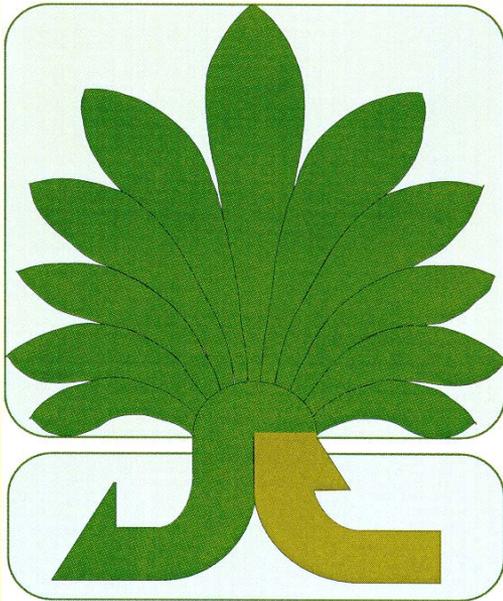


Mineralstoffwechsel



Nicolaus von Wirén

***Institut für
Pflanzenernährung***

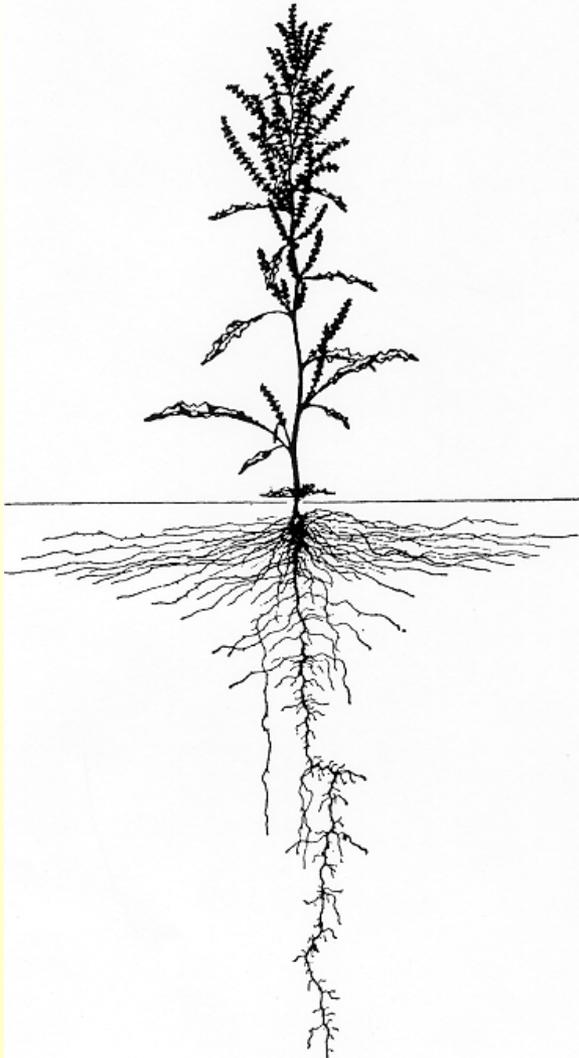
Universität Hohenheim



Bitte beachten !

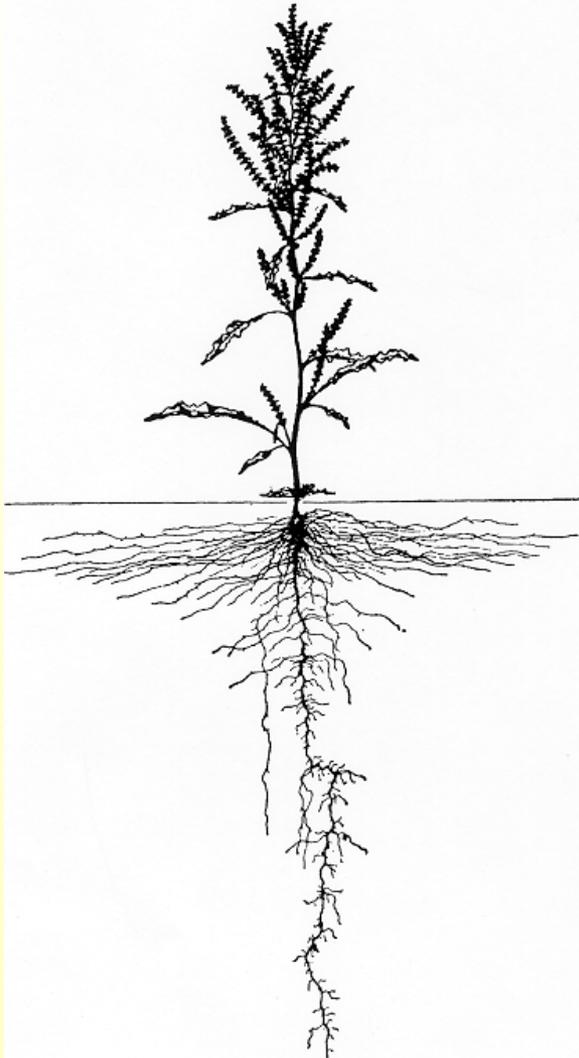
- *Handys vor Vorlesungsbeginn ausschalten !*
- *pünktlich erscheinen !*
- *keine Privatgespräche während der Vorlesung !*
- *Fragen beantworten und Ihrerseits Fragen stellen*

Gegenstand der Pflanzenernährung



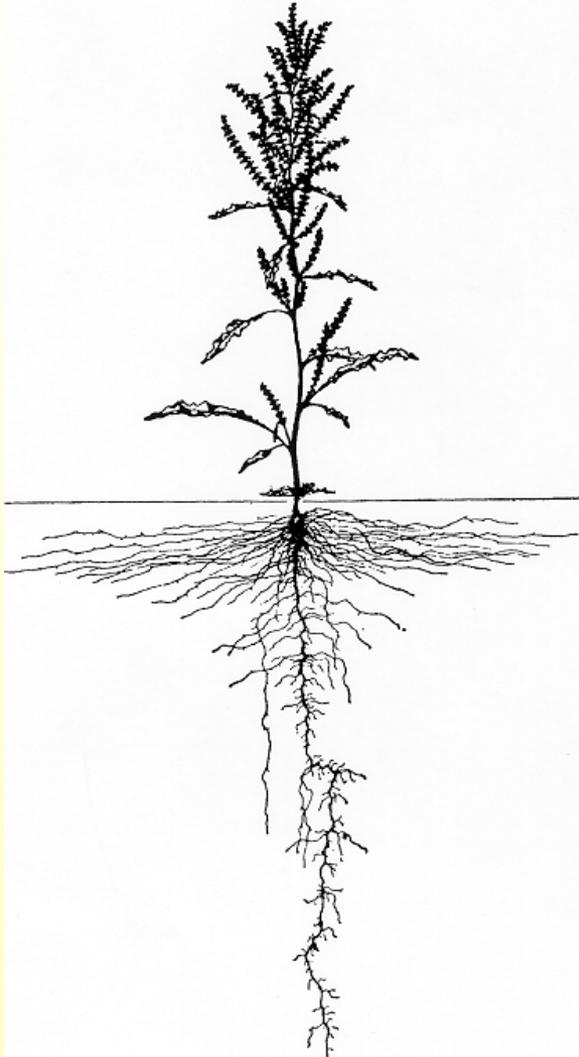
- Aufnahme und Verlagerung von Nährstoffen (Mechanismen, Regulation)
- Metabolismus und Funktion von Nährstoffen (Regulation, Wechselwirkungen mit ertrags- u. qualitätsrelevanten Prozessen, Ernährungsstörungen)
- Nährstoffe in Böden (Wurzelabscheidungen, Interaktion mit Mikroorganismen, Nährstoffkreisläufe)
- Manipulation der Nährstoffaufnahme und –verwertung (Düngung, Bewässerung, Organismen, Biotechnologie, Selektion etc.)

Ziele der Pflanzenernährung- **früher**



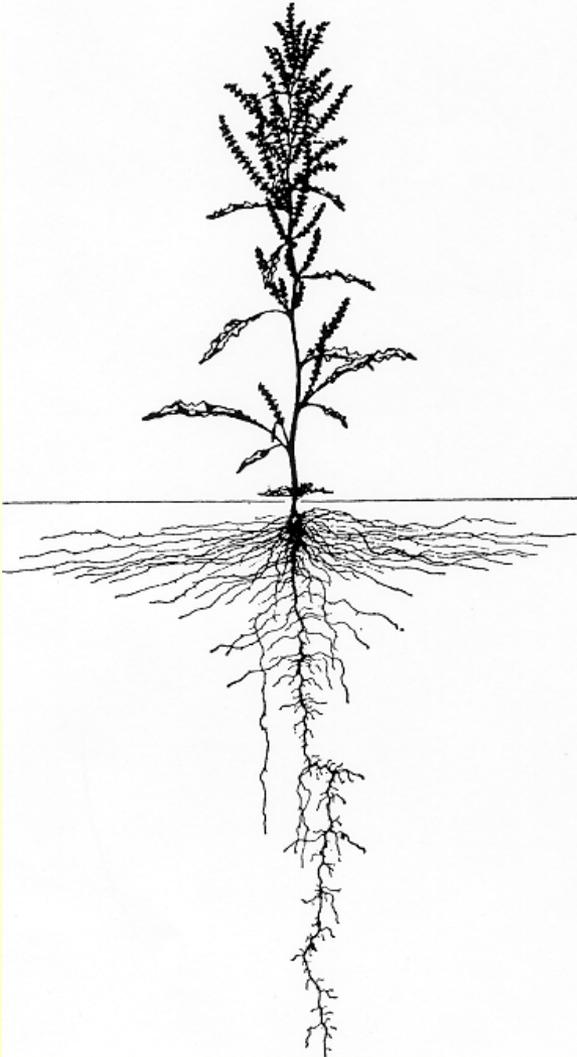
- Steigerung von Pflanzenerträgen
- Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit
- Verbesserung der Pflanzengesundheit

Ziele der Pflanzenernährung - heute



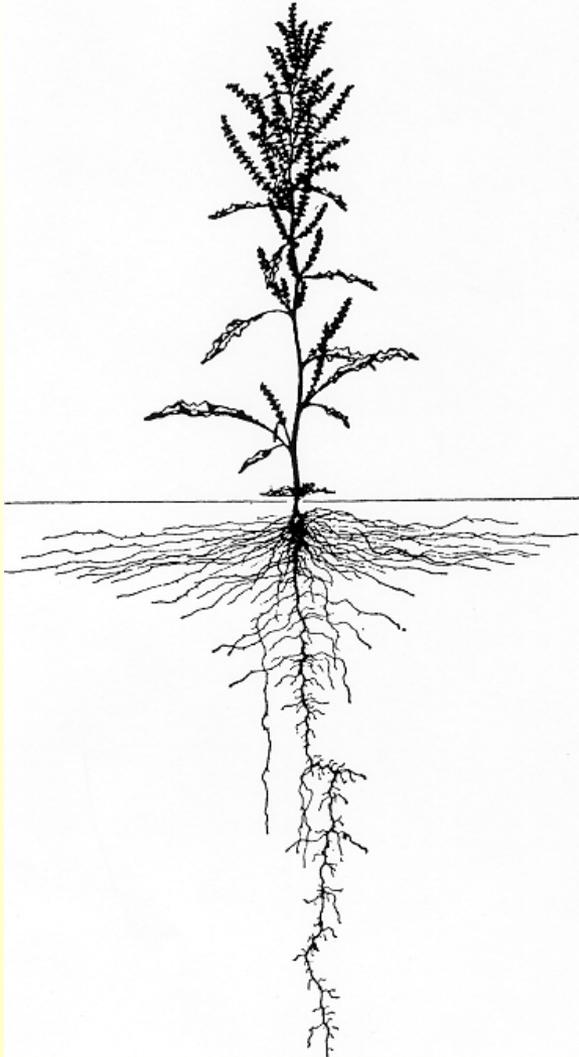
- **Sicherung und Steigerung von Pflanzenerträgen**
 - standortgerechte Düngung, verbesserte Düngemittel
 - Selektion nährstoffeffizienter Genotypen
- **Verbesserung der Qualität in Ernteprodukten**
 - auf Endprodukte abgestimmte Düngungskonzepte
- **Sicherung der Umwelt**
 - low-input (Schlagbilanzen)
 - Nährstoff-Recycling in Agrarökosystemen

Ziele der Pflanzenernährung - **morgen**



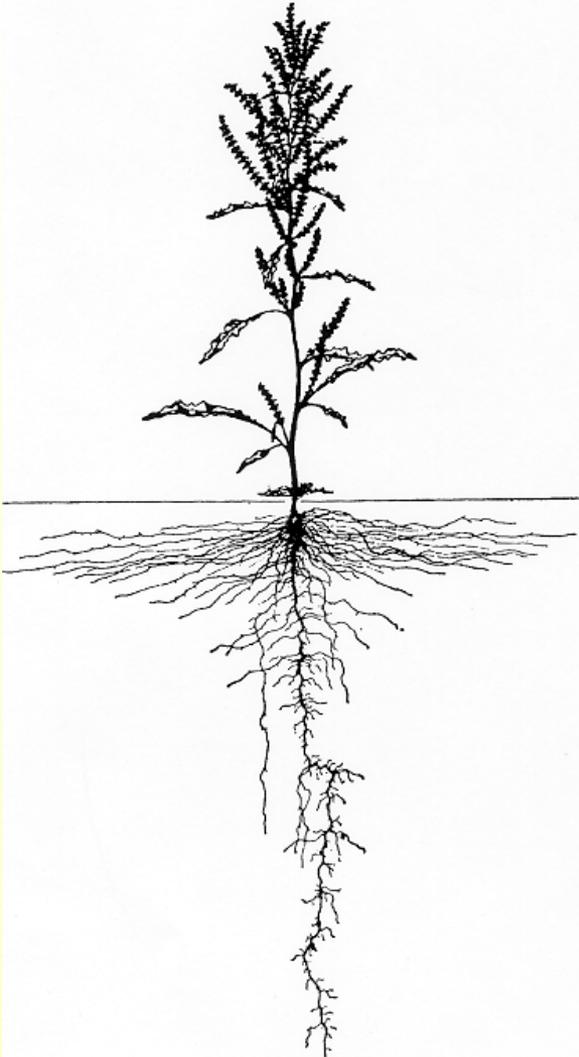
- **Sicherung von Pflanzenerträgen**
 - Erhöhung der Düngemittelverwertung
 - Neue Düngungskonzepte (Wurzel → Nährstoff)
 - Entwicklung nährstoffeffizienter Genotypen
- **Precision Farming**
 - Einzelpflanzen-gerechte Düngung
 - „on-farm“-Energie-/Wasser-/Mineralstoff-Recycling
- **Pflanzenbau auf Problemstandorten**
 - Salz
 - Schwermetalle
 - organ. Kontaminationen (z.B. Erdöl)
 - pH
 - hohe Al-Konzentrationen

Ziele der Pflanzenernährung - **morgen**



- Entwicklung neuer Qualitätsparameter
 - **Functional Food: Fe, Vit.A, Lycopopen etc.)**
 - **Agro-Pharming (Aminosäuren, Antikörper etc.)**
- Vorverlagerung technologischer
Verarbeitungsprozesse in die Pflanze
 - **schädlicher Amino-N in Zuckerrüben**
 - **Erhöhung der Verfügbarkeit essentieller Mineralstoffe für Human-/Tierernährung**
- Pflanzen mit neuen Funktionen
 - **Phytoremediation**
 - **Biosynthese technolog. Produkte**
(Schmierstoffe, Stärke etc.)
 - **Energieerzeugung**
 - **Pflanzen als Standortsindikatoren**

Aufgaben der physiologisch-orientierten Pflanzenernährung



- **Grundlagenforschung**

- Mechanismen und Regulation der Nährstoffaneignung

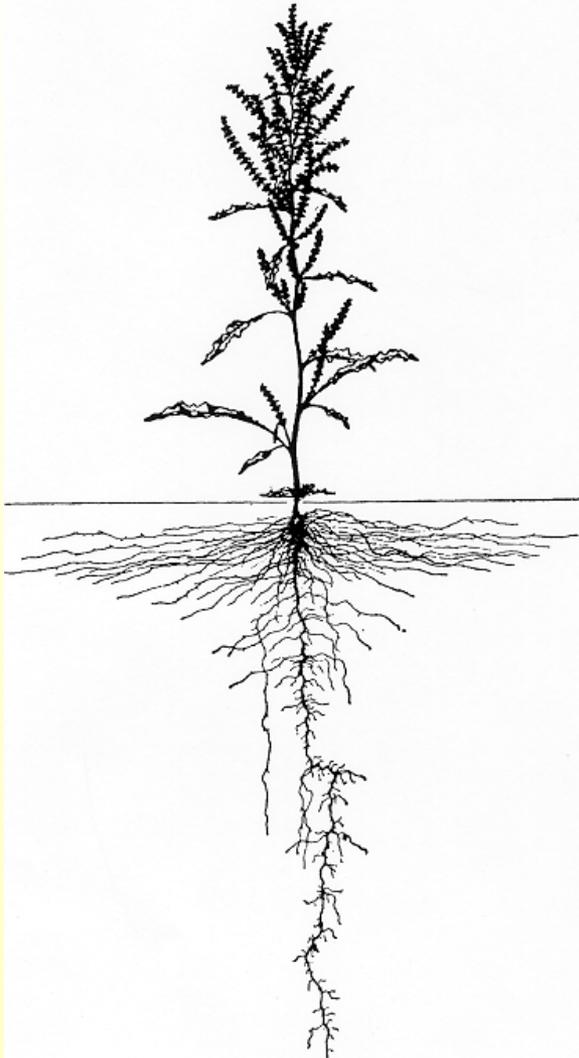
- Physiologische und morphologische Reaktionen der Pflanzen auf Düngung und Stressfaktoren (Signaltransduktion)

- **Anwendungsorientierte Forschung**

- gezielte Regulation einzelner physiologischer Prozesse zur Verbesserung der Nährstoffeffizienz, Stresstoleranz, Biosynthese best. Stoffe in (transgenen) Pflanzen

- Manipulation von physiolog. Reaktionen bzw. Signaltransduktionswegen durch Einsatz von Signalgebern (Nährstoffe, Wasser, Licht)

Aufgaben der physiologisch-orientierten Pflanzenernährung



- Methodenentwicklung

- **technisch:** Verbesserung der Düngemittelzusammensetzung und Schnellverfahren zur Diagnose von Ernährungsstörungen
- **physiologisch/biotechnologisch:** Methoden zur gezielten Ausnutzung von Stressreaktionen über transgene und konventionelle Ansätze

Lehrangebot im Physiologischen Teil der Pflanzenernährung

Titel	Dozent	AA	AB/Bio
Mineralstoffwechsel	v.Wirén	B	ABioT
Biotechnol. Methoden i.d. Pfl.prod.	Weber, v.Wirén	B	ABioT
Übungen zur Pfl.ernährung	v.Wi, Rö, Mü	M	ABioT/AÖ
Molekulare Regulation des Mineralstoffhaushalts	v.Wirén	M	ABioT/Bio
Pflanzenqualität	v.Wirén	M	ABioT/Bio
Transportprozesse über pflanzl. Membranen	v.Wirén	M	ABioT/Bio
Transporter-Praktikum	v.Wirén	M	ABioT/Bio
Pflanzliche Symbiosen	v.Wirén Rö, Mü, Neumann	M	ABioT/AÖ

Vorlesung Mineralstoffwechsel

(Vertiefung einzelner Themen im Praktikum)

Inhaltliche Schwerpunkte und Lernziele

- **Nährstoffaufnahme aus dem Boden**
(Wurzelmorphologie/Pflanzenanatomie)
- **Wasser- und Nährstofftransport in der Pflanze**
- **Beeinflussung von Ertragskomponenten durch Nährstoffe**
- **Stoffwechsel und Funktion von Nährstoffen**

Literatur zur Vorlesung Mineralstoffwechsel

- **Skript**

- H. Marschner (1995) **Mineral Nutrition in Higher Plants**. 2nd edition, Academic Press, London, UK
- Taiz L. & Zeiger (1998) **Plant Physiology**. 2nd edition, Sinauer Ass. Publ., USA
- Epstein & Bloom (2006) **Mineral Nutrition of Plants**. 2nd edition, ISBN: 0878931724
- S. Schubert (2006) **Pflanzenernährung**. Grundwissen Bachelor. Ulmer UTB, Stuttgart.
- W. Bergmann (1996) **Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen**.
- Zorn,...Bergmann (2007) **Handbuch zur visuellen Diagnose von Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen**. Spektrum Verlag, Elsevier, München.
- G. Schilling (2000) **Pflanzenernährung und Düngung**. UTB. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Mengel K. & Kirkby E. (2001) **Principles of Plant Nutrition**. 5th edition, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, NL
- C. Richter (2005) **Agrikulturchemie und Pflanzenernährung**. Margraf Publ., Weikersheim

Geschichtliche Entwicklung der Pflanzenernährung

I. Altertum bis Mittelalter: Pflanze als passives System

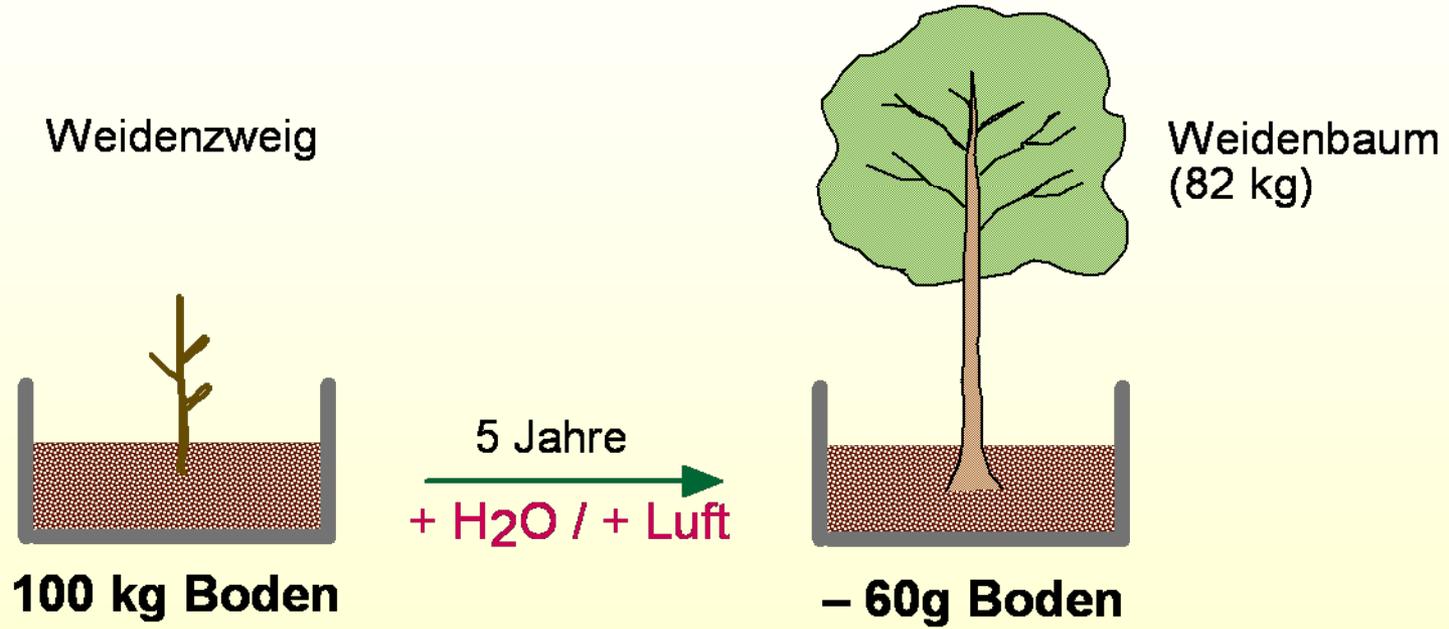
- **Aristoteles:** Humus ernährt die Pflanzen
(Tierexkremente, Gips, Kalk, Asche schon als Dünger verwendet.
Bedeutung der Wurzeln erkannt)

II. 1500-1750: Suche nach entscheidenden Faktoren für das Pflanzenwachstum

- **Jungius:** Pflanze nimmt Stoffe auf und gibt Stoffe ab und ist dabei selektiv
- **Van Helmont:** Pflanze stellt ihre Nahrung selbst her

Van Helmont (17. Jhdt):

Erster pflanzenernährerischer Vegetationsversuch



Geschichtliche Entwicklung der Pflanzenernährung

II. 1500-1750: Bedeutung der Luft

- **Malpighi**: Blätter sind nahrungsbereitende Organe
- **Hales**: Bedeutung der Luft zur Bildung der organischen Substanz

III. 1770-1810: Aufklärung der chemischen und physiologischen Grundlagen

- **Scheele**: Entdeckung des O_2
- **Ingen-Housz**: grüne Blätter scheiden bei Belichtung O_2 aus, beim Dunkelheit CO_2
- **De Saussure**: zum Gaswechsel benötigen Pflanzen auch Mineralstoffe

Geschichtliche Entwicklung der Pflanzenernährung

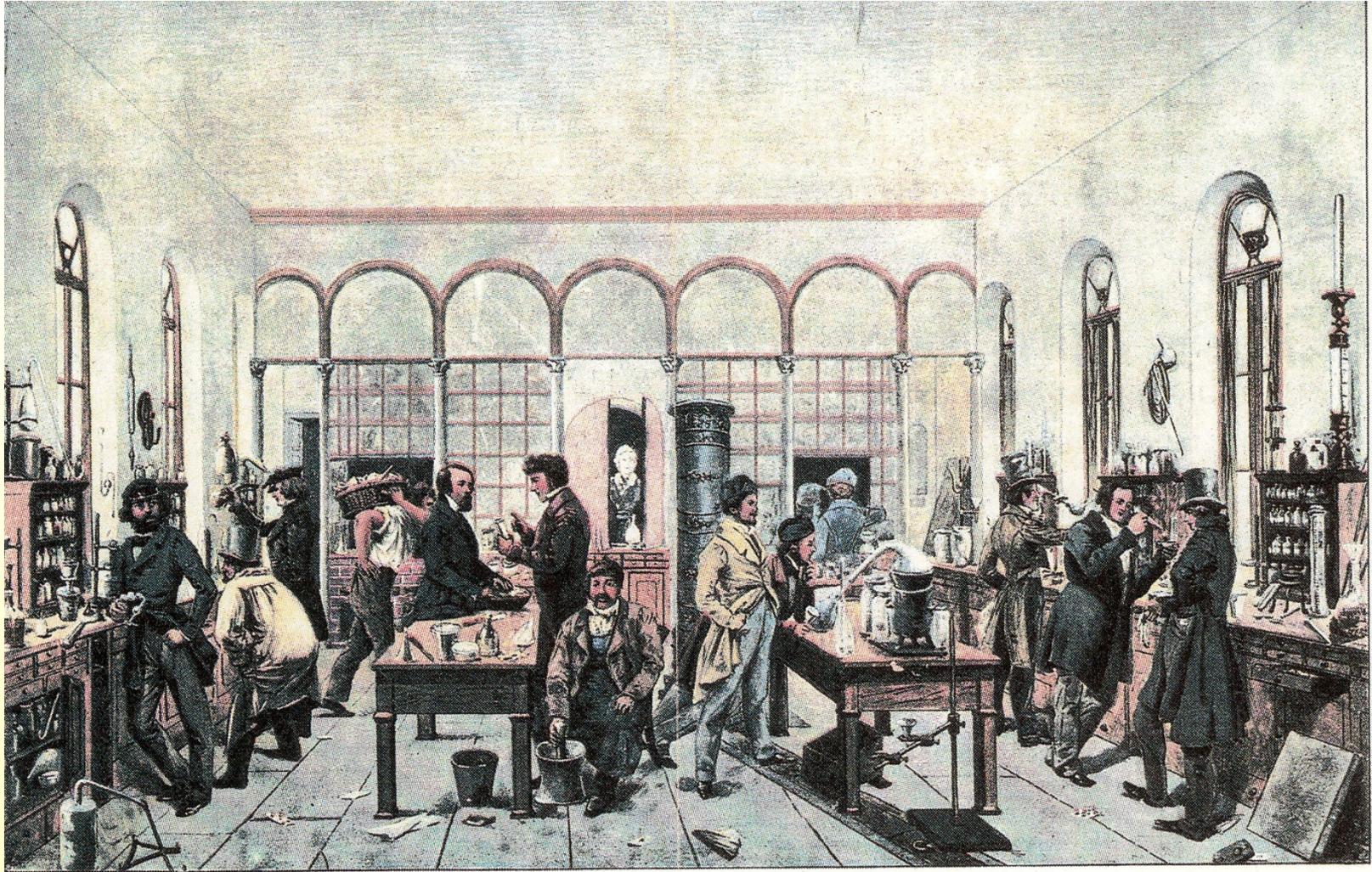
III. 1800: Humustheorie

- Preisfrage Berliner Akademie d. Wissenschaften nach Art der „erdigen Bestandteile“
- **Thaer**: Pflanzenwachstum zehrt Humus auf, anorganische Substanzen sind „Reizmittel“

IV. 1825-1840 Begründung der Agrikulturchemie

- **Sprengel**: Pflanzen bilden aus anorg. Stoffen aus Boden und Luft mit Wasser, Licht und Wärme organische Substanz

Labor von Justus von Liebig (gezeichnet 1843)



Geschichtliche Entwicklung der Pflanzenernährung

IV. 1825-1840 Begründung der Agrikulturchemie

- **Von Liebig: Mineralstoff-Theorie**

- Mineralstoffe fungieren als Nährstoffe in Pflanzen.
- Humus ist kein Nährstoff.
- Nahrungsmittel aller grünen Pflanzen sind anorgan. Substanzen: Kohlenstoffsäure, Ammoniak, Salpetersäure, Phosphorsäure, Schwefelsäure, Kalk, Magnesia, Kali und Eisen, manche bedürfen Kochsalz

Etablierung der mineralischen Ernährung als wissenschaftliche Disziplin

- **Wolff:** Beziehung zwischen Mineralstoffen und Qualität bzw. Quantität

Geschichtliche Entwicklung der Pflanzenernährung

V. 1840-1900: Methodenentwicklung zum Nachweis der Lebensnotwendigkeit der Mineralstoffe

Wiegmann & Polstorff, Wilfarth: Sandkulturversuche

Sachs, Knop: Wasserkulturversuche (kein Humusbedarf)

Hellriegel, Wilfarth: N₂-Bindung durch Knöllchenbakterien

Beijerinck: erste Reinkultur von Knöllchenbakterien

Geschichtliche Entwicklung der Pflanzenernährung

Nobbe: plaziertes Stickstoffangebot fördert lokales Seitenwurzelwachstum

→ **Pflanzen reagieren auf Nährstoffe**

Ueber die feinere Verästelung der Pflanzenwurzel.

Eine Vegetationsstudie

von

Dr. Friedrich Nobbe.

VI. ab 1900: Quantitative Beziehung zwischen mineral. Nährstoffen und Ertrag

- **Mitscherlich:** Ertragsgesetze
- 1913: NH_3 -Synthese nach Haber-Bosch (Düngerindustrie)

Geschichtliche Entwicklung der Pflanzenernährung

VI. ab 1900 Nachweis der lebensnotwendigen Nährstoffe

Eisen	1860	J. Sachs
Mangan	1922	J.S. McHargue
Bor	1923	K. Warington
Zink	1926	A.L. Sommer and C.B. Lipman
Kupfer	1931	C.B. Lipman and G. MacKinney
Molybdän	1938	D.I. Arnon and P.R. Stout
Chlor	1954	T.C. Broyer et al.
Nickel	1987	P.H. Brown et al.

weder Konzentration noch Vorkommen in Pflanze bestimmen
ob Nährstoff lebensnotwendig (essentiell) ist

VII. ab 1980: molekulares Verständnis über physiologische Prozesse in der Pflanze

Definition essentieller Nährstoffe

(nach Arnon & Stout, 1939)

Essentielle Nährstoffe

- in Abwesenheit des Nährstoffs kann die Pflanze ihren Lebenszyklus nicht beenden
- nicht ersetzbar
- definierte physiologische Funktion (?)
- 14 mineralische Elemente
N, K, P, Ca, Mg, S
B, Cl, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, Ni

Zink ist ein essentieller Nährstoff

Maispflanzen einer Zn-Steigerungsreihe

-Zn



+Zn



Definition essentieller Nährstoffe

(nach Arnon & Stout, 1939)

Essentielle Nährstoffe

- in Abwesenheit des Nährstoffs kann die Pflanze ihren Lebenszyklus nicht beenden
- nicht ersetzbar
- definierte physiologische Funktion (?)
- 14 mineralische Elemente
N, K, P, Ca, Mg, S
B, Cl, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, Ni

Förderliche (beneficial) Nährstoffe

- wachstums-stimulierend (je nach Pflanzenart) aber nicht essentiell
- Na, Si, Co, Se

Natrium ist ein förderlicher Nährstoff

Zuckerrübenpflanzen kultiviert mit

0.25 mval KCl
4.75 mval NaCl

5 mval KCl
-



Nährstoffgehalte unterscheiden sich stark

(nach Epstein, 1972, 1994)

Durchschnittliche Nährstoffgehalte in Pflanzen

Element	Chemical symbol	Atomic weight	Concentration in dry matter		Relative number of atoms with respect to molybdenum
			$\mu\text{mol g}^{-1}$	ppm or % ^a	
OBTAINED FROM WATER OR CARBON DIOXIDE					
Hydrogen	H	1.01	60,000	6	60,000,000
Carbon	C	12.01	40,000	45	40,000,000
Oxygen	O	16.00	30,000	45	30,000,000
OBTAINED FROM THE SOIL					
Macronutrients					
Nitrogen	N	14.01	1,000	1.5	1,000,000
Potassium	K	39.10	250	1.0	250,000
Calcium	Ca	40.08	125	0.5	125,000
Magnesium	Mg	24.32	80	0.2	80,000
Phosphorus	P	30.98	60	0.2	60,000
Sulfur	S	32.07	30	0.1	30,000
Silicon	Si	28.09	30	0.1	30,000
Micronutrients					
Chlorine	Cl	35.46	3.0	100	3,000
Iron	Fe	55.85	2.0	100	2,000
Boron	B	10.82	2.0	20	2,000
Manganese	Mn	54.94	1.0	50	1,000
Sodium	Na	22.91	0.40	10	400
Zinc	Zn	65.38	0.30	20	300
Copper	Cu	63.54	0.10	6	100
Nickel	Ni	58.69	0.002	0.1	2
Molybdenum	Mo	95.95	0.001	0.1	1

Makro- und Mikro-Nährstoffe

Makronährstoffe

- N
- P
- K
- Ca
- Mg
- S

Mikronährstoffe

- B
- Cl
- Fe
- Mn
- Zn
- Cu
- Mo
- Ni

Nährstoffkonzentrationen im Boden sind geringer als die in Pflanzen

(nach Epstein, 1994 und Peters, 1990)

Durchschnittliche Nährstoffgehalte (in $\mu\text{g g}^{-1}$) in der Bodenlösung eines Ackerbodens (Luvisol, pH 7,7) im Vergleich zur Konzentration in Pflanzen

Mineralstoff	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+	NO_3^-	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	Zn^{2+}	Mn^{2+}
Bodenlösung	510	1650	490	48	3100	590	1.5	0.48	0.002
Pflanze	10000	5000	2000	20000		1000	2000	20	50

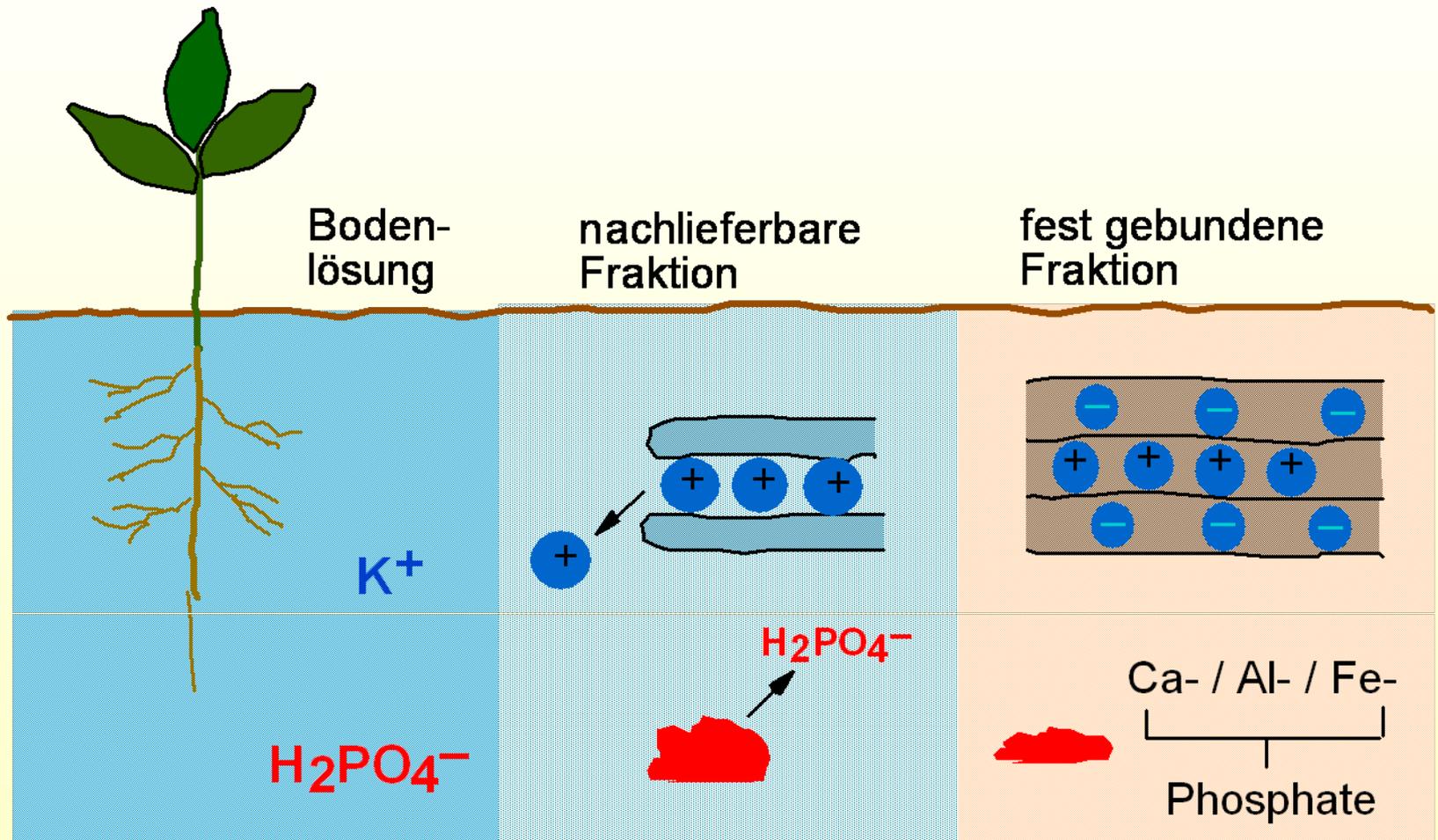
→ Nährstoffe im Boden müssen zur Wurzeloberfläche transportiert werden

Der Transport von Nährstoffen im Boden zur Wurzeloberfläche

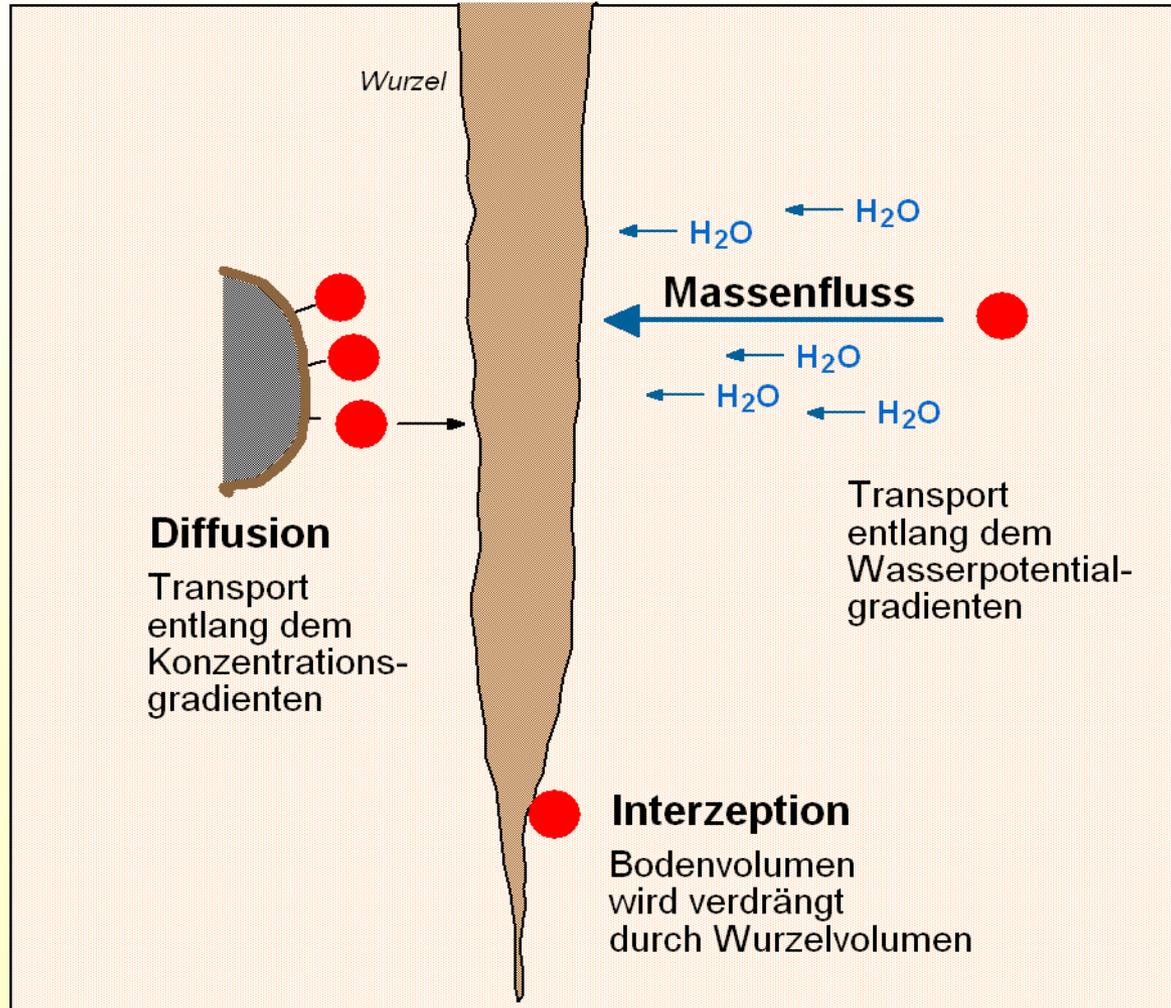
Mineralstoffe im Boden liegen in unterschiedlichen Bindungsformen vor

Mineralstoff	ionisch	ausgefällt/ adsorbiert	organisch gebunden
N	NH_4^+ , NO_3^-	NH_4^+ - Tonminerale	Proteine, DNA
K	K^+	K^+ - Tonminerale	--
P	H_3PO_4 $\leftrightarrow \text{PO}_4^{3-}$	Fe-, Al - PO_4	ATP, DNA, Zucker-P

Die Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen wird bedingt durch ihre Bindungsform im Boden



Massenfluss, Diffusion und Interzeption sind die Transportwege von Mineralstoffen im Boden

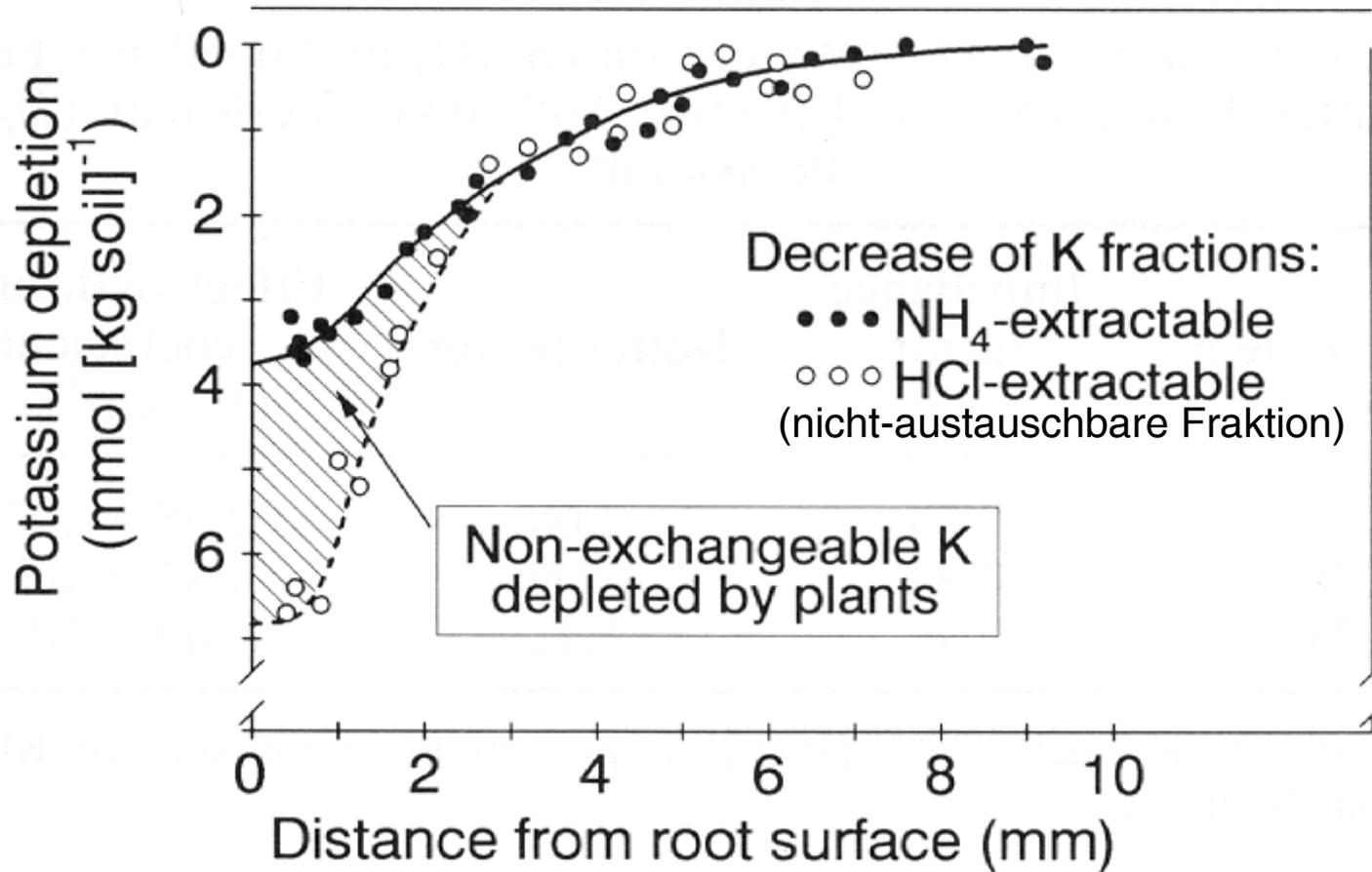


Diffusion wird bestimmt durch das
Konzentrationsgefälle zwischen Boden und Wurzel
und dem Diffusionskoeffizienten des Mineralstoffs

Schätzung der Diffusionskoeffizienten ($\text{m}^{-2} \text{sec}^{-1}$) von Ionen in Wasser und in Böden sowie Wanderung pro Tag (nach Jungk, 1991).

Ion	Diffusionskoeffizient		Wanderung im Boden (mm pro Tag)
	Wasser	Boden	
NO_3^-	1.9×10^{-9}	$10^{-10} - 10^{-11}$	3.0
K^+	2.0×10^{-9}	$10^{-11} - 10^{-12}$	0.9
H_2PO_4^-	0.9×10^{-9}	$10^{-12} - 10^{-14}$	0.13

Durch K-Aufnahme entsteht an der Wurzeloberfläche eine K-Verarmungszone, die K aus der nicht-austauschbaren Fraktion nachzieht

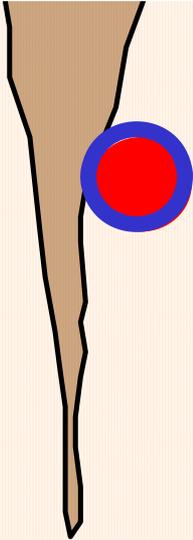


Massenfluss wird bestimmt durch die Konzentration des Mineralstoffs in der Bodenlösung und durch die Transpiration

Pflanzenaufnahme und Schätzung des Nährstofftransports zu den Wurzeln über Massenfluss für K, Ca, Mg bei Sommerweizen und Zuckerrübe (Bodentyp: Parabraunerde) Strebel and Duynisveld (1989).

(kg ha ⁻¹)	Sommerweizen			Zuckerrübe		
	K	Mg	Ca	K	Mg	Ca
Aufnahme	215	13	35	326	44	104
Massenfluss	5	17	272	3	10	236
(% d. Gesamt- aufnahme)	2	131	777	1	23	227

Interzeption ist kein unabhängiger Transportweg, sondern Diffusion



Interzeption

Bodenvolumen
wird verdrängt
durch Wurzelvolumen

- **Kontaktfläche Boden-Wurzel ist quasi nie wasserfrei**
- **ein Mineralstoff muss gelöst sein um an die Wurzeloberfläche zu gelangen**

Nährstoff-Bedarf und -Anlieferung Über Massenfluss und Diffusion

Nährstoffbedarf bei Mais und Nährstoffanlieferung

Nährstoff	Bedarf	Interzeption	Massenfluss	Diffusion
	(kg ha ⁻¹)			
Mg	45	15	100	30
N	190	2	150	38
K	195	4	35	156
P	40	1	2	37

(nach Barber, 1984)

Fragen bis zur nächsten Stunde

- 1. Worin unterscheiden sich Makro- und Mikronährstoffe ?**
- 2. In welcher Bindungsform liegen S, Ca, Mg und Fe im Boden vor ?
Sind diese Formen gut oder weniger gut pflanzenverfügbar ?**
- 3. Erwarten Sie für Ammonium und Nitrat eine ähnliche Verarmungszone an der Wurzeloberfläche wie für Kalium?**

Prüfungstermin (von Wirén/Müller)

Februar 2009