



Phosphoranreicherung, -Sättigung und -Löslichkeit im Bodenprofil als Faktoren des P-Austrags

Dr. Kathlin Schweizer, Humboldt-Universität Berlin

Weiterbildung zum Erosionsschutz

im Rahmen des vom Freistaat Thüringen geförderten Projektes

"Fachberatung Gewässerschutz zur Senkung der Nitrat- und Phosphoreinträge in Gewässer"

PROBLEMATIK

1. Boden hat Puffer-, Speicher- und Filterfunktion

- P-Anreicherung besonders der Tonfraktion, „partikuläres Phosphat“
- verzögert Ab- / Zunahme der P-Konzentration der Bodenlösung durch Nachlieferung bzw. durch Festlegung von Phosphat
- Einfluss auf P-Löslichkeit entlang der Transportstrecke
- **schleichende Re-Mobilisierung über lange Zeiträume**

2. Unterschiedliche Phosphorkenngrößen zur Quantifizierung von P-Versorgung und P-Austrag

Fragestellungen

In welchem Verhältnis stehen P-Versorgungszustand und P-Parameter des Austrags?

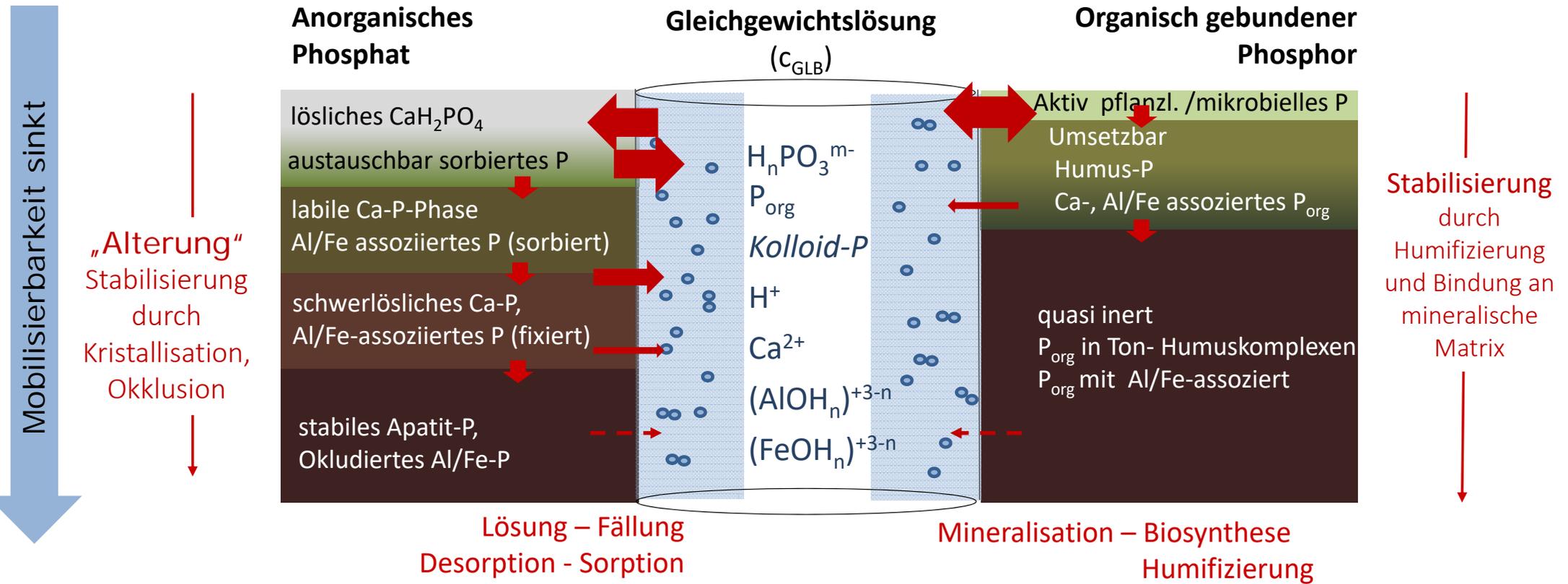
DL-P; CAL-P im Oberboden vs. P_{total} an der Oberfläche,

DL-P; CAL-P im Oberboden vs. H_2O -/ $CaCl_2$ - P an der Oberfläche

DL-P, CAL-P im Oberboden vs. P-Konzentration der Bodenlösung in tieferen Bodenhorizonten

Welche Faktoren beeinflussen die P-Bindung und P-Nachlieferung (Mobilisierung) entlang der Transportstrecke?

1. Problematik
- ➔ 2. Beschreibung des P-Vorrates nach Mobilität der Bindungsformen
3. Korrelation von P-DL, P-CAL und P-Parameter des P-Austrags
4. P-Verteilung und Verlagerung im Bodenprofil
5. Schlussfolgerungen



P-Bindungsformen im Gleichgewicht mit der Bodenlösung → Pufferung der P-Konzentration

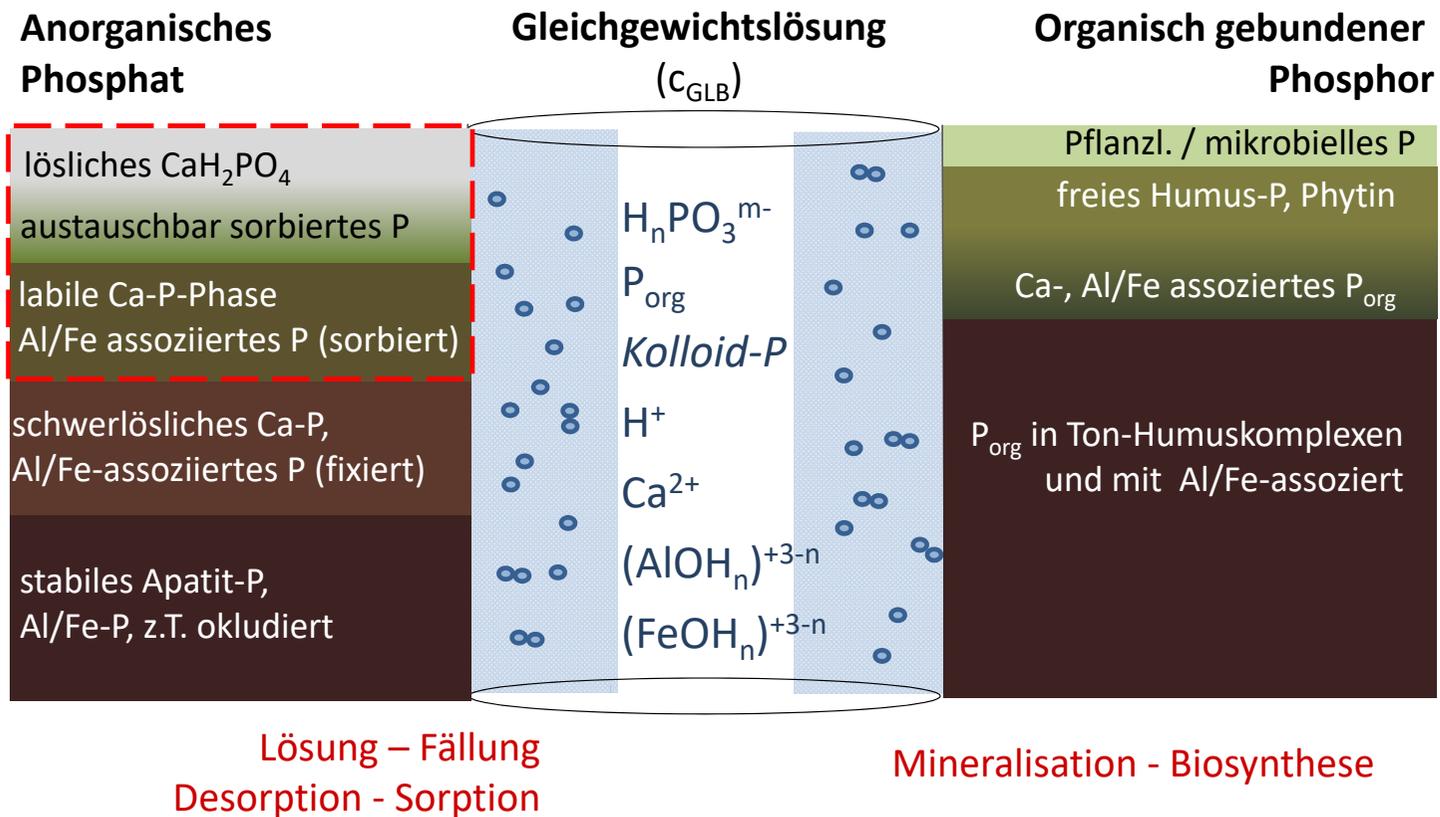
Ausgangsgestein, Grad der Humusakkumulation, Wassereinfluss bestimmen die dominierenden Bindungsformen und Mobilisierungsprozesse

Carbonatfreies Gestein		Carbonathaltiges Gestein	Anreicherung OBS	Grund- und Staunässe
<p>silikatarm</p> <ul style="list-style-type: none"> geringe Al-/Fe-Oxidgehalte geringe P-Sorption hoher Anteil an leichtlöslichem und labilem Ca-P, Al/Fe-P pH variabel < 7 <p><i>diluviale Sande</i></p>	<p>silikatreich</p> <ul style="list-style-type: none"> mittlere bis hohe Ton- und Al-/Fe-Oxidgehalte hohe P-Sorption bedeutende Anteile an okkludiertem P pH variabel < 7 <p><i>lehmig-tonige Verwitterungsböden</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> schwerlösliche Ca-P, Al-/Fe-P-Verbindungen pH-Wert stabil zwischen 6 -8 <p><i>Verwitterungsböden aus Mergel- und Kalkgestein Lößböden</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> P_{org} steigt proportional, da OBS mit bis > 10fach höher P-Konzentration im als Gestein Mobilisierung bei Abnahme der OBS <p><i>alluviale Böden Gleye, Anmoore</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> P-Anreicherung in Fe-Oxiden Mobilisierung bei Sinken des Redoxpotenzials aufgrund hoher OBS-Gehalte hohe P_{org}-Gehalte <p><i>Pseudogleye, Gleye, Anmoore, Moore</i></p>

Pflanzenverfügbares P: P-Fraktion, die mit der P-Aufnahme der Pflanze korreliert

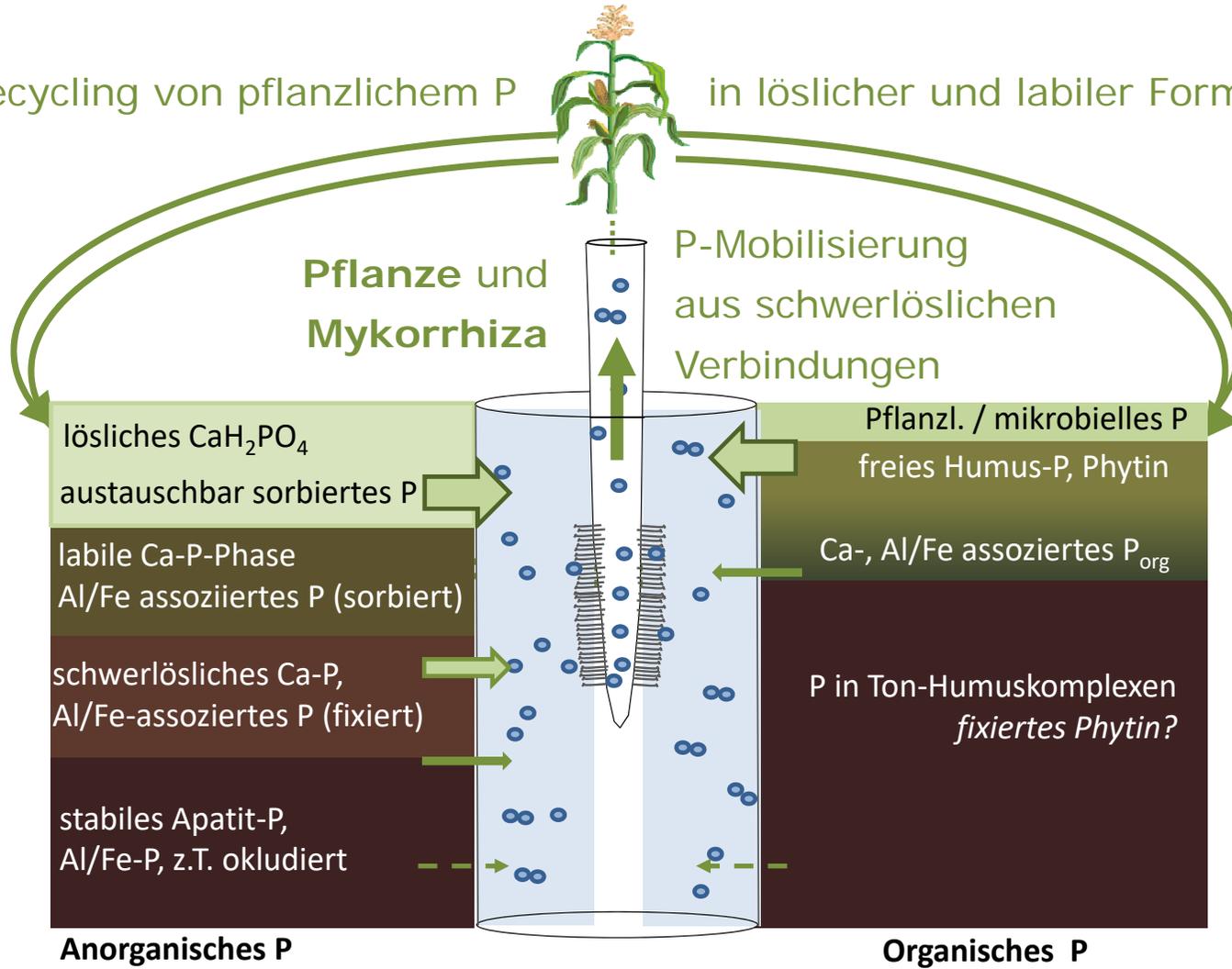
„Pflanzenverfügbares P“

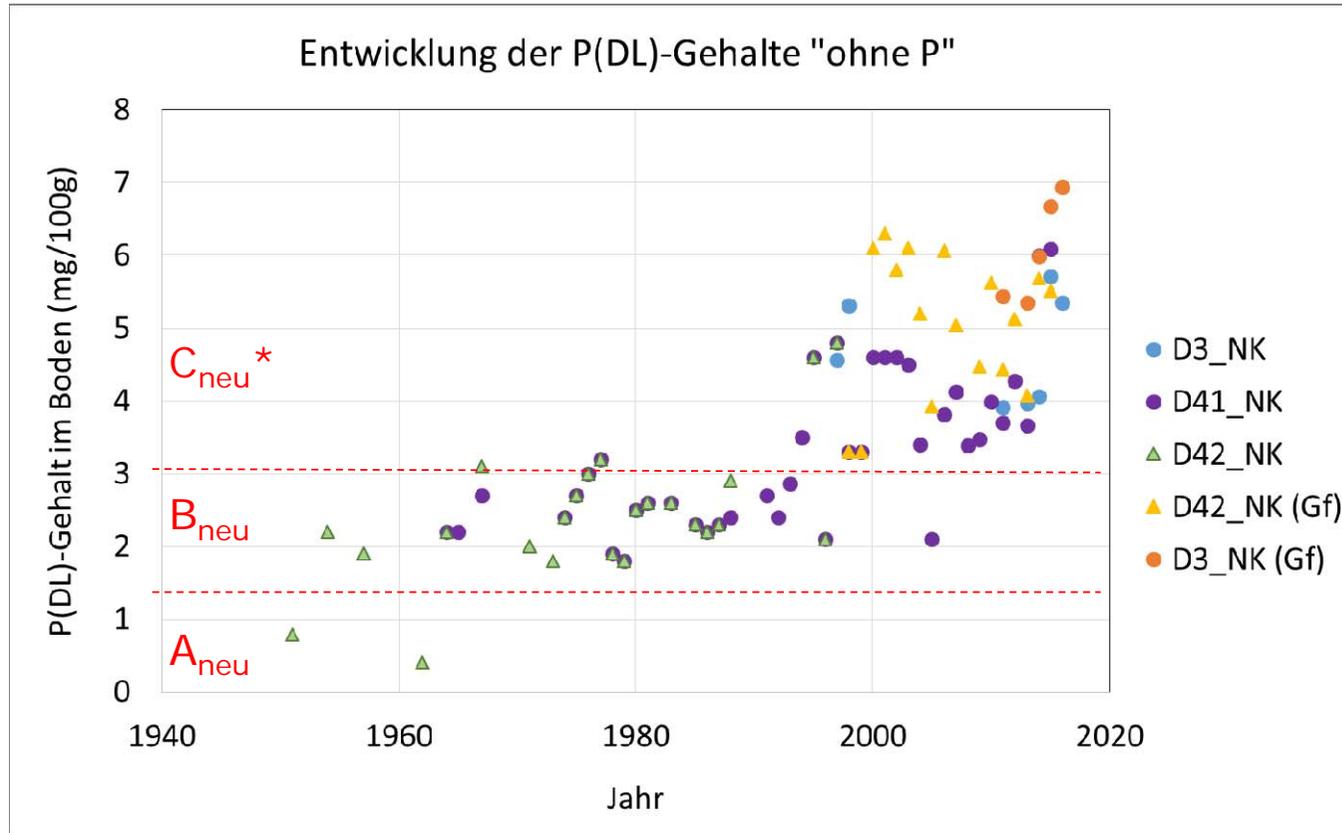
$P_{DL} > P_{CAL}$
van Laak et al. (2018)



P-BINDUNGSFORMEN UND MOBILITÄT

Recycling von pflanzlichem P in löslicher und labiler Form



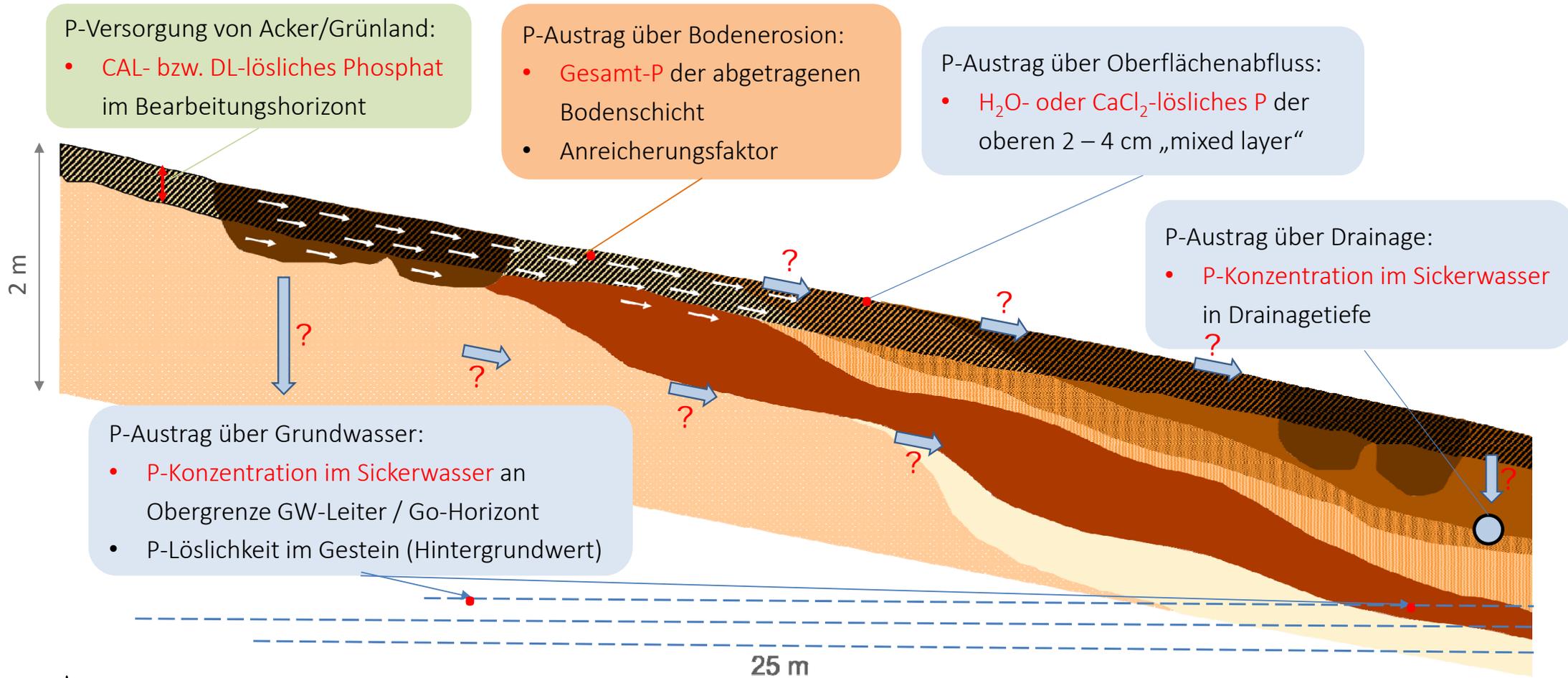


Ergebnisse der Dauerfeldversuche auf diluvialen Sandböden in Thyrow und Berlin-Dahlem: Gf ... Getreidefolge, Gf in D42: Roggenmonokultur, sonst Fruchtwechsel. Grenzwerte für $P(DL) = P(CAL)/0,84$. (Schweitzer et al. 2017)

* P-Gehaltsklassen für P(DL) berechnet auf Basis P(CAL) nach VDLUFA-Standpunkt, 1018

1. Problematik
2. Beschreibung des P-Vorrates nach Mobilität der Bindungsformen
- ➔ 3. Korrelation von P-DL, P-CAL und P-Parameter des P-Austrags
4. P-Verteilung und Verlagerung im Bodenprofil
5. Schlussfolgerungen

Phosphor-Parameter der P-Versorgung und des P-Austrages (review: Nash et al. 2020)



Beziehung zwischen pflanzenverfügbarem P (P_{DL}) zu Gesamt-P, P-Konzentration der Bodenlösung und Pufferung im **Oberboden** von Ackerböden

(Schweitzer et al. 2013)

Ergebnisse aus Untersuchungen von Dauerdüngungsversuchen

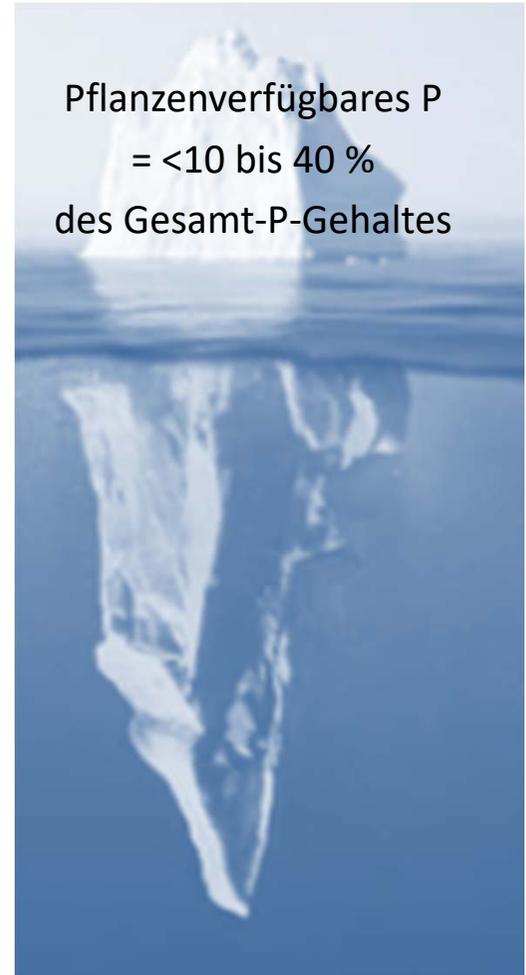
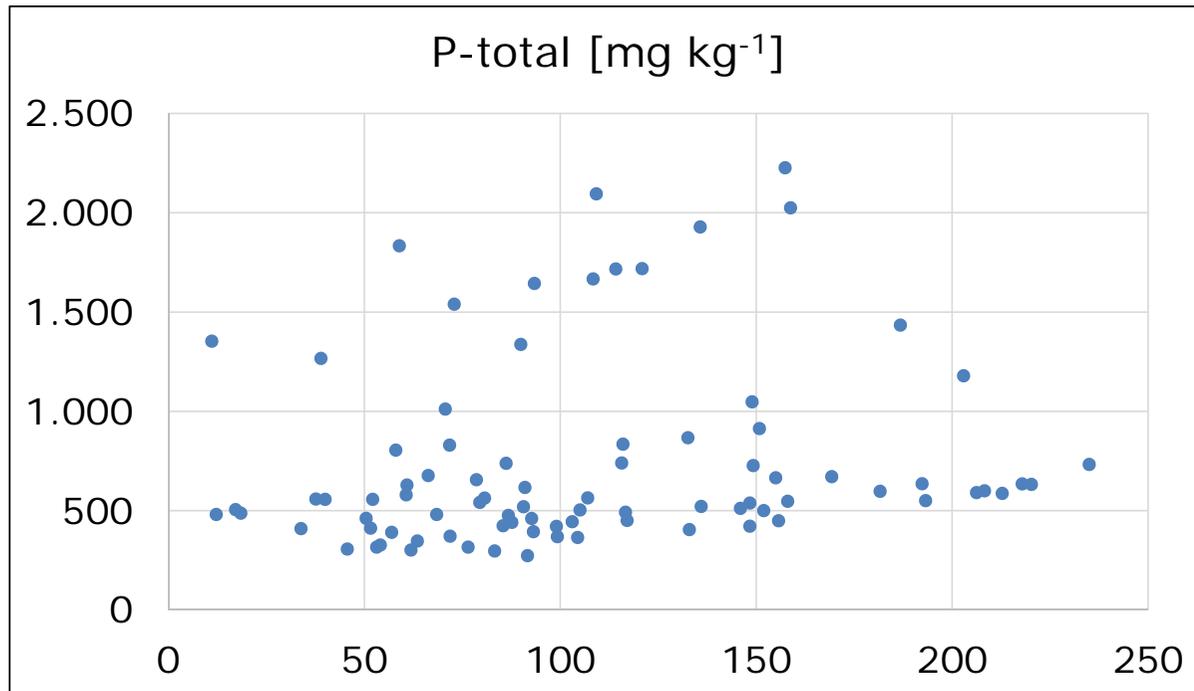
Anzahl der Versuche:	21 (9 D, 12 CZ)
Anzahl der Prüfglieder:	146
Boden-/ Standortbedingungen:	stark differenziert
Probenahme:	nach 21 – 94 Jahren
P-Versorgung:	Gehaltsklasse A - E

KORRELATION PFLANZENVERFÜGBARES P UND PARAMETER DES P-AUSTRAGES

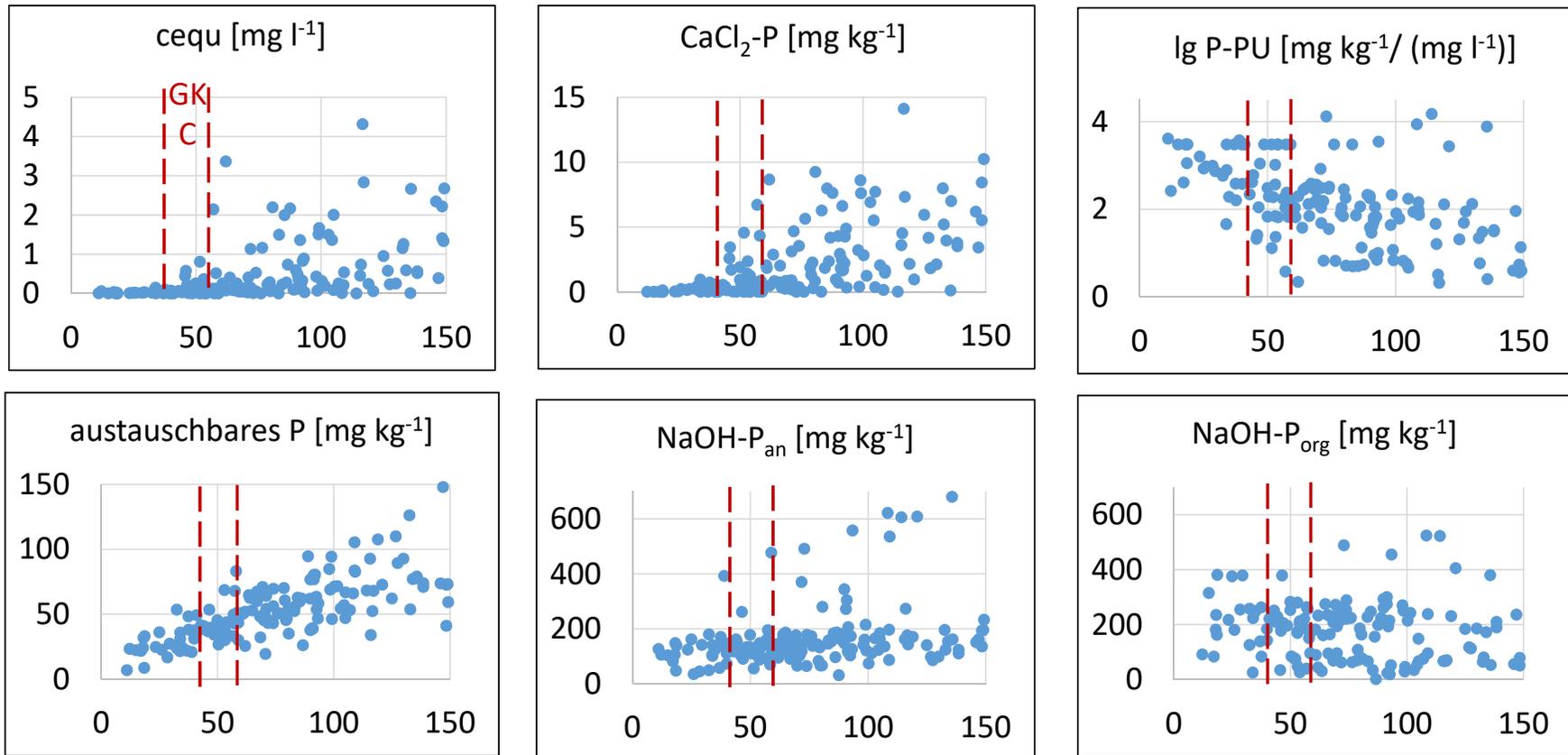
Untersuchte P-Parameter

P_{DL}	mg kg ⁻¹	pflanzenverfügbares P (nach VDLUFA-Methodenbuch Band 1: Methode A 6.2.1.2)	
P_t	mg kg ⁻¹	Gesamt-P (nach VDLUFA-Methodenbuch Band 1: Methode A 2.4.2.1)	
P-Löslichkeit			
P-CaCl₂	mg kg ⁻¹	P-Intensität, sofort lösliches P	} P-Sorptionsisotherme (modifiziert n. Pagel et al 1991)
c_{GBL}	mg l ⁻¹	P-Gleichgewichtskonzentration der BL	
P-Pufferung und Sorption			
PU	mg kg ⁻¹ /(mg l ⁻¹)	P-Pufferung der P-Konzentration der BL für P _{GBL}	
PSI	-	P-Sorptionsindex PSI = P-Sorption / P-Zugabe	
Fe_{ox} + Al_{ox}	mmol kg ⁻¹	oxalatlösliches (aktives) Fe und Al (n. Schwertmann)	
P-Nachlieferung			
P_{aust}	mg kg ⁻¹	austauschbares P in H ₂ O mit Anionenaustauscherharz (Thiessen & Moir, 1993)	
P-NaOH_{an}	mg kg ⁻¹	Fe/Al-assoziertes anorganisches P	} Sequentielle P-Fraktionierung (n. Marks, 1977)
P-NaOH_{org}	mg kg ⁻¹	Fe/Al-assoziertes anorganisches P	

Beziehung P_{total} zu pflanzenverfügbarem P_{DL}

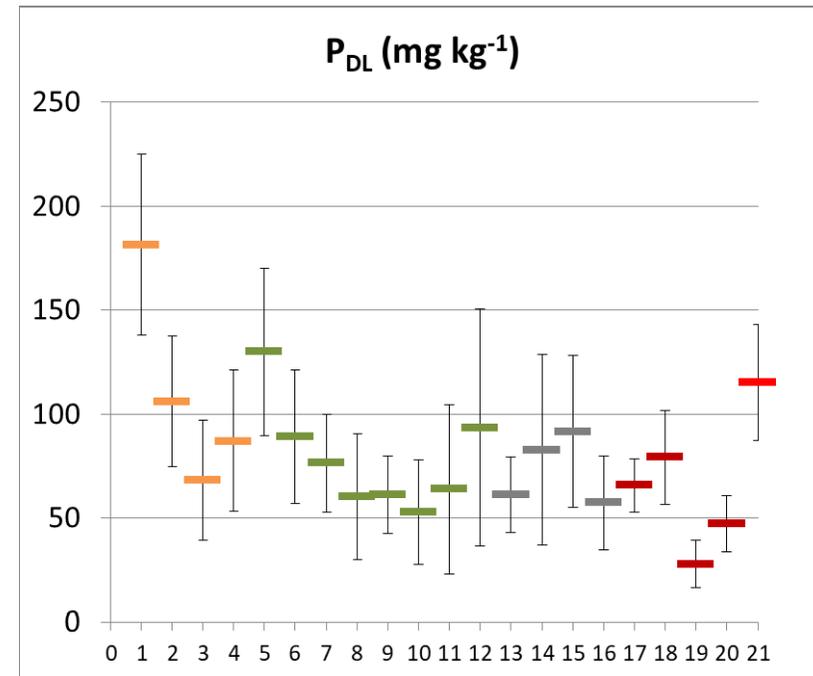
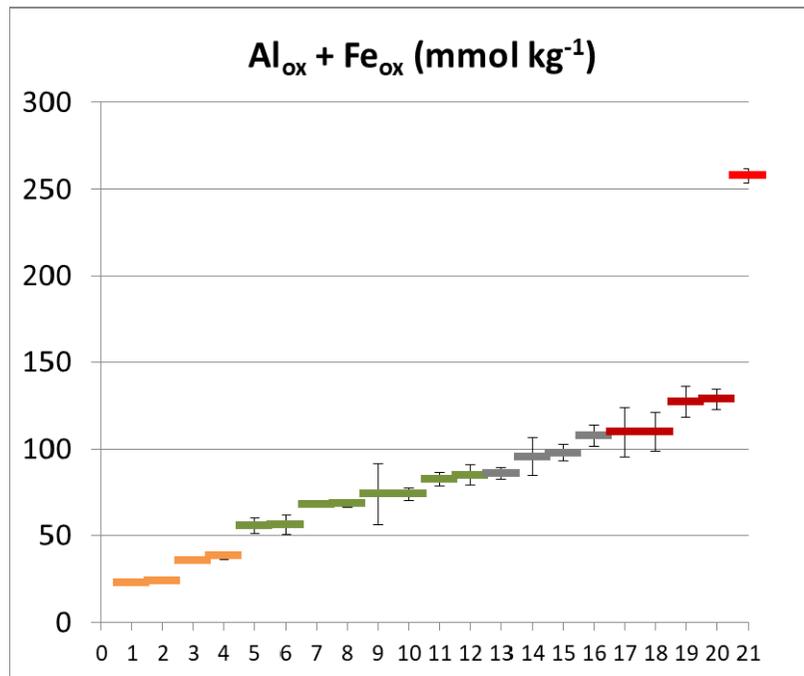


Parameter der P-Löslichkeit, P-Pufferung, P-Nachlieferung in Beziehung zu P-DL



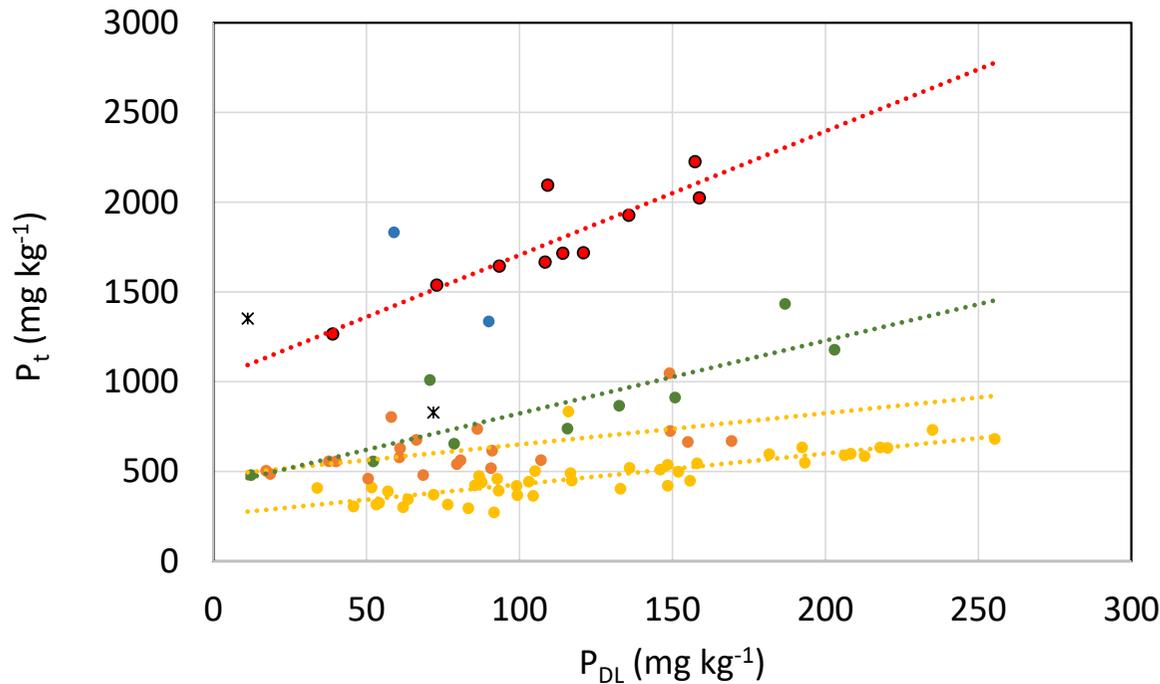
P-DL in mg kg⁻¹

Gehalt an aktivem Fe und Al ($\text{Fe}_{\text{ox}} + \text{Al}_{\text{ox}}$) als Klassifikationsmerkmal von Böden?



Geringe Variation des Gehaltes an oxalatlöslichem Fe und Al im Vergleich zu stark differenziertem pflanzenverfügbares P_{DL} in Dauerdüngungsversuchen (Nr. 1-21)

Beziehung zwischen pflanzenverfügbarem P_{DL} und P_{total} (\rightarrow partikuläres P)



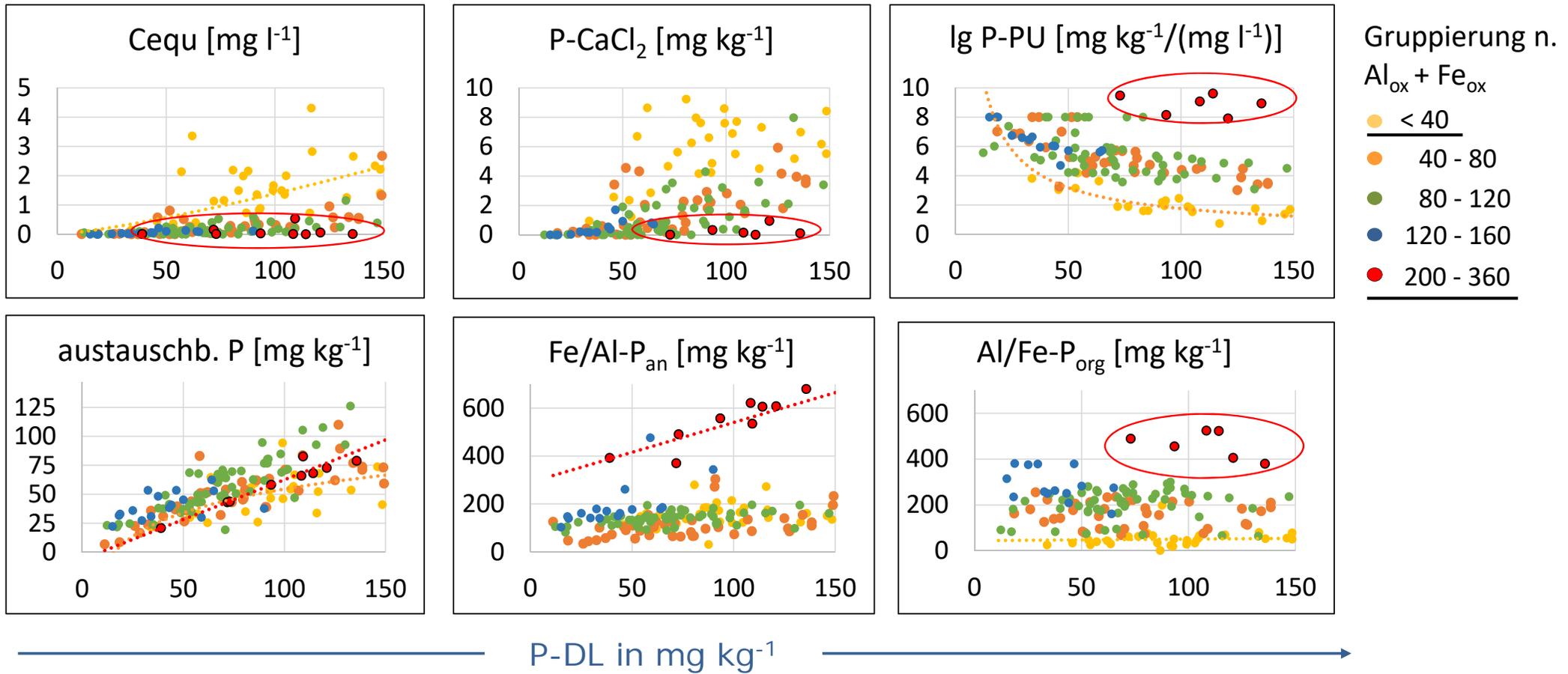
Oxalat-lösliches Al+Fe (mmol kg^{-1})

● <40 ● 40-80 ● 80-120 ● 120-160 ● 200-360 * Ausreißer

$\text{Al}_{\text{ox}} + \text{Fe}_{\text{ox}}$	$y =$	a	$* x + b$	r^2
<40	$P_t =$	1,71	$* P\text{-DL} + 257$	0,63
40-80	$P_t =$	1,74	$* P\text{-DL} + 476$	0,32
80-120	$P_t =$	4,05	$* P\text{-DL} + 418$	0,71
200-360	$P_t =$	6,90	$* P\text{-DL} + 1016$	0,78

Anstieg $P_{DL} < 20$ bis 60 % Anstieg P_t

Parameter der P-Löslichkeit, P-Pufferung, P-Nachlieferung in Beziehung zu P-DL



P-Sorptionsindex

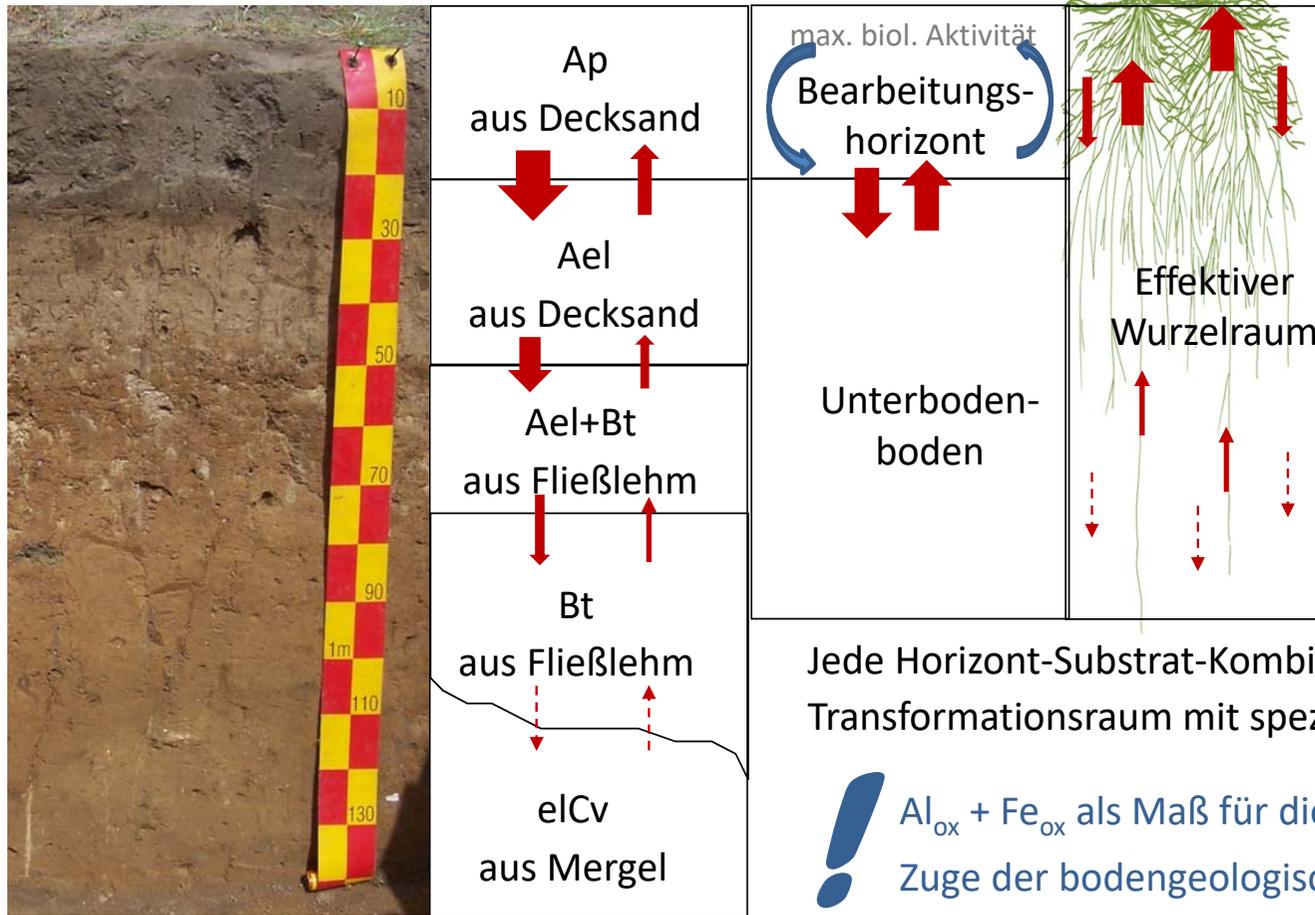
$Al_{ox} + Fe_{ox}$	bei P-Zugabe 100 mg kg^{-1}	bei P-Zugabe 1000 mg kg^{-1}
< 40	5 - 40	
40 - 80	51 - 90	
80 - 120	41 - 87	
120 - 160	57 - 90	
200 - 360	98 - 100	80 - 83

Al /Fe-reiche Böden sorbieren zugegebenes, überschüssiges P
nahezu vollständig!

1. Problematik
2. Beschreibung des P-Vorrates nach Mobilität der Bindungsformen
3. Korrelation von P-DL, P-CAL und P-Parameter des P-Austrags
- ➔ 4. P-Verteilung und Verlagerung im Bodenprofil
5. Schlussfolgerungen

P-VERTEILUNG UND -VERLAGERUNG IM BODENPROFIL

Je geringer die Bearbeitungstiefe umso höher der P-Gehalt



Streuschicht mit hoher P-Löslichkeit

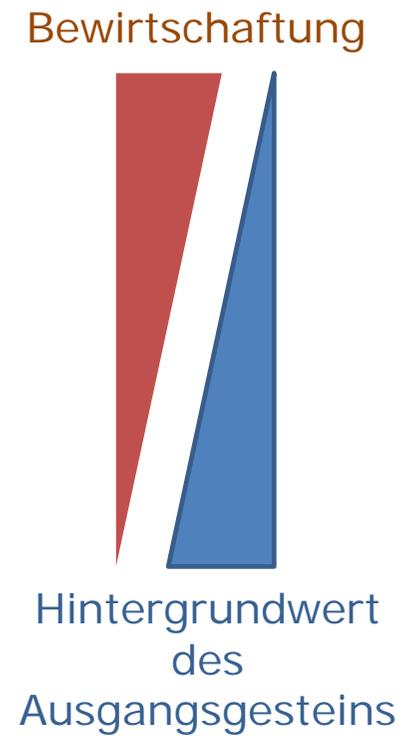
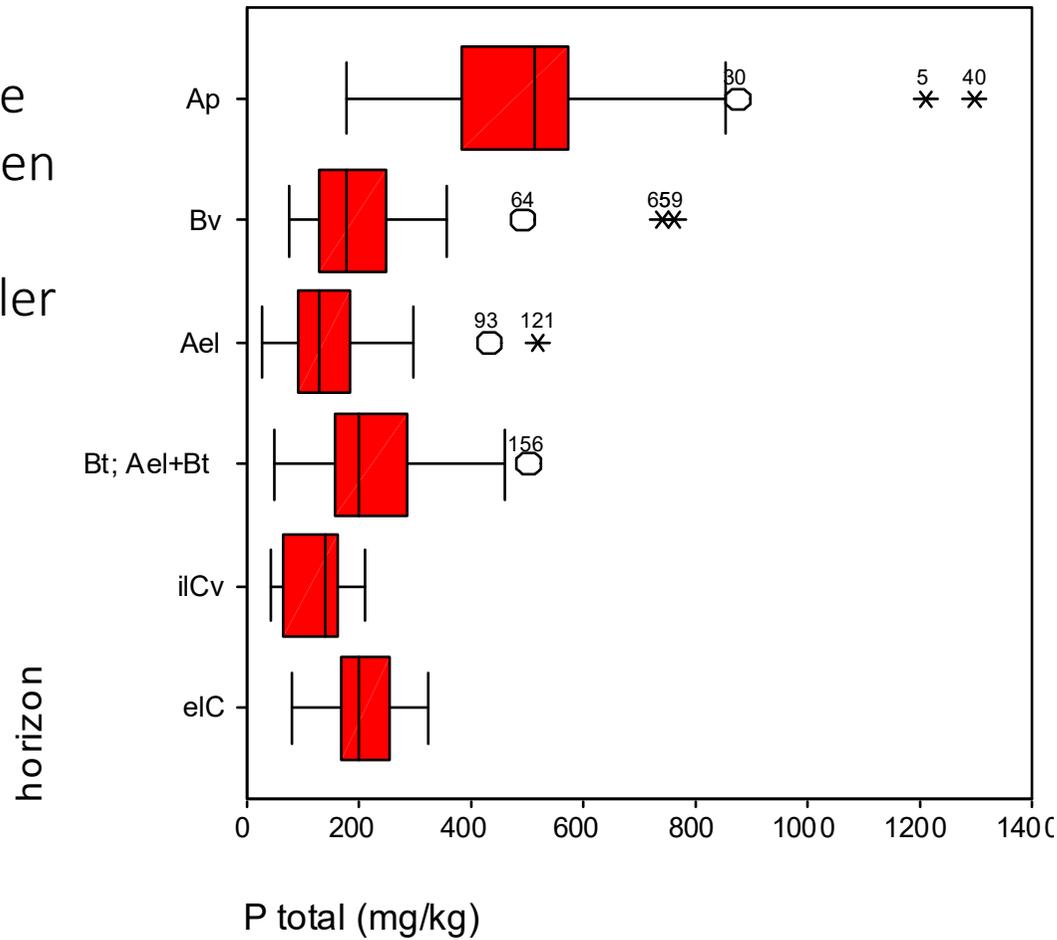
Foto:
Fahlerde aus Sand über Sandlehm,
Bodenschätzung ISI4D
(Lehrprofil HU Berlin Berlin-Dahlem)

Jede Horizont-Substrat-Kombination (HSK) ist ein spezieller Transformationsraum mit spezifischer P-Bindung / Löslichkeit

! $Al_{ox} + Fe_{ox}$ als Maß für die P-Bindungskapazität häufig im Zuge der bodengeologischen Landesaufnahme analysiert.

P-VERTEILUNG UND -VERLAGERUNG IM BODENPROFIL

Gesamt-P-Gehalte
in Bodenhorizonten
von Braun- und
Fahlerden diluvialer
Standorte



P-VERTEILUNG UND -VERLAGERUNG IM BODENPROFIL

Horizonte / Schichten mit Barrierefunktion



Lehm- / Tonbänder
und Horizonte mit
Toneinwaschung (t) in
Fahlerden und
Parabraunerden
→ Sorption an Ton
und Fe-/Al-oxiden



Unterbodenhorizonte
mit Einwaschung von
Fe- und Al-Oxiden (s)
(Podsol, meist unter
Wald)
→ viel $Al_{ox} + Fe_{ox}$



Horizonte im
Kapillarsaum des
Grundwassers (Go, Gso)
→ Fe-Oxide → Fe_{ox}

Bei Grundwasseranstieg durch Fe-Reduktion löslich!



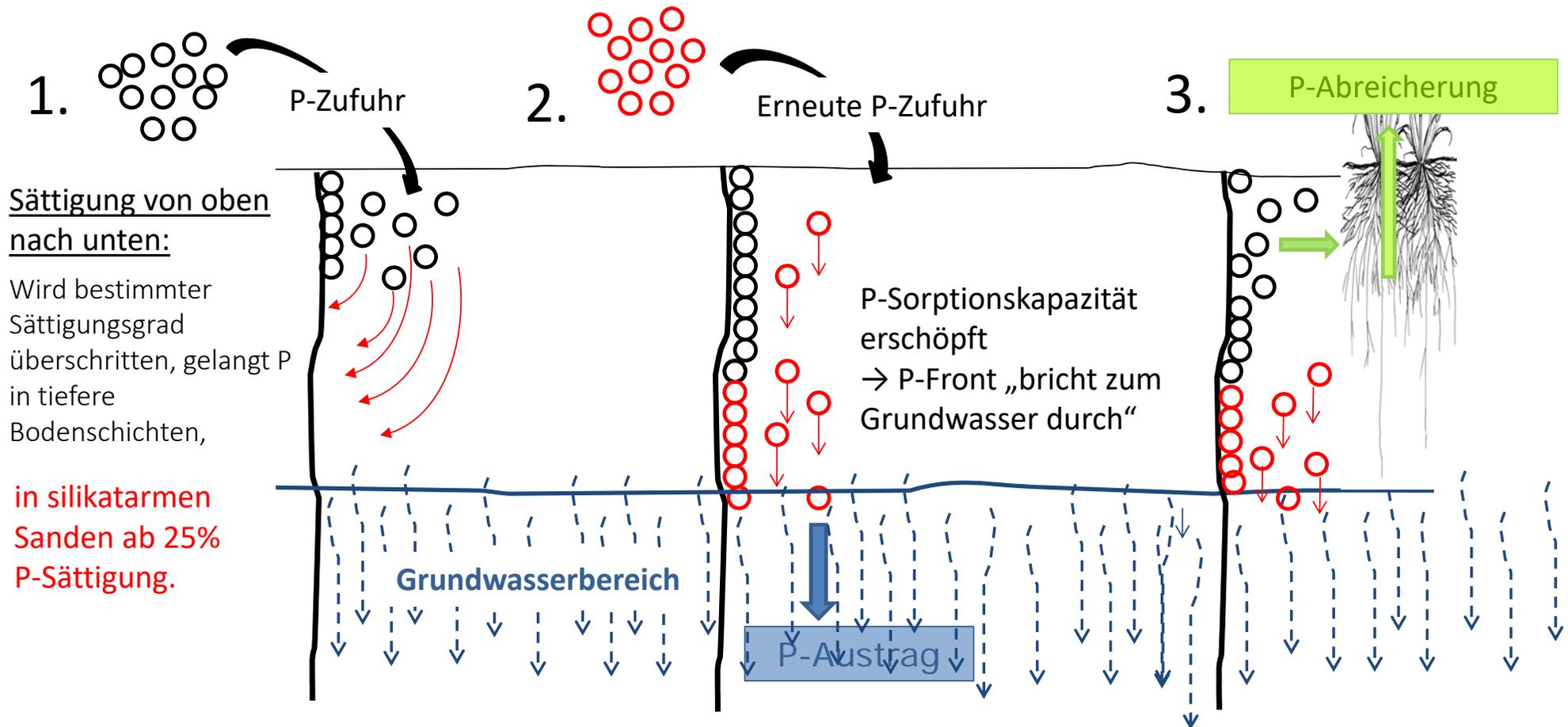
Moorbodenhorizonte
unter Entwässerung,
Horizonte im Kapillarsaum
des Grundwassers (Hs)
→ Fe-Oxide → Fe_{ox}



Horizonte aus
carbonathaltigem Gestein
(e, c)
→ $pH > 7$ + hohe Ca-
Aktivität
→ geringe P-Löslichkeit

PHOPHORVERLAGERUNG IM BODENPROFIL

P-Austrag mit dem Sickerwasser ist abhängig von der Sorptions-/ Bindungskapazität der Bodenhorizonte über dem Grund- / Stauwasserleiter (Schoumans & Chardon 2015)



PHOPHORVERLAGERUNG IM BODENPROFIL

Berechnung der P-Sorptionskapazität von Böden mit geringem Gehalt an aktivem Gehalt Al und Fe (Al_{ox} und Fe_{ox})

Beispiel: Parabraunerde oberhalb des Tonanreicherungshorizontes (Bt)

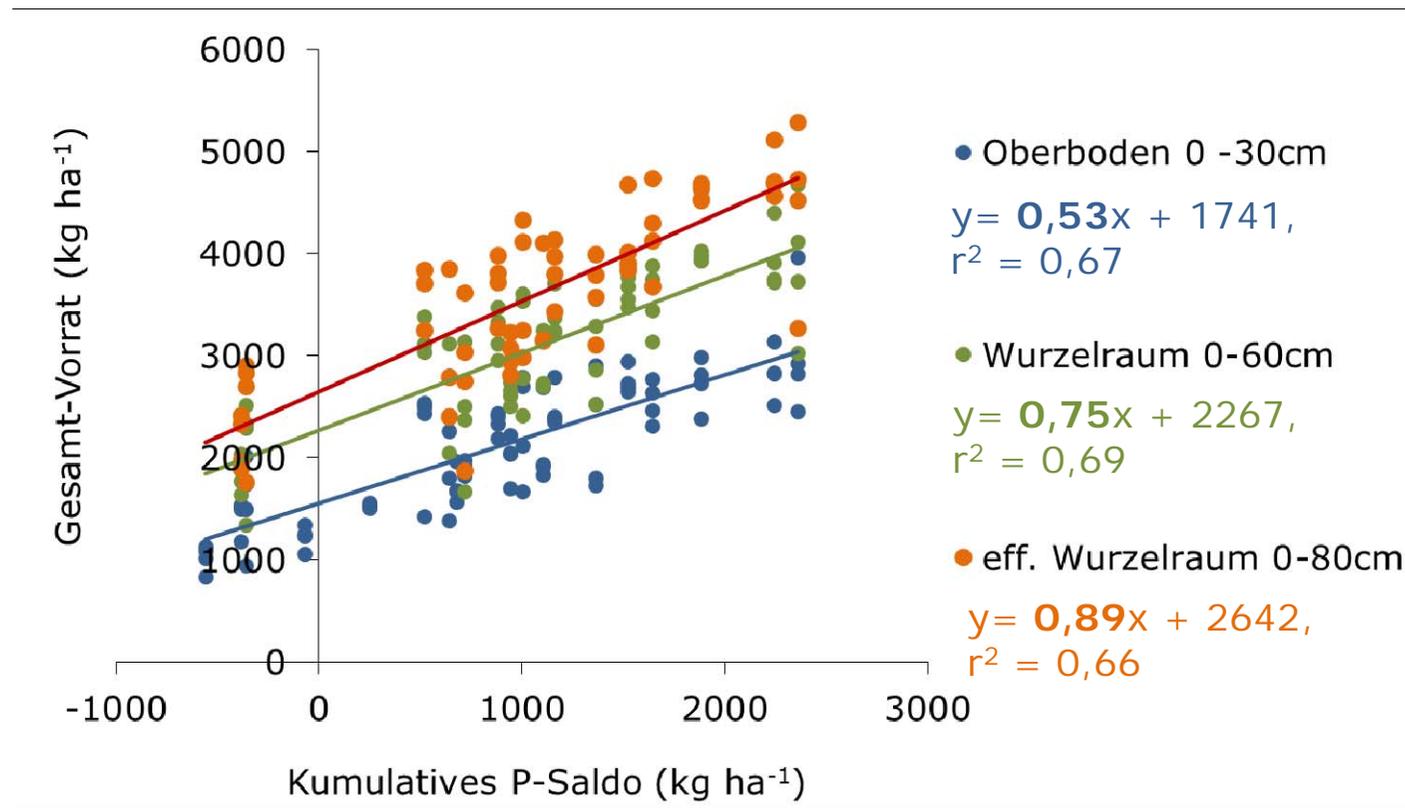
Empirisch ermittelter Faktor gültig nur für diese Böden in De Bolle et al., 2013

Horizont (DBG)	Mächtigkeit cm	Sand	Schluff	Ton	TRD g cm ⁻³	pH (CaCl ₂)	Al _{ox} +Fe _{ox} mmol kg ⁻¹	Horizont-Masse kg m ⁻²	Al _{ox} +Fe _{ox} je Horizont mmol m ⁻²	P-Sorptionskapazität = 0,5 * (Al _{ox} +Fe _{ox})		P-Sorptionskapazität bei 25% Sättigung kg ha ⁻¹	
										g m ⁻²	kg ha ⁻¹		
Ap	15	79,0	16,5	4,7	1,62	5,7	33,8	243	8.206	127	1272	318	
rAp	15	76,0	18,3	5,7	1,74	6,0	33,7	261	8.795	136	1363	341	
Ael	5	68,0	21,0	11,0	1,84	5,8	38,9	92	3.581	56	555	139	
Ael+Bt	40	53,0	27,1	19,8	1,70	6,3	60,4						
elCv	110	74,4	16,5	9,0	1,73	7,6	15,6						
										x Molmasse P: 31 g mol ⁻¹		Summe	798

Ab Sättigung von 25% erhöhte P-Mobilisierung

Eingangsgrößen

P-Austrag in diluvialen Böden – Ergebnisse aus Dauerdüngungsversuchen des LELF Brandenburg und der HU Berlin nach 40 – 90 Jahren

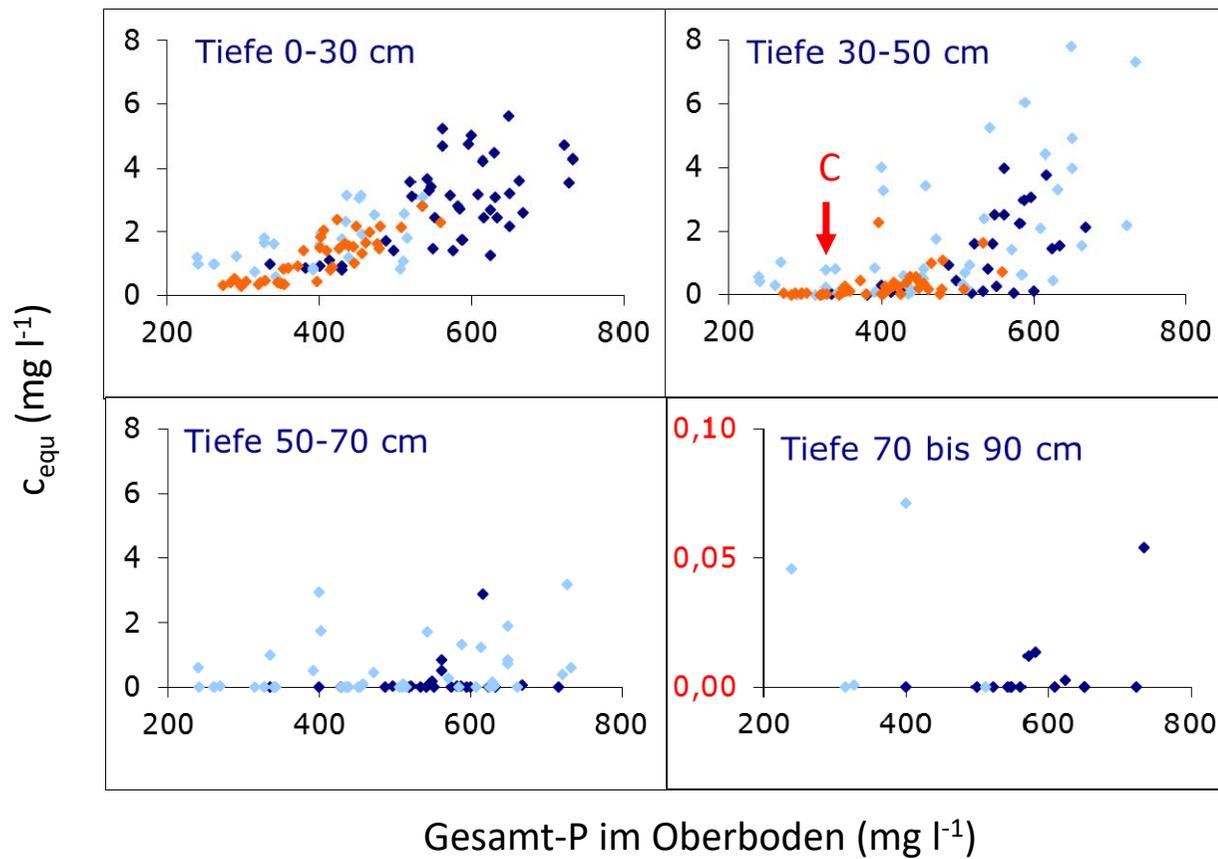


Schweitzer et al. (2016)

53 %
des überschüssig
gedüngten P sind
im Bearbeitungs-
horizont
verblieben

PHOPHORVERLAGERUNG IM BODENPROFIL

Steigende P-Konzentration der Bodenlösung im Bodenprofil bei P-Akkumulation im Oberboden (N = 110)



Dauerversuche

HU_D3 / LELF_P60 / LELF_M4

SCHLUSSFOLGERUNGEN



Cal-P / DL-P gibt P-Anreicherung und -, Löslichkeit im Oberboden nur teilweise wieder.

Gehalt an aktiven Fe und Al ist ein wichtiger Faktor der P-Sorption und P-Speicherung besonders in carbonatfreien Böden

- bodenbedingt sehr variabel
- Böden mit extrem geringen und extrem hohen Gehalten sind zu differenzieren
- sehr hohe Gehalte: Anreicherung von partikulären P
- sehr geringe Gehalte: hohe P-Löslichkeit

Sorptionskapazität im Boden ist auch bei geringen Gehalten an aktiven Fe/Al hoch und verzögert P-Austrag über Sickerwasser.

Mit P angereicherte Unterböden sind Quelle für P-Austrag auch wenn Oberboden an P verarmt

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!

Statischer Bodennutzungsversuch in Berlin-Dahlem, Anlage 1923

Bestimmung von Phosphat in der Bodenlösung

- a) H₂O oder 0,1M CaCl₂-Extraktion mit engem Boden-Lösung-Verhältnis (< 1:10)
- b) Bodensättigungsextrakt nach DIN 38414-4. laut BBodSchV
- c) Saugkerzen
- d) P-Gleichgewichtskonzentration abgeleitet aus P-Sorptionsisothermen (incl. Pufferung)

SRP ...soluble reactive P, $\varnothing < 0,45 \mu\text{m}$
= durch Molybdänblauumethode nachweisbares Ortho-Phosphat

Partikulär gebundenes P = „Kolloid-P“ $\varnothing > 0,45 \mu\text{m}$

DOP = dissolved organic P (incl. komplex gebundenes P)

Bestimmung nach chemischem Aufschluss aus der Differenz
zwischen total gelösten P und SRP

} **TOP**
Gesamt-P in Lösung

Bestimmung der P-Bindungsformen durch sequentielle P-Extraktion (Fraktionierung)

z.B. Tiessen & Moir, 1993; Marks, 1977

Bestimmung der P-Sorptions- und Bindungskapazität an aktiven Fe- und Al-Oxiden

Bestimmung des oxalatlöslichen Fe und Al n. Schwertmann

Bestimmung des P-Sättigungsgrades n. Schoumans & Chardon , 2015.

Bestimmung der P-Sorptionsverhältnisse und der P-Pufferung durch P-Isothermen

z.B. nach Pagel et al. 1981

De Bolle S, De Neve S, Hofman G. 2013. Rapid redistribution of P to deeper soil layers in P saturated acid sandy soils. *Soil Use and Management* 29:76–82.

Marks G. 1977. Beitrag zur präzisierten Charakterisierung von pflanzenverfügbarem Phosphat in Ackerböden. *Archiv für Acker-, Pflanzenbau und Bodenkunde* 21:447–456.

Pagel H, Benkenstein H, Kürger W. 1981. Die vereinfachte Ermittlung von P-Sorptionsisothermen und ihre Bedeutung für die Erfassung des P-Zustandes und der P-Dynamik im Boden. *Archiv für Acker-, Pflanzenbau und Bodenkunde* 25:755–764.

Schweitzer, K.; Kulhánek, M., Balík, J. (2013): Bewertung des pflanzenverfügbaren Phosphates im Boden – Präzisierung durch die Berücksichtigung des Gehaltes an oxalatlöslichem Eisen und Aluminium. *VDLUFA-Schriftenreihe 69: Untersuchen, Bewerten, Beraten, Forschen: 125 Jahre VDLUFA im Dienste von Landwirtschaft, Umwelt- und Verbraucherschutz, Berlin.* 226-233.

Schweitzer, K., Zimmer, J. Baumecker, M. (2016): Bewertung der Bodenfunktionen P-Speicherung und P-Nachlieferung für Sandböden trockener diluvialer Ackerstandorte auf der Grundlage von Dauerfeldversuchen. *VDLUFA-Schriftenreihe 73: Anforderungen an die Verwertung von Reststoffen in der Landwirtschaft. Kongressband 2016, Rostock.* 189-376.

Schoumans O F, Chardon W J. 2015. Phosphate saturation degree and accumulation of phosphate in various soil types in The Netherlands. *Geoderma* 237–238:325–335.

Tiessen H, Moir J O. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. In *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Ed M R Carter. London.

van Laak M, Klingenberg U, Peiter E, Reitz T, Zimmer D, Buczko U. 2018. The equivalence of the Calcium-Acetate-Lactate and Double-Lactate extraction methods to assess soil phosphorus fertility. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2018, 181, 795–801

VDLUFA-Methodenbuch Band 1: Bodenuntersuchung. https://www.vdlufa.de/Methodenbuch/index.php?option=com_content&view=article&id=7&Itemid=108&lang=de