



# Die Wurzel

## Möglichkeiten und Grenzen der Nährstoffmobilisierung

**BioNet Ackerbautage**

Gernot Bodner  
 Department für Nutzpflanzenwissenschaften  
 Universität für Bodenkultur Wien

BioNet Ackerbautage Inhalt

### Inhalt

**Einleitung: Ressourceneffizienter standortangepasster Pflanzenbau**

**Grundlagen der Nährstoffdynamik**

- Nährstoffbilanz - Nährstoffeffizienz
- Wurzelfunktionen im Nährstoffkreislauf

**Aufbau und Wachstum des Wurzelsystems**

- Bau und Funktion der Wurzel
- Wurzel und Boden

**Wurzelfunktionen in der Nährstofferschließung**

- Input - Humusbilanz
- Verlust - Unterbodenerschließung
- Mobilisierung – Umsatz anregen
- Entzug – Wurzeldichte und -aktivität

2/50

BioNet Ackerbautage Inhalt

**Einleitung: Ressourceneffizienter standortangepasster Pflanzenbau**

3/50


BioNet Ackerbautage Ressourceneffizienter Pflanzenbau

Grüne Revolution (1960)

Nachhaltige Intensivierung (2010)

**Züchtung**

- Hybridzüchtung
- Harvest Index (HhI)
- Reifezeit (RphI)



**Züchtung**

- Biotische und abiotische Stressresistenz
- Nutzung der Biodiversität
- Neue Züchtungstechnologien

**Management**

- Bewässerung (+2 % p.a.)
- Mineraldünger (+5,5 % p.a.)
- Mechanisierung (+4,5 % p.a.)


**Management**

- Konservierende Bodenbearbeitung
- Wassersparende Bewässerung
- Fruchtfolgediversifizierung

Quellen: FAO/STAT; Khush (2001) Nature Rev. Genet. 2 Quelle: FAO (2011)

4/50

BioNet Ackerbautage Ressourcen-effizienter Pflanzenbau



Stress	Bedeutung
Hitze	12 % der globalen Ackerfläche <sup>1</sup> (Kontinentale Gebiete Asiens und Nordamerikas)
Kälte/Frost	13 % der globalen Ackerfläche <sup>2</sup>
Sonstige (Ozon, ...)	Keine flächenbezogenen Daten
Wassermangel	27 % der globalen Ackerfläche <sup>2</sup>
P-Mangel	30 % der globalen Agrarfläche <sup>3</sup>
N-Mangel	Humusarme Böden
Versauerung (pH < 5,5)	25 % der globalen Ackerfläche <sup>4</sup>
Verdichtung	25% (AT, Alpenvorland <sup>5</sup> ) - 30 % (DT, Mecklenburg-Vorpommern <sup>7</sup> ) der Ackerfläche
Versalzung (EC > 4 ds m <sup>-1</sup> )	7 % der Landfläche, 50 % der bewässerten Fläche <sup>3</sup>

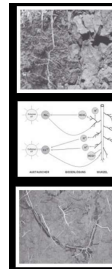
**Realer / potentieller Ertrag = 40 %<sup>1</sup>**

Quellen: Teixeira et al. (2013) Agric. Forest Meteorol. 170 und eigene Berechnung; <sup>1</sup>FAO/IIASA (2009); <sup>2</sup>Macdonald et al. (2011) PNAS 108; Lynch et al. (2004) Field Crops Res. 90; <sup>3</sup>Murer et al. (2012) Die Bodenkultur; <sup>4</sup>Frielinghaus et al. (s.o.) Beiträge Bodenschutz

5/50

BioNet Ackerbautage Ressourcen-effizienter Pflanzenbau

**Bodengesundheit = Bodenfruchtbarkeit = Ertragseffizienz**  
Management zum Erhalt, Verbesserung und Ausnutzung des natürlichen Bodenpotentials



**Physikalische Bodenfruchtbarkeit**  
Boden als poröser Speicherraum für Wasser- und Nährstoffe sowie Wachstumsraum der Pflanzenwurzel (Wasser- und Lufthaushalt)

**Chemische Bodenfruchtbarkeit**  
Boden als Speicher von Nährstoffen (Sorptions) und Filter für Schadstoffe (Nährstoffhaushalt)


**Biologische Bodenfruchtbarkeit**  
Boden als Lebensraum für Bodentiere und Bodenmikroorganismen (Umsetzungsvorgänge)

BioNet Ackerbautage Ressourcen-effizienter Pflanzenbau

**Bodeneigenschaften = Natur + Management**

**Natur = Klima + Geologie + Topographie + Zeit**  
Bodenwirkung: pH, Textur, Profiltiefe  
(Prozesse: Nährstoffe, Luft- und Wasserhaushalt, Erwärmung...)

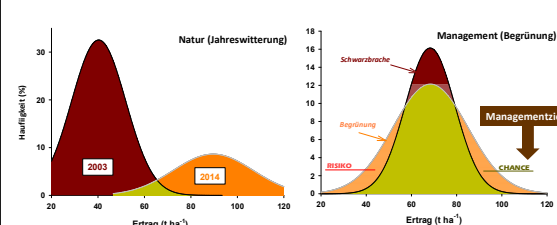
**Management = Fruchtfolge + Bodenbearbeitung + Düngung**  
Bodenwirkung: Humus, Bodenleben, Struktur, Bodenabtrag  
(Prozesse: Nährstoffumsetzung, Luft- und Wasserhaushalt, Durchwurzelung)



**TROCKENGEBIET**      **FEUCHTGEBIET**

BioNet Ackerbautage Ressourcen-effizienter Pflanzenbau

**Grenzen und Möglichkeiten der Veränderung**  
Praxiserträge Zuckerrübe aus Daten des Ackerbau-Arbeitskreises Mistelbach



Natur (Jahreswitterung)      Management (Begrünung)

2003      2014

Schwarzbrotze      Begrünung      Managementziel

BRUNO      CHANGE

Ertrag (t ha<sup>-1</sup>)

8/50

BioNet Ackerbautage Grundlagen

**Grundlagen der Nährstoffdynamik**

---

9/50

BioNet Ackerbautage Grundlagen

*Nach French und Schultz (1984)  
Aust. J. Agric. Res. 35*

**Definitionen**

**Pflanzliches Potential:** Maximale Ertragsbildung pro Einheit aufgenommener Ressource (derzeitiges physiologisches Limit).

**Aufnahme-effizienz:** Fähigkeit dem Boden pflanzenverfügbaren Ressourcen zu entziehen.

**Umsetzungs-effizienz:** Fähigkeit aus den aufgenommenen Ressourcen Ertrag zu bilden.

10/50

BioNet Ackerbautage Grundlagen

**Nährstoffbilanz**

11/50

BioNet Ackerbautage Grundlagen

**Nährstoffbilanz**

**Wurzeleinflüsse**

**ANGEBOT VERMEHREN**

1. Input: Humusbilanz
2. Verlust: Unterbodenerschließung
3. Mobilisierung: Löslichkeit verbessern

**AUFNAHME OPTIMIEREN**

4. Entzug: Wurzeldichte, Wurzelaktivität

Der Boden ist ein **BIO**physikalisches und **BIO**chemisches System. Seine sensibelste (und daher veränderbarste) Komponente ist **BIO**logisch.

BioNet Ackerbautage Grundlagen

### Nährstoffbilanz

Komponenten der **NÄHRSTOFFVERFÜGBARKEIT**

- Löslichkeit** der verschiedenen Nährstoffbindungsformen  
Bodenuntersuchung
- Wurzelnaher** Nährstofftransport
- Räumliche Nähe** zu den Orten der Nährstoffaufnahme  
Durchwurzelbarkeit
- Transport** unter den vorherrschenden Umweltbedingungen  
Wurzeffizienz

13/50

BioNet Ackerbautage Wurzelsysteme

### Aufbau und Wachstum von Wurzelsystemen

14/50

BioNet Ackerbautage Wurzelsysteme

### Leben im Untergrund...

Organismus	Menge
Wurzeln	500-5000 kg ha <sup>-1</sup>
Bakterien	500 kg ha <sup>-1</sup> 10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup> Zellen pro cm Wurzel 10 <sup>10</sup> -10 <sup>12</sup> Zellen pro g Rhizosphärenboden
Pilze und Strahlenpilze	1500 kg ha <sup>-1</sup>
Tierische Mikroorganismen	100 kg ha <sup>-1</sup>
Regenwürmer	400 kg ha <sup>-1</sup>

Nach Watt et al. (2006) und Jedicke (1989)

Das Bodenleben muss ernährt werden (bis zu 20 GVE ha<sup>-1</sup>). Dann bringt es seine Leistungen für die Bodenfruchtbarkeit und den Pflanzenertrag.

15/50

BioNet Ackerbautage Wurzelsysteme


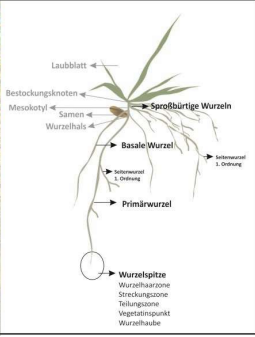
### Grundlagen der Wurzelfunktionalität

16/50

BioNet Ackerbauatage Wurzelsysteme

### Die Bauteile des Wurzelsystems

#### Einkeimblättrige Arten


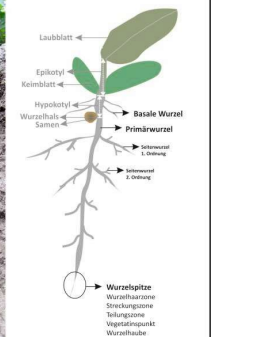



17/50

BioNet Ackerbauatage Wurzelsysteme

### Die Bauteile des Wurzelsystems

#### Zweikeimblättrige Arten

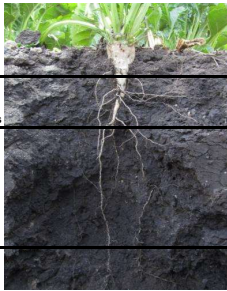
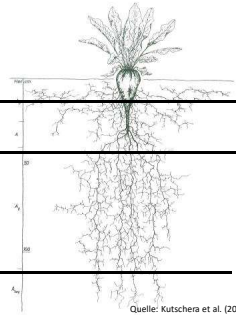



18/50

BioNet Ackerbauatage Wurzelsysteme

### Die Architektur des Wurzelsystems

#### Zuckerrübe (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris*)





Quelle: Kutschera et al. (2009)


19/50

BioNet Ackerbauatage Wurzelsysteme

### Grobe und feine Wurzelsysteme



Hohe Kraft durch Pfahlwurzel



Hohe Oberfläche durch Büschelwurzeln

20/50

BioNet Ackerbautage Wurzelsysteme

### Das „Hirn“ des Systems

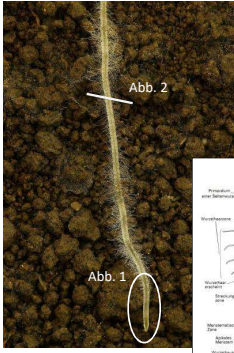


Abb. 2

Abb. 1

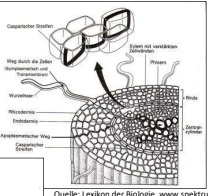


Abbildung 2

Quelle: Lexikon der Biologie, www.spektrum.de

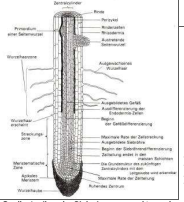


Abbildung 1


Quelle: Lexikon der Biologie, www.spektrum.de

21/50

BioNet Ackerbautage Wurzelsysteme

### Überleben durch Anpassung

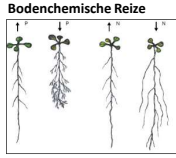
**Boden: „Heimat“ der Wurzel**



**Einflussfaktoren**

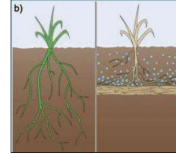
- > Mechanischer Widerstand
- > Wasser- und Lufthaushalt
- > Nährstoffe
- > Bodentemperatur

**Bodenchemische Reize**



Quelle: Lorenz-Baube et al. (2001); Curt-Otto Plant Biol.

**Bodenphysikalische Reize**



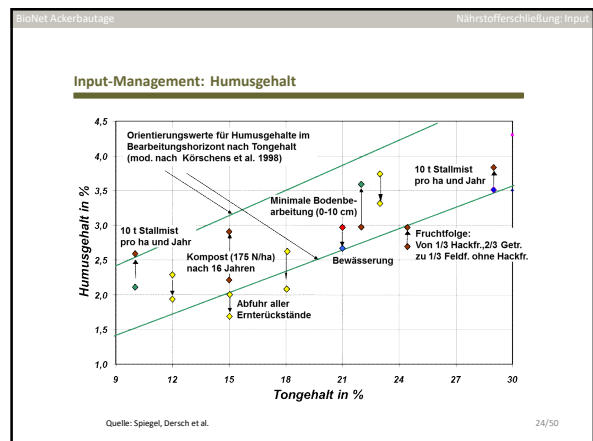
Quelle: MUNKV (Hrsg.) Bodenverdrichtungen vermeiden.

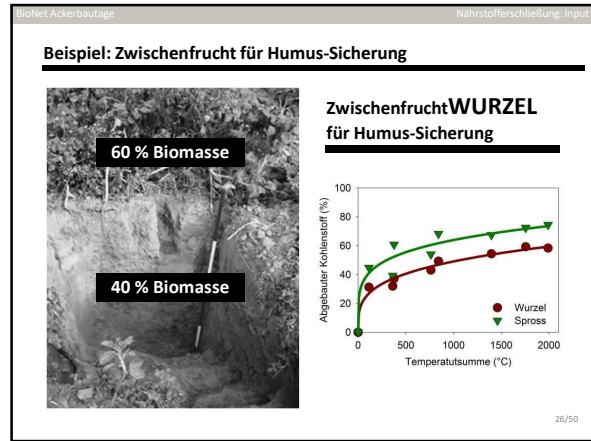
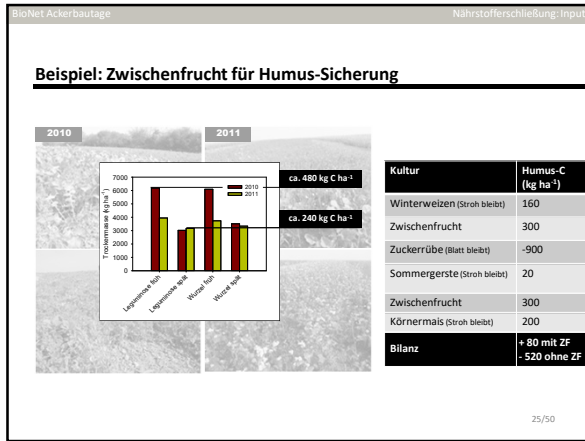
22/50

BioNet Ackerbautage Nährstoffschließung

### Wurzelfunktionen in der Nährstoffschließung

23/50





BioNet Ackerbautage Nährstoffschließung: Input

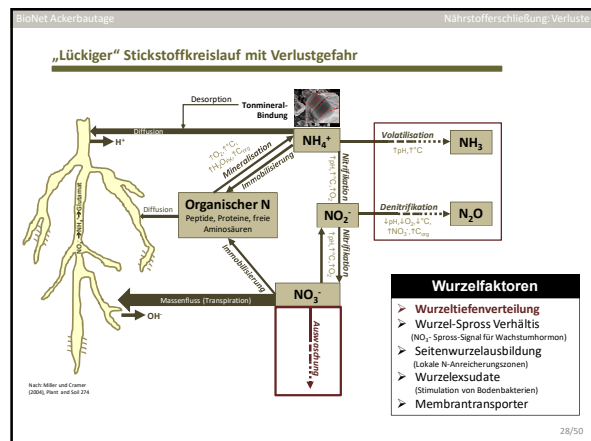
### Eine neue Sicht auf den Humusmanagement

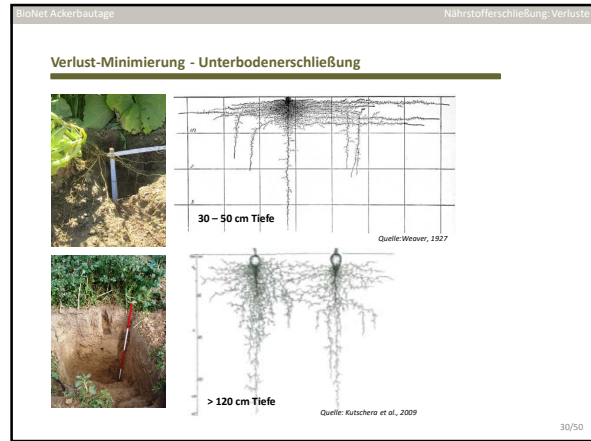
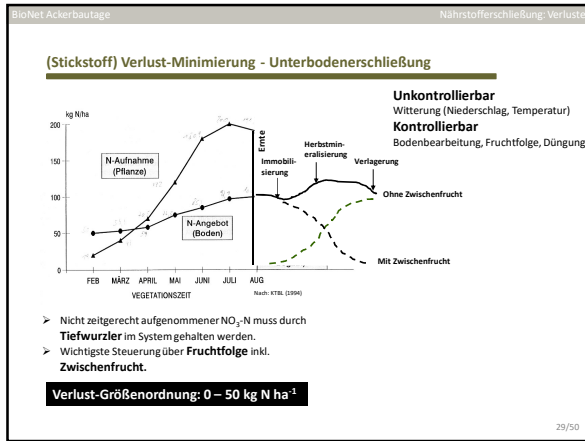
#### Bedeutung von „Wurzelhumus“

1. Stabile organische Substanz  
Chemisch: Lignin und Suberin  
Physikalisch: in Aggregaten  
Örtlich: im Unterboden
2. Labile organische Substanz  
Bis zu 40 % der Assimilate über Wurzelabscheidungen in den Boden (10-20 kg N ha<sup>-1</sup>)

Quelle: Schmitt et al. (2012) Nature

27/50



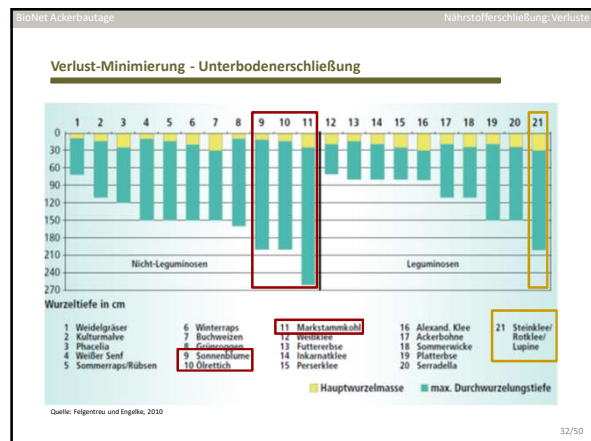


BioNet Ackerbautage Nährstofferschließung: Verluste

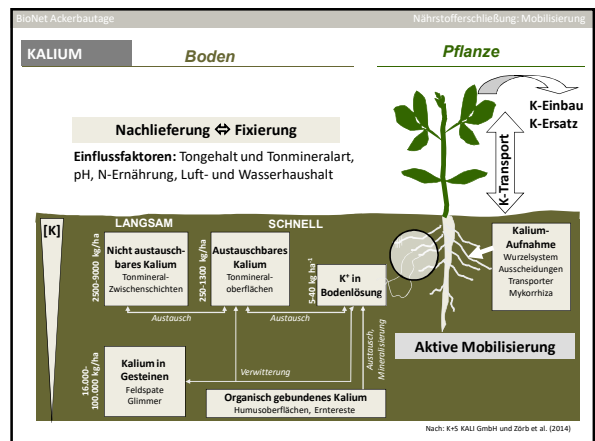
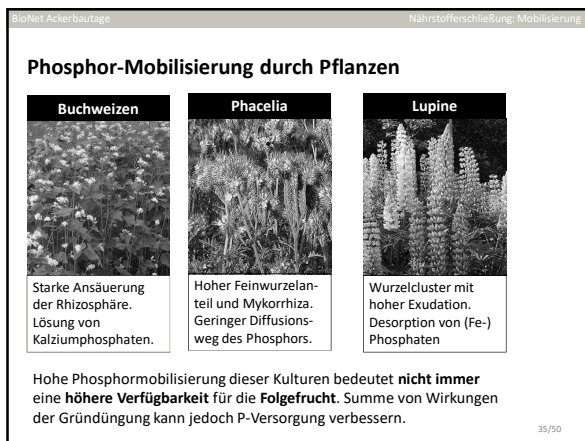
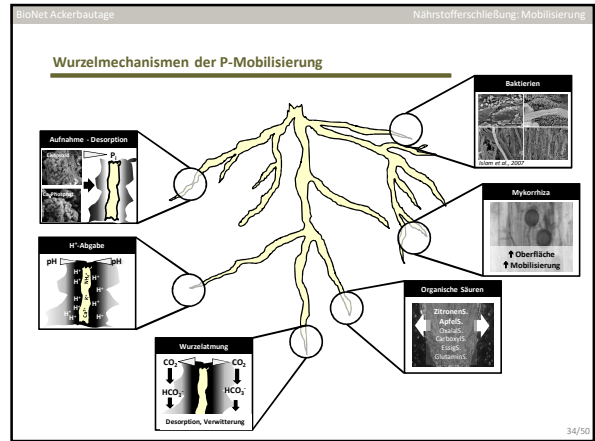
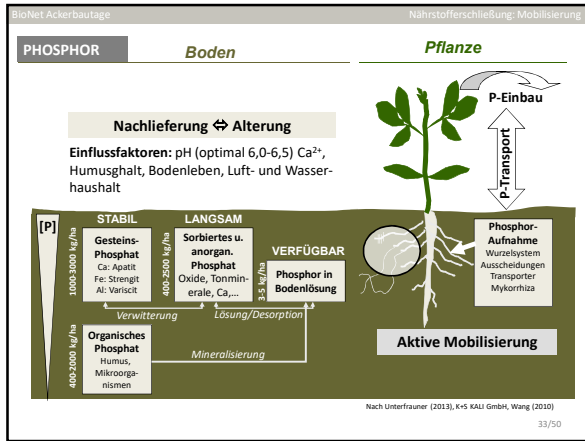
### Verlust-Minimierung - Unterbodenerschließung

Kulturart	Hauptdurchwurzelungszone bis cm	Weitere Durchwurzelungszone bis cm	Einzelne Wurzelfasern bis cm
<b>Leguminosen</b>			
Luzerne (zweij.)	57	90	145 u. tiefer
Rotklee (einj.)	41	100	132
Erbsen	23	46	67
Sommerwicke	20	52	90
<b>Getreide</b>			
Winterroggen	37	75	105
Winterweizen	34	78	96
Haler	41	75	205
Wintergerste	33	74	101
Sommergerste	23	72	98
<b>Öl- und Hackfrüchte</b>			
Winterraps	30	62	102
Kartoffeln	35	66	93
Zuckerrüben	42	74	110
Mais	26	53	90

31/50







BioNet Ackerbautage Nährstoffschließung: Mobilisierung

### Wurzelmechanismen der K-Mobilisierung

Diffusionsgeschwindigkeit ca. 100 mal höher als Phosphor

37/50

BioNet Ackerbautage Nährstoffschließung: Mobilisierung

### Bakterielle Biodünger

Bakteriengruppe	Nährstoff
Rhizobien	Stickstoff (50-300 kg N ha <sup>-1</sup> )
Azotobacter	Stickstoff (15-20 kg N ha <sup>-1</sup> )
K-lösende Mikroorganismen (KSM) Bacillus mucilaginosus, B. edaphicus, ...	Kalium
P-lösende Mikroorganismen (PSM) Bacillus sp., B. circulans, Azotobacter chroococcum, ...	Phosphor
Wachstumsfördernde Mikroorganismen (PGPR) Azospirillum brasilense, Pseudomonas fluorescens, ...	Indirekt (s.u.)

Quelle: Isom et al., 2007

Quelle: Jeremy Burgess, www.fincroamerica.com

### Wirkungsweisen

- Fixierung von N<sub>2</sub>
- Verbesserte Nährstofflösung durch Exudate
- Hormonelle Stimulation des Wurzelwachstums
- Verbesserte Symbiosen (Rhizobien, Mykorrhiza)

38/50

BioNet Ackerbautage Nährstoffschließung: Entzug

### Stickstoff- und Wassereffiziente Wurzelsysteme

$$\text{Ertrag} = \text{WA} \times \text{WNE} \times \text{HI}$$

$$\text{Ertrag} = \text{NA} \times \text{NNE} \times \text{HI}$$

WN ... Wasseraufnahme  
 WNE ... Wassernutzungseffizienz  
 HI ... Harvest Index  
 NA ... Stickstoffaufnahme  
 NNE ... Stickstoffnutzungseffizienz

Effiziente Wasser – und N-Aufnahme (WA, NA)	
Einflussfaktor auf die Wurzel	Veränderung an der Wurzel
Wasser ↓	Wurzel-Sproß Verhältnis ↑, Tiefenwachstum Hauptachsen ↑ (Hydrootropismus), Seitenwurzelbildung ↓
Stickstoff ↓	Wurzel-Sproß Verhältnis ↑, Tiefenwachstum Hauptachsen ↑, Seitenwurzelbildung ↓, Feinwurzelanteil ↑

39/50

BioNet Ackerbautage Nährstoffschließung: Entzug

### Phosphor- und Kaliumeffiziente Wurzelsysteme

#### Effiziente Phosphor- u. Kalium Aufnahme

##### Wurzelanpassung

Wurzel-Sproß Verhältnis ↑  
 Oberflächennahes Wurzelwachstum  
 Wurzelhaare ↑  
 Exudation ↑ (Änderung Exudat-Chemie)

Relative Bedeutung

Hohe Versorgung

Niedrige Versorgung

Aufnahmeeffizienz

Umwertungseffizienz

40/50

BioNet Ackerbaufrage Nährstoffschließung: Erntung

### Wurzelstrategien von Kulturpflanzen

<b>Weizen (Gräser)</b> 	<b>Zuckerrübe (Raps,...)</b> 	<b>Erbse (Leguminosen)</b> 
<b>Intensitätstypen</b> Dichtes Wurzelgeflecht reduziert den Transportweg zum Aufnahmeort	<b>Funktionalitätstypen</b> Effiziente Transportsysteme und plastische Anpassung (z.B. Wurzelhaarlänge) bringen hohe Aufnahme rate	<b> Helfertypen</b> Hoher Besatz mit Bodenmikroorganismen führt zu guter Mobilisierung

Pflanzenwurzeln sind der Schlüssel der **Standortanpassung**. Viele Mechanismen „springen“ erst bei **Mangelbedingungen** an.

41/50

BioNet Ackerbaufrage Bodenstruktur

### Wurzel für physikalische Bodenfruchtbarkeit

Die Rolle der Wurzel in der „Aggregat-Hierarchie“

Quelle: Jastrow und Miller (1988)

Aggregat-Hierarchie-Modell	
nach Tisdall und Oades (1982)	
Aggregate der Schlufffraktion < 20 µm	Grenzflächenkräfte
Mikroaggregate 20-250 µm	Biochemische Kräfte (Exudate)
Makroaggregate > 250 µm	Pilzhyphen und (Fein)Wurzeln

Quelle: Sarkhot et al., 2006

42/50

BioNet Ackerbaufrage Bodenstruktur

### Wurzel für physikalische Bodenfruchtbarkeit

Die Rolle der Wurzel in der „Poren-Hierarchie“

Poren-Hierarchie-Modell	
Nach Elliot und Coleman (1988)	
Intra-Mikroaggregatporen	Restwasser (Textur)
Inter-Mikroaggregatporen	Wasserspeicherung, Mikrofauna
Inter-Makroaggregatporen	
Makroporen	Drainage, Durchlüftung, Wurzeln, Makrofauna

Makroporen unterliegen hoher raum-zeitlicher Variabilität.  
Sie müssen aktiv gebildet werden!

15.12.2016

43/50

BioNet Ackerbaufrage Bodenstruktur

### Bodenverdichtung durch

Dichte > 1,6 g cm<sup>-3</sup>  
Wurzelkraft > 20 bar

**Plattengefüge**

Quelle: Murer et al., 2009

(i) Natürliche Setzung des Bodens (z.B. nach mechanischen Lockerung, über Winter)

(ii) Überschreitung der Tragfähigkeit des Bodens (z.B. schwere Maschinen)

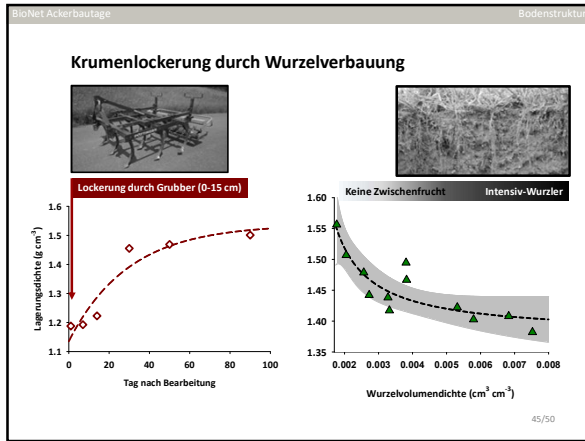
(iii) Gefüge(zers)störung durch Bodenbearbeitungsgeräte (z.B. Pflug, Fräse)

... führt zu

- schlechter Durchwurzelung
- gestörter Umsetzung der organischen Substanz
- Trocken-, Luft- und mechanischem Stress
- Ertragsreduktion

18 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche Verdichtungsgefahr sehr hoch

44/50



BioNet Ackerbautage Bodenstruktur

### Lockerung durch die Pflanzenwurzel

**Intensität der Maßnahme** (gering / hoch)

<p>Erhalt des Gefüges durch Anbau von Zwischenfrüchten</p>	<p>Verbesserung des Gefüges durch Änderung der Fruchtfolge</p>	<p>Brechen der Verdichtung und Sanierung des Gefüges durch Nutzungsänderung</p>
--	--	---

**Intensität der Bodenverdichtung** (gering / hoch)

### Lockerung durch Bodenbearbeitung

<p>Erhalt des bestehenden Bodenbearbeitungssystem</p> <p>&gt; Geringere Setzung</p> <p>&gt; Erhalt der Lockerung</p> <p>&gt; Sanierung von Oberboden-gefügeschäden</p>	<p>Übergang zu konservierendem Bodenbearbeitungssystem</p>	<p>Untergrundlockerung und biologische Gefügestabilisierung</p>
--	--	---

46/50

BioNet Ackerbautage Bodenstruktur

### Bodenverdichtung

**Reaktion bei Bodenschadverdichtung**

Einflussfaktor auf die Wurzel	Veränderung an der Wurzel
Eindringwiderstand ↑	Durchmesser ↑, seitliches Ausweichen (Wurzeltiefe ↓)
Sauerstoff ↓	Durchmesser ↑, Luftgewebe in der Wurzelrinde, Feinwurzeln + Wurzelhaare ↓

Starke Pfahlwurzeln können besser durch Verdichtungen durchwachsen. Sie sind jedoch kein Mittel zur Sanierung von Schadverdichtungen !

47/50

BioNet Ackerbautage Zusammenfassung

### Zusammenfassung Wurzelfunktionen

**Löslichkeit:** Die Wurzel mobilisiert gemeinsam mit Mikroorganismen aktiv Nährstoffe, um eine ausreichende Versorgung zu sichern.

**Transport:** Die Wurzel kann das Nährstoffgefälle zwischen Boden und Pflanzen durch verbesserten Nährstoffentzug erhöhen und den Transport beschleunigen. Je kürzer die Bahn zur Wurzel, desto besser die Nährstoffverfügbarkeit

**Aufnahme:** Je größer die Wurzeloberfläche und je mehr Wurzeln eine „Einheit“ Spross versorgen, desto besser die Nährstoffversorgung. Pro Einheit Wurzel kann die Aufnahme durch die Transportsysteme hochreguliert werden.

48/50

BioNet Ackerbautage Schlussfolgerungen

### Schlussfolgerungen – Wurzelmanagement

**NATUR** Die Pflanze passt sich an das Nährstofflevel in Boden an und hat viele natürliche Mechanismen (Exsudation, Transporter, Mikroorganismen), um mit niedriger Versorgung fertig zu werden.

**MANAGEMENT** Das effizienteste Management des Wurzelraums sichert:

- eine gesunde **Wachstums Umgebung** für die Ausbreitung der Wurzeln über einen lockeren, krümeligen Boden.
- einen ausgeglichenen **Wasser-, Luft- und Temperaturhaushalt** über die Bodenstruktur.
- ausreichend organische Substanz für ein **aktives Bodenleben** über Fruchtfolge und Zwischenfrucht.
- **Gründüngung** durch nährstoffeffiziente/-erschließende Kulturarten in der Fruchtfolge und als Zwischenfrucht.

49/50

BioNet Ackerbautage Schlussfolgerungen

### Schlussfolgerungen – Wurzelmanagement

Zufuhr von **Biodüngern** (*Mykorrhiza, Bakterien*) hat nur Sinn, wenn deren natürliches Vorkommen gestört ist und als Grund für Nährstoffmangel festgemacht werden kann.

*Es sollte in diesem Fall unbedingt nachgedacht werden, ob die zumeist natürlich vorkommenden Organismen gestört wurden und wie sie im System gefördert werden können.*

Die Forschung zeigt teilweise deutliche Unterschiede in der **Nährstoffeffizienz zwischen Sorten**. Eine gezielte Züchtung wäre gerade für den biologischen Landbau sinnvoll.

*Bei mehrortigen Sortenprüfungen kann u. u. der Ertrag auf Mangelstandorten einen Hinweis geben. Dies ist aber bei (konventionellen) Zuchtprogrammen mit entsprechender Nährstoffzufuhr nicht möglich.*

50/50

**Universität für Bodenkultur Wien**

**Department für Nutzpflanzenwissenschaften**

Abteilung Pflanzenbau – Arbeitsgruppe Pflanzliche Produktionsökologie

PD DI Dr. Gernot Bodner

Konrad Lorenz Straße 24, A-3430 Tulln an der Donau  
Tel.: +43 1 47654-3331, Fax: +43 1 47654-3300  
gernot.bodner@boku.ac.at, www.boku.ac.at

