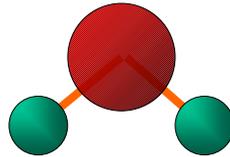


Vorlesung Wasserinhaltsstoffe

Dr. Thomas Dittmar

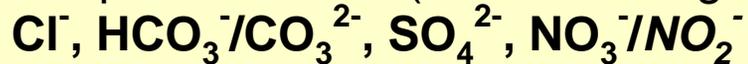


Anionen

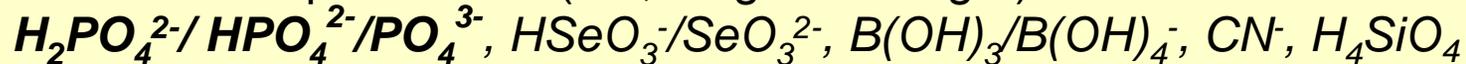
Anorganische Anionen als natürliche Wasserinhaltsstoffe

1. natürliche Wasserinhaltsstoffe

Hauptinhaltsstoffe (meist > 10 mg/L)



Neben- und Spurenstoffe (< 0,1 mg/L < 10 mg/L)



2. Vorkommen, Quellen (natürlich, anthropogen), Wirkung (Humange-sundheit, Ökologie), Entfernung (Wasseraufbereitung)

Chloridionen, Cl⁻

Vorkommen

- geogen:
- 18-häufigstes Element der Erdkruste (0,0314 %)
 - bedeutendstes Halogenid (F⁻ < 0,5 mg/L, Br⁻ < 0,5 mg/L, I⁻ < 0,1mg/L)
 - kein elementares Auftreten in der Natur, sondern in Verbindung mit Alkalimetallen, Erdalkalien usw.
 - hohe **natürliche Freisetzung** aus Mineralsalzen
Steinsalz (NaCl), Sylvin (KCl), Carnallit (KCl · MgCl₂·6 H₂O)
 - kommen in allen natürlichen Gewässern vor (ausgezeichnete Löslichkeit)
 - v. a. im Meerwasser 19 g/L; Grundwässer 10...30 mg/L
- anthropogen:
- belastete Oberflächenwässer > 100 mg/L weisen auf anthropogene Verschmutzungen hin
 - NaCl wichtigstes Mineralsalz (Speisesalz, Konservierungsmittel)
 - Taupunkterniedriger (Streusalz)
 - Medizin: physiologische Kochsalzlösung
 - Grundstoff in der chemischen Industrie (Chlor-Alkali-Elektrolyse)
 - industrielle Abwässer (z.B. Kaliindustrie, Chloride sind Abprodukte vieler chemischer Prozesse)
 - Verbrennung chlorhaltiger Organika (Pflanzenmaterialien, PVC, etc.)

Chloridionen, Cl⁻

Grenzwert nach Trinkwasserverordnung 2001 (TrinkwV 2001)

Anlage 3: Indikatorparameter

lfd. Nr. 1

250 mg/L

- **nicht humantoxikologisch begründet!!!**

- essentielles Spurenelement:

Chlorid ist notwendig zur Produktion von Magensäure und zur Aufrechterhaltung der Osmose im Organismus (Ausscheidung über Niere und Schweiß)

* Zusammenhang zwischen Salzkonsum und Bluthochdruck konnte bis heute nicht nachgewiesen werden.

- täglicher Bedarf: 3 – 12 g/d

- **sensorischer Wert**

(geschmackliche Beeinträchtigung ab 250 mg/L)

- Ökotoxizität: hohe Cl⁻-Konz. belasten Osmoseregulation von Süßwasserorganismen

Chloridionen, Cl⁻

- Chloridionen unterliegen in Gewässern keinen nennenswerten Umwandlungen
→ **konservative Ionen**
- werden durch herkömmliche Verfahren der Wasseraufbereitung nicht entfernt

Ausnahme: Verfahren zur Vollentsalzung

1) Ionenaustausch

- mit Hilfe stark basischer Ionenaustauscherharze in OH⁻-Form

2) Umkehrosmose

- Anwendung in Meerwasserentsalzung

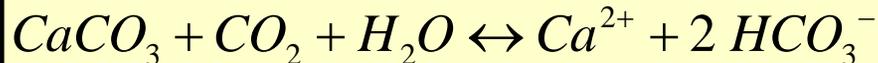
Hydrogencarbonationen HCO_3^-

Vorkommen

- geogen:
- in der Regel Anion mit der höchsten Konzentration in natürlichen Gewässern (Süßwässern)
 - Kohlenstoff 17-häufigstes Element der Erdkruste
 - Eintrag aus der Atmosphäre (Respiration heterotropher Organismen)



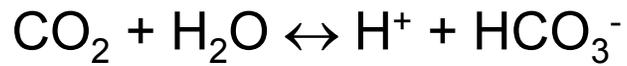
- Auflösung von Carbonaten (Ca/MgCO_3)



Kalk-Kohlensäure-Glg.

- anthropogen:
- indirekt durch Versauerung der Hydro- u. Pedosphäre
 - Erhöhung des CO_2 - Gehalts in der Atmosphäre

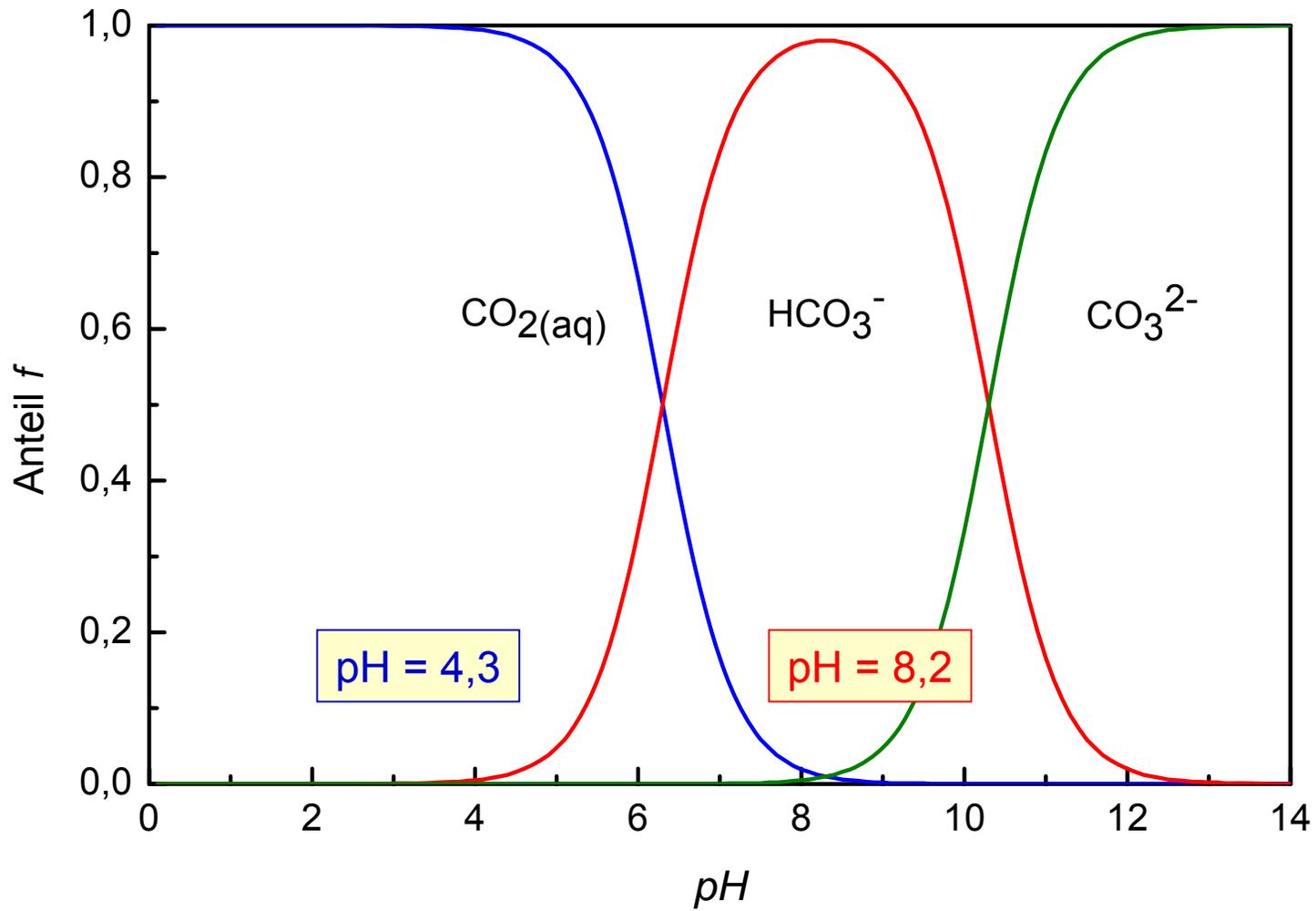
Kohlensäure CO₂, aq



$$pK_{S1} = 6,3$$

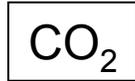


$$pK_{S2} = 10,3$$



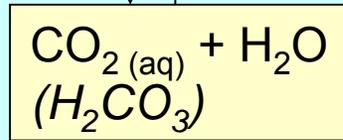
Hydrogencarbonationen HCO_3^-

Henry Gesetz:



$H(\text{CO}_2) = 52,47 \text{ mol/m}^3 \cdot \text{bar}$ $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
 $p(\text{CO}_2) = 0,00035 \text{ bar}$
 $c_{\text{sat.}} = 0,808 \text{ mg/L}$

Atmosphäre



Hydrosphäre

$c_{\text{CO}_2}^{\text{fl}} = H \cdot p_{\text{CO}_2}$

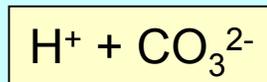
Dissoziation 1. Stufe

$K_{s1} = \frac{c(\text{H}^+) \cdot c(\text{HCO}_3^-)}{c(\text{CO}_2)}$



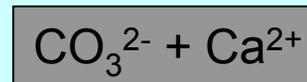
Dissoziation 2. Stufe

$K_{s2} = \frac{c(\text{H}^+) \cdot c(\text{CO}_3^{2-})}{c(\text{HCO}_3^-)}$



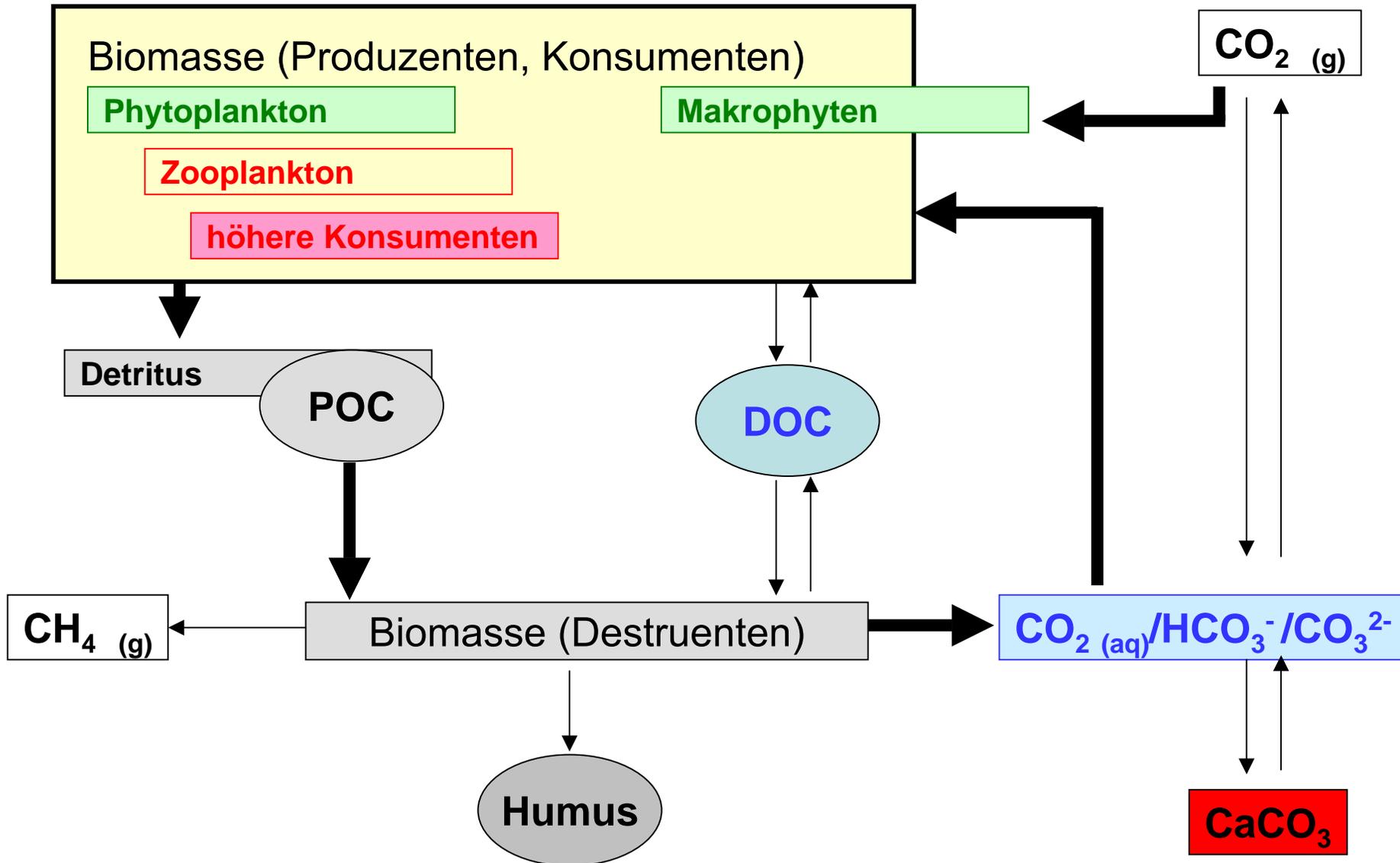
Löslichkeitsgleichgewicht: $pK_L = 8,48$

$K_L = c(\text{Ca}^{2+}) \cdot c(\text{CO}_3^{2-})$



Sediment/Boden

Kohlenstoffkreislauf in Oberflächengewässern



Hydrogencarbonationen HCO_3^-

Grenzwert nach Trinkwasserverordnung 2001 (TrinkwV 2001)

Anlage 3: Indikatorparameter

lfd. Nr. 1

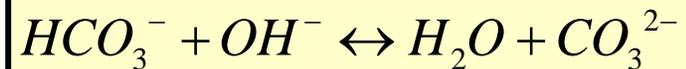
kein Grenzwert

- essentielles Spurenelement:

HCO_3^- regelt Säure-Basen-Haushalt im Blutkreislauf ($7,35 < \text{pH} < 7,45$)

- ökologische Bedeutung:

wichtigstes Puffersystem natürlicher Gewässer (bindet eingetragene H^+ und OH^-)



Trinkwasseraufbereitung: unbedenklicher Inhaltsstoff,
aufbereitetes Wasser: Einstellung des KKG

Basendosierung, Belüftung, Filtration über basische Materialien (Marmorfiltration)

Sulfationen, SO_4^{2-}

Vorkommen

- geogen:
- hohe **natürliche Freisetzung** aus Gips (CaSO_4) und Sulfiden (FeS_2)
 - Löslichkeit $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ (2 g/L)
 - Schwefel 14-häufigstes Element der Erdkruste
 - kommen in allen natürlichen Gewässern vor
 - in Oberflächenwässern bis 100 mg/L
 - Bestandteil des mikrobiologischen Schwefelkreislaufs
- anthropogen:
- belastete Oberflächenwässer > 100 mg/L weisen auf anthropogene Kontamination hin
 - Schwefelsäure bedeutendste anorganische Grundchemikalie
 - Düngemittel, Insektizide, Farbstoffe
 - Verbrennungsprozesse fossiler Kohlenstoffe: Bildung von SO_2
 - feuchte Deposition (Sulfatbildung, saurer Regen)

Sulfationen, SO_4^{2-}

Grenzwert nach Trinkwasserverordnung 2001 (TrinkwV 2001)

Anlage 3: Indikatorparameter

lfd. Nr. 1

240 mg/L

- nicht humantoxikologisch begründet!!!

- * essentielles Spurenelement [Stoffwechsel, Bestandteil von Aminosäuren Methionin, Cystein]
- * Bildung von Proteinen, Co-Enzymen, Vitaminen (Thiamin, Biotin) und Keratin
- * in höheren Konzentrationen abführende Wirkung (**Laxans**; Glaubersalz)

- sensorischer Wert

geschmackliche Beeinträchtigung ab >250 mg/L („brackiger“ Geschmack)

- technischer Wert

Ettringitbildung: ab 300 mg/L

- Trinkwasseraufbereitung:

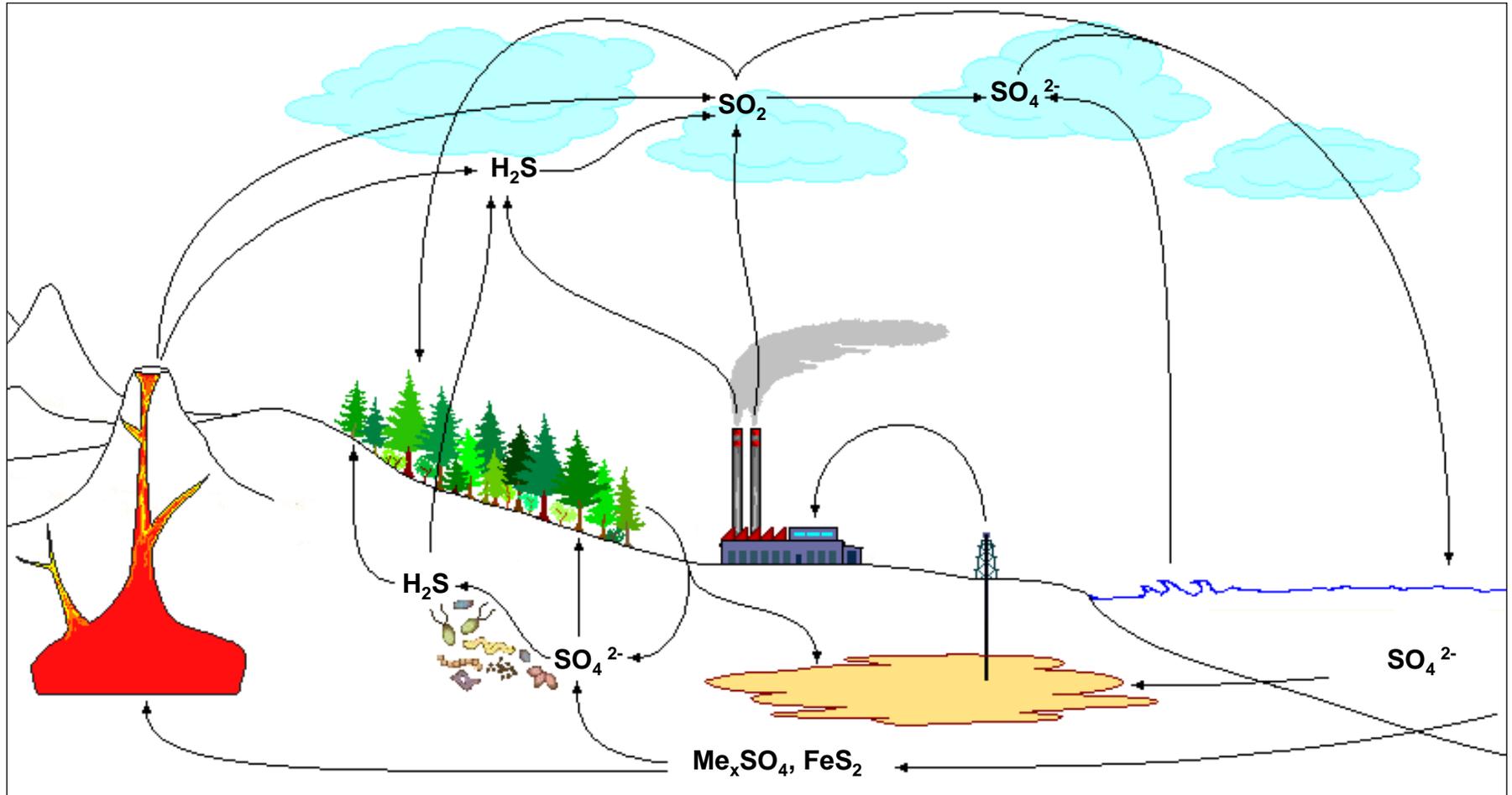
Ionenaustausch mit stark basischen Anionenaustauschern,
Nanofiltration u. Umkehrosmose

Globaler Schwefelkreislauf

- Schwefel tritt in Oxidationsstufen zwischen -2 und +6 auf
- Sedimentgesteine sowie Mineralsalze der Ozeane stellen höchsten Schwefelpool
- 0,00015 % des Gesamtschwefels liegt in niedrigen Wertigkeitsstufen (-2, 0) vor
- **anthropogene Nutzung:** Sulfide, elementarer Schwefel (Reichweite 300 a)
- beeinflusst dadurch globalen Kreislauf erheblich (SO₂ /Sulfatgehalte Hydrosphäre)
- Lebewesen setzen in erheblichen Umfang Schwefel um  mikrobieller Kreislauf

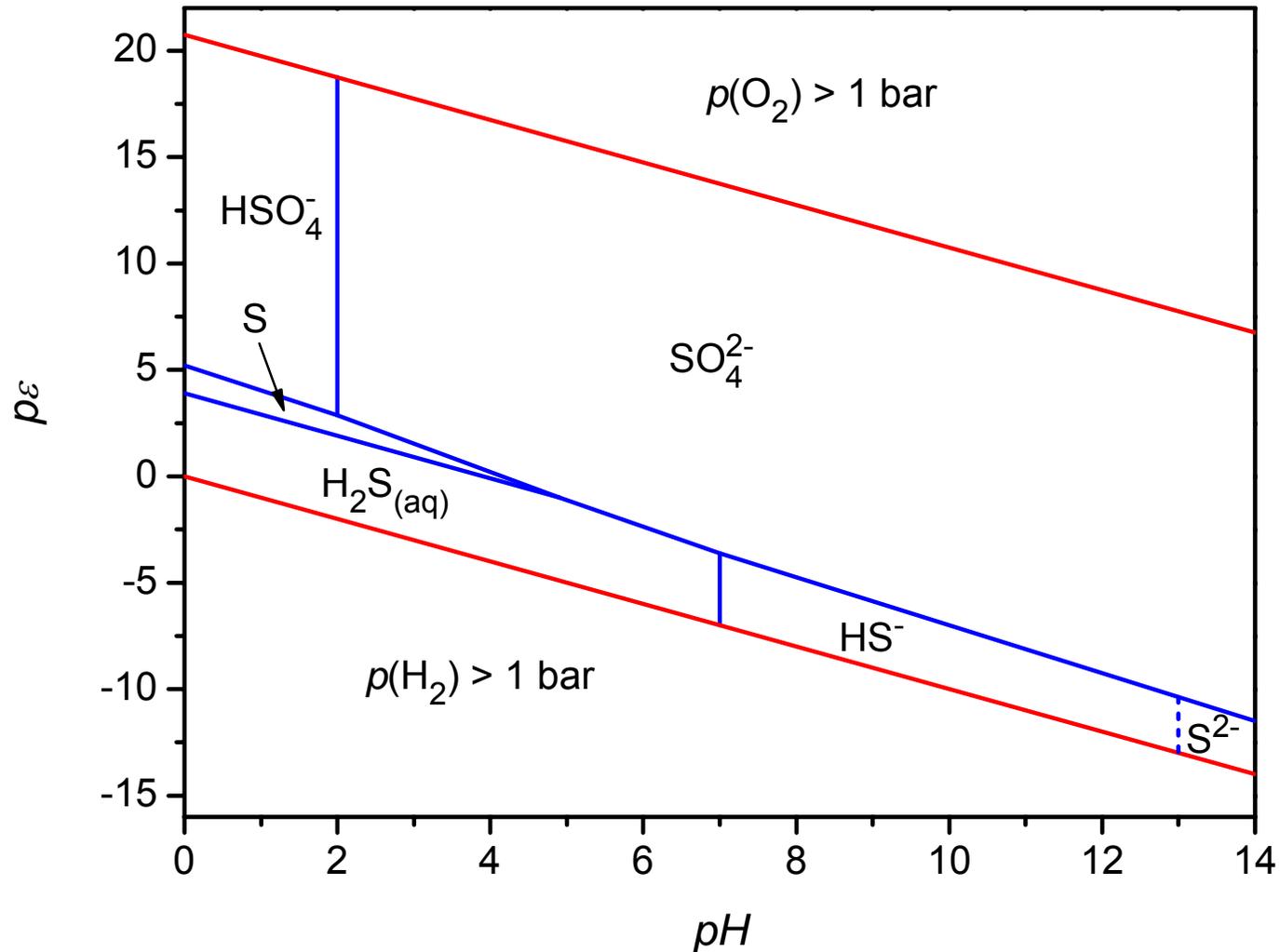
Kompartiment	Schwefelgehalt [t S]	Verbindungen
Atmosphäre	$1,5 \cdot 10^6$	SO ₂ , H ₂ S, SO _{3/4} ²⁻
Pedosphäre	10^{14}	S ₀ , H ₂ S, (FeS), SO ₄ ²⁻
Hydrosphäre	$1,3 \cdot 10^{15}$	SO ₄ ²⁻ , HS ⁻ /S ²⁻
Biosphäre	$6 \cdot 10^9$	org. S-vbnd. (Aminosäuren)

Globaler Schwefelkreislauf



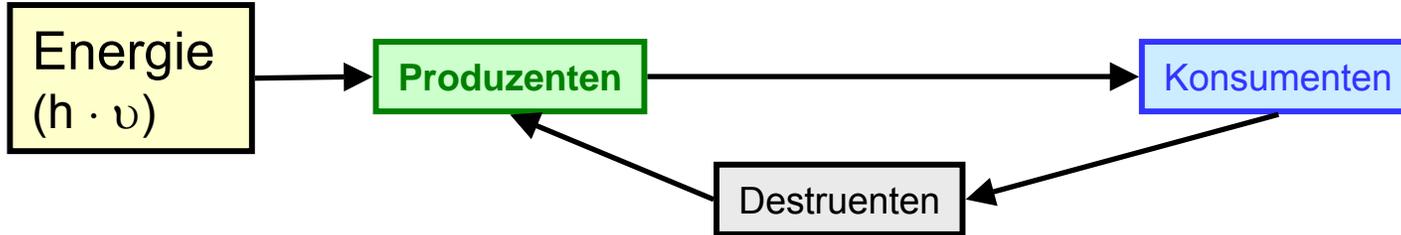
$p\varepsilon - pH$ - Diagramm des Schwefels

$c(S) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ mol/L}$, wässrige Lösung (OZ -2, ± 0 , +6)



Grundbegriffe zum Metabolismus

- Aufrechterhaltung von Lebensfunktion (Energiestoffwechsel) und Aufbau körpereigener Stoffe (Baustoffwechsel) aus körperfremden
- Grundstoff des Lebens sind die organischen Stoffe (CH_2O), Stoffwechsel \rightarrow Kohlenstoffwechsel



Kategorisierung des Energie- und Baustoffwechsels

Energiequelle	<i>Licht</i> Redoxreaktion	photo- chemo-	troph
Elektronendonator	<i>organische Verbindung</i> (CH_2O) <i>anorganische Verbindung</i> (H_2O)	organo- litho-	
Kohlenstoffquelle	<i>organische Verbindung</i> (CH_2O) <i>anorganische Verbindung</i> (CO_2)	hetero- auto-	

Photosynthese: **photolithoauto**tropher Stoffwechsel
 C-Quelle (CO_2) \rightarrow autotroph
 Energiequelle ($h \cdot \nu$), Elektronendonator (H_2O) \rightarrow photolithotroph

Mikrobiologischer Schwefelkreislauf

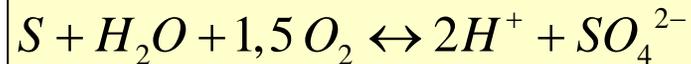
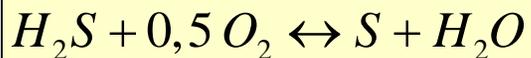
(1) Abbau organischer Schwefelverbindungen (heterotroph-chemoorganotroph)

anaerob (Desulfurylation) Fäulnisabbau org. S-verbindungen (*Escherichia, Proteus*) zu H_2S

aerob Abbau org. S-verbindungen zu Sulfat (*Aspergillus, Neurospora*)

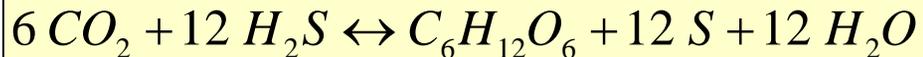
(2) Sulfidoxidation (Sulfurikation)

chemolithoautotroph farblose S-Bakterien (*Acidithiobacillus*) nutzen H_2S als Energiequelle



photolithoautotroph

Grüne S-Bakterien nutzen Licht zum Aufbau von Kohlenhydraten unter obligat anaeroben Bedingungen (anoxygene Photosynthese)

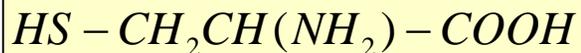


(3) Sulfatreduktion

assimilatorisch

Aufbau org. S-verbindungen (Aminosäuren)

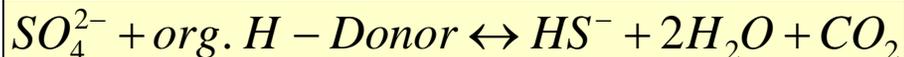
(photolithoautotroph)



dissimilatorisch

obligat anaerobe Bakterien (***Desulfovibrio, Desulfobacter***)

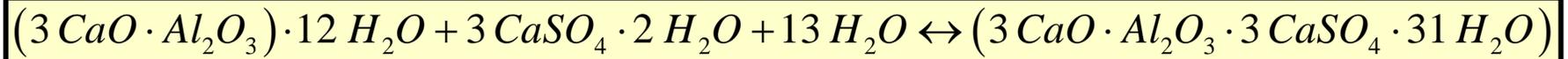
(chemorganoheterotroph) nutzen Sulfat als Oxidationsmittel → **Sulfatatmung (Desulfurikation)**



Ettringit-Bildung

Reaktion von Tricalciumaluminat (Zementbestandteil)

Tricalciumaluminat-haltiger Beton (Portlandzement) bindet Gips aus sulfathaltigen Wasser



hohe Wasseraufnahme (Aufblähung) \Rightarrow Rissbildung \Rightarrow Materialzerstörung
(Festigkeitsminderung)

Nitrationen NO_3^-

Vorkommen

- dominierende anorganische Stickstoffverbindung im Wasser (thermodynamisch begünstigt)
- ausgezeichnete Wasserlöslichkeit, geringe Sorptionsneigung
- wichtiger Bestandteil des natürlichen Stickstoffkreislaufs

geogen: - Verwitterung der Mineralsalze (Salpetersalze) ist nur von untergeordneter Bedeutung

anthropogen: - kommunale Abwässer
- Düngemittel (Nitrat-, Ammonium- und Harnstoffdünger)
- N-Eintrag: diffus (70%), punktuell durch häusliche Abwässer (30 %)
- Nitratgehalt in Oberflächen/Grundwässern korreliert mit Düngemittelanwendung

Nitrationen NO_3^-

Grenzwert nach Trinkwasserverordnung 2001 (TrinkwV 2001)

Anlage 3: Indikatorparameter

lfd. Nr. 1

50 mg/L

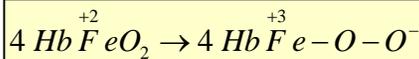
Nitrit: 0,5 mg/L (Ausgang Wasserwerk: 0,1 mg/L), außerdem: $c(\text{NO}_3^-)/50 + c(\text{NO}_2^-)/3 \leq 1 \text{ mg/L}$

- **humantoxikologisch begründet!!!** (stellt Gesundheitsgefährdung dar)

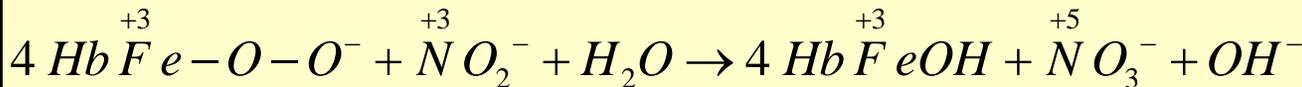
(1) *Primärwirkung*: bei hohen Konzentrationen **Reizung der Darmschleimhaut**

Sekundär- bzw. Tertiärwirkung durch mikrobiologische **NO_2^- -Bildung** (Nitratreduktasen) im Magen-Darm-Trakt

(2) **Methämoglobinämie** („Blausucht“) bei Säuglingen (bis 3 Monate)

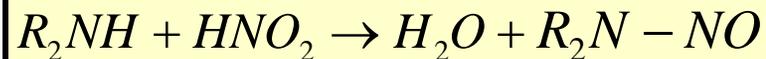


Oxyhämoglobin \rightarrow Hb-Fe³⁺-Superoxid



Methämoglobin

(3) **Nitrosaminbildung**



pH \leq 4

- cancerogene, teratogene und mutagene Wirkung

Nitrationen NO_3^-

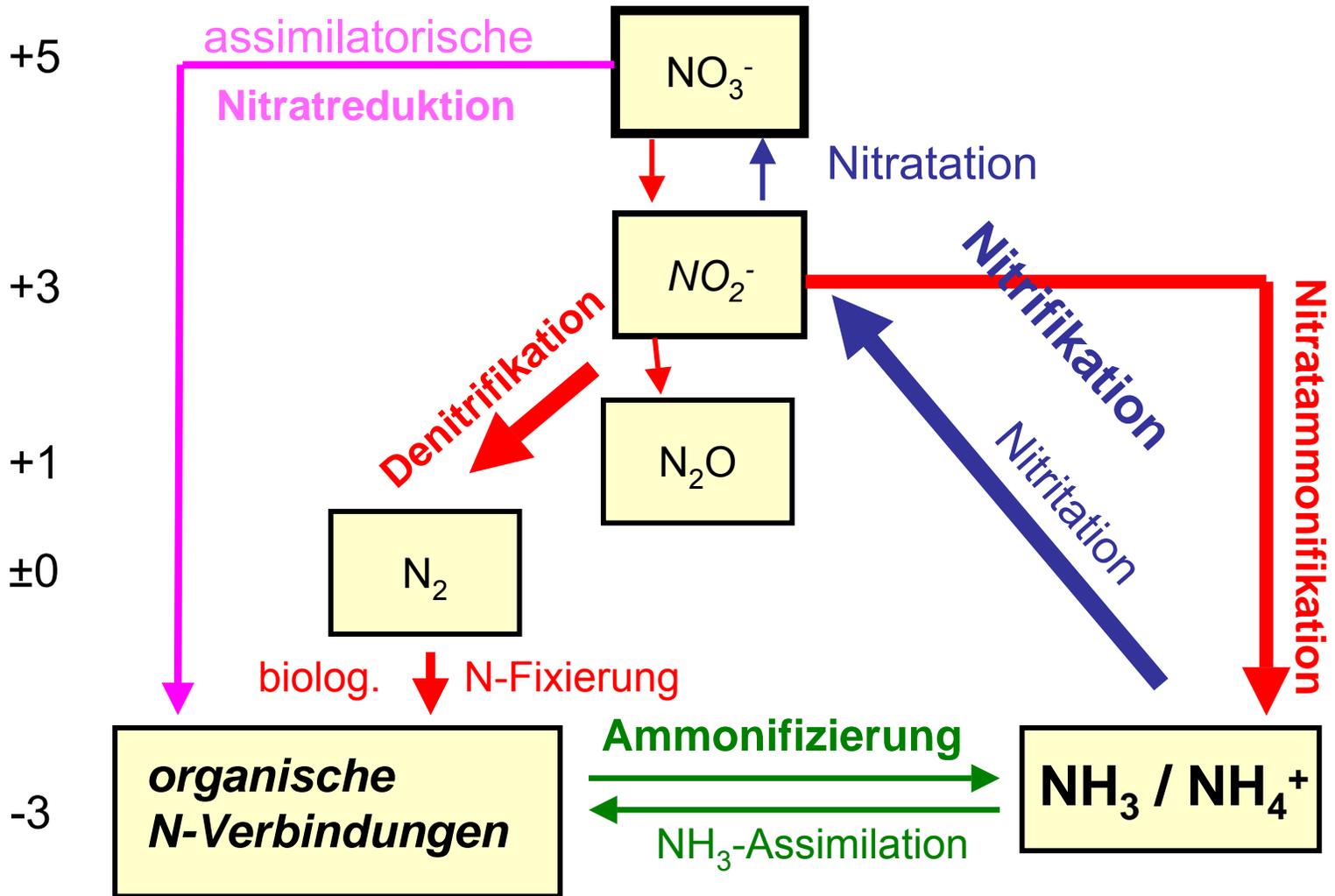
Ökologische Wirkung

unkontrollierter Düngemiteleinsatz führt durch Auswaschen oder Luftmassentransport zu erhöhten Nitratgehalten in der Hydrosphäre

Verursacher der Eutrophierung natürlicher Gewässer (neben Phosphat)

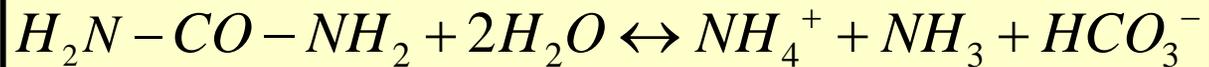
- übermäßige Primärproduktion pflanzlicher Biomasse verbraucht bei der oxidativen Mineralisierung mehr O_2 als durch Diffusion aus der Atmosphäre nachgeliefert wird,
- Schädigung des Gewässers bis zum völligen Umkippen (reduzierende Bedingungen)
 - kompletter Verlust der Bestände an höheren Wasserorganismen
 - Reduzierung der Biodiversität

Stickstoffkreislauf



Bildung von Nitrat

Harnstoffhydrolyse (Ammonifikation, Urease)



Nitrifikation (Nitrogenase chemolithoautotroph)



Nitritation (*Nitrosomonas*)

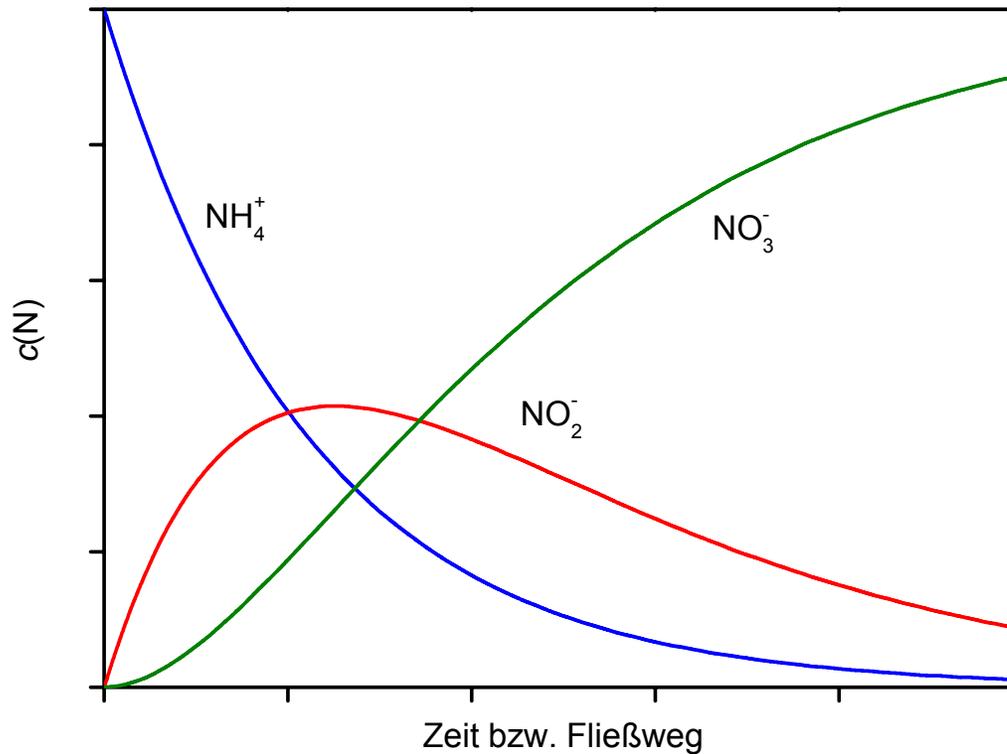


Nitratation (*Nitrobacter*)



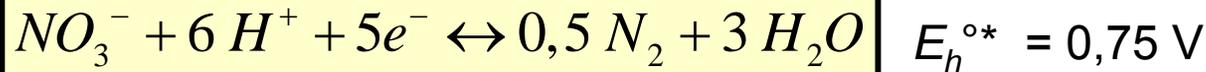
Nitrifikation

Folgereaktion: $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ (schematische Darstellung)



Abbau von NO_3^- (Nitratatmung)

Denitrifikation



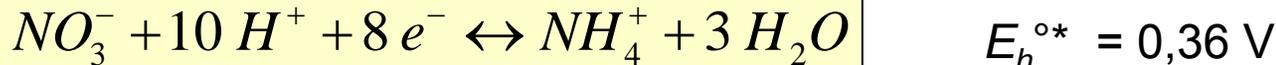
Abbau organischer Substanz



$$\Delta G^0 = -n \cdot F \cdot \Delta E^0 = -n \cdot 96,5 \cdot \Delta E^0$$
$$\Delta E^0 = E_1^0 - E_2^0$$

unter anoxischen Bedingungen (O_2 – Mangel) reduzieren *Pseudomonas*, *Paracoccus denitrificans*, *Thiobacillus denitrificans* (S-Oxidation)

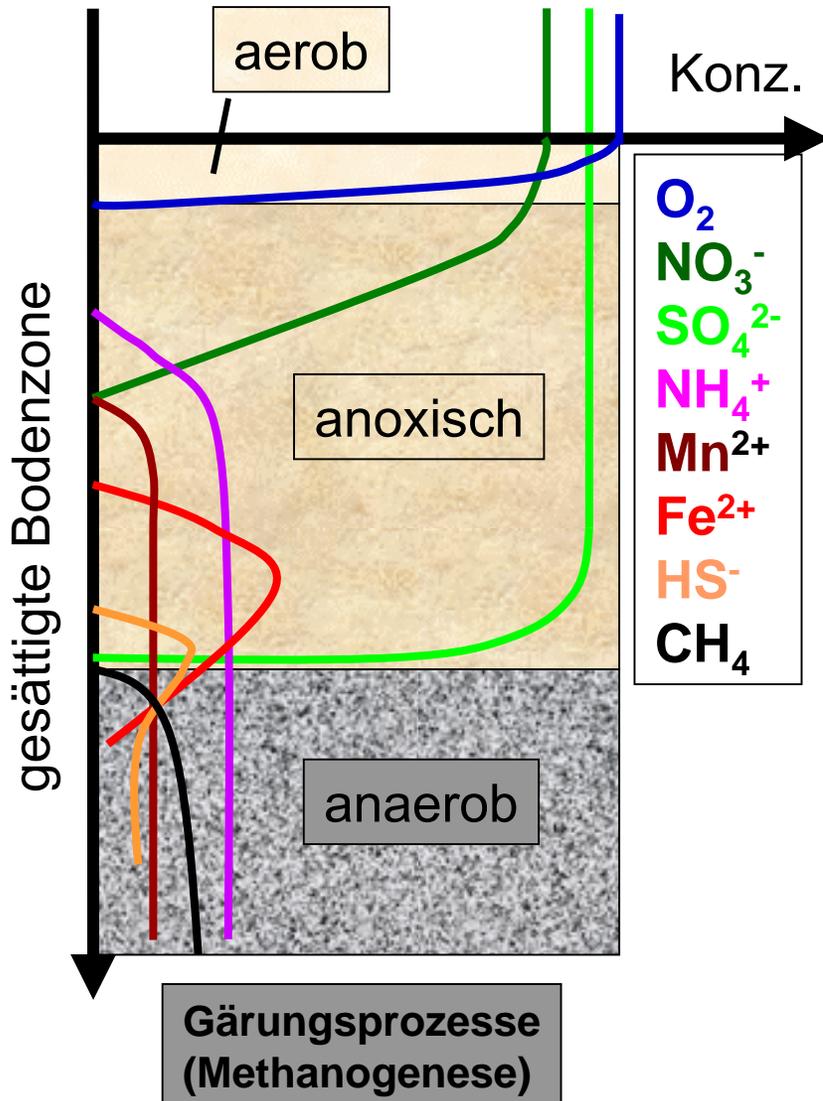
Nitratammonifikation



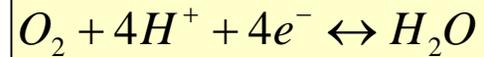
unter anoxischen Bedingungen reduzieren *Enterobacteriaceae* NO_3^- (Nitratreduktase über NO_2^- (Nitritreduktase) zum NH_4^+)

Sequenz der Elektronenakzeptoren

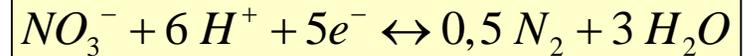
schematische Zusammensetzung eines organ. belasteten Grundwassers



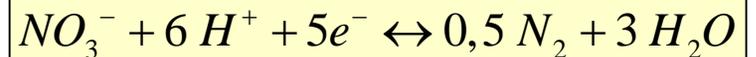
(1) Sauerstoffatmung ($E_h^{\circ*} = 0,82 \text{ V}$)



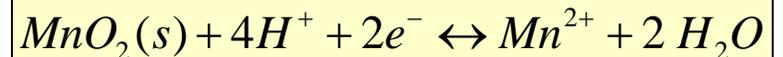
(2) Denitrifikation ($E_h^{\circ*} = 0,75 \text{ V}$)



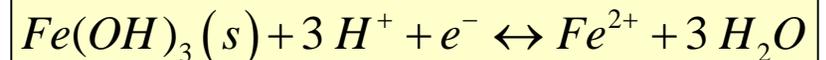
(3) Nitratammonifikation ($E_h^{\circ*} = 0,37 \text{ V}$)



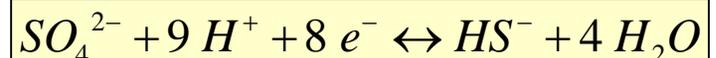
(4) Manganreduktion ($E_h^{\circ*} = 0,39 \text{ V}$)



(5) Eisenreduktion ($E_h^{\circ*} = 0,15 \text{ V}$)



(6) Desulfurikation ($E_h^{\circ*} = -0,24 \text{ V}$)



Nitrationen NO_3^-

Abwasserbehandlung:

biologische Reinigungsstufe → biochemischer Abbau durch Denitrifikation

Trinkwasseraufbereitung:

Maßnahmen der Vollentsalzung

Ionenaustausch

- mit Hilfe stark basischer Ionenaustauscherharze in OH^- -Form

Umkehrosmose

Hydrogenphosphat-/Dihydrogenphosphationen

Vorkommen

- geogen:
- 11-häufigstes Element der Erdkruste
 - natürliche Phosphorverbindungen immer in OS +5 (Bindung mit O₂)
 - Salze der Phosphorsäure
 - **natürliche Freisetzung** aus Phosphatmineralen
- Brushit (CaHPO₄ · 2H₂O), Monetit (CaHPO₄) Fluorapatit [Ca₁₀(PO₄)₆F₂],**
- in Hydrosphäre meist als HPO₄²⁻/H₂PO₄⁻ (günstigere Löslichkeit)
 - geringe Konzentrationen in unbeeinflussten Gewässern (< 50 µg/L)
 - organisch gebunden in aquatischer Biomasse

- anthropogen:
- 100 Mio t Rohphosphat gefördert (Marokko, USA)
 - davon 90 % Düngemittelphosphate
 - kommunale Kläranlagen
 - Waschmittelbestandteil als Enthärtungsmittel (Na₅P₃O₁₀)
 - Eutrophierung: häusliche Abwässer (91 %) > Landwirtschaft (9 %)

menschliche Ausscheidungen: ca. 1,6 g P /(E d)
Bei 130 L/(E d) → **14,6 mg/L P**

Hydrogenphosphat-/Dihydrogenphosphationen

Grenzwert nach Trinkwasserverordnung 2001 (TrinkwV 2001)

Anlage 3: Indikatorparameter

lfd. Nr. 1

6,7 mg/L

-humantoxikologisch nicht begründet!!!

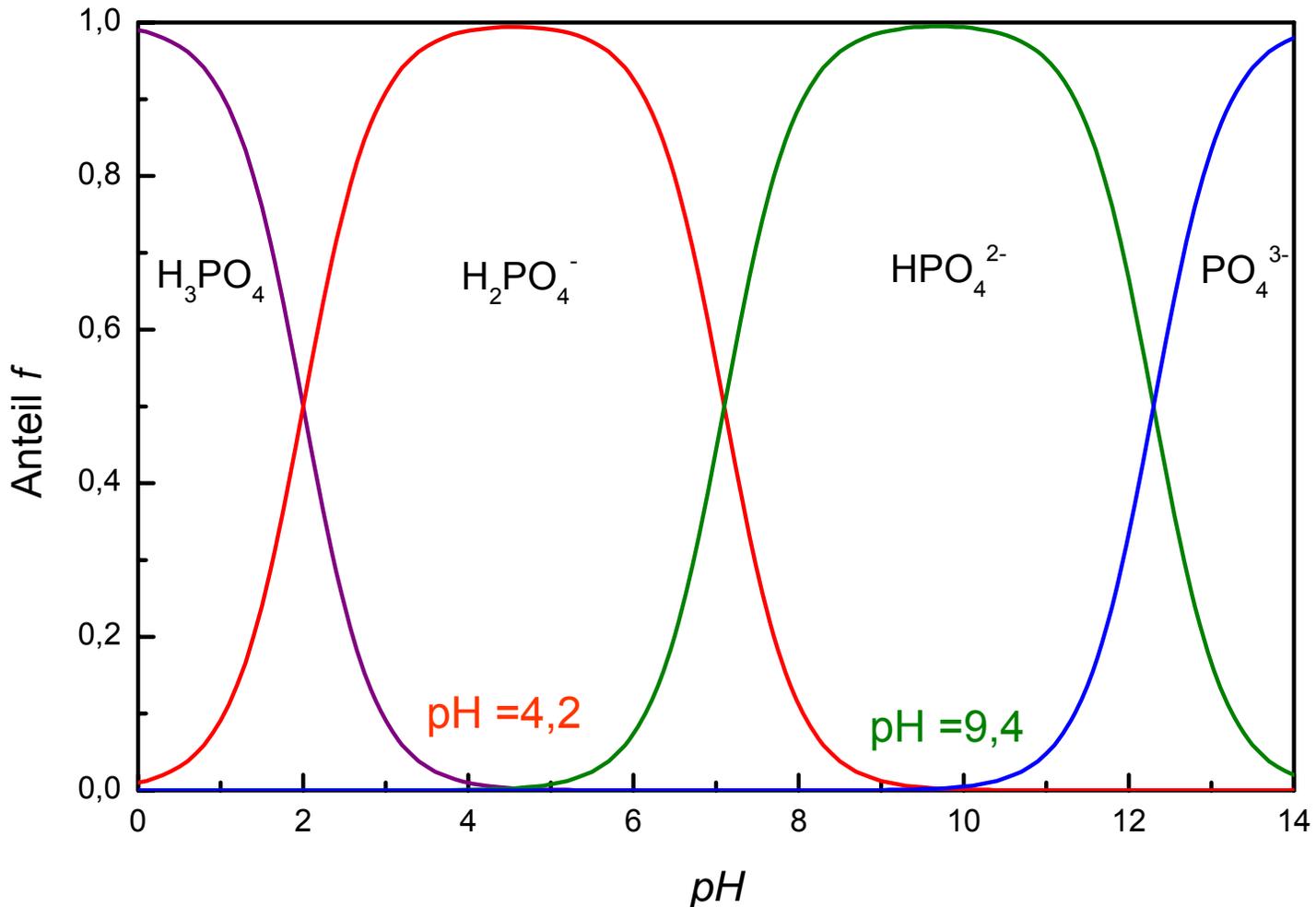
- in üblichen Konzentrationen nicht gesundheitsschädlich (unproblematisch)
- essentielles Spurenelement: wichtig f. Knochen [$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$], DNA-Baustein
- täglicher Bedarf: 1 – 1,2 g/d

Ökologische Bedeutung:

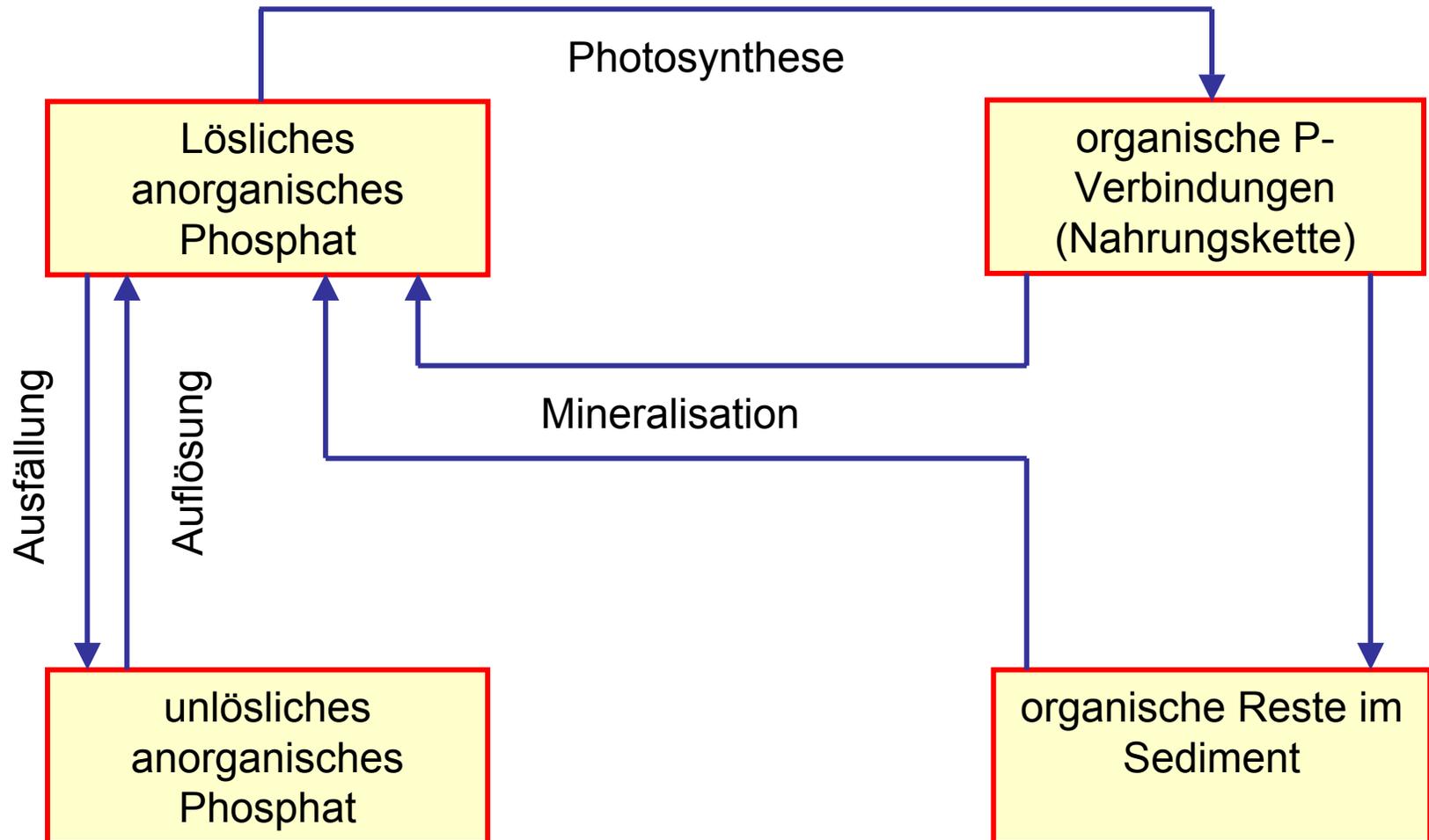
- strenge Anforderungen ans Abwasser
- Phosphor ist i. d. R. der Wachstum limitierende Nährstoff
- Hauptursache der Gewässereutrophierung

Grenzwert: 1 ... 2 mg/L

Speziationsdiagramm



Phosphorkreislauf



Phosphorkreislauf – P-Formen im Gewässer

P (gelöst)		P (suspendiert)	
anorganisch	organisch	anorganisch	Plankton (Tripton)
Orthophosphate HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-	Nukleinsäuren (Phytin) Inosithexaphosphat	anorg. Salze $\text{FePO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, $\text{AlPO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ $(\text{Mn, Fe})_3(\text{PO}_4)_2$	ADP---ATP RNA - Algen - Bakterien - Protzoen
Polyphosphate ger. Pflanzen- verfügbarkeit Hydrolyse zu ortho-Phosphat	Phosphorlipide Phosphorproteine	Tonminerale Apatite $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$	abgestorbene Biomasse α -Lecithin (Bestandteil biol. Membranen)

Eutrophierung

Eutrophierung: Überdüngung griech.: eutroph = „gut genährt“

Trophiegrad: Intensität der autotrophen Produktion org. Substanz

Ursachen: **Überdüngung** mit **Pflanzennährstoffen** (Phosphat, Nitrat)

Folge: vermehrte Primärproduktion (Algen, höhere Wasserpflanzen)
→ absinkende Biomasse benötigt für aeroben Abbau viel O₂
→ O₂-Mangel: Absterben höherer Wasserorganismen
→ anoxischer, anaerober (Fäulnis-)Abbau der Biomasse führt zu giftigen Zwischenprodukten (H₂S, CH₄, NH₄⁺)

physikalische Einflussparameter (besondere Bedeutung für Standgewässer):

1) Lichtverhältnisse

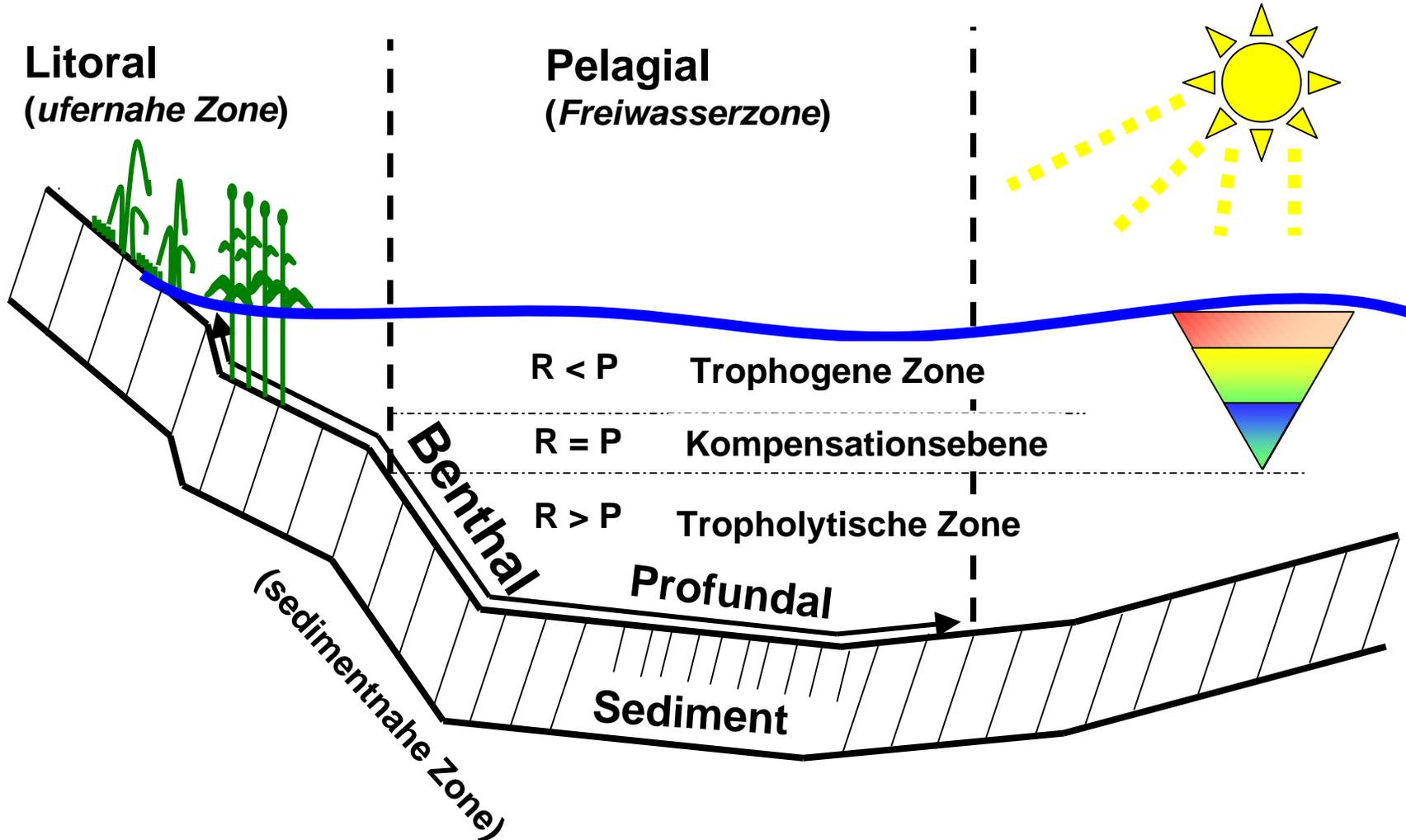
- photoautotrophe Produktion Kompensationspunkt bei $E_{\min} = 300 \text{ lx}$
- Ausdehnung unterseeischer (submerser) Makrophytengürtel

2) **Temperatur** und **Schichtung** (je größer epilimnische Schicht, je höher Primärproduktion)

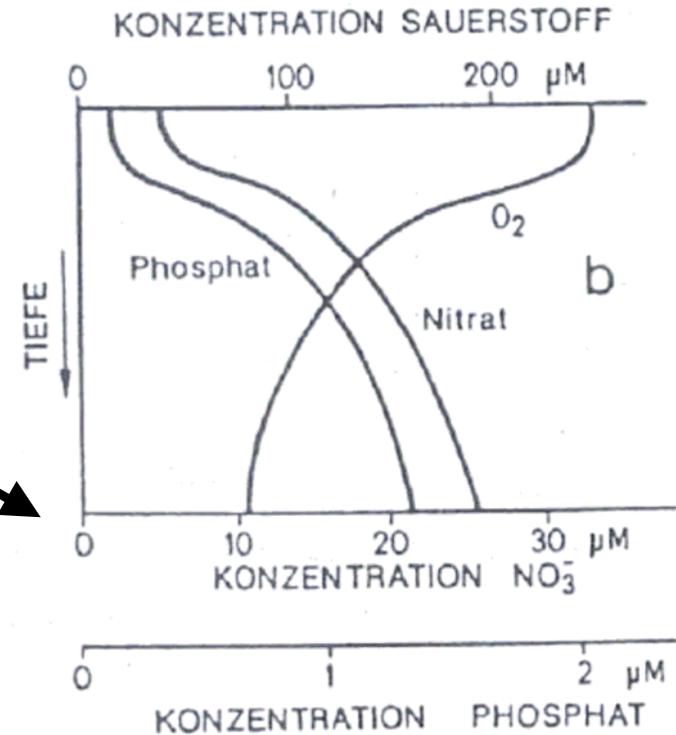
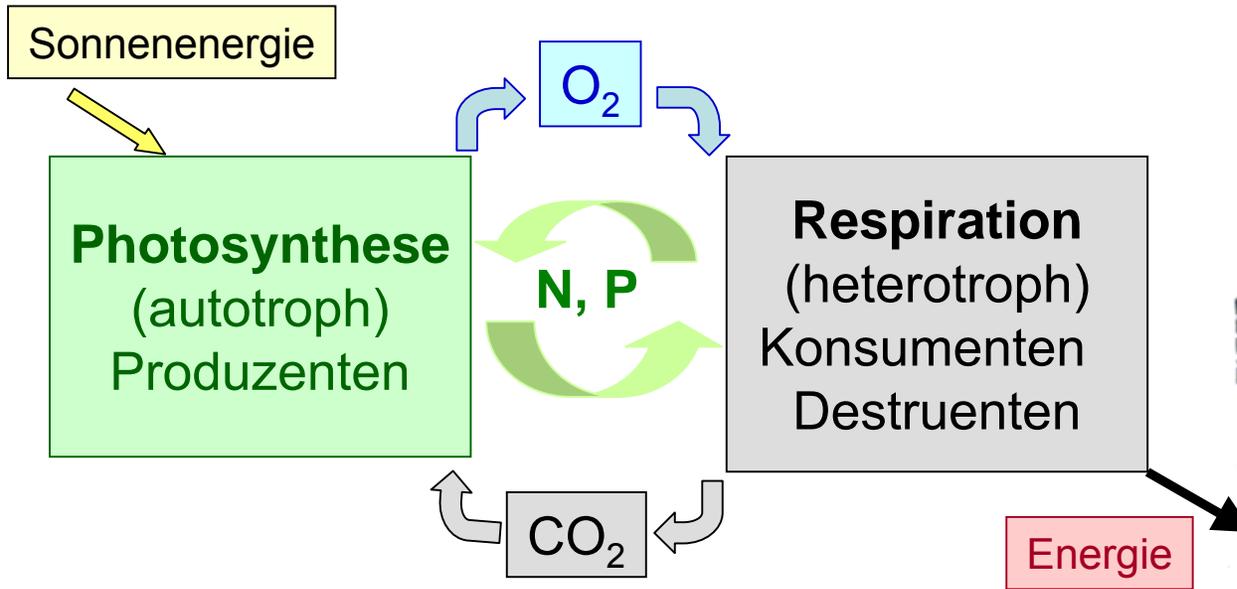
Limnologische Klassifizierung hinsichtlich Produktion und Respiration

P = Produktion (autotroph)

R = Respiration (heterotroph)



Zusammenhang zwischen Photosynthese und Respiration



balanciertes Ökosystem (Stationärzustand zwischen P und R) charakterisiert:

- (1) vertikale Trennung der P- und R-Funktion
- (2) Nährstoffe werden an Oberfläche aufgezehrt und in Tiefe freigesetzt

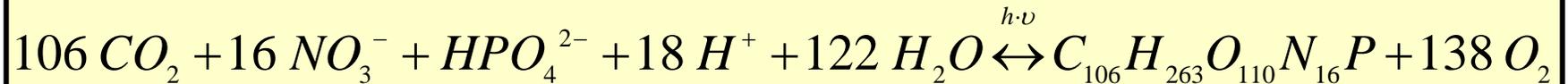
$$\frac{P}{R} \approx 1 \quad \text{Eutrophierung} \quad \rightarrow \quad \frac{P}{R} \gg 1 \quad (\text{begrenzt durch Nährstoffe u. Licht})$$

$$\text{aquatischen Ökosystemen: Nährstoffverhältnis } \frac{P}{N} \approx \frac{1}{100} \quad (\text{wachstumsbegrenzender Faktor})$$

Eutrophierung

Aufgabe:

In Folge der Eutrophierung wird – nach Absterben und Absinken der Biomasse – am Gewässergrund beim aeroben Abbau mehr O_2 verbraucht als physikalisch nachgeliefert werden kann. Unter Berücksichtigung der elementaren Zusammensetzung des Algenprotoplasmas lässt sich die Photosynthese durch:



beschreiben.

- Berechnen Sie, wieviel Biomasse (in g) aus 1 g P gebildet werden kann!
- Wieviel g O_2 sind zur vollständigen Mineralisierung von dieser Biomasse erforderlich?

$M(C) = 12 \text{ g/mol}$; $M(H) = 1 \text{ g/mol}$; $M(N) = 14 \text{ g/mol}$; $M(P) = 31 \text{ g/mol}$; $M(O) = 16 \text{ g/mol}$

Eutrophierung

Lsg.: Biomasse – Algenprotoplasma (AP)

$$(a) M(AP) = 106 \cdot 12 \text{ g/mol} + 263 \cdot 1 \text{ g/mol} + 110 \cdot 16 \text{ g/mol} + 16 \cdot 14 \text{ g/mol} + 31 \text{ g/mol}$$

$$M(AP) = 3550 \text{ g/mol}$$

entsprechend der Rkt.glg. gilt: 1 mol P \cong 1 mol AP

$$\frac{m(AP)}{m(P)} = \frac{M(AP)}{M(P)} \quad m(AP) = \frac{M(AP) \cdot m(P)}{M(P)} = \frac{3550 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 1 \text{g}}{31 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 114,5 \text{ g}$$

b) Betrachtung der Rückreaktion gilt: 1 mol AP \cong 138 mol O₂. Damit ergibt sich der Sauerstoffbedarf für den vollständigen aeroben Abbau von 1 g AP zu:

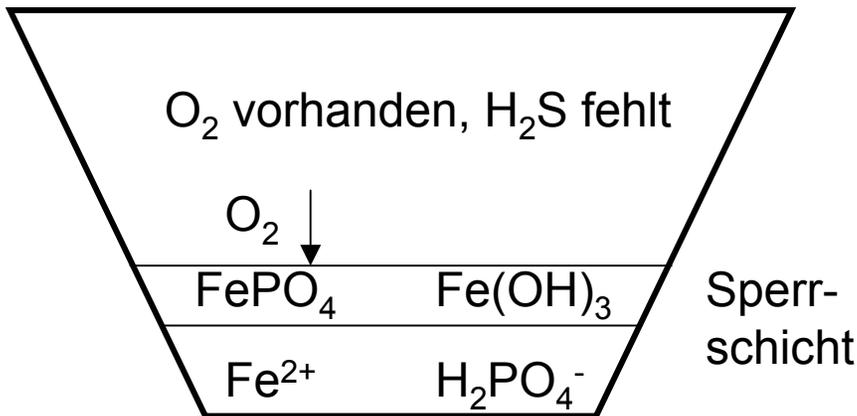
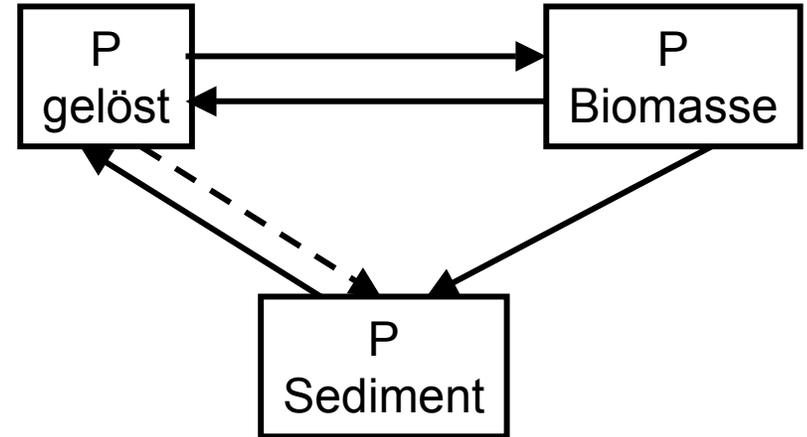
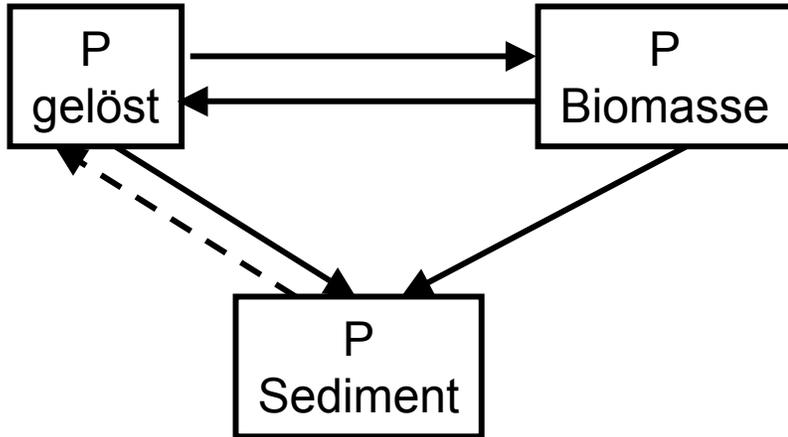
$$\frac{m(O_2)}{m(AP)} = \frac{138 \cdot M(O_2)}{M(AP)} \quad m(O_2) = \frac{138 \cdot M(O_2) \cdot m(AP)}{M(AP)} = \frac{138 \cdot 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 114,5 \text{ g}}{3550 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 142,4 \text{ g}$$

Trophiesystem – Klassifizierung stehender Gewässer

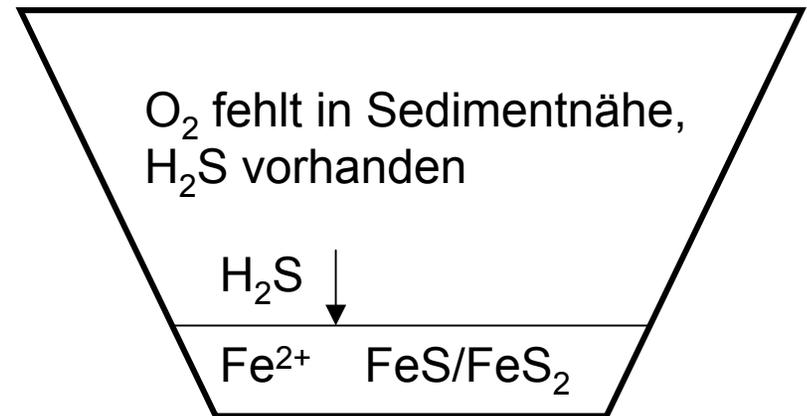
Anhand der Jahresdurchschnittswerte an Chlorophyll und Gesamtphosphor werden Standgewässer in 4 Trophiestufen klassifiziert (zusätzlich sekundäre Bewertungsparameter)

	oligotroph	mesotroph	eutroph	hypertroph
Sichttiefe (in Meter)	5 bis 10, höchstens 15 -20	1 bis 2, höchstens 5 bis 10	weniger als 1, höchstens 2 bis 3	weniger als 1
Tiefengrenze der submersen Vegetation	12 bis 30 m	5 bis 10 m	weniger als 2 m	weniger als 1 m
Phosphatgehalt (mg/m³)	>4 bis 10 (0 - 4 = ultraoligotroph)	>10 bis 35	>35 bis 100	mehr als 100
Gesamt-N im Herbst (mg N pro l)	höchstens 1	höchstens 1	mehr als 2	mehr als 2
Chlorophyllgehalt im Jahresmittel (mg/m³)	weniger als 3,5	weniger als 7,0	7...11	> 11
O₂-Gehalt (in mg/l)	mehr als 8	6 bis 8	2 bis 4	< 4
BSB₅ (in mg/l)	1-2	3 bis 5,5	5,5 bis 14	> 14
CSB (in mg/l)	1-3	8-9	20 bis 65	> 65
Bakterienzahl (Anzahl pro ml)	weniger als 100	ungefähr 10.000	bis 100.000	mehr als 100.000

Phosphor in Seen unterschiedlicher Trophie

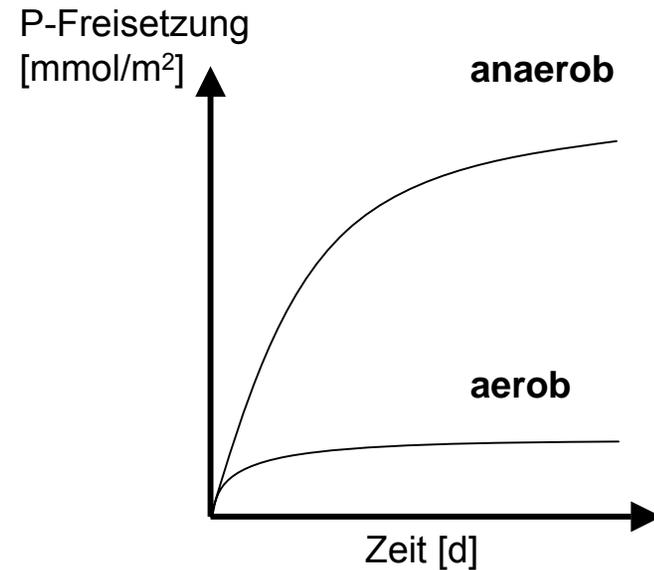
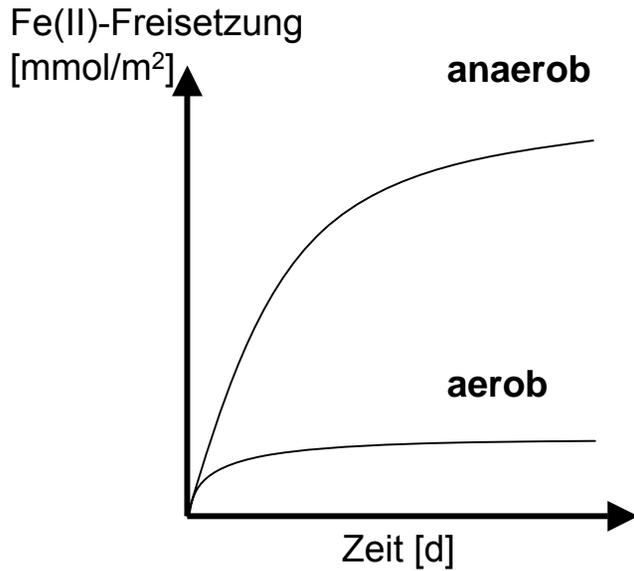


nicht eutrophiert



eutrophiert

Phosphor in Seen unterschiedlicher Trophie



aerobes Sediment dient als Sperrschicht gegen Auflösung und P-Freisetzung

	Freisetzungsraten ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)	
	Phosphor	Eisen
a) oxische Deckschicht	0.02-0.05	< 0.1
b) ständig anoxische Deckschicht	0.1 - 0.3	0.5 - 1.5
c) Übergang aerob ---> anoxisch	bis 5	bis 25

- interne P-Freisetzung kann durch Nitratzufuhr verhindert werden

Hydrogenphosphat-/Dihydrogenphosphationen

Phosphatentfernung in tertiärer Stufe der Abwasserbehandlung:

Vorklärung (- 10 % P)

biologische Reinigungsstufe (-20 - 30 % P)

Nachfällungsmethoden:

(1) Fällung mit Kalkhydrat Ca(OH)_2

Vorteil: $\text{P}_{\text{ges.}} < 0,2 \text{ mg/L}$, Nutzung als Dünger möglich

Nachteil: pH-Anhebung (10 -12), hoher Schlammanfall (CaCO_3)

(2) Fällung mit Fe- und Al-salzen

Vorteil: $\text{P}_{\text{ges.}} < 0,5 \text{ mg/L}$

Nachteil: Aufsalzung, wirtschaftliche Nutzung des Schlammes

Biologische Phosphatelimnierung (BioP-Verfahren):

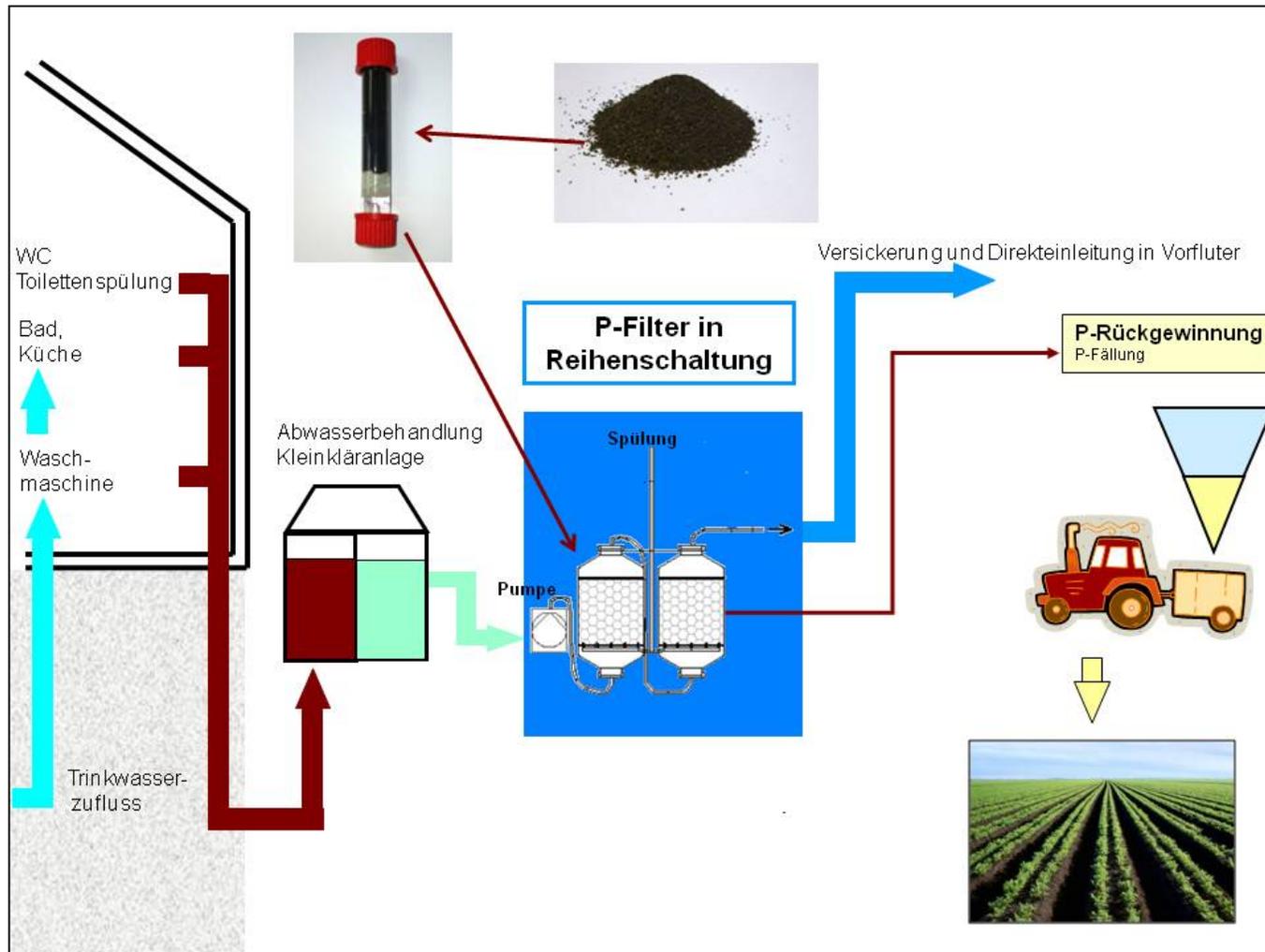
- zusätzliches Becken in der biologischen Stufe wird mit Rücklaufschlamm aus Nachklärung beschickt (P-Akkumulierer)

- BioP-Stufe wird anaerob betrieben (Stresssituation für MO), geben P ab ($\text{P}\uparrow$)

- Überführung des Abwassers und Schlammes in Belebungsbecken führt hier zu einer erhöhten P-Akkumulation („luxury uptake“) ($\text{P}\downarrow$)

Hydrogenphosphat-/Dihydrogenphosphationen

Technische Adsorption von P in dezentralen Kläranlagen



Zum Schluss: 3 × W (Was war wesentlich?)

Cl⁻ [konservatives Verhalten, organoleptischer Grenzwert, Entfernung]

HCO₃⁻ [natürliche Eintragspfade (Atmung, Kalk-Kohlensäure-Glg.), Säure-Base-Reaktionen, Bedeutung als natürliches Puffersystem]

SO₄²⁻ [mikrobieller Schwefelkreislauf (Desulfurikation, Sulfurikation), organoleptischer Grenzwert, Bildung von Ettringit]

NO₃⁻ [mikrobieller Stickstoffkreislauf, Bildung und Abbau (Nitratatmung), humantoxikologisch begründeter Grenzwert (Erläuterung der Primär-, Sekundär- und Tertiärwirkung), Sequenz der Elektronenakzeptoren (Atmung)]

HPO₄²⁻/ H₂PO₄⁻

[Säure-Base-Glg., Grenzwert im Abwasser (limitierender Nährstoff in aquatischen Ökosystemen), Eutrophierung, natürlicher Phosphorkreislauf in Standgewässern (Trophie, Remobilisierung von Phosphor)]