

Anhang 1 - Phosphor in der Landwirtschaft

Phosphor in der Landwirtschaft

P ist ein wichtiges Element für die Pflanzen- und Tierwelt. Es ist ein Grundbaustein von ATP, DNS, RNS und Phospholipiden (wichtig in Zellwänden).

Außerdem spielt P eine wichtige Rolle in den folgenden Prozessen:

- Photosynthese
- Stickstofffixierung
- Blüten-, Frucht- und Samenproduktion
- Reifung und Qualität des Ernteguts

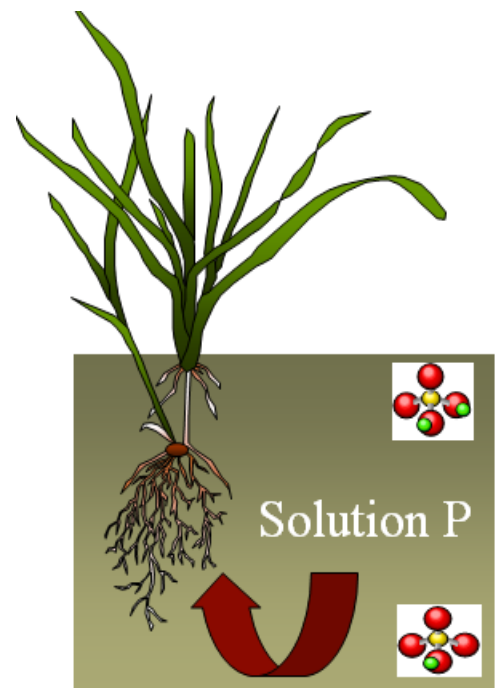
Nur ein Teil des gesamten P im Boden ist für die Pflanzen bioverfügbar, daher spielt P eine kritische Rolle in der Landwirtschaft. Der Gesamtgehalt von P im Boden liegt bei 0,1 - 0,2%: anorganischer Phosphor (≈50%) und organischer Phosphor (15-80%). Die P-Löslichkeit ist mit etwa 0,03 mg P/kg sehr niedrig.

Sowohl im Boden als auch in Wasser liegt P löslich in Form von Orthophosphaten, H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} und PO_4^{3-} , vor.

Im **sauren Milieu** ($\text{pH} < 7$), liegt vorwiegend das primäre Orthophosphat H_2PO_4^- vor. In diesem Molekül sind zwei Wasserstoffatome (grün dargestellt) an je ein Sauerstoffatom gebunden. Mehrere Wasserstoffatome deuten auf eine saure Umgebung hin.

Im **basischen Milieu** ($\text{pH} > 7$), liegt vorwiegend das sekundäre Orthophosphat HPO_4^{2-} vor. In diesem Molekül ist nur ein Wasserstoffatom an ein Sauerstoffatom gebunden, was auf eine alkalische Umgebung hindeutet. Im leicht basischen Milieu ($\text{pH} = 7,2$), liegen beide Spezies zu gleichen Teilen vor.

Viele Bodeneigenschaften wie eine Reichhaltigkeit von Ca, Al und Fe, organischen Substanzen, sowie dem pH-Wert beeinflussen die Löslichkeit und somit die Bioverfügbarkeit von P. Der pH-Wert ist der kritischste dieser Faktoren.



Anhang 1 - Phosphor in der Landwirtschaft

Reaktionen, die P-Verfügbarkeit reduzieren, treten in allen pH-Bereichen auf, sind aber in alkalischen ($\text{pH} > 7$) und sauren Böden ($\text{pH} < 5,5$) am ausgeprägtesten (s. Abbildung 1). Die höchste P-Verfügbarkeit wird in einem pH-Bereich zwischen 6,0 und 7,0 erreicht (Abbildung 1).

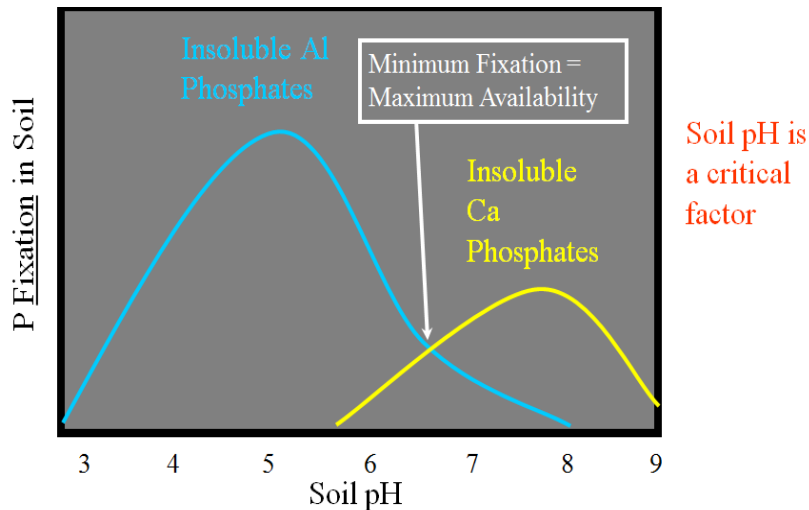


Abbildung 1. Verhalten von P bei verschiedenen pH-Werten des Bodens. P ist nur bei neutralem pH bioverfügbar.

Organischer Phosphor (Inositolphosphate, Nukleinsäuren und Phospholipide) tierischen oder pflanzlichen Ursprungs wird von Mikroorganismen im Boden mineralisiert und in verfügbare Formen (Orthophosphate) umgewandelt (Abbildung 2).

Mikroorganismen wandeln inorganischen P in organische P-Verbindungen wie Phospholipide, Nukleinsäuren und ATP um (Immobilisierung, siehe Abbildung 2). Anorganische P-Verbindungen werden mit der Zeit kristalliner und somit weniger löslich.

Anhang 1 - Phosphor in der Landwirtschaft

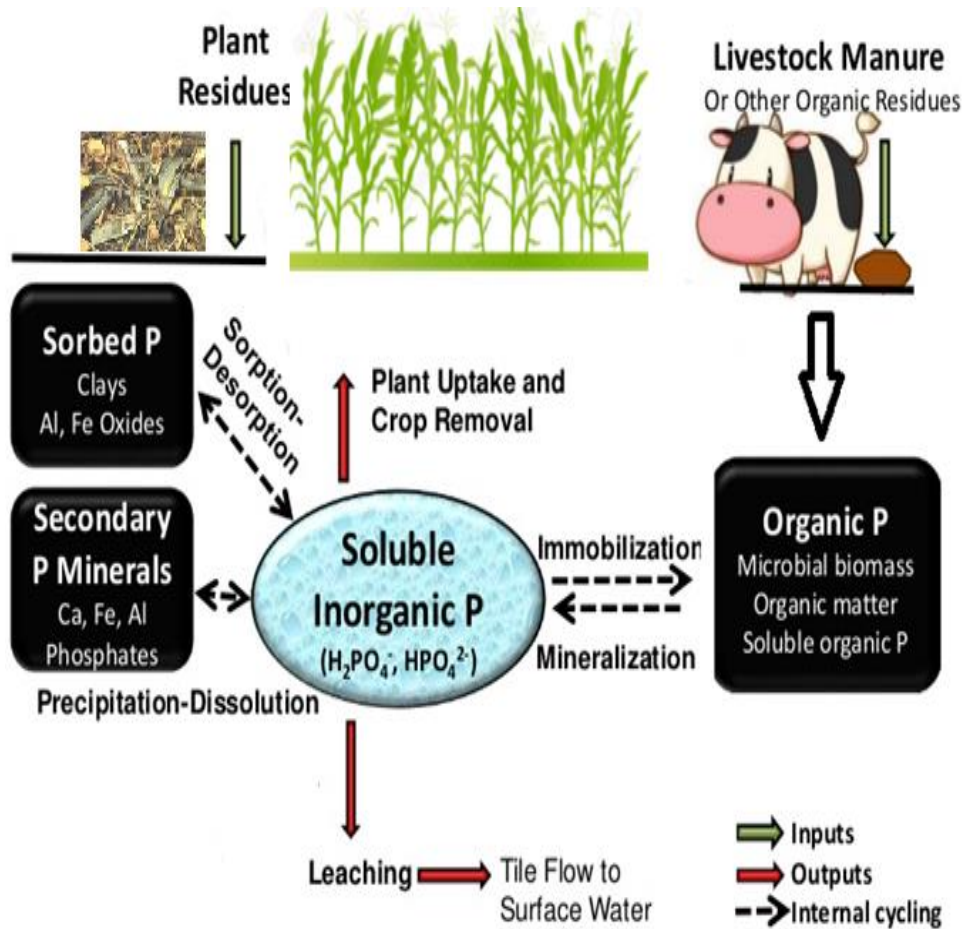


Abbildung 2: Der Phosphorkreislauf im landwirtschaftlichen Ökosystem. P liegt im Boden in anorganischen und organischen vor. Nur ein begrenzter Teil des P ist löslich und daher für die Pflanzen bioverfügbar. Der restliche Teil des P bildet unlösliche Ausfällungen.

P-Dynamik in der Rhizosphäre

Pflanzen haben verschiedene Strategien zur Aufnahme von Nährstoffen aus dem Boden entwickelt:

1) Wurzelstruktur

Die gängigsten Veränderungen treten in der Wurzelstruktur auf (Wurzelmorphologie, Topologie und Verteilungsmuster). Leidet eine Pflanze an P-Mangel, führt das zu erheblichen Veränderungen in der Wurzelstruktur (Abbildung 3). Insbesondere wird das Wachstum der Hauptwurzel gehemmt, während vermehrt Seitenwurzeln und Wurzelhaare wachsen und die Dichte Wurzelhaare zunimmt (Abbildung 3 B).

Anhang 1 - Phosphor in der Landwirtschaft

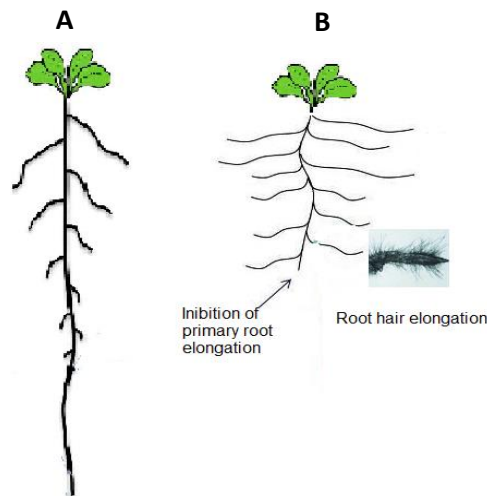
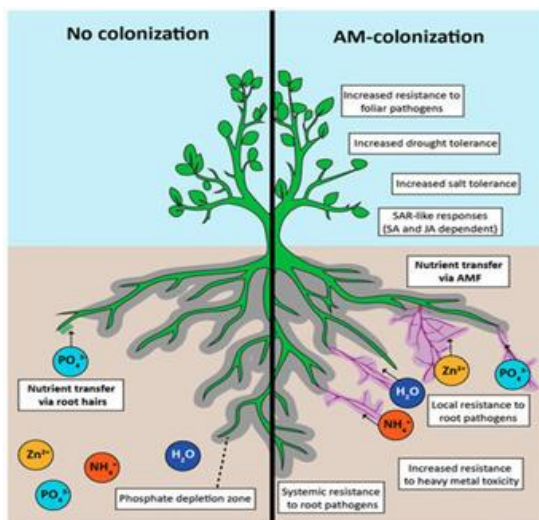


Abbildung 3: **A)** Pflanzen mit ausreichend P eine normale Wurzelstruktur. **B)** Leiden Pflanzen unter P-Mangel, kommt es zu überraschenden morphologische Veränderungen der Wurzeln; dabei verkürzt sich hauptsächlich die Länge der Primärwurzel, während die Länge der Seitenwurzeln sowie die Länge und Dichte der Wurzelhaare zunehmen.

2) Arbuskuläre Mykorrhizapilze (AMF)



Pflanzen können symbiotische Beziehungen mit Pilzen eingehen. Wenn im Boden Phosphat verfügbar ist, können es die Pflanzen direkt über Phosphattransporter im Wurzelsystem aufnehmen (Abbildung 4).

Um unter phosphorarmen Bedingungen dennoch P aufnehmen zu können, sind Pflanzen auf die Wechselwirkung mit Mykorrhizapilzen angewiesen. Diese Art der Symbiose erleichtert den Pflanzen die Aufnahme von Phosphor aus dem Boden, weil sie die Absorptionsfläche der Wurzeln vergrößert.

Abbildung 4. Symbiotische Beziehungen von Pflanzen mit Pilzorganismen sind eine Strategie zur Gewinnung von Nährstoffen, die im Boden nicht ohne weiteres verfügbar sind.

Anhang 1 - Phosphor in der Landwirtschaft

3) Chemische und biologische Prozesse in der Rhizosphäre

Pflanzenwurzeln können die Bedingungen der Rhizosphäre beeinflussen, indem sie organische Verbindungen wie Citrat, Malat oder Oxalat absondern (Abbildung 5).

Dies führt zu einer Versauerung des Bodens. Dabei kann der pH-Wert des Bodens um bis zu 2 bis 3 Einheiten gesenkt werden, wodurch der wenige, verfügbare P im Boden löslicher wird.

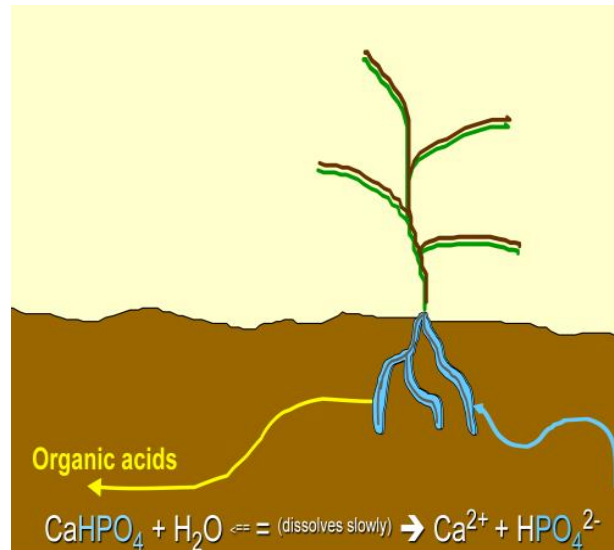


Abbildung 5. Pflanzenwurzeln verändern den pH-Wert der Rhizosphäre durch die Produktion von organischen Verbindungen.

Phosphorquellen für Kulturpflanzen

Heutzutage wird P größtenteils aus dem **Abbau von Phosphatgestein** gewonnen. Dieses Phosphatgestein bildete sich entweder in mariner Umgebung auf **Kontinentalschelf** oder als **vulkanische Ablagerungen**, vor allem in Schildgebieten und Riftzonen.

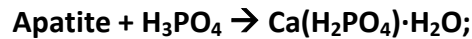
Phosphatgestein wird zunächst in Phosphorsäure umgewandelt. Der Großteil von P-Düngern wird durch eine Reaktion von Phosphatgestein mit einer Säure (H_2SO_4 , HNO_3) hergestellt (Abbildung 6).



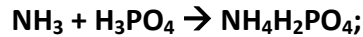
Anhang 1 - Phosphor in der Landwirtschaft

Die Hauptquellen von P-Dünger sind:

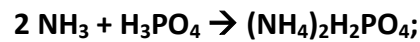
- **Apatite** $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, das auch Bestandteil von Zähnen und Knochen ist, wird in Säure gelöst, um löslichen P-Dünger herzustellen:



- **Ammoniumphosphat** entsteht, wenn gleiche Mengen Ammoniak und Phosphorsäure reagieren.



- **Diammonium phosphate** (DAP) wird hergestellt, wenn 2 mol Ammoniak mit 1 mol Phosphorsäure reagiert:



P aus dem Abbau von Phosphatgestein ist begrenzt und der Rohstoff ist nicht erneuerbar. Aus diesem Grund werden P-Dünger zukünftig nur begrenzt verfügbar sein.

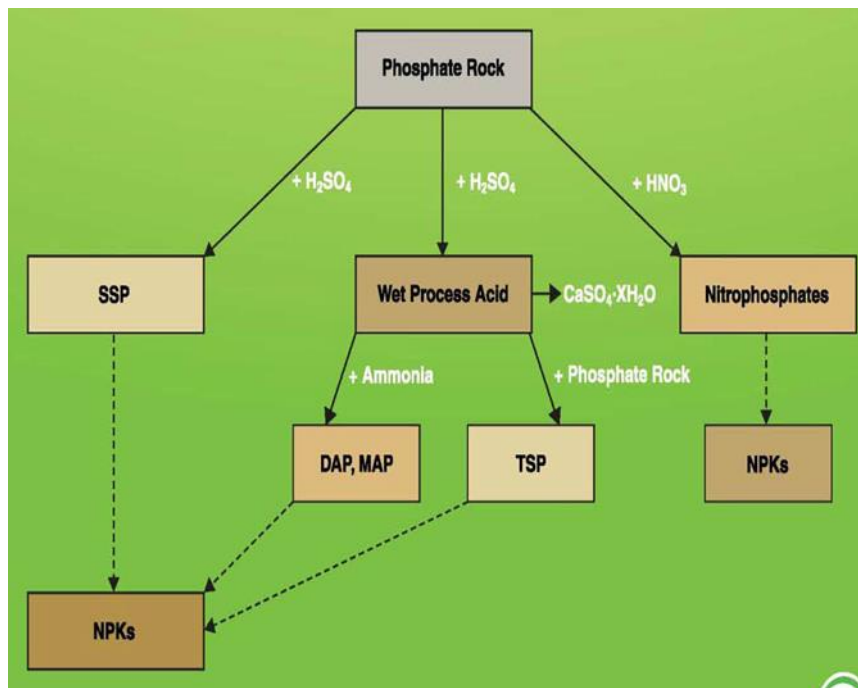


Abbildung 6. Das System zur Herstellung von Phosphatdünger hat seinen Ursprung im Abbau von Phosphatgestein.

Anhang 1 - Phosphor in der Landwirtschaft

Gibt es alternative Phosphorquellen?

Kläranlagen und **Viehzuchtbetriebe** sind die beiden wichtigsten (Sekundär-)Phosphorquellen.

Phosphor kann aus dem Abwasser in kristalliner Form als **Magnesium-Ammonium-Phosphat** (MAP), auch **Struvit** genannt zurückgewonnen werden.

Struvit

Struvit ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ist ein Mineral, das durch eine alkalische Fällungsreaktion von ammonium, Phosphat- und Magnesiumionen als weißes Pulver dargestellt wird (siehe Abbildung 7).

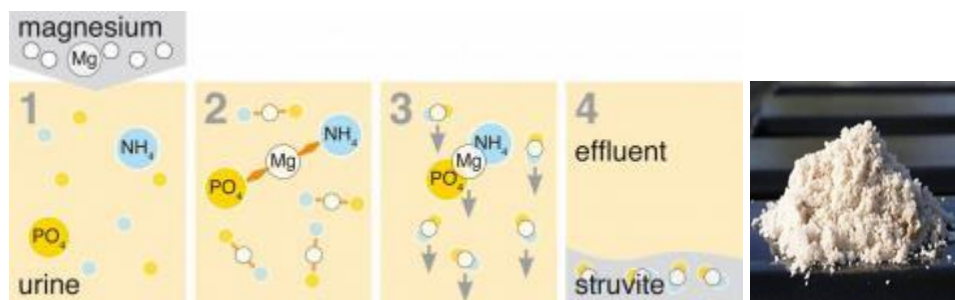


Abbildung 7: Herstellung von Struvit aus kommunalen Abwässern.

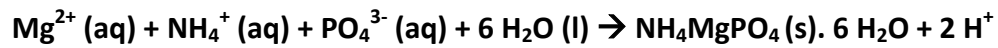
Struvit hat folgende Vorteile für den Ackerbau:

- **Bioverfügbarkeit:** N, P und Mg können in Struvit-Form von Pflanzen leicht aufgenommen werden.
- **langsame Freisetzung von Nährstoffen:** Durch seine geringe Löslichkeit kann eine langsame und gleichmäßige Nährstoffversorgung garantiert werden.
- **hohe Reinheit:** andere Inhaltstoffe des Abwasser, wie z.b. Pharmazeutika, fallen bei der Struvitfällung nicht aus.

Im Rahmen dieses Toolkits sollen die Schüler:innen aus recycelten Materialien einen Reaktor zur Herstellung von Struvit bauen und dabei berücksichtigen, wie sich der pH-Wert und die Konzentration der Reagenzien auf die Struvitbildung auswirkt.

Anhang 1 - Phosphor in der Landwirtschaft

Reaktion



pH-Wert auf 8,0 eingestellt

Struvit wird gebildet, wenn Mg^{2+} , NH_4^+ , PO_4^{3-} in äquimolaren Mengen (d.h. Stoffmengenverhältnis 1:1:1) vorhanden sind.