

# Stofflicher Eintrag in Böden und dessen Auswirkungen auf den Standort

Prof. Dr. Beate Michalzik

Friedrich-Schiller Universität Jena  
Institut für Geographie, Professur für Bodenkunde

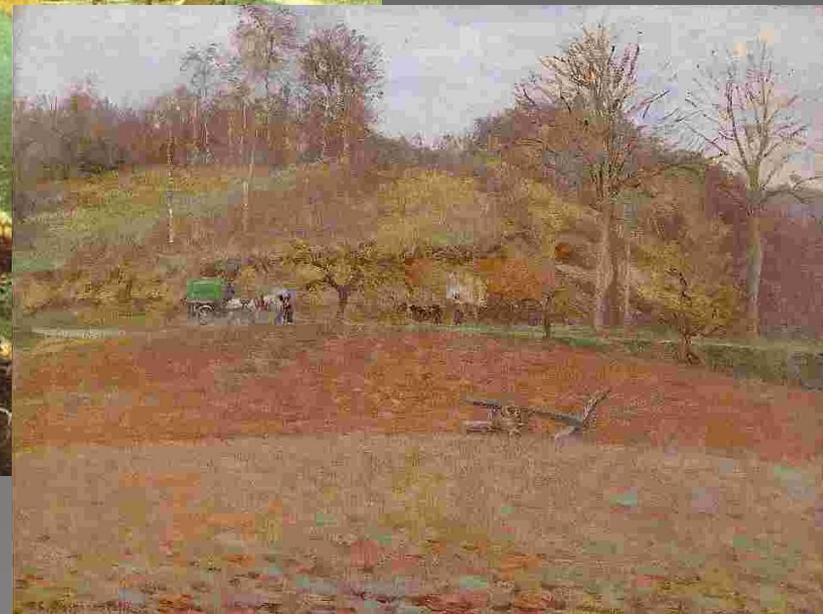
[beate.michalzik@uni-jena.de](mailto:beate.michalzik@uni-jena.de)

# Was ist Boden?

**Boden** ist die obere Schicht der Erdkruste, soweit sie Träger der **Bodenfunktionen** ist, einschließlich der flüssigen Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten (BBodSchG, 1998).



Pieter Breughel d. Ä. (1525 - 1569)  
Landschaft mit Fall des Ikarus

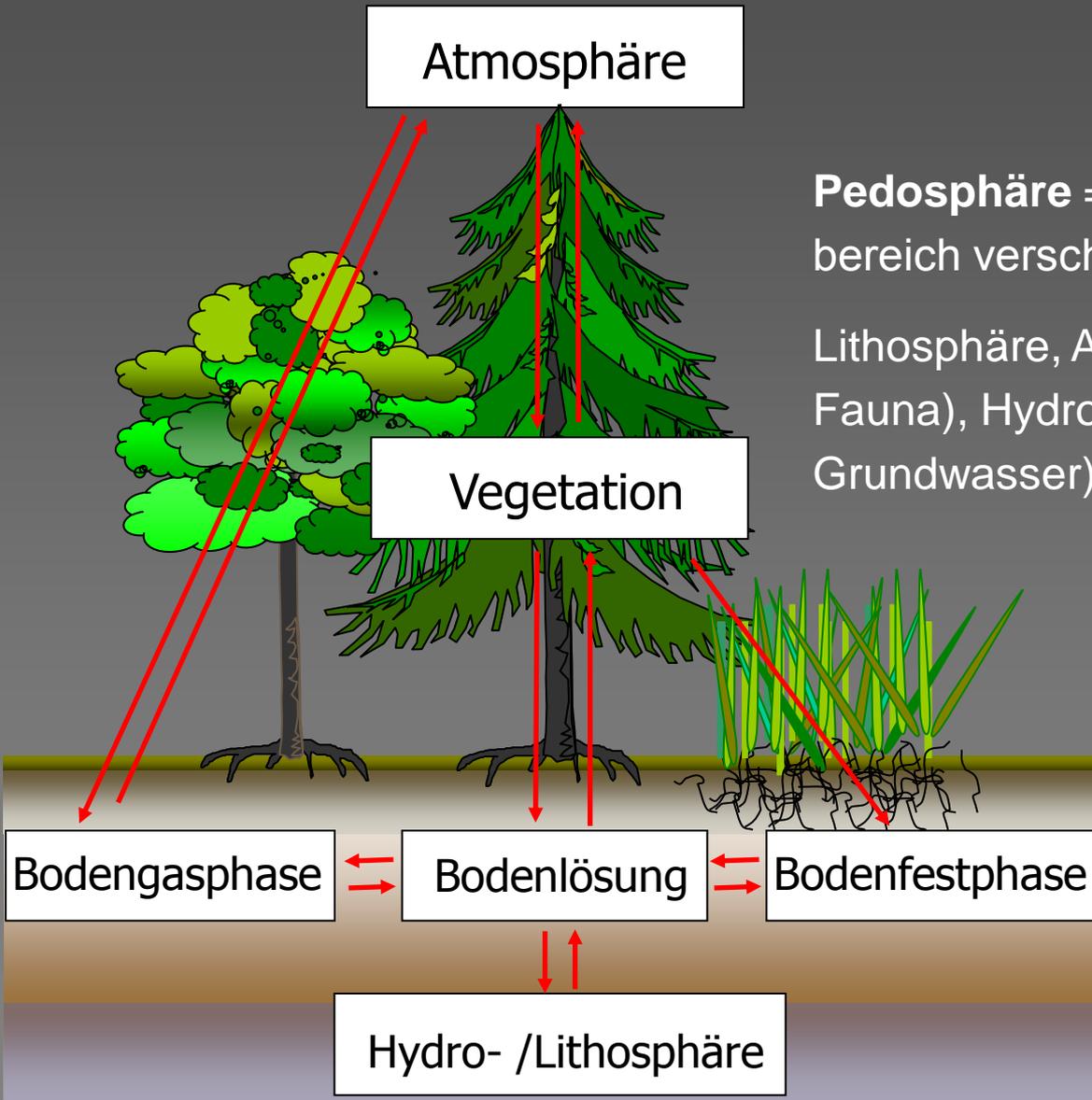


Camille Pissarro  
Umgepflügte Erde, 1874

# Funktionen von Böden

- **Lebensraumfunktionen**
  - Böden als Lebensraum für Pflanzen
  - Böden als Lebensraum für Tiere
- **Regelungsfunktionen**
  - Böden als Teil von Ökosystemen
  - Böden als Schadstoffpuffer (Filterfunktion)
  - Zusammensetzung der Atmosphäre
  - Klimaregulierung (Treibhausgase, Albedo)
  - Böden als Wasserspeicher (Hochwasserschutz)
- **Standortfunktionen**
  - Böden als Standorte von Bauwerken
- **Produktionsfunktionen**
  - Land- und Forstwirtschaft
  - Trinkwassergenerierung
  - Böden als Rohstoffe
- **Geschichtliche Funktionen**  
(Archiv der Landschaftsgeschichte – Dokumentation von Einflüssen des Menschen)

# Böden als Schnittstelle in Ökosystemen

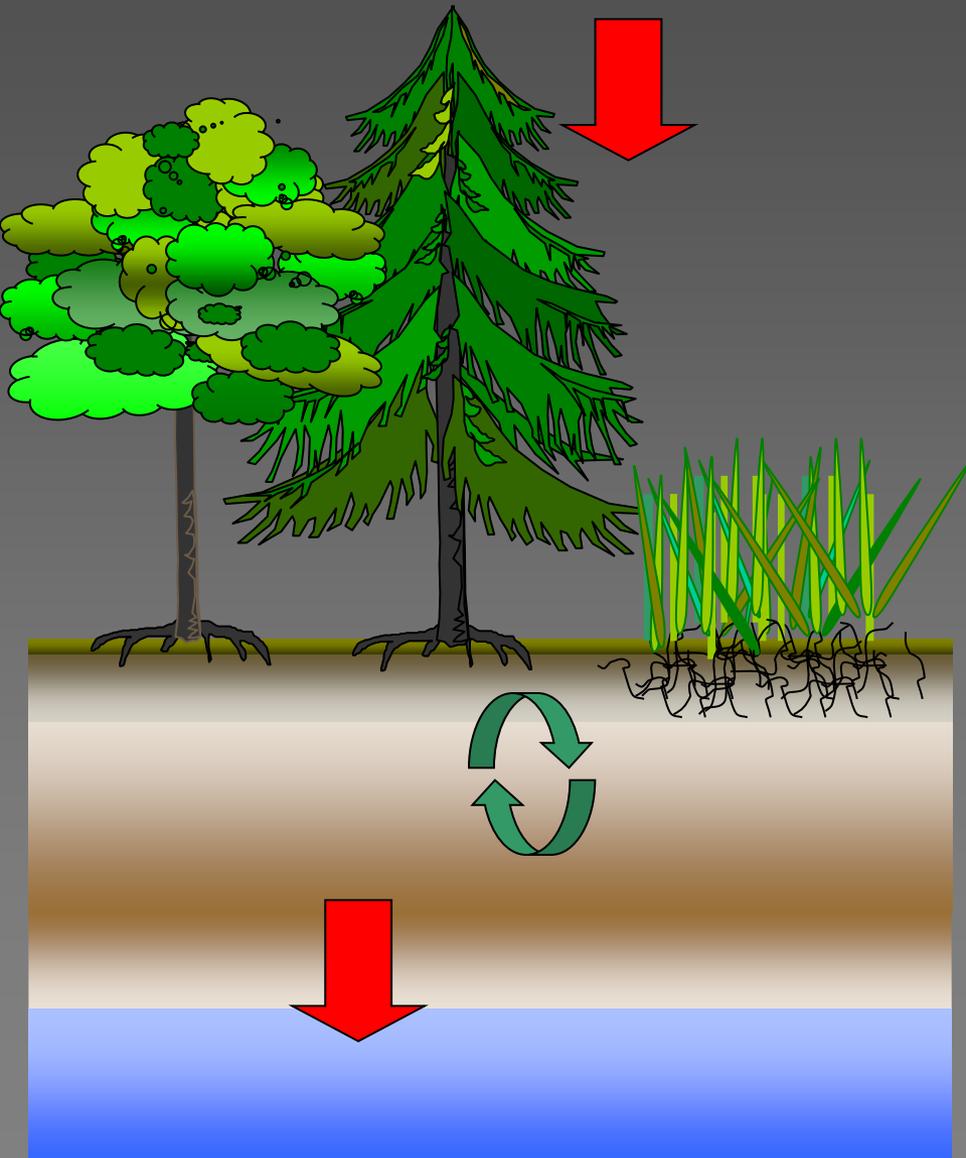


**Pedosphäre** = Grenz- und Überschneidungsbereich verschiedener „Sphären“:

Lithosphäre, Atmosphäre, Biosphäre (Flora und Fauna), Hydrosphäre (Oberflächen- und Grundwasser), **Anthroposphäre** (Nutzung)

**Boden** = Teil der Pedosphäre, der von der **Erdoberfläche** bis zum **unverwitterten Gestein** reicht.

# Der Boden als offenes Reaktionssystem



## Eintragspfade und -quellen

Diffus- nasse und trockene Deposition  
(Industrie, Verkehr, Vulkane,...)

Punktuell- z.B. Einleitungen, Unfälle,  
Klärschlamm, Komposte, indust. Produkte

## Reaktionssysteme

- Filterfunktion (mechanisch)
- Pufferfunktion (chemisch)
- Transformatorfunktion  
(mikrobiologisch/chemisch)

## Austrag

→ variabel im Verhältnis zum Eintrag | 4

# Stoffliche Einträge und Belastungen des Bodens

## 1) Säurebildner/ eutrophierende N-Einträge

(z.B.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ )

## 2) Schwermetalle

(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Tl, Zn, Hg, Cr (VI) und Cyanide (BBodSchV) → nicht abbaubare, persistente Schadstoffe, welche zumeist im Boden angereichert werden)

## 3) Organische Schadstoffe

(Leitsubstanzen: MKW, LHKW, BTEX, PCB, PAK)

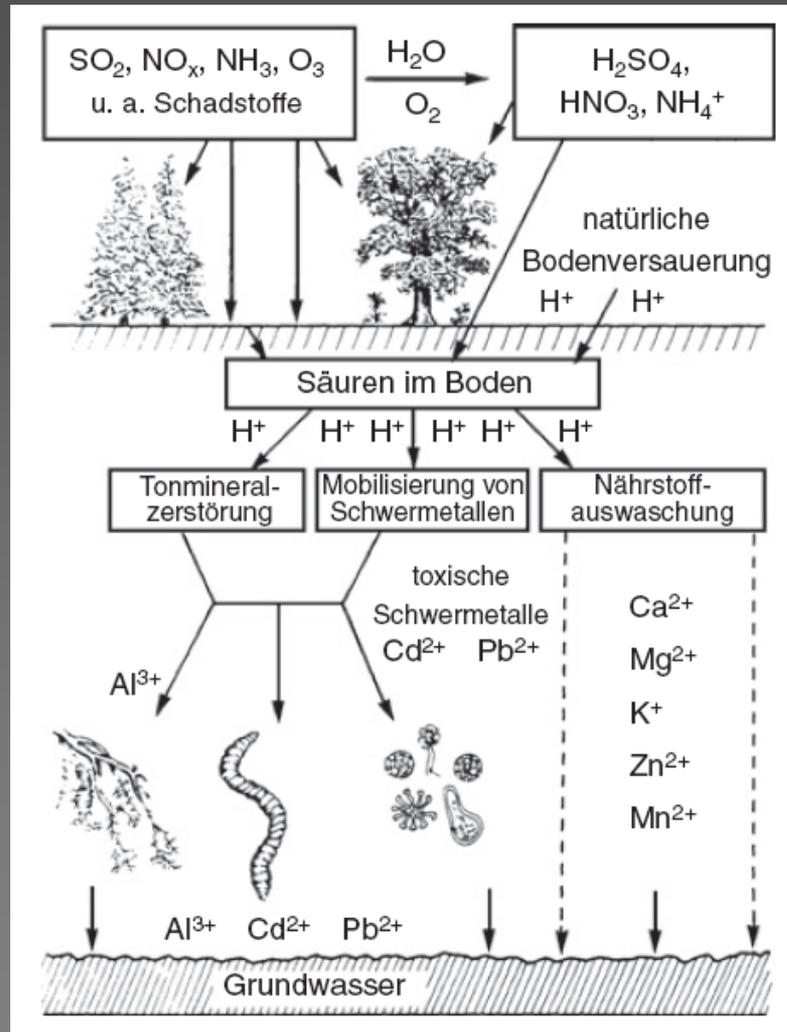
## Konzept der „critical loads“

„Critical loads“ stellen ein quantitatives Maß ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) bzw. 'Schwellenwerte' für einen oder mehrere Belastungsfaktoren dar, **unterhalb denen** nach dem heutigen Stand des Wissens längerfristig **keine nachteiligen Effekte** für einzelne Elemente eines Ökosystems oder das gesamte Ökosystem zu erwarten sind (Schulze et al., 1989).

Das Konzept basiert auf der Annahme von „steady-state“-Bedingungen, die sich bei gleichbleibenden Systembedingungen mit der Zeit einstellen, und auf der Analyse von Input-/output-Stoffbilanzen.

CL sind Funktionen vieler abiotischer Variablen (z.B. Boden-pH, Pufferkapazitäten, Bodentiefe, OS), die räumlich variieren.

# I. Wirkungen von Säureeinträgen auf Wälder und Böden



1. Wirkungen im Kronenraum

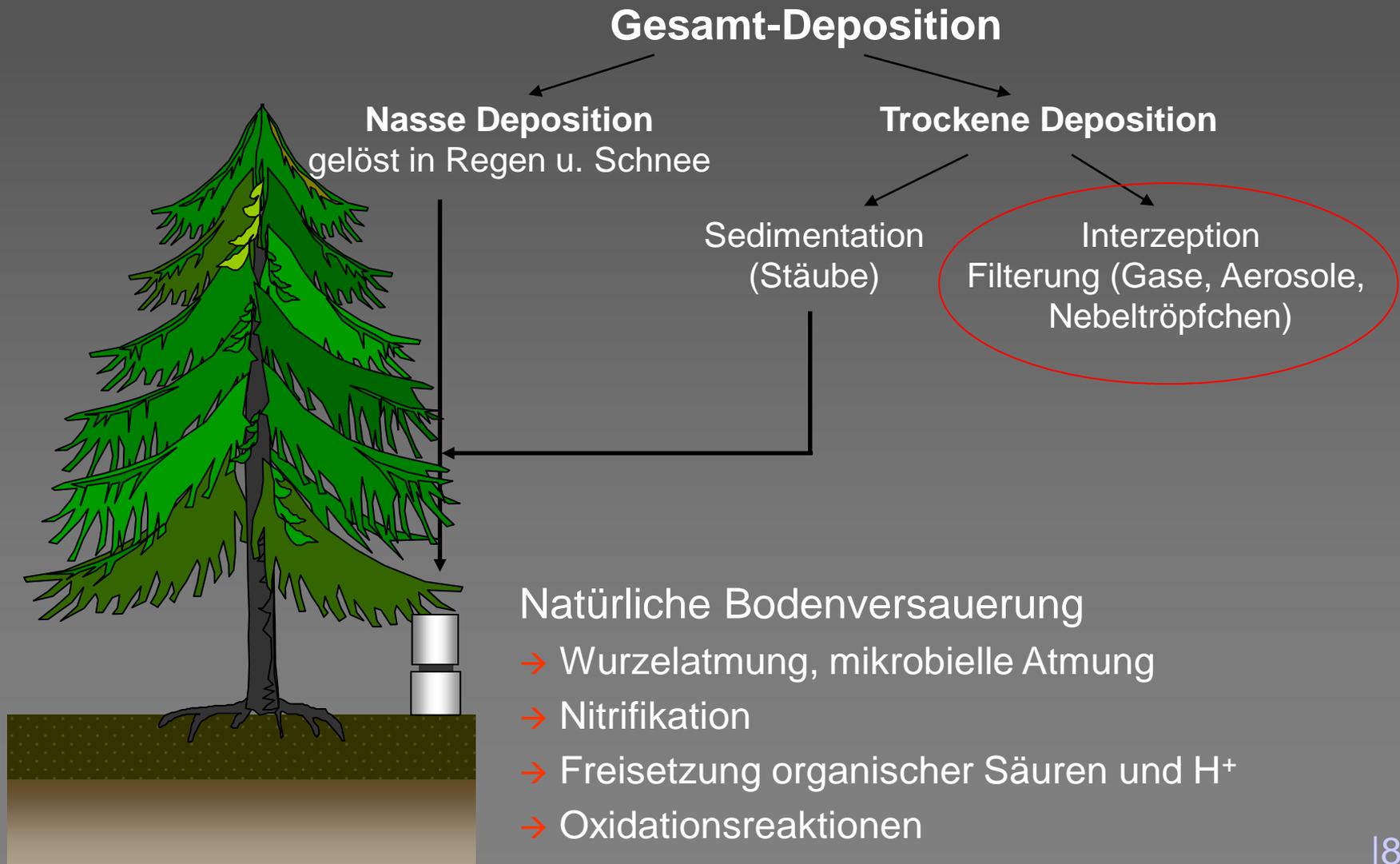
2. Wirkungen im Boden

Folgen

3. Bodenversauerung

4. Gewässerversauerung

# Atmosphärische Säuredeposition



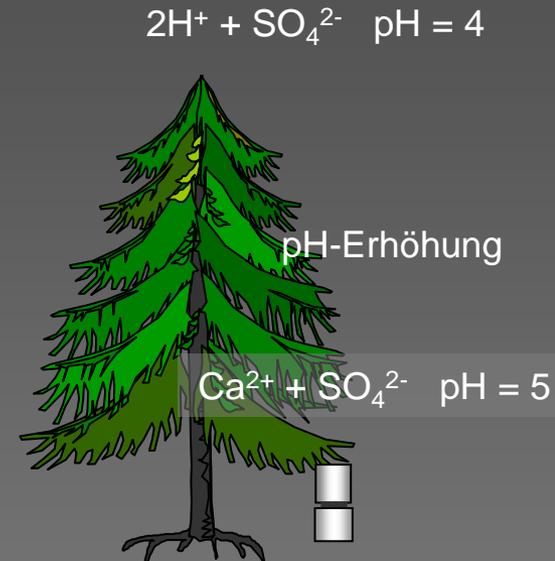
# Wirkungen im Kronenraum

## Säurebildung



## H<sup>+</sup>- Pufferung in der Baumkrone

→ Auswaschung von K, Ca, Mg, Mn, Zn als Gegenkation



→ vorindustriell → pH in Regenerlösung ca. 5,5 → heute pH 4-5

→ natürlicher Background des N-Eintrages: 0-5 kg N/ha\*a

→ Heute in Mitteleuropa: bis 60 kg/ha\*a

# Säurebildung im Boden

## 1. Bildung von Kohlensäure

Wurzelatmung , mikrobielle Atmung (Oxidation von Biomasse)



## 2. Nitrifikation von $\text{NH}_4$ -Dünger oder $\text{NH}_3$ -Einträgen



## 3 . Pflanzenwurzel

Abgabe von  $\text{H}^+$ -Ionen durch die Wurzeln bei Kationenaufnahme

→ pH-Wert in der Rhizosphäre deutlich niedriger als im Boden

## 4. Oxidation/Dissoziation während der Humifizierung



# Wirkungen im Boden: Pufferreaktionen

pH <sub>GbL</sub>	8,6	6,2	5,0	4,2	3,8	3,0
Pufferbereich	Carbonat	Silikat	Austauscher	Aluminium	Al / Fe	Eisen
wichtige Puffer-substanzen	<p>&gt; Carbonat &lt; → n (Al(OH)<sub>x</sub>(3-x)+) →</p> <p>&gt; Hydrogencarbonat &lt; → Al-Hydroxosulfate →</p> <p>&lt; Huminstoffe → &gt; Goethit, Hämatit →</p> <p>&gt; prim. Silikate ----- →</p> <p>&gt; M<sub>b</sub> &lt; &gt; Ferrihydrit</p> <p>&gt; Tonminerale →</p> <p>&gt; Fe-Oxide/Hydroxide mit Red. →</p> <p>&gt; Mn-Oxide/Hydroxide →</p>					
Pufferrate [kmol/ha * a <sup>-1</sup> ]	hoch (> 2)	0,1 - 2	sehr hoch	hoch - mittel	mittel bei der Präsenz wasserlöslicher Huminstoffe	
boden-chemische Schlüsselprozesse	Entkalkung	Freisetzung von Gitterkationen Tonmineralneubildung	Verlust austauschbarer Kationen, Abnahme der AK <sub>e</sub>	Lösung von silikatischem Al; Tonzerstörung Protolyse von Al-Hydroxiden	Fe-Mobilisierung als org. Komplex	Bleichung bei hohem O <sub>2</sub> -Partialdruck
Anspruchmerkmale	FE kalkhaltig	FE kalkfrei	M <sub>b</sub> /AK <sub>e</sub> > 0,15 (humushaltige Horizonte) bzw. M <sub>b</sub> /AK <sub>e</sub> > 0,05 (humusfrei)	M <sub>b</sub> /AK <sub>e</sub> < 0,15 (humushaltige Horizonte) bzw. M <sub>b</sub> /AK <sub>e</sub> < 0,05 (humusfrei)	Podsoligkeit (Aeh / Ahe)	Podsolierung (Ae - Bs) viel NH <sub>4</sub> Cl-extrahierbares H + Fe
pH-Wert der Bodenlösung bei Gleichgewicht			M <sub>b</sub> /AK <sub>e</sub> = 1			NH <sub>4</sub> Cl-extrahierbares H + Fe
		> 5,0	> 4,2	4,2 - 3,8	3,8 - 3,2	< 3,2

- Abhängig von Standortfaktoren:
- Ausgangsgestein (Pufferverm.)
  - Vegetation („Basenpumpe“)
  - Bewirtschaftung

## Folgen der Bodenversauerung

- Zerstörung von Tonmineralen und Auflösung von Al-Oxiden
- Freisetzung von  $\text{Al}^{3+}$  und  $\text{Mn}^{2+}$ -Ionen → Verdrängung der Nährstoffkationen vom Austauscherelement und nachfolgende Auswaschung → Nährstoffmangel (Verhältnis von Nährstoffkationen zu Al)
- Wurzel-toxische Al-Wirkungen (10- 20 mg/l für Waldbäume)
- Freisetzung von Schwermetallen mit zunehmender Versauerung (s.u.)  
→ Eintrag in Grundwasser und Oberflächengewässer
- Schädigung von Bodenflora und -fauna

# Indikatoren der Bodenversauerung

## Charakterisierung der Bodenversauerung

→ Konzept der Kapazitäts- und Intensitätsfaktoren

→ quantitative Beschreibung der Versauerung

| (van Breemen et al., 1983, 1984)

## Intensive Kriterien für die Bodenversauerung (mengen-unabhängig)

- Abnahme des pH-Wertes (→ Puffersysteme im Boden)

- Abnahme der Basensättigung: Prozentualer Anteil der Kationen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  und  $\text{Na}^+$  an der Kationenaustauschkapazität (KAK)

- Nährstoffverhältnisse: z.B.  $\text{Ca}/\text{Al}$  ( $< 0,1$  starke Gefährdung;  $> 1,0$  keine Gefährdung)

## Kapazitätsparameter der Bodenversauerung (mengen-abhängig)

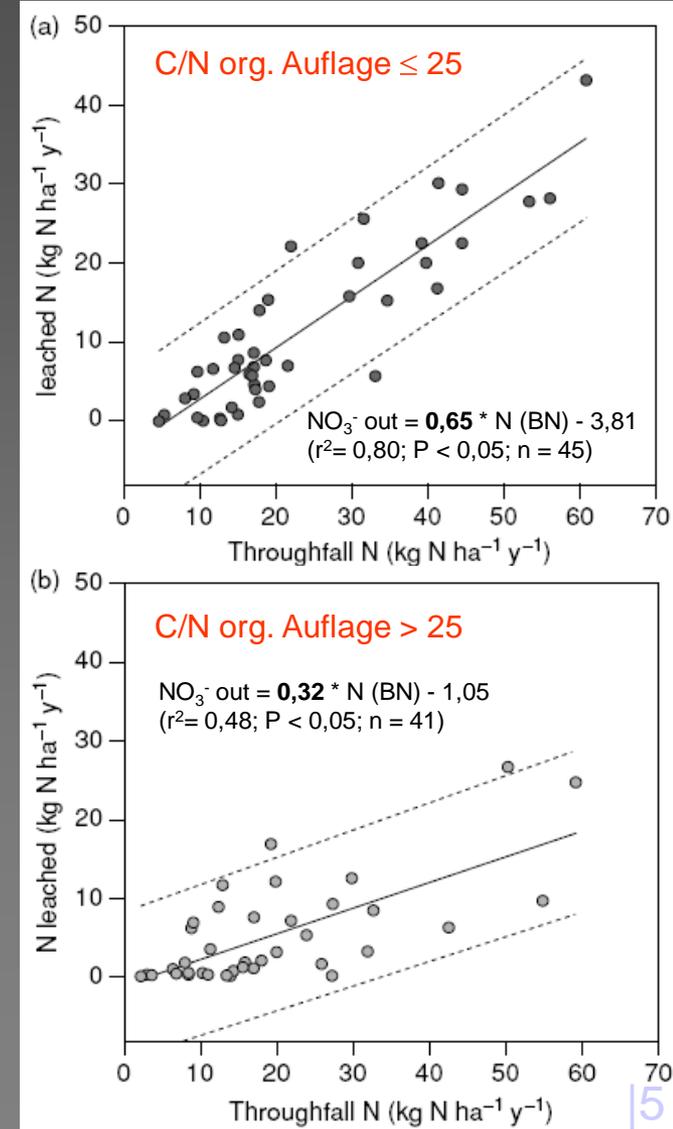
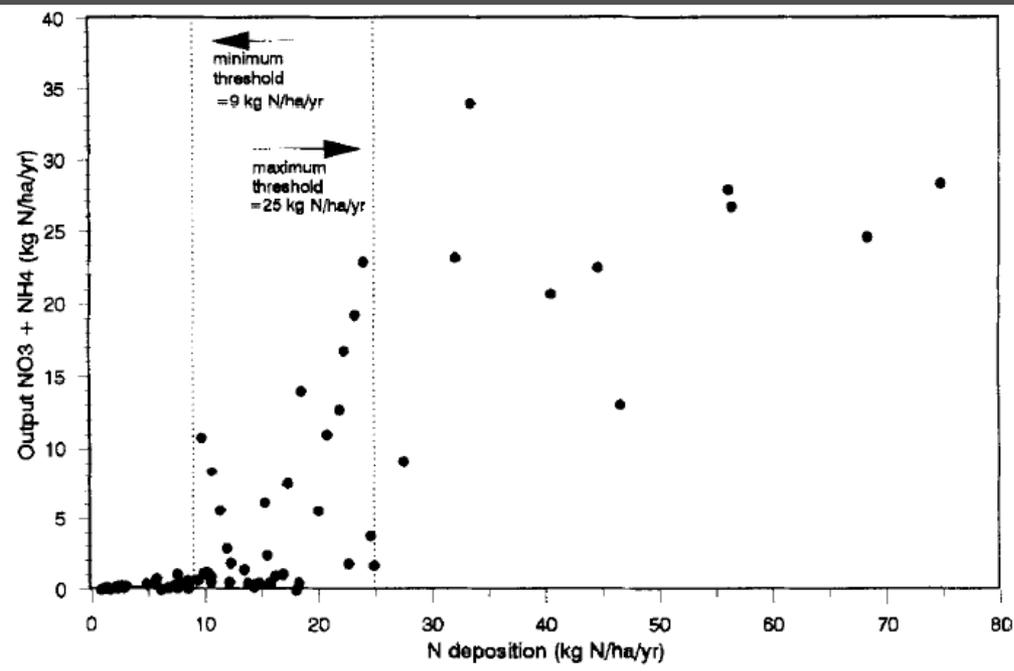
- Säureneutralisationskapazität (SNK)

Die SNK ist die Menge (z. B. in mol  $\text{H}^+$ ) an starken Säuren die benötigt wird, um den pH-Wert eines (Boden)Systems auf einen Referenz-pH-Wert zu erniedrigen.

# Wirkungen eutrophierender N-Einträge in Böden

- N- Einträge in Europa hochvariabel: 1 - 60 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> | (MacDonald et al., 2002)
- Waldstandorte natürlicherweise N-limitiert
- Weitreichende Auswirkungen durch erhöhte N-Einträge:
  - Erhöhtes Waldwachstum | (Tamm 1991)
  - Erhöhte Blatt-/Nadel-N-Gehalte | (Boxman et al., 1998)
  - Erhöhter Nitrataustrag | (Aber et al. 1995)
- erhöhte N-Einträge auch (Mit-)Ursache für das Waldsterben | (Nihlgård, 1985)
- Hypothese der „Stickstoff-Sättigung“, wonach | (Aber et al., 1995)  
biologischer N-Bedarf < anorg. N-Eintrag/-Verfügbarkeit
- Folge: Nährstoffverlust und Nitratauswaschung

# Erkenntnisse aus der empirischen N-Forschung



(Dise und Wright, 1995)

Kombination aus N-Eintrag und Boden-pH (B-Horizont) mit  $r^2 = 0,87$  (Erklärungsanteil an Variabilität der  $\text{NO}_3^-$ -Austräge)

N-Eintrag (BN) zusammen mit dem N-Anreicherungsstatus (C/N) sind gute Indikatoren für den  $\text{NO}_3^-$ -Austrag.

(MacDonald et al., 2002)

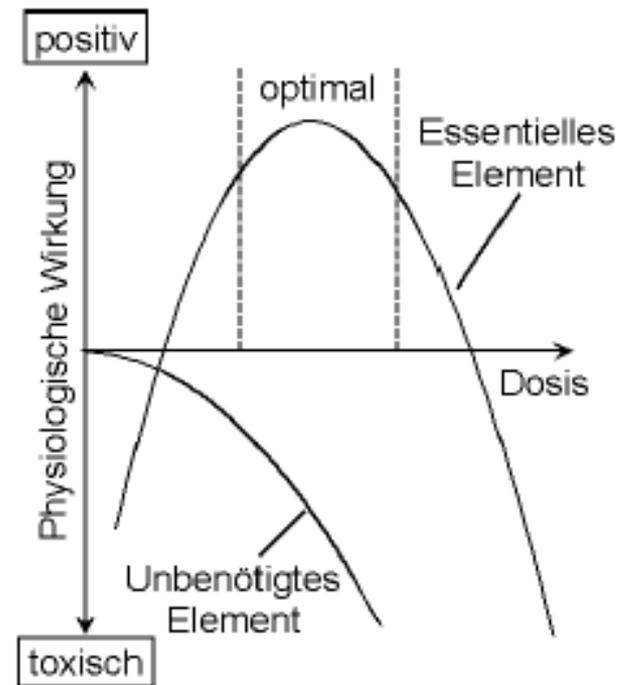
## II. Anorganische Schadstoffe

Schwer- und Halbmetalle und andere Anorganika  
(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Tl, Zn, Hg, Cr (VI) (und Cyanide)

Definition: Metalle mit einer Dichte größer etwa 4,5 (5,0) g/cm<sup>3</sup>

Nur toxisch: Cd, As, Pb, Hg, Be, Bi

Essentiell/nützlich für Pflanzen:  
Co, Cu, Mn, Mo, Se, V, Zn, Fe



# Eintragspfade- und quellen

**Diffuse Quellen-** nasse und trockene Deposition: Industrie, Verkehr, Vulkane,...

**Punktuelle Quellen-** Unfälle, Dünger, industrielle Produkte, Gesteinsverwitterung...

**Tab. 10.2-2** Schwermetalleinträge in [g ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>] verschiedene Quellen

Element	Atmosphärische Einträge		Direkteinträge				
	Ländl. Gebiete/ Waldstandorte	Industrie-/ Ballungsgebiete	Verwitterung	Klär- schlamm <sup>1</sup>	Kompost <sup>1</sup>	Wirtschafts- dünger <sup>2,3</sup>	Mineralischer Dünger <sup>2,4</sup>
As	3	k.A.	k.A.	0,12	k.A.	k.A.	k.A.
Cd	1,5...3	≤ 35	0,1	2,21	4,7	0,33...0,61	0,15...2,98
Cr	3	k.A.	2,0	61	253	6,11...33,8	15,3...464
Cu	11...13	1526	3,5	520	577	73,1...454	2,89...9,5
Ni	5...35	k.A.	0,8	43,5	163	8,93...13,6	1,50...6,63
Hg	0,2...0,8	2	k.A.	1,17	1,6	0,02...0,13	0,00...0,3
Pb	31...310	270...14.000	0,8	76	464	5,14...16,7	0,24...4,93
Zn	70...618	bis 4000	2,3	1253	2037	467...1077	36,9...54,3

<sup>1</sup> Berechnete Werte aus maximalen Frachtraten nach Klärschlamm- und Bioabfallverordnung (1,5 t ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> bzw.

**Rein mineralische Düngung mit deutlich geringeren Schadstofffrachten als Kombination aus organischen und mineralischen Düngemitteln (UBA, 2008)**

<sup>2</sup> wet only Daten von 2000; k.A. = keine Angabe

# Mobilität und Verfügbarkeit in Böden

abhängig von zahlreichen Faktoren (Auswahl):

## -chemische Bindungsform

wasserlöslich, austauschbar, leicht mobilisierbar, in Mn-Oxiden, organisch, amorphe Fe-Oxide, kristalline Fe-Oxide

## - pH-Wert

Schadstoffmobilisierung: Cd (6.5), Zn (6.0), Ni (5.5), Cu (4.5), CrIII (4.5), Pb (4.0), Hg (4.0)

## - Redoxpotential

Eh/pH-Stabilitätsdiagramme für definierte Verbindungen

## - Gehalt von organischen Kohlenstoffverbindungen & Tonmineralien in Böden

Sorption an negativen Ladungen der festen Bodenbestandteile, Einbau in Kristallgitter, Bildung organischer Komplexe (Hg > Fe<sup>3+</sup> > Al<sup>3+</sup> > Cu<sup>2+</sup> > Pb<sup>2+</sup> > Fe<sup>2+</sup> > Ni<sup>2+</sup> > Cd<sup>2+</sup> > Zn<sup>2+</sup>)

**Tab. 10.2-6** Durchschnittliche Schwermetallausträge aus Agrarökosystemen [g ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>] (n. WILCKE & DÖHLER 1995, BANNICK et al. 2001)

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Sickerwasserkonz. µg l <sup>-1</sup>	0,14	4,6	4	0,14	8,9	0,28	10
Bodensickerwasser <sup>1</sup>	0,28	9,2	8	0,28	17,8	0,56	38
Wassererosion	2	147	81	k. A.	96	189	338
Ernte <sup>2</sup>	0,67	5,27	34	k. A.	10,3	5,92	173

<sup>1</sup>Sickerwasserfracht bei 200 mm,

<sup>2</sup>Mittel über Fruchtarten Weizen, Roggen, Gerste, Hafer, Körnermais, Kartoffeln, Zuckerrüben

# Folgen der Einträge und Akkumulation

## Wirkungsschwellen verschiedener SM auf Bodentiere

Metall	Art	Parameter	Gehalt im Boden [mg kg <sup>-1</sup> ]	Hemmung/Reduktion [%]
Arsen	<i>Lumbricus terrestris</i>	Mortalität	117	50
	<i>Eisenia fetida</i>	Reproduktion	70	30
Blei	<i>Lumbricus rubellus</i>	Mortalität	3000	50
	<i>Caenorhabditis elegans</i>	Mortalität	1305	4
Cadmium	<i>Aporrectodea caliginosa</i>	Reproduktion	1,86	10
	<i>Folsomia candida</i>	Reproduktion	12	10
Chrom	<i>Octochaetus pattoni</i>	Reproduktion	2	40
	<i>Eisenia fetida</i>	Reproduktion	100	52
Kupfer	<i>Eisenia fetida</i>	Reproduktion	16,8	10
	<i>Aporrectodea caliginosa</i>	Wachstum	69,8	10
Nickel	<i>Eisenia fetida</i>	Reproduktion	85	10
	Nematoden	Populationsdichte	100	18
Quecksilber	<i>Octochaetus pattoni</i>	Reproduktion	0,5	35
	<i>Eisenia fetida</i>	Mortalität	13	26
Zink	<i>Eisenia fetida</i>	Reproduktion	136	50
	<i>Folsomia candida</i>	Reproduktion	185	50

Metall	Transferkoeffizient	Normal in Pflanzen	kritisch für Pflanzenwuchs	kritisch als Tierfutter
Arsen	< 0,5	< 0,1...5	10...20	> 50
Blei	< 0,5	1...5	10...20	10...30
Cadmium	0,03...10	< 0,1...1	5...10	0,5...1
Chrom	< 0,5	0,1...1	1...2	50...3000
Kupfer	0,01...2	3...15	15...20	30...100
Nickel	0,01...2	< 0,1...5	20...30	50...60
Quecksilber	< 0,05	< 0,1...0,5	0,5...1	> 1
Thallium	0,03...10	0,5...5	20...30	1...5
Zink	0,03...10	15...150	150...200	300...1000

Transferkoeffizienten Boden-Pflanze, normale & kritische SM-Konzentrationen in Pflanzen (mg kg<sup>-1</sup> TM)

### III. Organische Schadstoffe

Etwa 2.000 Verbindungen (von einigen Millionen chemischen Substanzen) werden aufgrund ihrer Toxizität, Persistenz oder Bioakkumulationsneigung als umwelt-relevant angesehen.

Klassifizierung: Hauptsächlich **substanzbezogen** nach den bekannten physikalisch-chemischen Daten von Stoffen aus technischen Anwendungen:

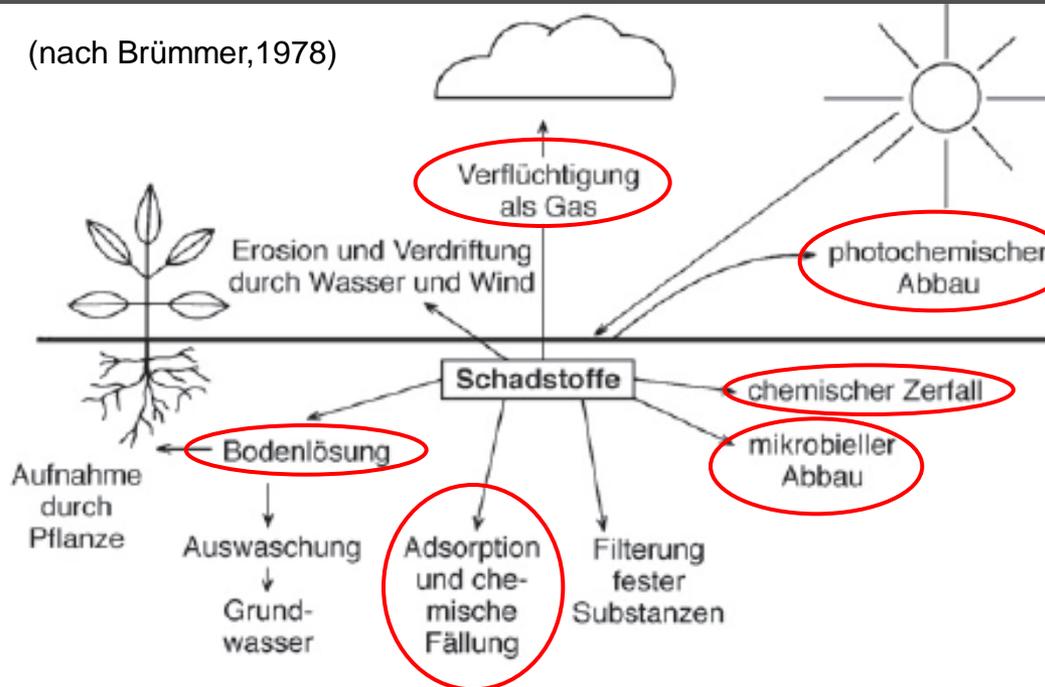
Produktion, Anwendungsmuster, Ausbreitung in der Umwelt, Persistenz und Abbau sowie Umwandlung

Leitsubstanzen: MKW, LHKW, BTEX, PCB, PAK

Quellen: hauptsächlich anthropogen durch Chemische Industrie, Verbrennung bzw. Verschwelung fossiler Brennstoff

# Mobilität und Verfügbarkeit in Böden

(nach Brümmer, 1978)



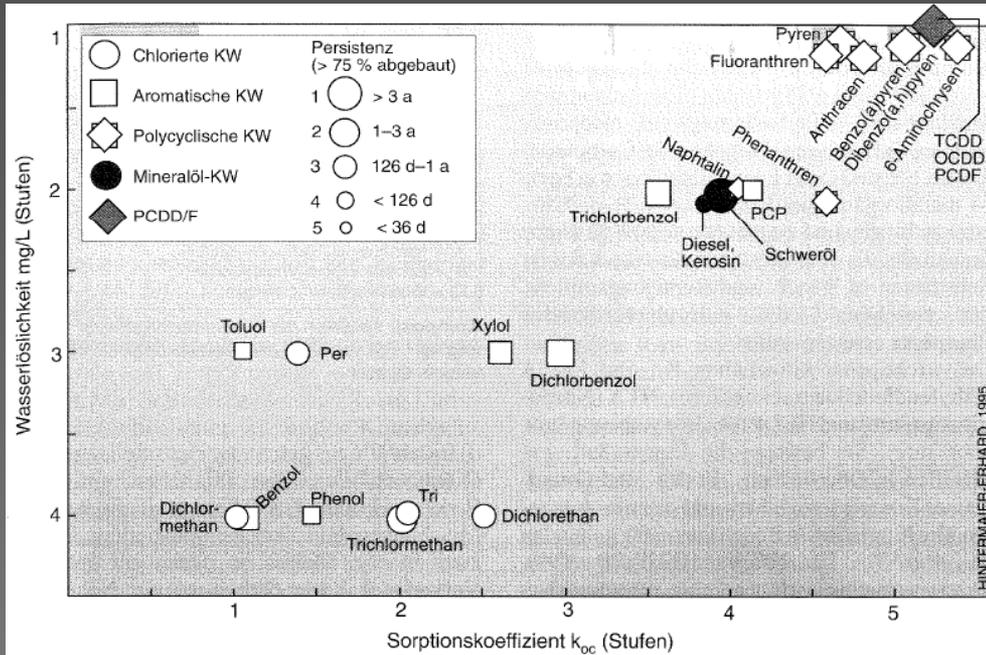
## Transformationsreaktionen

- physikalisch/ chemischer Abbau
- biologischer Abbau (katalysiert durch Bodenorganismen unter aeroben & anaeroben Bedingungen)
- Mineralisation & Metabolisierung
- Adsorption (hauptsächlich an organische Substanz, Bildung von „bound residues“)

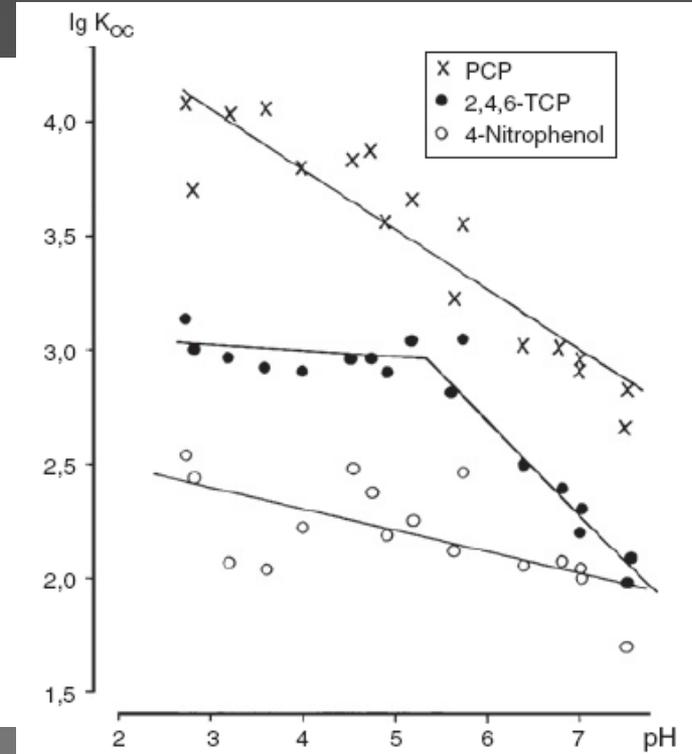
## Steuernde Faktoren

- physikalisch-chemische Stoffeigenschaften ( $K_{OW}$ -,  $K_{OC}$ -Wert)
- Menge, Art und Zeitpunkt des Eintrags und Konzentration im Boden
- Bodeneigenschaften (Ton Gehalt, Gehalt an OS, pH-Wert, Redoxpotenzial, Wassergehalt)
- Klimatische Bedingungen
- Art des Bewuchses (Ausbildung der Wurzel, Transpiration, Nährstoffe),
- landwirtschaftliche Bewirtschaftung

# Sorptionsverhalten, Wasserlöslichkeit und Persistenz wichtiger Kohlenwasserstoffe



(Hintermaier-Erhard und Zech, 1997)



**Abb. 10.3-2** Beziehungen zwischen den  $\lg K_{OC}$ -Werten von Pentachlorphenol (PCP), 2,4,6-Trichlorphenol (2,4,6-TCP) und 4-Nitrophenol von 17 Bodenproben aus A-Horizonten und deren pH-(CaCl<sub>2</sub>)-Werten (nach KUKOWSKI & BRÜMMER 1988).

$K_{OC}$ -Werte (Sorptionskoeffizient normiert auf den  $C_{org}$ -Gehalt) sind eng mit der Wasserlöslichkeit der jeweiligen Chemikalie und ihren Octanol/Wasser-Verteilungskoeffizient ( $K_{OW}$ , Polaritätsmaß) korreliert und zudem **pH-Wert** abhängig.

## Erweiterung des „critical load“-Konzepts notwendig?

„Critical loads“ stellen ein quantitatives Maß ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) für einen oder mehrere Belastungsfaktoren dar, **unterhalb denen** nach dem heutigen Stand des Wissens längerfristig **keine nachteiligen Effekte** zu erwarten sind.

Anwendbar auch auf die Abschätzung von Risiken zukünftiger Stoffeinträge?

- hinsichtlich sich verändernder Klima- und Umweltbedingungen (Boden-pH, Niederschlags-/Sickerwassermenge, Temperatur, Landnutzung,...) → potentielle Mobilisierung akkumulierter Schadstoffe in Böden, veränderte Wirkungspfade
- hinsichtlich unterschiedlicher (und schwer erfassbarer) Zeitskalen von Prozessraten (langsam: Verwitterung/SM-Akkumulation  $\leftrightarrow$  schnell: Freisetzung)  
→ „chemical time bomb“
- hinsichtlich anderer Schutzgüter (receptors of potential concern, ROPCs)  
→ z.B. Auswirkungen auf die Kopplung terrestrischer und aquatischer Ökosysteme, Transfer zwischen trophischen Ebenen

## Erweiterte Konzepte – Dynamische Modellierungsansätze

- Kopplung von „steady-state“ und dynamischen Modellen
- Identifikation und Abschätzung von Unsicherheiten im Prozessverständnis und Datenerhebung
- Regionalisierung lokaler CL und Kopplung mit Biodiversität
- Verknüpfung von Schadstoffdeposition mit Auswirkungen auf die Bodenchemie, Artpräsenz und Habitatqualität (Rowe et al., 2006; Smart et al., 2005) oder biotische Ökosystemparameter wie Biodiversität, Zuwachs- oder Photosyntheseraten (Sverdrup et al., 2005)

Danke für Ihre Aufmerksamkeit