%)	15	7.4
Wurzeln <0.2 cm (%)	0.5	0.6
C-Vorrat Boden (0-80 cm)	179	172

### C: Kohlenstoffhaushalt von 2 Buchenbeständen

#### C. Kohlenstoffbilanzen (t C ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>)

	Göttinger Wald	Solling
Zuwachs (incl. Grobwurzeln)	3.3	1.2
Streu Bäume Streufall	2.6	2.6
Wurzelstreu	0.6	1.3
Nettoprimärproduktion, Bäume (NPP)	6.5	5.1
Bodenvegetation	0.22	0.02
Vorratsänderung im Humus	0	0.35
Mineralbodenänderung	0?	0?
Netto C Senke im Ökosystem	3.3	1.2 + 0.35

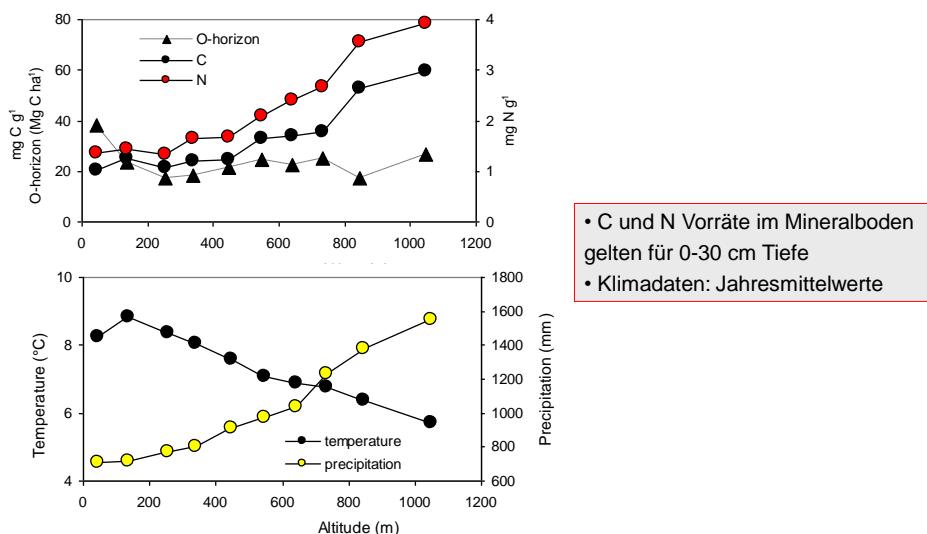
## D. Kohlenstoffspeicherung in Waldböden von Deutschland



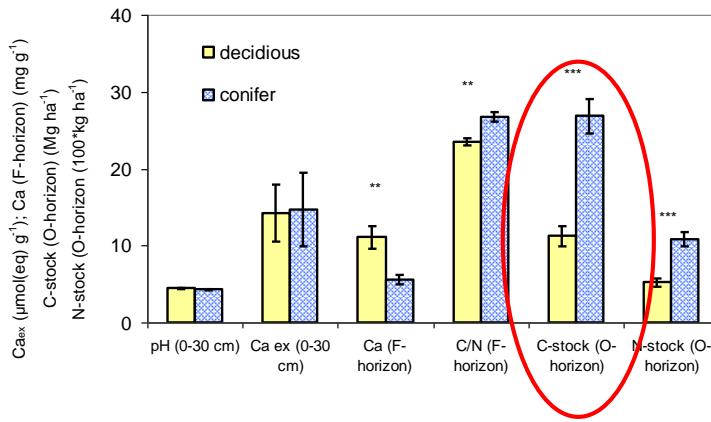
	$N = 1110$	$t\ C\ ha^{-1}$	$t\ N\ ha^{-1}$
Organische Auflage		19 (19%)	0.8(12%)
0 – 90 cm		80 (81%)	6 (88%)
Gesamt		99	6.8

(BZE, 1996)

## D. Der Einfluss der Höhe über NN auf die Kohlenstoffspeicherung



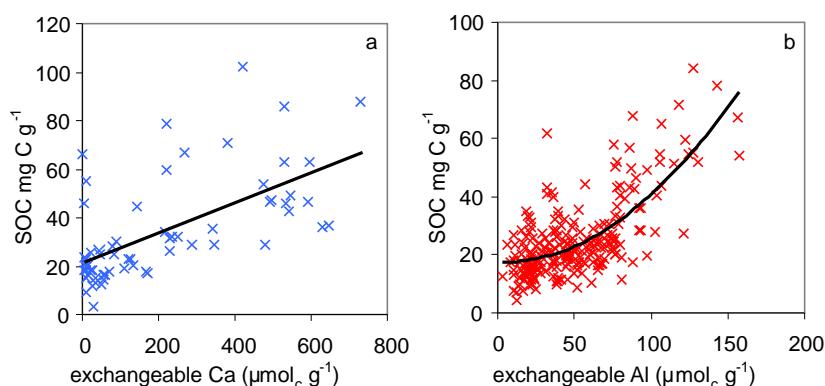
## D. Der Einfluss der Baumart auf die Kohlenstoffspeicherung



- Laubwälder sind definiert über <20% Nadelholzanteil (n = 75)
- Nadelwälder sind definiert über <20% Laubholzanteil (n = 60)
- Wälder liegen zwischen 200 und 400 Höhe
- Basenreiche Buchenwälder sind ausgeschlossen (<100 mg Ca<sub>ex</sub> kg<sup>-1</sup>)

(Brumme Khanna, 2009)

## D. Der Einfluss des Bodenzustandes auf die Kohlenstoffspeicherung

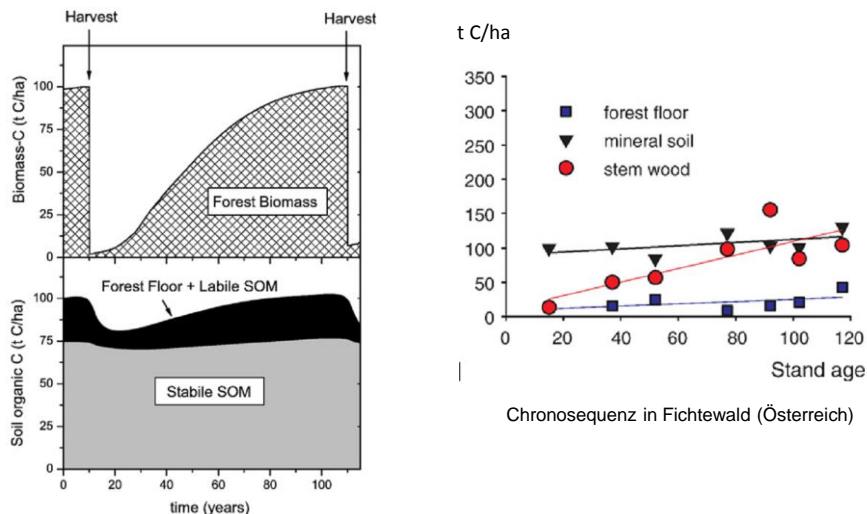


- Böden mit pH Werten >4.8

- Böden mit pH Werten <4.8,
- austauschbares Ca <15 mg kg<sup>-1</sup>,
- in Wäldern mit >95% Nadelholzanteil

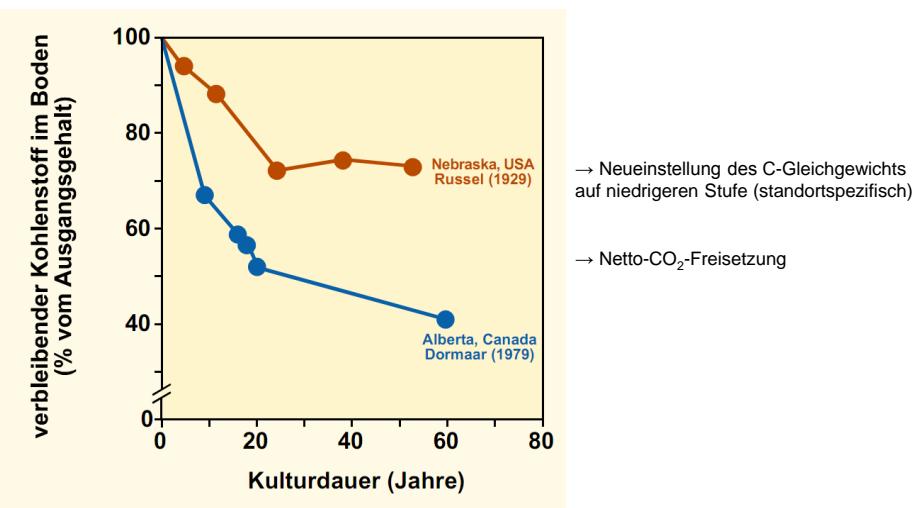
(Brumme Khanna, 2009)

#### D. Einfluß der Bewirtschaftung auf Kohlenstoffvorrat (Fichte)

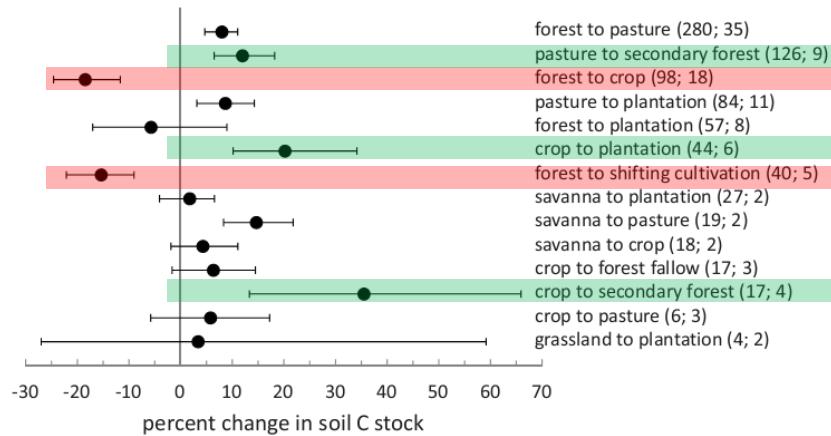


Jandl et al. 2007 (Geoderma)

#### D. Einfluss Landnutzungsänderungen auf Bodenkohlenstoff

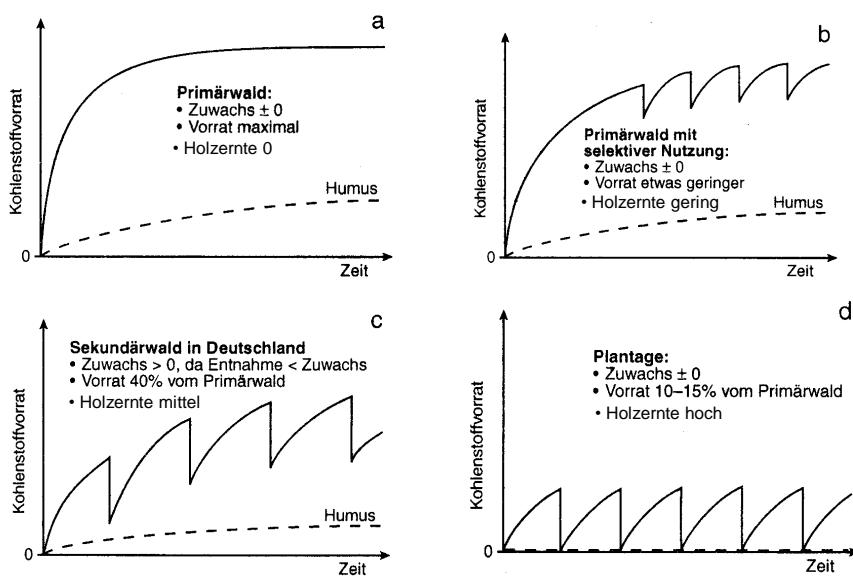


## D. Einfluss Landnutzungsänderungen auf Bodenkohlenstoff



(Powers et al. PNAS 2011)

## E. Einfluß der Bewirtschaftung auf den C-Zuwachs in Wäldern



## E. Forstliche Optionen zur Beeinflussung der Netto-C-Sequestrierung in Wäldern

### Mitigation Aktivitäten (IPCC 2007)

- Erhöhe die Zunahme der forstlichen Fläche
- Erhöhe die Biomassevorräte auf den Flächen
  - Erhalte den Kronenschlusses
  - Reduziere den Verlust von toten organischen Material (zB Schlagabbaum, Bodenerosion, Abbrennen zB des Schlagabraums)
  - Fördere eine schnelle Bestandesbegründung und Wachstum nach der Ernte
  - Reduziere die Degradierung von Wäldern
  - Fördere das Wachstum (Standortspezifisch zB Kalkung, Düngung)
- Erhöhe die C-Vorräte in Holzprodukten
- Erhöhe die Substitution von fossilen Brennstoffen
- Erhöhe die Substitution von energieintensiven Stoffen (Beton, Stahl, Aluminium, Kunststoffe, Dämmstoffe)

## E. Beitrag der Wälder zur Reduktion der CO<sub>2</sub> Emissionen?

Beispiel Deutschland:

C-Speicher Boden	1,2 Mrd. t C
C-Speicher Baum-Biomasse	1,2 Mrd. t C
<u>Langlebige Holzprodukte</u>	0,03 Mrd. t C
Gesamt	2,4 Mrd. t C

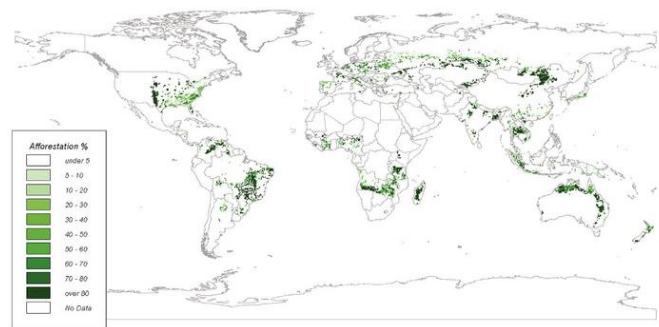
Anthropog. CO<sub>2</sub>-C-Emissionen                          218 Mio t C a<sup>-1</sup>

Stoffliche/energetische Verwertung von Holz    22 Mio t C a<sup>-1</sup>

Vorratszunahme an Biomasse im Wald                5,5 Mio t C a<sup>-1</sup>

A eine 8-fach höhere Waldfläche wäre notwendig, um die CO<sub>2</sub> Emissionen in Wäldern zu binden.

## E. Können Plantagen das global freigesetzte CO<sub>2</sub> adsorbieren?



Um 10 Gt CO<sub>2</sub>-C pro Jahr zu binden müßte eine Fläche,  
die 2.3 mal größer ist als das Amazonasbecken, bepflanzt werden (bei  
einer Wuchsleistung von 5 t C ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>).





## Acknowledgements

The work presented in the **Global Carbon Budget 2017** has been possible thanks to the contributions of **hundreds of people** involved in observational networks, modeling, and synthesis efforts.

We thank the institutions and agencies that provide support for individuals and funding that enable the collaborative effort of bringing all components together in the carbon budget effort.

We thank the sponsors of the GCP and GCP support and liaison offices.

We also want thank each of the many funding agencies that supported the individual components of this release. A full list is provided in Table B1 of Le Quéré et al. 2017.  
<https://doi.org/10.5194/essdd-2017-123>

We also thanks the Fondation BNP Paribas for supporting the Global Carbon Atlas.

This presentation was created by Robbie Andrew with Pep Canadell, Glen Peters and Corinne Le Quéré in support of the international carbon research community.



research for global sustainability



NIES



IAC  
LAND • OCEAN • ATMOSPHERE • SOCIETY



The Research Council  
of Norway



European  
Commission



Center for International  
Climate and Environmental  
Research - Oslo



LSC-E



University of East Anglia



Tyndall®Centre®  
for Climate Change Research



FONDATION  
BNP PARIBAS

# Feldversuche zum Wasser- und Stoffhaushalt von Waldökosystemen: Strategie und Instrumentierung

 E. Veldkamp  
Ökopedologie, Uni-Göttingen



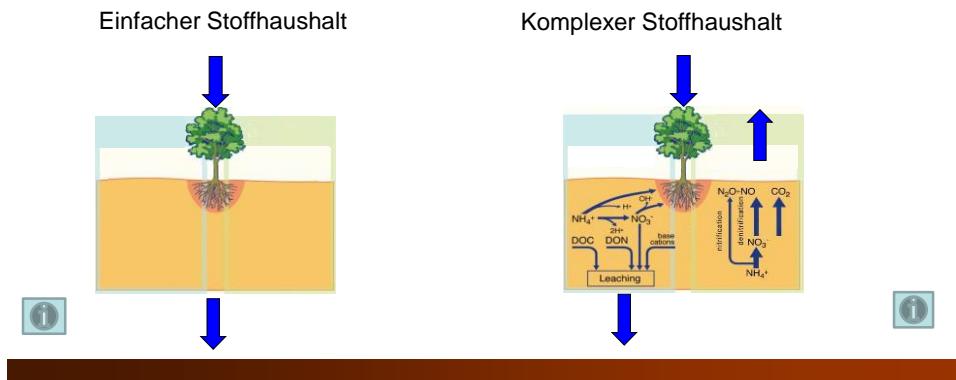
## Vorlesungsgliederung

- A. Einführung
- B. Stoffhaushalt, Beispiel
- C. Stoffhaushalt, Strategie und Messansatz
- D. Instrumentierung
- E. Zusammenfassung

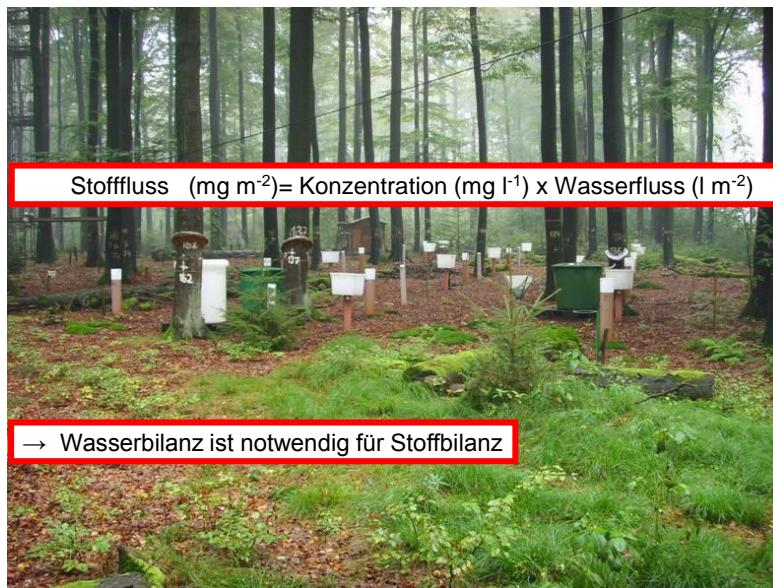
## Wie kann man Wasser- und Stoffhaushalt studieren?

-Waldökosysteme sind offene Systeme, das heißt, sie empfangen und verlieren Wasser und Nährstoffe und haben zusätzlich interne Wasser- und Nährstoffumsätze.

-Unbalanzierte Wasser- und Stoffhaushalte weisen oft auf Umweltprobleme hin.



## Wie mißt man den Stoffhaushalt eines Waldes?

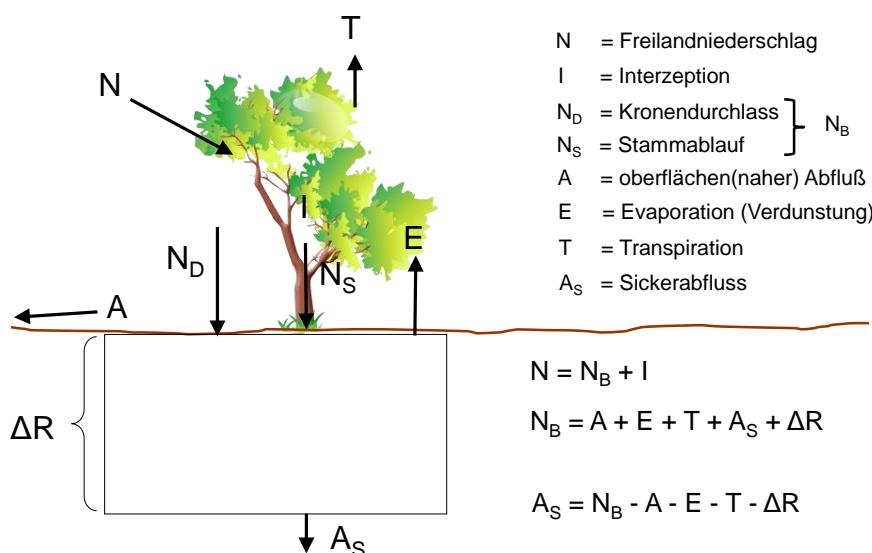


### Beispiel: Wasserbilanzen

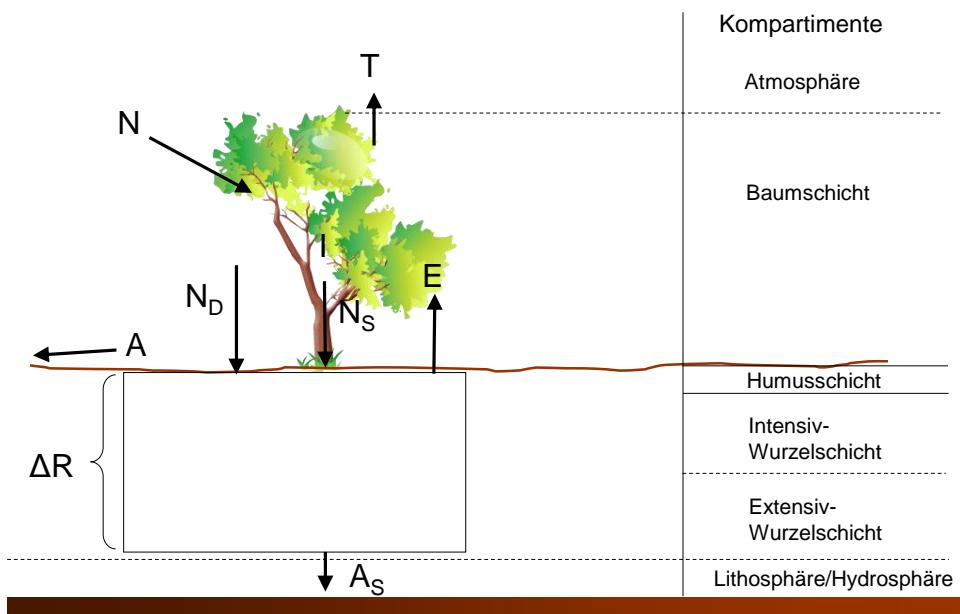
#### Vergleich Solling und Neuglobsow

	Baumart	N [mm/a]	I [mm/a]	$N_B$ [mm/a]	akt. ET [mm/a]	As [mm/a]	$\Delta R$ [mm/a]
Solling 1969 -1975							
	Buche	1064	152 14%	912 85%	307 29%	583 54%	+22
	Fichte	1064	320 30%	744 70%	384 36%	384 36%	-24
Neuglobsow 1998 - 2004							
	Kiefer/ Buche	547	142 25%	404 74%	385 70%	26 5%	0

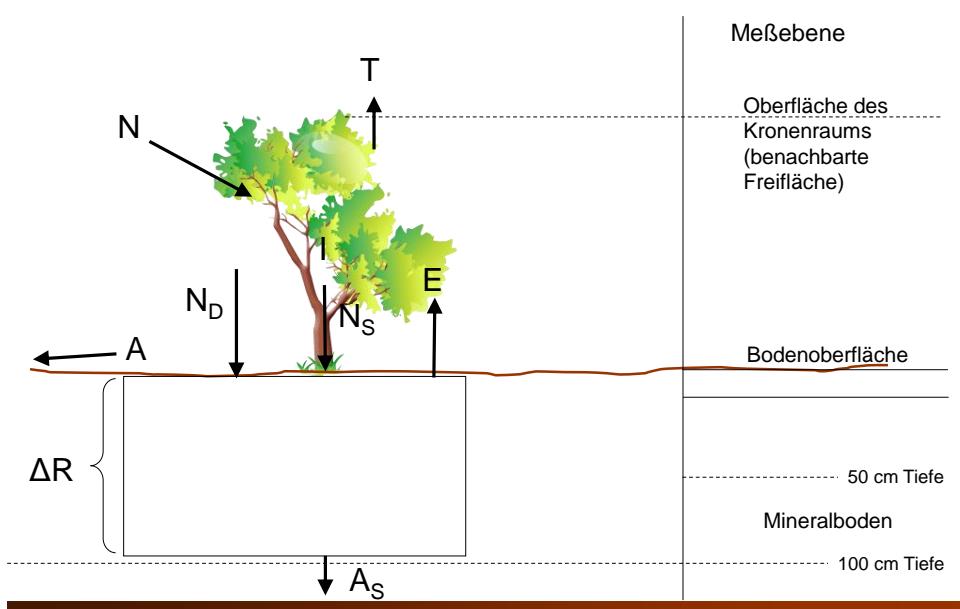
### Wasserhaushalt eines Waldökosystems

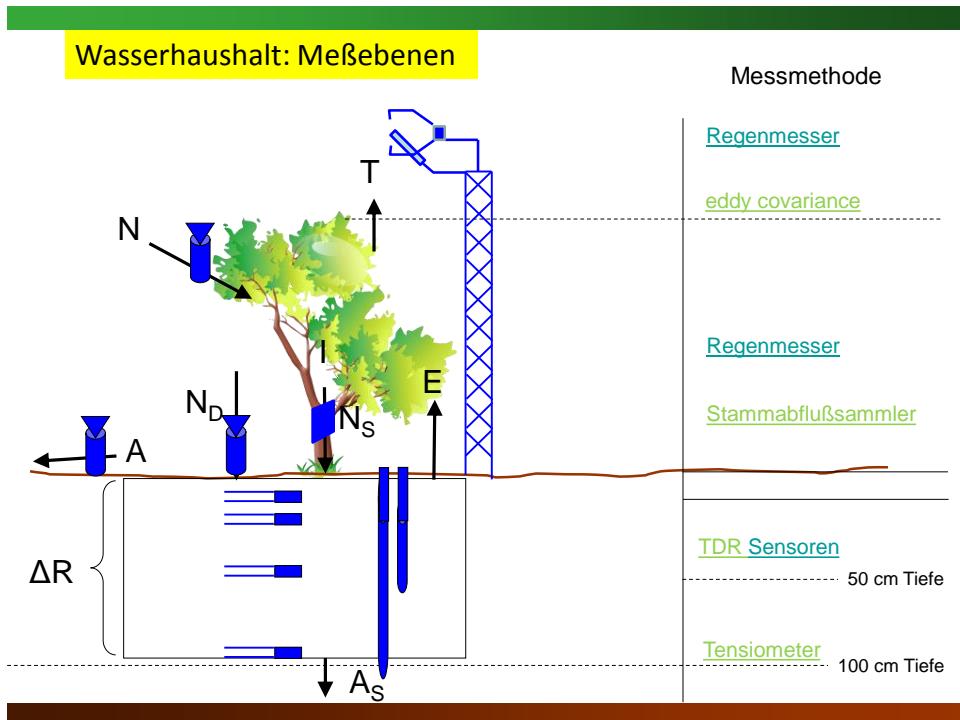


### Wasserhaushalt: Kompartimente



### Wasserhaushalt: Meßebenen





**Beispiel: N Bilanzen Buchenwald 1990 – 2002**

	<u>Solling</u>	<u>Göttinger Wald</u>
Niederschlagsdeposition	18	14
Bestandsniederschlag	<b>25</b>	<b>21</b>
Kronentraufe	22	17
Stammabfluß	3	4
Gesamtdeposition	25	21
Baumzuwachs	6	18
Humuszuwachs	21	0
Sickerwasserverluste	<b>2</b>	<b>5</b>
$\text{N}_2\text{O}$ -Verluste	<b>2</b>	0.1

Input-Output

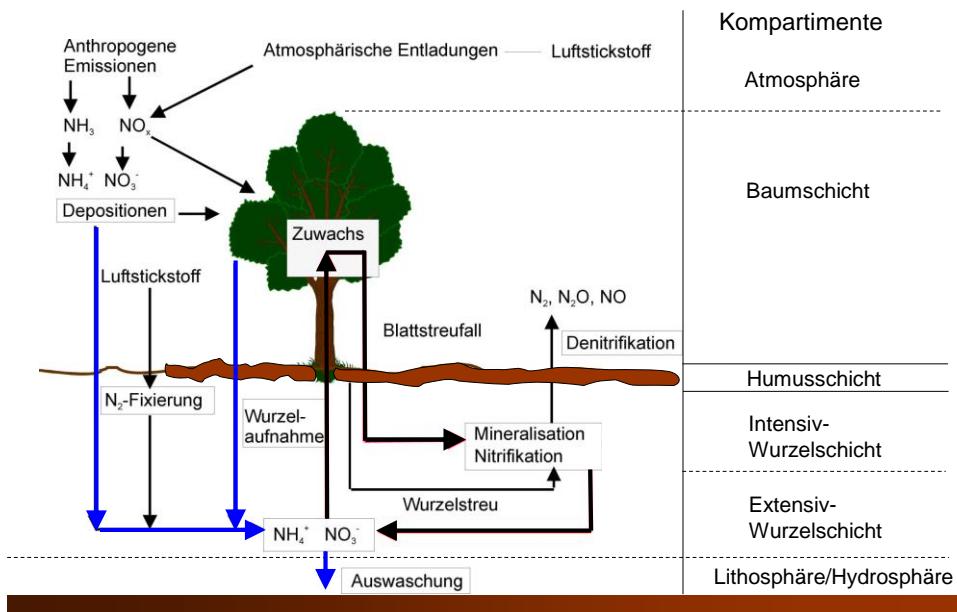
$$\mathbf{25 - 4 = 21}$$

$$\mathbf{21 - 5 = 16}$$

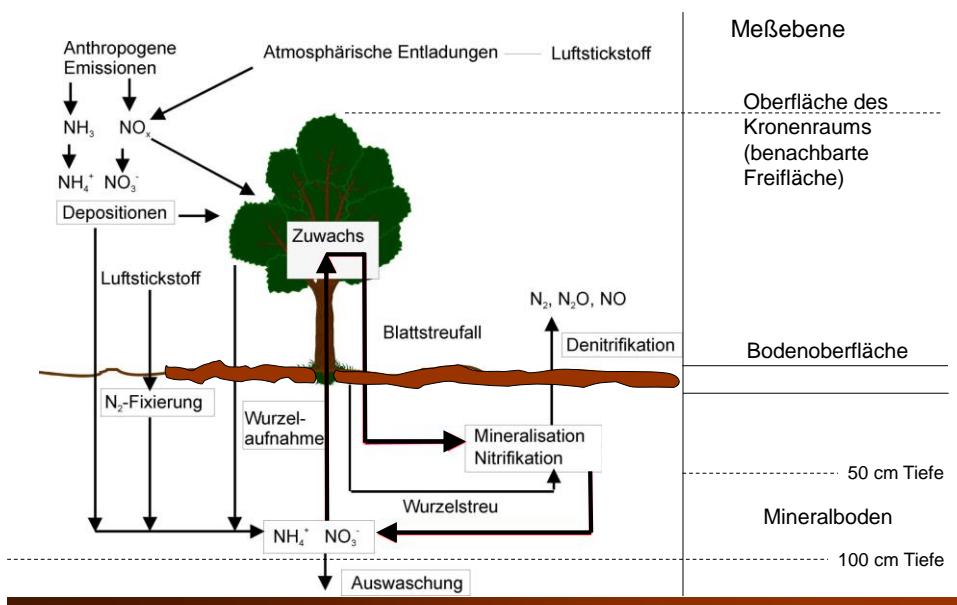
Alle Zahlen in ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ )

Brumme & Khanna, (2009)

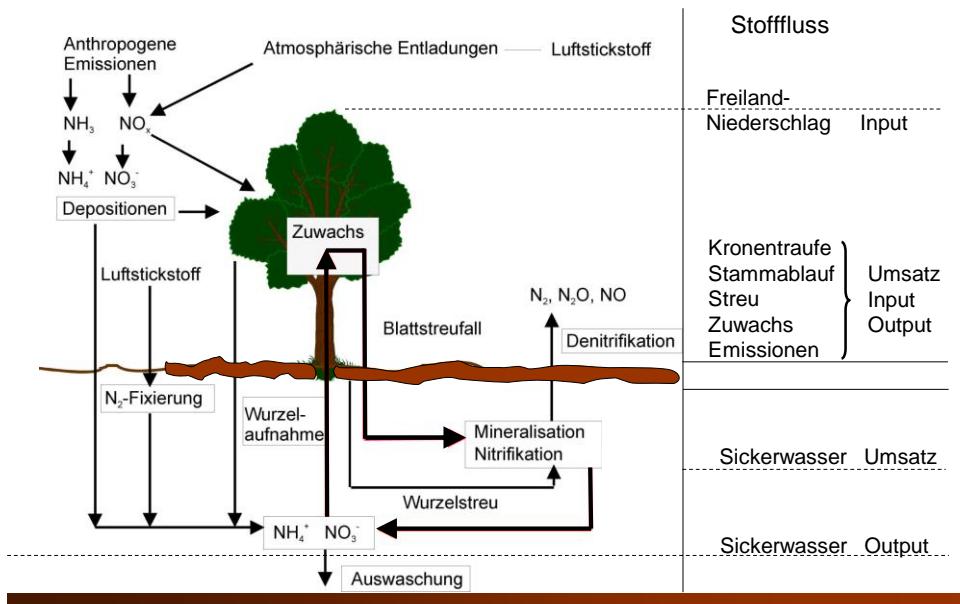
## Stickstoffhaushalt: Kompartimente



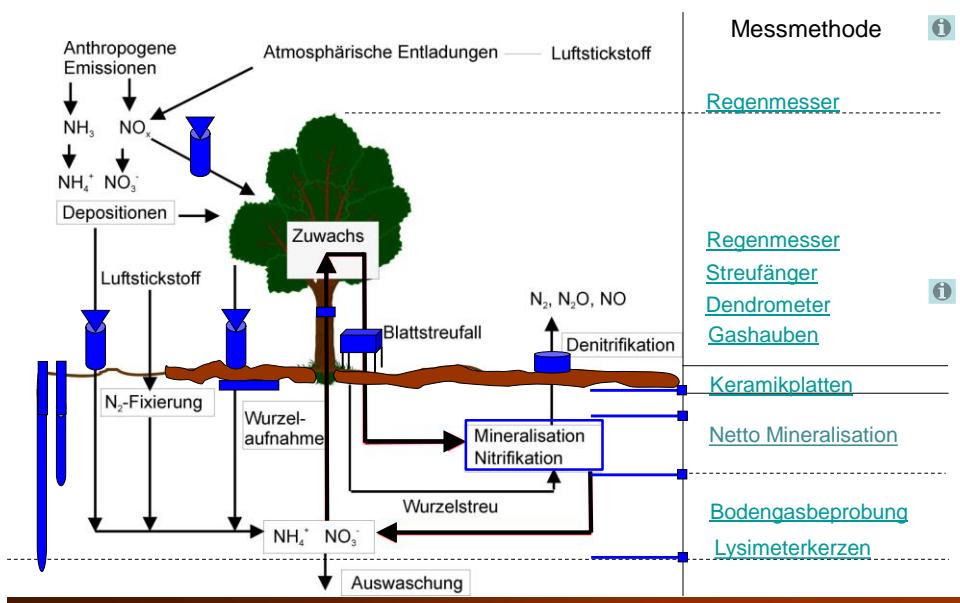
## Stickstoffhaushalt: Meßebenen



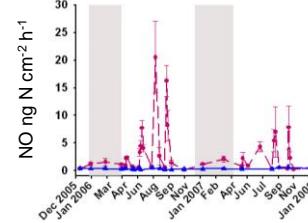
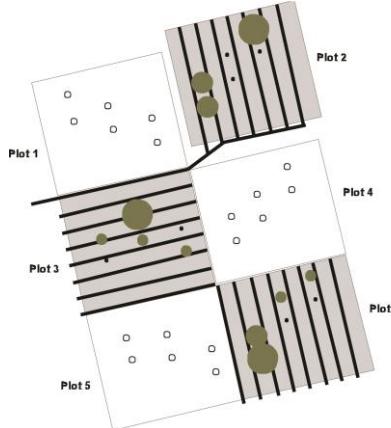
## Stickstoffhaushalt: Stoffflüsse



## Stickstoffhaushalt: Messmethoden



## Räumliche und zeitliche Variabilität



## Zusammenfassung

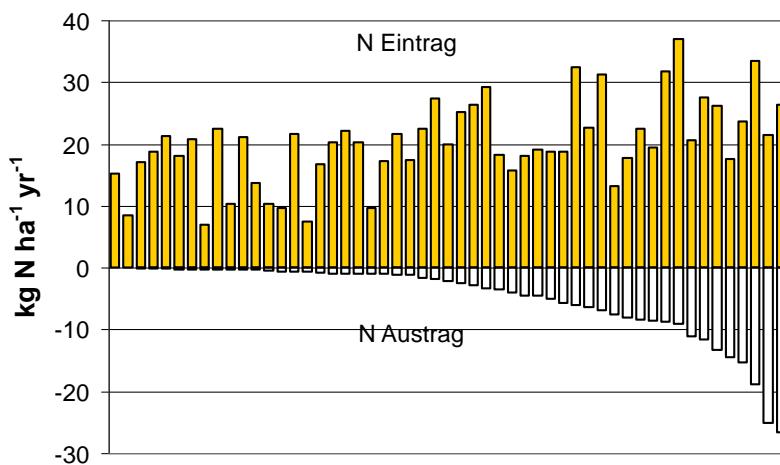
- Waldökosysteme sind offene Systeme
- Komplexität der Stoffhaushalte hängt ab von der Fragestellung
- Vorgehensweise:
  - Definition der Kompartimente
  - Messebene auf Grenzfläche zwischen Kompartimente
  - Instrumentierung abhängig von der Fragestellung

-Räumliche und zeitliche Variabilität bei Beprobung berücksichtigen!

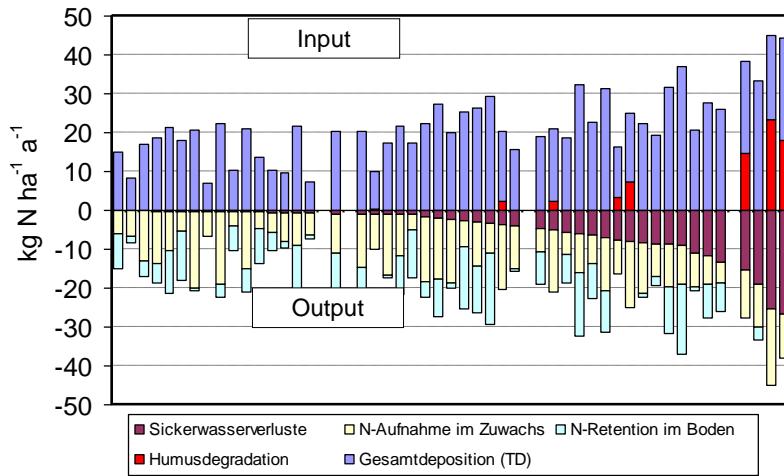
Vielen Dank !



### N-Bilanzen von Waldökosystemen in Deutschland



## N-Bilanzen von Waldökosystemen in Deutschland



## Regensammler



## Regensammler



## Stammabflußsammler



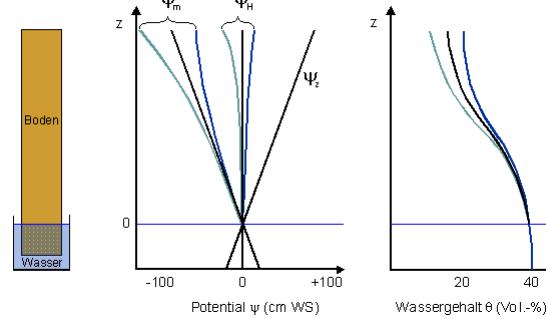
## Klimaturm mit eddy covariance Gerät



## Tensiometer

Hydraulische Potenzial  $\psi_h$  setzt sich zusammen aus:

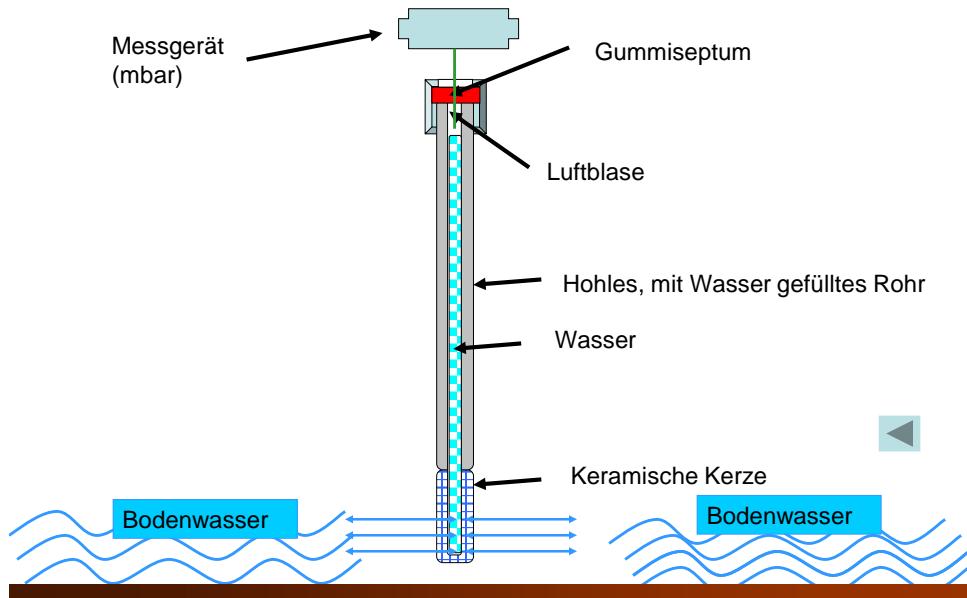
- Gravitationspotenzial  $\psi_z$  [hPa, cm H<sub>2</sub>O]  
Ursache: Schwerkraft
- Matrixpotenzial  $\psi_m$  [hPa, cm H<sub>2</sub>O] (Saugspannung, Tension)  
Ursache: Adsorptions- und Kapillarkräfte



## Tensiometermessfeld



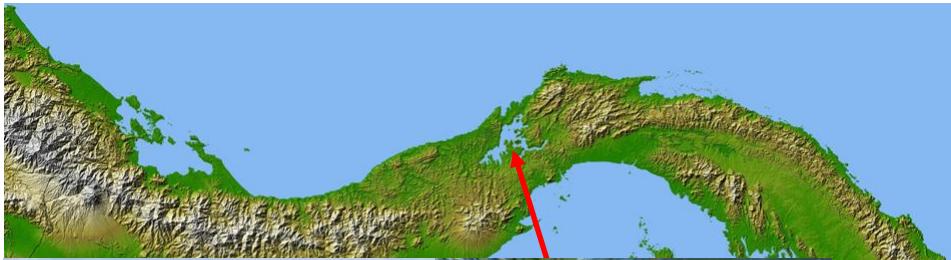
## Funktionsweise eines Tensiometers



### Installation von TDR Sensoren



### Panama



## Dendrometer



## Streufänger

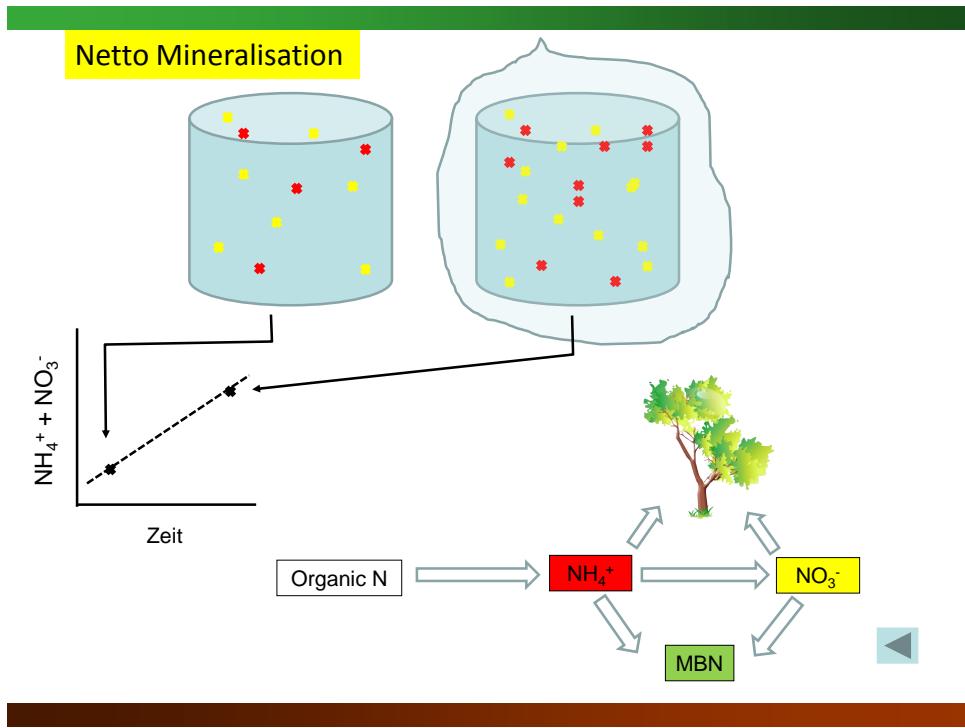


Gashauben



Keramikplatte unter organische Auflage





### Installation von Lysimeterkerzen für Sickerwasserbeprobung



Beheizte Hütte zum Sammeln der  
Lysimeter-Bodenlösungen aus  
den verschiedenen Bodentiefen  
mit Hilfe einer Unterdruckpumpe



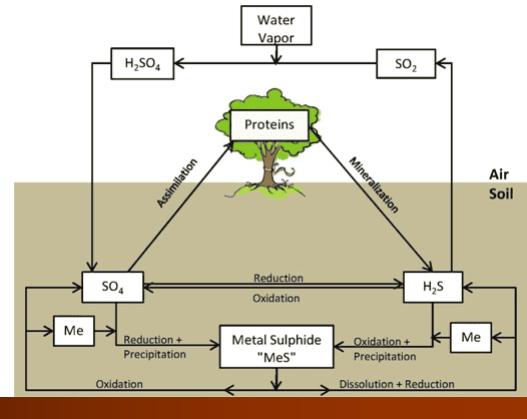
## Stoffhaushalt von Waldökosystemen

### Schwefel



E. Veldkamp

Ökopedologie, Uni-Göttingen



### Vorlesungsgliederung

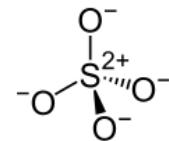
- A. Schwefel; Globaler Schwefelkreislauf
- B. Prozesse
- C. Depositionen
- D. Auswirkungen von S-Depositionen auf Waldökosysteme
- E. Bilanzen

## A: Schwefel (S)

- Schwefel ist enthalten in bestimmte wichtige Aminosäuren und Coenzyme und ist ein essentielles Element lebender Zellen

-Schwefel ist ein Makronutrient und steht Pflanzen vor allem in Form von anionischem Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) aus dem Boden zur Verfügung

-Der Schwefel wird bei Gefäßpflanzen als  $\text{SO}_4^{2-}$  über die Wurzeln aufgenommen und über das Xylem in die Blätter transportiert



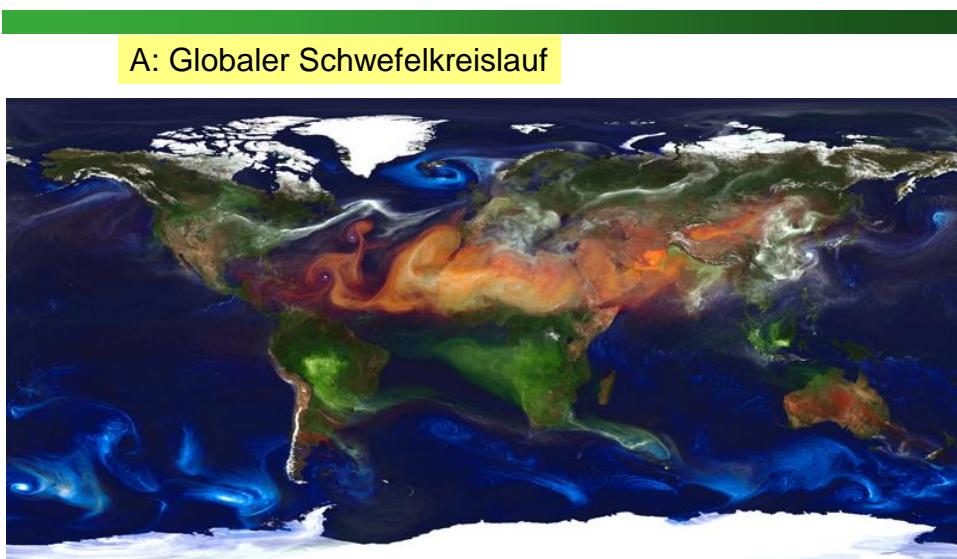
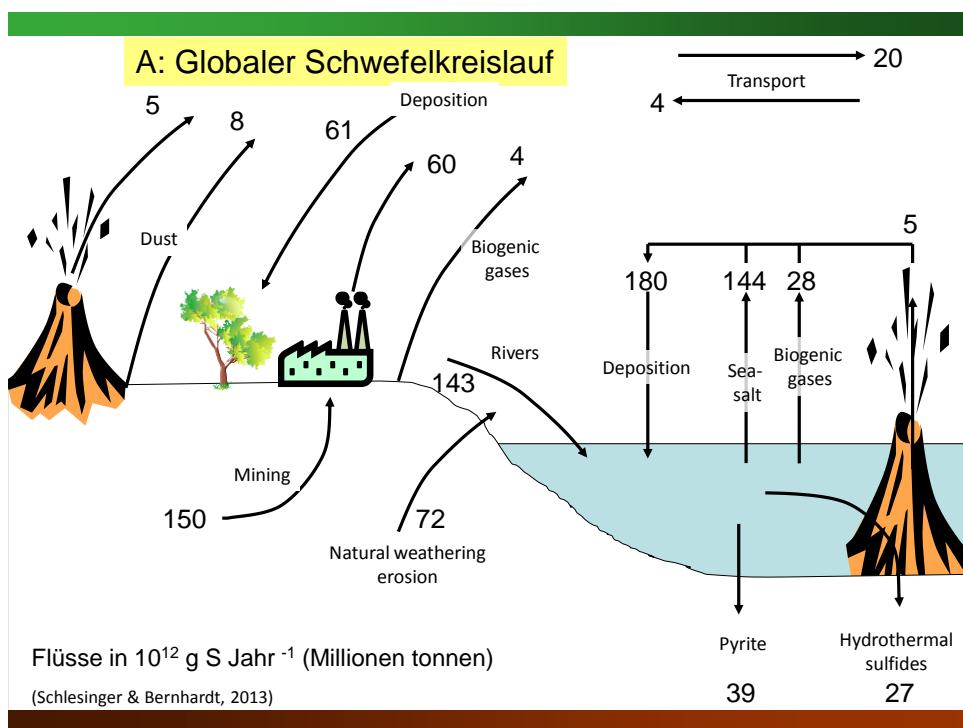
## A: Schwefel (S)

### Schwefelvorräte nahe der Erdoberfläche

Reservoir	$10^{18} \text{ g S} (=10^{12} \text{ ton} = \text{Tera ton S})$
Atmosphäre	0.0000028
Ozeane	1280
Sedimente	
Evaporite	2470
Schiefergestein	4970
Vegetation	0.0085
Boden org. Substanz	0.0155
<b>Gesammt</b>	<b>8720</b>



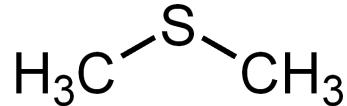
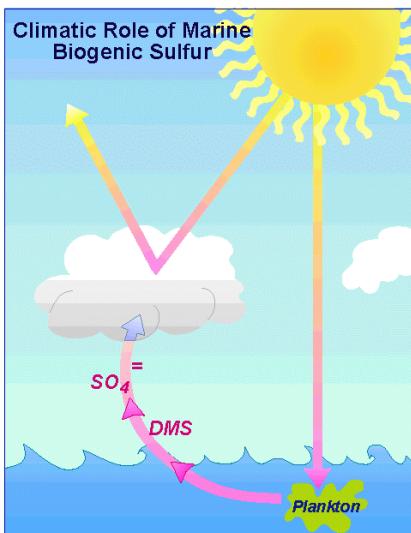
(Schlesinger & Bernhardt, 2013)



Rot: Staub; blau: Meeressalz; grün: Rauch; weiß: Sulfat

(William Putman, NASA/Goddard)

## A: Globaler Schwefelkreislauf



Dimethylsulfid (DMS)

## A. Schwefel in Waldökosystemen

### Herkunft

- Magmatite, 0.05% (quarzreich) bis 0.3 % (quarzarm)
- Sedimente (z.B. Röth; Zechstein; Muschelkalk)
- Meeresgischt  $\sim 5 \text{ kg S ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$
- Anthropogene Deposition 5-100  $\text{kg S ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$

### S-Gehalte in Böden (gemäßigt, humid)

- 0.2%, davon 90 - 98% organisch gebunden
- Moore bis zu 1%; Marschen bis zu 3.5%

### S-Gehalte in Pflanzenblättern

- 0.15 - 0.45%

### Bindungsformen

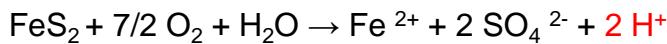
- Sulfide von Fe, Cu, Ni (Pyrit: FeS<sub>2</sub>)
- Sulfate von Al (Alaune) und Ca (Gips: CaSO<sub>4</sub>)
- organische Bindungen (C-S; C-S-S-C; O-S)

## A. Bindungsformen im Boden

### Sulfide



- Sulfide ( $S^{2-}$ ) sind nur unter stark reduzierenden Bedingungen stabil z.B. Pyrit ( $FeS_2$ ). Unter aeroben Bedingungen in gut durchlüfteten Böden werden Sulfide zu Sulfat ( $SO_4^{2-}$ ) oxidiert.



## A. Bindungsformen im Boden

### Sulfate

- Gips ( $CaSO_4$ ) ist leichter löslich als Kalk und unterliegt der Auswaschung
- Sulfat kann nur in ganz geringem Maße in sauren Böden ( $pH 3 - 5$ ) austauschbar gebunden werden (Anionenaustauscher, elektrostatische Anziehung)
- Bildung von metastabilem  $AlOHSO_4$  in sauren Böden

$AlOHSO_4$ : möglicherweise Jurbanit

## A. Bindungsformen

### Organische S-Verbindungen

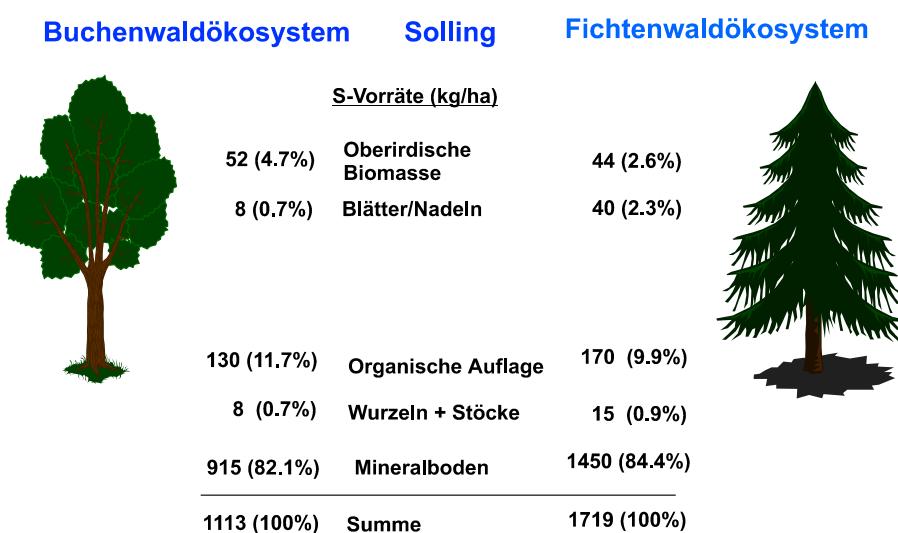
- S-haltige Aminosäuren in Proteinen und sek. Pflanzenstoffen (Cystein, Methionin)
- N/S-Verhältnis in pflanzlichen Proteinen genetisch determiniert ( $\approx 15/1$ )
- C/N/S in Blattorganen 100/8/1

### Nadel-, Blattgehalte (mg S/g)

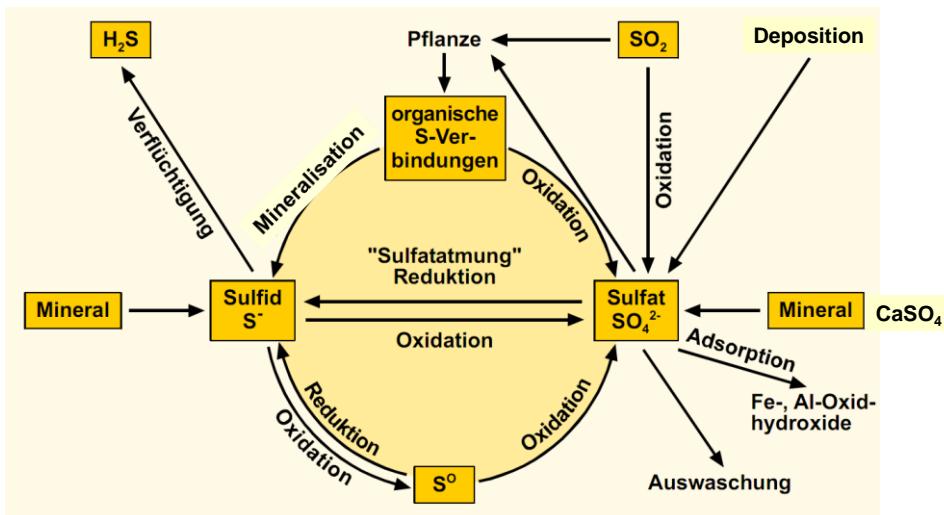
	Fichte	Kiefer	Buche
10% Perz., Med., 90% P.	0.9, 1.2, 1.7	1.2, 1.4, 2.2	1.4, 1.9, 2.2
Sehr gering, mittel, sehr hoch	<0.05, 1.1, >1.4	<0.05, 1.1, >1.4	<1.2, 2.1,

(BZE, 1997)

## A. S-Vorratsverteilung in Wäldern

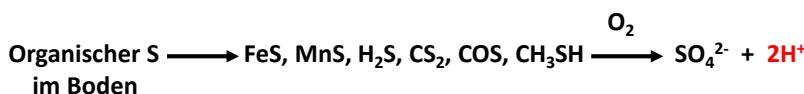


## B. Prozesse: Schwefelkreislauf



## B. Prozesse

### Mineralisation



(reduzierter S)

Endprodukte unter  
anaeroben Bedingungen  
(Marschen, Stagnogley...)

Endprodukte unter  
aeroben Bedingungen  
(gut durchlüftete Böden)

- Mineralisation durch Bodenorganismen (wie bei der N-Mineralisation)
- gleiche Einflussgrößen wie bei N-Mineralisation  
(Temperatur, Wassergehalt, Sauerstoffverfügbarkeit, pH)

## B. Prozesse

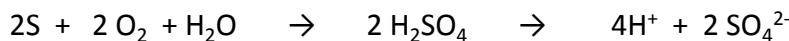
### Immobilisation

Vergleichbar zum Stickstoff wird S von Bodenorganismen immobilisiert wenn im organischen Material zu wenig S enthalten ist (C/N/S im Boden  $\approx 100/8/1$ ).

### Oxidationsprozesse

Oxidation von reduziertem S erfolgt i.d.R. durch autotrophe Bakterien (Thiobacillus). Chemische Oxidation von  $\text{SO}_3^{2-}$  und  $\text{S}^{2-}$ .

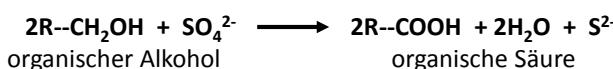
Im Gegensatz zu Stickstoff erfolgt die Oxidation in einem weitem pH Bereich von 2 bis 9, d.h. ist pH unabhängig.



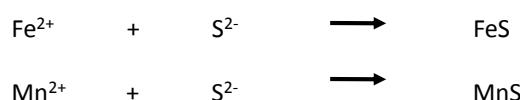
## B. Prozesse

### Reduktionsprozesse

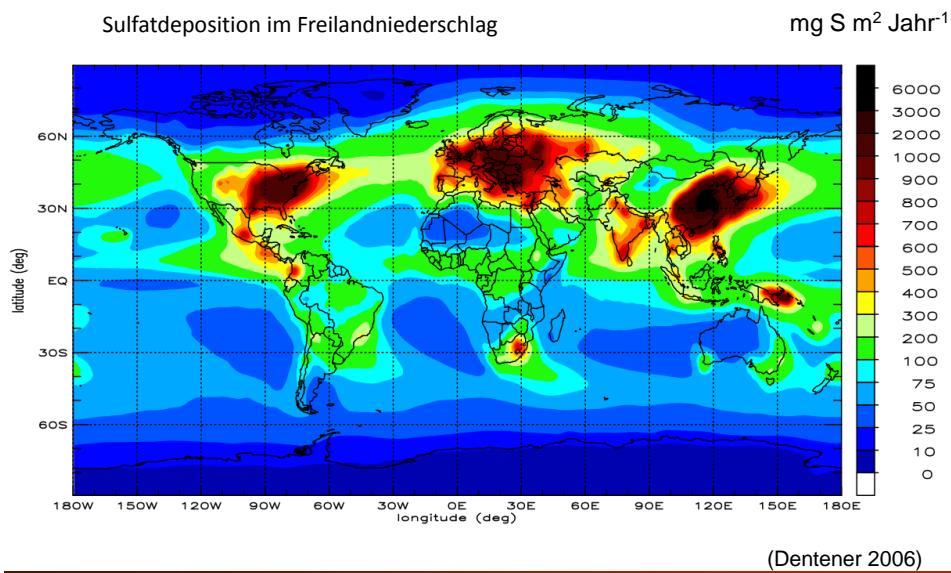
Unter anaeroben Bedingungen ist Sulfat instabil und kann durch Bakterien (Desulfovibro, Desulfotomaculum) reduziert werden. Vergleichbar zum Nitrat nutzen die Mikroorganismen den Schwefel im Sulfat als Elektronenakzeptor bei der Oxidation der organischen Substanz:



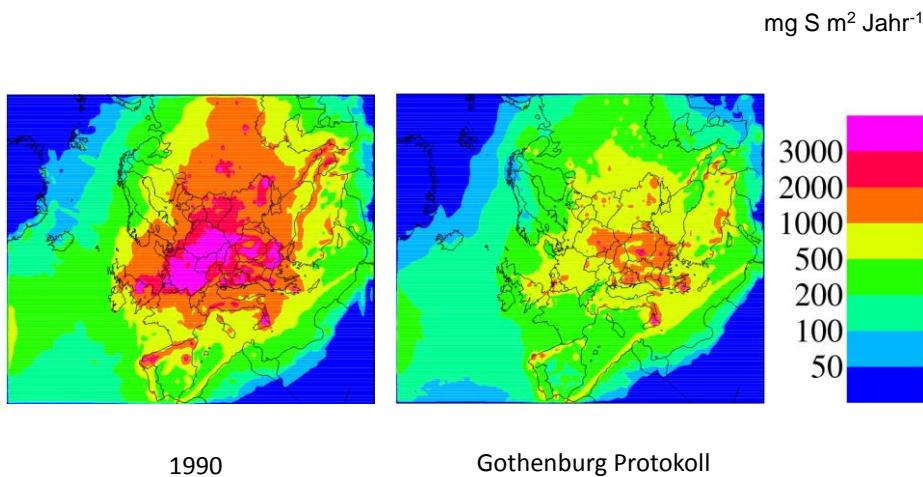
Unter streng anaeroben Bedingungen liegen Eisen und Mangan im Boden in reduzierter Form vor und reagieren mit Sulfid, ein Teil entweicht als gasförmige S-Verbindungen:



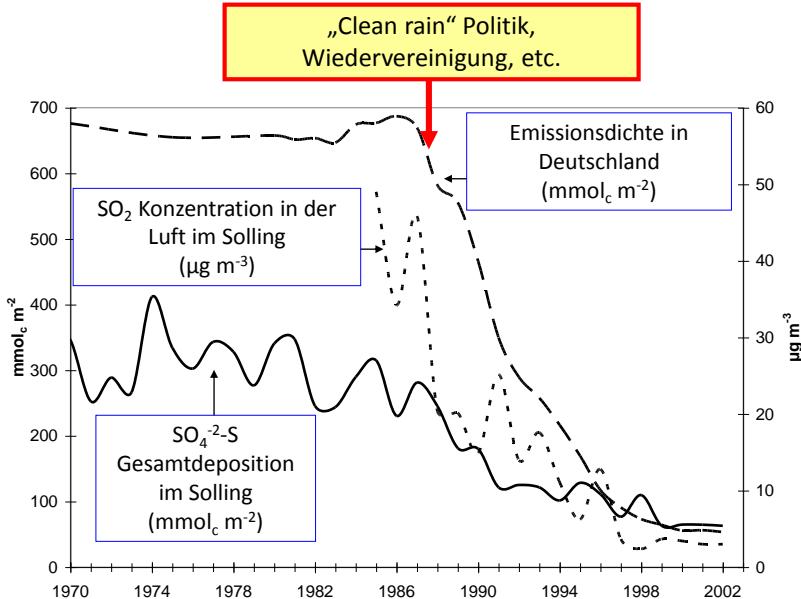
### C. Globale S-Depositionen



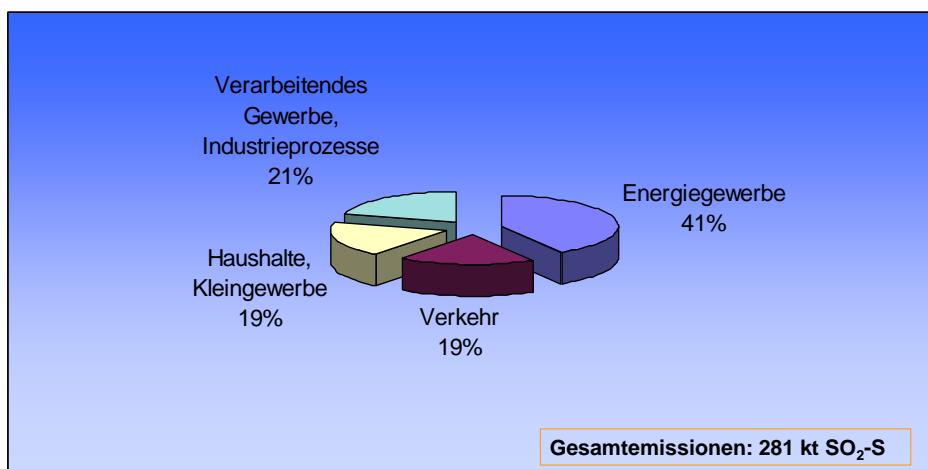
### C. S-Deposition in Europa



### C. S-Depositionen in Deutschland und dem Solling

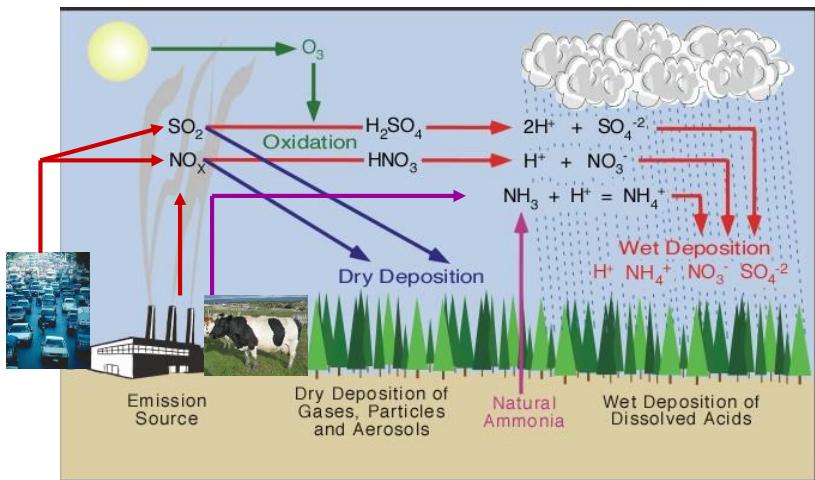


### C. Verursacher der $\text{SO}_2$ -Emission in Deutschland

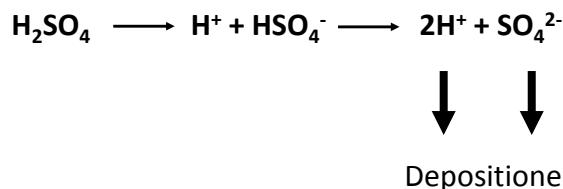


(UBA 2005)

### C. S-Einträge



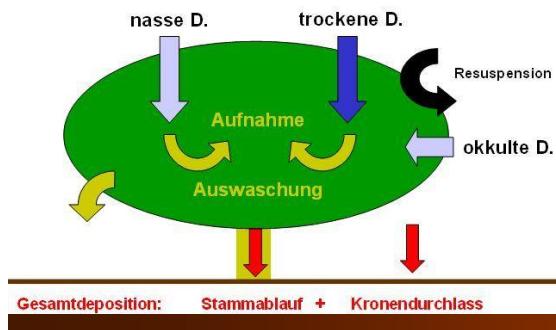
### C. Reaktionen von SO<sub>2</sub> in der Atmosphäre



### C. Komponenten der Deposition

#### Freilandniederschlag

- Nasse Deposition (Stoffe im Wasser)
- Absetzende trockene Stoffe (Stäube)



#### Bestandesniederschlag

- Ausfilterung von Aerosolen
- Lösung, Sorption, Aufnahme von atmosphärischen Gasen an Oberflächen
- Pflanzenauswaschung oder Pflanzenaufnahme

### C. Komponenten der Deposition: Gesamtdeposition

$$\text{GD}_x = \text{BD}_{\text{nass},x} + \text{ID}_{\text{part},x} + \text{ID}_{\text{gasf},x} \quad (1)$$

$$\text{BD}_{\text{nass},x} = \text{FD}$$

GD Gesamtdeposition

BD Bestandesdeposition

FD Freilanddeposition (Regen, Sedimentation von Partikeln)

ID Interzeptionsdeposition (Aerosole, okkulte Deposition)

ID<sub>part.</sub> partikuläre Interzeptionsdeposition

ID<sub>gasf,x</sub> gasförmige Interzeptionsdeposition

## C. Komponenten der Deposition: par. Interzeption

### Partikuläre Interzeption

Natrium-Kalibrierungsansatz

Bestimmung der partikuläre Interzeption von atmosphärischen Spurenstoffen auf der Vegetationsoberfläche von Ökosystemen unter der Annahme, dass sich Natrium im Kronenraum inert verhält (keine Quelle oder Senke). Weitere Annahmen: Na-Konzentration im Nebel entspricht der Na-Konzentration im Niederschlag; es erfolgt kein gasförmiger Eintrag

$$GD_{Na} = BD_{Na} = BD_{Na.nass} + ID_{Na.part} \quad (2)$$

Aus (1) + (2) folgt:

$$ID_{Na.part} = BD_{Na} - BD_{Na.nass} = BD_{Na} - FD_{Na} \quad (3)$$

## C. Komponenten der Deposition: par. Interzeption

Na<sub>part</sub> wird um den sog. Natrium .-Faktor gegenüber dem Freiland angereichert:

$$\text{Na-Faktor} = ID_{Na.part} / FD_{Na} = (BD_{Na} - FD_{Na}) / FD_{Na} = f_{Na}$$

$$ID_{part.x} = f_{Na} \times FD_x$$

f<sub>Na</sub>      Na-Faktor

x            H, Na, K, Mg, Ca, Mn, Al, Fe, NH<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>, Cl, NO<sub>3</sub>

Nicht gültig für Gebiete mit hohem Anteil von Seewasserpartikeln (Küstenregionen) oder Staub (Städte, landwirtschaftliche Flächen) wegen trockener Deposition

### C. Komponenten der Deposition: gasförmige Interzeption

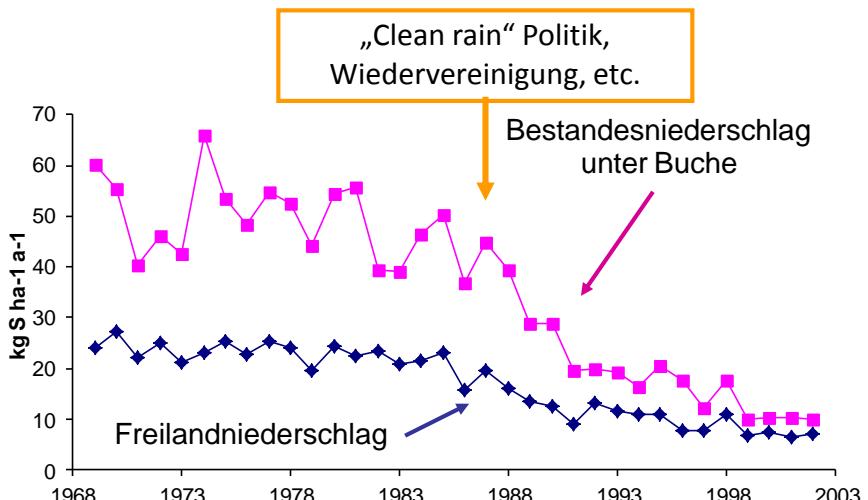
#### Gasförmige Interzeption

- Gasförmige Interzeption ist Null für Na, K, Mg, Ca, Mn, Al, Fe (keine Gasphase)
- Gasförmige Stoffe ( $\text{NH}_3$ , HCl,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ) können aus der Luft ausgefiltert oder von der Baumkrone aufgenommen werden.

$$\text{ID}_{\text{gasf.x}} = \text{BD}_x - \text{FD}_x - \text{ID}_{\text{part.x}}$$

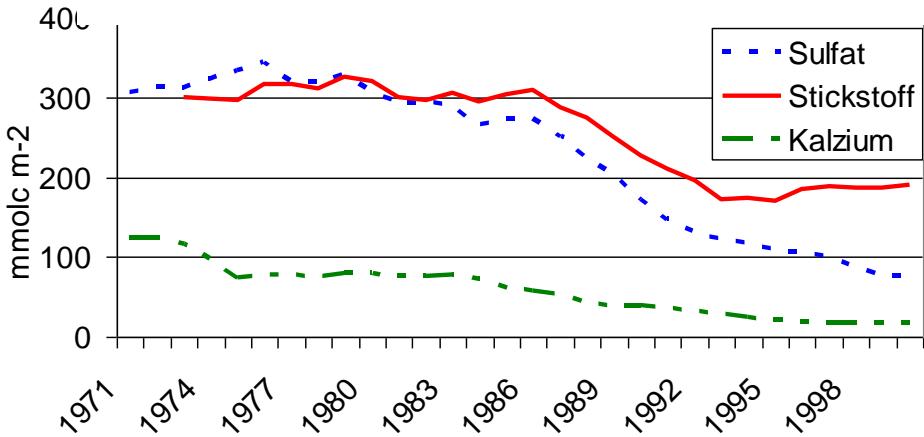
$x = \text{NH}_3, \text{SO}_4, \text{Cl}, \text{NO}_3$

### C. S-Einträge in den Buchenbestand im Solling

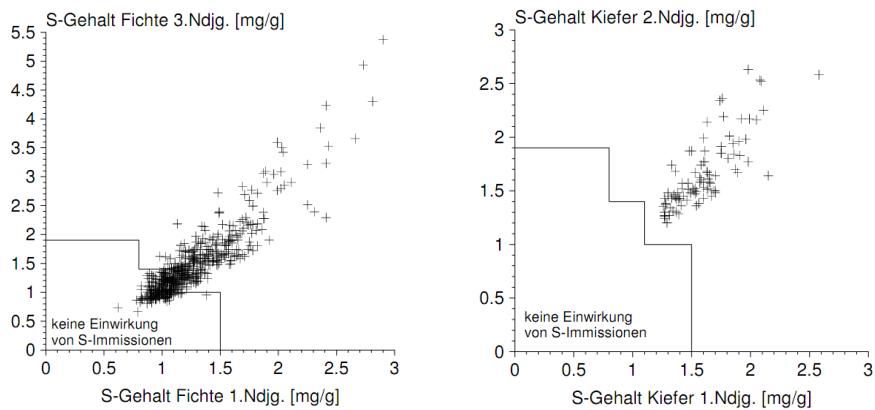


Reduktion um 80%

### C. 5-jähriges Mittel der Gesamtdepositon (Buche, Solling)



### D. Auswirkungen von S-Depositionen



(BZE, 1997)

## D. Auswirkungen von S-Depositionen

1. Veränderung der Bodenvegetation → acidophile Pflanzen ☹
2. Bodenversauerung (siehe H-Umsetzungen) → H und Al Toxizität ☹
3. Basenauswaschung → Nährstoffmangel ☹
4. Reduktion der Streuzersetzung → Humusakkumulation in der org Auflage ☹
5. Absterben der Feinwurzeln
  - Reduktion der Nährstoff- und Wasseraufnahme ☹
  - Reduktion des Wachstum ☹



Immissionsbedingte Flecken-, Rand- und Spitzennekrosen an einem Buchenblatt

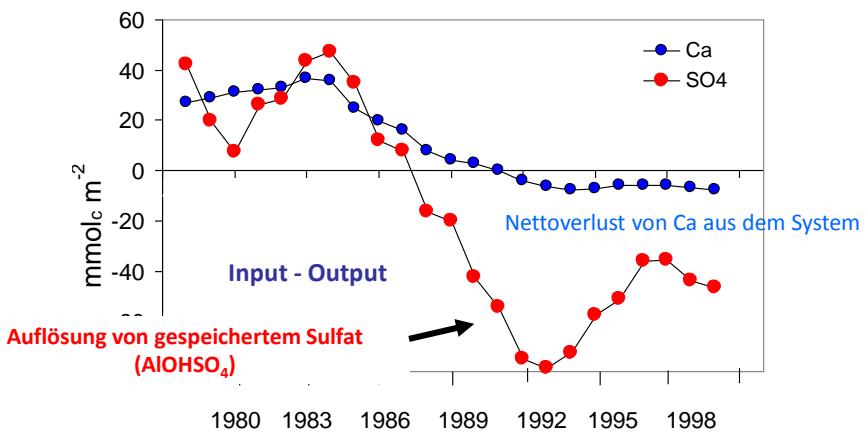


## E. Ökosystembilanz für Sulfat und Kalzium (Buche, Solling)

Kommt es zu einer Abreicherung oder Anreicherung von Stoffen im Ökosystem?

**Input:** Gesamtdeposition + Mineralverwitterung -

**Output:** Pflanzenaufnahme für Zuwachs - Sickerwasserverluste



### E. S-Bilanz im Solling (1973-1985, kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> )

	<u>Buche</u>	<u>Buche (90-02)</u>	<u>Fichte</u>
Niederschlagsdeposition	23.2	19	22.8
Bestandesniederschlag	50.0	32	83.1
Streufall	7.0	5.2	6.0
Zuwachs	1.3		1.0
Δ Auflagehumus	1.1		4.0
Output mit Sickerwasser	40.8	49	96.6
Δ Mineralboden	6.8	-17	-18.5



# **Stoffhaushalt von Waldökosystemen**

## **Spurennährälemente/Mikronährälemente**



### **Vorlesungsgliederung**

- A. Mikronährälemente**
- B. Vorkommen**
- C. Wirkung von Mikronährälementen**
- D. Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo**
- E. Bilanzen**

## A: Mikronährelemente

Viele metallische Spurennährstoffe wirken bereits in geringen Konzentrationen als Nährelemente.

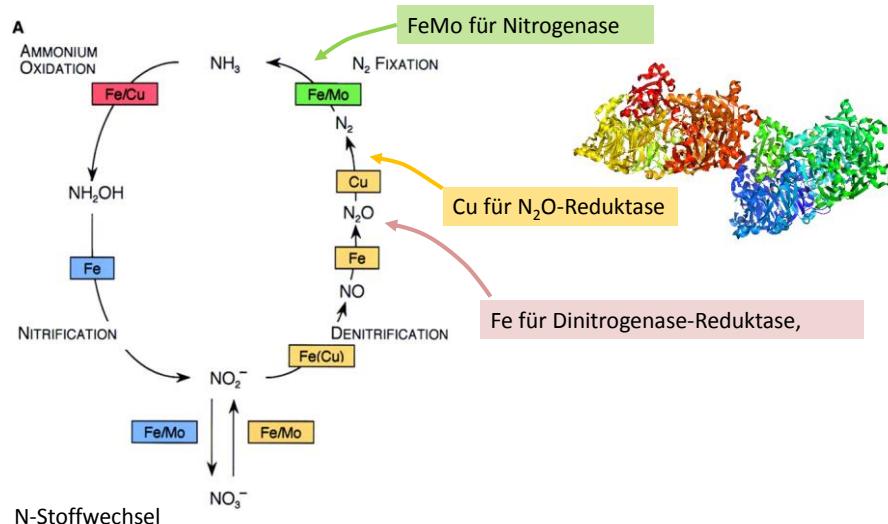


Häufigkeit in Pflanzen: Fe > Mn > Zn > B > Cu > Mo > Ni

"Nicht-Nährelemente", also Elemente ohne biologische Funktion, sind z.B. die Schwermetalle Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Quecksilber (Hg), das Halbmetall Arsen (As) und das Leichtmetall Aluminium (Al).

## A: Mikronährelemente

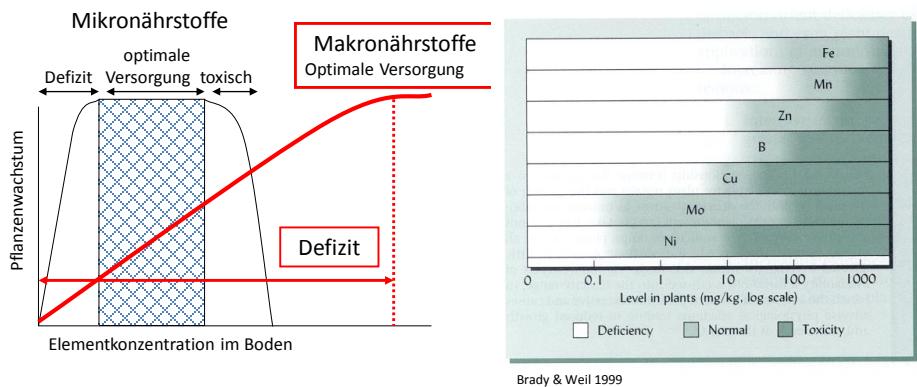
Metalle sind oft Kofaktoren für verschiedene Enzyme:



## A: Mikronährelemente

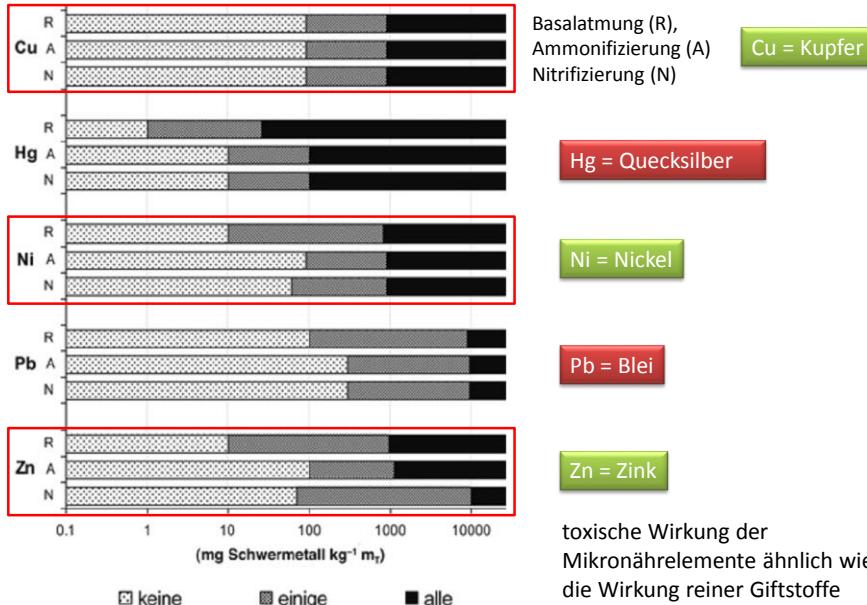
Spurennährelemente (Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo, Ni) sind für die Ernährung der Pflanzen nur in Spuren erforderlich

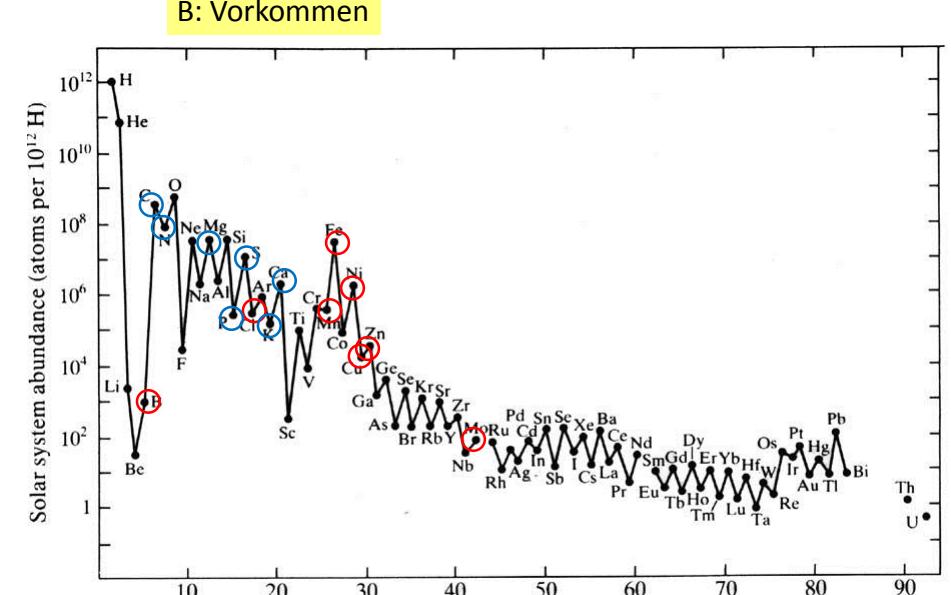
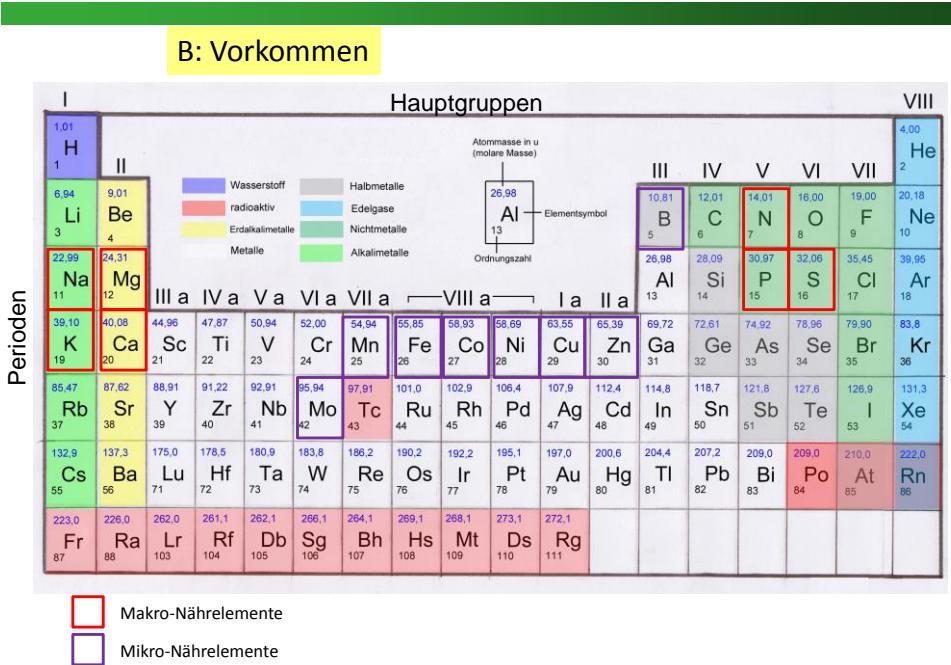
Im Gegensatz zu Makronährelementen können Mikronährelemente in höheren Konzentrationen toxisch sein



## A: Mikronährelemente

Wirkung von Schwermetallen auf die





## B: Vorkommen

Mittlere geogene Gehalte von Mikronährlementen ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

	Sandstein	Tonstein	Kalkstein	Löss	Granit	Basalt
Mn	50	850	700	500	325	1400
Cu	5	45	4	13	15	90
Zn	15	95	25	45	50	100
B	35	100	20	60	15	5
Mo	0.2	1,3	0.4	1.2	1.8	1
Cr	35	90	11	35	12	170
Pb	7	22	5	25	30	4
Cd	0.05	0.3	0.16	0.3	0.09	0.15

Chrom, Blei und Cadmium sind keine Nährelemente

## B: Vorkommen

	Grenzwert nach Klärschlammverordnung im Boden [ $\text{mg kg}^{-1}$ ]	Grenzwert mit schädigender Wirkung im Humus Tyler 1992 [ $\text{mg kg}^{-1}$ ]	Humusauflage BZE 1997 10%, median, 90% [ $\text{mg kg}^{-1}$ ]	Boden (0-10 cm) Schultz et al., 1988 [ $\text{mg kg}^{-1}$ ]	Konzentration Fichte 1. Jahrg. BZE 1997 [ $\text{mg kg}^{-1}$ ]	PDL [ $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ]	CL deVries et al., 2002 [ $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ] (CL excess[%])
Cu	60	20	9.4, 17, 37	1 - 9	3	3.9	12.5 (8)
Zn	200	300	48, 74, 152	8 - 64	27	-	-
Cr	100		3 - 16	7 - 88	1	-	-
Pb	100	150	38, 94, 261	15 - 66	0.8 (1,9 3.Jg.)	26	5.8 (91)
Cd	1.5	3.5	0.3, 0.5, 1.2		0.11	0.4	0.55 (29)

PDL = durchschnittliche aktuelle Gesamtdeposition

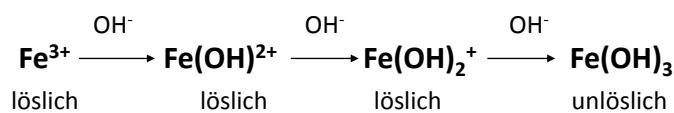
CL = critical load bezogen auf die Wirkung auf Bodenfauna und Pflanzen

CL excess = Anteil der Flächen die CL überschreiten

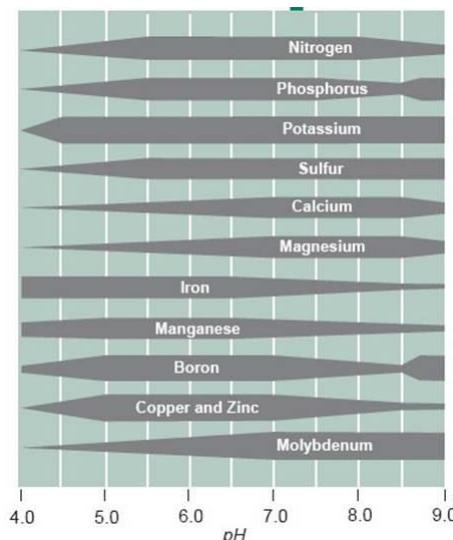
## C: Wirkung von Mikronährelementen: Verfügbarkeit

### 1. Einfluß pH

→ Für Fe und Mn gilt: in sehr **sauren Böden** liegen die Spurennährelemente in ionarer Form vor, sind pflanzenverfügbar, in höheren Konzentrationen aber auch toxisch. Mit **zunehmendem pH Wert** bilden sich zunächst lösliche Hydroxide und dann unlösliche Hydroxide oder Oxide.



## C: Wirkung von Mikronährelementen: Verfügbarkeit



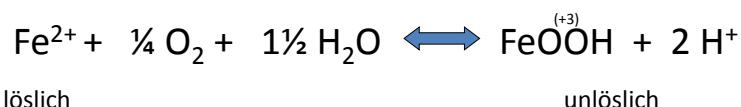
**Tab. 9.5-4** Auswaschung von kationischen Mikronähr-elementen in Ackerböden (unveröffentlichte Ergebnisse Limburger Hof; SCHIMMING, 1991) und Waldböden mit Buchen- und Fichtenbestand (MAYER & HEINRICHS 1980; SCHIMMING 1991).

	Auswaschung ( $\text{g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ )			
	pH	Mn	Cu	Zn
Ackerböden	7...5	1...800	5...94	10...360
Waldböden	5...3	50...9300	2...110	140...2400

### C: Wirkung von Mikronährelementen: Verfügbarkeit

## 2. Einfluss des Oxidationszustandes

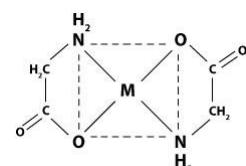
→ Die Spurennährstoffe Fe, Mn und Cu besitzen mehrere Oxidationszustände. Bei normalen pH Werten in Böden sind sie im oxidierten Zustand weniger löslich als im reduzierten Zustand.



### C: Wirkung von Mikronährelementen: Verfügbarkeit

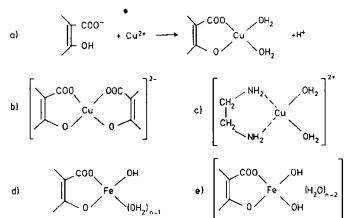
### 3. Einfluss der Metallorganischen Komplexe (Chelate)

- **Chelate** sind **anionische** Komplexe mit hoher Stabilität (Bindung an mehrere funktionelle Gruppen der Komplexbildner).
  - Der **komplexierte Anteil** steigt in der Bodenlösung mit höheren Gehalten von in Wasser gelöstem, organischem Material an (DOC), bei pH-Werten >7 liegen viele Schwermetalle in hohen Anteilen komplexiert in der Bodenlösung vor (**und sind damit potentiell pflanzenverfügbar!**).
  - Stabilität der Komplexe nimmt in folgender Reihenfolge ab:  
 $\text{Hg}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$

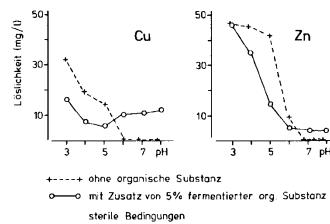


## C: Wirkung von Mikronährrelementen: Verfügbarkeit

- **Herkunft komplexierender organischer Substanzen:**
  - mikrobieller Abbau von organischen Substanzen (Fulvo- und Huminsäuren),
  - Wurzelexsudate, scheiden niedermolekulare Substanzen (Apfelsäure, Citronensäure, Malonsäure, Fumarsäure ...), Aminosäuren, Phenole, und höhermolekulare Verbindungen wie Polysaccharide aus.
- **Bindung von Metallen an organische Komplexbildner** durch funktionelle Gruppen (z.B. Carboxyl: -COOH, Carbonyl: -CO, Aromat-OH, Amino: -NH<sub>2</sub>)



**Abb. 4.4-2** Chelatkomplexe von Kupfer bzw. Eisen mit Carboxyl- und phenolischen OH-Gruppen von Fulvosäure sowie Beispiel für ein Kupfer-Diamin-Chelat (c).



**Abb. 4.4-3** Einfluß von pH-Wert und organischen Komplexbildnern auf die Löslichkeit von Kupfer und Zink in einem belasteten Sandboden (Cu: 115 mg kg<sup>-1</sup>; Zn: 123 mg kg<sup>-1</sup>).<sup>10</sup>

## C: Wirkung von Mikronährrelemente: Mobilisierung

### 4. Einfluß Nährstoff-Aufschlußvermögen der Pflanzen

- **Abgabe von organischen Säuren** (insb. Citronensäure) mobilisiert z.B. **Mn** und an Fe- und Al-Oxide gebundenes **Phosphat** durch Komplexierung.
- **Aktive Protonenabgabe** bei Mangel an kationischen Mikronährelementen, z.B. bei **Fe-Mangel**
- **Änderungen der Redoxbedingungen** durch Abgabe von reduzierenden Substanzen sowie durch enzymatische und O<sub>2</sub>-Partialdruck Veränderung an der Wurzeloberfläche.

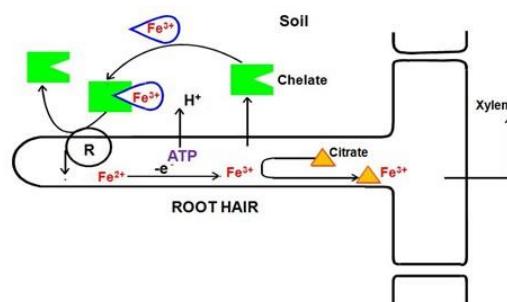


Durch Säureangriff und Reduktion können Oxide und Mikronährstoffe aufgelöst und in verfügbare Komplexe umgewandelt werden.

- Gleichzeitig werden durch die Abgabe von organischen Säuren potentiell toxische **Schwermetalle** (Hg, Pb, Cd u.a.) und Al in der Bodenlösung saurer Böden komplexiert, die wesentlich weniger toxisch sind als freie Schwermetallkationen.

## C: Wirkung von Mikronährlementen: Aufnahme

### Aufnahme von komplexierten Elementen an der Wurzeloberfläche



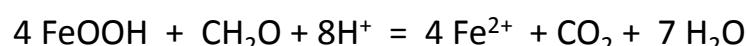
Metallkomplex wird an der Wurzeloberfläche aufgelöst, das Metall reduziert und dann aufgenommen (viele zweikeimblättrige Pflanzen).

## D: Eisen

**Bedeutung:** Enzymbestandteil (Peroxidase, Nitratreduktase); Bestandteile der Atmungskette (Cytochrome) und der photosynthetischen Redoxkette; Betriebsstoffwechsel, Chlorophyllsynthese

### Bindungsformen in Böden:

- Eisen(III)-oxide (z.B. Goethit ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), Hämatit ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )),
- silikatisch gebunden
- gelöste organische Fe-Komplexe (vorherrschend bei  $>\text{pH } 3.5$ ),
- gelöstes Fe(II)-Ionen (unter anaeroben Bedingungen)



Eisen(III)-oxide sind sehr stabil, saure/anaerobe Bodenbedingungen reduzieren Eisen, das als  $\text{Fe}^{2+}$  von Pflanzen aufgenommen wird.

## D: Eisen

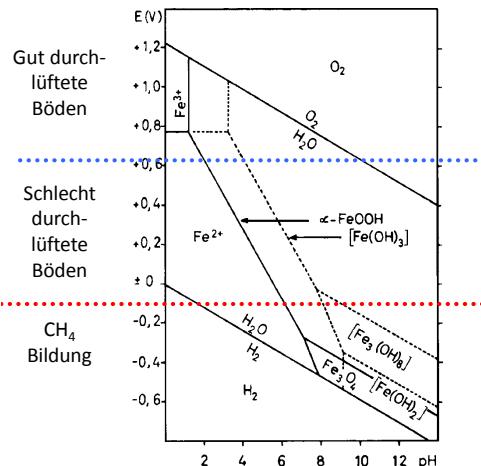


Abb. 4.3-1 Stabilitätsfelder von  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\alpha\text{-FeOOH}$  und  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (mit gestrichelten Linien von  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$  und  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) in Abhängigkeit von Redoxpotential, pH-Wert und Ionenaktivitäten von  $10^{-5}$  Mol l<sup>-1</sup> unter Standardbedingungen ( $10^5$  Pa, 25 °C).



Stabilitätsbereiche von Fe in  
Abhängigkeit vom  
Redoxpotential und pH-Wert

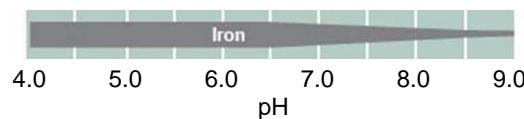
$\alpha\text{-FeOOH}$  = Goethit

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  = Hämatit

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  = Magnetit

$\text{Fe}(\text{OH})_{2/3}$  = Eisenhydroxid

## D: Eisen



Pflanzen decken ihren Bedarf vor allem aus  
organischen Fe-Komplexen, z.B. nach Ausscheidung  
von Wurzelexudaten, wobei  $\text{Fe}^{3+}$  zu  $\text{Fe}^{2+}$  reduziert wird.

**Fe-Mangel:** - trotz häufig hoher Gehalte ist Fe-Mangel z.B. auf karbonathaltigen Böden (Fe-Immobilisation in der Pflanze)  
oder Fe-armen Substraten (Hochmoore) verbreitet,  
- tritt in den jüngsten Blätter auf, werden hellgrün bei starkem Mangel gelb.

**Fe-Toxizität:** - möglich unter anaeroben Bedingungen in Reisböden

## D: Eisen



### Fe (& Mn)-Mangelsymptome

Junge Nadeln gelb bis weißlich, ältere Nadeln jedoch grün, gelbliche Blätter mit grünem Adernetz

## D: Mangan

**Bedeutung:** Für alle Lebewesen essentielles Element.

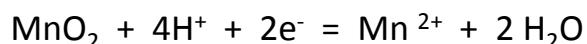
Enzymaktivator, Stoffwechsel, Nukleinsäuresynthese,  
Elektronendonator für die photosynthetische Redoxkette.



Manganit:  $\gamma\text{-MnO(OH)}$   
[wikipedia.de](#)

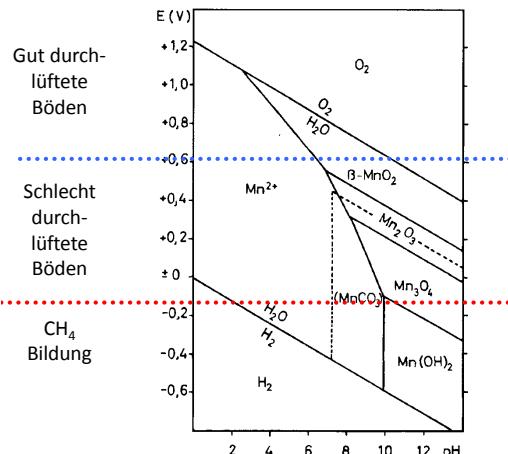
### Bindungsformen in Böden:

- Mangan(II, IV)-oxide, Silikate,  $\text{MnCO}_3$ ,
- gelöste organische Mn-Komplexe (vorherrschend in neutralen und alkalischen Böden),
- austauschbares oder gelöstes Mn(II)-Ion (vorherrschend in sauren Böden)



Bodenreaktion und Redoxbedingungen beeinflussen  
die Mn-Verfügbarkeit der Pflanzen, da Mangan als  
 $\text{Mn}^{2+}$  aufgenommen wird.

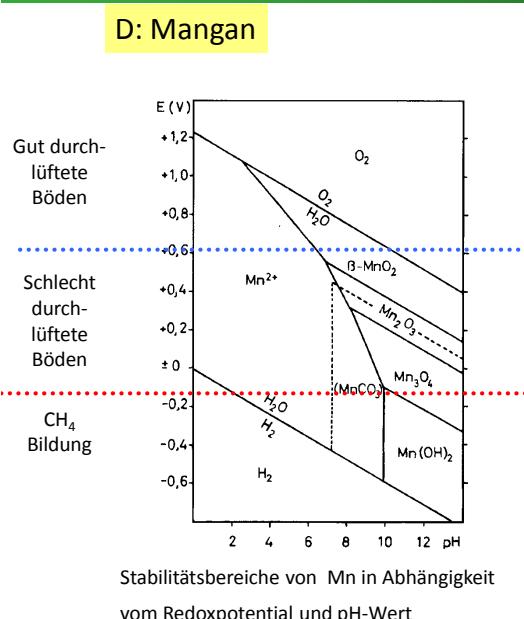
## D: Mangan



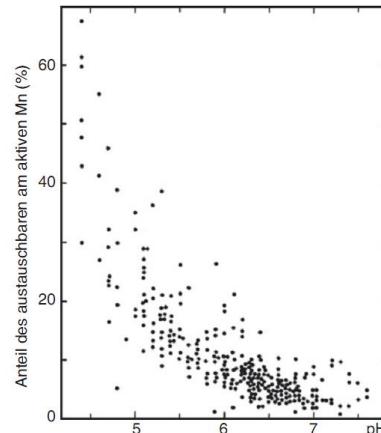
**Abb. 4.3-2** Stabilitätsfelder von  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\beta\text{-MnO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  und  $\text{Mn(OH)}_2$  in Abhängigkeit von Redoxpotential, pH-Wert und Ionenaktivitäten von  $10^{-5} \text{ Mol l}^{-1}$  unter Standardbedingungen ( $10^5 \text{ Pa}$ ,  $25^\circ \text{C}$ ). --- = Stabilitätsfeld für  $\text{MnCO}_3$  bei einem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Bodenluft von 1% ( $P_{\text{CO}_2} = 10^3 \text{ Pa}$ ).

Stabilitätsbereiche von Mn in Abhängigkeit vom Redoxpotential und pH-Wert

- $\beta\text{-MnO}_2$ : Mangan(IV)oxid (Braunstein)
- $\text{Mn}_2\text{O}_3$ : Mangan(III)oxid
- $\text{Mn}_3\text{O}_4$ : Mangan(II)oxid (Hausmannit)
- $\text{MnCO}_3$ : Mangancarbonat
- $\text{Mn(OH)}_2$ : Mangan(II)hydroxid

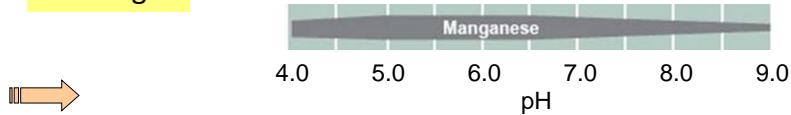


Stabilitätsbereiche von Mn in Abhängigkeit vom Redoxpotential und pH-Wert



**Abb. 9.7-1** Anteil des austauschbaren Mangans am aktiven Mangan (Sulfit-Mn, pH 5,5) in Abhängigkeit vom pH (M KCl) bei norddeutschen pleistozänen Sandböden

### D: Mangan



Mangan unter sauren und anoxischen Bedingungen sehr mobil ( $Mn^{2+}$ ) und pflanzenverfügbar so lange bis Verarmung durch Auswaschung eintritt.

**Mn-Mangel:** im gemäßigtem humiden Klimabereich auf Mn-armen Sandböden, entwässerten Niedermooren und Marschen bei  $pH > 6$ . Chlorosen können zwischen den Adern der jüngsten Blätter auftreten.

**Mn-Toxizität:** Auf sauren Standorten nehmen Pflanzen besonders viel Mangan auf. Fichten sind sehr resistent (es wurden in Fichtennadeln  $> 5000 \text{ mg kg}^{-1}$  auf stark versauerten Lössböden gemessen)

### D: Mangan



Mn-Mangelsymptome

Junge Nadeln chlorotisch, Spitzendürre, Wipfeldürre, Verkürzung der Höhentriebe, Kümmerwuchs

## D: Kupfer

### Bedeutung:

- Enzymbestandteil
- dient in den Chloroplasten als  $e^-$ -Donator
- N-Stoffwechsel

### Bindungsformen in Böden:

- 25% bis 75% in organischer Bindung
- 15% bis 70% an Mn- und Fe-oxide gebunden
- 1% bis 10% in silikatischer Bindung
- <1% bei pH>5 als austauschbares Kupfer
- bis zu 20% bei pH<4 als austauschbares Kupfer (in sauren Waldböden)
- Bei pH >6 als Karbonatkomplex ( $\text{CuCO}_3$ ) oder metallorganischer Komplex vor ( $\text{Cu}_{\text{org}}$ ).
- Bei pH <5 steigt der Anteil von  $\text{Cu}_{\text{org}}$  bis auf 95% an.

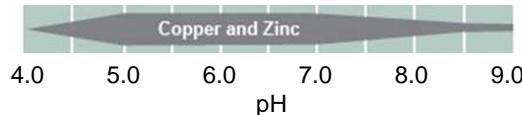


## D: Kupfer

➡ Pflanzenaufnahme als  $\text{Cu}^{2+}$  und wahrscheinlich als organische Komplexe

**Cu-Mangel:** tritt besonders auf humusreichen sandigen Podsolen auf,  
selten auf Schluff-, Lehm- und Tonböden

**Cu-Toxizität:** tritt vor allem in anthropogen belasteten Gebieten auf



## D: Kupfer



Fichte und Eiche mit Cu Mangel

Cu-Mangelsymptome

Spitzenbräune der Nadeln, dunkle Blattverfärbung, Absterben von Zweigspitzen

## D: Zink

**Bedeutung:**

- Für Pflanzen, Tiere, und Menschen unentbehrliches Spurenelement
- Enzymaktivator (Proteasen)
- Chlorophyllbildung
- Eiweißabbau
- Stoffwechsel
- Wuchsstoffbildung



**Bindungsformen in Böden:**

- 40% bis 60% in organischer Bindung bei schwach saurer Bodenreaktion
- 40% bis 60% an Mn- und Fe-oxiden gebunden, nimmt pH>7 zu
- 1% bis 10% in silikatischer Bindung
- austauschbares Zink steigt mit sinkendem pH (pH 5: 10-30%, pH3: >30%)
- gelöste metallorganische Komplexe, vor allem in humosen Oberböden
- Freies Zn<sup>2+</sup> in humusarmen Unterböden (wenig Komplexbildner)

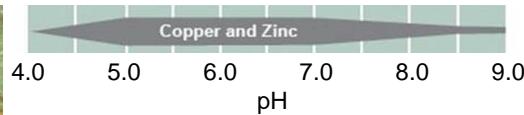
## D: Zink



Pflanzenaufnahme als  $Zn^{2+}$  und wahrscheinlich als gelöste organische Komplexe

**Zn-Mangel:** sehr selten, meist auf carbonathaltigen Böden

**Zn-Toxizität:** tritt vor allem in anthropogen belasteten Gebieten auf



Zn-Mangelsymptome

Zn Mangel tritt selten auf; junge Nadeln/Blätter chlorotisch, später nekrotisch

## D: Bor

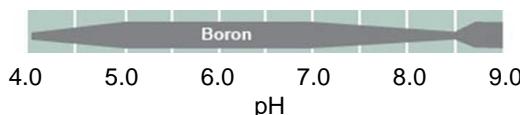
### Bedeutung:

- Lebensnotwendiges Spurenelement für Pflanzen
- Stabilität der Zellwände (esterartige Bildungen mit Zellwandbestandteilen)
- Zellteilung
- Kohlenhydrattransport und -stoffwechsel



### Bindungsformen in Böden:

- Bindung an organische Substanzen und Tonminerale
- Adsorption an Fe- und Al-Oxide bei  $pH > 7$  als  $B(OH)_4^-$
- In der Bodenlösung  $< pH 7$  ausschliesslich als  $B(OH)_3$



## D: Bor



Pflanzenaufnahme als  $B(OH)_3$

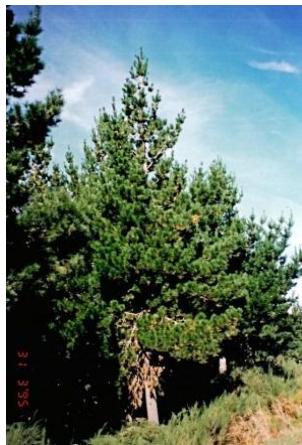
**B-Mangel:** möglich auf sauren Böden (wg. geringer Adsorbierbarkeit von  $B(OH)_3$ ) und auf alkalischen Böden (starke Adsorption von  $B(OH)_4^-$ )

**B-Toxizität:** wird in humiden Bereichen nur selten beobachtet  
(nicht bei laubwerfenden Bäumen)

B-Toxizität bei *Arbutus unedo* (Erdbeerbaum)



B-Mangelsymptome



vermindertes  
Streckungswachstum



Wurzelfäule



Endknospen vertrocknen

## D: Molybdän



### Bedeutung:

- Lebensnotwendiges Spurenelement für Pflanzen, Tier und Menschen
- Bestandteil von *Enzymen des N-Stoffwechsels*,
- z.B. bei Nitrogenase ( $N_2$ -Fixierung)
- oder *Nitratreduktase* bei Nitraternährung



### Molybdän

*Molybdän (Mo) – gehört zum „Katerfrühstück“*

Allgemeines: Molybdän ist ein lebenswichtiges Spurenelement. Es ist an der Einlagerung des Fluors in den Zahnschmelz beteiligt.

Durchschnittlicher Tagesbedarf: etwa 500 Mikrogramm.

Molybdän ist enthalten in: Hülsenfrüchten, Getreide, Haferflocken und Vollkornbrot sowie in geringeren Mengen auch in Kartoffeln, Reis, Eiern, Nudeln, Spinat, Bohnen und Leber.

<http://zell-milieu-medizin.de/index.php/spurenelemente/molybdaen>

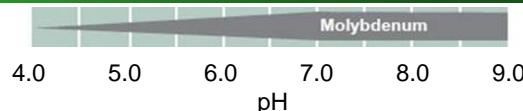
### Bindungsformen in Böden:

- Gebunden an Fe- und Al-Oxiden und der organischen Substanz
- Unter stark reduzierenden Bedingungen wird es als  $MoS_2$  ausgefällt
- In der Bodenlösung >pH5 dominieren  $MoO_4^{2-}$ -Ionen,
- In der Bodenlösung <pH5 wird es protonisiert zu  $HMnO_4^-$  oder  $H_2MoO_4^-$



Pflanzenaufnahme als  $MoO_4^{2-}$  oder bei pH <5 als  $HMnO_4^-$

## D: Molybdän



### Mo-Mangel:

- möglich auf sauren Sandböden (z.B. Podsolien, wg. starker Adsorption an Fe-Oxiden)
- Kalkung erhöht Mo-Verfügbarkeit
- äußert sich ähnlich wie N-Mangel (Chlorosen an älteren Blättern)

**Mo-Toxizität:** auch bei hohen Konzentrationen nicht festzustellen



© FGW

## E. Mikronährstoffhaushalt im Solling (kg ha<sup>-1</sup>)

Mikronährstoffvorräte (1970-er)

[kg/ha]	Buche			Fichte		
	Mn	Fe	Cu	Mn	Fe	Cu
Vorrat Bäume	123,0	81,0	12,2	85,0	65,0	14,1
Vorrat Auflage	L	9,8	60,0	0,9	3,9	46,0
	O <sub>F</sub>	9,6	315,0	2,0	4,6	143,0
	O <sub>H</sub>				6,8	225,0
Summe Auflage		19,5	376,0	2,9	15,3	414,0
Mineralboden (0-50 cm)		4150	119000	130	3780	107000
						147

(Mayer & Heinrichs, 1980)

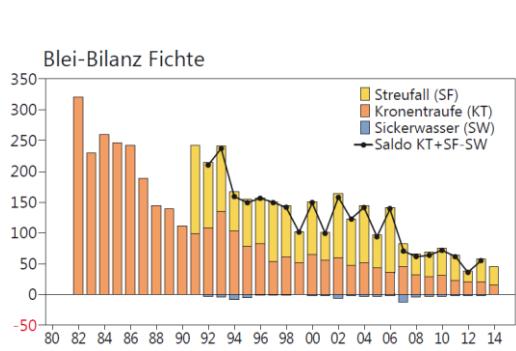
## E. Mikronährstoffhaushalt in Solling (1970-er, g ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup> )

Mikronährstoffflüsse

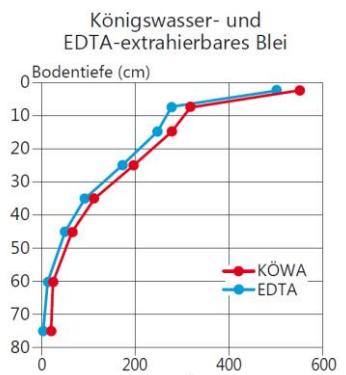
	Buche			Fichte		
	Mn	Fe	Cu	Mn	Fe	Cu
1) Freilandniederschlag	370	800	350	370	800	350
2) Kronendurchlass	4630	640	130	7150	1590	230
3) Stammablauf	1130	260	18			
4) Sickerwasser	5890	210	110	9300	150	110
5) Streufall	7100	2100	75	5800	8600	240
6) Zuwachs Biomasse	2900	2100	310	1354	1300	300
1-4	-5520	590	240	-8930	650	240
1-(4+6)	-8400	-1500	-70	-10300	-650	-60

(Mayer & Heinrichs, 1980)

## E. Schwermetallbelastung der Wälder



Jährliche Blei-Bilanz und -Salden aus Ein- und Austrägen (g je Hektar) für eine Fichtenfläche im Solling von 1982-2014. Die schwarze Linie entspricht dem Saldo aus Kronentraufe plus Streufall minus Austrag.



Tiefenprofil der Blei-Gehalte [mg/kg] im Harz (Lange Bramke Kamm) nach unterschiedlichen Extraktionsverfahren

Unterscheidung geogener und anthropogener Bleianteile



## E. Mikronährstoffhaushalt in Solling (1970-er, g ha<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>)

### Mikronährstoffflüsse

Buche B1	Cr	Co	Ni g · ha <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup>	Cu	Zn	Cd	Pb
Gesamt-Deposition (=Input)	149	16	123	470	1632	16	437
Sickerwasseroutput	7,1	64	21	106	1125	16,5	24
						kg · ha <sup>-1</sup>	
Vorrat Biomasse	4,3	0,19	3,5	12,2	4,6	0,0057	2,0
Vorrat Humusaufklage	1,8	0,27	0,86	2,9	8,5	0,063	16,7
Vorrat Mineralboden bis 50 cm	350	70,4	65,3	130	315	0,458	150,0
Fichte F1						g · ha <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup>	
Gesamt-Deposition (=Input)	165	19,6	140	659	1732	20	733
Sickerwasseroutput	5,5	415	66	110	2364	26,2	13
						kg · ha <sup>-1</sup>	
Vorrat Biomasse	3,2	0,20	3,8	14,1	12,7	0,160	3,5
Vorrat Humusaufklage	2,5	0,34	1,2	4,7	9,8	0,050	25,0
Vorrat Mineralboden bis 50 cm	304	104,4	111,5	174	262	0,390	220,0

(Ellenberg et al. 1986)

Ellenberg, H. R. Mayer u. J. Schauermann (1986): Ökosystemforschung - Ergebnisse des Solling-Projekts: 1966-1986. Verlag Eugen Ulmer  
 Brady, N. C. a. R.R. Weil (1999): The nature and properties of soils. Prentice Hall, 13th. ed.

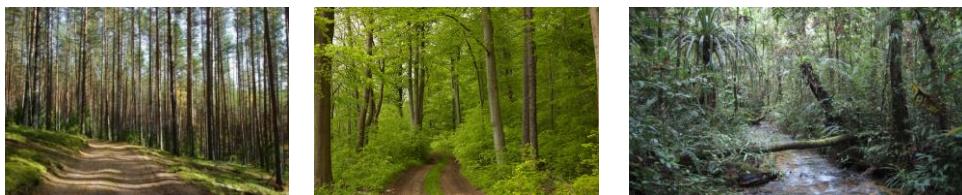
## Stoffhaushalt von Waldökosystemen

### Vergleich Stoffhaushalt in Wälder der gemäßigte Breiten und der Tropen



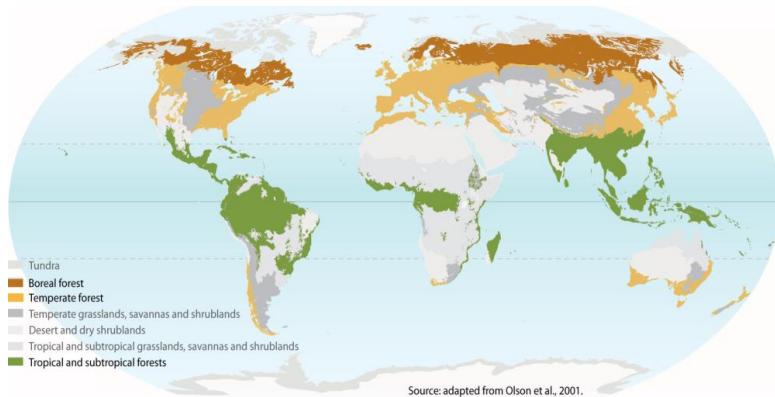
#### Vorlesungsgliederung

##### Vergleich Stoffhaushalt in Wälder der gemäßigte Breiten und der Tropen



- A. Klima und Böden in Wäldern der gemäßigte Breiten und der Tropen
- B. Bodenentwicklung und Nährstoffverfügbarkeit
- C. Kohlenstoffhaushalt in Wälder der gemäßigte Breiten und der Tropen
- D. Stickstoffhaushalt in Wälder der gemäßigte Breiten und der Tropen

## Waldbiome



### borealer Wald:

- Besteht überwiegend aus Nadelbaumarten; ein paar Laubbaumarten sind auch vorhanden
- ~29% der weltweiten Waldfläche

### gemäßiger Laubwald:

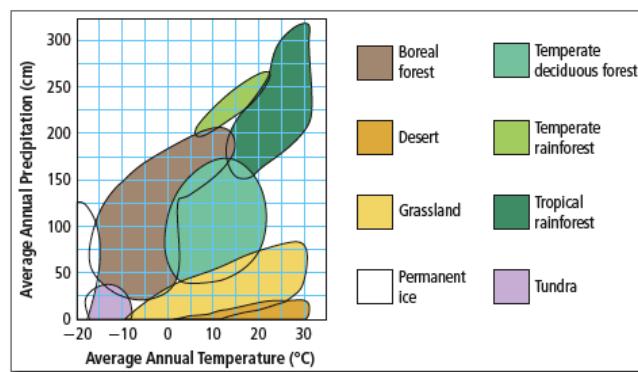
- Mischung von laubabwerfenden und immergrünen Arten
- ~21% der weltweiten Waldfläche

### tropischen Regenwald:

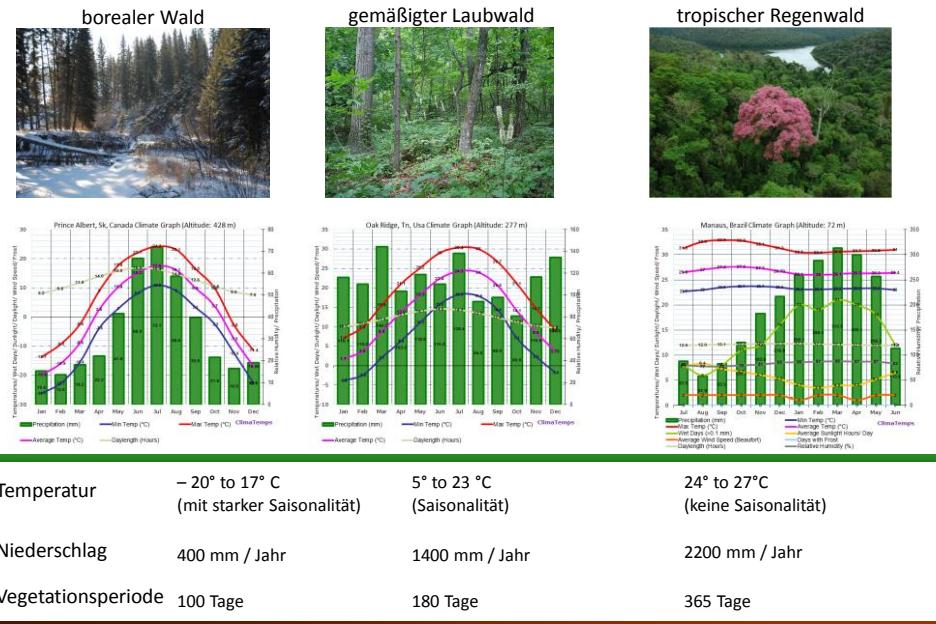
- Hoher Baumdiversität
- Bäume mit großer Statur und dichte Kronenschluß
- ~37% der weltweiten Waldfläche

## A:Klima

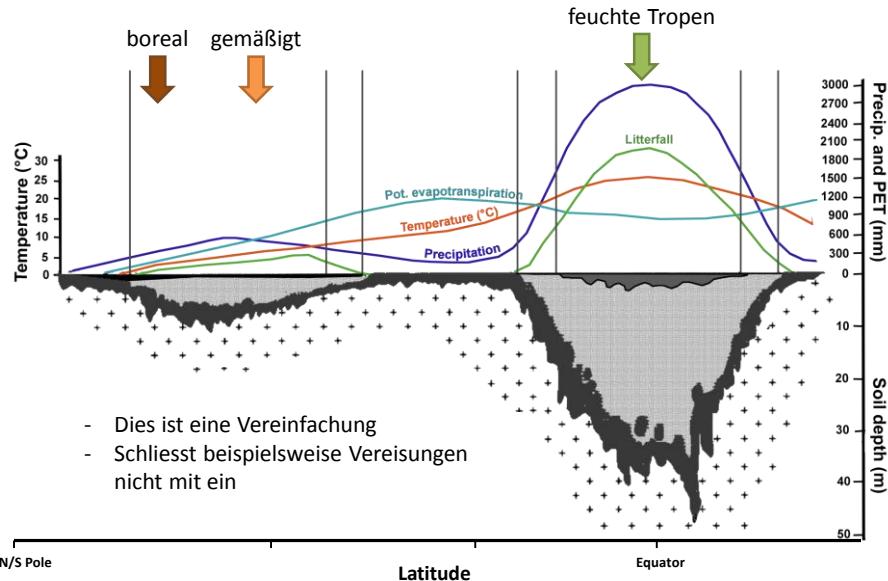
### Klima



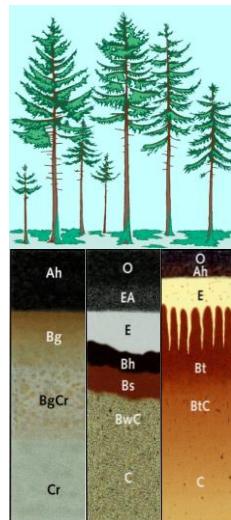
## A: Klima



## A: Böden



## A: Böden der borealen Zone: (FAO)



### Borealer Wald

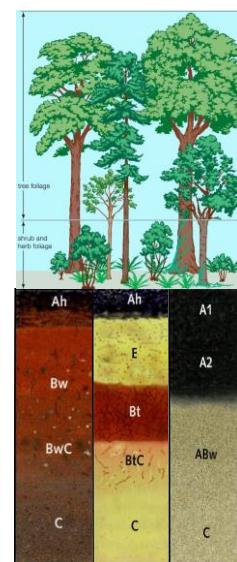
Allgemeine Merkmale:

- Frühe Stadien der Bodenentwicklung
- Nährstoffarm
- Niedrige pH-Werte
- Langsamer Abbau organischer Substanz

Häufig vorkommende Bodentypen:

- Gleysols
- Podzols
- Albeluvisols
- Histosols

## A: Böden der feuchten Mittelbreiten (FAO)



### Gemäßigter Laubwald

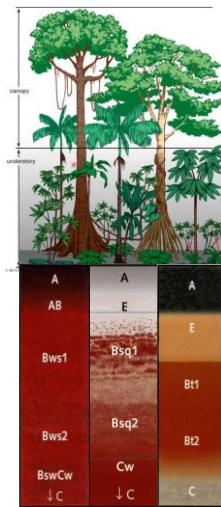
Allgemeine Merkmale:

- gut entwickelte Böden
- Oft nicht älter als 10000 Jahre
- Oberboden angereichert mit Humus

Häufig vorkommende Bodentypen:

- Cambisols
- Luvisols
- Umbrisols

## A: Böden der feuchten Tropen (FAO)



### Tropischer Regenwald

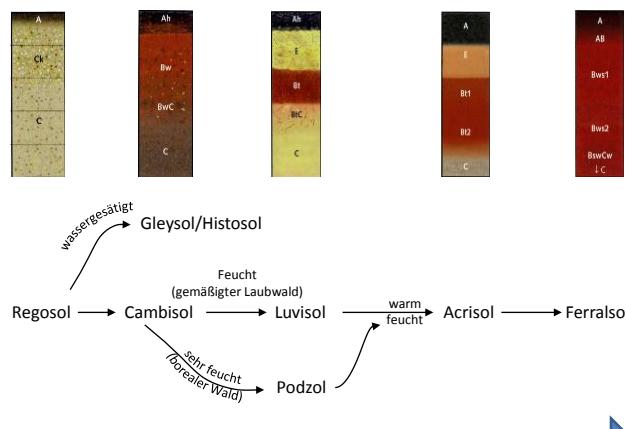
Allgemeine Merkmale:

- Sehr alte Böden
- Saurer pH-Wert, nährstoffarm
- Starke Auswaschung
- Tiefe Verwitterung
- Schnelle Zersetzung der Streu

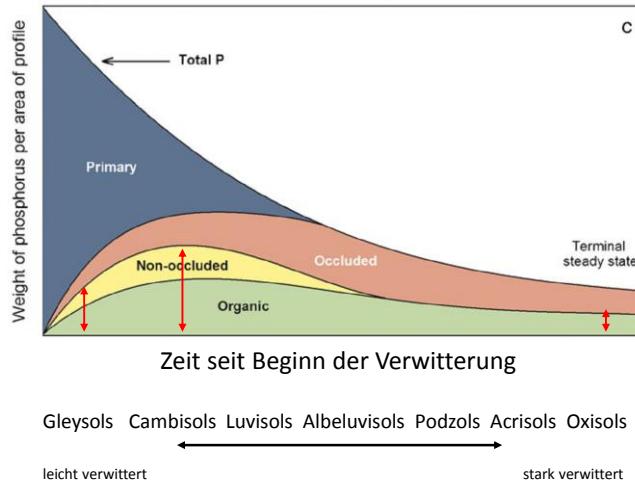
Häufig vorkommende Bodentypen:

- Ferralsols
- Acrisols
- Plinthosols

## B: Bodenentwicklung

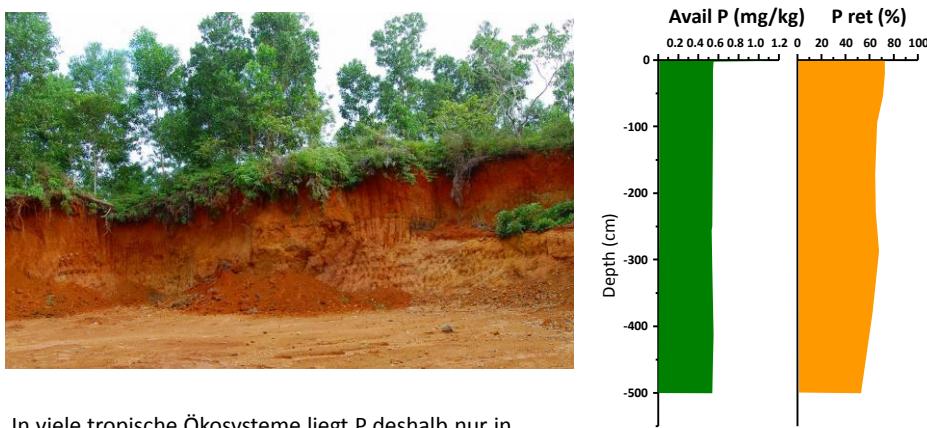


## B: Bodenentwicklung und P-Verfügbarkeit

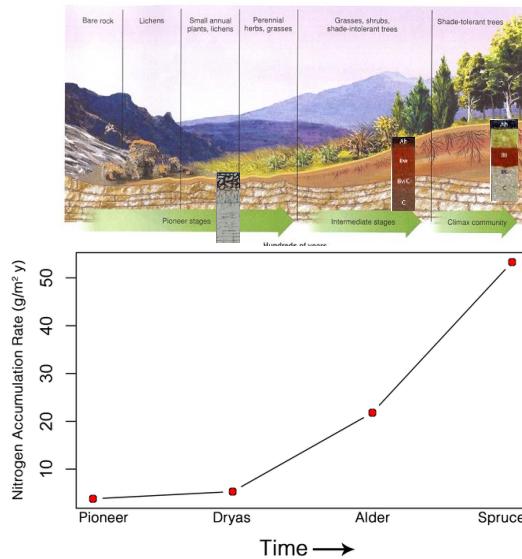


## B: Bodenentwicklung und P-Verfügbarkeit

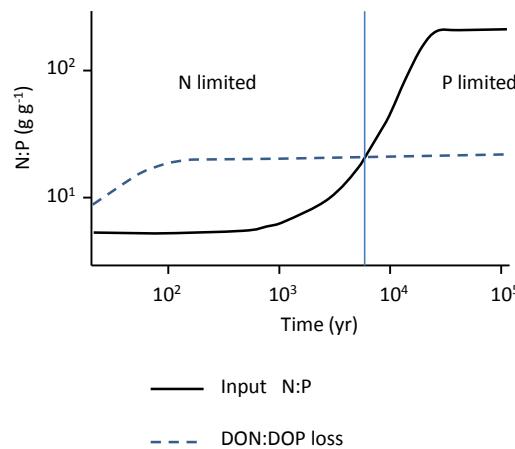
Über längere Zeit, P geht von 'occluded and nonoccluded' P Formen über in 'occluded and organic-P' Forme. Stark verwitterte Böden enthalten fast kein verfügbares P.



## B: Sukzession und Stickstoff



## B: N und P Verfügbarkeit



(Menge et al., 2012)

### C: Kohlenstoffhaushalt

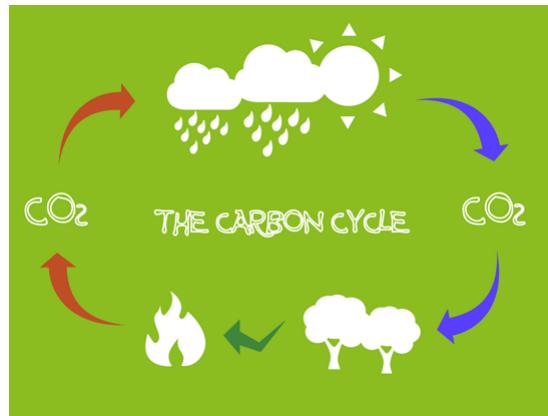
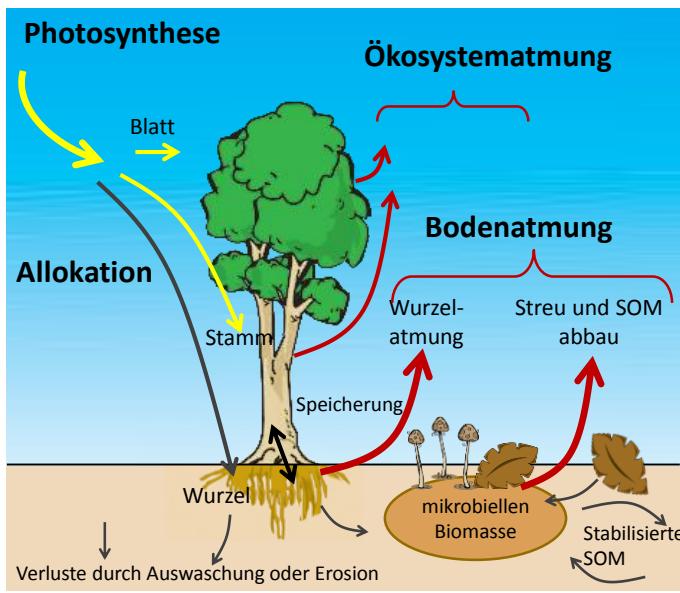


Image source: <http://www.hotlogs.ie/about-hot-logs>

### C: Kohlenstoffhaushalt



Input:

- Photosynthese

Output:

- Respiration,
- Auswaschung,
- Erosion

Vorräte:

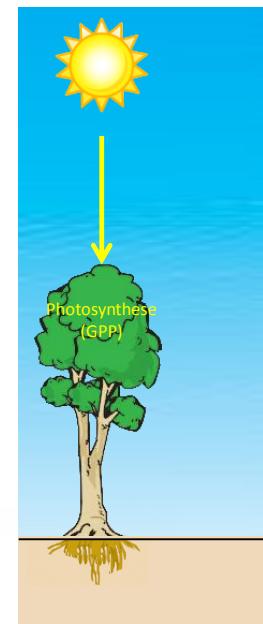
- Vegetation
- Boden

Trumbore, 2006

## C: einige Schlüsselkonzepte

### 1. Bruttoprimärproduktion(GPP):

- Die Rate, mit der ein Ökosystem Kohlenstoff über eine bestimmte Zeitdauer für die Biomasseproduktion und Atmung erfasst

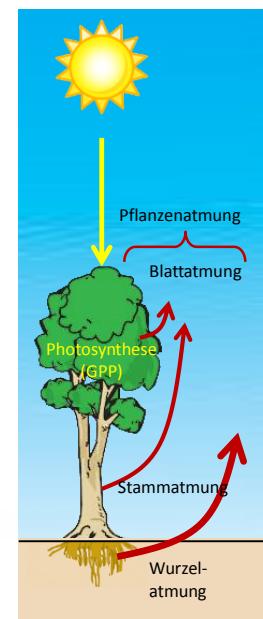


## C: einige Schlüsselkonzepte

### 2. Nettoprimärproduktion(NPP):

- Die Produktion neuer Biomasse (sowohl ober- und unterirdisch) durch die Pflanzen über eine bestimmte Zeitdauer
- $NPP = GPP - \text{Pflanzenatmung}$  oder  

$$NPP = \sum (\text{neue pflanzliche Biomasse})$$
- Nicht enthalten sind heterotroper C-Pool und Flüsse



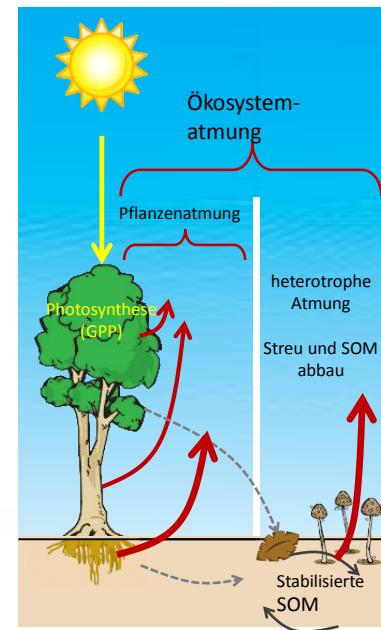
### C: einige Schlüsselkonzepte

#### 3. Net ecosystem exchange (NEE):

- ist ein Maß dafür, wieviel Kohlenstoff im Ökosystem aufgenommen und veratmet wird

$$\text{NEE} = \text{GPP} - \text{Ökosystematmung}$$

- Positiv heißt Ökosystem ist eine Senke
- Null heißt Ökosystem ist im Gleichgewicht
- Negativ heißt Ökosystem ist eine Quelle



### C: einige Schlüsselkonzepte

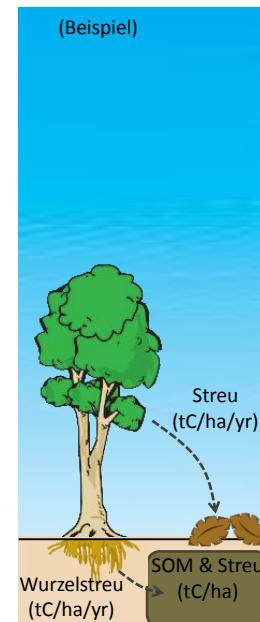
#### 4. Die Umsatzzeit:

- “Die mittlere Zeitdauer, die Kohlenstoff in einem Reservoir bleibt..” [1]

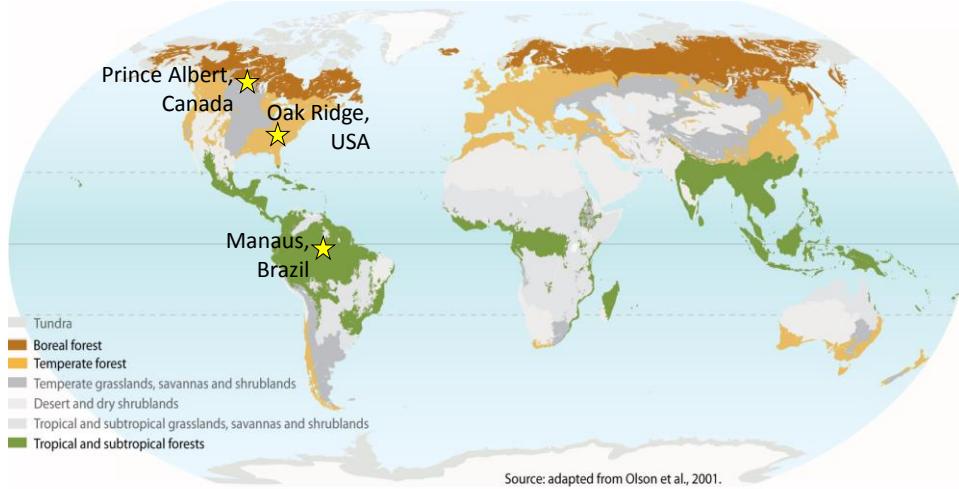
$$\text{Umsatzzeit} = \frac{\text{C Vorrat eines Reservoirs}}{\text{Netto C Zufuhr}}$$

(von C in einem Pool)

[1] Aber and Melillo, 2003



### C: Kohlenstoffhaushalt: Beispiele

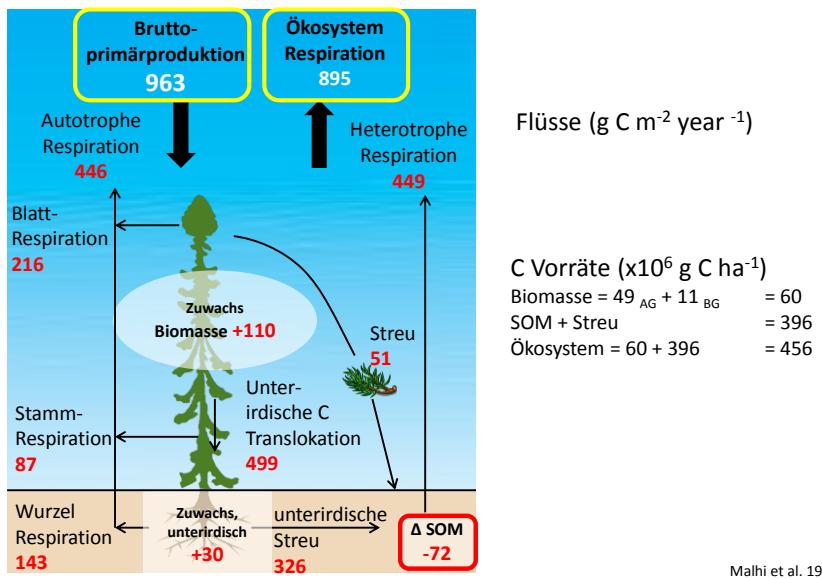


### C: Kohlenstoffhaushalt: Beispiele

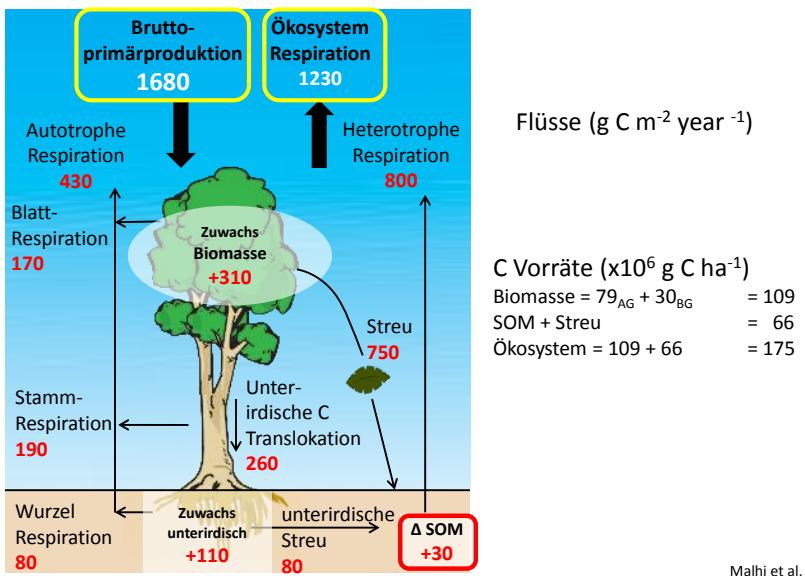
	Borealer Wald	Gem. Laubwald	Tropischen Regenwald
Ort	Prince Albert, Kanada	Oak Ridge, USA	Manaus, Brasilien
Baumarten	<i>Picea mariana</i> (Black spruce)	<i>Quercus alba</i> , <i>Q. Prinus</i> , <i>Carya ovata</i> (Hickory)	>200 Arten/ha
Altersklasse	~115	~55 (Sekundärwald)	Primärwald ('old growth forest')
Oberirdische Biomasse	50-60 Mg ha <sup>-1</sup>	155-170 Mg ha <sup>-1</sup>	330-370 Mg ha <sup>-1</sup>
Bodentyp	Gleysol (Staunässe)	Cambisol	Ferralsol (extrem verwittert)
Mit. Som.-temperatur	17°C	23°C	27°C (Trockenzeit)
Mit. Wint.-temperatur	-20°C	5°C	24°C (Regenzeit)
Niederschlag	400 mm	1400 mm	2200 mm
Vegetationsperiode	100 Tage	180 Tage	365 Tage

Mahli et al. 1999

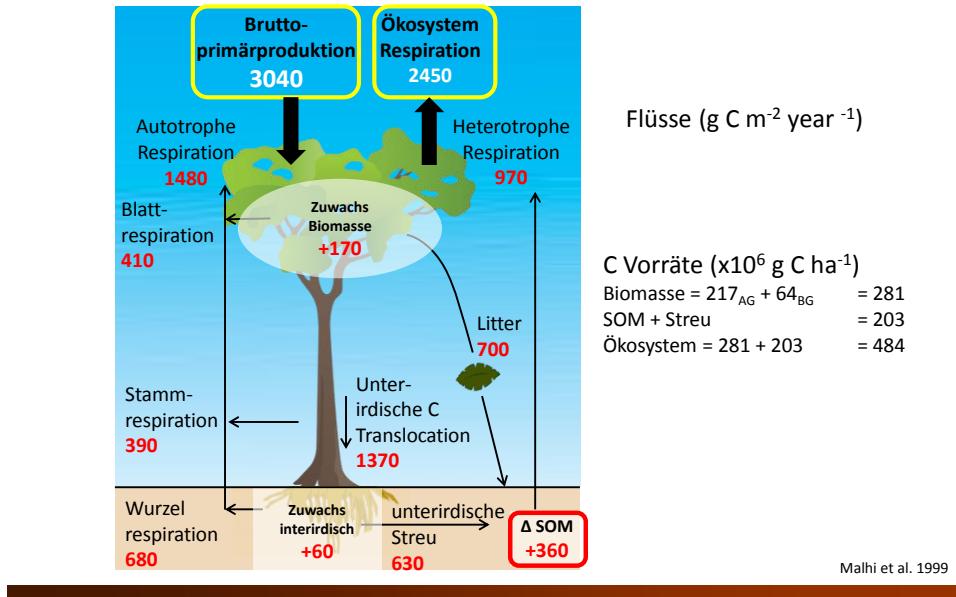
### C: Kohlenstoffhaushalt: borealer Wald



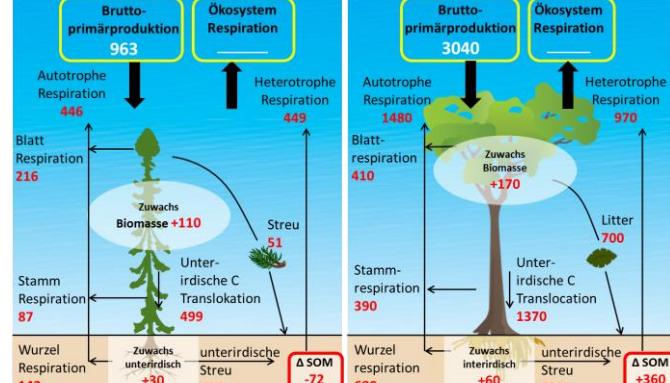
### C: Kohlenstoffhaushalt: gemäßiger Laubwald



### C: Kohlenstoffhaushalt: tropischer Regenwald



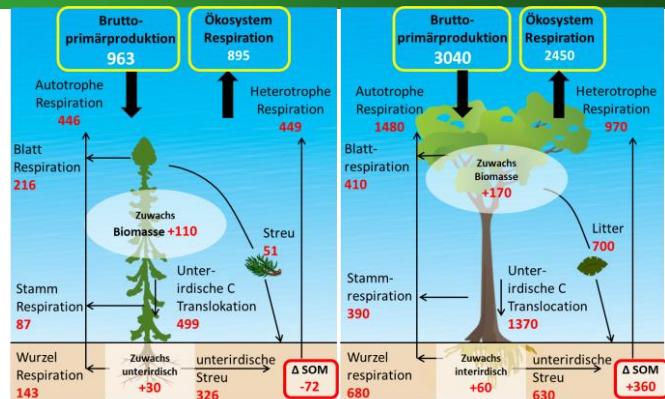
Zusammenfassung C-Flüsse ( $\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ )



	Borealer Wald	Tropischen Regenwald
Brutto-primärproduktion (GPP)		
Netto primärproduktion (NPP)		
Net ecosystem exchange (NEE)		
Ökosystem Respiration		
C- Vorräte ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) und (C Umsatzzeiten)	Biomasse = 60 (Jahre) SOM & Streu = 369 (Jahre) Ökosystem = 456 (Jahre)	Biomasse = 281 (Jahre) SOM & Streu = 203 (Jahre) Ökosystem = 486 (Jahre)

Malhi et al. 1999

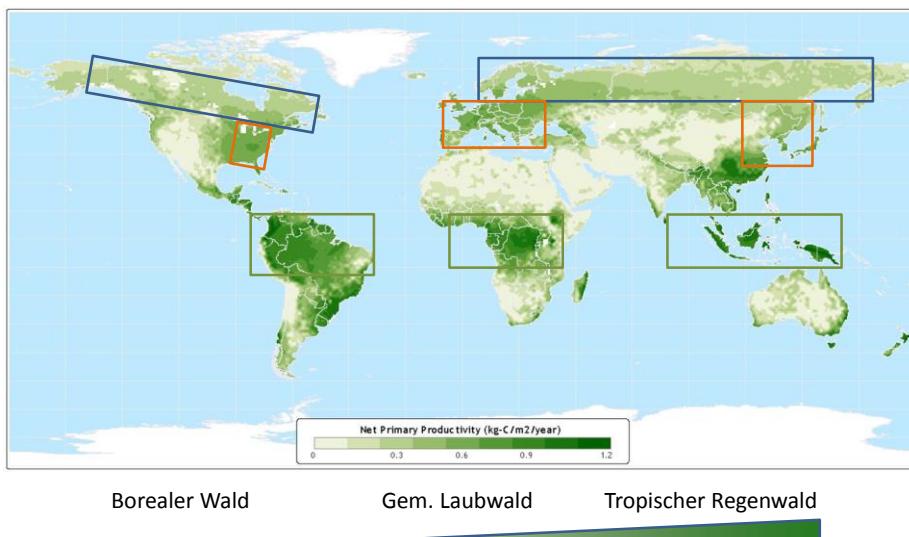
## Zusammenfassung C Flüsse ( $\text{g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ )



	Borealer Wald	Tropischen Regenwald
Brutto-Primärproduktion (GPP)	963	3040
Netto-Primärproduktion (NPP)	517 (= GPP-autotrophe Respiration)	1560
Net ecosystem exchange (NEE)	68 (AG = 110, BG = 30, SOM = -72)	590 (AG = 170, BG = 60, SOM = 360)
Ökosystem-Respiration	895	2450
C- Vorräte ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) und (C Umsatzeiten)	Biomasse = 60 (12 Jahre) SOM & Streu = 369 (105 Jahre) Ökosystem = 456 (88 Jahre)	Biomasse = 281 (18 Jahre) SOM & Streu = 203 (15 Jahre) Ökosystem = 486 (31 Jahre)

Maihi et al. 1999

## C: Kohlenstoffhaushalt: Netto-Primärproduktion

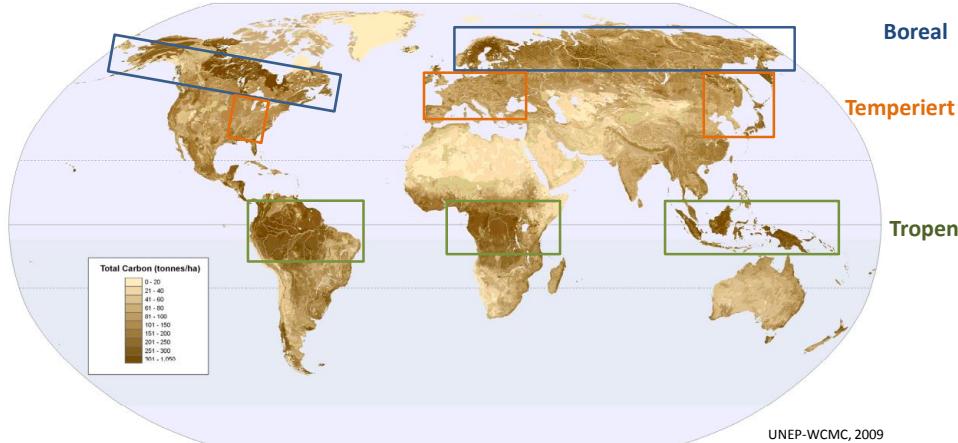


Borealer Wald

Gem. Laubwald

Tropischer Regenwald

### C: Kohlenstoffhaushalt: Ökosystem C Vorräte



#### Boreal:

- Lange Verweilzeiten (langsamer Zersetzung organischer Substanz)
- Hohe Kohlenstoffspeicherung zum Teil wegen Sümpfen

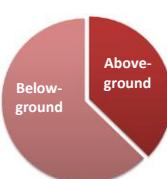
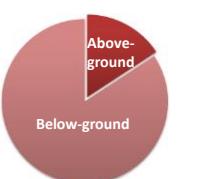
#### Humide Tropen:

- Hohe Kohlenstoffumsatzraten

### C: Kohlenstoffhaushalt: C Vorräte pro Biom

	Vegetation Wachstum	Vegetation Zersetzung	C-Quelle oder Senke	C Vorräte ( $t\text{ C ha}^{-1}$ )	Globale C Vorräte (Gt)	Hauptgefahr für pot. C Emissionen
borealer Wald	langsam	langsam	Senke	Böden: 116-434 Veg: 61-93	Böden: 471 Veg: 88 <b>Total: 559</b>	Waldbärde, Abholzung, Bergbau
gemäßiger Laubwald	schnell	schnell	Senke	156-320	Böden: 59 Veg: 100 <b>Total: 159</b>	Historische Verluste hoch, aber nun weitgehend stabil
tropischer Regenwald	schnell	schnell	Senke	Böden: 94-191 Veg: 170-250	Böden: 212 Veg: 216 <b>Total: 428</b>	Entwaldung und Degradierung

#### Ober- und unterirdische C-Allokation



Dixon et al. 1994

## D: Stickstoffhaushalt

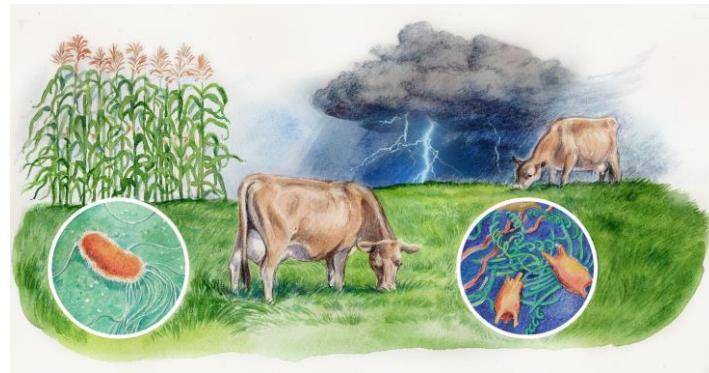
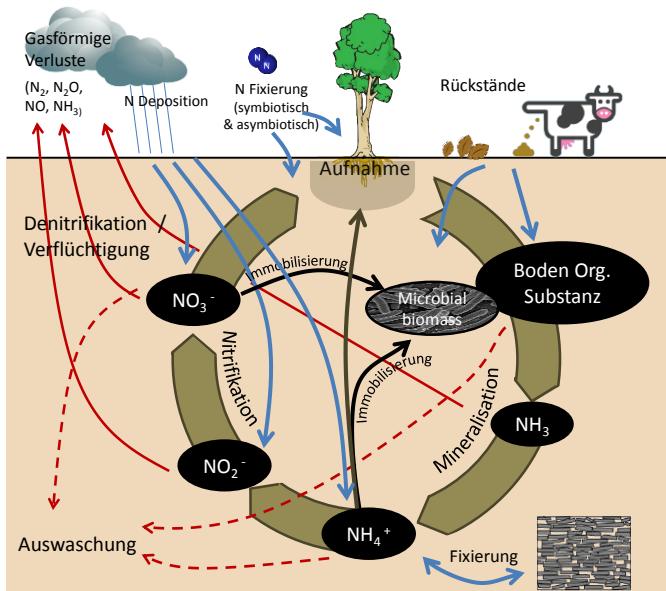


Image source: <http://judithhunillustrations.blogspot.de/2009/11/nitrogen-cycle.html>

## D: Stickstoffhaushalt



### Boden-N-Zyklus:

- Mineralisation
- Nitrifikation
- Immobilisierung

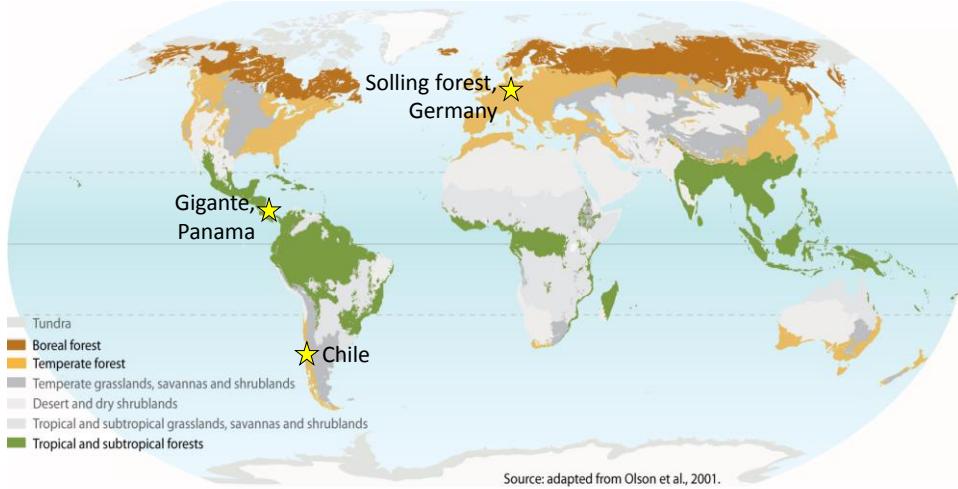
### N Verluste:

- Gasförmig
- Auswaschung

### N Einträge:

- N Deposition
- N-Fixierung

## D: Stickstoffhaushalt: Beispiele



## D: Stickstoffhaushalt: Beispiele

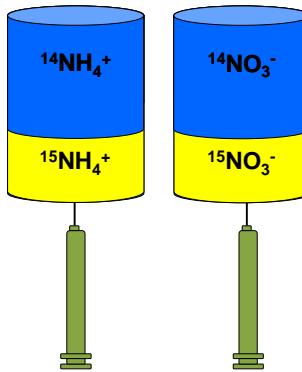
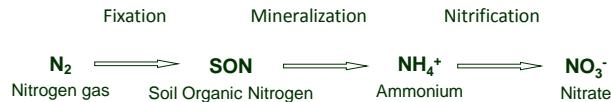
	Temperate forest site	Tropical forest site
Ort	Solling, Germany	Gigante, Panama
Waldtyp	Buche	Primärwald ('old growth forest')
Altersklasse	~ 150 Jahr	> 300 Jahr
Höhe	510 m	~ 50 m
durchschn. Temperatur	7 °C	27.4 °C
durchschn. Niederschlag	1100 mm	2650 mm
Vegetationsperiode	180 Tage / Jahr	365 Tage / Jahr
Bodentyp	Cambisol / Loess über Buntsandstein	Nitisol
Boden chemische Eigenschaften	pH: 3.5 CEC: 129 mmolc kg <sup>-1</sup> BS: 6.8% Al-Sättigung: 56%	pH: 5.3 ECEC: 205 mmolc kg <sup>-1</sup> BS: 92% Al-Sättigung: 3%

(Corre et al 2003)

(Corre et al 2010)

## D: Bodenstickstoffhaushalt: Methode

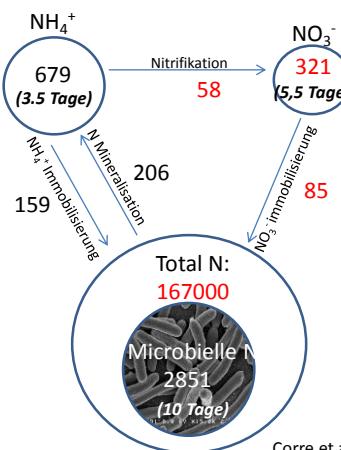
### $^{15}\text{N}$ Isotopenverdünnungsmethode



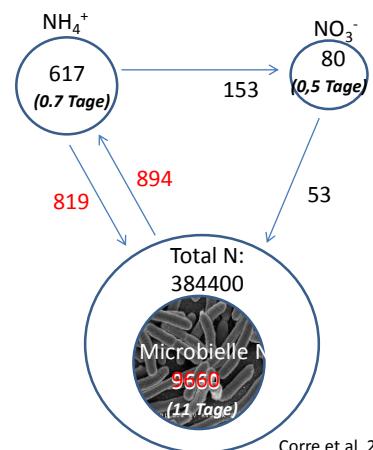
## D: Bodenstickstoffhaushalt: Vergleich Buchen-Tropenwald

0-5 cm Tiefe: N Vorräte in Kreisen (mg N m<sup>-2</sup>); N Flüsse in Pfeile (mg N m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)

### Buche (Solling)



### Tropen (Panama)



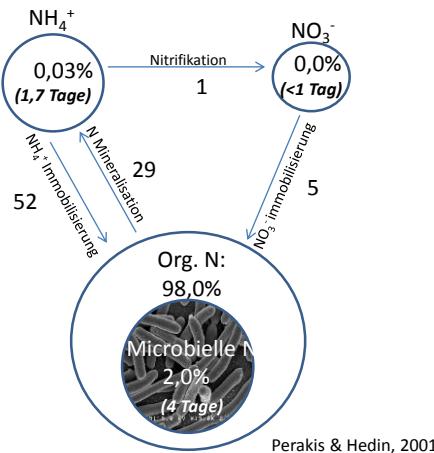
Corre et al. 2003

Corre et al. 2010

## D: Bodenstickstoffhaushalt: Vergleich Buchen-Tropenwald

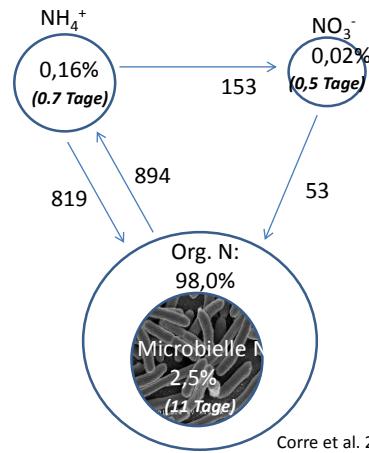
0-5 cm Tiefe: N Vorräte in Kreisen (%); N Flüsse in Pfeile ( $\text{mg N m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )

### Unpolluted temperate forest (Chile)



Perakis & Hedin, 2001

### Tropen (Panama)



Corre et al. 2010

## D: Stickstoffhaushalt

### Buche

### Tropenwald

( $\text{Kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ )

	Buche	Tropenwald
<b>Input</b>		
Atmosphärische Deposition	25	8
N <sub>2</sub> Fixierung (symbiotisch & asymbiotisch)	6.5 *	36 *
<b>Output</b>		
Auswaschung	2	2
N <sub>2</sub> O Emissionen	2	1
<b>Pflanzenaufnahme</b>		
Blatt	68	114
Stamm	6	11

\* Literature values for biomes:

Cleveland et al. 1999

Brumme & Khanna 2009

Corre et al. 2010

## D: Stoffhaushalte: Zusammenfassung

	Borealer/ gem.-Laubwald		Tropischer Regenwald
<b>Global</b>			
Niederschlag	niedrig	<	Hoch
Temperatur	niedrig	<	Hoch
NPP (g C/m <sup>2</sup> /yr)	Boreal: 200–600 Temperate: 600–1500		2000–3000
C (gespeichert)	oberirdisch < unterirdisch		oberirdisch = unterirdisch
<b>C-Kreislauf Beispiel</b>	Black spruce (Prince Albert, Kanada)		Tropenwald (Manaus, Brasilien)
GPP	niedrig	<	Hoch
NPP	niedrig	<	Hoch
NEE	niedrig	<	Hoch
C Umsatzeiten	Lang	<	Kurz
<b>N-Kreislauf Beispiel</b>	Buchenwald (Solling, Germany)		Tropenwald (Gigante, Panama)
Boden N cycling rates	Niedrig bis moderat	<	Hoch
Gasförmige Verluste (N <sub>2</sub> O)	niedrig (ohne deposition)	<	Hoch

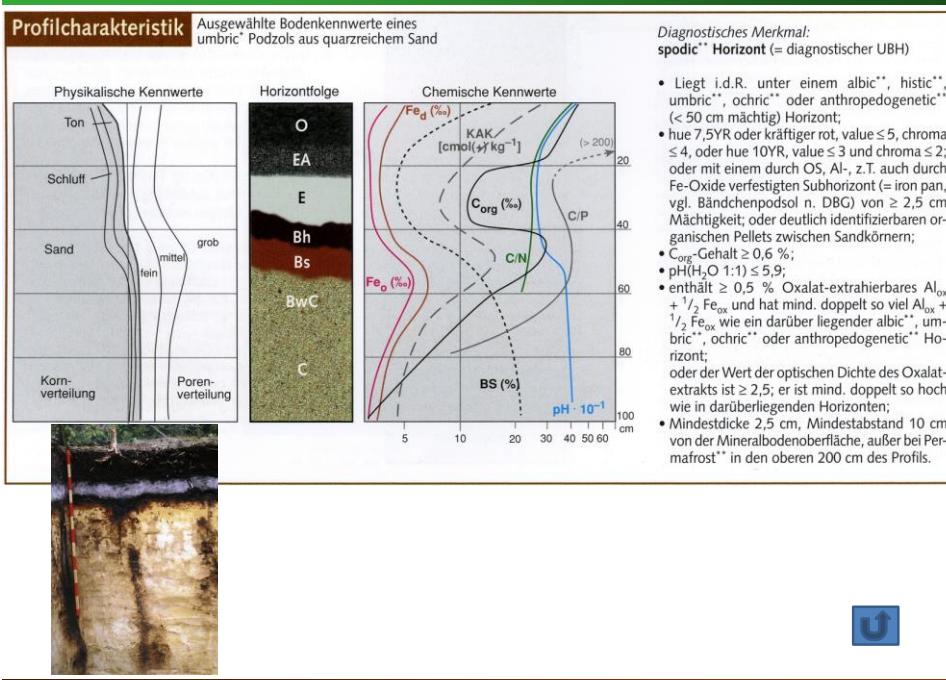
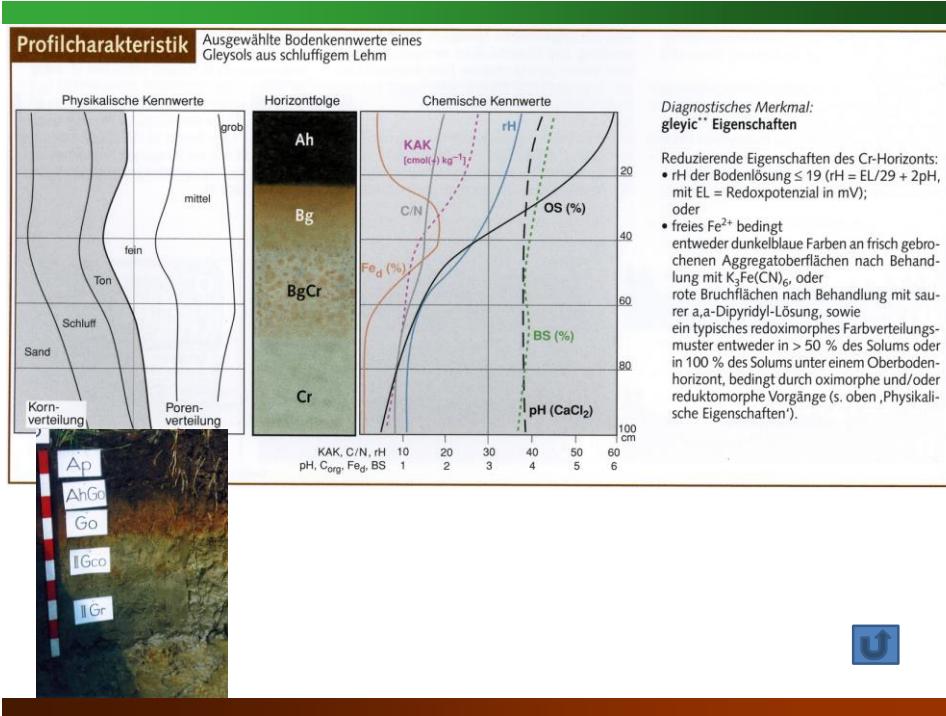
Vielen Dank!

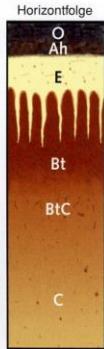
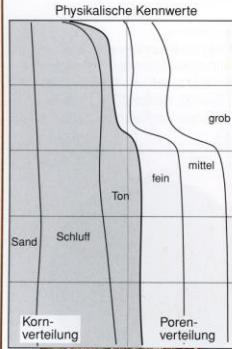
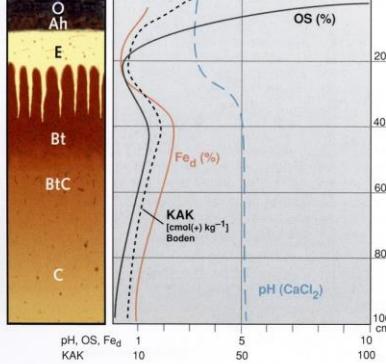
Solling, Germany



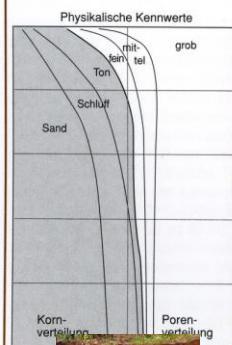
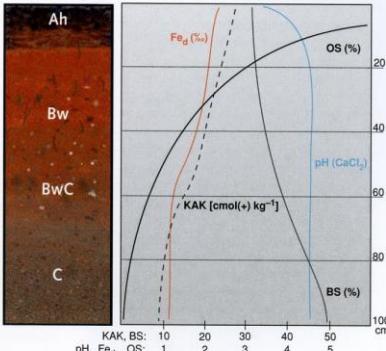
Gigante, Panama





**Profilcharakteristik**Ausgewählte Bodenkenntwerte eines  
Albeluvols aus schluffigem Lehm**Chemische Kennwerte****Diagnostische Merkmale:**  
**argic\*\* Horizont, albeluvic tonguing\*\***

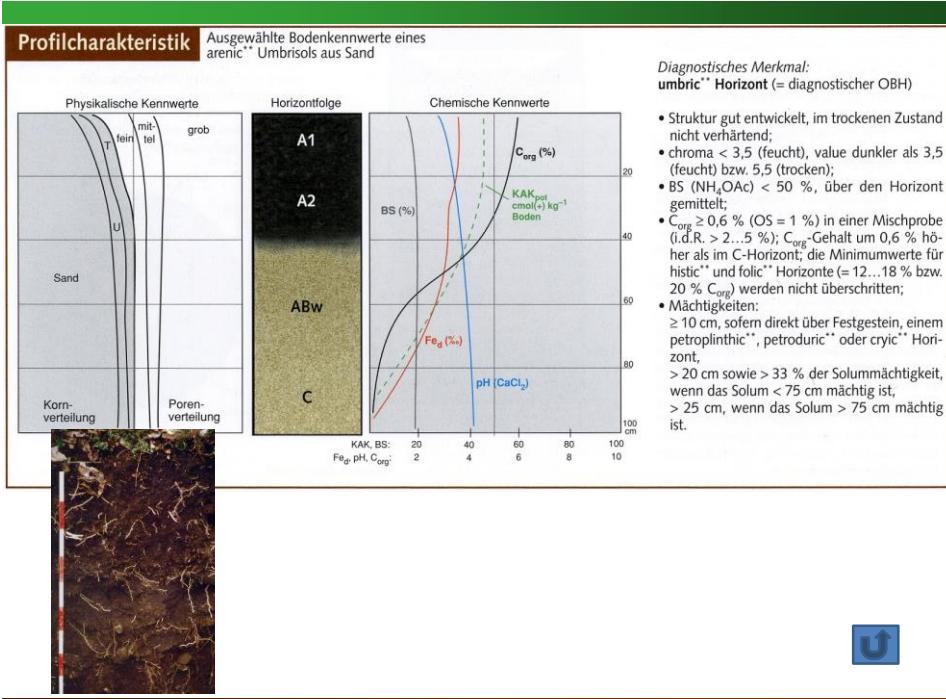
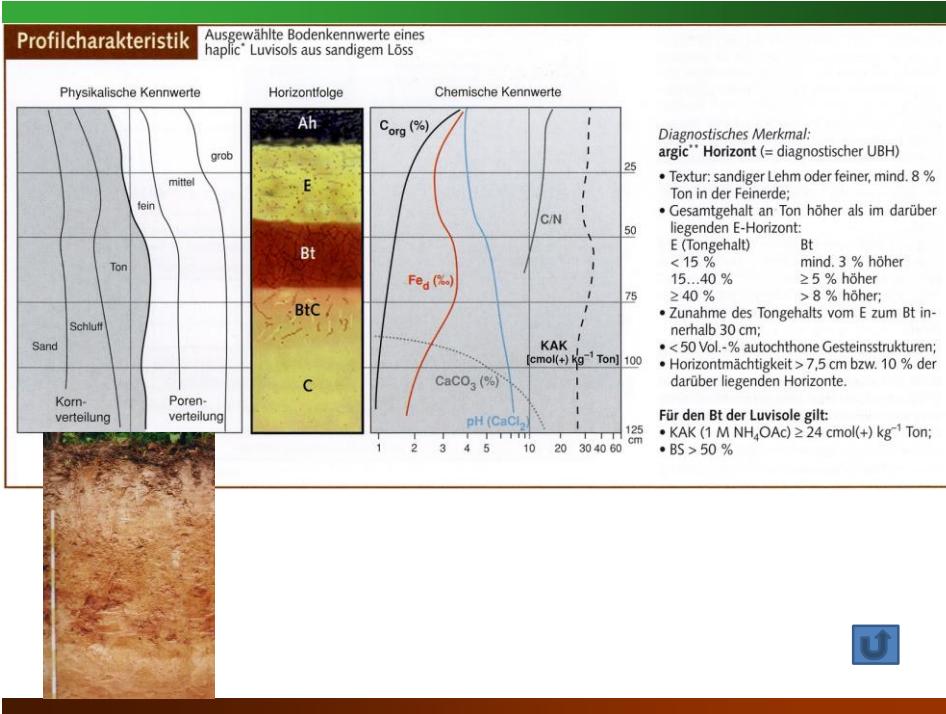
- Argic\*\* Horizon (Definition s. Luvisole, S. 32) innerhalb 100 u. GOF mit albeluvic tonguing\*\* (DBG: Verzahnung);
- die in den argic\*\* Horizon hineingreifenden Zungen haben die Farbe des albic\*\* Horizonts;
- sie sind tiefer als breit und haben folgende waagerechte Ausdehnung:  
≥ 5 mm in tonigen argic\*\* Horizonten,  
≥ 10 mm in tonig-lehmigen und schluffigen argic\*\* Horizonten,  
≥ 15 mm in schluffig-lehmigen, lehmigen oder sandig-lehmigen argic\*\* Horizonten;
- sie nehmen > 10 Vol.-% in den oberen 10 cm des argic\*\* Horizonts ein (vertikal oder horizontal);
- Ihre Kornverteilung entspricht jener des gebleichten Eluvialhorizonts über dem argic\*\* Horizont.

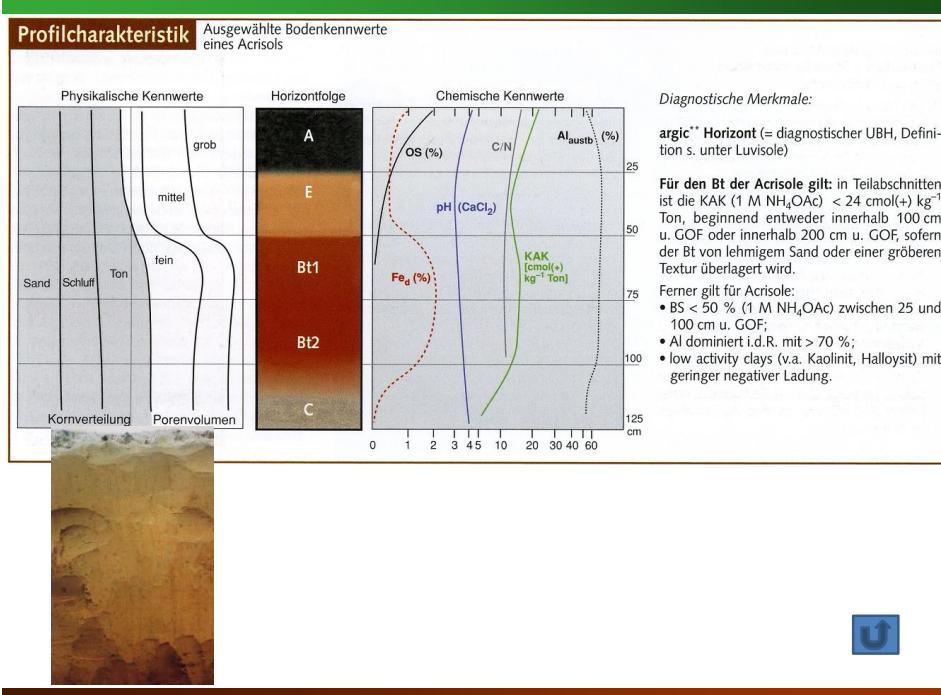
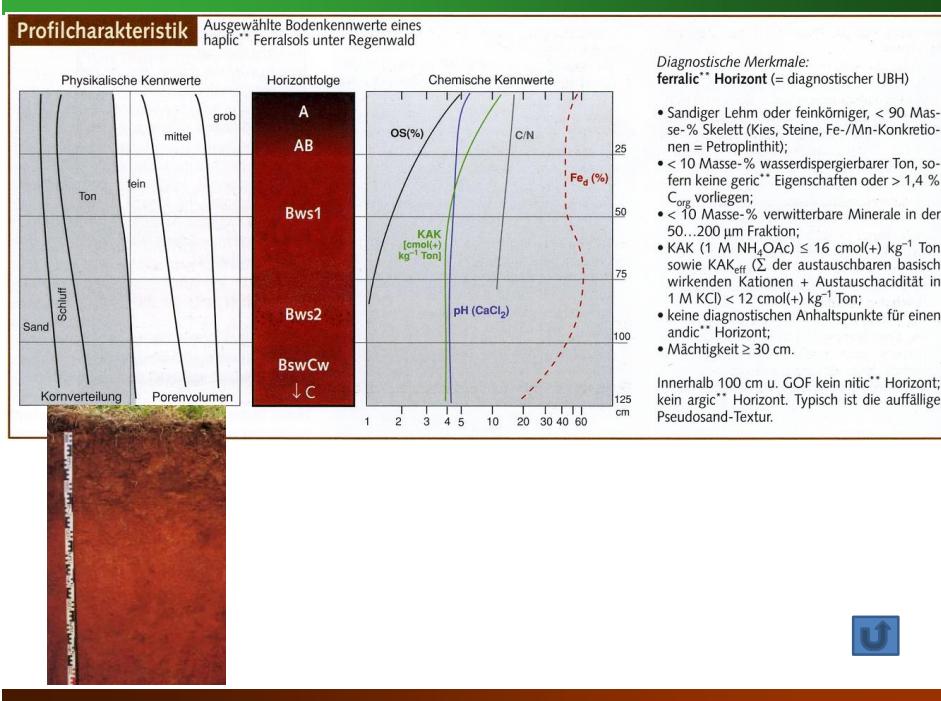
**Profilcharakteristik**Ausgewählte Bodenkenntwerte eines  
haplic\* Cambisols aus schluffigem Sand**Chemische Kennwerte****Diagnostische Merkmale:**  
**cambic\*\* Horizont (= diagnostischer UBH)**

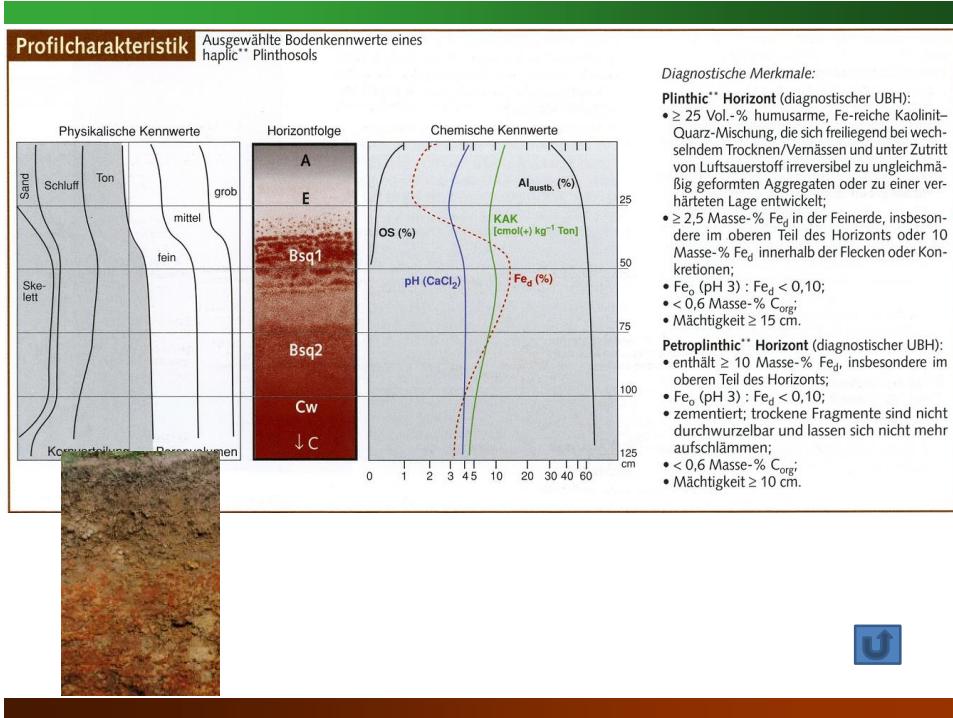
- Textur der Feinerde: sandiger Lehm oder feinkörniger;
- Strukturmerkmale nur mäßig entwickelt oder autochthone Gesteinsstrukturen nehmen ≤ 50 Vol.-% des Horizonts ein;
- Verwitterungsmerkmale in Form von stärkerem chroma, starker rotem hue oder höherem Ton gehalt als in tieferen Teilen des Profils; Hinweise auf Carbonatauswaschung in Cambisol aus kalkhaltigem Gestein, z.B. weniger oder fehlende Kalküberzüge auf groben Partikeln;
- feucht keine bröckelige ('brittle') Konsistenz;
- > 15 cm mächtig, Unterkante mind. 25 cm u. GOF;
- KAK<sub>pot</sub> (1 M NH<sub>4</sub>OAc) > 16 cmol(+) kg<sup>-1</sup> Ton oder KAK<sub>eff</sub> (= Summe austauschbarer basisch wirkenden Kationen + austauschbare Acidität in 1 M KCl) < 12 cmol(+) kg<sup>-1</sup> Ton oder ≥ 10 % verwitterbare Minerale in der 50...200 µm-Fraktion.

**Mollic Horizont** über einem UBH mit einer BS < 50 % innerhalb 100 cm u. GOF; oder ein a) andic\*\*, vertic\*\* oder vitric\*\* Horizont, der zwischen 25 und 100 cm beginnt, bzw. ein b) plinthic\*\*, petroplinthic\*\* oder salic\*\* Horizont, der zwischen 50 und 100 cm beginnt, wobei oberhalb dieser Horizonte kein lehmiger Sand oder eine grobkörnigere Textur vorkommen dürfen.









# **Stoffhaushalt von Waldökosystemen**

## **Berechnungen und Bodenzustandserhebung**

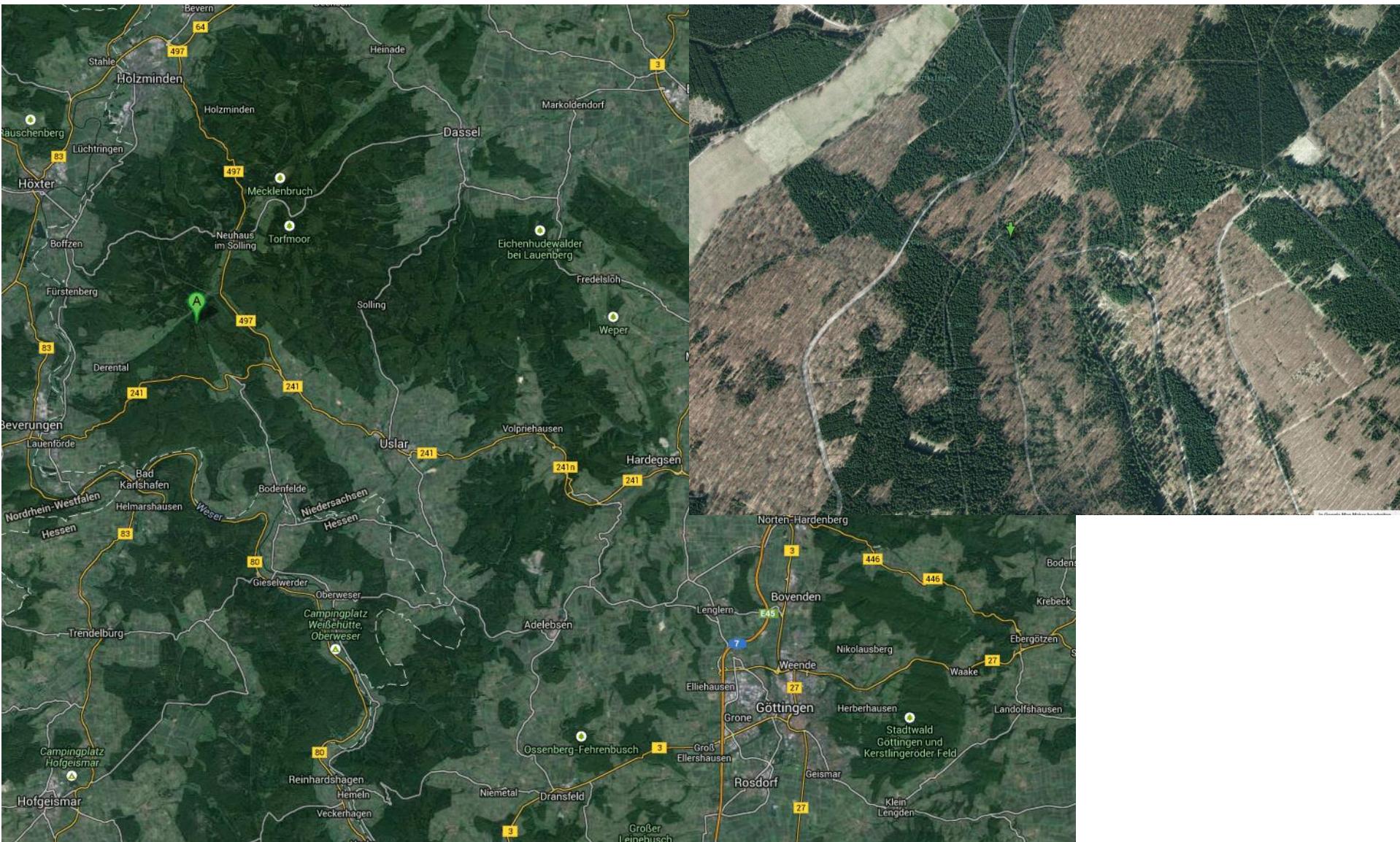
# Vorlesungsgliederung

## Berechnungen und Bodenzustandserhebung

- A. Berechnung Stoffvorräte in Böden; Bodenzustandserhebung
- B. Berechnung Komponente der Deposition

## Feldversuche zum Wasser- und Stoffhaushalt von Waldökosystemen: Strategie und Instrumentierung

# A: Lage Amelith, Solling



(Google maps)

## A: Feldaufnahme

## **Humusform: typ. Moder feinhumusreich (MOR)**

Humusprofil					
Horizont	Tiefe	Substanz	Gefüge	Durchwurzel.	Humusform
L-Lage	3	locker			
Of	2				Moder feinhumusarm (MOA)
Oh	1				

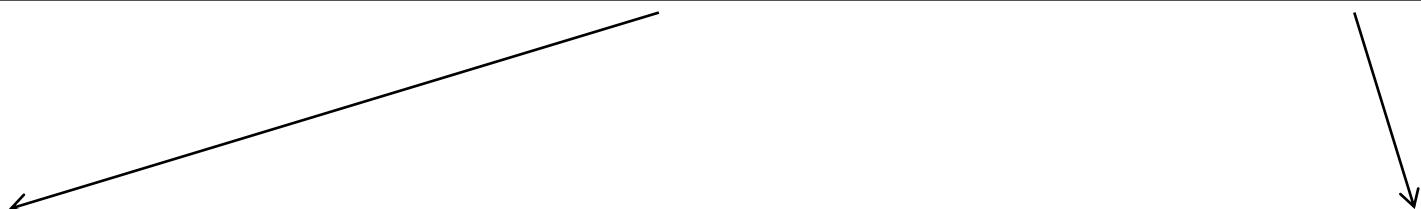
## Bodentyp: Braunerde (BB)

## A: Laboranalysen

	TRD (g cm <sup>-3</sup> )	Ton (%)	Schluff (%)	Sand (%)
Ah	1,1	23	63	14
Bv	1,2	22	62	16
BvCv	1,4	31	37	32

### Bodenchemie

Horiz.	Tiefe	pH [H <sub>2</sub> O]	pH [KCl]	C	Humus [%]	N [mg/g]	C/N	P [mg/g]	KAKe/KAKt mmol <sub>c</sub> /kg	Na [%]	K [%]	Ca [%]	Mg [%]	Al [%]	Mn [%]	Fe [%]	H	CaCO <sub>3</sub> [%]
Ah	0-10			46,6	8,0	2,23	20,9	0,51	112,7	0,2	1,0	0,4	0,9	75,8	0,1	7,4	14,1	0
Bv	10-65			7,2	1,2	0,74	9,8	0,37	44,7	0,2	1,9	0,0	0,2	92,1	1,5	0,1	3,9	0
BvCv	>65			3,7	0,6	0,54	6,8	0,28	64,8	0,1	2,3	0,0	0,3	94,3	0,5	0,0	2,5	0



Horiz.	Na	K	Ca	Mg (mmol <sub>c</sub> /kg)	Al	Mn	Fe	H
Ah 0-10cm	0,2	1,1	0,6	1,0	85,5	0,1	8,3	15,9
Bv 10-65cm	0,1	0,8	0,0	0,1	41,2	0,7	0,1	1,7
BvCv >65cm	0,1	1,5	0,0	0,2	61,1	0,3	0,0	1,6

A: Wie groß sind die KAK<sub>e</sub> und Basensättigung in diesem Boden?

Horiz.	KAKe	Na	K	Ca	Mg (mmol <sub>c</sub> /kg)	Al	Mn	Fe	H
Ah 0-10cm	?	0,2	1,1	0,6	1,0	85,5	0,1	8,3	15,9
Bv 10-65cm	?	0,1	0,8	0,0	0,1	41,2	0,7	0,1	1,7
BvCv >65cm	?	0,1	1,5	0,0	0,2	61,1	0,3	0,0	1,6

$$KAK_e = \sum \text{Kationen} = 0,2 + 1,1 + 0,6 + 1,0 + 85,5 + 0,1 + 8,3 + 15,9 = 112,7 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$$

$$\text{Basensättigung} = \frac{\sum \text{Basen}}{KAK} \times 100\% = (0,2 + 1,1 + 0,6 + 1,0) / 112,7 * 100\% = 2,6 \%$$

$$Al - \text{Sättigung} = 85,5 / 112,7 * 100\% = 75,8 \%$$

# A:BZE

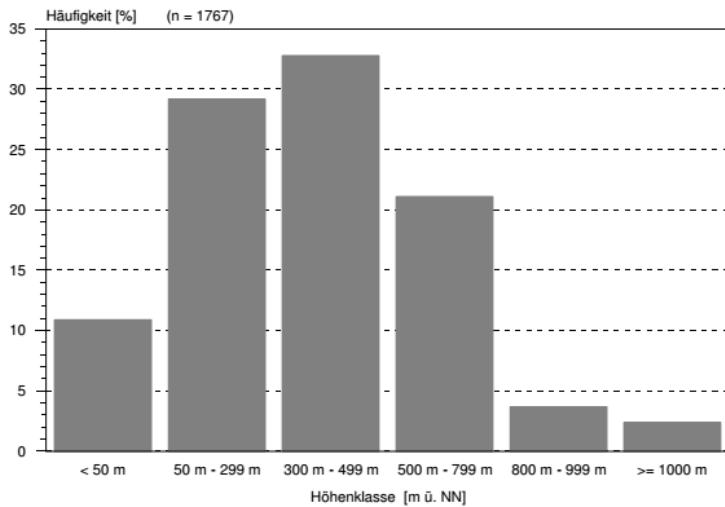
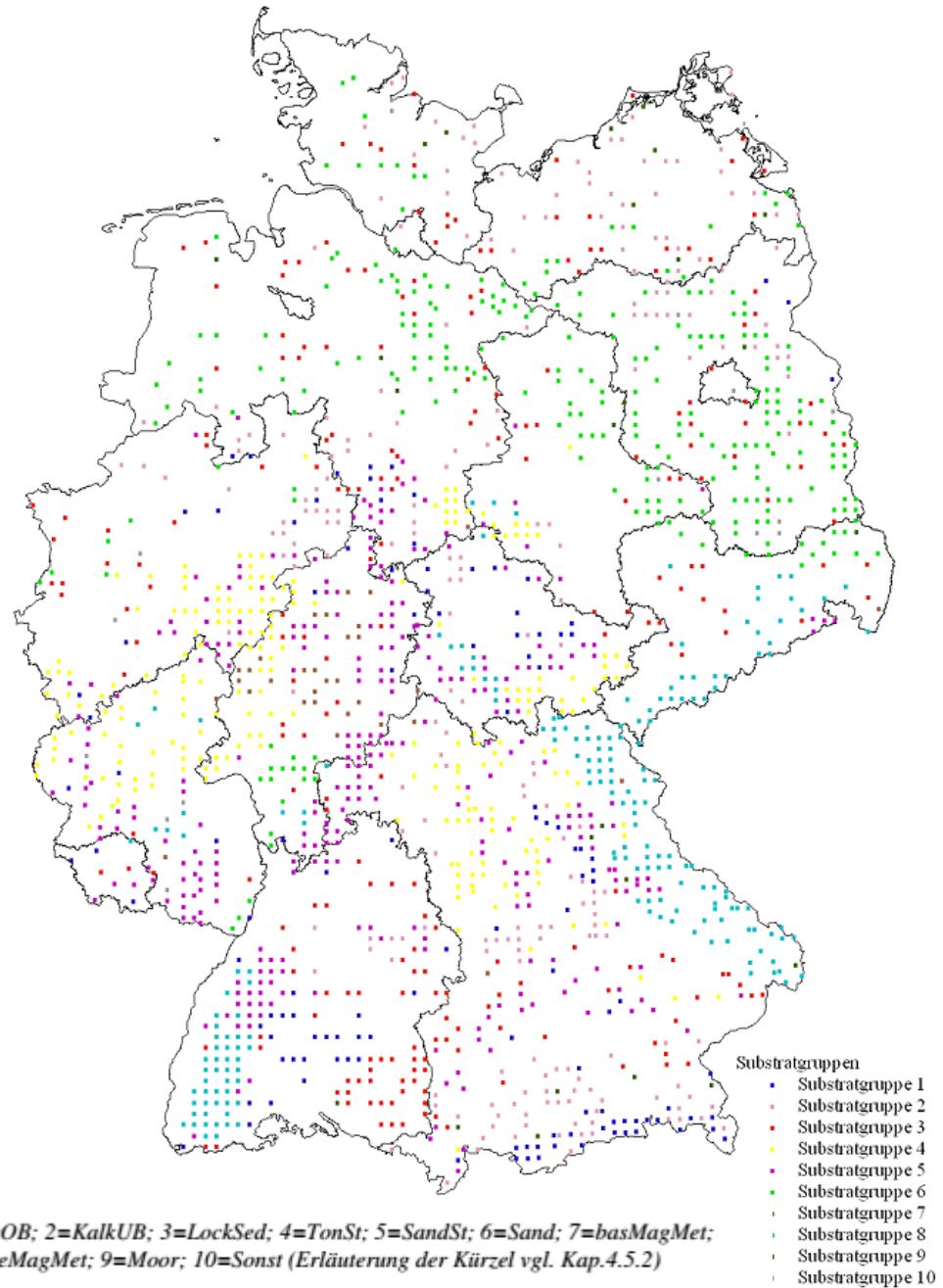


Abb.5: Höhenlage der Erhebungsflächen



## A: BZE: Basensättigung

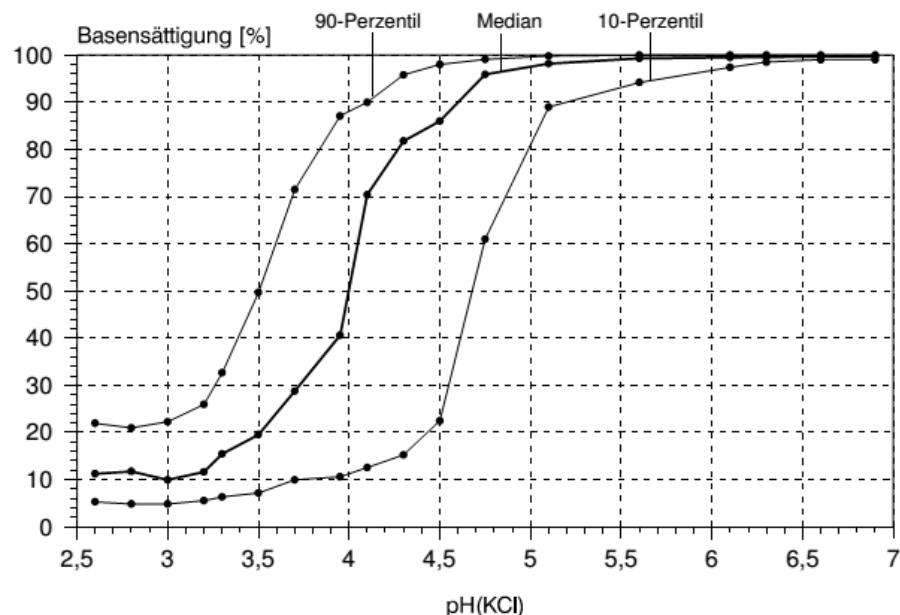


Abb.22: Beziehung zwischen pH(KCl) und Basensättigung („gleitende Mittelwerte“ der Mediane, 10-Perzentile und 90-Perzentile; Tiefenstufe 0-10 cm (n = 1719)

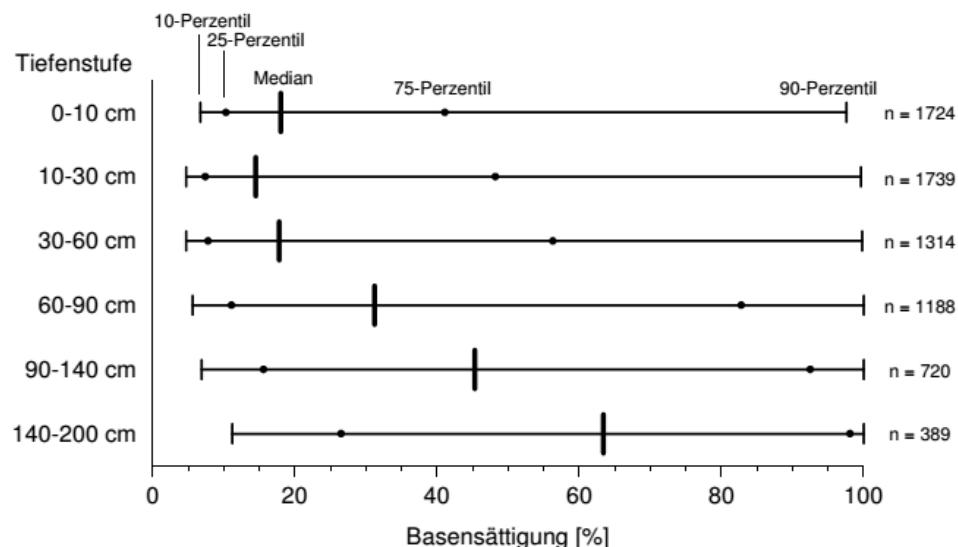


Abb.23: Tiefengradient der Basensättigung

## A: BZE: Al-Sättigung

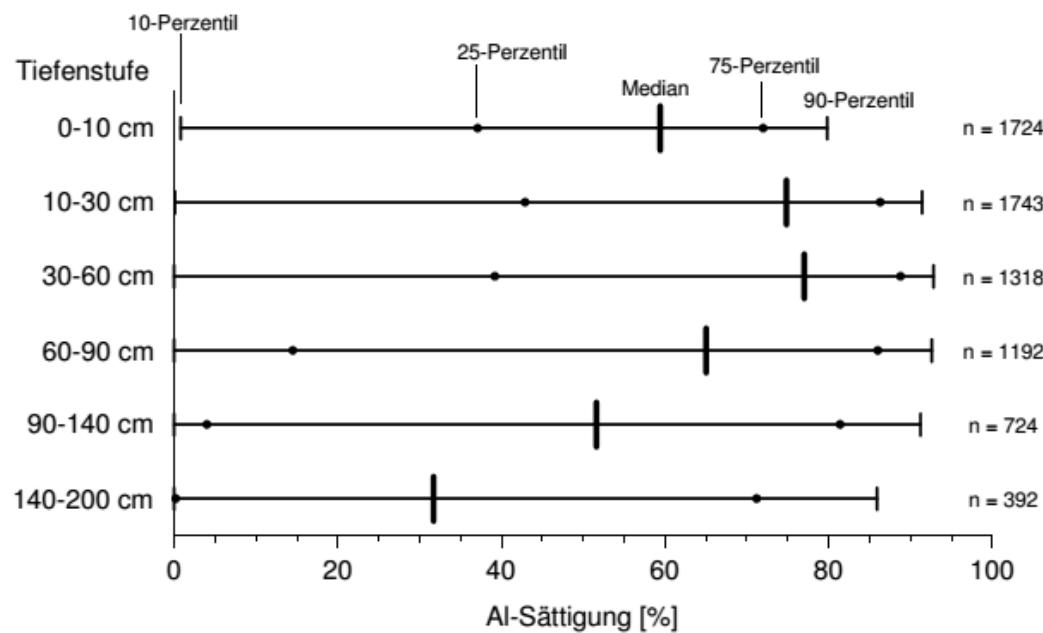
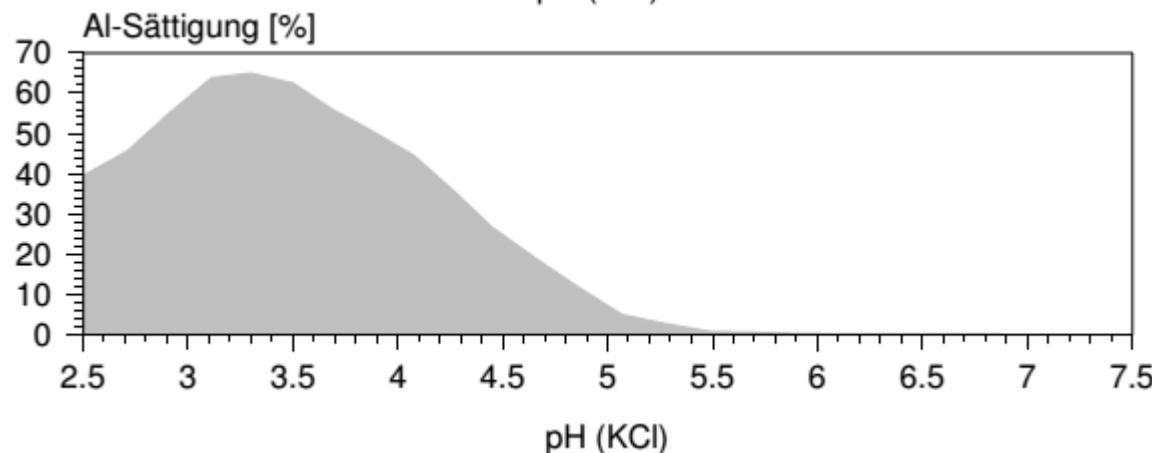


Abb.28: Tiefengradient der Aluminiumsättigung

A: Wie groß sind die Ca Vorräte ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) in diesem Boden?

				TRD ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Ton (%)	Schluff (%)	Sand (%)		
Horiz.	KAKe	Na	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe	H
					( $\text{mmol}_c/\text{kg}$ )				
Ah 0-10cm	112,7	0,2	1,1	0,6	1,0	85,5	0,1	8,3	15,9
Bv 10-65cm	44,7	0,1	0,8	0,0	0,1	41,2	0,7	0,1	1,7
BvCv >65cm	64,8	0,1	1,5	0,0	0,2	61,1	0,3	0,0	1,6

Volumen Boden:  $100\text{m} * 100\text{m} * 0,1\text{m} = 1000 \text{ m}^3$

TRD=  $1,1 \text{ g cm}^{-3} = 1100 \text{ kg m}^{-3}$

} Masse = TRD \* V =  $1,1 * 10^6 \text{ kg ha}^{-1}$  Boden

$0,6 \text{ mmol}_c \text{ Ca } * \text{kg}^{-1}$

Ladung Ca:  $2+$

}  $0,6 \text{ mmol}_c \text{ Ca kg}^{-1} = 0,3 \text{ mmol Ca kg}^{-1}$

$M_{\text{ca}} = 40 \text{ g mol}^{-1} = 40 \text{ mg mmol}^{-1}$

}  $0,3 * 40 = 12 \text{ mg Ca kg}^{-1}$

$1,1 * 10^6 \text{ kg ha}^{-1} * 12 \text{ mg Ca kg}^{-1} = 13,2 * 10^6 \text{ mg Ca ha}^{-1} = 13,2 \text{ kg Ca ha}^{-1}$

## BZE: Ca-Vorräte

**Tab.9: Prozentuale Verteilung der Ca-Vorratsklassen (Wurzelraum) nach Substratgruppen und Haupt-Bodentypen Braunerde (B), Parabraunerde (L), Podsol (P), Pseudogley (S)**

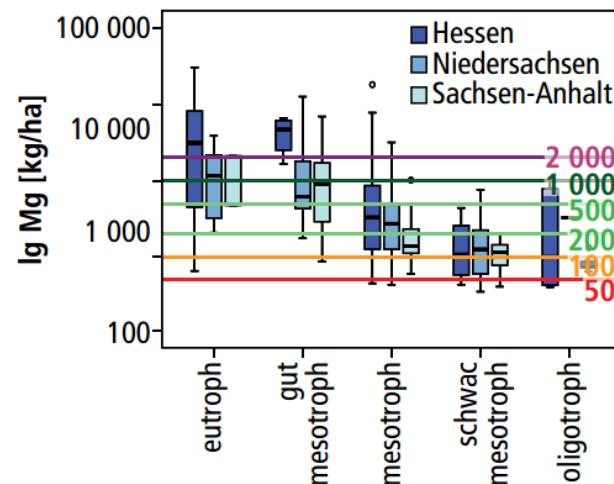
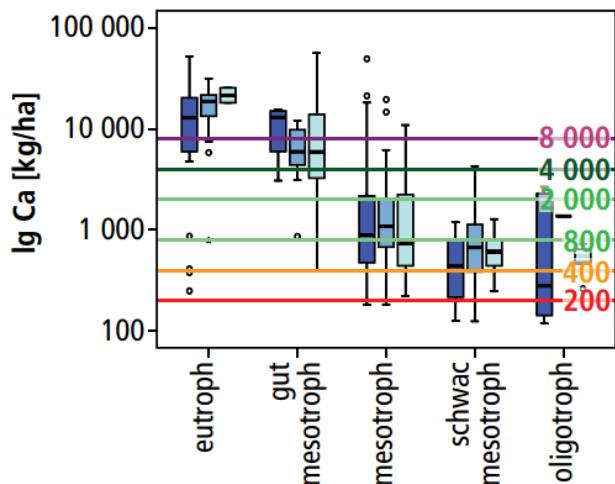
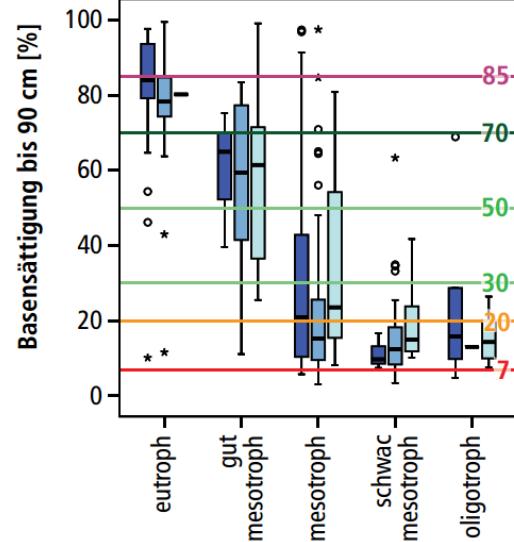
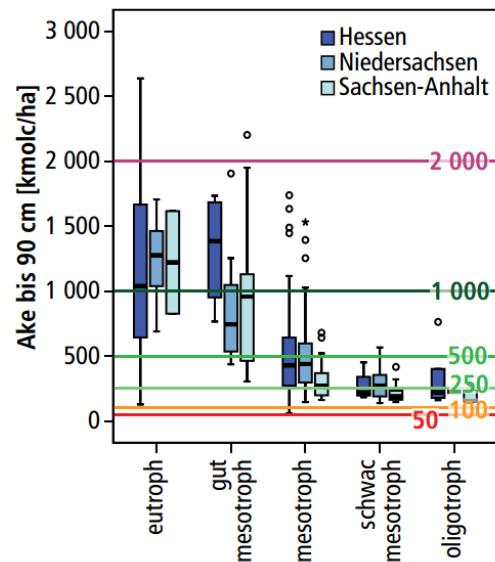
Ca-Vorrat im Wurzelraum			Anteil der BZE-Punkte [%]						
Klasse	Bewertung lt. AK SK	Wertebereich [kg/ha]	Substratgruppe						
			1 (n=63)	2 (n=119)	3 (n=190)	4 (n=175)	5 (n=239)	6 (n=231)	8 (n=107)
I	sehr gering	< 200	0.0	2.7	2.3	8.6	6.8	4.2	9.9
	gering	200 - 400	1.4	6.7	12.6	29.9	36.6	27.9	27.8
II	mäßig	400 - 800	0.3	15.1	23.8	29.4	27.5	42.2	34.4
	mittel	800 - 2000	0.0	22.6	27.6	18.7	22.5	18.9	12.7
III	mäßig hoch	2000 - 4000	1.4	7.5	16.5	8.5	5.3	1.6	8.6
	hoch	4000 - 8000	1.4	12.0	8.9	2.8	0.8	3.9	5.6
	sehr hoch	>= 8000	95.6	33.5	8.3	2.2	0.5	1.4	0.9

Substratgruppen: 1=KalkOB; 2=KalkUB; 3=LockSed; 4=TonSt; 5=SandSt; 6=Sand;  
8=saurerMagMet (Erläuterung der Kürzel vgl. Kap.4.5.2)

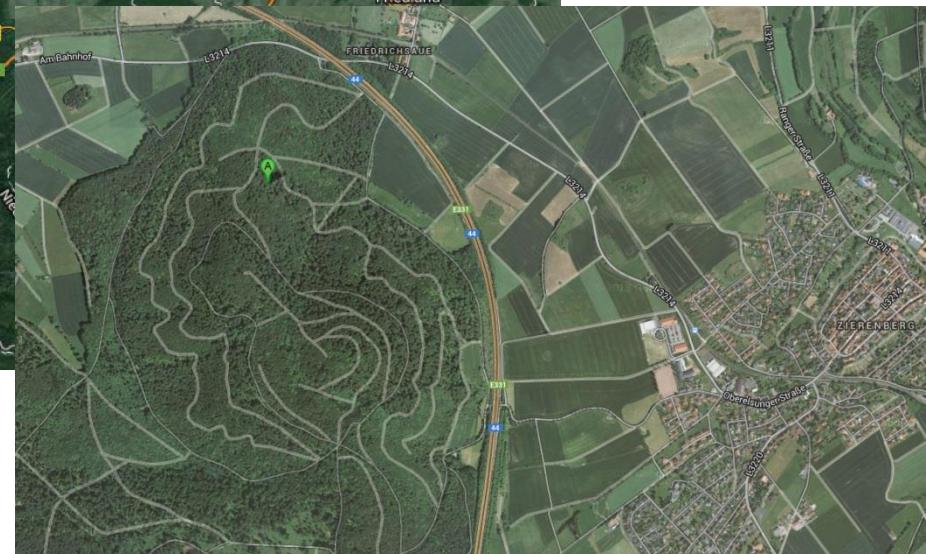
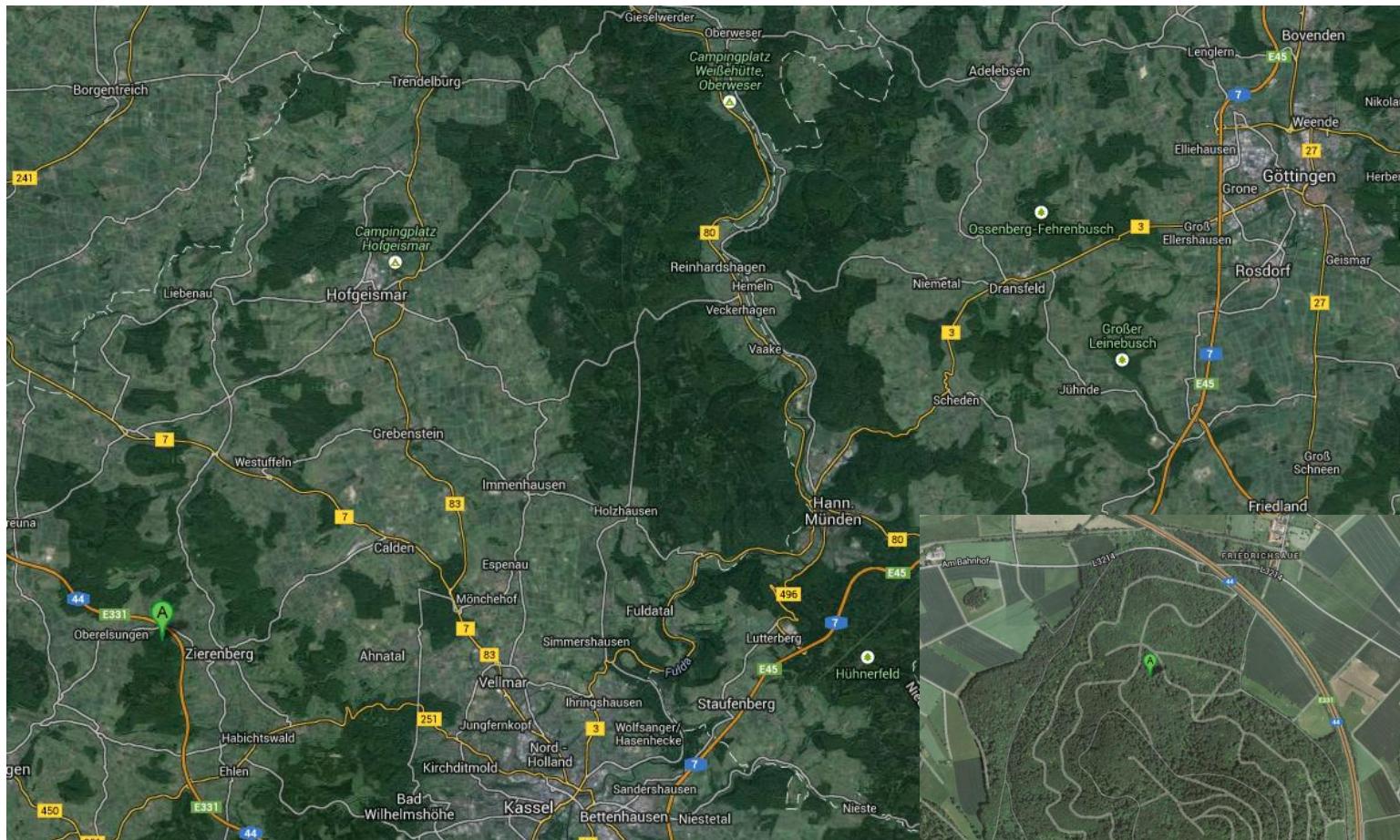
# Vergleich: Standortskartierung/BZE

**Tab. 1: Zuordnung der Trophiestufen der Standortskartierungen der Länder nach [34]**

Niedersachsen	Hessen	Sachsen-Anhalt
Nährstoffzahl	Trophie	Nährkraftstufe
6	1+ = Karbonat-eutroph	..RC.. = reich-karbo-natisch bis R
5, 5+	1, 1- = eutroph	..R.. = reich
4+, 5-	2+ = gut mesotroph	..K.. = kräftig
3, 3+, 4-, 4	2 = mesotroph	..M.. = mittel
2+, 3-	2- = schwach mesotroph	..Z.. = ziemlich arm
1, 2-, 2	3 = oligotroph	..A.. = arm



## B: Lage Zierenberg



(Google maps)

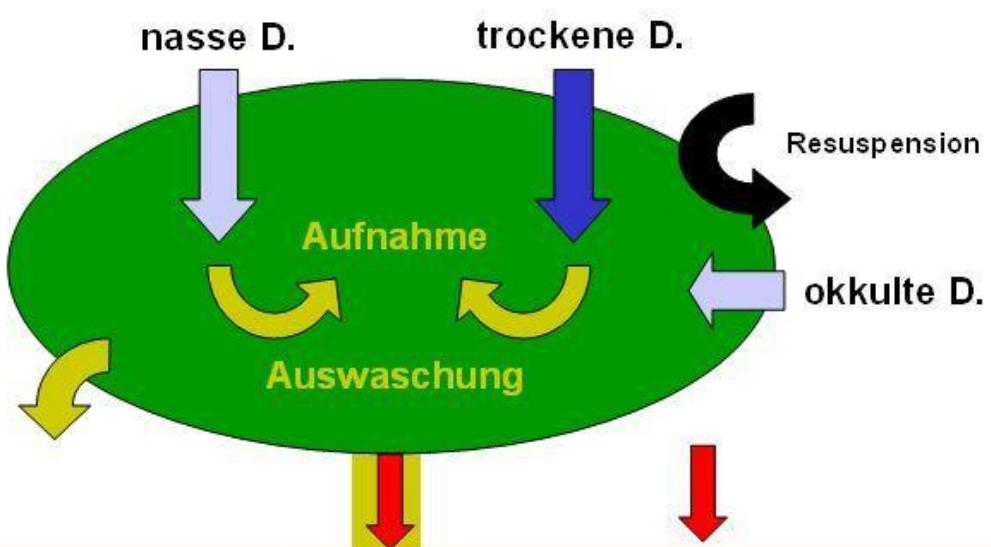
## B. Komponenten der Deposition

### Freilandniederschlag

- Nasse Deposition (Stoffe im Wasser)
- Absetzende trockene Stoffe (Stäube)

### Bestandesniederschlag

- Ausfilterung von Aerosolen
- Lösung, Sorption, Aufnahme von atmosphärischen Gasen an Oberflächen
- Pflanzenauswaschung oder Pflanzenaufnahme



Gesamtdeposition: **Stammablauf** + **Kronendurchlass**

## B. Komponenten der Deposition: Gesamtdeposition

$$\text{GD}_x = \text{BD}_{\text{nass},x} + \text{ID}_{\text{part},x} + \text{ID}_{\text{gasf},x} \quad (1)$$

$$\text{BD}_{\text{nass},x} = \text{FD}$$

GD Gesamtdeposition

BD Bestandesdeposition

FD Freilanddeposition (Regen, Sedimentation von Partikeln)



ID Interzeptionsdeposition (Aerosole, okkulte Deposition)

$\text{ID}_{\text{part.}}$  partikuläre Interzeptionsdeposition

$\text{ID}_{\text{gasf},x}$  gasförmige Interzeptionsdeposition

$$\text{GD}_{\text{Na}} = \text{BD}_{\text{Na}} = \text{BD}_{\text{Na,nass}} + \text{ID}_{\text{Na,part}} \quad (2)$$

Aus (1) + (2) folgt:

$$\text{ID}_{\text{Na,part}} = \text{BD}_{\text{Na}} - \text{BD}_{\text{Na,nass}} = \text{BD}_{\text{Na}} - \text{FD}_{\text{Na}} \quad (3)$$

$\text{Na}_{\text{part}}$  wird um den sog. Natrium .-Faktor gegenüber dem Freiland angereichert:

$$\text{Na-Faktor} = \text{ID}_{\text{Na,part}} / \text{FD}_{\text{Na}} = (\text{BD}_{\text{Na}} - \text{FD}_{\text{Na}}) / \text{FD}_{\text{Na}} = f_{\text{Na}} \quad (4)$$

## B. Komponenten der Deposition: Interzeption

$$\text{Na-Faktor} = \text{ID}_{\text{Na.part}} / \text{FD}_{\text{Na}} = (\text{BD}_{\text{Na}} - \text{FD}_{\text{Na}}) / \text{FD}_{\text{Na}} = f_{\text{Na}} \quad (4)$$

$$\text{ID}_{\text{part.x}} = f_{\text{Na}} \times \text{FD}_x$$

$f_{\text{Na}}$       Na-Faktor



### Gasförmige Interzeption

- Gasförmige Interzeption ist Null für Na, K, Mg, Ca, Mn, Al, Fe (keine Gasphase)
- Gasförmige Stoffe ( $\text{NH}_3$ , HCl,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ) können aus der Luft ausgefiltert oder von der Baumkrone aufgenommen werden.

$$\text{ID}_{\text{gasf.x}} = \text{BD}_x - \text{FD}_x - \text{ID}_{\text{part.x}}$$

$x = \text{NH}_3, \text{SO}_4, \text{Cl}, \text{NO}_3$

## B. Komponenten der Deposition: Berechnungen

1990:	Wasser (mm)	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup> (x10 <sup>-2</sup> mmol l <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
-------	----------------	-----------------	---	------------------------------	-------------------------------

Freilanddeposition (FD)	628	5.41	3.34	5.89	7.96
Bestandesdeposition (BD)	488	11.47	9.22	9.63	19.06

1990:	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			(kmol ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	

Freilanddeposition (FD)	0.34	0.21	0.37	0.50
Bestandesdeposition (BD)	0.56	0.45	0.47	0.93



Na-Faktor: (0.56-0.34)/0.34 = 0.647



$$ID_{part.x} = f_{Na} \times FD_x \quad 0.22 \quad 0.14 \quad 0.24 \quad 0.32$$

$$ID_{gasf.x} = BD_x - FD_x - ID_{part.x} \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 0.11$$

$$Ges.Dep.(GD_x = FD + ID_{part.x} + ID_{gasf.x}) \quad 0.56 \quad 0.35 \quad 0.61 \quad 0.93$$

$$GD-BD \text{ (Krone: +Senke -Quelle)} \quad 0.00 \quad -0.10 \quad 0.14 \quad 0.00$$

$$Sickerwasseraustrag (As) \quad 0.47 \quad 1.66 \quad 0.00 \quad 1.09$$

$$GD-As \text{ (Ökosystem: +Senke -Quelle)} \quad 0.09 \quad -1.31 \quad 0.61 \quad -0.16$$

# Ökopедология III

---

## Nährstofftransport zur Wurzel

### Massenfluß

---

#### ☒ 1. Massenfluß:

- Nährstofftransport mit dem fließenden Wasser
- **Antriebskraft:** Transpiration der Pflanze

$$\text{Nährstoffanlieferung durch Massenfluß} = \\ \text{Konz. in Bodenlösung} \cdot \text{Wasseraufnahme}$$

#### ➤ Massenflußkoeffizient:

$$\frac{\text{tatsächliche Aufnahme eines Nährstoffs}}{\text{angelieferte Menge via Massenfluß}}$$

- ⇒ Massenflußkoeff. > 1: zusätzlicher Anlieferungsmechanismus  
⇒ Massenflußkoeff. < 1: Ausschluß eines Stoffes durch die Pflanze

## Massenfluß

- Bsp.: Massenflußkoeffizienten bestimmt für Buche:

Al: 0.076      Cl: 0.086      Na: 0.34      S: 0.77  
Fe: 1.5      Mg: 1.7      K: 8.3      N: 11      P: 120

⇒ Massenflußkoeffizient ist in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften sehr variabel.

- Bsp.: Berechnung des Massenflußkoeffizienten für P (Buche 120 Jahre):

Transpiration:      300 mm ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>

P-Konz in Bodenlösung:      0.015 mg L<sup>-1</sup>

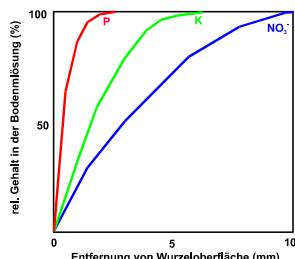
P-Aufnahme:      5 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>

$$\frac{5000 \text{ g ha}^{-1}}{3000000 \text{ L ha}^{-1} \cdot 0.015 \text{ mg L}^{-1}} = 111$$

## Diffusion

### ☒ 2. Diffusion:

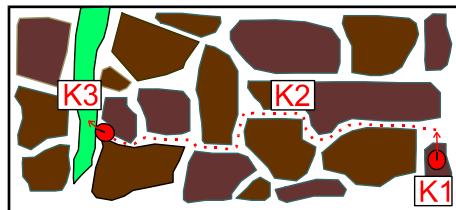
- Selektive Ionenaufnahme aus Rhizosphäre führt zu einem Nährstoffverarmungstrichter um die Wurzeln:



- Ausbildung der Verarmungsprofile ist abhängig von:  
• Zeitdauer der Verarmung  
• Sorptionskraft des Bodens,  
• Pufferfähigkeit des Bodens,  
• Diffusionseigenschaften des Nährstoffs.

- Nährstoffnachlieferung:

K1: Lösung bzw. Desorption  
K2: Transport via Diffusion und Massenfluß  
K3: Aufnahme durch Wurzel  
⇒ K2 ist oft limitierend



## Diffusion

- Diffusionsgesetz:

$$\frac{dQ}{dt} = D_B \cdot A \cdot \frac{dC}{dx}$$

$dQ/dt$  = Nährstofffluß pro Zeiteinheit

$D_B$  = Diffusionskoeffizient im Boden

$A$  = Diffusionsfläche

$dC/dx$  = Konzentrationsgradient pro Diffusionsstrecke

$$D_B = D_S \cdot \theta \cdot f \cdot \frac{dl}{dQ}$$

$D_S$  = Diffusionskoeffizient in reinem Wasser

$\theta$  = Wassergehalt des Bodens

$f$  = Tortuosität des Bodens  
(kürzester Weg/echter Weg)

$dl/dQ$  = Intensität/Kapazität (Oberflächenfallen)

## Diffusion

- Beispiel: Einfluß des Wassergehalts und der Tortuosität auf den Diffusionskoeffizienten

Faktor	pF 2.0	pF 4.2
Wassergehalt ( $\theta$ )	0.4	0.07
Tortuosität ( $f$ )	0.5	0.01
$\theta \cdot f$	0.2	0.0007

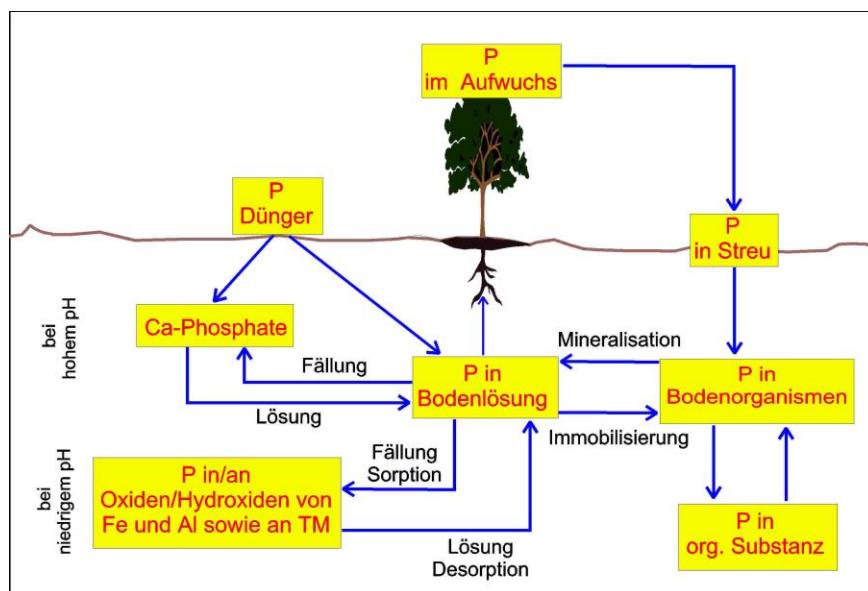
- Beispiel: Nährstoffaufnahme von Klee (mg/Gefäß) und Wassergehalt

Nährstoff	pF 1.8	pF 2.8	Verhältnis
K	345	246	1.40
Mg	38	27	1.41
Ca	286	197	1.45
P	61	28	2.18

# Ökopедologie III

## Phosphor in Böden

### P-Kreislauf im Boden



## P-Formen im Boden

### 1. Ca-Phosphate:

➤ Bildung bei hohen pH-Werten:

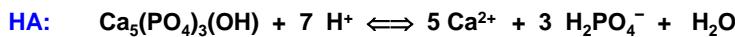
- Hydroxylapatit (HA):  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$
- Fluorapatit (FA):  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F})$
- Octocalciumphosphat (OCP):  $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6$
- Dicalciumphosphat (DCP):  $\text{CaHPO}_4$
- Monocalciumphosphat (MCP):  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$

↑  
steigendes  
Ca/P-Verhältniss

#### Löslichkeit

$$\text{FA} < \text{HA} < \text{OCP} < \text{DCP} < \text{MCP}$$

➤ Die P-Konz in der Bodenlösung im Gleichgewicht mit diesen Mineralen lässt sich über das Löslichkeitsprodukt berechnen

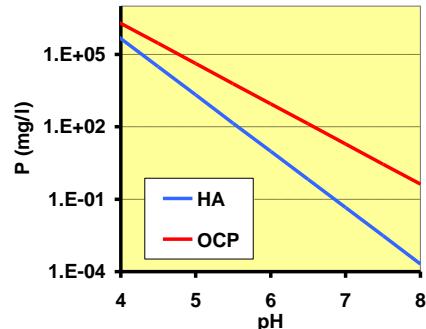
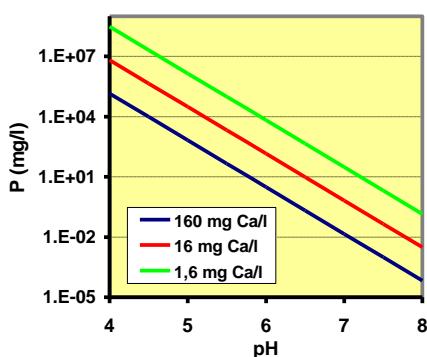


⇒ Die P-Konz. steigt mit sinkendem pH und sinkender Ca-Konz.

⇒ Auflösung von Ca-Phosphaten bei sinkendem pH-Wert

## P-Formen im Boden

➤ P-Konzentration in Abhängigkeit vom pH im Gleichgewicht mit Hydroxylapatit (HA) bzw. Octocalciumphosphat (OCP) ( $\text{Ca} = 0.4 \text{ mmol l}^{-1}$ )



➤ Löslichkeit des Hydroxylapatits in Abhängigkeit vom pH und der Ca-Konzentration

## P-Formen im Boden

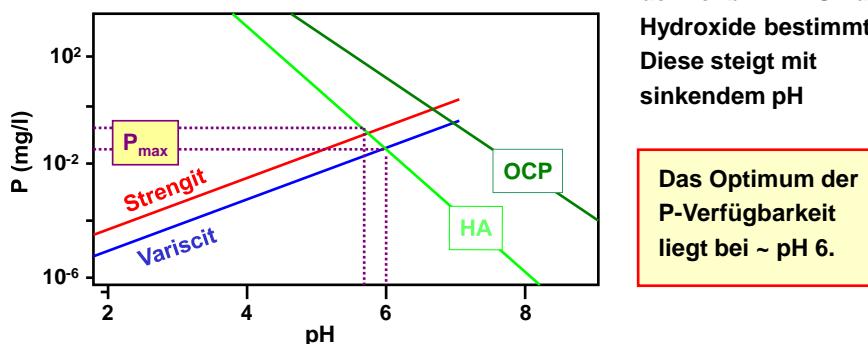
### 2. Al- und Fe-Phosphate:

➤ Bildung bei niedrigen pH-Werten:



➤ Die P-Konz. steigt mit sinkender  $\text{Fe}^{3+}$  bzw.  $\text{Al}^{3+}$ -Konz. in der Bodenlösung

➤ Die  $\text{Fe}^{3+}$  bzw.  $\text{Al}^{3+}$ -Konz. in der Bodenlösung wird durch die Löslichkeit der Fe- bzw. Al-Oxide/ Hydroxide bestimmt. Diese steigt mit sinkendem pH



Das Optimum der P-Verfügbarkeit liegt bei ~ pH 6.

## P-Formen im Boden

### 3. Organische P-Verbindungen:

➤ Phytin-P:

- stabile Ringstruktur, schwer mineralisierbar
- stammt aus phytinhaltigen Phospholipiden der Mikroorganismen
- reichert sich im Boden an → häufigste  $\text{P}_{\text{org}}$ -Form

➤ Nucleoproteide und Abbauprodukte:

- leicht mineralisierbar
- mikrobieller Ursprung
- ca. 5-10% des  $\text{P}_{\text{org}}$

➤ Phospholipide:

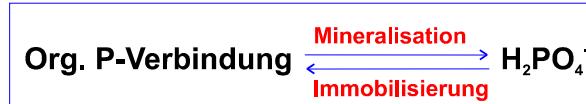
- ca. 1-2% des  $\text{P}_{\text{org}}$

➤ Gelöste organische P-Verbindungen:

- bis zu 70% des gesamten gelösten P, erst nach enzymatischem Abbau pflanzenverfügbar
- Abbau durch Phytasen (Vorkommen z.B. in Wurzelexudaten, Mykorrhiza)

## P-Formen im Boden

➤ Mineralisation organischer P-Verbindungen:



- Mineralisation ist abh. vom **C/P-Verhältnis** der organischen Substanz.
- Netto-P-Mineralisation erst bei C/P < 200,
- P-Immobilisierung bei C/P > 300

➤ Bereiche der C/P-Quotienten in Humusformen

➤  $\text{P}_{\text{org}}$  ist besonders in Böden mit starker P-Fixierung eine wichtige P-Quelle

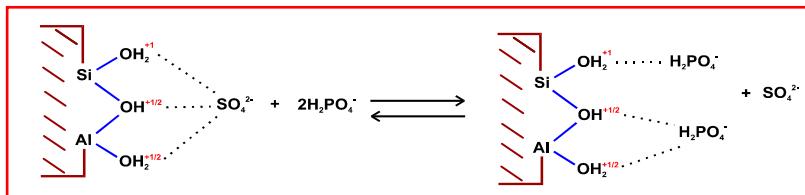
Humusform	C/P
L-Mull, F-Mull	10-100
Mullartiger Moder	80-180
Moder	180-560
Rohhumusartiger Moder	420-740
Rohumus	600-1100

## P-Formen im Boden

### 4. Adsorbiertes Phosphat:

- Sorption-Desorption sind relativ schnelle Reaktionen
- wichtige P-Quelle für Pflanzen bei saurem pH-Wert

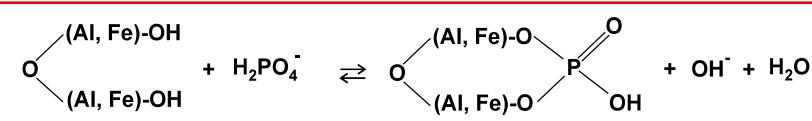
☒ Anionenaustausch:



- Ausgleich positiver Ladung an der Oberfläche der Austauscher
- Anionensorption steigt mit sinkendem pH-Wert (pH-variable Ladung!)
- Bindung durch elektrostatische Kräfte
- mögliche Austauscher: Oxide und Hydroxide von Fe und Al, Tonminerale mit zahlreichen (Al, Fe)-OH und -OH2-Gruppen an der Oberfläche
- besonders bedeutend in **Andisolen** (Allophane) und **Oxisolen** (Oxide)

## P-Formen im Boden

### ☒ Spezifische Adsorption:

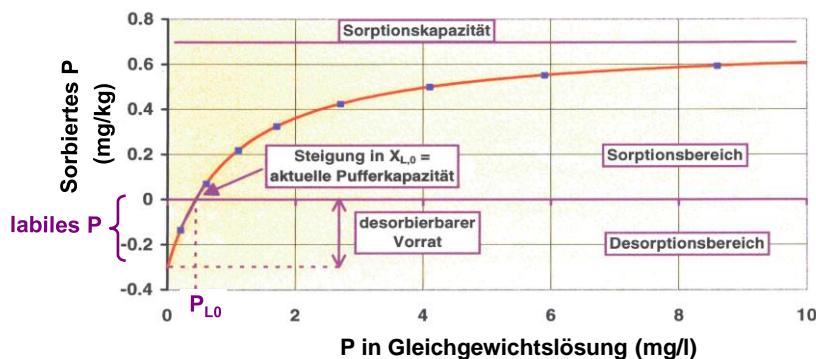


➤ Verdrängung der OH und OH<sub>2</sub>-Liganden aus der Koordinationshülle der Al- bzw Fe-Atome (**Ligamentausch**) ⇒ feste Bindung

- Ausbildung von Sauerstoffbrücken zu den Fe-, Al-Atomen.
- spezifisch Adsorption z.B. bei Phosphat, Molybdat, Silicat.
- kein Austausch durch unspezifisch adsorbierte Anionen wie Cl<sup>-</sup> oder NO<sub>3</sub><sup>-</sup> möglich
- **Okkludiertes P**: mechanischer Einschluß von adsorbiertem P in Fe-Oxid-Konkretionen

Relative P-Sorption	Adsorbens
hoch	Amorphe Al-Oxide Ferrihydrit Allophan
hoch - mittel	Goethit, Hämatit Al und Fe an Huminstoffen
mittel	Imogolit
niedrig	Gibbsit, Schichtsilikate
keine	Quarz, Feldspäte

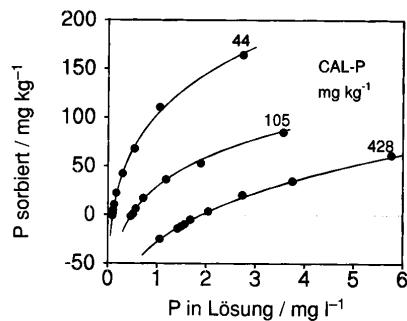
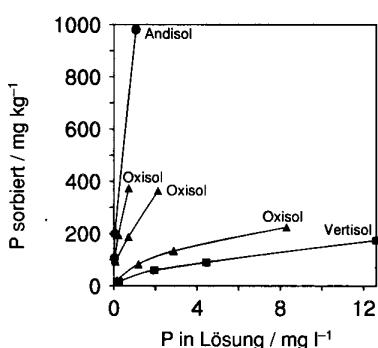
## P-Sorptionskurve



- P-Pufferung: Steigung der Kurve
- labiles P: Anteil der potentiell in Lösung gehen könnte
- P<sub>L0</sub>: P-Gleichgewichtskonzentration
- ⇒ P-Sorption wird beeinflußt durch: Anzahl der Sorptionsplätze, Bindungsfestigkeit der Sorption, Sättigung der Sorptionsplätze, pH, Gehalt an org. Substanz, Redoxbedingungen

## P-Sorptionskurve

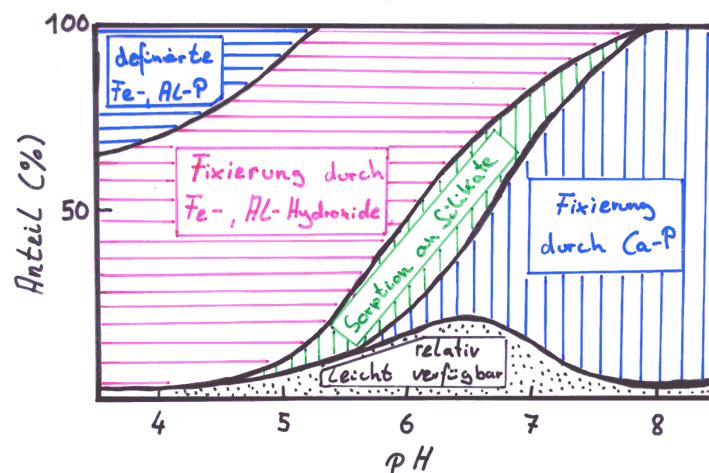
- P-Sorptionskurven von Lößböden mit unterschiedlicher P-Freigabe (P-Düngung)
- Die Sorptionskraft sinkt mit zunehmender Belegung der P-Sorptionsplätze



### P-Sorptionskurven verschiedener Böden

- Sorption durch pedogene Minerale:  
Andisol → Allophane  
Vertisol → Smectit  
Oxisol → Fe-, Al-Oxide/Hydroxide

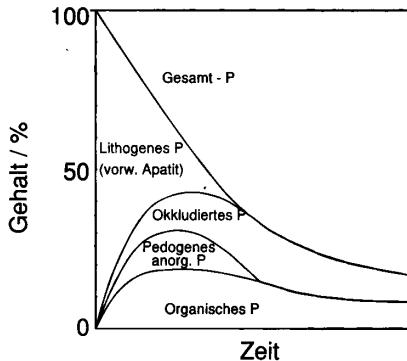
## P-Formen im Boden und pH-Wert



- pH > 6.5: P-Festlegung durch Bildung von Ca-Phosphaten
- pH < 5.5: P-Festlegung durch Sorption an Fe- und Al-Oxide/Hydroxide
- pH < 4.5: P-Festlegung durch Bildung von Al- und Fe-Phosphaten

## P-Formen im Boden und pH-Wert

### ➤ Veränderung des Gesamt-P und der P-Formen im Verlauf der Pedogenese

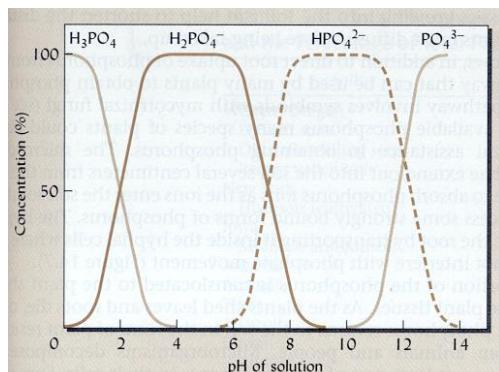


- An Ca gebundenes Phosphat nimmt ab und geht in Al und Fe gebundenes Phosphat über. Letztlich wird P in Fe-Oxidkonkretionen okkludiert.
- Anreicherung von organischem P solange P aus primären Phosphaten nachgeliefert wird

## P-Formen im Boden

### 5. Gelöstes Phosphat:

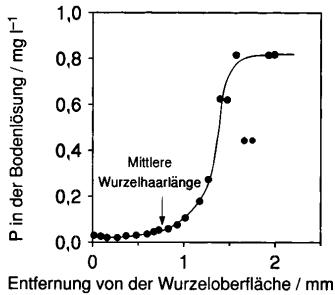
- Die P-Konzentration in der Bodenlösung ist durch Sorptions- und Fällungsreaktionen meist sehr gering ( $0.01\text{-}0.1 \text{ mg P L}^{-1}$ )
- Die dominierende P-Form in Lösung ist abh. vom pH-Wert
- Die P-Auswaschung ist aufgrund der geringen P-Konz. auf den meisten Standorten sehr gering
- P-Austrag durch:
  - Biomasseentzug,
  - Erosion,
  - Oberflächenabfluß



- Limitierender Nährstoff in vielen tropischen Böden sowie in vielen aquatischen Systemen (Gewässereutrophierung)

## P-Mobilisierung in der Rhizosphäre

### ➤ P-Verarmungstrichter in der Rhizosphäre



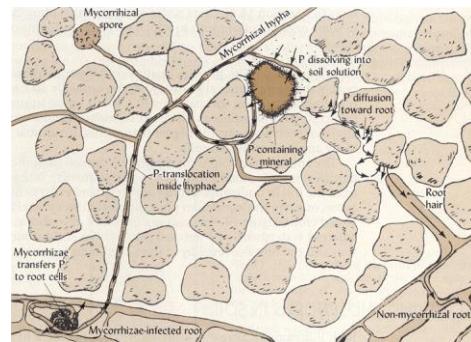
⇒ Selektive P-Aufnahme aus der Bodenlösung (Nachlieferung durch Diffusion)

⇒ P-Mobilisierung durch pH-Absenkung und Wurzelexudate

⇒ geringe Ausdehnung der Verarmungszone

⇒ Oberflächenvergrößerung des Wurzelsystems durch Mykorrhiza

⇒ P-Mobilisierung durch Phytesen



## P-Gehalte verschiedener Substrate

### ☒ P im Ausgangssubstrat:

prim. Gestein	P (mg/kg) (Mittelwert)	sek. Gestein	P (mg/kg) (Mittelwert)
Basalt	2000	Ton	750
Gabbro	1200	Löß	650
Granit	830	Sandstein	200

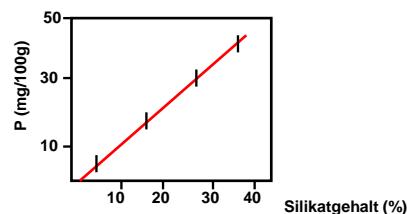
### ➤ P in Korngrößenklassen (Bsp: Sandlössboden):

- grober Sand: 8 mg P/kg
- feiner Sand: 194 mg P/kg
- Schluff: 640 mg P/kg
- Ton: 2310 mg P/kg

### ➤ P in Waldböden:

$$P_t \text{ (mg/100g)} = 1,2 \cdot \text{Silikatgehalt (\%)} - 1,9$$

⇒ Schätzung des Silikatgehalts anhand der Bodenart



## Bsp.: P-Gehalte in Blättern auf verschiedenem Substrat

☒ Gefäßversuch zur P-Freigabe in verschiedenen Substraten:

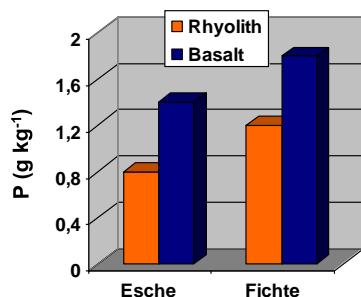
➤ Zwei verschiedene Ausgangssubstrate:

- Rhyolith:

Bodenart Podsol, pH 4,0  
Basensättigung 16%  
Humusgehalt 2,6%  
P-Gehalt 0,3 g kg<sup>-1</sup>

- Basalt:

Bodenart Braunerde, pH 4,8  
Basensättigung 85%  
Humusgehalt 2,9%  
P-Gehalt 1,4 g kg<sup>-1</sup>



⇒ P-Gehalte in Eschenblättern und Fichtennadeln auf Rhyolith und Basalt

⇒ Wichtige Faktoren:

- P-Gehalt der Gesteine (Basalt > Rhy.)
- pH-Wert
- Streu- und Humus-Umsatz  
(Bodenart ist hier rel. ähnlich)

## P-Gehalte im Böden

☒ P Verteilung in Böden

Parabraunerde		Podsol	
Horizont	P (mg/kg)	Horizont	P (mg/kg)
Ah	520	Ah	176
Al	320	Ae	40
Bt	480	Bhs	917
C	500		

- P-Umverteilung im Profil:  
Anreicherung im Ah-Horizont, Verarmung in den Eluvialhorizonten (Al und Ae Horizont).

Pufferbereich		P <sub>Al</sub>	P <sub>Fe</sub>	P <sub>Ca</sub>	P <sub>occl</sub>	P <sub>org</sub>
		%				
Carbonatpuffer		1	4	60	30	5
Silikatpufferbereich		30	17	0	43	10
Al-Pufferbereich		7	20	0	47	26

- P-Formen in humusarmen Horizonten

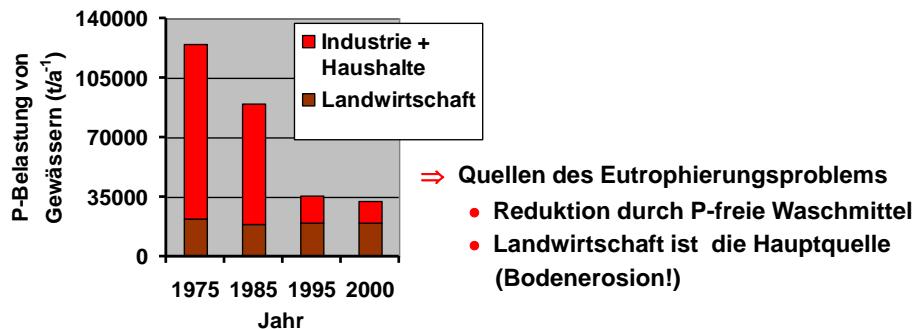
## P: Eutrophierungsproblem

### ☒ Unterschiedliche Grenzwerte für Ackerböden und Gewässer:

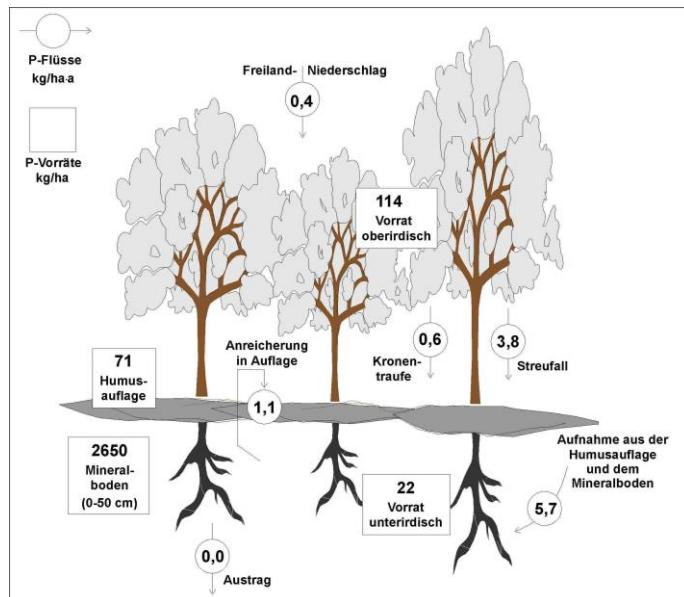
⇒ Acker: Ausreichende P-Versorgung ab  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  (CAL-P)

⇒ Gewässer:

- $0,02 \text{ mg L}^{-1}$  (Gesamt-P): Überschuss
- $0,04 \text{ mg L}^{-1}$  (Gesamt-P): UBA-Grenzwert
- $0,10 \text{ mg L}^{-1}$  (Gesamt-P): Eutrophierung



## P-Vorräte und Flüsse (Solling, Buche 120 Jahre)



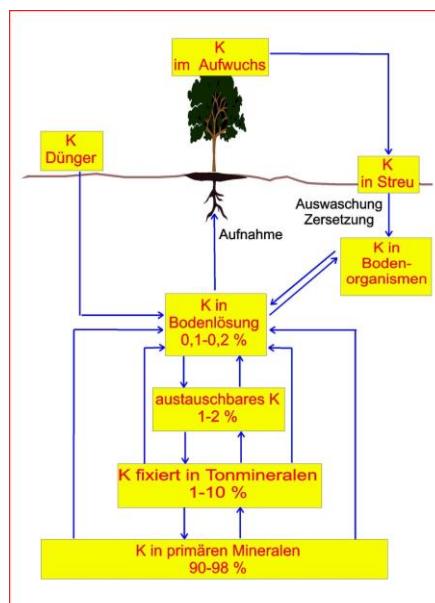
# Ökopedologie III

---

## Kalium in Böden

### K-Kreislauf im Boden

---



## K-Formen im Boden - Primäre Silikate

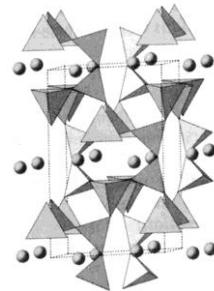
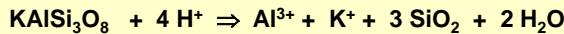
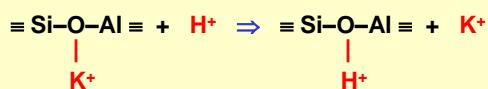
### 1. Primäre Silikate:

#### ☒ Kalifeldspat (Orthoklas):

➤  $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ , Gerüstsilikat aus  $(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_4$ -Tetraedern, isomorper Ersatz (jedes 4.  $\text{Si}^{4+}$ -Zentralkation ist durch  $\text{Al}^{3+}$  ersetzt)

➤ 14 % K, das fest im Mineralgitter gebunden ist

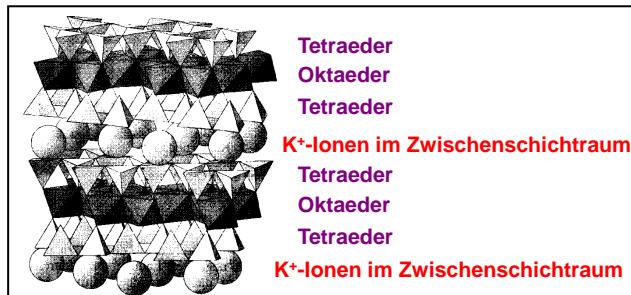
➤ K-Freisetzung durch Aufnahme von Protonen unter Freisetzung von Strukturkationen



## K-Formen im Boden - Primäre Silikate

#### ☒ Muskovit:

➤  $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ , Schichtsilikat aus  $(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_4$ -Tetraedern und  $\text{Al}(\text{O}, \text{OH})_6$ -Oktaedern, isomorpher Ersatz in Tetraedern durch  $\text{Al}^{3+}$ , Oktaederzentren zu 2/3 mit  $\text{Al}^{3+}$ , belegt (dioktaedrische Struktur)



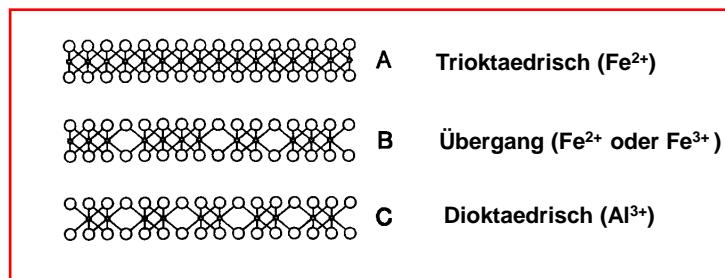
➤ 10 % K, das im Zwischenschichtraum gebunden ist

➤ K-Freisetzung durch Auflösung im sauren Milieu

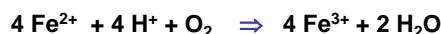
## K-Formen im Boden - Primäre Silikate

### ☒ Biotit:

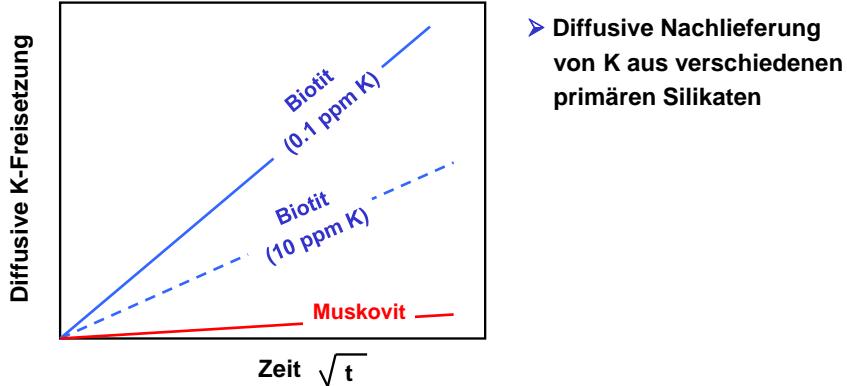
➢  $KFe_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ , Aufbau wie Muskowit jedoch trioktaedrisch.



- 8 % K, das im Zwischenschichtraum gebunden ist
- K-Freisetzung durch Auflösung im sauren Milieu und durch Diffusion
- Durch K-Freisetzung wird  $Fe^{2+}$  in Oktaedern anfällig gegenüber Oxidationsprozessen ➔ Umwandlung von Biotit in Vermiculit



## K-Formen im Boden - Primäre Silikate

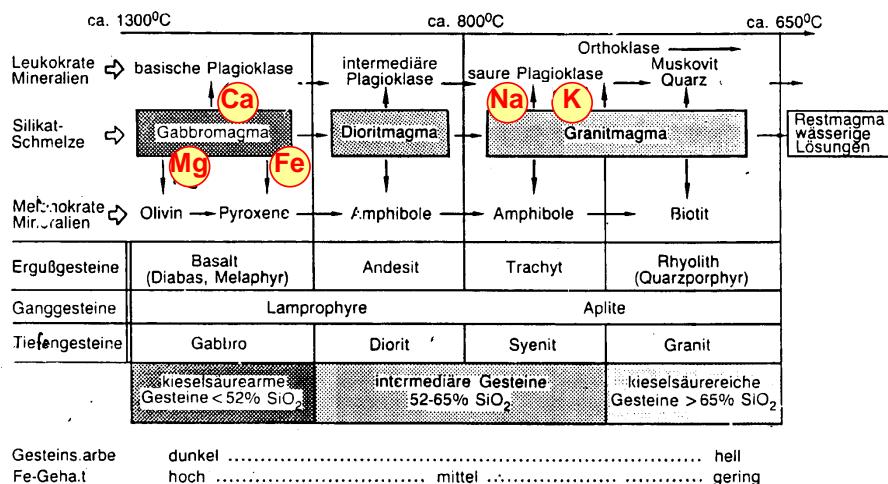


Verwitterungsstabilität primärer K-haltiger Minerale

K-Feldspat > Muskovit > Biotit

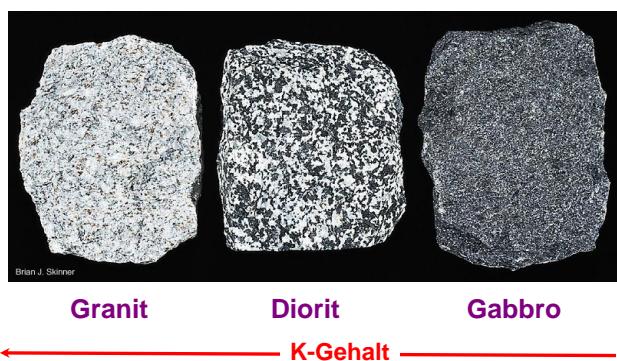
## K-Gehalte in Magmatiten

### Gravitative Kristallisations-Differentiation heißer silikatischer Schmelzen



## K-Gehalte in Magmatiten

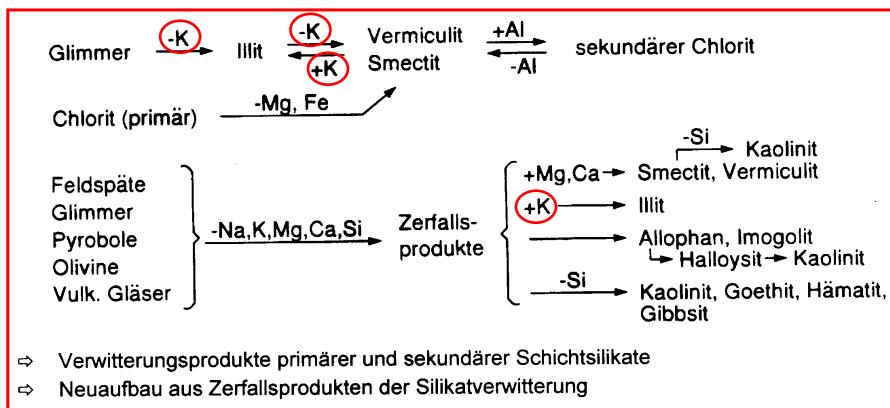
Gestein	K <sub>2</sub> O (%)	Gestein	K <sub>2</sub> O (%)
Granit	5.1	Gabbro	0.6
Rhyolit	5.4	Peridotit	0.3
		Basalt	0.8



## K-Formen im Boden - Sekundäre Silikate

### 2. Sekundäre Silikate (Tonminerale):

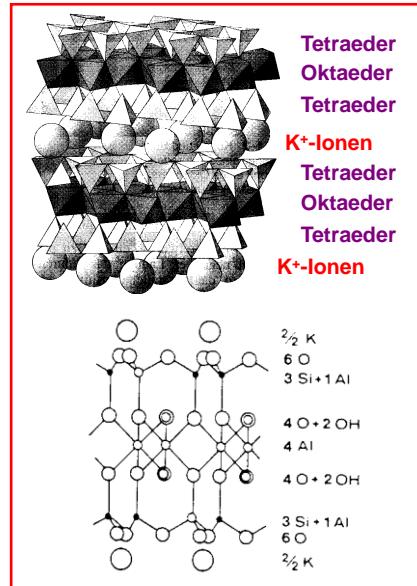
- Bildung aus primären Schichtsilikaten (Glimmer, primärer Chlorit)
- Bildung aus Tonmineralen (Verwitterung, Illitisierung)
- Neuaufbau aus Zerfallsprodukten der Silikatverwitterung



## K-Formen im Boden - Sekundäre Silikate

### ☒ Illit:

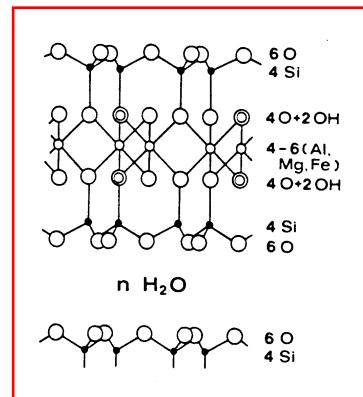
- eng verwandt mit den Glimmern (Muskovit, Biotit), gleiche Silikatstruktur, etwas geringerer K-Gehalt (Dreischichtmineral)
- Entstehung aus a) Glimmern durch randliches Aufweiten der Zwischenschichten und beginnende K-Freisetzung oder b) durch Illitisierung aus Vermiculiten
- 4 - 7% K (Gew.% als K<sub>2</sub>O), nackte K-Ionen in der Zwischenschicht (nicht austauschbar)



## K-Formen im Boden - Sekundäre Silikate

### ☒ Vermiculit:

- Entstehung aus Glimmern oder Illit durch Aufweiten der Zwischenschichten
- bei K-Zufuhr Illitisierung, Kontraktion der Silikatschichten
- 0 - 2% K (Gew.% als K<sub>2</sub>O), K-Ionen und andere meist hydratisierte Zwischenschichtkationen, die austauschbar gebunden sind.

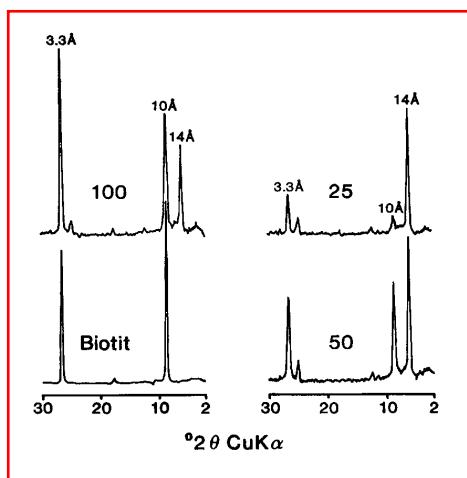


### ☒ Smectit:

- Entstehung aus Glimmern, Illit oder Vermiculit
- geringere neg. Schichtladung und stärkere Wassereinlagerung als beim Vermiculit
- 0 - 0.5% K (Gew.% als K<sub>2</sub>O)

## Mineralumwandlung durch K-Entzug

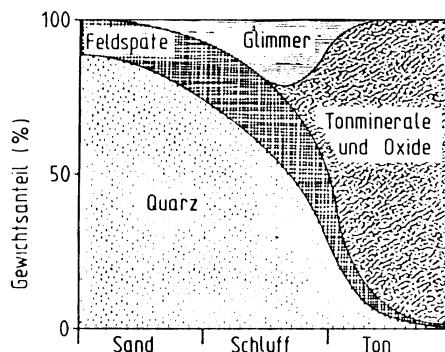
- Röntgendiagramme von Biotiten und die Bildung aufweitbarer Tonminerale (14 Å) durch K-Entzug (Bepflanzung mit Weizen)



## K in Mineralen und Sedimenten

- K-Gehalte in Sedimenten
- K-Vorrat steigt mit dem Tonanteil
- Geringe K-Vorräte in Sandböden  
Gute K- Versorgung in Tonböden

Gestein	K <sub>2</sub> O (%)
Geschiebemergel	2.1
Tonschiefer	3.6
Flugsand	1.1
Löß	2.6



- Texturanalyse gehört zu den wichtigsten Indikatoren der K-Versorgung

## K-Formen im Boden - Austauschbares K

### 3. Austauschbar gebundenes Kalium:

- mit 1 M Ammoniumacetat-Lösung (pH = 7) extrahierbares Kalium, der übrige K-Anteil ist nicht-austauschbares Kalium
- wichtigste K-Quelle für Pflanzen

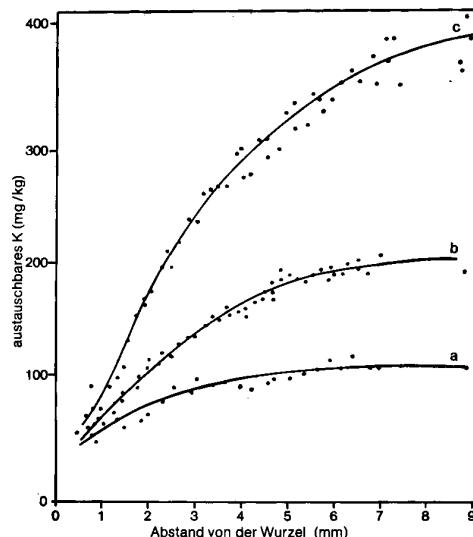
K in Lösung ⇔ austauschbares K ⇔ nicht austauschbares K

### ⇒ K-Fixierung:

- Festlegung von wasserlöslichem und austauschbarem K in einer nicht austauschbaren Form
- Intensität ist abh. von der K-Selektivität und der K-Sättigung der Minerale

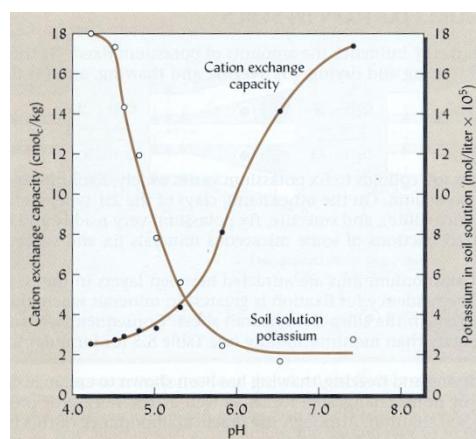
## K-Formen im Boden - Austauschbares K

- Austauschbares K ist ein wichtiger Pool für die K-Versorgung von Pflanzen
- Verarmungstrichter an austauschbarem K um die Wurzeln durch selektive K-Aufnahme
- Verarmungstrichter in Böden mit unterschiedlichem Vorrat an austauschbarem K



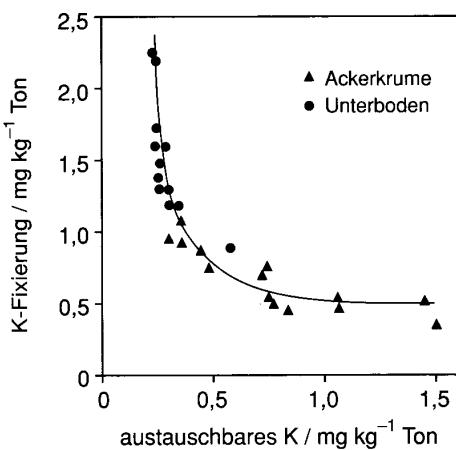
## K in der Bodenlösung

- Die K-Konzentration in der Bodenlösung sinkt mit steigender KAK
  - dafür steigt mit der KAK meist auch die Menge an austauschbarem K



⇒ Tonböden mit 3-Schicht Tonmineralen bieten trotz einer geringen K-Konzentration im Bodenwasser eine sehr gute K-Versorgung

## Austauschbares K und K-Fixierung



⇒ Böden mit aufweitbaren 3-Schicht-Tonmineralen und geringem Vorrat an austauschbarem K pro g Ton neigen zur K-Fixierung ⇒ Illitisierung

## K-Ca-Austauschkurve

☒ Die **K-Ca-Austauschkurve** beschreibt das K-Gleichgewicht zwischen Boden und Bodenlösung:

➤ **Methode:** Versetzen einer Bodenprobe mit verschiedenen K/Ca-Lösungen bekannter Konzentration (Ca = konst.), 1 Std. schütteln, Bestimmung der K- und Ca-Konz. in der Lösung.

$$\Delta K (\text{mmol}_c / 100 \text{ g}) = \text{Ausgangskonz. Analysenlösung} - \text{Endkonz. nach dem Schütteln}$$

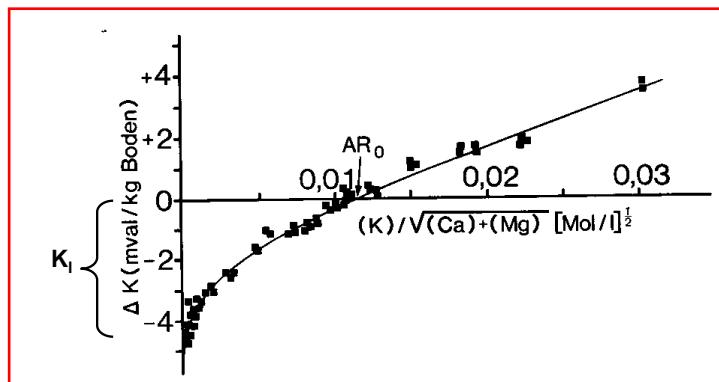
$$AR = (aK / \sqrt{aCa})$$

➤ Auswertung: Es wird AR gegen  $\Delta K$  aufgetragen

➤ **Information über:**

- K-Konz. in Lösung im natürlichen Gleichgewicht
- Veränderung der K-Konz. in Lösung durch K-Zufuhr
- Veränderung der K-Konz. in Lösung bei K-Entzug

## K-Ca-Austauschkurve

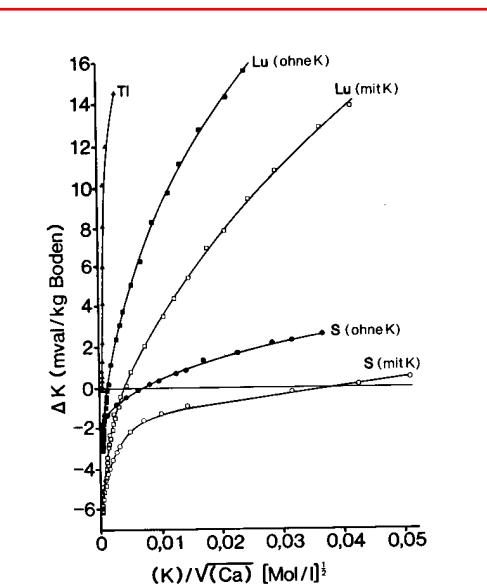


**AR<sub>0</sub>:** (Activity Ratio), ist das Aktivitätenverhältnis in der Bodenlösung, das sich im Gleichgewicht mit dem labilen K befindet.

**BCKe:** (Buffer capacity K effective), Steigung der Austauschkurve, gibt an wieviel sich der AR-Wert ändert, wenn sich der Vorrat  $\Delta K$  ändert

**K<sub>l</sub>:** (labiles Kalium), Vorrat an leicht verfügbarem K

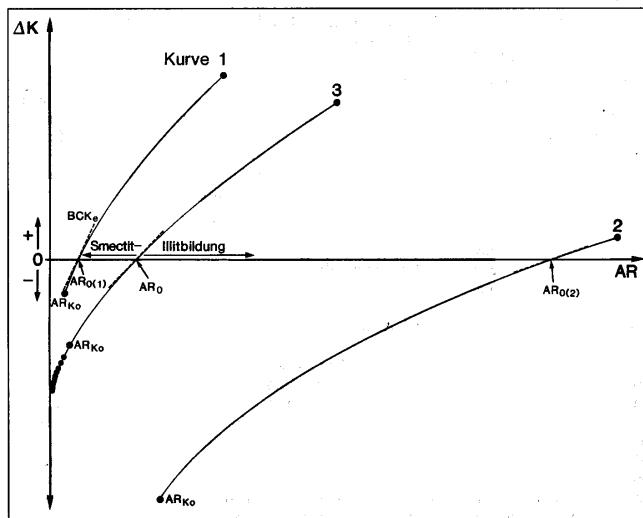
## K-Ca-Austauschkurven



➤ K-Ca Austauschkurven von Böden mit unterschiedlichem Tongehalt (Tl bis S) mit und ohne K-Düngung

- Mit dem Tonanteil steigt die BCKe (K-Bindung an Tonminerale)
- K-Düngung führt im Sandboden zu einem starken Anstieg des  $AR_0$ -Werts. Beim Lehm ist die Veränderung des  $AR_0$ -Werts gering.
- Durch Düngung sinkt die BCKe (zunehmende Belegung der K-Bindungsplätze)

## K-Ca-Austauschkurven



➤ Tonmineralumwandlung und K-Ca-Austauschkurven

⇒ Illit-Bildung:

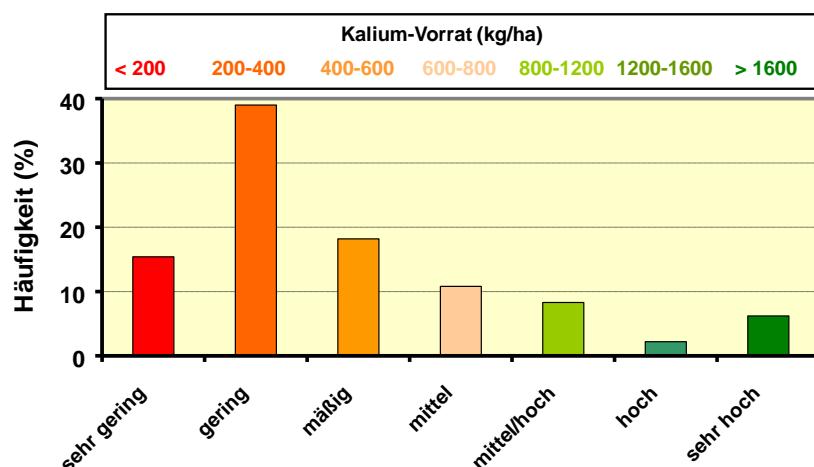
- $AR_0$  steigt
- $BCKe$  sinkt

⇒ Smectit-Bildung:

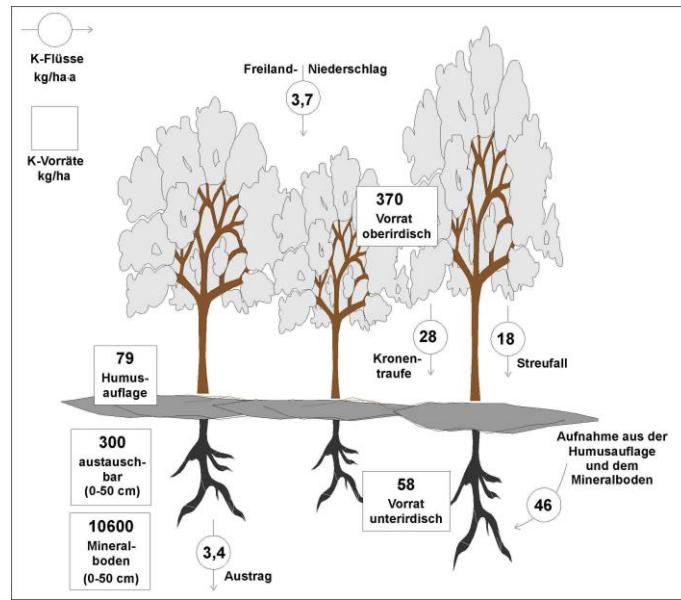
- $AR_0$  sinkt
- $BCKe$  steigt

## K-Vorräte (Waldböden)

➤ Austauschbares Kalium im Mineralboden (0-60 cm) sowie K-Vorrat in der Humusaufklage. (BZE-Auswertung, n=1192)



## K-Vorräte und Flüsse (Solling, Buche 120 Jahre)



# Ökopедология III

---

## Magnesium und Calcium in Böden

### **Mg als Pflanzennährstoff**

---

#### **☒ Funktionselement in der Pflanze:**

- zentraler Bestandteil des Chlorophylls
- beteiligt an Phosphorilierungsprozessen
- Aktivierung von Acetyl-CoA (Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel)
- Aktivator in der Aminosäuresynthese

#### **☒ Bewertung der Mg-Ernährungssituation**

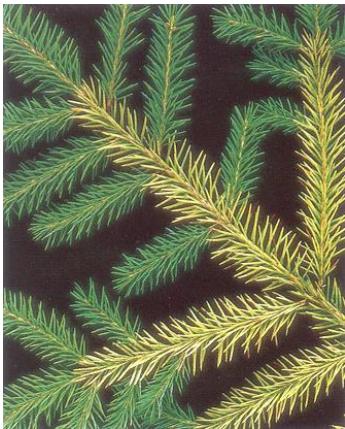
- Mangelsymptome: Intercostalchlorosen an älteren Blättern, Vergilbung und Vertrocknen der Nadelspitzen (Goldspitzigkeit)
- Blatt- bzw. Nadelanalyse (Mg in mg/g TS)

Bewer-tung	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Buche <sup>(1)</sup>	< 0.7	0.70-0.8	0.8-1.00	1.00-1.4	>1.4
Fichte <sup>(2)</sup>	< 0.75	0.75-1.0	1.0-1.25	1.25-1.5	>1.5
Kiefer <sup>(2)</sup>	< 0.75	0.75-1.0	1.0-1.25	1.25-1.5	>1.5

<sup>(1)</sup>Blätter von Neutrieben der Lichtkrone

<sup>(2)</sup>1 NJ 7. Quirl bei Fichte, 1 NJ Oberkrone bei Kiefer

## Mg- Mangelsymptome



➤ Vergilbung der älteren Nadeljahrgänge bei Fichte



➤ Vergilbung der älteren Nadeljahrgänge bei Tanne

## Mg-Formen im Boden - Primäre Silikate

### 1. Primäre Silikate:

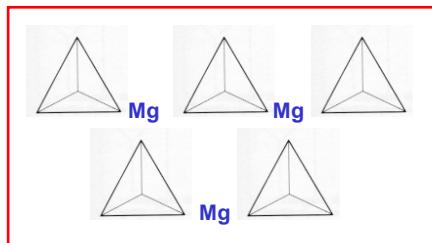
#### ☒ Pyroxene, Amphibole:

➤ Augit  $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti})_2(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$ , Ketten silikat, isomorper Ersatz wird durch Einbau von Ca-, Mg-, Fe-, Al-, Ti-Ionen zwischen die Ketten ausgeglichen, die Kationen bewirken den Zusammenhalt der Ketten, 10-18%<sub>(Gew.)</sub> MgO.

➤ Hornblende, Bandsilikat, 3-25%<sub>(Gew.)</sub> MgO.

#### ☒ Olivin:

➤  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ , Inselsilikat,  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder sind nicht über gemeinsame O-Ionen sondern über Mg-Ionen miteinander verbunden, 38-47%<sub>(Gew.)</sub> MgO.

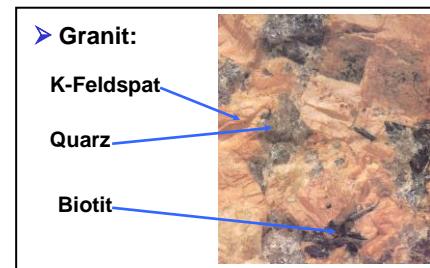


## Mg-Formen im Boden - Primäre Silikate

### ☒ Biotit:



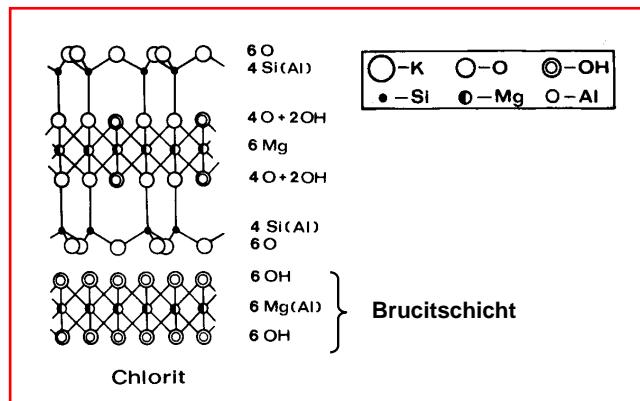
- $K(Mg, Fe, Mn)_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ , Schichtsilikat, trioktaedrischer Aufbau, 0,3-28%<sub>(Gew.)</sub> MgO.
- Mg-Freisetzung durch Auflösung im sauren Milieu



## Mg-Formen im Boden - Primäre Silikate

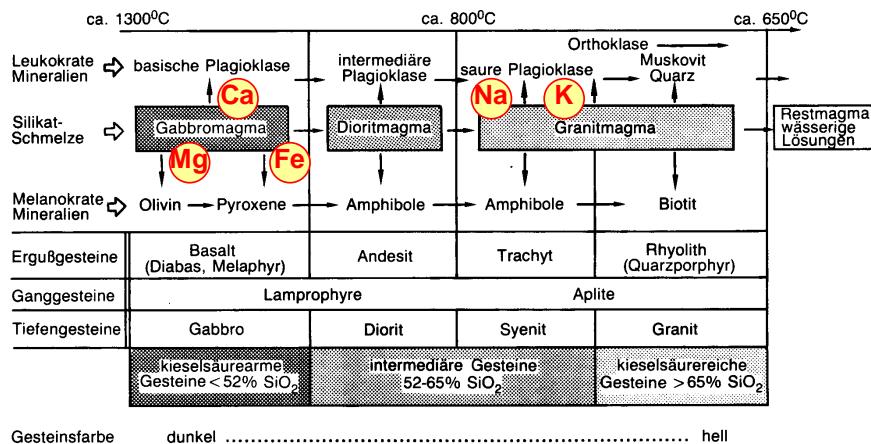
### ☒ Primärer Chlorit

- Dreischichtsilikat mit einer  $Mg(OH)_2$ -Schicht (Brucitschicht) zwischen den Silikatschichten
- 12-34%<sub>(Gew.)</sub> MgO.

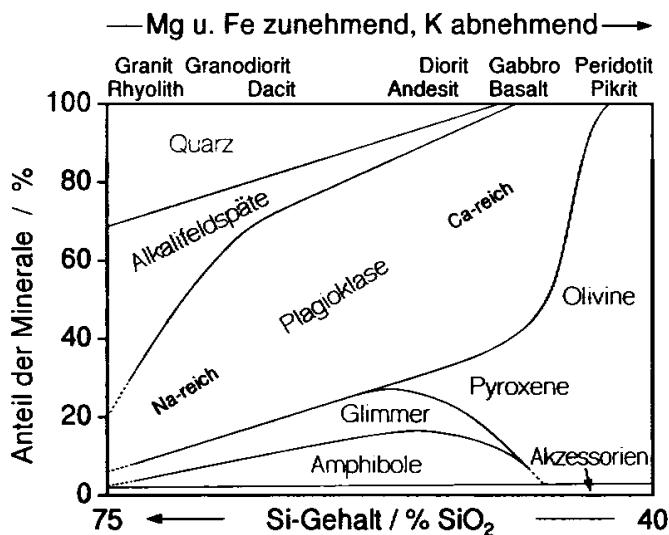


## Mg-Gehalte in Magmatiten

### Gravitative Kristallisations-Differentiation heißer silikatischer Schmelzen

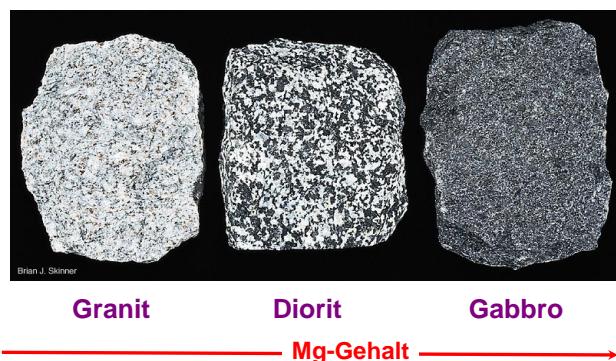


## Mg-Gehalte in Magmatiten



## Mg-Gehalte in Magmatiten

Gestein	MgO (%)	Gestein	MgO (%)
Granit	0.26	Gabbro	8.1
Rhyolith	0.32	Peridotit	34
		Basalt	6.3

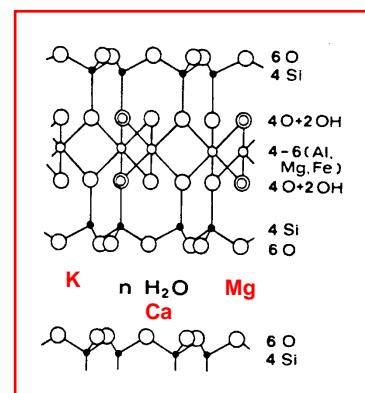


## Mg-Formen im Boden - Sekundäre Silikate

### 2. Sekundäre Silikate (Tonminerale):

#### ☒ Vermiculit:

- Entstehung aus Biotit oder Illit durch Aufweiten der Zwischenschichten
- Aufweitbares Dreischichtsilikat
- Kationen im Zwischenschichtbereich sind austauschbar gebunden
- Bis zu 28%<sub>(Gew.)</sub> MgO.



#### ☒ Smectit:

- Aufbau wie Vermiculit
- Bis zu 2.5%<sub>(Gew.)</sub> MgO.

## Mg-Formen im Boden - Carbonate und Sedimente

### ☒ Magnesit:

- $\text{MgCO}_3$

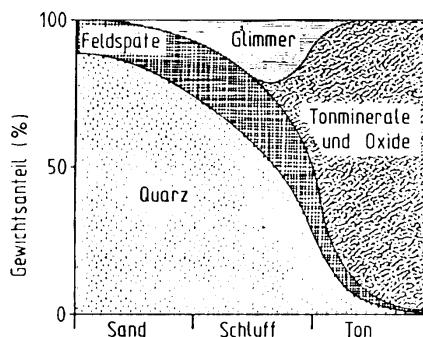
### ☒ Dolomit

- $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

### ☒ Calcit:

- $\text{CaCO}_3$  oft 1-3 %  $\text{MgCO}_3$ -Anteil

Gestein	MgO (%)
Geschiebemergel	1.0
Tonschiefer	2.6
Flugsand	0.1
Löß	0.9



- Mg-haltige Minerale gibt es überwiegend in der Ton- und Schlufffraktion

## Mg-Formen im Boden - Austauschbares Mg

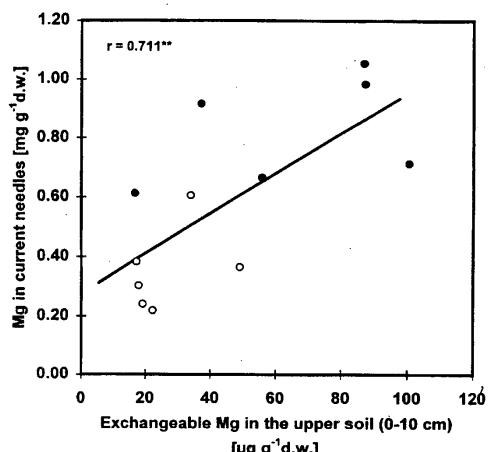
### 3. Austauschbar gebundenes Magnesium:

- kurz bis mittelfristig pflanzenverfügbarer Mg-Vorrat

- Austauschbares Mg im Oberboden (0-10 cm) und Mg-Gehalt von Fichten-needeln:
  - Mangelsymptome
  - ohne Mangelsymptome

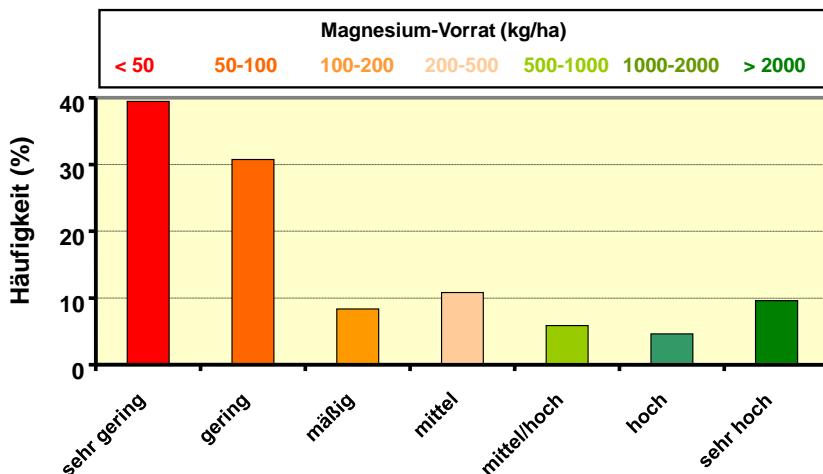
- Austauschbares Mg als Indikator der Mg-Verfügbarkeit im Boden:
 

< 50 kg/ha:	sehr gering
50-100 kg/ha:	gering
100-200 kg/ha:	mäßig
> 2000 kg/ha:	sehr hoch

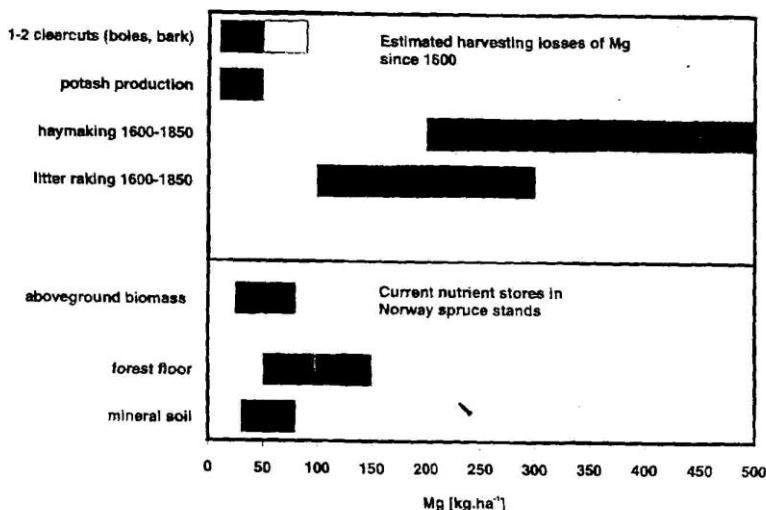


## Mg-Formen im Boden - Austauschbares Mg

- Austauschbares Magnesium im Mineralboden (0-60 cm) sowie Mg-Vorrat in der Humusaufklage. (BZE-Auswertung, n=1221)

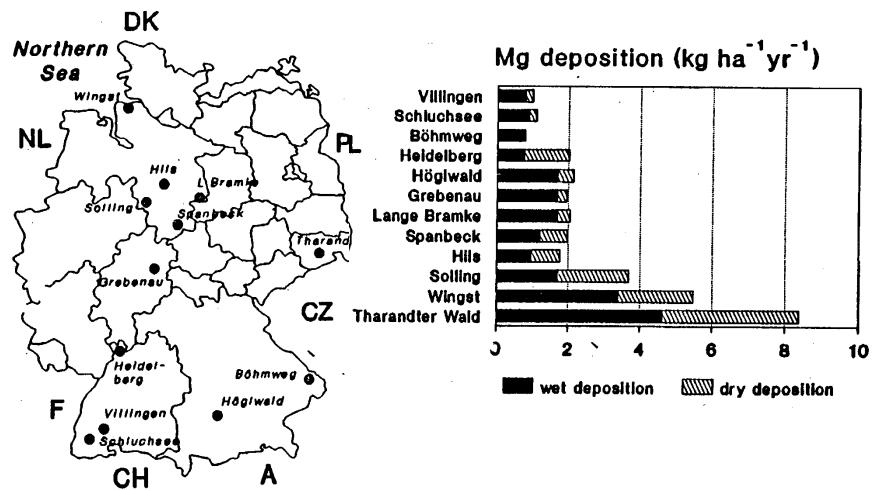


## Historische Waldnutzung und Mg-Versorgung



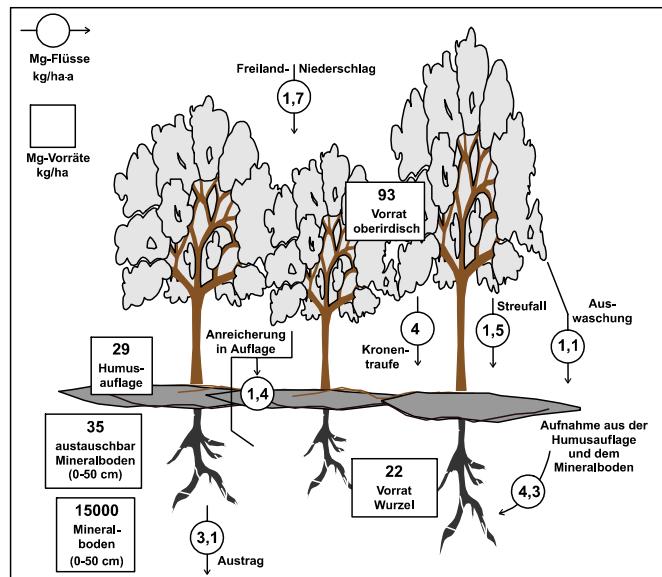
- Mg-Export und Mg-Vorräte einer Versuchsfläche im Böhmerwald

## Mg-Eintrag über Deposition



- Trockene Deposition durch Flugasche oder Zementstäube
- Nasse Deposition durch Meerwasserspray (N → S-Gradient)

## Mg-Vorräte und Flüsse (Solling, Buche 120 Jahre)



## Ca als Pflanzennährstoff

### ☒ Bau- und Funktionselement in der Pflanze:

- Beeinflussung osmoregulatorischer Prozesse
- beteiligt am Aufbau von Zellmembranen
- unspezifischer Aktivator zahlreicher Enzyme, große Bedeutung für das Wachstum meristematischer Gewebe

### ☒ Bewertung der Ca-Ernährungssituation

- Mangelsymptome: Chlorosen und Nekrosen an jungem, meristematischem Gewebe
- Blatt- bzw. Nadelanalyse (Ca in mg/g TS)

Bewer-tung	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Buche <sup>(1)</sup>	< 4	4-5.0	5.0-7.0	7.0-8.5	> 8.5
Fichte <sup>(2)</sup>	< 1	1-2.0	2.0-3.0	3.0-5.0	> 5.0
Kiefer <sup>(2)</sup>	< 2	2-2.6	2.6-3.3	3.3-4.0	> 4.0

<sup>(1)</sup>Blätter von Neutrieben der Lichtkrone

<sup>(2)</sup>1 NJ 7. Quirl bei Fichte, 1 NJ Oberkrone bei Kiefer

## Ca-Formen im Boden - Primäre Silikate

### 1. Primäre Silikate:

#### ☒ Ca-Feldspäte (Anorthit):

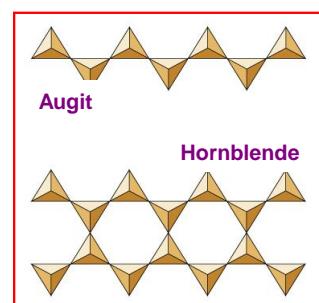
- $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ , Gerüstsilikat aus  $(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_4$ -Tetraedern, isomorpher Ersatz wird durch den Einbau von  $\text{Ca}^{2+}$  in das Mineralgitter ausgeglichen

- Plagioklase: Mischung zwischen Ca- und Na-Feldspäten  
 $0-19,5\%_{(\text{Gew.})} \text{CaO}$

#### ☒ Pyroxene, Amphibole

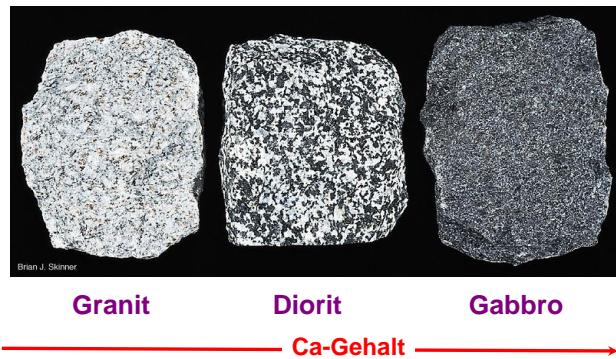
- Augit ( $\text{Ca, Mg, Fe, Al, Ti}_2(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$ , Ketten silikat, isomorper Ersatz wird durch Einbau von Ca-, Mg-, Fe-, Al-, Ti-Ionen zwischen die Ketten ausgeglichen,  $13-22\%_{(\text{Gew.})} \text{CaO}$ )

- Hornblende, Bandsilikat,  
 $10-14\%_{(\text{Gew.})} \text{CaO}$



## Ca-Gehalte in Magmatiten

Gestein	CaO (%)	Gestein	CaO (%)
Granit	0.72	Gabbro	11.1
Rhyolith	1.10	Peridotit	3.5
		Basalt	10.4



## Ca-Formen im Boden - Sekundäre Silikate

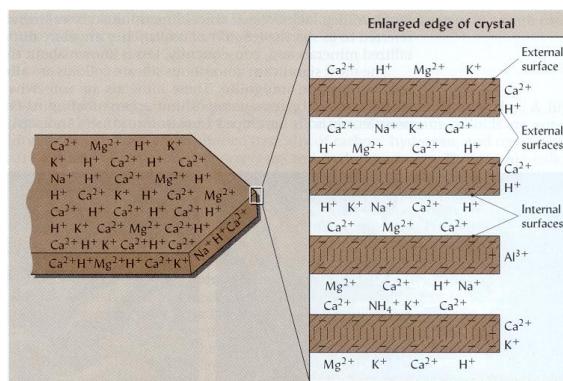
### 2. Sekundäre Silikate (Tonminerale):

#### ☒ Vermiculit:

- Aufweitbares Dreischichtsilikat bis zu 2%<sub>(Gew.)</sub> CaO
- Ca austauschbar gebunden

#### ☒ Smectit:

- Aufweitbares Dreischichtsilikat bis zu 3%<sub>(Gew.)</sub> CaO
- Ca austauschbar gebunden



## Ca-Formen im Boden - Carbonate und Sedimente

### ☒ Calcit:

➤  $\text{CaCO}_3$

### ☒ Dolomit

➤  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Sediment	CaO (%)
Geschiebemergel	9.7
Tonschiefer	2.2
Flugsand	0.1

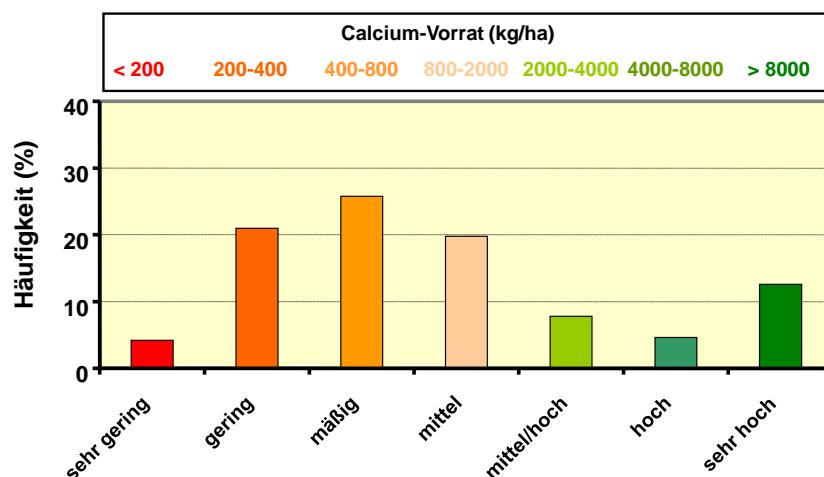


Rendzina aus Kalkstein

Kalk (%)	Ton (%)	Gesteinsbezeichnung
95-100	0-5	Kalk, Kalkstein
85-95	5-15	Mergeliger Kalk
75-85	15-25	Mergelkalk
65-75	25-35	Kalkmergel
65-35	35-65	Mergel
25-35	65-75	Tonmergel
15-25	75-85	Mergelton
5-15	85-95	Mergeliger Ton
0-5	95-100	Ton, Tonstein

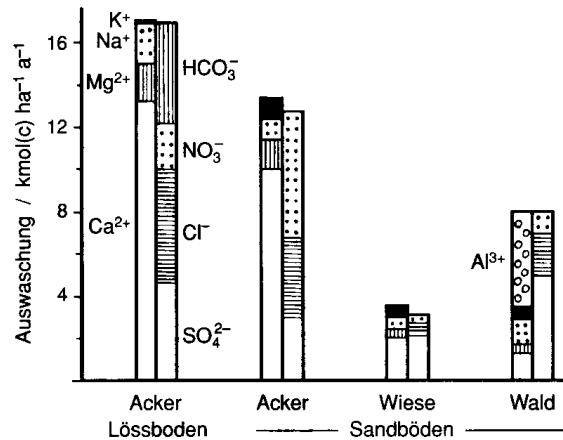
## Ca-Formen im Boden - Austauschbares Ca

- Austauschbares Calcium im Mineralboden (0-60 cm) sowie Ca-Vorrat in der Humusaufklage. (BZE-Auswertung, n=1187)

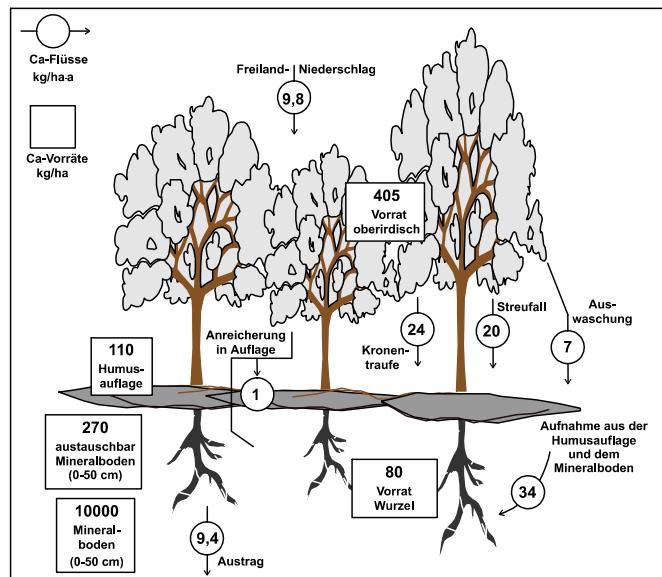


## Auswaschung von Kationen und Anionen

- Auswaschung verschiedener Kationen und Anionen aus einer Löß-Parabraunerde und 3 Podsolen bei verschiedener Nutzung

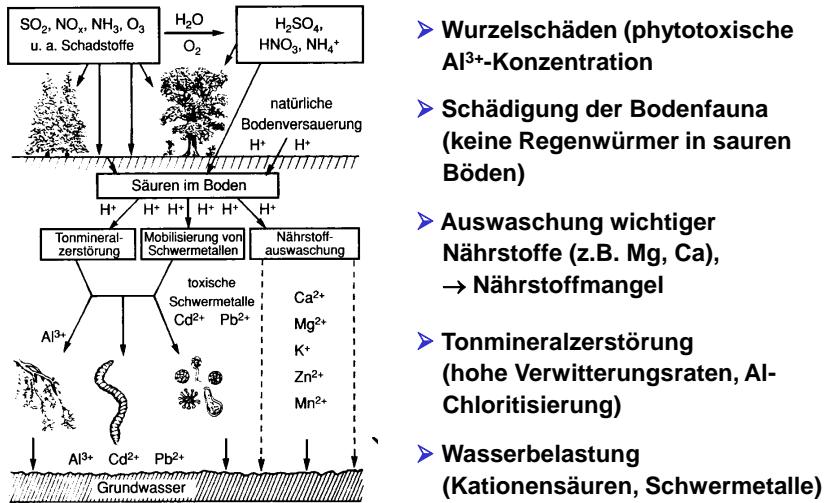


## Ca-Vorräte und Flüsse (Solling, Buche 120 Jahre)



## Bodenversauerung und Kalkung

### ☒ Wirkungspfade der Bodenversauerung:



- Wurzelschäden (phytotoxische  $\text{Al}^{3+}$ -Konzentration)
- Schädigung der Bodenfauna (keine Regenwürmer in sauren Böden)
- Auswaschung wichtiger Nährstoffe (z.B. Mg, Ca), → Nährstoffmangel
- Tonmineralzerstörung (hohe Verwitterungsraten, Al-Chloritisierung)
- Wasserbelastung (Kationensäuren, Schwermetalle)

## Bodenversauerung und Kalkung

### ☒ Kriterien für die Waldkalkung nach Ulrich:

Kalkung erforderlich		
$\text{O}_\text{H}$ -Horizont	Ca-Sättigung	< 10 %
Mineralboden	pH (Salz)	< 4.2
	Ca-Sättigung	< 15 %
	molares Ca/Al in Bodenlsg.	< 1
Kalkung edringend erforderlich		
$\text{O}_\text{H}$ -Horizont	Ca-Sättigung	< 5 %
	pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )	< 3
Mineralboden	pH (Salz)	< 3.8
	Ca-Sättigung	< 5 %
	molares Ca/Al in Bodenlsg.	< 0.3
	% (Fe + H) am Austauscher	> 2–5 %

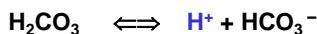
## Ökopedologie III

### Protonenumsetzung in Böden

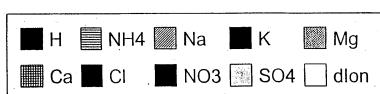
#### Belastung von Waldökosystemen durch Protonen

##### ☒ H<sup>+</sup>-Quellen:

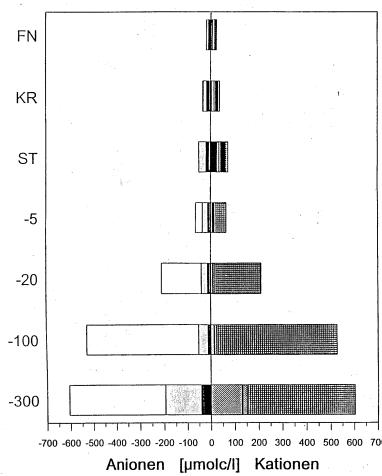
###### A) Protonenfreisetzung durch die Dissoziation von H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>



- pK<sub>s</sub> = 6.46
- nur oberhalb von pH 5 von großer Bedeutung
- in carbonathaltigen Böden die wichtigste H<sup>+</sup>-Quelle
- Bildung aus CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O



Chemische Zusammensetzung der Lösung in verschiedenen Kompartimenten der Untersuchungsfläche "Göttinger Wald" (Mittlere Konzentrationen 1993-94, FN = Freilandniederschlag, KR = Kronentraufe, ST = Stammabfluss, -5, -20, -100, -300 = Bodenlösung in 5, 20, 100 bzw. 300 cm unter Mineralbodenoberfläche), dlon als Rest aus der Ionenbilanz entspricht im wesentlichen HCO<sub>3</sub>, in -5 und -20 cm z.T. auch organischen Anionen.



## **Belastung von Waldökosystemen durch Protonen**

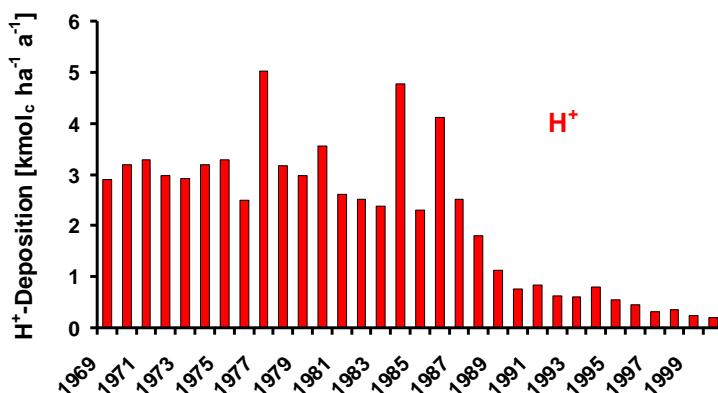
### **B) H<sup>+</sup>-Eintrag mit dem Bestandesniederschlag**

- Eintrag von H<sup>+</sup> insbesondere durch den Eintrag von Schwefel- und Salpetersäure
- Ausmaß des H<sup>+</sup>-Eintrags ist stark abh. von:  
Lage, Exposition,  
Klimabedingungen,  
Vegetation, Jahreszeit
- Bestandesniederschlag =  
Kronentraufe + Stammabfluss



## **Belastung von Waldökosystemen durch Protonen**

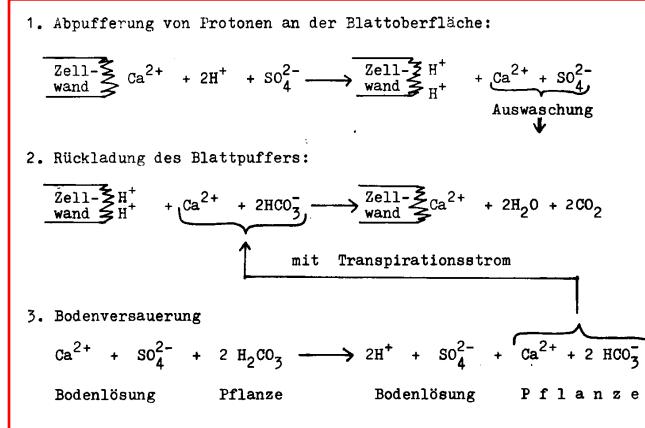
- Entwicklung der H<sup>+</sup>-Deposition im Solling:



⇒ Deposition von H<sup>+</sup> mit dem Bestandesniederschlag hat stark abgenommen (z.B. Rauchgasentschwefelung, Reduktion der Verbrennung stark S-haltiger fossiler Energieträger)

## Belastung von Waldökosystemen durch Protonen

### C) Pufferung des atmosphärischen H<sup>+</sup>-Eintrags im Kronenraum über den Austauscherpuffer der Blätter bzw. Nadeln

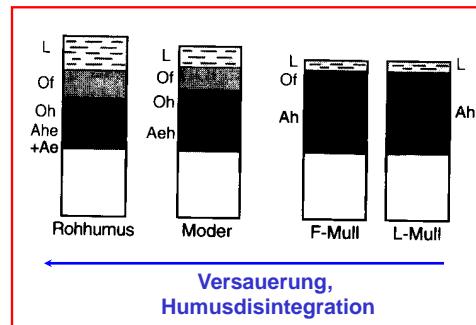


- Eindringen der Säurebildner (SO<sub>2</sub>) bzw. H<sup>+</sup>-Ionen durch die Spaltöffnungen in das Blatt führt letztlich zur Bodenversauerung

## Belastung von Waldökosystemen durch Protonen

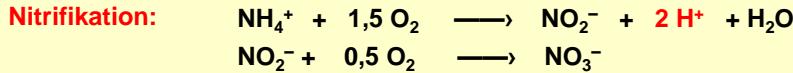
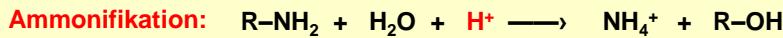
### D) Die Festlegung von Kationenüberschüssen in der Biomasse während der Aufbauphase eines Waldbestandes sowie der Entzug von Biomasse wirkt versauernd

- Ausgleich der H<sup>+</sup>-Ionenbilanz durch Rückführung und Mineralisation der aufgebauten Biomasse (Streu) im Boden (**Basenrückfuhr**)
- Ausgleich der H<sup>+</sup>-Ionenbilanz wird gestört durch **zeitliche und räumliche Entkopplung der Aufnahmee- und Mineralisations- prozesse** sowie durch den Entzug von Biomasse
  - ⇒ Streunutzung
  - ⇒ Fehlende Einmischung der Streu
  - ⇒ Gehemmte Mineralisation der Streu



## Belastung von Waldökosystemen durch Protonen

#### E) Unterbrechung des internen N-Kreislaufs durch Nitratauswaschung



- Geschlossener N-Kreislauf (Ammonifikation, Nitrifikation, Nitrataufnahme) ist  $H^+$ -neutral



## Protonenbilanz 0

➤ wird das Nitrat ausgewaschen, trägt 1 H<sup>+</sup>-Ion zur Versauerung bei



# Belastung von Waldökosystemen durch Protonen

**F) Aufnahme und Nitrifikation des atmosphärischen  $\text{NH}_4^+$ -Eintrags in Relation zur Aufnahme des Nitrateintrags.**

## ➤ Deposition von $\text{NH}_4^+$ :

- Aufnahme von  $\text{NH}_4^+$  → H<sup>+</sup>-Abgabe      Protonenbilanz +1
  - Nitrifikation und Nitraufnahme  
 $\text{NH}_4^+ + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2 \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$       Protonenbilanz +2  
 $\text{NO}_3^-$ -Aufnahme → OH<sup>-</sup>-Abgabe      Protonenbilanz -1  
Nettoeffekt:      Protonenbilanz +1

### ➤ Deposition von $\text{NO}_3^-$ :

- Aufnahme von  $\text{NO}_3^-$  →  $\text{OH}^-$ -Abgabe Protonenbilanz -1
  - Auswaschung von  $\text{NO}_3^-$  Protonenbilanz 0

### ➤ N-Deposition:

- Im Mittel ca. 50% Nitrat-N und 50% Ammonium-N
  - In Gebieten mit intensiver Viehhaltung überwiegt  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  Deposition

## **Belastung von Waldökosystemen durch Protonen**

### **G) Bildung organischer Säuren und Auswaschung der Säureanionen**

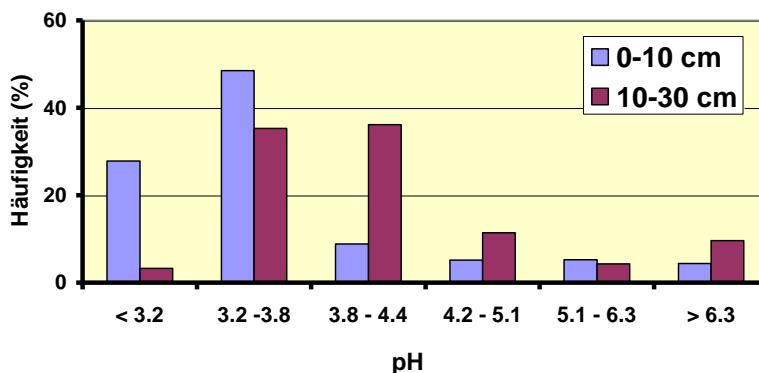


**Protonenbilanz +1,  
wenn RO<sup>-</sup> ausgewaschen wird**

- Versauerung, wenn H<sup>+</sup> Pufferreaktionen an der Bodenfestphase eingeht und das org. Säureanion ausgewaschen wird (räumliche Entkopplung)
  - z.B. Verlagerung org. Säuren mit dem Sickerwasser
  - Bei Mineralisation des Säureanions wird die Säurewirkung kompensiert, da bei der Mineralisation wieder H<sup>+</sup> verbraucht wird

## **Bodenversauerung im Wald - Ist-Zustand**

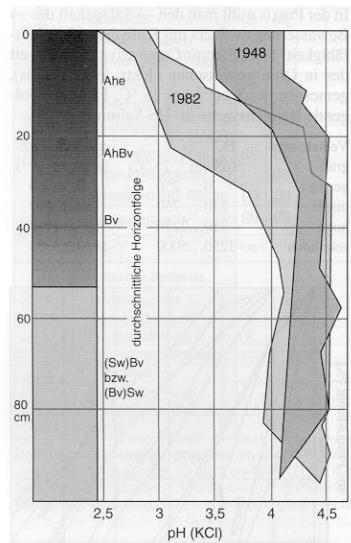
- pH (KCl) in Waldböden, BZE-Auswertung, n = 1750



- über 75% der Oberböden (0-10 cm) sind sehr stark versauert
- auch in 10-30 cm Tiefe weisen die meisten Böden einen stark bis sehr stark sauren pH-Wert auf

## Bodenversauerung im Wald - Entwicklung

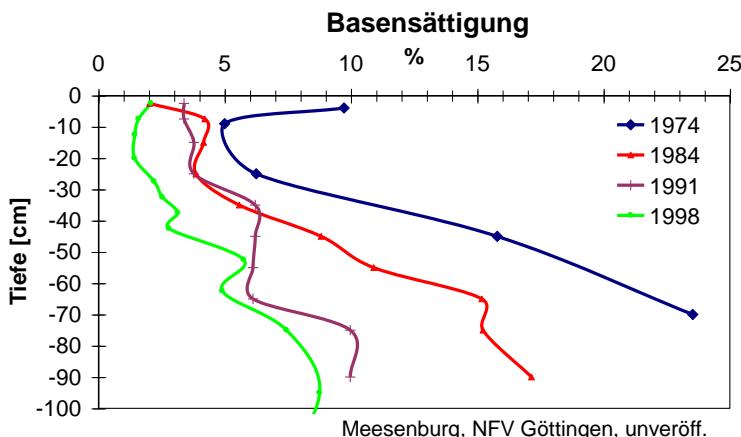
- Veränderung des pH-Werts in podsoligen Braunerden



- starke Versauerung der Oberböden seit 1948
- geringer Effekt im Unterboden
- Achtung!  
pH gibt nur ein unzureichendes Bild der gesamten Versauerung (Gesamtacidität)

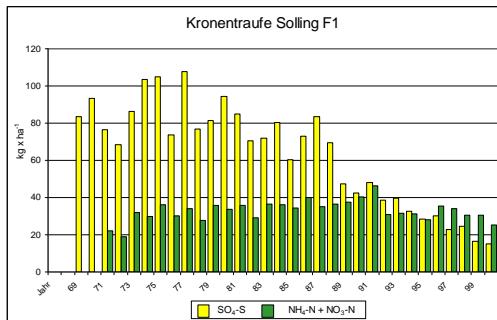
## Bodenversauerung im Wald - Entwicklung

- Entwicklung der Basensättigung am Standort Lange Bramke, (Harz)



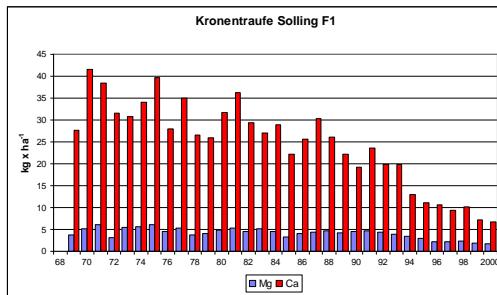
- Rückgang der Basensättigung auch im Unterboden

## Deposition - Entwicklung



➤ Entwicklung der S- und N-Deposition im Solling

- Starke Reduktion der S-Einträge
- anhaltend hohes Niveau der N-Einträge

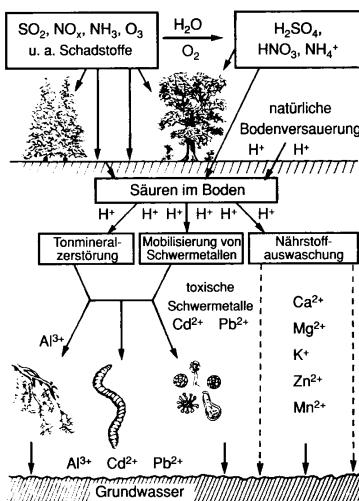


➤ Entwicklung der Ca- und Mg-Deposition im Solling

- Starke Reduktion der Ca- und Mg-Einträge

## Bodenversauerung - Wirkungspfade

☒ Wirkungspfade der Bodenversauerung:



➤ Wurzelschäden (phytotoxicische Al³⁺-Konzentration)

➤ Schädigung der Bodenfauna (keine Regenwürmer in sauren Böden)

➤ Auswaschung wichtiger Nährstoffe (z.B. Mg, Ca), → Nährstoffmangel

➤ Tonmineralzerstörung (hohe Verwitterungsraten, Al-Chloritisierung)

➤ Wasserbelastung (Kationensäuren, Schwermetalle)

## Bodenversauerung und Kalkung

---

### ☒ Kriterien für die Waldkalkung nach Ulrich:

<b>Kalkung erforderlich</b>		
O <sub>H</sub> -Horizont	Ca-Sättigung	< 10 %
Mineralboden	pH (Salz)	< 4.2
	Ca-Sättigung	< 15 %
	molares Ca/Al in Bodenlsg.	< 1
<b>Kalkung edringend erforderlich</b>		
O <sub>H</sub> -Horizont	Ca-Sättigung	< 5 %
	pH (H <sub>2</sub> O)	< 3
Mineralboden	pH (Salz)	< 3.8
	Ca-Sättigung	< 5 %
	molares Ca/Al in Bodenlsg.	< 0.3
	% (Fe + H) am Austauscher	> 2– 5 %

## Bodenschutzkalkung - Ziele

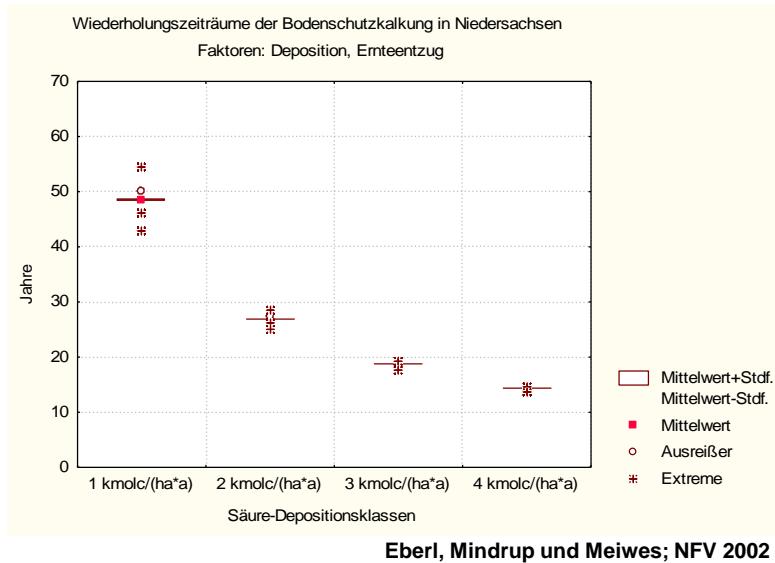
---

### ☒ Ziele:

- Neutralisation depositionsbedingter Säuren
- Verringerung der Säure- und Kationensäuregehalte in der Bodenlösung und am Austauscherkomplex
- Erhaltung bzw. Schaffung eines für das Wurzelwachstum günstigen bodenchemischen Zustands
- Erhaltung bzw. Schaffung eines Bodenzustands, in dem Bodenwühler aktiv sein können.
- Verbesserung der Nährstoff- und Basenversorgung von Blättern und Nadeln → Stärkung des Puffervermögens im Kronenraum
- Zufuhr im Zuge der Versauerung ausgewaschener Nährstoffe (Ca, Mg)
- Verringerung der Humusdisintegration
- Förderung der Entwicklung einer Krautschicht
- Förderung der natürlichen Verjüngung

## Bodenschutzkalkung

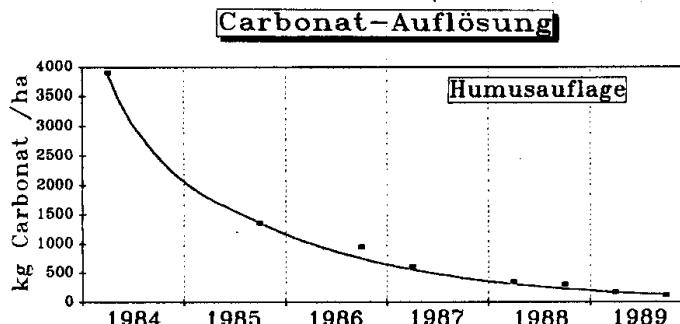
☒ Ausbringungsempfehlung: 3t langsam löslicher Ca/Mg-Kalk



## Bodenschutzkalkung

☒ Zeitlicher Verlauf der Kalklösung:

- Bsp.: Auflösung eines dolomitischen Kalkes (Ausbringung auf einem versauerten Fichtenstandort (pH in der Humusaufklage 2.8 bis 3.7))

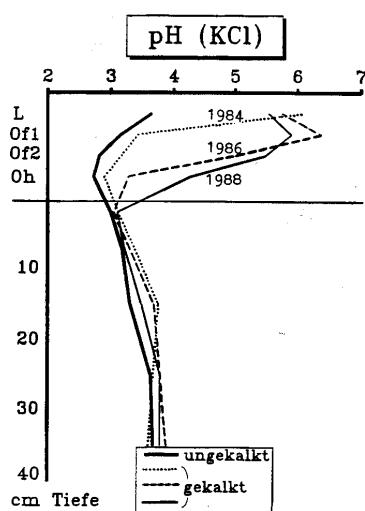


- Lösungsrate wird beeinflußt durch:

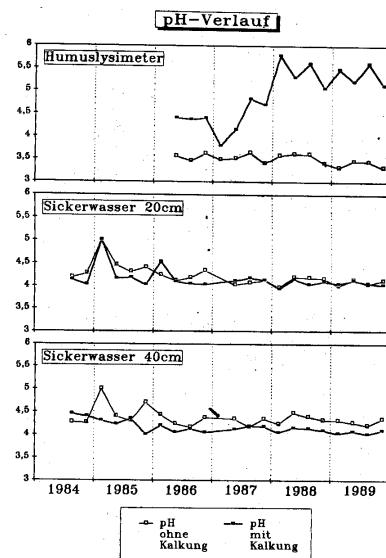
- mineralische Zusammensetzung des Kalkes und Feinheit der Mahlung
- Standortfaktoren: Säuredeposition, Bodenazidität, Sickerwasser

## Bodenschutzkalkung - Wirkung (4 t Ca/Mg-Kalk 1984)

### ➤ pH-Wert im Boden

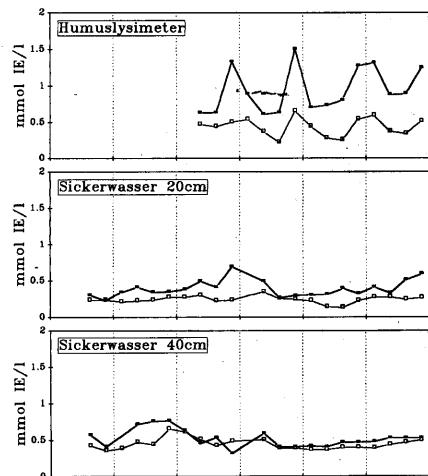


### ➤ pH-Wert im Sickerwasser

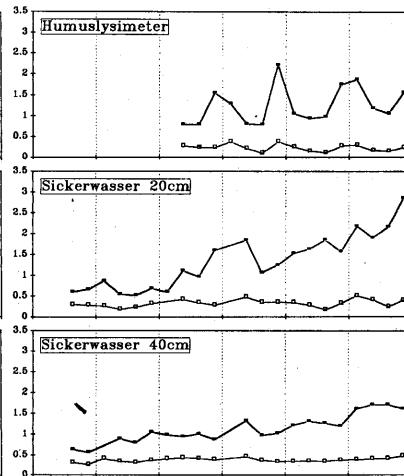


## Bodenschutzkalkung - Wirkung (4 t Ca/Mg-Kalk 1984)

### Calcium



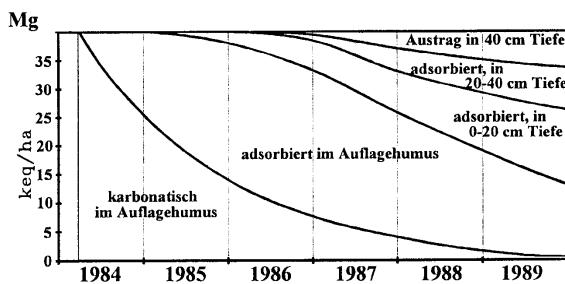
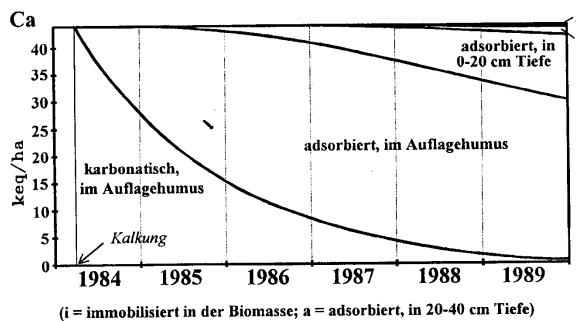
### Magnesium



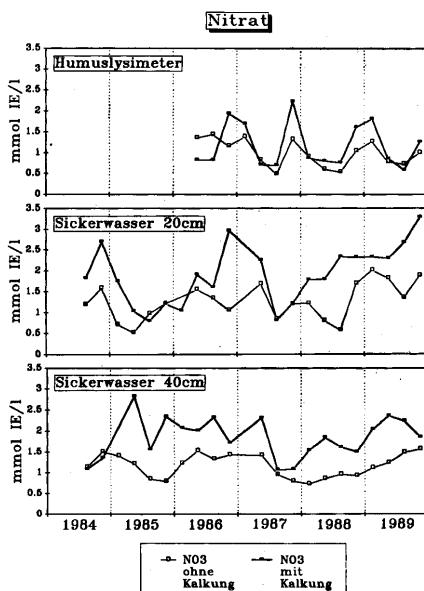
—○— Ca ohne Kalkung  
—■— Ca mit Kalkung

—○— Mg ohne Kalkung  
—■— Mg mit Kalkung

## Bodenschutzkalkung - Wirkung (4 t Ca/Mg-Kalk 1984)



## Bodenschutzkalkung - Wirkung (4 t Ca/Mg-Kalk 1984)



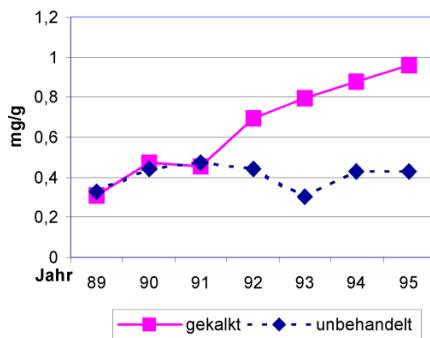
➤ Verringerung der Humus-disintegration durch erhöhte Mineralisationsraten

➤ Gefahr der Nitratauswaschung

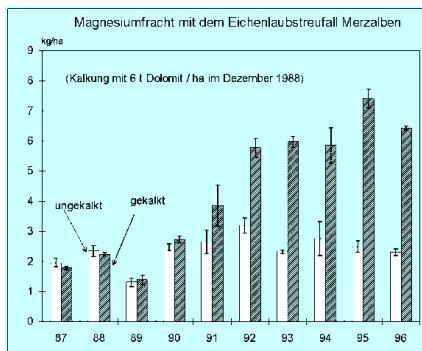
## Bodenschutzkalkung - Wirkung

### ➤ Wirkung auf die Mg-Gehalte in Nadeln und Streu

Magnesiumgehalt in 2-jährigen Fichtennaden



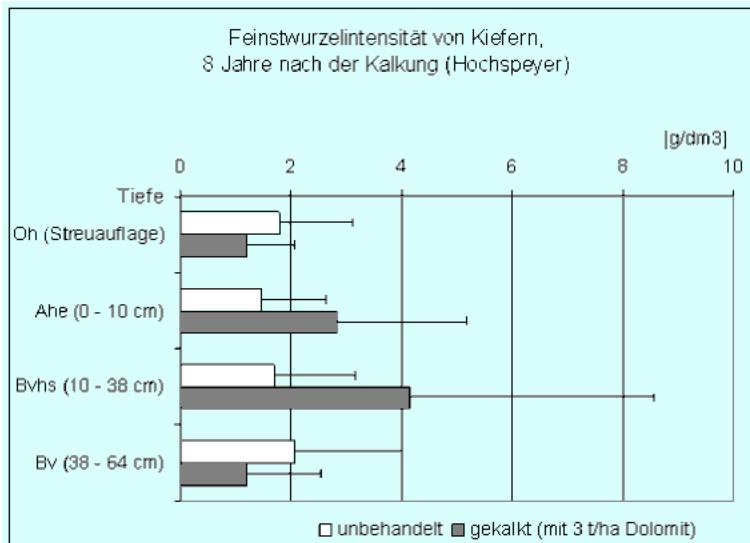
### ➤ Bodenschutzkalkung 1988



### ➤ Bodenschutzkalkung 1991

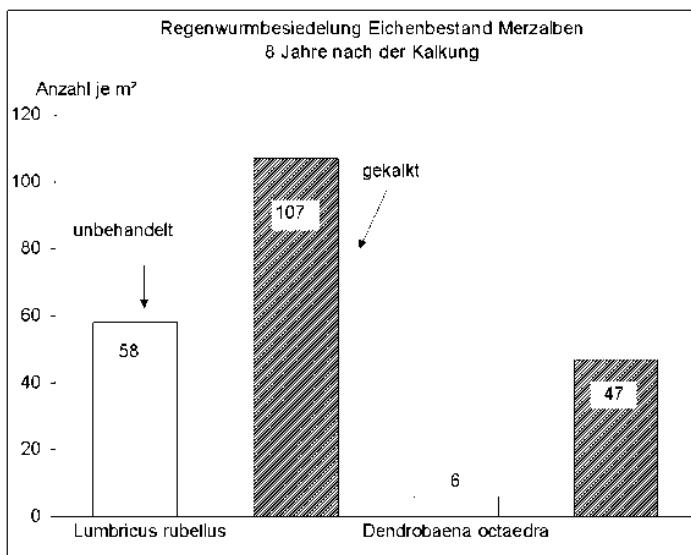
## Bodenschutzkalkung - Wirkung

### ➤ Wirkung auf das Wurzelwachstum



## Bodenschutzkalkung - Wirkung

### ➤ Wirkung auf die Regenwurmabundanz



## Bodenschutzkalkung - Wirkung

### ➤ Vegetationsentwicklung nach Auflichtung eines Fichtenaltbestandes:



Kontrolle ohne Düngung



Vor 25 Jahren 9 t Branntkalk und 2 t Thomasphosphat