



Kalium –

Baustein für eine nachhaltige Ertragsbildung





| | |
|---|--------------------|
| Einleitung | 4 |
| Kalium in der Pflanze | 6 |
| Kalium für das Pflanzenwachstum | 8 |
| Kalium im Boden | 14 |
| Kaliumversorgung der Pflanzen | 20 |
| Kaliumdüngung in der Praxis | 28 |
| Kaliumquellen und ihre Bedeutung | 32 |
| Kaliumdüngemittel | 34 |
| Rahmenbedingungen für die Kaliumdüngung | 40 |



Einleitung

Bedeutung von Kalium in der Ernährung von Mensch, Tier und Pflanze

Zum Leben und Wachsen benötigen Pflanzen neben Licht, Wasser und Kohlendioxid auch mineralische Nährstoffe. Pflanzen sind in der Lage, aus diesen Ausgangsstoffen organische Substanz zu bilden. Diese Fähigkeit der Pflanzen ist die Basis für die Sicherung der Nahrung für Menschen und Tiere.

Der Anbau unserer Kulturpflanzen ist facettenreich und viele wissenschaftliche Erkenntnisse fließen dabei ein. Ein wichtiger Bereich ist die Ernährung der Pflanzen. Die nachhaltige Wirtschaftsweise im Pflanzenanbau muss darauf ausgerichtet sein, die mit Pflanzen oder Pflanzenteilen durch Ernte- oder Weidenutzung entzogenen Nährstoffe dem Boden wieder zuzuführen. Damit bleibt die Bodenfruchtbarkeit langfristig erhalten oder wird sogar erhöht.

Eine wesentliche Voraussetzung für dieses nachhaltige Wirtschaften ist die gründliche Kenntnis der dynamischen Prozesse, denen die Nährstoffe in Böden und Pflanzen unterliegen. Nur damit wird es möglich, sachgerechte Empfehlungen für eine effiziente und ressourcenschonende Düngung zu geben.

Richtig zu düngen heißt letztlich, dass Pflanzen eine optimale Nährstoffversorgung zum Wachsen erhalten. Pflanzen ausgewogen zu ernähren ist eine Herausforderung, die für jede angebaute Kultur gleichermaßen zu erfüllen ist, denn jede hat durchaus unterschiedliche Bedarfe an den verschiedenen Nährstoffen während der Wachstumsperiode. Eine ausgewogene Düngung sichert einen optimalen Ertrag mit hoher Qualität.

In der vorliegenden Broschüre sind, ausgehend vom Boden als Wachstumssubstrat, die Nährstoffdynamik des Mineralstoffs Kalium (K), dessen Bedeutung für die Pflanze sowie die Konsequenzen für die praktische Düngung dargestellt. Die K-Gehalte von Düngemitteln werden generell in Oxidform (K_2O) angegeben. Die Pflanzenernährung mit Kalium hat in den vergangenen Jahren im Zusammenhang mit stark reduzierter Grunddüngung und zurückgehenden K-Gehalten im Boden an Aktualität gewonnen.

Kalium – Funktionen im Körper von Menschen und Tieren

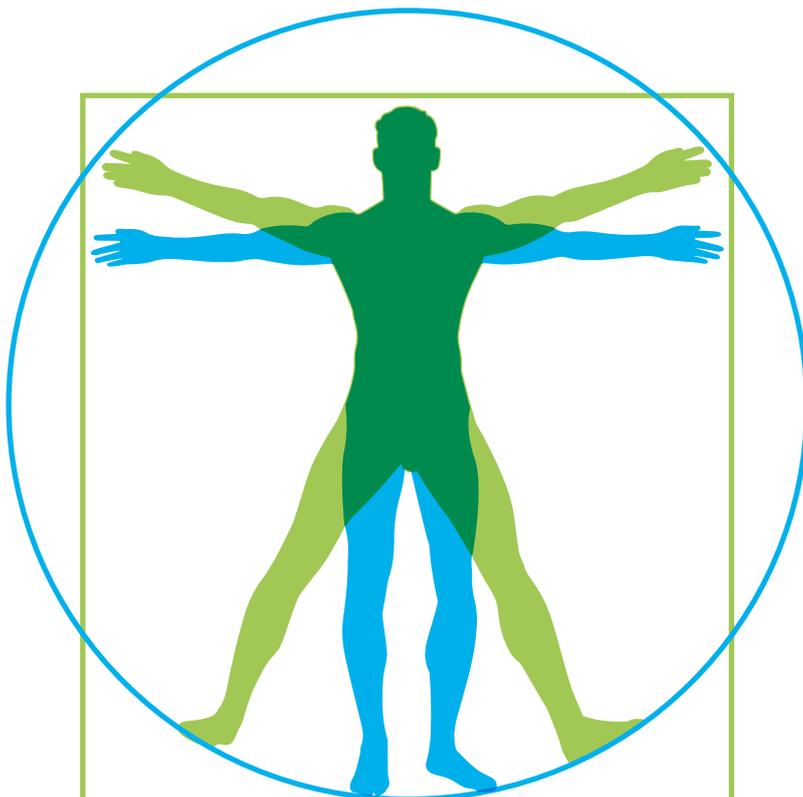
Menschen und Tiere nehmen das lebensnotwendige Mineral Kalium mit Nahrungs- und Futtermitteln zu sich. Kalium kann nicht vom Körper gespeichert werden und muss deshalb täglich in ausreichender Menge aufgenommen werden. Innerhalb der menschlichen Zelle ist Kalium der quantitativ vorrangige Mineralstoff. Im gesamten Körper rangiert Kalium nach Calcium und Phosphor an dritter Stelle.

Kalium zählt zu den bedeutendsten Elektrolyten unserer Körperflüssigkeit. Es ist für den osmotischen Druck in den Zellen und für die Reizweiterleitung in Muskel- und Nervenzellen zuständig. Zudem wird es für die Proteinbildung sowie den Glukosetransport benötigt und beeinflusst den Insulinstoffwechsel. Kalium spielt eine wichtige Rolle bei der Regulation des Blutdrucks sowie des Wasser- und des Säure-Basen-Haushaltes. Es ist in jeder Körperzelle vorhanden und sorgt dafür, dass ihr Flüssigkeitshaushalt stimmt.

Kalium wird für den körpereigenen Eiweißaufbau sowie für die Verwertung von Kohlenhydraten benötigt und ist für die Muskelfunktion unentbehrlich. Mögliche Symptome von fehlendem Kalium sind: Abgeschlagenheit, Müdigkeit, Muskelschwäche und Verstopfung. In schweren Fällen können sogar Bewusstseins- und Herzrhythmusstörungen auftreten.

Auch bei Tieren zählt Kalium zu den bedeutendsten Elektrolyten im Körper und ist unverzichtbar für die Zellfunktion. Ob im Stoffwechsel, für die Muskeltätigkeit oder die Nervenfunktion übernimmt der Mineralstoff die verschiedensten Aufgaben im tierischen Körper. Besonders wichtig ist Kalium als Alternative zu Natrium für Haustiere. Schließlich sorgt es für eine ausgewogene Ernährung und kann dabei helfen, Krankheiten des Herz-Kreislauf-Systems zu vermeiden. Bei Nutztieren wiederum wird Kalium zum Beispiel erfolgreich zur Behandlung von Hitzestress eingesetzt.

Funktionen von Kalium im menschlichen Körper



Kalium wirkt

- im Flüssigkeitshaushalt
- beim Eiweißaufbau
- bei der Verwertung von Kohlenhydrate
- in den Muskeln

Symptome bei Mangel

- Abgeschlagenheit
- Müdigkeit
- Muskelschwäche
- Verstopfung

Kalium in der Pflanze

Funktionen in der Pflanze

Kalium steuert direkt oder indirekt alle lebensnotwendigen Vorgänge in der Pflanze und ist entscheidend am Auf- und Umbau der gebildeten Assimilate beteiligt.

Damit hat Kalium großen Einfluss auf Ertrag und Qualität, es wird jedoch nicht in die organische Substanz eingebaut. Seine Aufgaben:

- Aktivierung vieler Enzymsysteme, die das gesamte Stoffwechselgeschehen beeinflussen, insbesondere innerhalb der Photosynthese
- Förderung energieübertragender Prozesse durch den Aufbau energiespeichernder Verbindungen wie Kohlenhydrate, Proteine und Fette.
- Steuerung des Wasserhaushaltes durch Erhöhung des Turgordrucks (Druck des Zellsaftes auf die Zellwände) in den Pflanzenzellen und der Regulierung der Spaltöffnungen
- Verbesserung der Frostresistenz durch Erniedrigung des Gefrierpunktes des Zellsaftes
- Festigung der Zellwände durch verstärkte Bildung von Stützgewebe
- Erhöhung der Resistenz gegenüber Krankheiten und Schädlingen

Kalium ist aufgrund seiner vielfältigen Funktionen vor allem im wachsenden Gewebe der Pflanzen zu finden.

Kalium ist wichtig für ...



... die Bildung von Kohlenhydraten und deren Transport vom Blatt zu den Ähren, Knollen, Kolben oder dem Rübenkörper.



... die Regulation der Stomata und damit für die Photosynthese-Leistung.



... eine produktive Wassernutzung und die Minderung von Trockenstress.



... die Qualität, zum Beispiel höherer Eiweiß- und Vitamingehalt sowie verringerte Schwarzfleckigkeit bei Kartoffeln.



... die Funktion der Chloroplasten und damit der Photosyntheseleistung.



... die natürliche Widerstandskraft gegen Krankheiten, Schädlinge und Frost sowie für die Standfestigkeit der Pflanzen.

Kaliumaufnahme und Umsetzung in der Pflanze

Die Pflanze nimmt den Nährstoff aus der Bodenlösung nur als K-Ion (K^+) auf. Die Pflanzen haben für Kalium sehr spezifische Aufnahmesysteme entwickelt, sodass andere Nährstoffe die K-Aufnahme nicht blockieren können. K-Aufnahme und -Transport in der Pflanze werden durch K-Transporter (in den Zellmembranen lokalisierte Proteine) ermöglicht. Kalium wird in der Pflanze als K^+ sehr gut beweglich und wird im Vergleich zu anderen Nährstoffen nicht in organische Verbindungen eingebaut.

Einflussfaktoren auf die Kaliumaufnahme durch Pflanzen

- Freisetzung von Wurzelexsudaten (Stoffe, welche von den Wurzeln ausgeschieden werden), zum Beispiel organische Säuren (erhöhen die Freisetzung von Bodenmineralien).
- Erschließung des Bodenvolumens durch Wurzeln (größere Nähe zu den mit Kalium besetzten Austauschern, siehe Seite 16).
- K-Aufnahmerate über die Plasmamembran von Wurzelzellen hängt bei Kalium stark von den dort lokalisierten Transportproteinen ab und ist allgemein sehr schnell.

Kaliummangel und seine Folgen

Kalium ist in der Pflanze sehr mobil und wird in Mangelsituationen schnell von den älteren zu den jüngeren, aktiven Pflanzenteilen verlagert. Dementsprechend werden K-Mangelsymptome zuerst an älteren Pflanzenteilen sichtbar.

Kaliummangelsymptome:

- Die Blätter sind schlaff und hängen herunter.
- Die ganze Pflanze wirkt schlaff und welk, man spricht von „Welketracht“.
- Vom Rand her beginnend werden die Blätter immer hellgrüner.
- Später treten Blattrand-, Blattspitzen- und insbesondere bei Getreide und Mais auch Interkostalnekrosen auf.
- Es kommt zu Wachstumsverzögerungen.
- Die Blätter bleiben klein und sitzen fest am Zweig (Obstbau).
- Es kommt zu einer verminderten Verholzung der Zellwände, was die Gefahr bei Getreide zur Lagerbildung und die Anfälligkeit gegenüber Pilzinfektionen erhöht.

Kaliummangelsymptome



Raps



Mais



Wein

Kalium für das Pflanzenwachstum

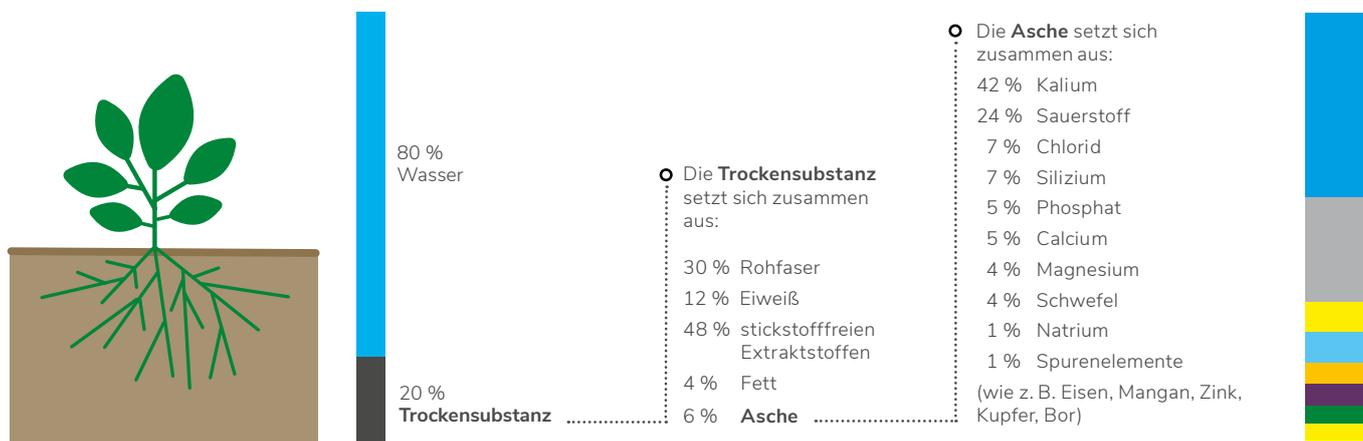


Kalium – Baustein nachhaltiger Ertragsbildung

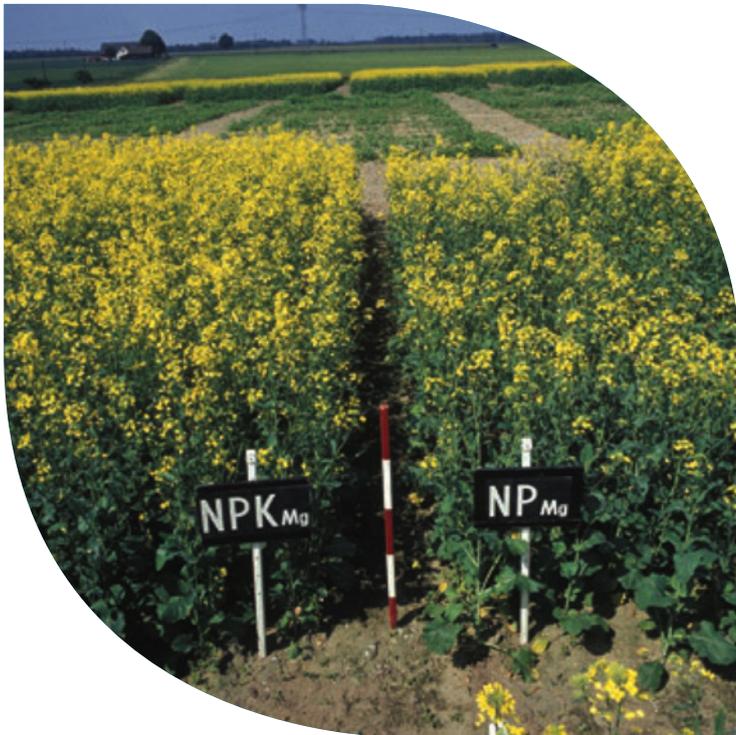
Als eine erste Annäherung für das Ermitteln des Nährstoffbedarfs bietet sich die Mineralstoffzusammensetzung der Trockenmasse von Kulturpflanzen an, in deren Asche diese bestimmt wird. Aus der Abbildung unten ist ersichtlich, dass im Mittel der meisten Pflanzenarten Kalium den Hauptbestandteil der Nährstoffe bildet. Ein genaueres Indiz für den Bedarf an Nährstoffen ist die Analyse der verschiedenen Kulturarten und insbesondere der Verlauf der Nährstoffaufnahme während der Vegetationsperiode.

Die K-Aufnahme der Pflanzen ist im Vergleich zu anderen Nährstoffen relativ groß. Sie hängt sowohl von der Höhe des möglichen Ertrages als auch von der Kulturart selber ab. Zu den Kulturen mit höheren Ansprüchen an die K-Versorgung gehören allgemein blattreiche Pflanzen, wie zum Beispiel Zuckerrüben, Kartoffeln, Raps, Mais aber auch Futterpflanzen, Mähweiden und mehrschnittige Wiesen.

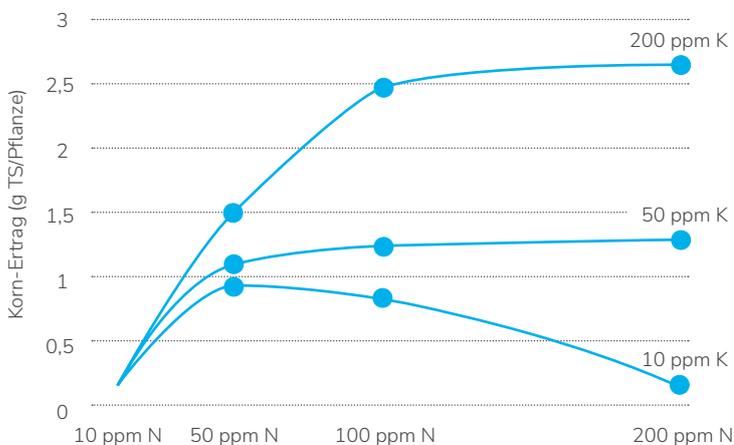
Die durchschnittliche Zusammensetzung der Pflanze



Effiziente Nutzung von Nährstoffen durch optimales Kaliumangebot



Optimale Kaliumversorgung verbessert die Stickstoffverwertung



Quelle: Wasserkulturversuch zu Gerste, nach MacLeod, 1969

Einfluss von Kalium auf Ertrag und Qualität

Eine gute K-Versorgung der Pflanzen ist Voraussetzung für hohe Erträge mit guter Qualität. Zudem bestehen Wechselwirkungen mit anderen Produktionsfaktoren. Die ertragssteigernde Wirkung anderer Wachstumsfaktoren (zum Beispiel N-Düngung, Pflanzenschutz, Wasserversorgung) kann erst bei einem optimalen K-Angebot effizient genutzt werden, wie Versuche im Feld belegen (Abb. links oben).

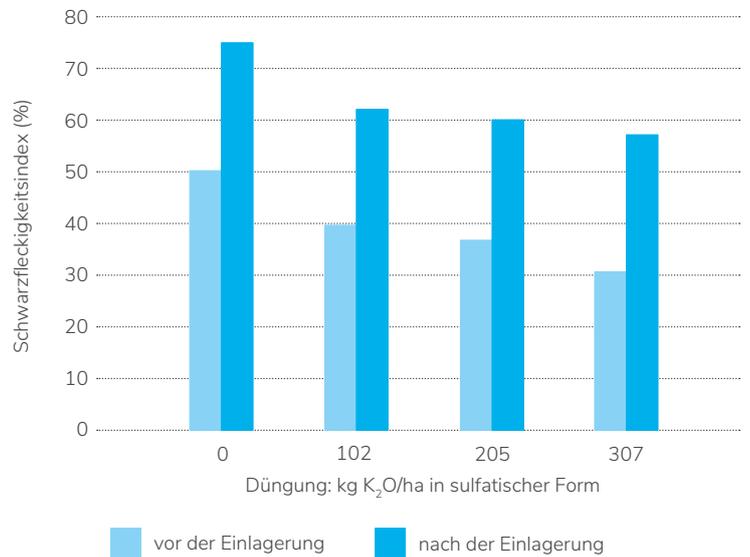
So wird die Wirkung einer N-Düngung auch durch die K-Düngung beeinflusst (Abb. links unten). Nur bei einer optimalen K-Versorgung der Bestände kann der zur Verfügung stehende Stickstoff (N) von den Pflanzen vollständig aufgenommen und in Ertrag umgesetzt werden. Damit wird gleichzeitig die Gefahr der Auswaschung von nicht verwertetem Stickstoff in den Unterboden minimiert.

Kalium erfüllt wichtige, durch andere Nährstoffe nicht zu ersetzende Funktionen in der Pflanze und beeinflusst dadurch auch entscheidend die Qualität der Ernteprodukte. So gibt es einen positiven Einfluss auf die Kohlenhydratbildung. Durch eine unzureichende K-Versorgung sinkt zum Beispiel der Stärkegehalt in Kartoffeln. Für Stärke- und Veredelungskartoffeln sind niedrigere Auszahlungspreise die Folge, was für die landwirtschaftliche Produktion mit entsprechenden wirtschaftlichen Konsequenzen verbunden ist. Im Speisekartoffelbau sorgt eine bedarfsgerechte K-Düngung für eine optimale Haltbarkeit im Lager, guten Geschmack und die Reduzierung der Schwarzfleckigkeit (Abb. rechte Seite oben).

Bei Zuckerrüben erhöht Kalium den Zuckergehalt und fördert den Umbau löslicher N-Verbindungen in Proteine. Dadurch sinkt der alpha -Amino-N-Gehalt und die Zuckerausbeute wird verbessert. Eine dem Pflanzenbedarf angepasste K-Zufuhr ermöglicht daher eine bessere Ausnutzung der N-Düngung.

Kalium sichert durch seine Beteiligung an zahlreichen Enzymreaktionen, dass der Gehalt und die Qualität von Fetten, Ölen und Fasern in Pflanzen verbessert werden. Eine suboptimale Düngung führt zu einem Rückgang des Tausendkorngewichtes, des Hektolitergewichtes und zu einer verschlechterten Kornausbildung bei Getreide. Bei Weizen sinken Klebergehalt und Backvolumen, bei Braugerste werden Extraktgehalt und Eiweißlösungsgrad verringert. In Obst und Gemüse fördert eine gute K-Versorgung die Reifevorgänge, sie verhindert zum Beispiel den Grünkragen bei Tomaten (Abb. unten) und erhöht den Vitamingehalt. Auf Wiesen und Weiden wird der Anteil wertvoller Gräser, Kräuter und Leguminosen durch eine gute K-Versorgung deutlich verbessert.

Gute Kaliumversorgung reduziert Schwarzfleckigkeit bei Kartoffeln



Durchschnitt aus 9 K-Steigerungsversuchen auf leichten Böden in Norddeutschland

Gute Kaliumversorgung fördert Ertrag und Reifevorgänge



Kaliumversorgung und Pflanzengesundheit

Eine gute Ernährung der Pflanze beeinflusst ihre Toleranz gegenüber Umwelteinflüssen (Trockenheit, Salz) und anderen Stressfaktoren. So ist die Widerstandsfähigkeit gegenüber Krankheits- und Schädlingsbefall auch vom Ernährungszustand der Pflanzen abhängig.

Einerseits wird durch eine gute Nährstoffversorgung das Wachstum verbessert, was zu dichteren Pflanzenbeständen mit geänderten Mikroklima führt. Dadurch wird möglicherweise der Befallsdruck an Schadpilzen verstärkt. Andererseits können durch das beschleunigte Wachstum der Pflanzen befallene Pflanzenteile schneller regeneriert und ersetzt werden.

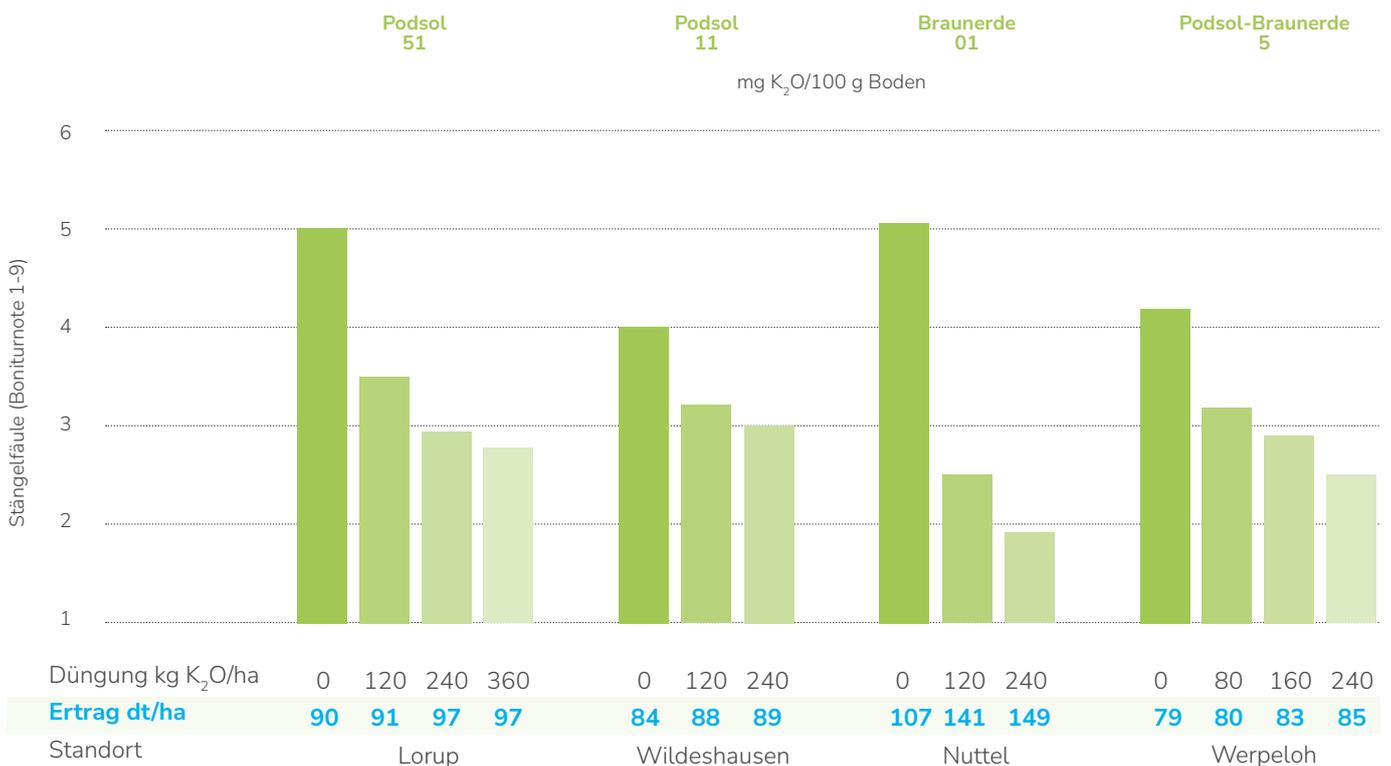
Kalium erhöht die Standfestigkeit bei Getreide über die Ausbildung stabilerer Zellwände. Bevor der Einsatz von Halmstabilisatoren üblich wurde, war die K-Düngung hier die hauptsächlich angewandte Maßnahme. Das ist durchaus aktuell, so zum Beispiel im ökologischen Landbau und auch in konventionellen Produktionsverfahren, in denen der Einsatz von Halmstabilisatoren ausgeschlossen ist. Insbesondere

bei Körnermais spielt die Standfestigkeit eine große Rolle. Sie wird durch den Befall mit Fusarium-Pilzen entscheidend negativ beeinflusst. Der Einsatz von Kalium kann diesen Befall verringern (Abb. unten).

Im Allgemeinen erhöht also eine gute K-Versorgung der Pflanze ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber pilzlichen und bakteriellen Erkrankungen. Neben der absoluten Versorgung muss aber auch das Verhältnis zu anderen Nährstoffen beachtet werden. Gerade bei K-Mangel führt eine steigende N-Düngung oft zu einer verminderten Widerstandsfähigkeit der Pflanzen gegenüber Krankheitserregern. Die Gründe für eine bessere Widerstandsfähigkeit gegenüber Stressfaktoren bei ausreichender K-Versorgung sind:

- Ausbildung starker und fester Zellwände
- Geringeres Angebot an Nahrungsstoffen (Stoffwechselzwischenprodukten) für die Schaderreger durch schnelleren Aufbau höhermolekularer Verbindungen
- Erniedrigter Gefrierpunkt durch osmotisch wirkende höhere Ionenkonzentration im Zellsaft (verminderte Auswinterungsgefahr)

Stängelfäule bei Mais wird durch eine gute K-Versorgung zurückgedrängt



Boniturnote: 1= fehlend oder gering bis 9 = sehr stark

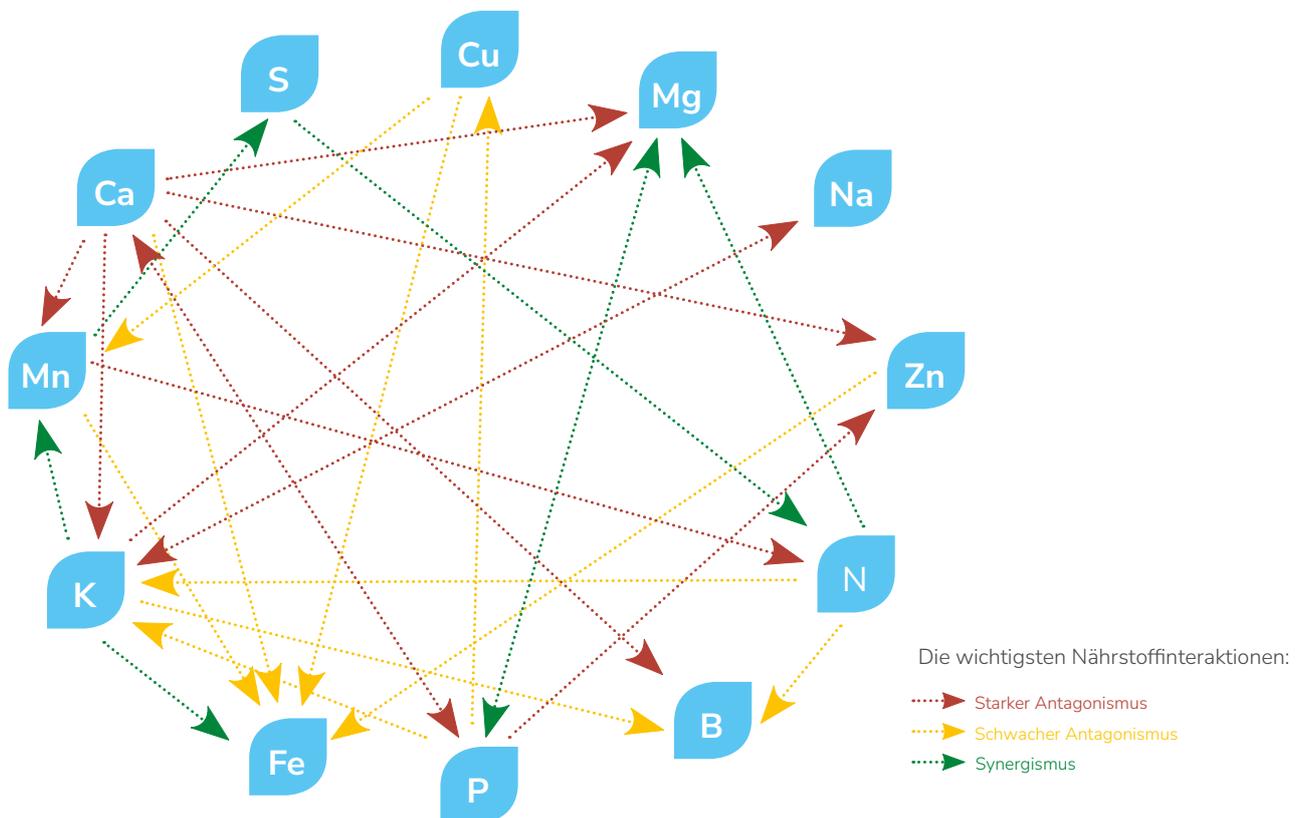
Nährstoffinteraktionen

Die von den Pflanzen benötigten mineralischen Nährstoffe stehen in vielfältigen Wechselbeziehungen zueinander, sowohl im Boden als auch bei der Aufnahme und im Stoffwechsel der Pflanze. Diese Wechselbeziehungen, gekennzeichnet durch gegenseitige Förderung (der sogenannte Synergismus) oder gegenseitige Hemmung (der sogenannte Antagonismus), sind ein entscheidender Grund für die Zufuhr der verschiedenen Nährstoffe in einem für die Pflanze optimalen Verhältnis. Ein wichtiges Beispiel für Antagonismus ist die Hemmung der Magnesiumaufnahme bei einem zu weiten Kalium-Magnesium-Verhältnis beziehungsweise bei einseitiger K-Ernährung. In der Regel liegt Kalium in der Bodenlösung in deutlich niedrigeren Konzentrationen vor als Magnesium (Mg). Deshalb hat die Pflanze Transportsysteme entwickelt, die selbst bei sehr niedrigen K-Konzentrationen in der Bodenlösung dennoch eine K-Aufnahme aus dieser ermöglichen. Diese Transporter sind so spezifisch, dass sie nicht durch andere Nährstoffe genutzt werden können.

Auf der anderen Seite liegt Magnesium in der Regel in höheren Konzentrationen in der Bodenlösung vor. Offensichtlich führt dieser Sachverhalt dazu, dass die Aufnahmesysteme weniger spezifisch sind als beispielsweise für Kalium. Das bedeutet, dass durch diese Mg-Transportsysteme auch andere Kationen wie zum Beispiel Kalium aufgenommen werden können und daher bei übermäßigem K-Angebot in ihrer Mg-Aufnahmeaktivität gehemmt sind.

Eine weitere für die landwirtschaftliche Praxis wichtige Nährstoffinteraktion betrifft Kalium und Stickstoff (N) in Form von Ammonium (NH_4^+). Nicht nur in Nährlösungsexperimenten konnte beobachtet werden, dass Ammonium die K-Aufnahme durch die Pflanze beeinflusst, während umgekehrt Kalium die NH_4^+ -Aufnahme kaum verändert.

Wirkungsgefüge der Nährstoffe und nützlichen Elemente





Kalium im Boden

Böden als Grundlage landwirtschaftlicher Produktion

Böden sind fundamentale Bestandteile aller Landschaftsökosysteme. Sie erfüllen vielfältige Funktionen im Naturhaushalt.

Böden sind...

- ... die natürlichen Standorte der Pflanzen.
- ... Speicher und Vermittler von Pflanzennährstoffen.
- ... Lebensraum für eine Vielzahl von Organismen, die für den Kreislauf der Nährstoffe unentbehrlich sind (Umsetzung der organischen Substanz, Mineralisierung).
- ... Filter und Speicher für Wasser. Sie regulieren die Menge und die Inhaltsstoffe von Grund- und Oberflächenwasser.
- ... Puffer und Filter für Schadstoffe.
- ... Produktionsgrundlage für Land- und Forstwirtschaft.

Für den Landwirt steht die Eignung des Bodens als Standort der Kulturpflanze im Mittelpunkt des Interesses. Böden unterscheiden sich deutlich in ihren Eigenschaften, unterteilt in:

- physikalisch (Körnung, Porenvolumen, Wasser-/Lufthaushalt)
- chemisch (pH-Wert, Nährstoffgehalt)
- biologisch (Humusgehalt, -form, Mikroorganismen, Umsetzungsgeschwindigkeit)

Zusammen mit klimatischen Faktoren ergeben sich damit große Unterschiede zwischen verschiedenen Böden (Abb. rechte Seite).

Bodenart und Humusgehalt sowie das Bodengefüge bestimmen den Luft- und Wasserhaushalt eines Standortes. Die mineralische Zusammensetzung und der Humusgehalt der Böden entscheiden über den natürlichen Vorrat an Pflanzennährstoffen und dessen Verfügbarkeit, aber auch über die Speicherkapazität für zugeführte Nährstoffe.

Selbst auf kleinem Raum können sich Böden als Folge wechselnder Standortfaktoren (unter anderem Ausgangsgestein, Relief, Grundwasserstand) in ihren Eigenschaften stark unterscheiden. Eine standortgerechte Bodennutzung und auch Düngung müssen diese Unterschiede berücksichtigen.

Verfügbarkeit von Kalium im Boden

Im Boden liegt Kalium in verschiedenen Zustandsformen vor. Die Pflanzenwurzeln können Nährstoffe nur in gelöster Form aus dem Bodenwasser aufnehmen. Nur ein sehr geringer Teil an Kalium (etwa 5 bis 45 kg K_2O/ha) befindet sich in dieser – direkt für Pflanzen verfügbaren – Form in der Bodenlösung. Der wesentlich größere Anteil ist nicht gelöst und muss, wenn er von den Pflanzen genutzt werden soll, vorher mobilisiert werden.

Standortgerechte Düngung berücksichtigt die Bodenart



Podsol auf Sand
Verbreitung: eiszeitliche Sande Norddeutschlands, Sandstein- und Quarzitgebiete der Mittelgebirge



Parabraunerde-Pseudogley aus Sandlöss
Verbreitung: zusammenhängende Flächen in Teilen der Lüneburger Heide, Ems-Hunte-Geest, im Kern-Münsterland und im Niederrhein-Tiefland



Pseudogley-Parabraunerde aus Geschiebemergel
Verbreitung: östliches Hügelland in Schleswig-Holstein



Kalkhaltiger Pseudogley aus Geschiebemergel
Verbreitung: Westfälische Tieflandsbucht

Kaliumdynamik im Boden

Der gesamte K-Gehalt eines Bodens schwankt je nach Mineralbestand zwischen 0,2 bis 3 Prozent. Davon ist jedoch nur ein geringer Teil pflanzenverfügbar. Die K-Dynamik und -Verfügbarkeit, und damit das K-Angebot an die Pflanze, wird in Mineralböden entscheidend durch die Nährstoffflüsse im System Tonmineral-Bodenlösung-Pflanzenwurzel bestimmt (Abb. unten).

Man unterscheidet zwischen:

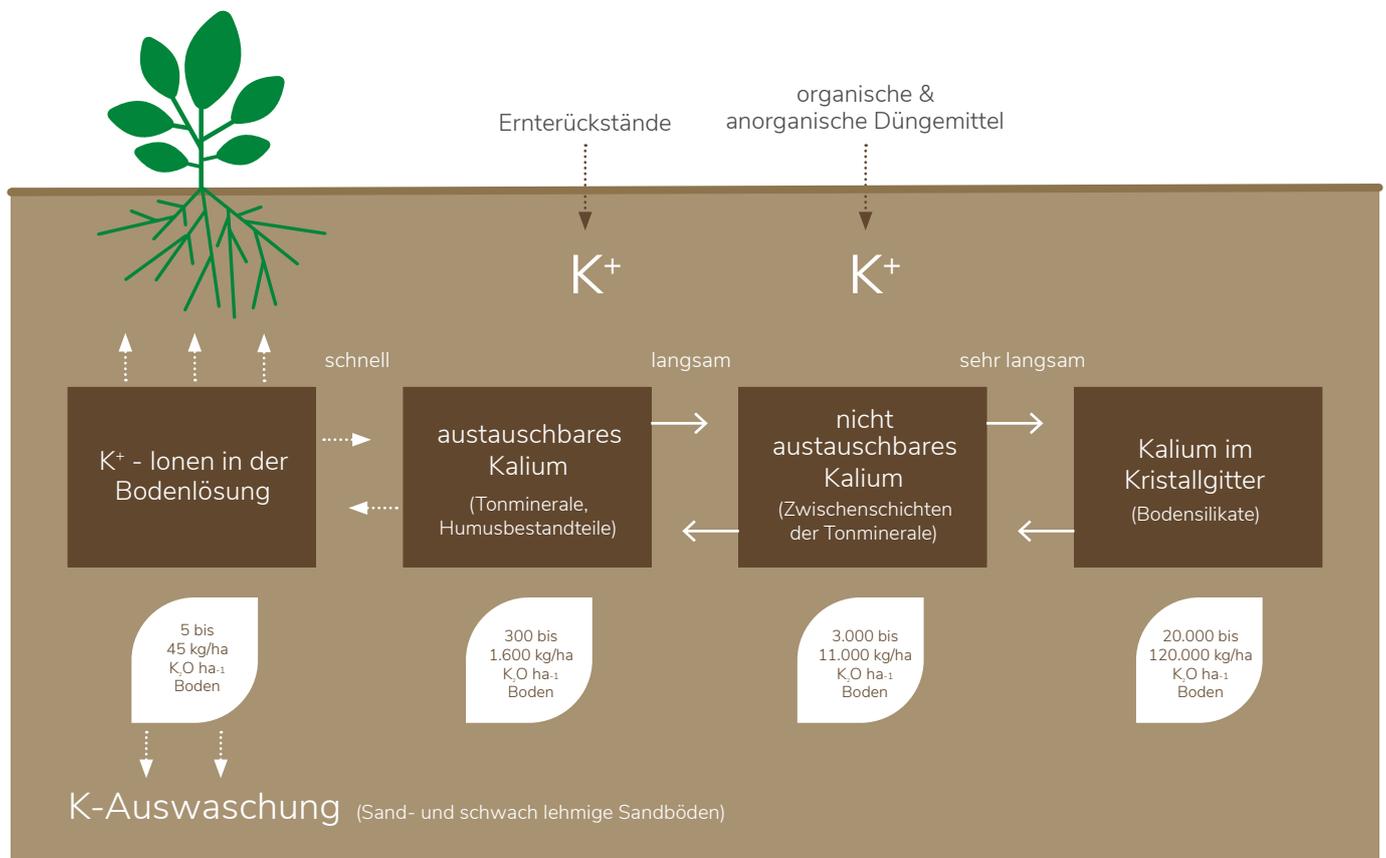
- direkt pflanzenverfügbarem Kalium in der Bodenlösung
- austauschbarem Kalium mit hoher Verfügbarkeit
- Zwischenschicht-Kalium mit geringer Verfügbarkeit
- Kalium als festen Baustein im Kristallgitter (zum Beispiel von Feldspäten und Glimmern) mit äußerst geringer Verfügbarkeit

Je nach Bodentyp liegen nur 5 bis 45 kg K_2O/ha in der Bodenlösung, also in sofort pflanzenverfügbarer Form vor. Im Wachstumsverlauf werden jedoch circa 150 (Getreide) bis 450 kg K_2O/ha (Zuckerrüben) benötigt. Deshalb muss über eine K-Düngung die rechtzeitige Nachlieferung sichergestellt werden.

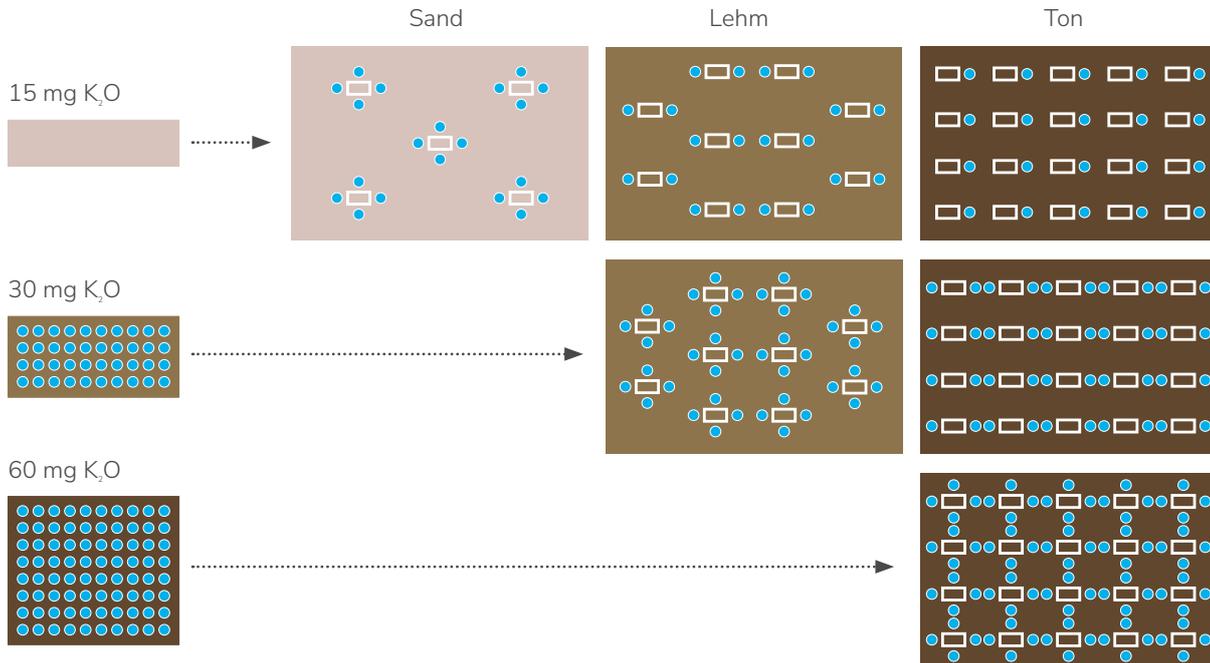
Zwischen 95 und 99 Prozent des K-Vorrates liegen in nicht austauschbarer Form in den Zwischenschichten der Glimmer und Tonminerale beziehungsweise im Kristallgitter von Feldspäten gebunden vor (Abb. unten).

Nach der Aufnahme von Kalium durch die Pflanze aus der Bodenlösung kommt der K-Nachlieferung von den Oberflächen der Tonminerale (austauschbares Kalium) in die Bodenlösung eine besondere Bedeutung für die K-Versorgung der Pflanzen zu.

Kaliumdynamik im Boden



Kaliumsättigung in unterschiedlichen Böden



- Nährstoffträger
- Kalium

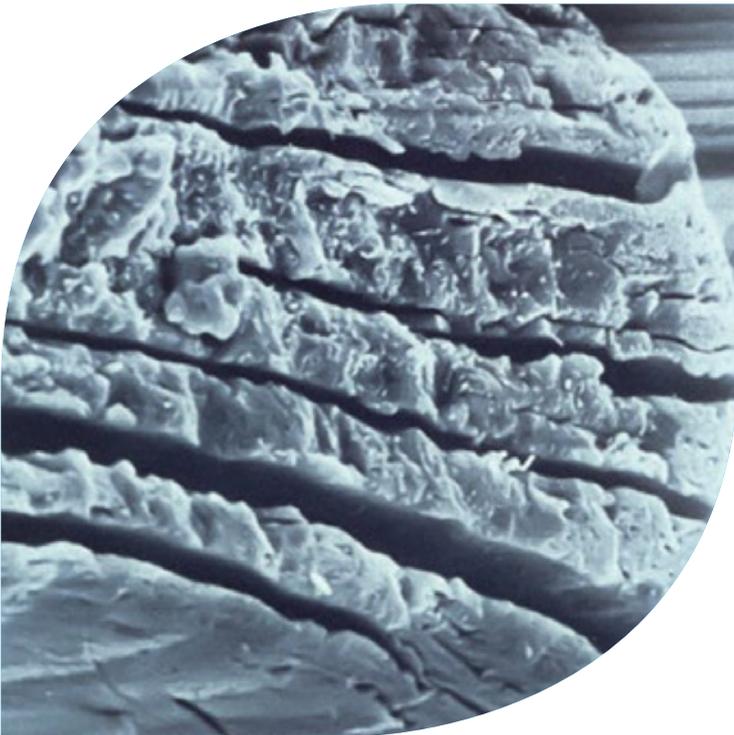
Gehaltsklasse C, Angaben bezogen auf 100 g Boden

Bei gleichem Gehalt an austauschbarem Kalium, gemessen mit der konventionellen Bodenuntersuchung, liegt in tonreicheren Böden (Lehme, Tone) die K-Konzentration der Bodenlösung deutlich niedriger als in tonarmen Böden (Sand, Moor). Tonreiche Böden benötigen daher eine höhere Versorgung mit Kalium, um eine für das Pflanzenwachstum ausreichende K-Konzentration in der Bodenlösung sicherzustellen (Abb. oben).

Durch den insgesamt größeren K-Vorrat weisen tonreichere Böden jedoch eine höhere Pufferung (Nachlieferung) auf als tonarme, das heißt die K-Konzentration der Bodenlösung fällt nach einem Entzug von Kalium durch die Pflanze nicht so schnell ab wie auf leichten Böden.

Neben dem Tongehalt bestimmt auch die Zusammensetzung der verschiedenen Tonmineralarten im Boden den Umfang und die Intensität der K-Bindung und -Freisetzung. Während Kaolinite und Chlorite relativ wenig Kalium enthalten und nachliefern können, sind illitische Tonminerale zwar relativ kaliumreich, der überwiegende Teil ist jedoch in den Tonmineral-Zwischenschichten fest gebunden und wird erst nach starker K-Verarmung der Bodenlösung langsam pflanzenverfügbar.

Vermiculite lagern in der Bodenlösung gelöstes Kalium zunächst in die kaliverarmten Zwischenschichten ein, sodass es der Pflanzenaufnahme über die Wurzel weitgehend entzogen (fixiert) ist. Montmorillonit gibt dagegen das in den Zwischenschichten eingelagerte Kalium mit relativ hoher Rate wieder an die Pflanze ab. Deshalb können Böden mit zwar gleichem Gehalt an austauschbarem Kalium, aber unterschiedlichem Tonmineralbestand sehr verschieden hinsichtlich ihrer K-Nachlieferung und K-Verfügbarkeit reagieren.



Aufgeweitete Tonminerale (Biotit) nach Herauslösen des Zwischenschicht-Kaliums. Elektronenmikroskop. Aufnahme (Vergrößerung 5.300 x) Graf v. Reichenbach

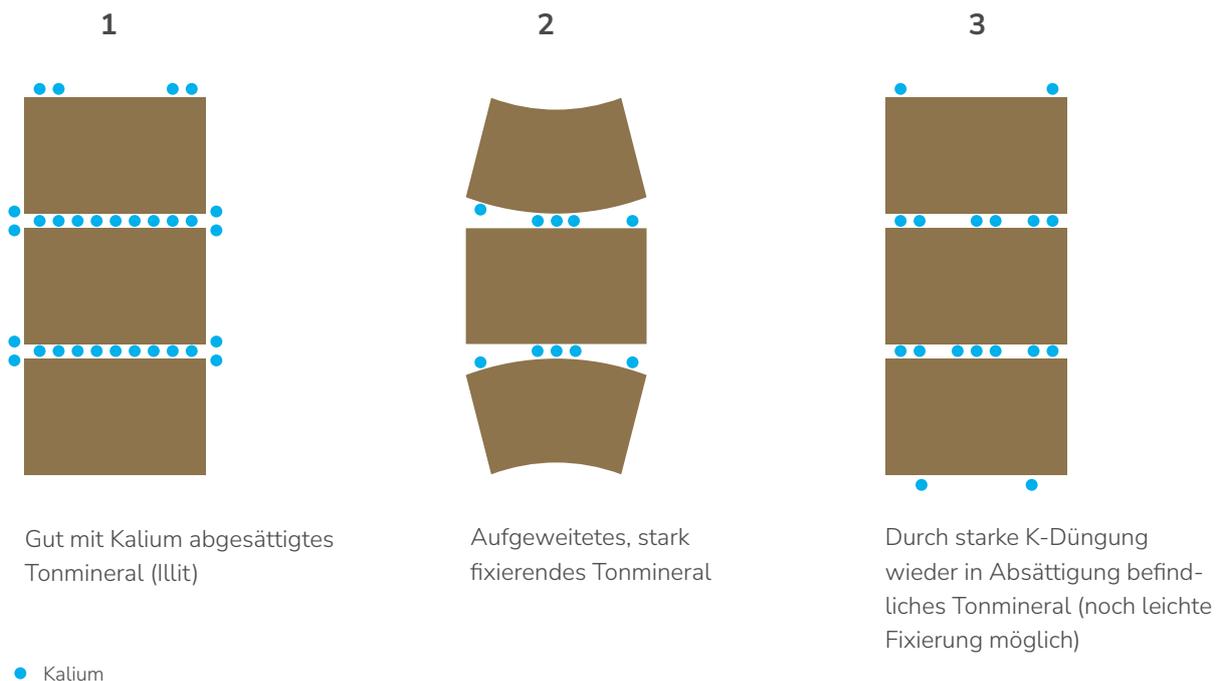
Kaliumfixierung

Auf manchen tonhaltigen Böden werden trotz K-Düngung, die am Bedarf der Pflanze ausgerichtet ist, dennoch zum Teil starke K-Mangelerscheinungen an Pflanzen beobachtet. Dabei handelt es sich um den Vorgang der sogenannten „K-Fixierung“.

Tonhaltige Böden mit hohen Anteilen an aufgeweiteten Illiten oder Vermiculiten bauen gedüngtes Kalium mit hoher Geschwindigkeit in die Zwischenschichten der kaliumverarmten Tonminerale ein (Abb. links und unten). Dabei nehmen die Zwischenschichten wieder ihren ursprünglichen Schichtabstand ein und können auf diese Weise fixiertes Kalium nur noch mit geringer Intensität an die Bodenlösung abgeben.

Dadurch steht gedüngtes Kalium den Pflanzen zunächst als Nährstoff nicht zur Verfügung. K-Mangelerscheinungen sind die Folge. Die K-Fixierung tritt auf Auenstandorten und durchschlickten Niedermoorböden besonders augenfällig zutage. Sie ist in ihren praktischen Auswirkungen jedoch nicht auf diese Standorte beschränkt. Nahezu alle Rohlössen verfügen in Abhängigkeit von Herkunft und Tongehalt über ein unterschiedlich hohes K-Fixierungsvermögen, das in erster Linie geogen bedingt ist.

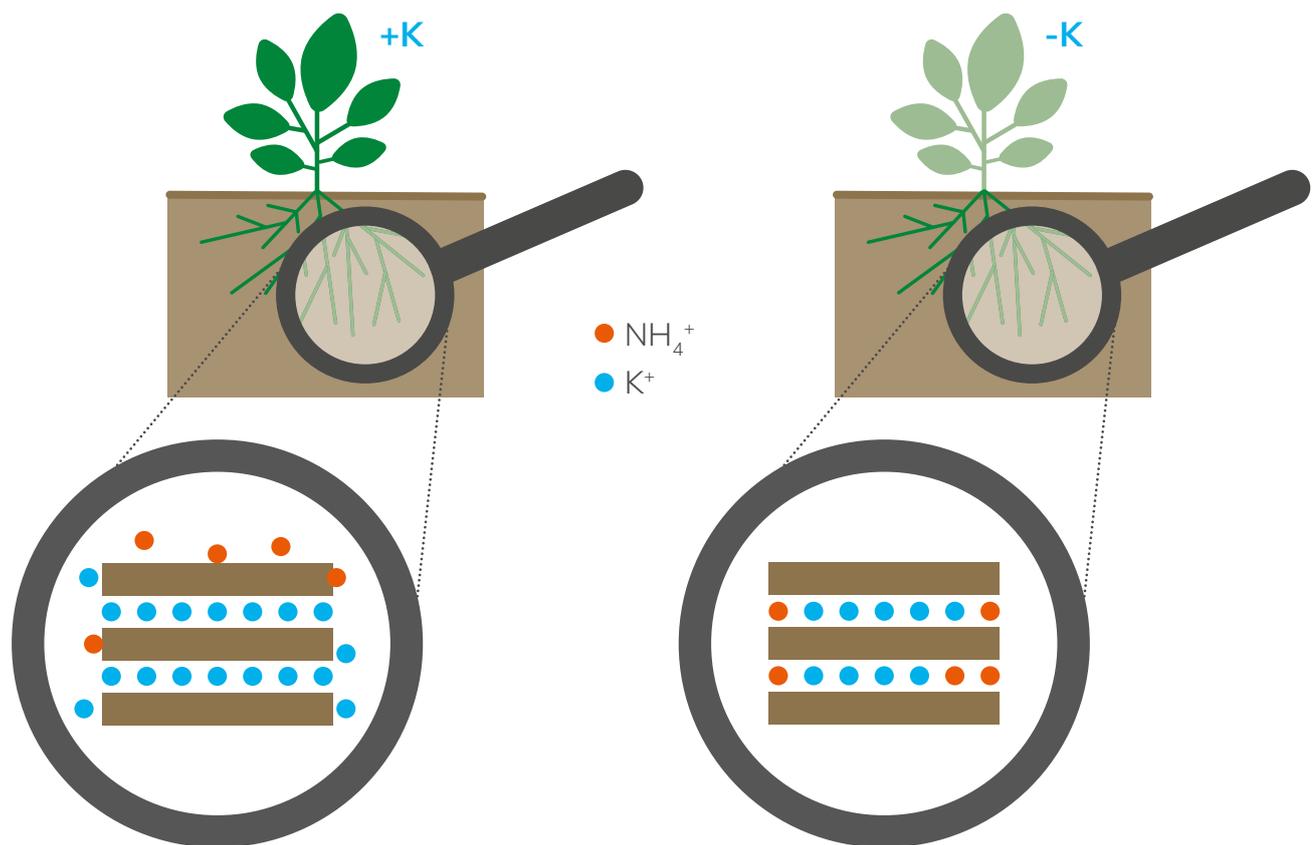
Bei der Kaliumfixierung wird gedüngtes Kalium in den Zwischenschichten der Tonminerale festgelegt



Durch eine K-Düngung wird die K-Fixierungskapazität in den Oberböden fixierender Böden jedoch reduziert und damit reichert sich auch pflanzenverfügbares Kalium auf den Oberflächen der Tonminerale an. Die in unterschiedlichem Ausmaß vorhandene Rest-Fixierungskapazität in der Krume und im Unterboden ist Grund dafür, dass auf vielen Lössböden die zur Erhaltung des K-Vorrates im Boden notwendige K-Düngung über dem Nettoentzug der Kulturen liegt. Bei Düngung in Höhe des Nettoentzuges sinken die K-Gehalte im Boden ab.

Eine K-Unterversorgung des Bodens hat auch einen Einfluss auf die N-Versorgung der Pflanzen (Abb. unten). Diese ergibt sich daraus, dass die in den Zwischenschichten der Tonminerale entstandenen Lücken auch durch Ammonium aufgefüllt werden können, die dann wiederum für die N-Ernährung der Pflanze fehlen.

Ammonium (NH_4^+)-Fixierung bei Kaliumunterversorgung im Boden



Optimale K-Versorgung des Bodens:

K^+ füllt die Zwischenschichten der Tonminerale, NH_4^+ ist pflanzenverfügbar.

K-Unterversorgung des Bodens:

Pflanzen nutzen das K^+ aus den Zwischenschichten, NH_4^+ füllt die entstandenen Lücken und ist nicht pflanzenverfügbar.



Kalium- versorgung der Pflanzen

Nur ein geringer Teil des Gesamtvorrates an Nährstoffen im Boden steht den Pflanzen während der Vegetation tatsächlich zur Verfügung. Man bezeichnet diesen Teil als „pflanzenverfügbar“. Die Pflanzenverfügbarkeit ist bedingt durch das chemische und physikalische Verhalten der einzelnen Nährstoffe im Boden und die Fähigkeit der einzelnen Pflanzenarten zur Nährstoffaneignung.

Abschätzung der Pflanzenverfügbarkeit von Kalium im Boden

Mit Hilfe der Bodenuntersuchung wird versucht, die Menge dieses pflanzenverfügbaren Nährstoffanteils über die Extraktion einer möglichst repräsentativen Bodenprobe mit Salzlösungen zu bestimmen. Zahlreiche Düngungsversuche haben gezeigt, dass die durch eine Bodenuntersuchung ermittelten K-Gehalte im Boden im Mittel vieler Standorte mit dem Düngbedarf der Pflanzen in Beziehung stehen. Je höher der Nährstoffgehalt im Boden, umso geringer ist der Düngbedarf und umgekehrt.

Bei sehr hohen Gehalten im Boden hat die Düngung meist keine direkte Wirkung mehr auf den Ertrag. Diese Erkenntnisse führten dazu, Böden gemäß ihren K-Gehalten in verschiedene Gehaltsklassen beziehungsweise Versorgungsstufen einzuteilen. Die Einteilung dient der Interpretation der gemessenen Gehalte und der Ableitung von Düngempfehlungen. Die K-Gehalte werden in fünf Klassen eingeteilt.

Die Gehaltsklasse C ist das anzustrebende Niveau. Sie stellt sich mittelfristig bei Düngung nach Düngempfehlung ein und gewährleistet somit nachhaltig optimale Erträge. Böden mit zu geringen Gehalten (Klassen A und B) sollten bis zum Erreichen der Klasse C eine erhöhte Düngung erhalten (Abb. rechte Seite). Liegen die Bodenuntersuchungswerte in den Klassen D und E, kann die Düngung zeitweise vermindert werden beziehungsweise gänzlich unterbleiben. Dadurch werden die pflanzenverfügbaren Vorräte im Boden abgebaut und in die Gehaltsklasse C zurückgeführt.

Durch eine regelmäßige Bodenuntersuchung können sich die Landwirtinnen und Landwirte einen Überblick über den pflanzenverfügbaren Nährstoffvorrat ihrer Böden verschaffen. Entsprechend der durch die Analyse der Bodenproben festgestellten Gehaltsklasse des Bodens ist der Düngedarf zu ermitteln. Der besondere Vorteil von langjährigen Aufzeichnungen liegt im Erkennen von Trendverläufen der Nährstoffgehalte im Boden, sodass dann mit einer entsprechenden Anpassung der Düngungshöhe reagiert werden kann.

Um die Schwankungen der Messergebnisse möglichst gering zu halten, sollten die Bodenproben auf einem Schlag am besten immer an den gleichen Stellen gezogen werden. Auch sollte der Zeitpunkt der Beprobung zwischen den Untersuchungszeiträumen annähernd gleich sein (alle 3 bis 4 Jahre).

Eine Düngung zum Erreichen der Bodengehaltsklasse C hat sich für Kalium bewährt

| Gehaltsklasse | Düngungsempfehlung | Ziel der Düngung: Gehaltsklasse C |
|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| A (niedrig) | stark erhöhte Düngung | |
| B (mittel) | mäßig erhöhte Düngung | |
| C (hoch) | Erhaltungsdüngung | |
| D (sehr hoch) | 1/2 Erhaltungsdüngung | |
| E (besonders hoch) | z. Zt. keine Düngung | |

Im Einzelnen können jedoch die Ergebnisse von Eichversuchen verschiedener Standorte mit vergleichbaren Nährstoffgehalten im Boden erheblich voneinander abweichen, da in der Natur neben dem gemessenen Nährstoffgehalt im Boden weitere Faktoren die Pflanzenverfügbarkeit von Kalium bestimmen. Diese kann der Landwirt jedoch nicht oder nur bedingt beeinflussen.

Dazu gehören:

- pH-Wert des Bodens
- Tongehalt und Art der Tonminerale
- Humusgehalt
- Reserven an nicht austauschbarem Gehalt
- Nährstoff-Festlegungseigenschaften von Ober- und Unterböden
- Nährstoffgehalt im Unterboden
- Wasserhaushalt
- Bodentemperatur
- Bodenstruktur
- Wechselwirkungen mit anderen Ionen
- Verfügbarer Wurzelraum beziehungsweise Durchwurzelungstiefe
- Faktoren des Aneignungsvermögens der Pflanze:
 - Menge der Gesamt-Wurzelmasse
 - Morphologie des Wurzelsystems (Flach-, Tiefwurzler)
 - Länge und Dichte des Wurzelsystems
 - Wurzelhaarausbildung
 - Spezifische Aufnahmekapazität
 - Wurzelneubildung im Vegetationsverlauf

Die Bodenuntersuchung stellt zwar ein unverzichtbares Element für die Abschätzung der potenziellen Nährstoffversorgung für die Pflanze dar. Wechselwirkungen zwischen Verfügbarkeitsparametern im Boden und die Eigenschaften zur Nährstoffaufnahme der Pflanzen werden aber nicht erfasst. Hierin liegt auch der Grund, weshalb die auf Bodenuntersuchungen basierenden Düngungsempfehlungen mitunter von den in Kalibrierversuchen ermittelten Ergebnissen abweichen können.

Es ist deshalb von erheblicher Bedeutung, einerseits die Faktoren der K-Verfügbarkeit des Bodens, andererseits aber auch die Faktoren des Nährstoffaneignungsvermögens der Pflanzen zu kennen. Sie beeinflussen letztlich die tatsächliche Höhe der Nährstoffaufnahme. Deshalb sollen im Folgenden einige Faktoren der Pflanzenverfügbarkeit von Kalium dargestellt werden.

Wasserhaushalt und Nährstoffverfügbarkeit

Nur mit der Bodenlösung gelangt Kalium an die Pflanzenwurzel. Ein ausreichender Bodenwasservorrat und dessen Ergänzung durch Niederschläge oder Bewässerung sind deshalb für die Erzielung hoher Erträge unabdinglich. Nur bei geregelter Wasserversorgung, das heißt Niederschläge, Bewässerung und Speicherung im Boden (gute Kapillarität), können die Pflanzen ihre Transpirationsverluste ausgleichen und mit dem Wasser genügend Nährstoffe aufnehmen.

Die größten pflanzenverfügbaren Wassermengen speichern Lehm- und Schluffböden. Sandige Böden haben dagegen vergleichsweise geringe Wasserspeicherkapazitäten. Bei tonreichen Böden tritt trotz eines hohen Wassergehalts oft ein Feuchtigkeitsdefizit auf (das sich bei Pflanzen durch Welketracht bemerkbar macht), weil sie einen hohen nicht für die Pflanzen nutzbaren Wasseranteil (Totwasser) haben.

Damit auch bei knapper Wasserversorgung dennoch genügend Nährstoffe an die Pflanzen angeliefert werden, muss unter solchen Bedingungen die Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung höher sein. Dies kann nur durch höhere Düngung beziehungsweise höhere Nährstoffgehalte im Boden erreicht werden (Abb. unten).

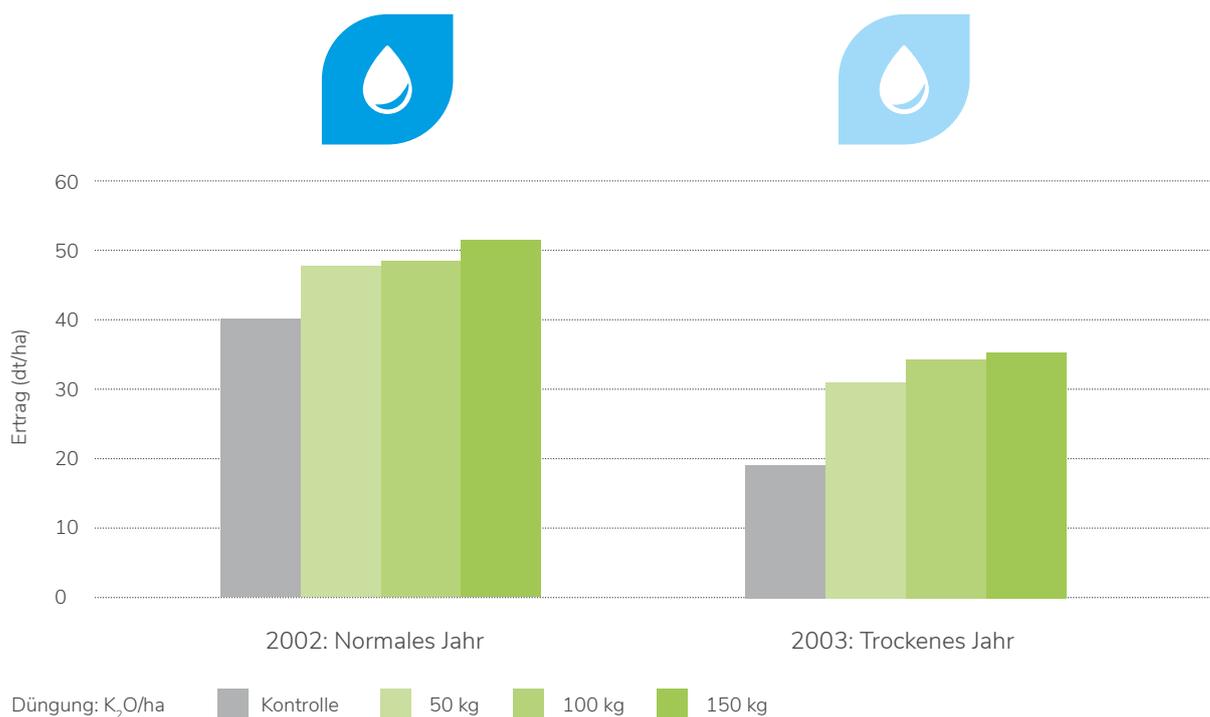
Wurzelraum und Nährstoffverfügbarkeit

Die Hauptmasse der Pflanzenwurzeln befindet sich im oberen Bereich des Bodens, in der Krume, hier werden bis zu 60 Prozent des Wasser- und Nährstoffbedarfs gedeckt. Dem Wasser- und Nährstoffvorrat des Unterbodens kommt eine große Bedeutung zu, wenn in den Frühlingsmonaten während des Massenwachstums der Oberboden austrocknet. In dieser Zeit zeigen tiefgründige Böden wie Löss- und Lehme ihre besondere Überlegenheit hinsichtlich Durchwurzelungstiefe und Speicherkapazität für pflanzenverfügbares Wasser und Nährstoffanlieferung aus dem Unterboden.

Die Fähigkeit dieser Lehm- und Lössböden zur Wasser- und Nährstoffanlieferung hängt wesentlich von ihrer Sedimentmächtigkeit und dem Grad der Bodenentwicklung ab.

Bei geringmächtigen Lössen oder Verdichtungshorizonten im potenziellen Wurzelraum sind der Wasserhaushalt und die Nährstofferschließung aus dem Unterboden deutlich schlechter zu bewerten als bei Böden in typischen Lössböden mit mächtigen Lösspaketen.

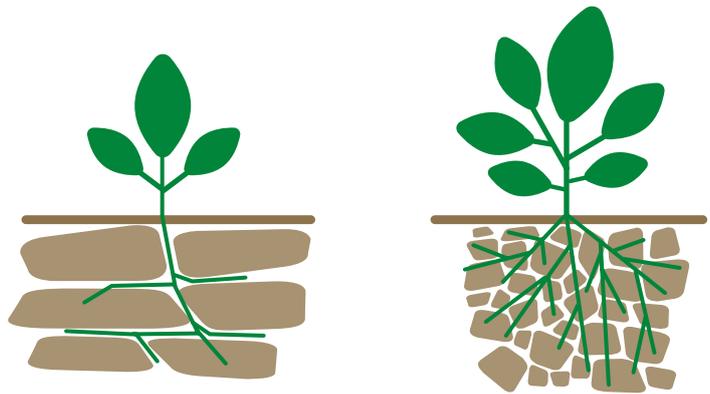
Getreideertrag und Kaliumdüngung bei unterschiedlichem Trockenstress



Bodenstruktur und Nährstoffverfügbarkeit

Tonreiche Böden neigen sehr stark zur Aggregierung. Gerade bei Austrocknung entstehen dichte prismatische oder säulenförmige Bodeneinheiten, die von Pflanzenwurzeln nur schlecht durchdrungen werden können.

Die Pflanzenwurzeln können meist nur auf den Oberflächen der Boden-Aggregate wachsen (Abb. rechts). Dadurch verringert sich der tatsächlich verfügbare Wurzelraum, Bodenwasser und Nährstoffe können nur schlecht erschlossen werden. Daher benötigen solche tonreichen, stark aggregierten Böden auch bei hoher Nährstoffversorgung noch eine regelmäßige Düngung, um die Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung zu erhöhen und den eingeschränkten Wurzelraum auszugleichen (Tabelle rechts).



Bei schlechter Struktur ist die Nährstoffaufnahme auf wenige Bereiche beschränkt, sodass ein insgesamt höheres Nährstoffangebot vorhanden sein muss.

Eine gute Bodenstruktur ermöglicht eine optimale Durchwurzelung und damit eine gute Ausnutzung der gesamten Nährstoffe.

Humusgehalt und Nährstoffverfügbarkeit

Die organische Substanz und deren Dauerform, der Humus, sind für die Fruchtbarkeit von Böden von besonderer Bedeutung, da sie sich positiv auf die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Bodens auswirken. Humus vermag Nährstoffe und Wasser locker zu binden, um sie dann langsam wieder abzugeben, es folgt ein stetiger Nährstofffluss in die Bodenlösung zu den Pflanzenwurzeln.

Nur fruchtbare Böden besitzen die Fähigkeit, nachhaltig hohe Pflanzenerträge zu erzeugen. Voraussetzung dafür ist eine stabile Krümelstruktur, die eine gute Bodengare schafft. Bodenkrümel entstehen durch eine Zusammenballung kleinster organischer und mineralischer Bodenteilchen. Durch die Festigung dieser Bodenteilchen zu größeren, stabileren Krümeln wird der Strukturzustand des Bodens verbessert. Dadurch können ein intensiverer Gas- beziehungsweise Luftaustausch, ein leichteres Eindringen und größeres Speichervolumen von Wasser, ein besseres Wurzelwachstum und eine hohe biologische Aktivität erreicht werden.

Die Humusbildung kann durch Mineraldüngung unterstützt werden. Durch die ertragssteigernde Wirkung der Düngung erhöht sich auch die Menge an Ernterückständen und Wurzelmasse, die als organische Substanz dem Boden wieder zugeführt werden.

Einfluss der Größe von Bodenaggregaten auf die Kaliumaufnahme

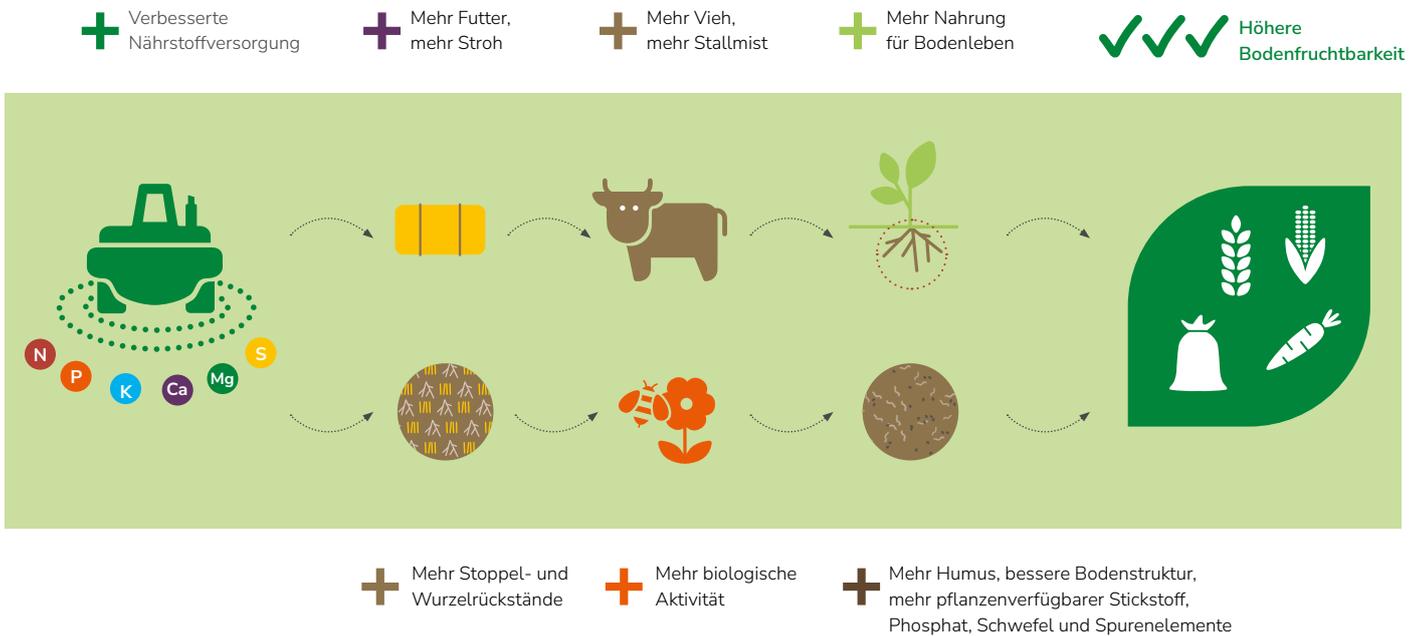
| | Bodenaggregat-Durchmesser in mm | | | | |
|------------------------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | >9 | 5-9 | 3-5 | 2-3 | 1-2 |
| K-Aufnahme Oberböden ¹ | 123 | 125 | 135 | 145 | 154 |
| K-Aufnahme Unterböden ² | 66 | 70 | 71 | 75 | 77 |

¹ 24 mg K₂O/100 g Boden ² 5 mg K₂O/100 g Boden

Die Mineraldüngung fördert also die Bodenfruchtbarkeit (Abb. Seite 24 oben).

Die allein aus der Mineralisierung des Humus und der natürlichen Verwitterung der Ausgangsgesteine resultierende Nährstoffanlieferung reicht in der Regel jedoch nicht aus, um eine qualitativ hochwertige und ertragreiche landwirtschaftliche Produktion zu erzeugen. Zudem stimmt diese natürliche Anlieferung an Nährstoffen zeitlich oft nicht mit dem tatsächlichen Bedarf der Pflanzen überein. Über die ergänzende Mineraldüngung lassen sich diese Nachteile ausgleichen.

Höhere Bodenfruchtbarkeit durch eine verbesserte Nährstoffversorgung



Nährstoffaneignungsvermögen der Pflanze

Die verschiedenen Kulturpflanzenarten haben ein sehr unterschiedliches Aneignungsvermögen für Nährstoffe. Die Ursachen sind in den unterschiedlichen Wurzelsystemen zu finden, die sich hinsichtlich Morphologie und spezifischer Aufnahmekapazität deutlich unterscheiden.

Getreide kann ein vergleichsweise dichtes und tiefgründiges Wurzelnetz aufbauen und hat somit meist ein besseres Nährstoffaneignungsvermögen als viele Blattfrüchte mit ausgesprochenen Pfahlwurzelsystemen und/oder geringeren Wurzeldichten, wie zum Beispiel Zuckerrüben oder Kartoffeln.

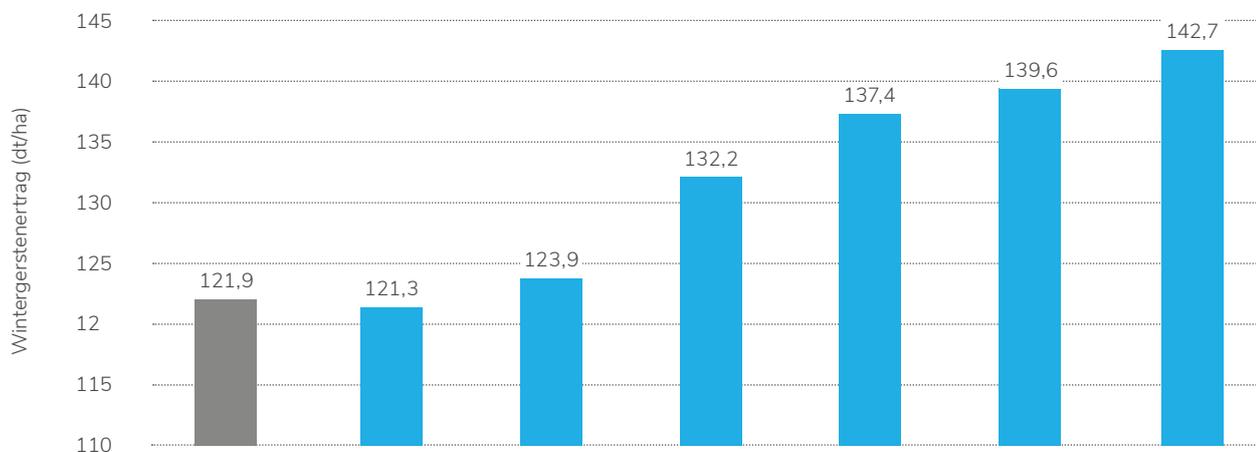
Die Folge ist, dass bei gleichem Nährstoffgehalt im Boden Getreide noch für optimale Ertragsbildung ausreichende Nährstoffmengen aufnehmen kann, während Zuckerrüben, Kartoffeln, Raps, Mais sowie viele Gemüsearten schon Ertragseinbußen aufweisen. Blattreiche Kulturen reagieren in der Regel früher und empfindlicher auf eine K-Unterversorgung als zum Beispiel Getreide.

Nährstoffeffizienz

Die Düngeverordnung (DüV) begrenzt den Einsatz der beiden Nährstoffe Stickstoff und Phosphor. Um diese Zielvorgabe zu erreichen, müssen Strategien angepasst werden. Die Effizienz der N-Düngung hängt in einem erheblichen Maß vom Angebot der übrigen essenziellen Nährstoffe ab. Umso wichtiger ist es, die K-Applikation zu optimieren. Entzug und Ertrag stehen dabei in direktem Zusammenhang. Ein Düngeniveau unterhalb des Pflanzenbedarfs reduziert nicht nur den Ertrag, sondern auch den Entzug umweltrelevanter Nährstoffe. Stickstoff ist der Motor des Pflanzenwachstums. Jedoch ist es ökologisch wie ökonomisch nicht sinnvoll, die N-Menge zu erhöhen, wenn dadurch ein Ungleichgewicht im Verhältnis zu den anderen Nährstoffen, hauptsächlich Kalium entsteht. Einseitige N-Düngung führt zu Nährstoffungleichgewichten in der Bodenlösung, Ernährungsstörungen bei den Pflanzen und unproduktiven N-Verlusten. Ein Versuch mit unterschiedlichem Düngungsniveau an Kalium kann dies verdeutlichen (Abb. rechts).

Balancierte Düngung sichert gute Erträge und hohe Nährstoffeffizienz

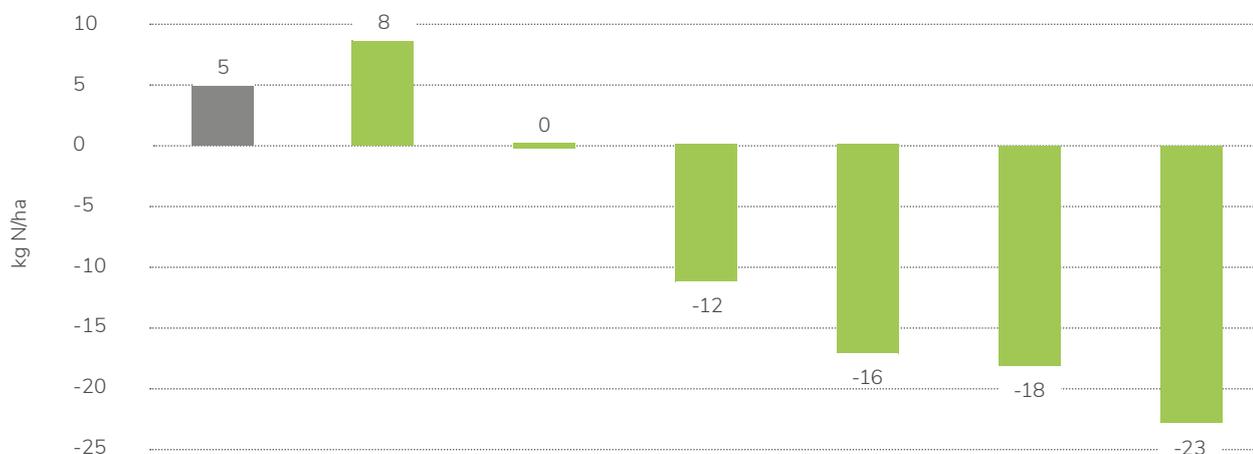
Ertragswirkung



Düngung kg/ha

| | | | | | | | |
|------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| K ₂ O | - | 30 | 60 | 120 | 30 | 60 | 120 |
| MgO | - | - | - | - | 4,5 | 9 | 18 |
| S | - | - | - | - | 3,8 | 7,5 | 15 |
| in Form von | - | 60er Kali | 60er Kali | 60er Kali | Korn-Kali | Korn-Kali | Korn-Kali |

N-Bilanz



Versuchsstandort Ostfeld, K-Düngungsversuch 2015 in Wintergerste Vorfrucht: Winterweizen
 Bodenart sl, pH: 6,1 (B), mg/100 g Boden: 24 mg P₂O₅ (C), 12 mg K₂O (B), 5,5 mg Mg (A)
 N-Versorgung: Nmin: 31 kg N/ha; N-Düngung: 190 kg N/ha; Gesamt-N: 221 kg N/ha

Der K-Bedarf wird oft für eine Rotation kalkuliert. In einer Fruchtfolgedüngung erhalten die Kulturen mit dem höchsten Bedarf (Kartoffeln, Zuckerrüben, Raps, Mais) die K-Düngung. Die genannten Kulturen entziehen dem Boden oft mehr Stickstoff als gedüngt wurde und profitieren in besonderem Maß von einer

am Bedarf orientierten K-Düngung. Gelingt es, den Ertrag zu steigern, wird dadurch auch die N-Bilanz entlastet. Auch im Rahmen der Düngeverordnung muss Kalium nicht balanciert werden, da es nicht umweltrelevant ist. Aus fachlicher Sicht ergibt eine Unterlassung jedoch wenig Sinn.

Wassernutzungseffizienz

Die Wasserversorgung ist vermutlich der häufigste den Ertrag begrenzende Faktor. Aus verschiedenen Gründen ist eine Bewässerung nicht auf allen Standorten möglich. Es kommt also darauf an, alle Produktionsfaktoren auf eine maximale Nutzung des Wasserangebotes auszurichten. Den jeweiligen Erfolg kann man mit der Wassernutzungseffizienz (WNE) beschreiben; sie gibt die Menge Biomasse an, die pro Einheit Wasserverbrauch produziert wird (zum Beispiel Kilogramm Trockenmasse (TM) /Liter Wasser; Abb. oben).

Kalium steuert den Wasserhaushalt der Pflanze, von der Wasseraufnahme durch die Wurzel, und dem darauf folgenden Transport bis zur Abgabe durch die Stomata der Blätter. Kalium lenkt den Zufluss von Wasser in die Stomata und damit deren Zellinnen- druck (Turgor). Bei hohem Turgor öffnen sich die Stomata und bei niedrigem Turgor schließen sie sich. So werden die Wasserabgabe und die Aufnahme des für die Photosynthese und damit für die Erzeugung von Biomasse benötigten CO_2 sichergestellt (Abb. unten).

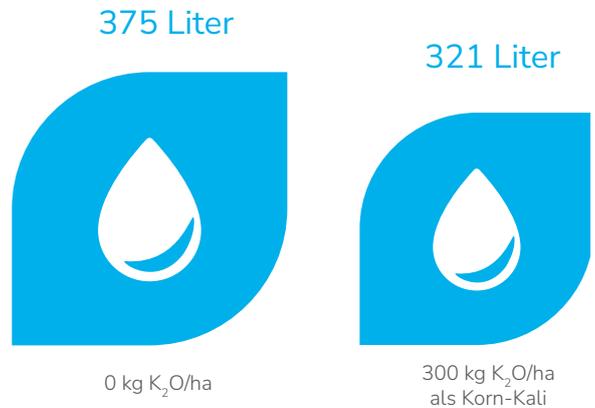
Über den dadurch entstehenden Transpirationssog durch die Pflanze werden weiteres Wasser und die darin gelösten Nährstoffe aus dem Boden aufgenommen. Bei guter K-Versorgung bleiben die Stomata auch bei Trockenstress optimal geöffnet und sorgen damit für die Aufrechterhaltung der Transpiration bei gleichzeitiger Aufnahme von Kohlendioxid. So ermöglicht Kalium, dass die Pflanze auch bei Trockenheit weiter nahezu optimal wachsen kann. Sie nutzt das Wasser effizient zur Ertragsbildung.

Eine optimale Versorgung mit Kalium gewährleistet eine hohe Wassernutzungseffizienz.

Dies passiert über:

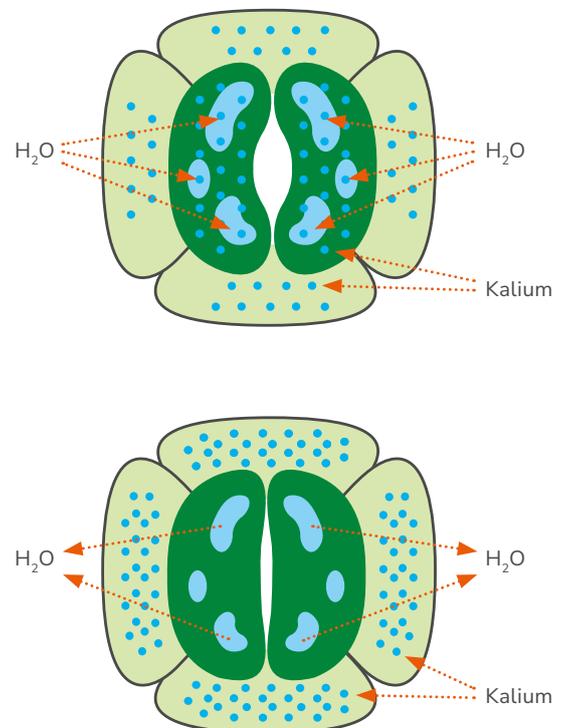
- Aufrechterhaltung der Transpiration auch bei sub-optimaler Wasserversorgung
- Gewährleistung eines optimalen Assimilattransports und damit Produktion von Ertrag (TM) und wertgebenden Inhaltsstoffen
- Rasches Wurzelwachstum und damit optimale Erschließung des Bodenwassers
- Höheres Wasserspeichervermögen des Bodens durch Erhöhung des Anteils von Mittelporen bei höheren K-Bodengehalten

Wasserverbrauch für die Produktion von einem Kilogramm Rüben-Weißzucker



Quelle: Forschungsprojekt der K+S KALI GmbH und der Universität Halle, Feldversuch Bernburg

Die Rolle von Kalium in der Funktion der Stomata



Kalium hält Transpiration und Photosynthese aufrecht: Das Wasser folgt Kalium und führt somit zu hohem Turgor und offenen Stomata (oben) beziehungsweise zu verringertem Turgor und einem Schließen der Stomata (unten).

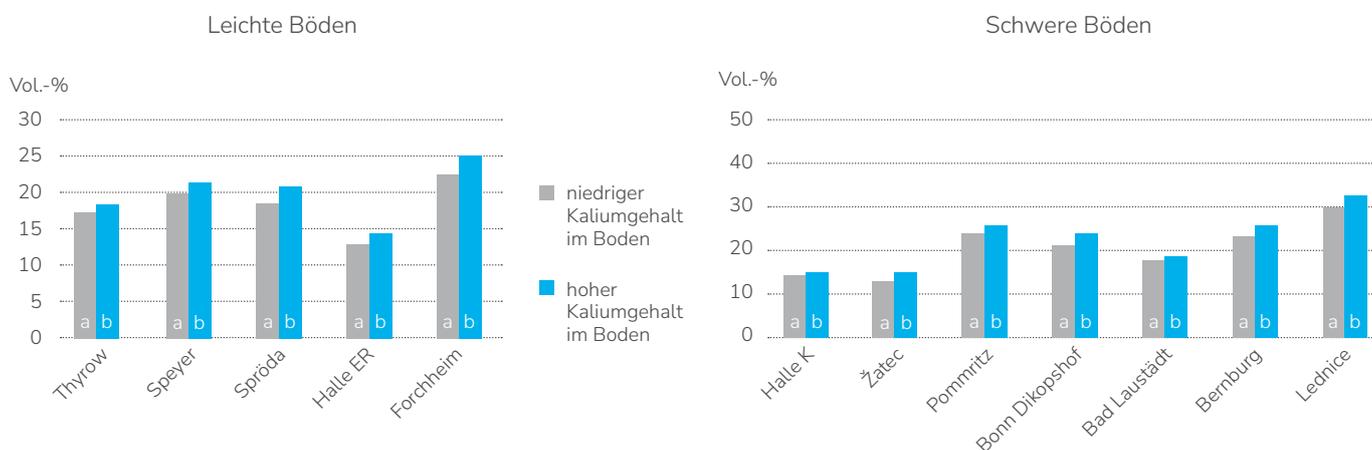
Insbesondere bei suboptimaler K-Versorgung lässt sich die Wassernutzungseffizienz durch K-Düngung wesentlich steigern. Aus vielen einschlägigen Versuchen ist bekannt, dass eine K-Düngung besonders die Wassernutzungseffizienz in Bezug auf den Zuckerertrag (Zuckerrüben) erhöht. Kalium beeinflusst jedoch nicht nur die Effizienz der Wassernutzung von Pflanzen, sondern auch die physikalischen Eigenschaften der Böden. Durch Bildung von sogenannten K-Tonbrücken im Boden entstehen aus Großporen, die Wasser nur im geringen Maße gegen die Gravitation halten können, Mittelporen, die imstande sind, Wasser für die Pflanzen nutzbar zu speichern. Böden mit guter K-Versorgung weisen daher höhere Feldkapazitäten als unzureichend versorgte Böden (Abb. unten).

Kälteresistenz

Gut mit Kalium versorgte Pflanzen haben eine höhere Konzentration an Kalium und Assimilaten (Zucker). Dadurch wird unter anderem ein steigender Zellinnendruck bewirkt; die Bildung von Eiskristallen findet dann allenfalls zwischen den Zellen statt. Allerdings ist hier eine gewisse Akklimatisierungsphase erforderlich. Darüber hinaus vermindern die vorstehend erwähnten Effekte einer optimalen Steuerung des Wasserhaushaltes (Spaltöffnungen) und einer maximalen Durchwurzelung des Bodenraumes (Abreißen von Wurzeln bei Auffrieren) die Gefahr einer durch Frost induzierten Trockenheit.



Nutzbare Feldkapazität an verschiedenen Versuchsstandorten

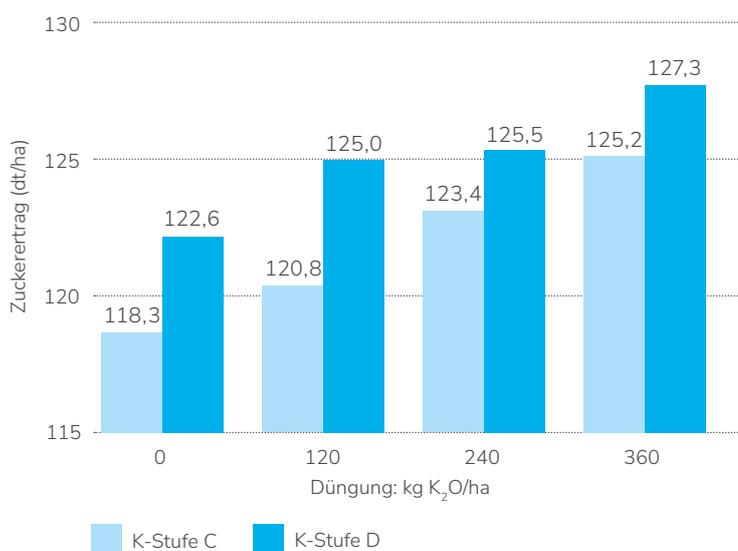


Quelle: Damm et al., 2012

Kalium- düngung in der Praxis



Einfluss unterschiedlicher Kaliumdüngung und Kaliumbodenversorgung auf den Zuckerertrag von Zuckerrüben



5-Löss-Parabraunerde, je 3 Zuckerrüben-Jahre; Köln-Aachener-Bucht, Schwaben, Franken, Kraichgau, Hildesheimer Börde; circa 20 mg K₂O/100 g Boden CAL vor Anlage; Ernterückstände verblieben auf der Fläche

Bemessung der Kaliumdüngung

Ergebnisse aus vielen langjährigen, stationär durchgeführten Dauerdüngungsversuchen zeigen, dass bei suboptimaler Bodenversorgung das Ertragsniveau absinkt und die Ertragseffekte durch eine K-Düngung zunehmen.

Insbesondere Kulturen mit nicht so dichtem Wurzelsystem (viele Hack- und Blattfrüchte) reagieren empfindlich auf unzureichende K-Gehalte im Boden. Bei niedriger Versorgung des Bodens (A oder B) ist der Ertragseffekt durch die Grunddüngung zwar größer, dennoch bleibt das Ertragsniveau dort unter der guten Bodenversorgung. Eine Anhebung der pflanzenverfügbaren Gehalte im Boden führt zu einer Verbesserung des Ertragsniveaus. Aus diesem Grund ist die Grunddüngung auch so auszurichten, dass die Gehaltsklasse C erreicht wird und erhalten bleibt. Ein Absinken gefährdet dagegen das Ertragsniveau und somit die Wirtschaftlichkeit (Abb. links).

Der durchschnittliche K-Verbrauch in Deutschland über Mineraldünger ist in den vergangenen 50 Jahren stark gesunken (Abb. rechte Seite oben). In vielen Ackerbauregionen wird von den in der Vergangenheit aufgebauten Nährstoffvorräten im Boden gezehrt, sodass sich dort bereits deutliche Rückgänge an K-Gehalten im Boden bis hin zu Mangelsymptomen an Pflanzen erkennen lassen. Gerade in solchen Betrieben ist es von enormer Bedeutung, durch Bodenuntersuchungen die K-Vorräte im Boden zu kontrollieren. Ertragsniveau und Wirtschaftlichkeit sollten nicht durch eine unzureichende Versorgung

mit Grundnährstoffen gefährdet werden, zumal dann auch andere ertragssteigernde Maßnahmen (zum Beispiel N-Düngung oder Pflanzenschutz) nicht voll zur Wirkung kommen.

Die Ermittlung des K-Bedarfs einer Kultur beziehungsweise einer Fruchtfolge leitet sich aus der Höhe des pflanzenverfügbaren Bodenvorrates, dem Ertragsniveau sowie dem Nährstoffaneignungsvermögen der verschiedenen Pflanzen ab. Die Höhe der mineralischen Düngung bestimmt sich zudem aus der eventuellen Nährstoffrücklieferung über Ernterückstände, der Menge an wirtschaftseigenen Düngern oder Sekundärrohstoffdüngern sowie der Beurteilung von Verfügbarkeits- und Verlustfaktoren. Daraus ergeben sich folgende Schritte zur Festlegung der Düngungshöhe:

1. Bestimmung des voraussichtlichen K-Entzugs durch die anzubauende Kulturpflanze. Dieser ist abhängig von der Pflanzenart und dem Ertragsniveau.
2. Bestimmung des pflanzenverfügbaren K-Gehalts im Boden mit Hilfe der Bodenuntersuchung und Einstufung der Ergebnisse in die Gehaltsklassen A bis E unter Berücksichtigung der Bodenart.
3. Berücksichtigung von Standortfaktoren und Pflanzeigenschaften: Die Ableitung von treffsicheren Düngeempfehlungen aus den Ergebnissen der Bodenuntersuchungen ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Ein wichtiger Grund dafür ist, dass die aus langjährigen Kalibrierversuchen gewonnenen Durchschnittsergebnisse nicht direkt auf sämtliche Standorte zu übertragen sind. Die standortspezifischen Bedingungen weichen zum Teil erheblich voneinander ab. Um die Sicherheit von Düngungsempfehlungen zu verbessern, sind einige Forschungs- und Versuchseinrichtungen dazu übergegangen, Standortfaktoren zu berücksichtigen, die die Nährstoffaufnahme beeinflussen.

Um die K-Versorgung der Pflanzen und damit die Ausschöpfung des standortspezifischen Ertragsoptimums sicher zu stellen, sollte bei Fruchtfolgen mit den aneignungsschwachen Kulturen wie Zuckerrübe, Kartoffel aber auch Mais und Raps der obere Bereich der Gehaltsklasse C angestrebt werden. Bei getreidebetonten Fruchtfolgen ist der mittlere Bereich bei günstigen Standortbedingungen in der Regel ausreichend. Mit diesem Verfahren wird zunächst der Nährstoffbedarf der Kulturpflanzen bestimmt. Um den Mineraldüngerbedarf zu ermitteln, müssen weitere Schritte angeschlossen werden.

Entwicklung des mineralischen Kaliumverbrauchs in Deutschland seit 1961



Quelle: IFA

4. Berücksichtigung der Nährstoffrücklieferung aus Ernterückständen, wirtschaftseigenen Düngern und Sekundärrohstoffdüngern.

Gerade in der heute sehr oft spezialisierten Landwirtschaft müssen die Nährstoffrückflüsse im Betriebskreislauf berücksichtigt werden. So bleiben in Ackerbaubetrieben Nährstoffe über die Ernterückstände im Kreislauf, sofern diese nicht verkauft werden. In viehhaltenden Betrieben müssen die Nährstoffmengen der wirtschaftseigenen Dünger in die Düngeplanung mit einbezogen werden. Durch Sekundärrohstoffdünger (zum Beispiel Klärschlamm, Komposte) und Gärreste können zusätzlich Nährstoffe in den Betrieb eingebracht werden.

Um den Mineraldüngerbedarf zu bestimmen, müssen diese Nährstoffmengen vom Gesamtnährstoffbedarf abgezogen werden. Auch diese Nährstoffquellen unterliegen den erwähnten Verfügbarkeitsfaktoren und können daher nicht immer voll angerechnet werden. Bei Verbleib der Ernterückstände auf dem Acker werden auf leichteren oder organischen Böden erhebliche K-Mengen in tiefere Bodenschichten verlagert, die den Pflanzen in der nächsten Wachstumsperiode nur noch teilweise zur Verfügung stehen.

Berücksichtigt werden muss zudem, dass der Nährstoffgehalt organischer Dünger erheblich schwankt. Oft können sie nicht zum pflanzenbaulich optimalen Zeitpunkt ausgebracht werden.

Eine genaue, auf den Bedarf der Kultur ausgerichtete Düngeplanung ist so unmöglich. Werden direkt pflanzenverfügbare mineralische Dünger mit garantierten Nährstoffgehalten verwendet, kann auf den mengenmäßigen und zeitlichen Bedarf der Pflanzen optimal eingegangen werden.

Termine der Kaliumdüngung

Auf vielen Böden ist eine K-Düngung im Herbst sinnvoll. So kommt das Kalium schon den Winterungen zugute und kann deren Frosthärte erhöhen. Auf mittleren und schweren Böden (ab etwa 30 Bodenknoten oder 10 Prozent Ton) ist die K-Verlagerung in tiefere Bodenschichten aufgrund der guten Speicherfähigkeit als äußerst gering einzuschätzen. Zudem sind die Böden im Spätsommer/Herbst oft gut abgetrocknet und besser befahrbar; Struktur-schäden werden vermieden.

Auf Sand- und Moorböden ist von der Herbstdüngung mit Kalium wegen des Verlagerungsrisikos grundsätzlich abzuraten. Für solche Böden richtet man die Düngung auf den jährlichen Bedarf der jeweils angebauten Kultur aus. Allerdings muss beim Anbau von Winterungen auf solchen Standorten darauf geachtet werden, dass diese Kulturen für die Vorwinterentwicklung ausreichend Kalium zur Verfügung haben.

Durchschnittlicher Nährstoffbedarf von Haupt- und Nebenprodukt landwirtschaftlicher Kulturpflanzen

| Fruchtart | Ertrag (t/ha) | Nährstoffbedarf (kg/ha) | | | | |
|--------------------|---------------|-------------------------|-------------------------------|------------------|-----|----|
| | | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | MgO | S |
| Roggen | 6,0 | 126 | 64 | 144 | 23 | 10 |
| Qual.-Weizen | 9,0 | 260 | 94 | 155 | 32 | 20 |
| Wintergerste | 8,0 | 160 | 81 | 143 | 24 | 12 |
| Braugerste | 6,5 | 113 | 66 | 96 | 20 | 9 |
| Hafer | 6,5 | 134 | 74 | 161 | 24 | 11 |
| Körnermais | 9,0 | 217 | 91 | 230 | 61 | 17 |
| Triticale | 7,0 | 148 | 75 | 149 | 27 | 11 |
| Raps | 4,0 | 182 | 98 | 205 | 39 | 40 |
| Sonnenblumen | 3,0 | 147 | 102 | 357 | 38 | 12 |
| Spätkartoffel | 40,0 | 156 | 59 | 269 | 22 | 10 |
| Zuckerrübe | 55,0 | 253 | 97 | 390 | 83 | 17 |
| Futterrübe | 80,0 | 192 | 75 | 485 | 74 | 13 |
| Silomais (28 % TS) | 55,0 | 209 | 88 | 248 | 55 | 14 |
| Grünland | 10,0 | 276 | 95 | 324 | 43 | 40 |
| Ackerbohne* | 4,0 | 224 | 60 | 160 | 22 | 18 |
| Erbse* | 4,0 | 204 | 56 | 160 | 24 | 16 |

* N-fixierende Leguminose
Quelle: K+S KALI Taschenbuch 2019

Insbesondere auf schlecht versorgten Schlägen ist die K-Gabe dann zwischen Herbst und Frühjahr aufzuteilen.

Düngebedarf/Düngesysteme

Wie bereits im Detail beschrieben leitet sich der Düngebedarf aus dem Nährstoffbedarf der Kultur (oder der angebauten Fruchtfolge) ab. Außerdem sind die Nährstoffe im Boden und die Verfügbarkeit/Festlegung des Kaliums zu berücksichtigen. Durchschnittliche Bedarfszahlen für Ackerkulturen und Gemüse auf Basis der Nährstoffabfuhr des Haupternteerzeugnisses und der Bodengehaltsklasse C sind in den Tabellen unten aufgeführt.

Nährstoffabfuhr von Freilandgemüse durch das Haupternteerzeugnis (kg/ha) bei Bodengehaltsklasse „C“

| Gemüseart | Ertrag (dt/ha) | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | MgO |
|----------------|----------------|-----|-------------------------------|------------------|-----|
| Blumenkohl | 350 | 98 | 35 | 126 | 7 |
| Buschbohnen | 120 | 30 | 11 | 36 | 5 |
| Chicorée | 450 | 113 | 54 | 243 | 30 |
| Chinakohl | 700 | 105 | 64 | 210 | 12 |
| Endiviansalat | 450 | 90 | 27 | 248 | 14 |
| Feldsalat | 80 | 36 | 8 | 52 | 6 |
| Grünkohl | 200 | 120 | 37 | 108 | 8 |
| Gurke | 700 | 105 | 48 | 168 | 14 |
| Kohlrabi | 450 | 126 | 46 | 189 | 11 |
| Kopfsalat | 500 | 90 | 35 | 180 | 13 |
| Markterbse | 70 | 70 | 16 | 25 | 4 |
| Möhre | 600 | 102 | 49 | 318 | 27 |
| Porree | 500 | 125 | 40 | 180 | 17 |
| Radicchio | 280 | 70 | 26 | 134 | 9 |
| Radieschen | 300 | 60 | 21 | 102 | 10 |
| Rettich | 500 | 70 | 40 | 200 | 9 |
| Rosenkohl | 250 | 163 | 49 | 165 | 10 |
| Rote Rübe | 600 | 168 | 69 | 288 | 30 |
| Rotkohl | 500 | 110 | 40 | 180 | 13 |
| Schwarzwurzeln | 200 | 46 | 32 | 78 | 8 |
| Sellerie | 500 | 125 | 75 | 270 | 13 |
| Spargel | 80 | 21 | 7 | 19 | 1 |
| Spinat | 250 | 90 | 29 | 165 | 21 |
| Stangenbohne | 250 | 63 | 23 | 75 | 10 |
| Tomate | 500 | 80 | 23 | 195 | 10 |
| Weißkohl | 1000 | 200 | 73 | 310 | 25 |
| Zucchini | 600 | 96 | 36 | 120 | 16 |
| Zuckermais | 200 | 70 | 32 | 52 | 12 |
| Zwiebel | 450 | 81 | 36 | 108 | 11 |

Die Kalium-, Magnesium- und Schwefel-Düngung erfolgt im Freilandgemüsebau über sulfatische Düngemittel wie Patentkali (30 % K₂O, 10 % MgO, 17 % S).

Bodendüngung

Die Bodendüngung mit Kalium ist die wichtigste Form der K-Ausbringung. Wie in den Tabellen auf Seite 30 dargestellt, ist der K-Bedarf bei den meisten Kulturen ähnlich dem des Stickstoffs. Die Applikation ist ganzjährig möglich und kann auch bei Frost ohne Probleme vorgenommen werden. Kalium wird meist mit der Fruchtfolge ausgebracht und kann dabei bereits im Herbst und/oder als Stoppeldüngung sowie auch im Frühjahr erfolgen. Auch eine Bestandsdüngung (Kopfdüngung) ist problemlos durchführbar. Dabei sind die jeweiligen Wachstumsstadien zu beachten, zum Beispiel sollte hier keine Düngerapplikation nach dem 2-Blatt-Stadium erfolgen, um Stress an beziehungsweise in der Pflanze zu vermeiden. Weiterhin ist immer die Bodenart bei der Düngung zu berücksichtigen. In mittleren und schweren Böden ist die Gefahr der Auswaschungsverluste in der Regel gering, wobei es bei leichten, sandigen Böden zu K-Verlagerungen kommen kann. Dies sollte man immer bei seinem Düngemanagement entsprechend berücksichtigen.

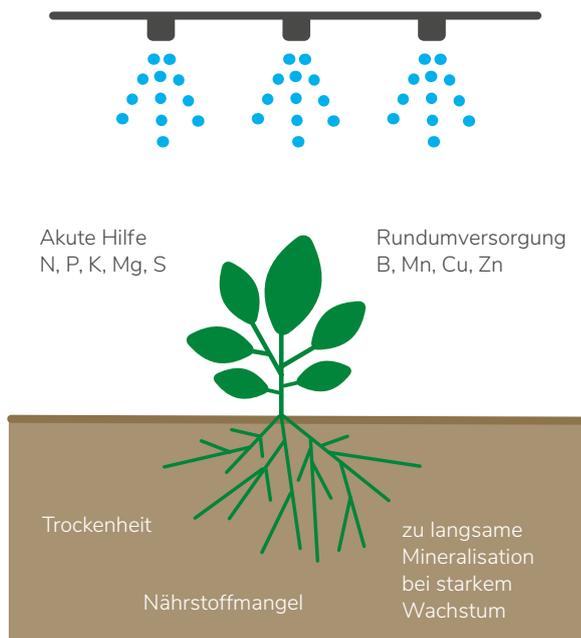
Blattdüngung

Eine Blattdüngung mit Kalium ist möglich, dabei wird diese allerdings mehr als Ergänzungsdüngung gesehen (Abb. rechts). Denn der Nährstoffbedarf von Kalium liegt bei den meisten Kulturen in ähnlicher Höhe wie der Bedarf von Stickstoff (etwa 100 bis 300 kg K_2O/ha). Dieser kann somit nur gedeckt werden, wenn eine Bodendüngung vorgenommen wird. Allerdings hat bei einigen Kulturen die K-Blattdüngung eine besondere Bedeutung. Zum Beispiel wirkt sich im Kartoffelanbau eine K-Anwendung per Blattdüngung je nach K-Bindungsform auf die Stärkebildung in der Knolle aus. Während sulfathaltiges Kalium die Stärkebildung positiv beeinflusst, wirkt eine chloridische K-Düngung reduzierend. Auch wird Kalium zusammen mit Stickstoff als NK-Dünger im Gemüseanbau verwendet. Die K-Düngemittel, die für die Blattdüngung genutzt werden, können in der Regel auch für Fertigation und Bewässerungssysteme angewendet werden.

Möglichkeiten für eine standortspezifische Düngung

Bei der Kalkulation des Mineraldüngerbedarfs müssen zusätzlich Verfügbarkeitsfaktoren berücksichtigt werden. Humusarme, stark saure, zu kalkhaltige, ausgetrocknete, pseudovergleyte und sehr leichte Böden weisen oft eine geringe Nährstoffverfügbarkeit auf.

Blattdüngung gleicht temporären Nährstoffmangel aus



Nährstofffixierungsvorgänge in Krume und Unterboden verschlechtern zum Teil erheblich die Nährstoffausnutzung aus der Düngung. Eventuelle Stauhorizonte im Unterboden begrenzen eine intensive Durchwurzelung, wodurch die Nährstoffaufnahme der Pflanzen ebenfalls behindert wird.

Die Erhaltungsdüngung (Erhaltung der Gehaltsklasse C) liegt auf vielen Standorten daher oft höher als die reine Nährstoffabfuhr („Nettoentzug“). Unterbleibt dieser standortspezifische Zuschlag, sinkt der verfügbare Nährstoffgehalt im Boden mittelfristig ab. Schlechtere Ausnutzungsraten und eine kostenintensive Aufdüngung sind die Folgen. Über die Höhe des Zuschlages entscheiden letztlich die jeweiligen Boden-, Klima- und Bewirtschaftungsbedingungen.

Es ist zweckmäßig, die Bilanzierung von K-Abfuhr und -zufuhr (siehe Grundlagen der Düngemessung) über eine gesamte Fruchtfolge vorzunehmen. Die Düngung selbst sollte dann zu den Kulturen mit dem höchsten Bedarf und/oder geringsten Aneignungsvermögens durchgeführt werden.

Häufig aufgestellte pauschale Bilanzen für eine ganze Region können nur allgemeine Tendenzen aufzeigen. Für die Ableitung von einzelbetrieblichen und schlagbezogenen Düngungsempfehlungen sind sie ungeeignet, da die betrieblichen Bedingungen und standortspezifische Besonderheiten nicht berücksichtigt werden.

Kaliumquellen und ihre Bedeutung

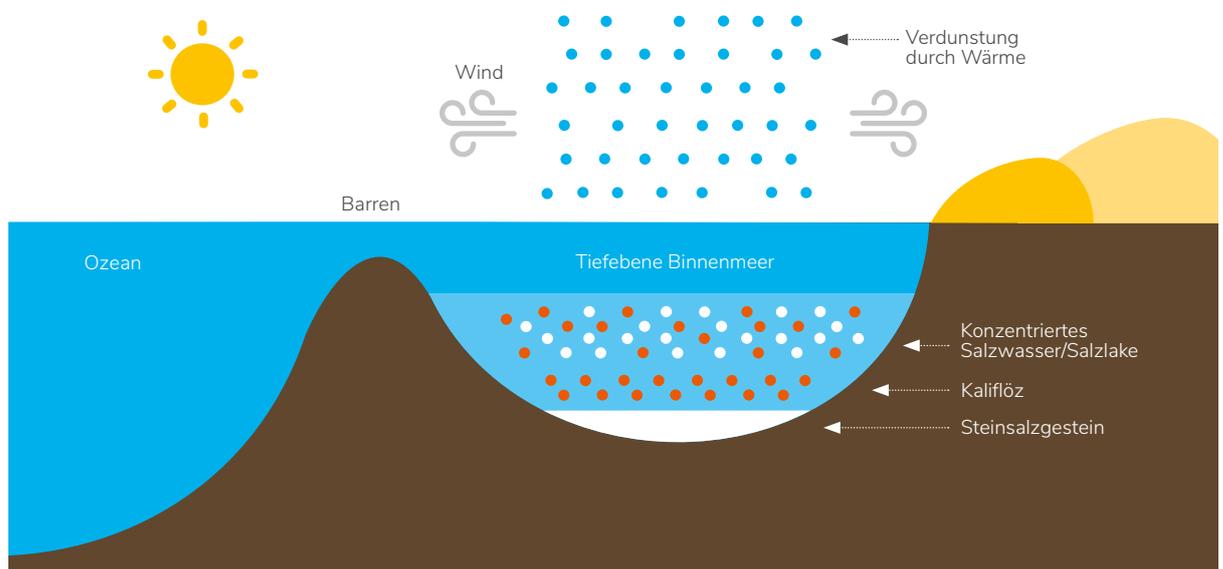


Kalium aus dem Boden

Kalium ist in primären Silikaten gebunden. Im Kristallgitter ist es direkter Baustein der Bodensilikate. Durch diese feste Bindung ist dieses Kalium nicht pflanzenverfügbar. Erst durch die Verwitterung kann es aus dem Verband gelöst werden und in eine verfügbare Fraktion übergehen. Dies ist ein kontinuierlich stattfindender, sehr langsamer Prozess. Durch Verwitterung freigesetztes, in der Bodenlösung vorhandenes Kalium liegt dann als K-Ion vor. Einen hohen K-Gehalt findet man in tonreichen Böden, in denen die K-Ionen

an die negativ geladenen Oberflächen der Tonminerale gebunden werden. Dort stehen sie den Pflanzen zur Verfügung. Sind sie jedoch fest in die Zwischenschichten bestimmter Tonminerale eingebaut, spricht man von Fixierung. In diesem Fall werden die K-Ionen der Pflanzenaufnahme entzogen. Für die Pflanzenernährung ist der Teil an Kalium wichtig, der für die Pflanze gut aus der Bodenlösung aufnehmbar ist. Über die Bodenanalyse kann der Versorgungszustand eines Bodens ermittelt und damit der Düngebedarf

Entstehung von Kalium- und Magnesiumablagerungen



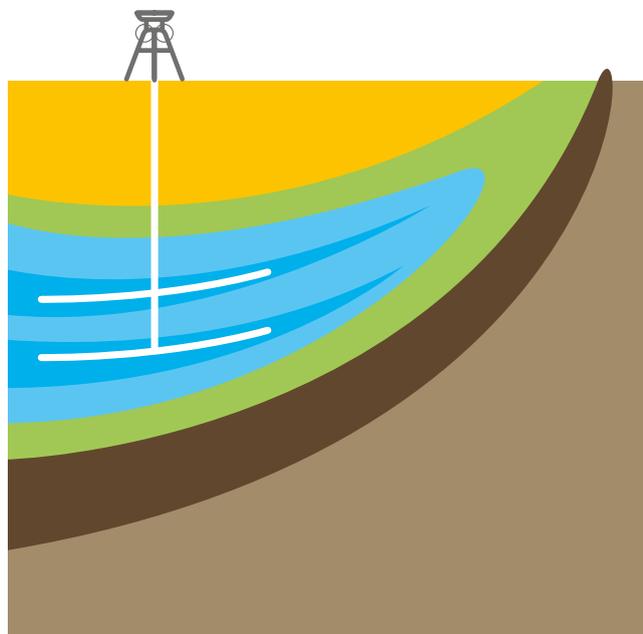
berechnet werden. Es werden fünf Gehaltsklassen von sehr niedrig (A) bis sehr hoch (E) unterschieden. Die Gehaltsklasse „C“ ist dabei die anzustrebende Versorgungsstufe der Böden mit Nährstoffen. Die Nährstoffgehalte der einzelnen Gehaltsklassen variieren je nach Bodenart (leichte Böden, mittelschwere Böden, schwere Böden).

Natürliche Minerale, der Rohstoff aus Urmeeren

Die K-Lagerstätten in Deutschland entstanden vor etwa 250 Millionen Jahren durch Verdunstung des Zechsteinmeeres. Nach der so genannten Barrentheorie floss salzhaltiges Meerwasser über seichte Meerengen in weite Tiefebene, wo es infolge starker Sonneneinstrahlung verdunstete. Die Salzkonzentration erhöhte sich, Kalium-, Magnesium- und Natriumsalze kristallisierten aus und setzten sich in der Reihenfolge ihrer Löslichkeit ab (Abb. linke Seite unten). Dieser Vorgang wiederholte sich über die Jahrtausende, sodass zwei oder mehrere Lager in mehreren hundert Metern Tiefe entstanden. Im Laufe der jüngeren Erdgeschichte wurden die Salzlager dann von mächtigen Ablagerungen, vor allem Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper, überdeckt.

Die flachen, flözartigen K-Lagerstätten mit einer Mächtigkeit von circa drei bis acht Metern befinden sich in etwa 500 bis 1.500 Metern Tiefe (Tiefe unter der Erdoberfläche). Darüber und darunter liegende, wasserundurchlässige Tonschichten schützen die Lagerstätten vor Grundwasser. Hoher Druck des Deckgebirges und tektonische Kräfte führten zu Verwerfungen und Auffaltungen einiger Lagerstätten. Man unterscheidet daher flache und steile Lagerung.

Lagerstätte mit flacher Lagerung



- vorw. Sandstein, Trias
- Anhydrit, Tonstein & Karbonat, Zechstein 1-7, Karbonat, Zechstein 1
- Kaliflöze, Zechstein 1
- Sandstein & Konglomerat, Rotliegend
- Steinsalz, Zechstein 1
- vorw. Tonschiefer, Grundgebirge, Ordovizium bis Unterkarbon

Unterkarbon
Die schematische Darstellung vermittelt am Beispiel der Werra-Fulda-Lagerstätte einen Eindruck von den Herausforderungen beim Abbau der Kalium- und Magnesiumsalze in Deutschland.

Natürliche Rohstoffe aus den Kaliumlagerstätten



Carnallit besteht aus Carnallit ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) und Halit ($NaCl$).

K_2O -Gehalt: 8–15 %
MgO-Gehalt: 7,5–15 %



Hartsalz besteht aus Sylvin (KCl), Halit ($NaCl$) und Kieserit ($MgSO_4 \cdot H_2O$).

K_2O -Gehalt: 10–15 %
MgO-Gehalt: 3–12 %



Sylvinit besteht aus Sylvin (KCl) und Halit ($NaCl$).

K_2O -Gehalt: 15–25 %

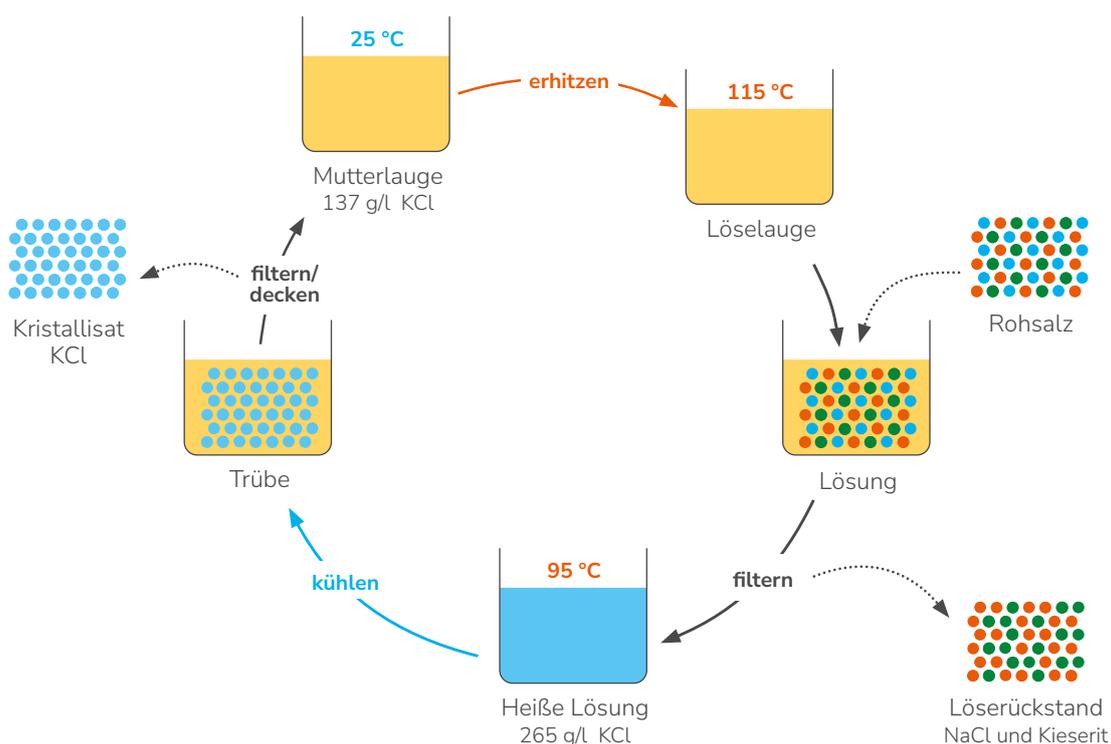
Kalium- düngemittel

Rohstoffaufbereitung

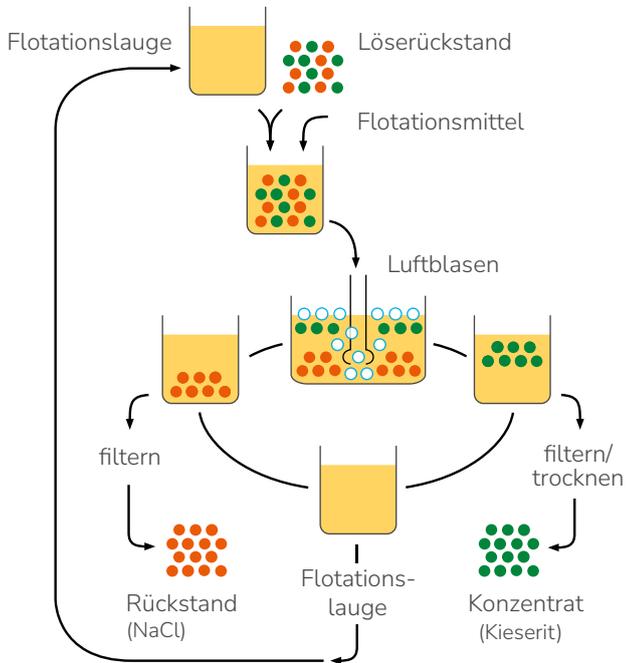
Die bergmännisch abgebauten Rohsalze aus den Kalium- und Magnesiumvorkommen werden über Tage weiter verarbeitet. Bei den verschiedenen Aufbereitungsverfahren (Abb. unten und rechts oben) fallen Kaliumchlorid (KCl) und Kieserit (Magnesiumsulfat-Monohydrat) an. Beide kommen als K- und Mg-

Dünger direkt zum Einsatz und sind Ausgangsstoffe zur Weiterverarbeitung, beispielsweise zu Korn-Kali, Patentkali und Kaliumsulfat (Abb. rechte Seite unten). Alle Nährstoffe in den K-Salzen sind wasserlöslich, können also leicht von der Pflanze aufgenommen werden. Sie verändern den pH-Wert des Bodens nicht.

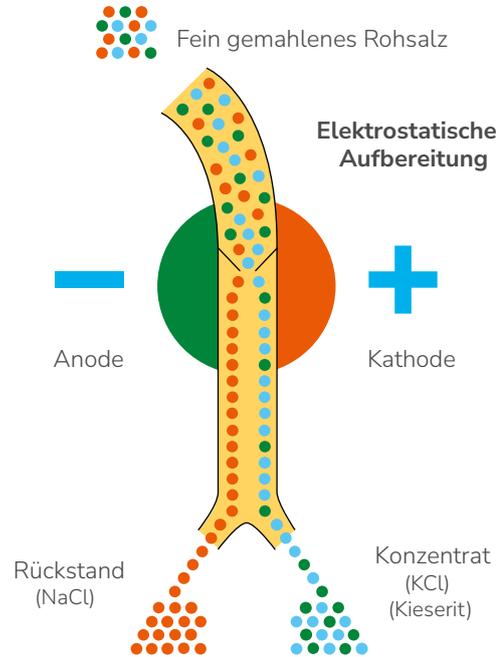
Schematische Darstellung der Aufbereitungsverfahren zur Herstellung von Kaliumdüngern



Flotation –
nass und kalt



Elektrostatisches Verfahren –
trocken und kalt



Mehrnährstoffdünger

Dünger, die mehr als einen der Hauptnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium enthalten, werden als Mehrnährstoffdünger bezeichnet. Man unterscheidet hierbei zwei Arten:

- Komplexdünger, oft auch als Volldünger bezeichnet, mit zumindest zwei der Hauptnährstoffe werden durch chemische Reaktionen der Rohstoffe in flüssiger Maische erzeugt. In jedem Düngerkorn sind dann alle verwendeten Nährstoffe im angegebenen Verhältnis enthalten.
- Mischdünger (Bulk Blends) werden durch mechanisches Mischen von zwei oder mehr granulierten Ausgangsdüngern hergestellt (siehe Seite 37). Die gemischten Teilchen sind hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften, zum Beispiel Größe, genau aufeinander abgestimmt, was ein Entmischen beim Transport oder Ausbringen verhindert.



Die Kulturen können nach dem Grad ihrer Chloridempfindlichkeit in verschiedene Gruppen eingeteilt werden:

Chloridliebend:

Zuckerrübe, Futterrübe, Sellerie, Mangold

Chloridverträglich:

Getreide, Mais, Raps, Spargel, Grobkohlarten, Rote Beete, Grünland, Klee gras

Bedingt Chloridverträglich:

Sonnenblume, Weinrebe, Kernobst, Schwarze Johannisbeere, Pflanz- und Speisekartoffel, Tomate, Radies, Kohlrabi, Feinkohlarten, Erbse, Spinat, Karotte, Lauch, Rettich, Chicoree

Chloridempfindlich:

Stärke- und Veredelungskartoffel, Tabak, Rote Johannisbeere, Stachelbeere, Himbeere, Erdbeere, Brombeere, Heidelbeere, Steinobst, Buschbohne, Dicke Bohne, Gurke, Melone, Paprika, Zwiebel, Salat, Frühgemüse, Koniferen, Blumen, Zierpflanzen und alle Unterglaskulturen.

Nährstoffform

In der Regel werden unter unseren Klima- und Bodenbedingungen K-Dünger in chloridischer Bindungsform eingesetzt. Diese Bindungsform ist sowohl in K-Einzeldüngern als auch in Mehrnährstoffdüngern vorherrschend. Chloridische K-Dünger können für die meisten landwirtschaftlichen Kulturen verwendet werden, Zucker- und Futterrüben sind sogar Chloridliebende Pflanzen.

Einige Kulturen, besonders Kartoffeln und Sonderkulturen sowie Pflanzenarten aus dem gärtnerischen Bereich (zum Beispiel Erdbeeren), sind jedoch Chloridempfindlich. Das heißt vor allem, dass Qualitätskriterien wie beispielsweise Stärkegehalt, Geschmack oder Farbausprägung durch Chlorid negativ beeinflusst werden. Für Chloridempfindliche Kulturen eignen sich sulfatische K-Dünger oder Kaliumsulfathaltige Mehrnährstoffdünger. Bei einer Düngung zur Saat beziehungsweise während der Keimung ist immer der Einsatz von sulfatischen K-Düngern zu empfehlen.

Der Schwefelgehalt dieser sulfatischen K-Dünger hat zudem wesentliche Bedeutung für die Schwefelversorgung der Pflanzen, da der Schwefeleintrag aus der Atmosphäre durch Luftreinhaltungsmaßnahmen sehr stark zurückgegangen ist.



Mischbarkeit/Blend

K-Düngemittel werden zu einem nennenswerten Anteil auch in Mischungen mit anderen Düngern, sogenannten „Blends“ (aus dem Englischen), ausgebracht. Der Unterschied zu sogenannten Komplexdüngern besteht darin, dass der Mischvorgang trocken und rein physikalisch erfolgt. Die Komponenten verändern also ihre Eigenschaften nicht. Hergestellt werden diese Blends überwiegend in dezentralen Düngermischanlagen, die in der Regel beim Landhandel angesiedelt sind. Daneben gibt es allerdings auch direkt oder im Auftrag von Düngemittelherstellern betriebene Anlagen. Diese befinden sich normalerweise an logistisch gut erreichbaren Standorten und stellen dann oft nur wenige bestimmte Mischungen her, aber in jeweils größerer Menge.

Der Vorteil von Düngermischungen liegt darin, dass flexibel die Zusammensetzung auf unterschiedliche Ansprüche von Kulturen und Schlägen, beziehungsweise Teilschlägen eingestellt werden kann. Das betrifft nicht nur die reine Nährstoffzusammensetzung, sondern auch die Art der eingesetzten Komponenten. So kann mit einer begrenzten Zahl an Ausgangsstoffen eine Vielzahl unterschiedlicher Mischungen hergestellt werden.

Um eine ordnungsgemäße Ausbringung zu gewährleisten, muss darauf geachtet werden, dass die Einzelkomponenten ähnliche physikalische Eigenschaften haben. Das betrifft vor allem die mittlere Korngröße und die Dichte. Ist das gewährleistet, treten bei Umschlag und Ausbringung keine nennenswerten Entmischungen auf. Dem steht auch nicht entgegen, dass K-Dünger überwiegend Pressgranulate (also nicht rund) sind. Das zeigen zumindest einschlägige Streuversuche. Die meisten Hersteller von Düngerstreuer geben auf Basis eingesandter Proben spezielle Empfehlungen für die Einstellungen der Streuer. Insbesondere wegen der potenziellen Wasseraufnahme aus der Luft (Hygroskopizität) eignen sich nicht alle Düngemittel als Mischungspartner. Für K-Dünger selbst gibt es in dieser Beziehung keine Einschränkungen.

In den letzten Jahren hat insbesondere der Einsatz von Mischdüngern bei der Unterfußdüngung zu Kartoffeln und anderen Kulturen stark zugenommen. Mengenmäßig bildet Kalium hier oft den Hauptbestandteil.

Zusammensetzung verschiedener Kaliumdünger

| Produkt | K ₂ O-Gehalt | K-Form, weitere Nährstoffe |
|--------------------|-------------------------|--|
| Korn-Kali | 40 % | Kaliumchlorid; 6 % MgO · 12,5 % SO ₃ · 4 % Na ₂ O Magnesium und Schwefel in Sulfatform und Natriumchlorid |
| Roll-Kali | 48 % | Kaliumchlorid; 4 % MgO · 10 % SO ₃ Magnesium und Schwefel in Sulfatform |
| 60er Kali gran. | 60 % | Kaliumchlorid |
| Magnesia-Kainit | 9 % | Kaliumchlorid; 4% MgO · 9 % SO ₃ · 35 % Na ₂ O Magnesium und Schwefel in Sulfatform und Natriumchlorid |
| KALISOP | 50 % | Kaliumsulfat; 45 % SO ₃ Schwefel in Sulfatform |
| soluSOP 52 organic | 52 % | Kaliumsulfat; 45 % SO ₃ Schwefel in Sulfatform |
| Patentkali | 30 % | Kaliumsulfat; 10 % MgO · 42,5 % SO ₃ |
| Polysulfat gran. | 14 % | Kaliumsulfat; 6 % MgO · 19 % SO ₃ Magnesium und Schwefel in Sulfatform |
| Potashplus | 37 % 7 % | Kaliumsulfat, 30 % Kaliumchlorid; 2,8 MgO · 9,2 % S |
| Polysulfat stand. | 13,5 % | Kaliumsulfat; 5,6 % MgO · 18,6 % SO ₃ Magnesium und Schwefel in Sulfatform |

Flüssigdüngung und Fertigation

Die verbreitetsten Systeme bei der Flüssiganwendung von Düngern sind die Blattdüngung und die Ausbringung gelöster Nährstoffe über die Tröpfchenbewässerung auf Boden, häufig auch in bodenlosen Anbauverfahren. Als Fertigation wird Düngung über die Bewässerungsanlage bezeichnet.

Der Begriff Fertigation setzt sich zusammen aus „Fertilisation“ (Düngung) und „Irrigation“ (Bewässerung). Dabei muss man zwischen Anbausystemen auf natürlichem Boden und Systemen basierend auf Substraten sowie im geschützten Anbau (Unterglasanbau, Folientunnel) oder im Freiland unterscheiden. Während im Freiland auf natürlichem Boden die Hauptnährstoffversorgung über den Boden vorgenommen wird und Nährstoffe nur in Bedarfsspitzen über das Bewässerungswasser ergänzt werden, erfolgt die Nährstoffversorgung im geschützten Anbau und auf Substraten ausschließlich über die Bewässerung. Je nach System, Kultur, Nährstoffbedarf werden daher individuell angepasste Nährstoffkonzentrationen benötigt, die sich am besten durch Mischung von Einzeldüngemitteln einstellen lassen.

Die Düngemittel werden in Stammlösungstanks zu konzentrierten Lösungen aufgelöst und dann dem Bewässerungswasser zudosiert. Für diese Anwendung müssen die eingesetzten Düngemittel vollständig wasserlöslich sein, das heißt die Düngemittel dürfen keine unlöslichen Bestandteile wie beispielsweise Tonminerale, Kalke oder Gips enthalten, damit Filter, Düsen und Tropfer der Bewässerungsanlage nicht verstopfen oder beschädigt werden. Neben kristallinen Produkten können auch flüssige Produkte (Lösungen wie beispielsweise Kalilauge) eingesetzt werden. Suspensionen (mit Ausnahme wasserlöslicher Suspensionen) sind dagegen für Fertigungsanwendungen ungeeignet.

Die meisten Fertigungsdüngemittel sind bei der Herstellung von Stammlösungen miteinander mischbar. Dennoch muss beim Ansetzen der Stammlösungen darauf geachtet werden, dass sulfat- und phosphathaltige Produkte nicht mit calciumhaltigen Produkten im gleichen Stammlösungstank aufgelöst beziehungsweise gemischt werden, um unlösliche Niederschläge zu vermeiden.

Kaliumdüngung aus organischen Nährstoffträgern

Zu den organischen Nährstoffträgern, die Kalium enthalten, gehören überwiegend Ernterückstände, Wirtschaftsdünger und Gärreste, deren Ausbringung in der Düngeplanung berücksichtigt werden muss. Zudem gelangen immer mehr Produkte aus industriellen Verarbeitungs- oder Recyclingprozessen (Sekundärrohstoffdünger wie beispielsweise Kartoffelfruchtwasser aus der Stärkeproduktion, Komposte aus Siedlungsabfällen) in den landwirtschaftlichen Nährstoffkreislauf. Nachteilig dabei ist die oft stark schwankende Nährstoffzusammensetzung der applizierten Produkte und bei Komposten die Verunreinigung mit Plastik. Oftmals spielen dort auch die Gehalte an Schwermetallen und organischen Schadstoffen, die in diesen Produkten vorkommen, eine Rolle. Der Gesetzgeber hat aber dafür enge Grenzen gesetzt.

Die Verteilung dieser Dünger und damit auch der Nährstoffe auf dem Feld ist häufig ungenauer als bei der Ausbringung von Mineraldüngern. Eine gezielte Pflanzenernährung wird dadurch erschwert.

Die Ausnutzung des Kaliums aus organischen Düngern durch die Folgefrucht schwankt in Abhängigkeit von Bodenart und Ausbringungstermin beträchtlich. Auf leichten Böden können insbesondere bei Ausbringung von Gülle, Stallmist oder Sekundärrohstoffdüngern beziehungsweise Ernterückständen erhebliche K-Auswaschungsverluste (je nach Niederschlagsmengen bis über 50 Prozent) entstehen, die damit weitgehend dem Nährstoffkreislauf entzogen sind.

Kaliumdüngung im ökologischen Landbau

Die ökologische Landwirtschaft strebt geschlossene Nährstoffkreisläufe an. Da auch diese Betriebe über den Verkauf landwirtschaftlicher Produkte, die zum Teil erhebliche K-Mengen enthalten (wie zum Beispiel Kartoffeln oder Möhren), Kalium aus dem Betrieb exportieren, sind bei dieser Wirtschaftsform die Nährstoffbilanzen häufig negativ. Darüber hinaus treten auch im ökologischen Landbau natürliche Verluste zum Beispiel durch Nährstoffverlagerung in tiefere Bodenschichten und Auswaschung auf. Werden diese nicht ergänzt, kommt es zum Absinken der Bodenfruchtbarkeit, die eine nachhaltige Produktion auf dem Standort gefährdet.

Ausgewogen Düngen mit mineralischem Kalium

Die Nährstoffdefizite müssen daher auch im ökologischen Landbau ausgeglichen werden. Dazu werden mineralische K-Düngemittel, die für den ökologischen Landbau zugelassen sind, eingesetzt.

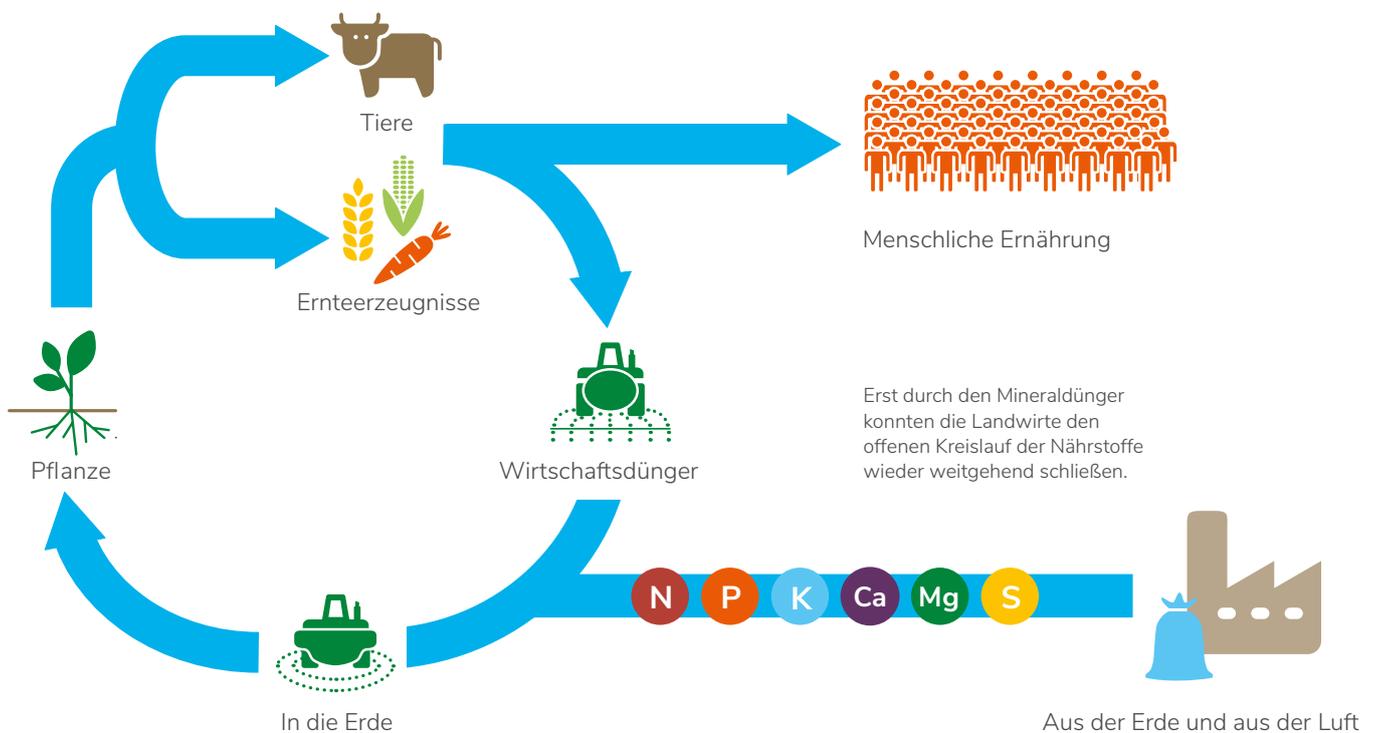
Nach den Verordnungen EU Nr. 2018/848 und EG Nr. 889/2008 über den ökologischen Landbau sind bei Bedarf folgende K-Mineraldünger auch für den Einsatz in den Betrieben zugelassen, die nach Maßgaben des ökologischen Landbaus wirtschaften:

- Kaliumrohsalze (Magnesia-Kainit)
- Kaliumsulfat
- Kaliumsulfat mit Magnesiumsalzen (Patentkali)
- Mischungen aus den oben genannten Komponenten

Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit ist eine Nutzung von organischen Düngemitteln in landwirtschaftlichen Betrieben sinnvoll und richtig. Der Einsatz von mineralischem Kalium bietet hervorragende Ergänzungsmöglichkeiten sowie eine Reihe von Vorteilen:

- präzise und einheitliche Nährstoffkonzentration
- genaue Verteilung der Nährstoffe auf dem Feld bei großer Arbeitsbreite
- geringe Ausbringungskosten
- hohe Nährstoffkonzentration und damit geringer Transport- und Lagerraum
- gezielte Ausrichtung der Nährstoffmenge auf den Nährstoffbedarf des Bodens und der Pflanzen. Über mineralische Düngung lässt sich die K-Versorgung genau anpassen.

Der Kreislauf der Nährstoffe





Rahmen- bedingungen für die Kalium- düngung

Düngeverordnung

Die Düngeverordnung (DüV) beschreibt die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Danach ist die Düngung grundsätzlich so auszurichten, dass die Nährstoffe weitestgehend von den Pflanzen ausgenutzt werden können, um Nährstoffverluste und eventuell damit verbundene Einträge in die Umwelt zu vermeiden. Geräte zur Ausbringung von organischen und mineralischen Düngern müssen den anerkannten Regeln der Technik entsprechen. In der Novellierung der DüV wurden die Vorgaben bei der Düngung von Stickstoff und Phosphor präzisiert, starker Fokus liegt hier auch auf der Handhabung von organischen Düngemitteln. Ziel ist es, die stofflichen Risiken durch die Anwendung dieser beiden Nährstoffe weiter zu reduzieren.

Eine Bodenuntersuchung auf Kalium schreibt die DüV nicht vor. Es empfiehlt sich jedoch, diese gleichzeitig mit der verpflichtenden Untersuchung auf Phosphor durchzuführen, um bei der Düngeplanung eine effiziente Nährstoffversorgung sicherzustellen. Die K-Düngung unterliegt im Gegensatz zu Stickstoff und Phosphor keinen vergleichbaren Einschränkungen bei Höhe, Zeitpunkt und Art (zum Beispiel Einarbeitung) der Anwendung, sodass auf eventuelle Defizite sofort flexibel reagiert werden kann.

Kaliumgrunddüngung unter Umweltgesichtspunkten

Die Kaliumrohsalz-Lagerstätten auf der Erde sind zwar groß, aber endlich. Deshalb sollte die Verwendung als Dünger möglichst effektiv und ressourcenschonend gehandhabt werden. Dies bedeutet, dass die Bemessung der Düngemenge so ausgerichtet ist, dass es zu keiner hohen Nährstoffanreicherung im Boden kommt. Das Ziel der Mengenbemessung sollte das Anstreben von Gehaltsklasse „C“ sein. Nährstoffverluste sind im Rahmen der gegebenen standort- und bewirtschaftungsbedingten Möglichkeiten zu minimieren, um eine hohe Ausnutzung der Dünger zu erhalten. Allerdings können solche Verluste nicht auf null reduziert werden. Selbst bei nicht bewirtschafteten, naturbelassenen Flächen treten Nährstoffverluste auf.

Bei sachgemäßer Anwendung und Ausbringung von K-Düngemitteln ergibt sich keine Beeinträchtigung des Ökosystems. Durch eine an Standort und Nutzung angepasste K-Düngung wird die Effizienz des Einsatzes der übrigen Pflanzennährstoffe erhöht. Die auftretenden Auswaschungsverluste hängen im Wesentlichen von Bodenart sowie Niederschlagshöhe und -verteilung ab, sie können auf mittleren und schweren Böden praktisch vernachlässigt werden. Zudem hat Kalium keine ökologische oder toxikologische Relevanz.



Der Energieaufwand für Mineraldüngemittel stellt in der Erzeugung von Nahrungsmitteln einen bedeutenden Anteil des gesamten Energieverbrauchs dar. Gemessen am Gesamtenergieverbrauch fossiler Energie ist laut Eurostat der Anteil der Landwirtschaft jedoch vergleichsweise gering und machte im Jahr 2021 in der EU 3 Prozent des Endenergieverbrauchs aus.

Auf der anderen Seite trägt die Pflanzenproduktion als einer der wenigen Bereiche dazu bei, dass über die Photosynthese (Umwandlung von Licht in chemische Energie) deutlich mehr Energie produziert als verbraucht wird.

Diese kann in Form von Nahrungsmitteln für eine wachsende Weltbevölkerung oder als technische, erneuerbare Energiequelle genutzt werden. Über die ertragssteigernde Wirkung der K-Düngung wird dabei die gewonnene Energiemenge je Flächeneinheit erhöht. Der dazu benötigte Energieaufwand für die K-Düngung steht dabei in keinem Verhältnis, was durch einen einfachen Input-Output-Vergleich deutlich wird. Langjährige Düngungsversuche zeigen, dass je Einheit eingesetzter Energie zwischen 31 und 71 Einheiten gewonnen werden.

Die großen positiven Werte ergeben sich auch dadurch, dass der Energieaufwand zur Herstellung von K-Mineraldüngern zudem in den vergangenen Jahrzehnten durch optimierte Prozessverfahren ständig gesunken ist. Während noch vor 40 Jahren etwa 8 MJ/kg K_2O aufgewendet werden mussten, ist mit dem heutigen Stand der Technik der Aufwand auf circa 3 MJ/kg K_2O gesenkt worden.

Die Ertragssteigerungen einer nachhaltigen Landwirtschaft leisten mit Blick auf die balancierte Düngung einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneffizienz weltweit, denn so wird weniger Fläche für die Produktion von Nahrungsmitteln benötigt.

Quellen

Damm, E.; Hoke, S. & Doetsch, P. (2012): Erfassung und Optimierungspotenzial der Kühlleistung von Boden dargestellt an ausgewählten Beispielflächen der Stadt Bottrop. Bodenschutz-Erhaltung, Nutzung und Wiederherstellung von Boden. Heft 03.12, 94-98.

Eurostat: Statistisches Amt der Europäischen Union, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agri-environmental_indicator_-_energy_use#Data_sources



IFA: International Fertilizer Association, www.fertilizer.org.

K+S KALI GmbH, Kassel:
Bilder, Tabellen, Grafik- und Textbeiträge

MacLeod, L.B. (1969): Effects of N, P and K and their interactions on the yield and kernel weight of barley in hydroponic culture, Agronomy Journal, Vol. 61, 26-29.

Weitere Informationen
finden Sie unter

www.iva.de

Herausgeber: Industrieverband Agrar e. V. (IVA) · Mainzer Landstraße 55 · 60329 Frankfurt am Main
Tel.: +49 69 2556-1281 · Fax: +49 69 2556-1298 · E-Mail: service.iva@vci.de · www.iva.de

Redaktion: Bundesarbeitskreis Düngung (BAD) · Mainzer Landstraße 55 · 60329 Frankfurt am Main

Layout: Seippel & Weihe Kommunikationsberatung GmbH, Offenbach am Main, www.markenaktivisten.com

Bildnachweis: iStock: S. 1 · AdobeStock: S. 2, 3, 4, 5, 20, 24, 27, 28, 40, 41 · Fotolia: S: 6, 8 · IVA: S. 14

Redaktionsschluss: März 2024 · Abdruck honorarfrei, Beleg erbeten