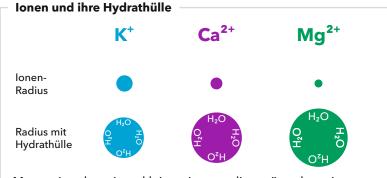
Warum wird die Magnesiumaufnahme oft durch Antagonismen beeinträchtigt?

In der Pflanzenernährung können Nährstoffe die Aufnahme eines anderen Nährstoffs in die Pflanze, dessen Verfügbarkeit im Boden oder dessen Funktionen im Stoffwechsel beeinflussen. Man spricht hier von "Nährstoffinteraktionen" oder "Nährstoffwechselwirkungen". Je nachdem, ob die Aufnahme positiv oder negativ beeinflusst wird, liegt ein Synergismus (positive Interaktion) oder Antagonismus (negative Interaktion) vor.

Magnesium nimmt bei den Wechselwirkungen eine besondere Rolle ein, denn die Aufnahme dieses Nährstoffes wird in der Praxis von mehreren Antagonismen beeinträchtigt. Das liegt daran, dass Magnesium ein relativ kleines Ion mit doppelter Ladung (Mg²+) ist und deshalb eine relativ große Hydrathülle trägt. Es wird damit – anders als andere Kationen wie Kalium oder Ammonium – nur relativ lose an die Bodenmatrix gebunden. Dadurch ist Magnesium im Boden mobil und kann mit dem Niederschlagswasser insbesondere auf leichten Böden in tiefere Bodenschichten verlagert werden. Häufig hat deshalb der Boden in der Nähe der Wurzeln, in der Rhizosphäre, nur einen geringen Magnesiumgehalt. Andere Kationen wie zum Beispiel Kalium lagern sich in der Rhizosphäre stärker an und können Magnesium bei der Aufnahme in die Pflanze verdrängen.

Das Basiswissen zu Antagonismen und Synergismen bei der Nährstoffaufnahme ist im WISSENS SPEICHER Beitrag "Nährstoff-Interaktion" im gleichnamigen Register zusammengestellt. Im Beitrag Kalium-Magnesium-Antagonismus gibt es weitere Informationen.

Sie haben noch keinen WIS-SENS SPEICHER Sammelordner? Dann bestellen Sie ihn kostenlos oder laden Sie die Beiträge herunter: wissen.kali-akademie.de



Magnesium hat einen kleinen Ionenradius, trägt aber eine vergleichsweise große Hydrathülle. Dadurch ist die Bindungsstärke im Boden gering und es besteht eine hohe Auswaschungsgefahr.

Darüber hinaus wird Magnesium in der Bodenlösung hauptsächlich über den Massenfluss an die Wurzel angeliefert. Das ist eine passive Bewegung mit dem von der Pflanze aufgenommenen Wasser. Die Aufnahme erfolgt ebenfalls passiv entlang eines elektrochemischen Gradienten mit dem Wasserstrom. Auch aus diesem Grund ist Magnesium bei der Aufnahme in die Pflanze einer starken Konkurrenz mit anderen Kationen ausgesetzt. Ein relevantes Beispiel für diese Konkurrenz ist der Kalium-Magnesium-Antagonismus, der bereits im WISSENS SPEICHER vorgestellt wurde: Hier lässt sich festhalten, dass die Effizienz einer Kaliumdüngung deutlich verbessert wird, wenn der Kaliumdünger zusätzlich nennenswerte Gehalte an Magnesium aufweist. Ideal ist ein Verhältnis von Kalium zu Magnesium von 3:1.



WAS IST EINE HYDRATHÜLLE?

Hydrate sind Substanzen, die Wasser enthalten. Wenn sich Wassermoleküle an ein Ion anlagern, entsteht um dieses Ion herum eine Hülle, die als Hydrathülle bezeichnet wird. Die Hülle wird aufgrund elektrostatischer Kräfte zwischen den geladenen Ionen und den Wasser-Dipolen gebildet. Dabei ziehen positiv geladene Ionen (z. B. Mg²+, K⁺) die Sauerstoffatome des Wassers an; negativ geladene Ionen (z. B. Cl⁻) ziehen die Wasserstoffatome an. Dieser Prozess wird Hydratation genannt.

Wie beeinflusst Calcium die Magnesiumaufnahme?

Neben Kalium treten bei der Aufnahme in die Pflanze weitere Kationen in den Wettbewerb zu Magnesium. Dies betrifft insbesondere Calcium, das bei neutralen und aufgekalkten Böden und auch noch bei leicht sauren Bedingungen das mengenmäßig häufigste Kation an den Austauschern im Boden ist.

Die Tabelle unten zeigt am Beispiel von jungen Gerstenpflanzen, wie stark die Aufnahme von Magnesium durch die Zugabe von Calcium und Kalium vermindert wird, obwohl ausreichend Magnesium in der Nährlösung bzw. in der Bodenlösung vorhanden ist:

Die Magnesiumaufnahme von Gerste wird durch Calcium und Kalium beeinträchtigt

Mg²⁺ Aufnahme (Mikroäquivalent Mg²⁺ / 10 g Frischmasse in 8 h)

Pflanzenteil	MgCl ₂	MgCl ₂ + CaSO ₄	MgCl₂ + CaSO₄ + KCl
Wurzel	165	115	15
Sproß	88	25	6.5

Wird Magnesium in Form von Magnesiumchlorid gedüngt (MgCl₂), so werden große Mengen Magnesium in die Pflanze aufgenommen. Kommt Calciumsulfat hinzu (MgCl₂ + CaSO₄), ist die Magnesiumaufnahme bereits verringert. Wird zusätzlich noch Kaliumchlorid dazugegeben (MgCl₂ + CaSO₄ + KCl), kann nur noch sehr wenig Magnesium in die Pflanze aufgenommen werden.

Quelle: Marschner (1995), basierend auf Schimansky, C. (1981)

Kein anderes Kation ist so stark von antagonistischen Effekten beeinträchtigt wie Magnesium. Aus diesem Grund kann auch eine magnesiumhaltige Kalkung zunächst Magnesiummangel induzieren, da das karbonatisch gebundene Magnesium erst nach einem längeren Lösungsprozess pflanzenverfügbar wird.

Dagegen lösen sich Ca-Karbonate schneller. Eine Applikation von Dolomit CaMg(CO3)2 kann bei niedriger Magnesiumversorgung des Bodens somit den Magnesiummangel eher verstärken als mindern, da bei jeder Gabe deutlich mehr Calcium als Magnesium appliziert wird. Dies ist auch in Düngemitteln der Fall, bei denen ein Großteil des darin befindlichen Schwefels in CaSO4 gebunden ist. Trotz der langsameren Auflösung im Boden wird dennoch das Mg: Ca-Verhältnis negativ beeinflusst.

Liegen im Boden ungünstige Kationenverhältnisse vor, die die Magnesiumaufnahme einschränken, so schafft nur der Einsatz von reinen Magnesiumdüngern Abhilfe. Wasserlösliches Magnesium ermöglicht einen schnellen Transport an die Wurzeln in allen Bodenschichten.

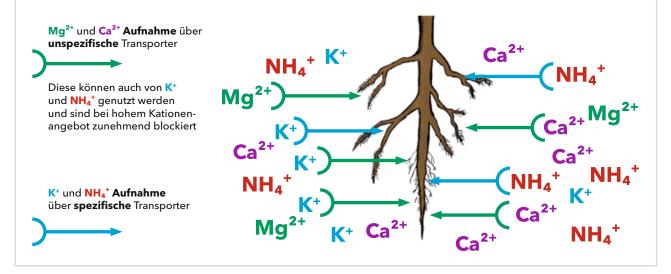


Die Tatsache, dass im Wettbewerb um die Aufnahme durch die Pflanze Magnesium meistens den anderen Kationen unterlegen ist, spiegelt sich auch durch eine häufige Beobachtung wider: Selbst bei höherer Magnesium-Bodenversorgung (Gehaltsklasse C und D) können noch positive Wachstumsreaktionen durch eine Magnesiumdüngung erzielt werden. Die Effizienz der Magnesiumdüngung ist also entscheidend von den Bodenverhältnissen und den weiteren im Düngemittel enthaltenen Nährstoffen bzw. den begleitenden Kationen des Nährstoffträgers abhängig.

Hier spielt neben der Magnesiumkonzentration im Dünger auch die Bindungsform eine wichtige Rolle. Es ist bekannt, dass karbonatisches Magnesium (MgCO₃) nicht wasserlöslich und somit nicht sofort pflanzenverfügbar ist. Je nach Vermahlungsgrad und seiner Herkunft benötigt die Freisetzung des Magnesiums aus diesen Produkten Zeit und ein saures Milieu im Boden. Dabei kann eine intensive Einmischung des Magnesiumcarbonates in den Wurzelbereich eines sauren Bodens die Freisetzung beschleunigen.

Kationenkonkurrenz an der Wurzel um die Aufnahme durch Transporter

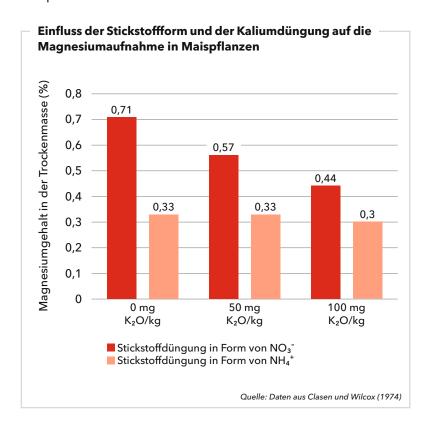
Diese Darstellung verdeutlicht die Konkurrenzverhältnisse der Nährstoffkationen bei der Aufnahme durch die Wurzeln. Kationen wie Magnesium (Mg^{2+}) und Calcium (Ca^{2+}) werden über **unspezifische Transporter** in die Pflanzenwurzel aufgenommen. Diese können von allen Kationen genutzt werden. Die einwertigen und in ihren Eigenschaften sehr ähnlichen Kationen Ammonium (NH_4^+) und Kalium (K^+) werden primär über **spezifische Transporter** (Carrier) in die Wurzel aufgenommen, die ausschließlich der Aufnahme von Ammonium bzw. Kalium dienen. Bei hoher Versorgung von Kalium und bei ammoniumbetonter Düngung sowie gleichzeitig hohem Calciumangebot (auf gekalkten Böden) werden die unspezifischen Aufnahmekanäle von den Kationen K^+ , NH_4^+ und Ca^{2+} belegt und können die Mg^{2+} -Aufnahme dadurch behindern. Für eine optimale Nähstoffaufnahme ist daher ein ausgewogenes Kationenverhältnis im Wurzelraum erforderlich.



Welche Rolle spielt Stickstoff bei der Aufnahme von Magnesium?

Auch Ammonium (NH₄⁺) aus mineralischer und organischer Düngung konkurriert bei der Aufnahme durch die Pflanzen mit Kalium und insbesondere mit Magnesium. Im Rahmen der neuen Düngeverordnung werden bei der Stickstoffdüngung verstärkt Nitrifikationshemmer zugesetzt. Diese stabilisieren den Stickstoff in der Ammonium-Form und vermindern somit Stickstoffverluste über Nitratauswaschung. Stickstoff, der unter unseren klimatischen und vorherrschenden Bodenbedingungen bisher überwiegend als Nitrat vorlag, tritt nun allerdings in Form von Ammonium verstärkt in Kationenkonkurrenz bei der Aufnahme von Kalium und insbesondere von Magnesium in die Pflanze.

Am Beispiel Mais wurde der Einfluss des Kaliumangebots bei unterschiedlichen Stickstoffformen auf die Magnesiumaufnahme untersucht (siehe Grafik). Dabei zeigt sich zunächst, dass die mit Nitrat (NO $_3$ -) ernährten Pflanzen mit steigendem Kaliumangebot abnehmende Magnesiumgehalte aufweisen. Jedoch viel stärker als die Kaliumdüngung wirkt sich die Stickstoffumstellung von Nitrat (NO $_3$ -) auf Ammonium (NH $_4$ +) auf die Magnesiumaufnahme aus. Der Wechsel von Nitrat- auf Ammoniumernährung bewirkt, dass die Magnesiumaufnahme sehr deutlich reduziert wird. Erfolgt keine Kaliumdüngung (0 mg K $_2$ O), so sinkt durch den Wechsel von Nitrat zu Ammonium sogar der Magnesiumgehalt der Maispflanzen um mehr als die Hälfte.





Eine ammoniumbetonte Düngung führt also zu einer sehr starken Reduktion der Magnesiumaufnahme, während eine Kaliumsteigerung die Magnesiumaufnahme nur geringfügig beeinträchtigt.

Weitere Daten aus dem gleichen Versuch zeigten, dass die Stickstoffform nur einen geringen Einfluss auf die Kaliumaufnahme hatte. Allerdings trifft dies nur auf einen bestimmten Ammonium-Konzentrationsbereich zu. Im Gegensatz zu Magnesium sind Ammonium und Kalium sich sehr ähnlich, was Ladung, Größe und Hydratationsenergie angeht. Diese sind unerlässliche Eigenschaften für den Membrantransport. Außerdem scheinen einige K-spezifische Transporter auch für die NH₄⁺-Aufnahme geeignet zu sein.

Eine überwiegende Aufnahme der Makronährstoffe Stickstoff, Kalium, Magnesium und Calcium als Kationen würde innerhalb der Zellen zu starken Ladungsungleichgewichten führen. Die Pflanze gleicht diese aus, indem sie verstärkt Protonen (H⁺-lonen) an die Bodenlösung abgibt. Durch die Abgabe von Protonen sinkt der pH-Wert im wurzelnahen Bereich (Rhizosphäre) stark ab. Da bei der Ammoniumdüngung H⁺ nicht nur bei der Aufnahme durch die Pflanzenwurzel entsteht, sondern auch dann, wenn Ammonium (NH₄⁺) durch Bakterien zu Nitrat (NO₃⁻) nitrifiziert wird, spricht man bei reinen Ammoniumdüngern von physiologisch sauer wirkenden Düngern. Die Bodenversauerung hat ebenfalls einen großen negativen Einfluss auf die Magnesiumaufnahme.

WAS IST BEI EINER AMMONIUMBETONTEN DÜNGUNG ZU BEACHTEN?

Das Kation Ammonium (NH_4^+) wird an Bodenkolloide angelagert und unterliegt deshalb weniger der Auswaschung als das Nitrat (NO_3^-).

Pflanzen reagieren meist langsamer auf eine Ammonium- als auf eine Nitratdüngung. Verzögertes Wachstum durch Ammonium könnte zurückzuführen sein auf:

- Geringere Mobilität von Ammonium im Vergleich zu Nitrat.
- Konkurrenz mit anderen Kationen wie Kalium, Magnesium und Calcium bei der Aufnahme. Häufig ist die Magnesiumaufnahme reduziert.
- Pflanzen benötigen zusätzliche Energie zur Aufrechterhaltung des Ladungsgleichgewichts in den Zellen, wenn der Großteil der Nährstoffe in Form von Kationen aufgenommen wird.

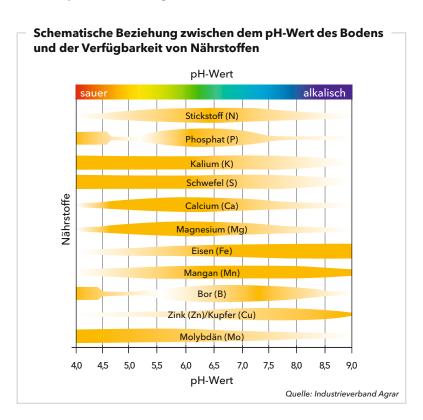
Um zu verhindern, dass das für Zellen giftige Ammoniak (NH_3) entsteht, muss Ammonium schon in der Wurzel in organischen Stickstoff eingebaut werden. Dazu ist eine gute Kohlenhydratversorgung der Wurzel erforderlich.

Die Kohlenhydratversorgung ist dann sichergestellt, wenn ausreichend Kalium und insbesondere Magnesium vorhanden sind, um den Assimilattransport von den Blättern in die Wurzeln zu ermöglichen.



Welche Rolle spielt der pH-Wert im Boden bei der Kationenaufnahme?

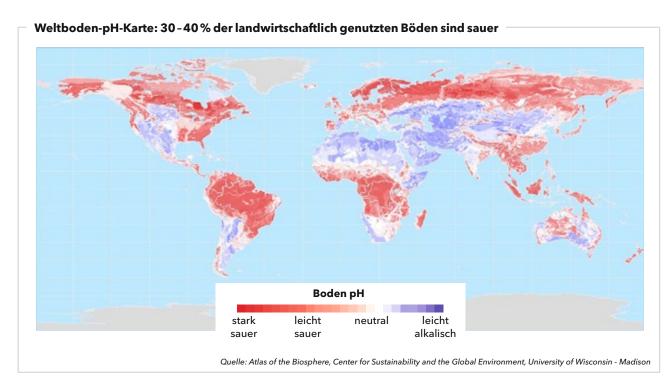
Der pH-Wert im Boden bestimmt maßgeblich die Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen. Prozesse der Verwitterung aus den Mineralbestandteilen des Bodens laufen verstärkt bei niedrigen pH-Werten ab, während die Freisetzung z. B. von Stickstoff und Schwefel vorwiegend bei höheren pH-Werten stattfindet. Umgekehrt können auch bestimmte Elemente je nach pH-Bereich immobilisiert werden, indem sie an bestimmte Strukturen gebunden bzw. mit deren Hilfe ausgefällt und dem verfügbaren Nährstoffpool somit entzogen werden.



Der Boden-pH-Wert hat einen entscheidenden Einfluss auf die Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen. Jedes Element hat einen Optimalbereich mit idealer Pflanzenverfügbarkeit. In diesem Optimalbereich liegt es überwiegend in für die Pflanzen leicht aufnehmbarer Form, also austauschbar gebunden oder frei in der Bodenlösung, vor. Das hängt damit zusammen, dass der pH-Wert maßgeblich dafür verantwortlich ist, in welchen chemischen Verbindungen das jeweilige Element vorliegt.



Auch die Pflanzen reagieren direkt auf Änderungen des pH-Wertes im Boden. In den humiden Klimaten ist aufgrund der Auswaschung der basischen Kationen die Bodenversauerung ein weitverbreitetes Phänomen:



Eine Abnahme des pH-Wertes im Boden bedingt nicht unmittelbar sichtbare Symptome bei der oberirdischen Pflanzenmasse. Eine Ausnahme hiervon wäre eine extrem starke Absenkung, da die meisten Nährstoffe ihr Optimum im Neutralbereich haben. Vielfach äußert sich eine Abnahme des pH-Wertes im Boden, wie sie in humiden Klimaten häufig mit zunehmender Tiefe beobachtet wird, durch eine Reduktion des Wurzelwachstums (s. Abbildung rechts). Beeinträchtigungen des Wurzelwachstums können schon relativ früh auftreten und haben in der Folge erheblichen Einfluss auf die Wasser- und Nährstoffaufnahme aus tieferen Bodenschichten. Dies wirkt sich besonders in Jahren mit Trockenperioden aus, wenn der Oberboden austrocknet und die Pflanzen auf die Wasser- und Nährstoffnachlieferung aus dem Unterboden angewiesen sind.

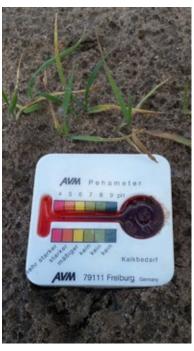


Wie beeinflusst Aluminium bei niedrigem pH-Wert die Magnesiumversorgung?

Die Ursache für die Störung des Wurzelwachstums bei niedrigem pH-Wert ist, dass mit höherer Bodensäure, also dem Anstieg der Protonen, sich auch Aluminium in der Bodenlösung anreichert (s. Abbildung auf Seite 9). Aluminium liegt in diesem pH-Bereich überwiegend als Aluminium-Ion (Al³+) vor und ist für die meisten Pflanzen toxisch. Es führt unmittelbar zu einer starken Reduktion des Wurzelwachstums. Aluminium hemmt die Zellteilung und das Zellwachstum und führt damit zu einer regelrechten Verkrüppelung des Wurzelsystems. In dessen Folge kommt es zu Nährstoffmangel, insbesondere wird dadurch auch Magnesiummangel induziert, der auf sauren Böden sehr häufig auftritt.

Auf diesen Fotos aus Norddeutschland ist ein pH-Wert induzierter Magnesium-Mangel an Sommerweizen zu sehen. Der Magnesiummangel ist sehr gut an der Aufhellung der Weizenblätter mit einer perlschnurartigen Aneinanderkettung des Chlorophylls im Blatt zu erkennen.





PH-induzierter Magnesiummangel bei Sommerweizen in der Nahaufnahme (links) und pH-Messung im Feld (rechts)

Der toxische Effekt von Aluminium beruht darauf, dass sich das dreiwertige Al³⁺ sehr stark an den Magnesium-Bindungsstellen von so genannten G-Proteinen anreichert und damit die Hydrolyse von Guanosintriphosphat (GTP) verhindert.



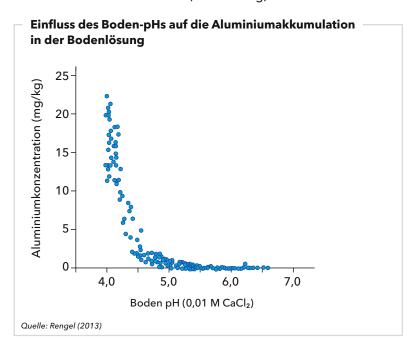
GUANOSINTRIPHOSPHAT (GTP)

Guanosintriphosphat (GTP) ist eine energiereiche chemische Verbindung, die im Citratzyklus entsteht. Dabei wird Energie aus Kohlenhydraten und Fetten auf GTP übertragen – es dient als Energiespeicher im Zellstoffwechsel.

G-PROTEINE

G-Proteine sind Proteine, die Guanosintriphosphat binden können und somit im Stoffwechsel eine Schlüsselposition bei der Signalweiterleitung einnehmen. Ein Teil der negativen Bindungsstellen der G-Proteine sind unter normalen Bedingungen mit Magnesiumionen besetzt. Wenn unter sauren Bedingungen ein Überschuss von Al³+-lonen entsteht, werden die benötigten Mg-lonen von diesen Bindungsstellen verdrängt. Damit wird auch die Energieübertragung auf GTP gehemmt.

Gewöhnlich wird bei guter landwirtschaftlicher Praxis durch Kalkung nicht nur der Boden-pH erhöht, sondern zugleich dafür gesorgt, dass das vorliegende Al³⁺ durch die pH-Wert-Steigerung ausgefällt wird und keine Schäden mehr verursacht (s. Abbildung).

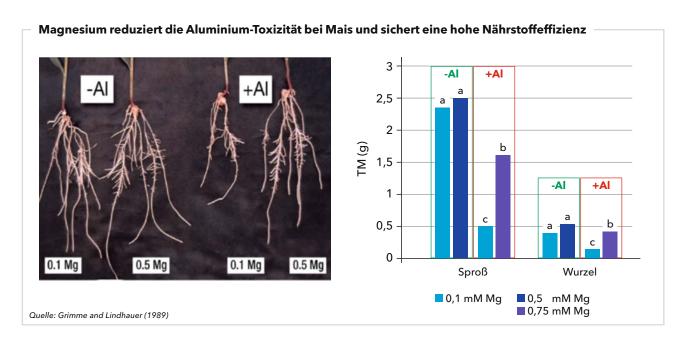


In manchen Regionen werden aus wirtschaftlichen und logistischen Gründen die je nach Säuregrad der Böden und Bodenart erforderlichen großen Mengen an Kalk (mehrere Tonnen je Hektar) nicht ausgebracht. Hier besteht die Möglichkeit, eine Linderung der Aluminium-Toxizität über eine Magnesiumapplikation vorzunehmen.



Wie kann Magnesium die Aluminium-Toxizität lindern?

Die Ergebnisse verschiedener Forschungsgruppen mit unterschiedlichen Pflanzenarten zeigen einen deutlichen Einfluss der Magnesiumernährung auf die toxische Wirkung von Aluminium. Sie wurde durch Magnesium deutlich gelindet. Am Beispiel Mais, der in Nährlösung kultiviert wurde und bei dem unabhängig vom pH-Wert das Al³+- und Mg²+-Angebot variiert wurde, ist der Effekt der Magnesiumapplikation deutlich zu erkennen (s. Abbildung unten). Bei niedrigem Magnesiumangebot waren die Wurzeln unter Einfluss von Aluminium deutlich verkürzt.



Hingegen wiesen die Wurzeln bei der höheren Magnesiumgabe ein vergleichbares Wachstum auf wie die Pflanzen, die keiner Aluminium-Toxizität ausgesetzt waren. Auch das Sprosswachstum, welches sehr stark auf die Aluminiumzugabe reagierte, wurde unter Zugabe von höheren Mengen Magnesium signifikant verbessert.

Der Effekt der Linderung der Aluminium-Toxizität durch Magnesium erklärt sich durch die Regulation der Biosynthese von organischen Säuren. Unter Mithilfe von Magnesium wird Zitronensäure abgegeben, die in der Lage ist, das schädliche Aluminium (Al³+) im Wurzelraum zu komplexieren. Darüber hinaus hilft Magnesium dabei, die elektrischen Ladungen an den Zellwänden zu verhindern und sorgt dafür, dass die für die Nährstoffaufnahme wichtigen Protonenpumpen aktiv bleiben. Erhöhte Magnesiumgehalte sind ebenso dafür verantwortlich, dass die Calcium-Kanäle, die durch hohe Aluminiumkonzentrationen beeinträchtigt sind, für das für die Zellwandstabilität wichtige Calcium permeabel bleiben.

FAZIT:

Magnesium ist ein Nährstoff, der heute noch in vielen Düngungssystemen vernachlässigt wird und daher nicht sein volles Potenzial als wichtiger Makronährstoff entfalten kann. Wegen seiner wichtigen Funktionen im pflanzlichen Stoffwechsel ist es jedoch unerlässlich für die Bildung von Biomasse und Ertrag. Ein wesentlicher Aspekt für die Pflanzenverfügbarkeit von Magnesium ist neben der Konzentration im Boden vor allem die Interaktion mit anderen positiv geladenen Nährstoffen (Kationen) bei der Aufnahme in die Pflanze.

Magnesium wird im Vergleich zu anderen Kationen besonders leicht bei der Aufnahme verdrängt - insbesondere durch Kalium, Calcium, Ammonium und Aluminium. Da Magnesium leicht von diesen Kationen verdrängt wird, jedoch gleichzeitig eine wichtige Rolle für deren effiziente Nutzung im pflanzlichen Stoffwechsel spielt, ist eine ausreichende Versorgung mit Magnesium die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Pflanzenproduktion. Zum Beispiel kann der Einbau von Ammonium in der Wurzel nur erfolgen, wenn die Wurzel ausreichend mit Kohlenhydraten versorgt ist. Für den Transport von Kohlenhydraten aus den Blättern zur Wurzel spielt Magnesium die Schlüsselrolle. Magnesium unterstützt auch wichtige Funktionen von Calcium - zum Beispiel bei der Zellwandintegrität, die vor allem dann wichtig ist, wenn die Pflanze unter Stress leidet. Auf sauren Böden ist Magnesium der zentrale Nährstoff, der zur starken Linderung der Aluminium-Toxizität führt und damit verhindert, dass große Schäden am Wurzelsystem entstehen. Somit wird die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen auch unter solchen Bedingungen gesichert.

Eine ausgewogene Düngung sollte daher stets auch eine ausreichende Versorgung mit wasserlöslichem Magnesium (ESTA Kieserit, Korn-Kali, Patentkali, EPSO Blattdünger) berücksichtigen, um das Potenzial dieses Nährstoffs zu nutzen.



Mehr über die Grundfunktionen von Magnesium erfahren Sie im WISSENS SPEICHER Beitrag "Makronährstoffe, Mikronährstoffe, nützliche Elemente".

Den Sammelordner können Sie kostenlos bestellen oder die Beiträge unter wissen.kaliakademie.de herunterladen.







Mehr Wissen der KALI Akademie rund um die Pflanzenernährung haben wir unter www.kali-akademie.de für Sie informativ und anschaulich zusammengefasst.





K+S Minerals and Agriculture GmbH Bertha-von-Suttner-Str. 7 34131 Kassel, Deutschland

+49 561 9301-0 kali-akademie@k-plus-s.com www.kali-akademie.de

