



Informationen zur Düngung

Für Fachschulen, Handel
und Genossenschaften

Inhalt

Verzeichnis der Abkürzungen	3	5. Düngersorten und -formen	61
1. Einleitung	6	5.1 Abgrenzungen	61
2. Begriffsbestimmung	7	5.2 Mineralische Düngemittel	62
3. Nährstoffe und Nährstoffbedarf	9	5.2.1 Mikronährstoffdüngung	63
3.1 Makronährstoffe	9	5.3 Organische Düngemittel	64
3.1.1 Stickstoff	9	5.4 Inhibitoren und Zusatzstoffe	67
3.1.2 Phosphor	19	5.4.1 Urease-Inhibitoren	67
3.1.3 Kali	27	5.4.2 Nitrifikationsinhibitoren	69
3.1.4 Schwefel	31	5.5 Coatings	71
3.1.5 Kalkdüngung und Calcium	34	5.6 Sonstiges	72
3.1.6 Magnesium	38	5.6.1 Ansäuerung	72
3.2 Mikronährstoffe	41	5.6.2 Kalkstickstoff	72
3.2.1 Mangan	43	6. Ausbringtechnik und Applikationsformen mineralische Dünger	73
3.2.2 Zink	45	6.1 Breitverteilung	73
3.2.3 Bor	46	6.1.1 Blattdüngung	74
3.2.4 Kupfer	47	6.2 Platzierte Düngung	75
3.2.5 Eisen	48	7. Lagerung und Mischbarkeit	76
3.2.6 Molybdän	49	8. Rechtliches	79
3.2.7 Chlor	50	8.1 Gute Fachliche Praxis	79
3.2.8 Nickel	50	8.2 Düngeverordnung in Bund und Ländern	79
3.3 Weitere nützliche Elemente	51	8.3 Deklaration und Zulassung von Düngemitteln	82
3.3.1 Silizium / Kieselsäure	51	9. Weiterführende Literatur	85
3.3.2 Selen	53	10. Anhang	85
3.3.3 Natrium	54		
4. Nährstoffermittlung und Untersuchungsmethoden	55		
4.1 Bodenuntersuchung	55		
4.2 Pflanzenuntersuchung	58		
4.3 Sensortechnik und Digitale Werkzeuge	59		

Verzeichnis der Abkürzungen

Nährstoffangaben

Amid-N	Carbamid-Stickstoff (Harnstoff-Stickstoff)
CaO	Kalk
HNO ₃	Salpetersäure
K ₂ O	Kali
MgO	Magnesium
N	Stickstoff
Na	Natrium
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff
P ₂ O ₅	Phosphat
S	Schwefel

Düngemittelsorten

AHL	Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung
ASS	Ammonsulfatsalpeter
ED	Einzeldüngemittel
HS	Harnstoff
KAS	Kalkammonsalpeter
KSti	Kalkstickstoff
NK-Düngemittel	Mehrnährstoffdüngemittel (Stickstoff, Kali)
NP-Düngemittel	Mehrnährstoffdüngemittel (Stickstoff, Phosphat)
NPK-Düngemittel	Mehrnährstoffdüngemittel (Stickstoff, Phosphat, Kali)
P-Düngemittel	Phosphathaltige Einzeldüngemittel
PK-Düngemittel	Mehrnährstoffdüngemittel (Phosphat, Kali)
SA	Schwefelsaures Ammoniak (Ammoniumsulfat)

Sonstige Bezeichnungen

ABL / NBL	Alte Bundesländer / Neue Bundesländer
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
dt	Dezitonne (100 kg)
EFTA	Europäische Freihandelsassoziation
EU	Europäische Union
Eurostat	Statistisches Amt der Europäischen Union
FAO	Organisation für Landwirtschaft und Ernährung der Vereinten Nationen
GUS	Gemeinschaft Unabhängiger Staaten
IFA	Düngemittel-Weltverband
IVA	Industrieverband Agrar e.V.
k. A.	keine Angaben
kg	Kilogramm
LF	Landwirtschaftliche Nutzfläche
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
t	Tonnen
UN	Vereinte Nationen

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Richtwerte für den Gesamtbedarf an Stickstoff bei verschiedenen Ackerbaukulturen (angelehnt an DüV)	12	Tabelle 16: Richtwerte für Borgehalte (mg/kg Boden) in Mineralböden auf Ackerland (CAT-Methode)	47
Tabelle 2: Entwicklungsstadien der Wintergetreide mit der durch die Düngung beeinflussten Pflanzenordnung (Yara)	13	Tabelle 17: Empfohlene Bordüngung in Abhängigkeit vom Borgehalt des Bodens (Bodendüngung)	47
Tabelle 3: N-Bedarfswerte auf Grünland und Feldfutterbau bei unterschiedlicher Nutzungsintensität (Quelle: BMEL DüV 2017)	16	Tabelle 18: Richtwerte für Kupfergehalte (mg/kg Boden) in Ackerböden (CAT-Methode) und Düngeempfehlung in kg Cu/ha (Bodendüngung)	48
Tabelle 4: Gehaltsklassen und zugehörige Versorgungsstufen für Phosphat auf Acker und Grünland (CAL-Methode)	23	Tabelle 19: Versorgungsbereiche der Bodennährstoffe und allgemeine Düngeempfehlungen	56
Tabelle 5: Einflussfaktoren auf die Phosphatverfügbarkeit im Boden und die Phosphataufnahme in die Pflanze	24	Tabelle 20: Wichtige Bodenuntersuchungsmethoden	57
Tabelle 6: Kalibedarf von Marktfrüchten und im Futterbau	29	Tabelle 21: EUF-Richtwerte (Bodengesundheitsdienst)	58
Tabelle 7: Kalibedarf von Gemüsekulturen	30	Tabelle 22: Untersuchungszeitraum und Vorgehensweise bei der Pflanzenanalyse auf Mikronährstoffe	59
Tabelle 8: Schwefeldüngebedarf von Marktfrüchten und im Futterbau (nach VDLUFA)	32	Tabelle 23: N-Ausnutzung verschiedener Düngemittel in Prozent ¹ (Quelle: verändert nach Gutser, Lehrstuhl für Pflanzenernährung der TU München-Weihenstephan)	65
Tabelle 9: Höhe der Gesundheits- und Erhaltungskalkung in Abhängigkeit von pH-Wert und freiem Kalk auf Acker (Humusgehalt ≤ 4 %) (Quelle: Gelbes Heft, LfL, 2022)	35	Tabelle 24: Anrechnung organischer Düngemittel (LfL Freising, Agrarökologie)	66
Tabelle 10: Anzustrebender pH-Bereich auf Grünlandböden mit max.15 % Humus Düngebedarf für die Erhaltungskalkung und einmalige Höchstgabe der Gesundheitskalkung (Quelle: Gelbes Heft, LfL, 2022)	36	Tabelle 25: Mischbarkeit fester mineralischer Düngemittel (Bundesverband der Düngermischer, 2015)	78
Tabelle 11: Gehaltsklassen für Magnesium in Acker- und Grünland und daraus abgeleitete Düngerbemessung in Bayern (CAL-Methode)	39	Tabelle 26: Nährstoffgehalte organischer Dünger zum Zeitpunkt der Ausbringung, nach Berücksichtigung der anrechenbaren Stall- und Lagerungsverluste (nach LfL, Gelbes Heft, 2025)	86
Tabelle 12: Entzug von Spurennährstoffen in g/ha	42	Tabelle 27: Wirkungsweise verschiedener Phosphatdünger	88
Tabelle 13: Wichtige Mikronährstoffe und ihre Mangelursachen	43	Tabelle 28: Düngemittelliste der BAD-Mitgliedsunternehmen (verändert nach Düngemittelliste des LAD Bayern, Stand Dezember 2025)	89
Tabelle 14: Richtwerte für Mangangehalte (mg/kg Boden) in Ackerböden (CAT-Methode)	44	Abbildung 29: Liste der Stickstoffinhibitoren („Stabilisatoren“) und inhibierter Düngemittel der BAD-Mitgliedsunternehmen (Stand Dezember 2025)	100
Tabelle 15: Richtwerte für Zinkgehalte (mg/kg Boden) in Ackerböden (CAT-Methode) und Düngeempfehlung in kg Zn/ha	45		

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stickstoffkreislauf (eigene Darstellung)	10	Abbildung 15: Bormangelsymptome bei Kartoffeln (links) und Zuckerrüben (rechts) (K+S)	46
Abbildung 2: Entwicklung der N-Aufnahme bei Wintergetreide (angepasst nach Yara)	13	Abbildung 16: Kupfermangelsymptome bei Gerste (links) und Weizen (rechts) (Yara)	48
Abbildung 3: Phosphat im Boden (verändert nach Mengel und Kirkby, Principles of plant nutrition)	20	Abbildung 17: Eisenmangelsymptome bei Winterweizen (links) und Wein (rechts) (K+S)	49
Abbildung 4: P-Mangelsymptome bei Mais (links, ICL) und Raps (rechts, K+S)	23	Abbildung 18: Molybdänmangelsymptome bei Raps (links, K+S) und Roggen (rechts, Yara)	50
Abbildung 5: Phosphatverfügbarkeit in Abhängigkeit von der eingesetzten P-Düngerform	25	Abbildung 19: Pflanzenverfügbarkeit von Silizium bei verschiedenen Düngemitteln	53
Abbildung 6: Kaliumdynamik im Boden (nach K+S)	28	Abbildung 20: Konzept der dynamischen Düngebedarfsermittlung	61
Abbildung 7: Kaliummangelsymptome bei Mais (links) und Raps (rechts) (K+S)	30	Abbildung 21: Steigerung der Bodenfruchtbarkeit durch eine bedarfsgerechte Pflanzenernährung in einem landwirtschaftlichen System	62
Abbildung 8: Verlauf der Stickstoff- und Schwefelaufnahme während der Vegetationsperiode bei Winterraps (nach Yara)	32	Abbildung 22: Wirkungsweise von Ureaseinhibitoren	68
Abbildung 9: Schwefelmangelsymptome bei Raps (links) und Wintergerste (rechts) (K+S)	33	Abbildung 23: Umwandlung von Harnstoff im Boden	68
Abbildung 10: Wirkungsgeschwindigkeit verschiedener Kalkdünger	36	Abbildung 24: Nitrifikation in Böden und Wirkungsweise von Nitrifikationsinhibitoren	70
Abbildung 11: Nährstoffverfügbarkeit in Abhängigkeit des pH-Werts (Beitsma et al., 2011)	37	Abbildung 25: Ausbringung von granuliertem Mineraldünger mit einem Pneumatikstreuer	73
Abbildung 12: Magnesiummangelsymptome bei Mais (links, K+S) und Auswirkungen unterschiedlicher Magnesiumernährung auf Winterweizen (rechts, Cakmak)	38	Abbildung 26: Maisaussaat mit pneumatischer Unterfußdüngung von granuliertem Mineraldünger in die Saatreihe	75
Abbildung 13: Manganmangelsymptome bei Wintergerste (links) und Raps (rechts) (K+S)	45	Abbildung 27: Klumpenbildung und Qualitätsmängel von Mineraldüngern aufgrund ungünstiger Lagerung	77
Abbildung 14: Zinkmangelsymptome bei Mais (links) und Sojabohnen (rechts) (K+S)	45		

1. Einleitung

Zentraler Bestandteil eines nachhaltigen Pflanzenbaus ist eine bedarfsgerechte Düngung, die den Ansprüchen der Kulturpflanzen über die gesamte Vegetationsperiode gerecht wird. Nur so können sie ihr gesamtes Ertragspotenzial ausschöpfen und die hohen Qualitätsanforderungen erfüllen. Dies gilt sowohl für die jährliche Betrachtung der begrenzten Vegetationszeit der Kultur als auch über einen längeren Zeitraum entlang einer gesamten Fruchtfolge. Neben wachsenden klimatischen Unsicherheiten, die das Produktionsrisiko für den Landwirt massiv erhöhen, sehen sich die Landwirte schwankenden Rohstoffpreisen für Betriebsmittel und Erzeugnisse und steigenden regulatorischen Anforderungen gegenüberstehen. Um dem agronomischen Anspruch einer bedarfsgerechten Pflanzenernährung gerecht zu werden, ist es wichtig neben der Kenntnis an die Anforderungen und Besonderheiten des Bodens und der Kulturpflanzen an eine optimale Nährstoffversorgung auch auf eine hohe Betriebsmittelqualität zu achten. Nur so können gleichzeitig hohe Erträge und Qualitäten erzielt und gleichzeitig unnötige Verluste in die Umwelt vermieden werden. Daneben ist der Einsatz moderner Technik ein wichtiges Vehikel für einen möglichst effizienten Düngemiteleinsatz.

Veränderte Anbau- und Bodenbearbeitungssysteme haben einen hohen Anspruch an die Kenntnisse der Nährstoffdynamik im Boden. Dies gilt insbesondere bei Direktsaat und der Etablierung von Zwischenfrüchten und Leguminosen in die Fruchtfolge. Dadurch wird die Schwierigkeit einer optimalen Düngung unter Anpassung an die Nährstoffverfügbarkeit deutlich. Umso wichtiger ist es, den Landwirten und beratenden Institutionen einen Leitfaden bereitzustellen, anhand dessen eine optimale und an das jeweilige System angepasste Düngeberatung möglich ist, die gleichzeitig die Vielschichtigkeit der modernen Pflanzenernährung und Düngung verdeutlicht.

Mit dieser Broschüre soll dem Leser ein ganzheitliches Bild über die Anforderungen und die praktische Gestaltung der modernen Pflanzenernährung gegeben werden, bei der auch die rechtlichen Rahmenbedingungen beleuchtet werden.

2. Begriffsbestimmung

Man unterscheidet folgende Begriffe:

Bodenfruchtbarkeit stellt das natürlich vorliegende spezifische Ertragspotenzial eines Bodens dar, das durch ackerbauliche Maßnahmen und Düngung erhalten und gesteigert werden kann. Davon abzugrenzen sind nicht veränderliche Eigenschaften, wie bspw. Bodenart und nutzbare Feldkapazität.

Düngebedarf ist die Nährstoffmenge, die in Ergänzung zu den verfügbaren Nährstoffen aus dem Bodenvorrat und sonstiger verfügbarerer Nährstoffmengen wie z.B. aus Ernterückständen noch gedüngt werden muss. Der Düngebedarf ist unter anderem von Standortfaktoren, Witterung, Bewirtschaftungsintensität und genetischer Veranlagung der Sorten abhängig. Unvermeidbare Verluste (siehe Kap. 5.3.) durch Ausgasung, Auswaschung und Festlegung müssen bei der Ermittlung des Düngebedarfs berücksichtigt werden.

Düngung ist die Zufuhr von Nährstoffen über Düngemittel, Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate oder Pflanzenhilfsmittel zur Ernährung und damit zur Erzeugung von Nutzpflanzen mit hohen Erträgen und Qualitäten der Erntegüter sowie zur Erhaltung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit. Generell gilt bei der Düngung das „4-R“-Prinzip zu berücksichtigen:

1. Richtiger Nährstoff,
2. Richtige Menge
3. Richtige Zeit
4. Richtiger Ort.

(Gesamt-)Entzug entspricht einem Teil des Nährstoffbedarfs und ist die gesamte Menge an Nährstoffen, die im Ernteprodukt und in Ernterückständen gefunden wird. Ein Teil der Nährstoffe verbleibt damit mit den Ernterückständen auf dem Feld.

Erhaltungsdüngung umfasst die Nährstoffmenge, die eine weitgehend optimale Pflanzenernährung sicherstellen soll, ökonomisch sinnvoll ist (bedingt durch aktuelle Düngerpreise), und langfristig die Bodenfruchtbarkeit, d. h. die Ertragsfähigkeit des Standorts erhält. Dies bezieht sich insbesondere auf die Grundnährstoffe P und K, bezieht jedoch auch den in organischer Substanz vorliegenden Stickstoff mit ein.

Erhaltungskalkung ist die Kalkmenge, die regelmäßig ausgebracht werden muss, um Kalkverluste auszugleichen und damit den optimalen Kalkzustand des Bodens zu erhalten. Dies gewährleistet zudem die Verfügbarkeit anderer Nährstoffe.

Fruchtfolgedüngung umfasst die Nährstoffmenge, die – vorausgesetzt bei guter Nährstoffversorgung des Bodens – mindestens den Nettoentzug einer gesamten Fruchtfolge so abdeckt, dass die Bodenfruchtbarkeit nicht leidet. Diese Düngung, die ja insbesondere die Grundnährstoffe Phosphat und Kali betrifft, kann beim Einsatz von NPK- und PK-Düngemitteln innerhalb der Fruchtfolge zu jeder Kultur erfolgen, während sie bei Einzeldüngern bevorzugt zur Blattfrucht mit dem jeweils höchsten Einzel Nährstoffbedarf durchgeführt wird.

Gesundungskalkung ist die Kalkmenge, die zusätzlich zur Erhaltungskalkung ausgebracht werden muss, um einen Boden mit zu niedrigem pH-Wert bis in einen optimalen bzw. anzustrebenden pH-Bereich aufzukalken. Mineraldüngerbedarf umfasst die Nährstoffmenge, die als Ergänzungsdüngung zum Nährstoffangebot aus allen anderen Nährstoffquellen und in aller Regel als die Differenz von Düngbedarf und anrechenbarem Wirtschaftsdüngeranteil zu verstehen ist. Der Bedarf ist nicht mit der gesetzlich zulässigen Menge gleichzusetzen, da dieser insbesondere in Roten Gebieten auch für Mineraldünger gedeckelt ist.

Nährstoffaufnahme beschreibt den Vorgang der Nährstoffaneignung durch die Pflanzen und beinhaltet den zeitlichen Verlauf des Nährstoffbedarfs während der einzelnen Vegetationsabschnitte bzw. von der Saat bis zur Ernte. Neben den ackerbaulichen und bodenspezifischen Voraussetzungen für eine gute Wurzelentwicklung spielen insbesondere Wasserverfügbarkeit und Temperatur eine wesentliche Rolle bei der Nährstoffaufnahme und -verfügbarkeit.

Nährstoffbedarf und deren Zusammensetzung ist die Menge an Nährstoffen und Nährstoffform, welche von den Pflanzen für eine optimale Ertragsbildung und hohe Qualität unter den gegebenen Umweltbedingungen benötigt wird. Diese liegt höher als der Gesamtentzug bei der Ernte, da abfallende Blätter und Pflanzenteile beim Gesamtentzug nicht berücksichtigt werden.

Nährstoff-Effizienz/Nährstoffnutzungseffizienz ist das Verhältnis von Nährstoff-Input zum Nährstoff-Output. Meistens wird hier die N-Nutzungseffizienz herangezogen. Sie beschreibt die Effektivität der Düngung allgemein oder die eines bestimmten Düngesystems bzw. einer bestimmten Düngestrategie unter dem Blickwinkel von Ausnutzungsraten der eingesetzten Nährstoffeinheiten bzw. Nährstoffmengen im Verhältnis zum individuell definierten Produktionsziel (Ertrag und Qualität). Eine hohe Nährstoffeffizienz schont die Ressourcen, die Umwelt durch ausgeglichene Nährstoffbilanzen und bedeutet für den Landwirt einen ökonomisch sinnvollen Einsatz der Betriebsmittel.

Netto-Entzug (= Nährstoffabfuhr) ist die Nährstoffmenge, die über die Ernteprodukte vom Feld abgefahren wird. Ernterückstände, die auf dem Feld verbleiben, sind darin nicht enthalten.

Nährstoffzufuhr ist die Summe der einem Feld/Fläche über Düngung und dem Nährstoffeintrag außerhalb einer Düngung zugeführten Nährstoffmengen.

Eine **wesentliche Nährstoffmenge** ist im Sinne der DüV eine zugeführte Nährstoffmenge je Hektar und Jahr von mehr als 50 kg Stickstoff (Gesamt-N) oder mehr als 30 kg Phosphat.

3. Nährstoffe und Nährstoffbedarf

3.1 Makronährstoffe

3.1.1 Stickstoff

Stickstoff ist der Motor des Pflanzenwachstums, da er wesentlicher Bestandteil von Aminosäuren ist. Es ist ein wichtiger Baustein des Chlorophylls, mit dessen Hilfe Pflanzen unter Ausnutzung der Energie des Sonnenlichts Photosynthese durchführen. Es ist außerdem lebensnotwendiger Bestandteil der Energie übertragenden Verbindungen ATP und ADP. Damit beeinflusst Stickstoff von allen Pflanzennährstoffen die Ertrags- und Qualitätsbildung am stärksten. Deutlich mehr als bei allen anderen Nährstoffen kommt es beim Stickstoff auf eine exakte Dosierung zum richtigen Zeitpunkt an, denn eine Über- oder Unterdüngung führt schnell zu Ertrags- und Qualitätseinbußen. Zudem ergeben sich daraus negative Einflüsse auf die Umwelt durch bspw. Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser und Ober-

flächengewässer sowie durch gasförmige Verluste in Form von Ammoniak und Lachgas.

Unter den für die Pflanzenernährung wichtigen Nährstoffen nimmt Stickstoff eine Sonderstellung ein, weil er im Boden zahlreichen und variablen Ab-, Um- und Aufbauprozessen unterliegt, die von vielen Faktoren (z.B. Standort, Klima, Bewirtschaftung) beeinflusst werden. Hinzu kommt, dass nicht genutzter Stickstoff leicht in tiefere Bodenschichten verlagert werden kann und der Pflanze dann nicht mehr zur Verfügung steht.

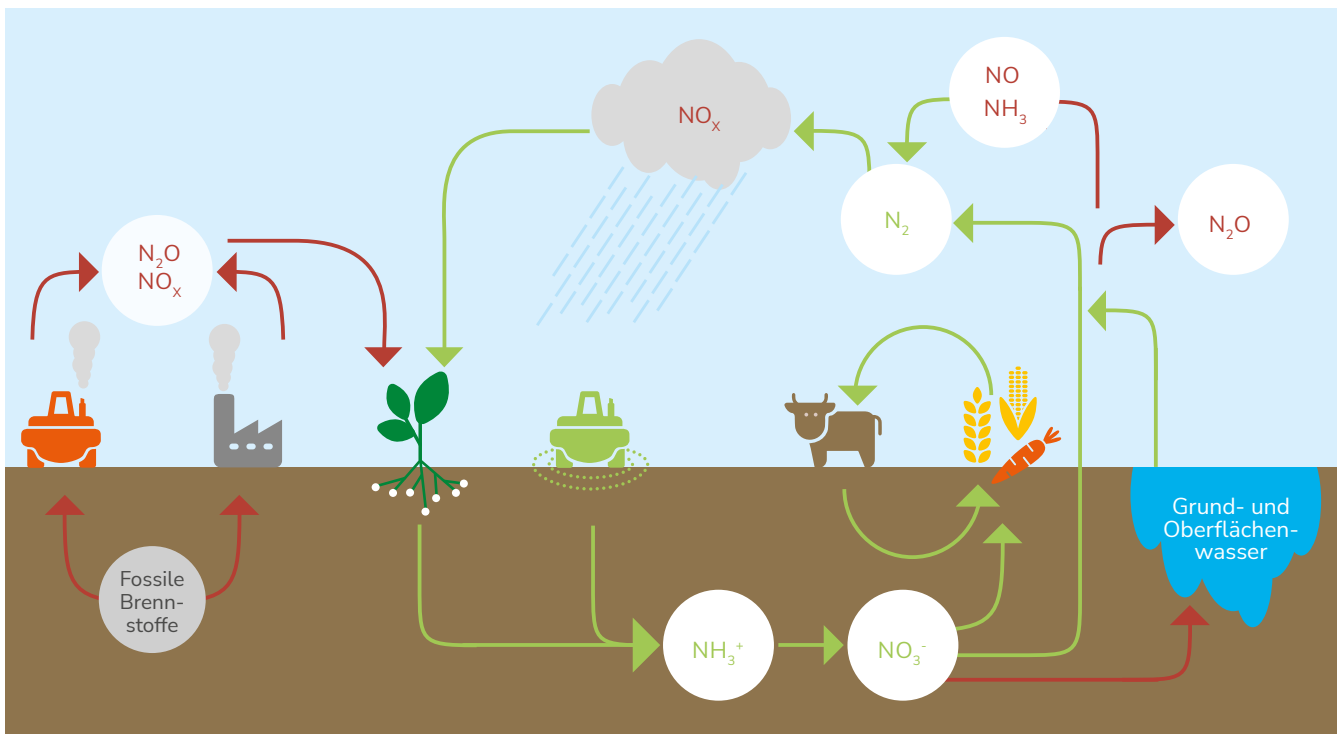


Abbildung 1:
Stickstoffkreislauf (eigene Darstellung)

Die Pflanzenwurzel nimmt Stickstoff in mineralischer Form vor allem als Ammonium (NH_4^+) oder Nitrat (NO_3^-) auf. Die Aufnahme in Form von Harnstoff erfolgt dagegen in deutlich geringerem Umfang, auch weil Harnstoff im Boden in kurzer Zeit zu Ammonium und Nitrat verstoffwechselt wird. Alle anderen Stickstoffverbindungen müssen daher zunächst in diese Formen überführt werden. Hier zeigt sich auch der wesentliche Unterschied in der Nährstoffverfügbarkeit von organischen und mineralischen Düngemitteln. Nährstoffe aus organischen Düngern (z. B. aus Gülle, Stallmist) sind nach der Ausbringung größtenteils nicht sofort für die Pflanzen verfügbar und müssen zuerst von den im Boden vorhandenen Mikroorganismen in eine mine-

ralische Form umgewandelt werden. Dieser Prozess wird Mineralisation genannt, deren Geschwindigkeit durch drei wesentliche Faktoren beeinflusst wird: Temperatur, Bodenfeuchte, Sauerstoffgehalt im Boden. So können z.B. nur geringe Temperaturunterschiede die Umwandlung von Ammonium zu Nitrat um Wochen verzögern. Bei diesen Prozessen kann es zu hohen Verlusten in Form von Ammoniak und Lachgas aber auch Nitrat kommen. Direkt nach der Applikation organischer Düngemittel stehen den Pflanzen so nur ca. 20-30 Prozent der enthaltenen Nährstoffe zur Verfügung. Zudem unterliegen die Nährstoffkonzentrationen in organischen Düngern großen Schwankungsbreiten. Dadurch entspricht die Düngung nicht immer dem aktuellen Nährstoffbedarf der Kulturpflanzen. Mit organischen Düngern können dem Boden nur die Nährstoffe zurückgeführt werden, die ihm an anderer Stelle entzogen wurden. Demgegenüber stehen hochreine mineralische Düngemittel, deren Nährstoffe nach der Applikation sofort pflanzenverfügbar sind. Der Zeitpunkt und die Menge der zugeführten Nährstoffe können ganz gezielt dem Bedarf der Pflanzen angepasst werden.

Bedarfsermittlung von Stickstoff im Ackerbau

Ziel der N-Düngung ist es, durch Zufuhr von N-haltigen Düngern / Düngemitteln die Differenz zwischen N-Bedarf der Pflanzen und dem für Pflanzen verfügbaren N-Angebot aus dem Boden auszugleichen.

Ein Pflanzenbestand deckt seinen N-Bedarf im Wesentlichen aus

- dem zu Vegetationsbeginn in der Wurzelzone vorhandenen mineralischen Stickstoff (NO_3^- und $\text{NH}_4\text{-N}$, auch N_{min} genannt),
- dem während der Vegetationsperiode durch Abbau organischer Stoffe (Humus) freiwerdenden Stickstoff (N-Nachlieferung),
- dem pflanzenverfügbaren N-Anteil aus Wirtschaftsdüngern bzw. Sekundärrohstoffdüngern und
- dem durch mineralische Düngemittel zugeführten Stickstoff

Außerdem kann der Stickstoff aus der Luft durch den Anbau von Futter- und Körnerleguminosen wie Klee und Luzerne sowie Ackerbohnen, Sojabohnen und Erbsen gebunden werden. Die sog. Knöllchenbakterien (Rhizobien) können dabei in Abhängigkeit von Bewuchsstärke und Bodenart beträchtliche N-Mengen fixieren.

Bemessung der Gesamt-Stickstoffgabe

Die Höhe der mineralischen N-Düngung ist die Differenz zwischen dem N-Entzug durch die Ernte und der Rückführung von Stickstoff in Ernterückständen und organischen Düngern sowie deren Ausnutzungsgrade (>>> Kapitel 5.3).

Nach der aktuellen Düngeverordnung ergeben sich angepasste N-Bedarfswerte/ Sollwerte für Ackerkulturen. Der Bedarf wird je nach Kultur und Ertragsniveau nach oben hin gedeckelt. Ausschlaggebend für den eigenen Ertrag ist die gemittelte Ertragshöhe der letzten drei Jahre:

Tabelle 1:

Richtwerte für den Gesamtbedarf an Stickstoff bei verschiedenen Ackerbaukulturen (angelehnt an DüV)

Kultur	Ertragsniveau in dt/ha	N-Bedarfswert in kg/ha	Zu-/Abschlag
Winterraps	40	200	(5 dt) 10/15
Winterweizen A, B	80	230	(10 dt) 10/15
Winterweizen C	80	210	(10 dt) 10/15
Winterweizen E	80	260	(10 dt) 10/15
Wintergerste	70	180	(10 dt) 10/15
Sommergerste	50	140	(10 dt) 10/15
Körnermais	90	200	(10 dt) 10/15
Silomais	450	200	(50 dt) 10/15
Zuckerrübe	650	170	(100 dt) 10/15
Kartoffel	400	180	(50 dt) 10/10

Um eine möglichst exakte Aussage über den pflanzenverfügbaren Stickstoff im Boden zu erhalten sind eigene N_{\min} -Analysen unerlässlich und den von Kammern und Ämtern erhobenen Listen immer zu bevorzugen.

Ein Beispiel der Stickstoffbedarfsermittlung ist im Folgenden für Getreidepflanzen aufgeführt. Hier wird zur Steuerung des Wachstums die Stickstoffdüngung in 2-4 Gaben (je nach Produktionsrichtung und Düngestrategie; N1, N2, N3, N4) aufgeteilt.

Tabelle 2:

Entwicklungsstadien der Wintergetreide mit der durch die Düngung beeinflussten Pflanzenordnung (Yara)

BBCH-Stadium	Beschreibung	Evtl. Düngerelevanz
00-09	Keimling	
10	Auflaufen (Keimblattstadium)	
11-13	1-3 Blattstadium	
21-25	Beginn der Bestockung Hauptbestockung	Frühe 1. N-Gabe (1a) zur Bestockungsförderung
29	Ende der Bestockung	Späte 1. N-Gabe zur Triebstärkung
30	Schossbeginn	Frühe 2. N-Gabe zur Triebstärkung
31-32	1-Knoten- / 2-Knoten-Stadium	2. N-Gabe zur Trieberhaltung
37	Fahnenblattspitzen	Frühe 3. Gabe zur TKG-Bildung und Proteinbildung
39	Fahnenblatt voll entwickelt	3. Gabe zur TKG-Bildung und Proteinbildung
49-59 / 61	Öffnung Blattscheide Ende Ährenschiebung / Blühbeginn	Qualitätsgabe (4. Gabe) zur Proteinbildung

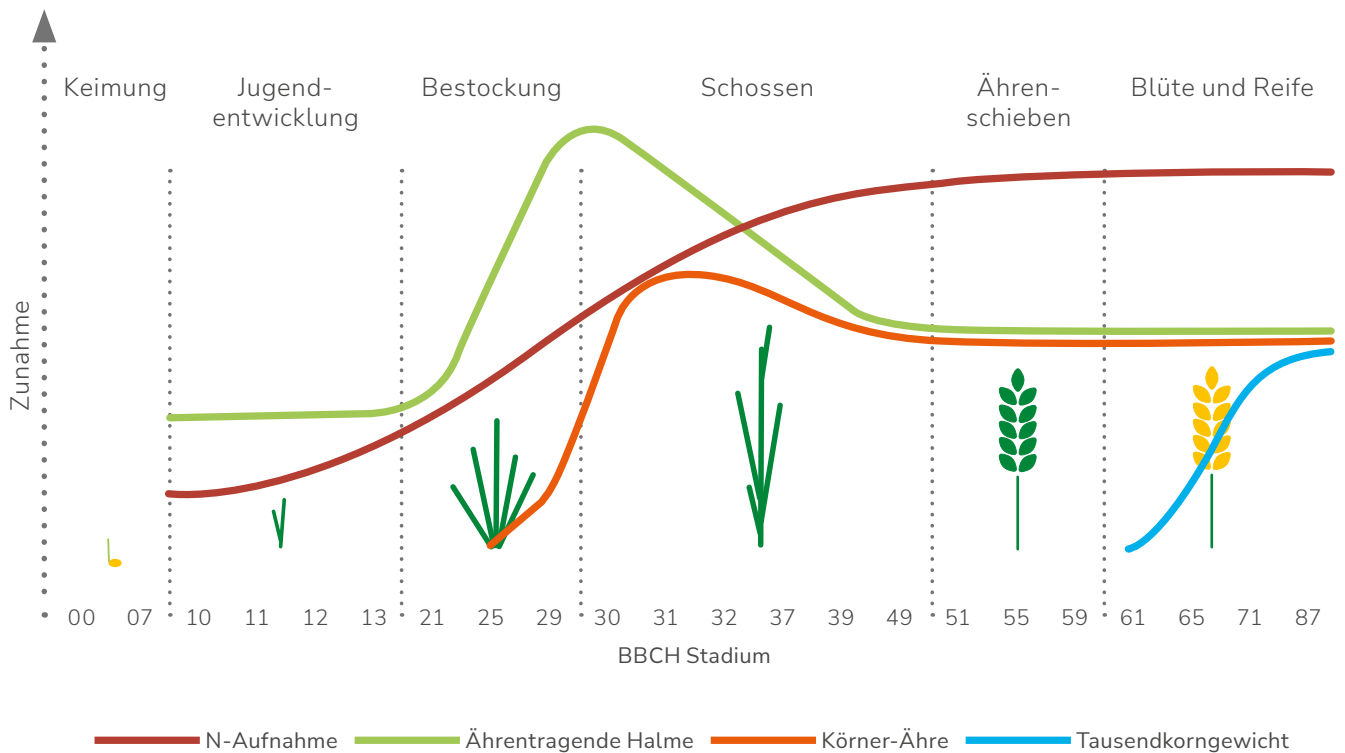


Abbildung 2:

Entwicklung der N-Aufnahme bei Wintergetreide (angepasst nach Yara)

Die wichtigste Grundlage der N-Düngung bildet die standörtliche Erfahrung des Betriebsleiters. Bei gleichbleibender Bewirtschaftung kalkuliert er eine mittlere Düngungshöhe für seine Kulturen ein. Bei der Aufteilung der Gaben orientiert sich der Landwirt neben seinen eigenen Erfahrungswerten hinsichtlich des Standorts und Bodens auch an sortenindividuellen Anforderungen sowie den aktuellen Witterungsbedingungen. Zudem haben sich bundesweit Verfahren etabliert, die auf der Nmin-Methode basieren. Die Grundidee dieser Methoden ist, dass jede Fruchtart zu Vegetationsbeginn bzw. für die gesamte Wachstumsperiode für ihre optimale Entwicklung ein bestimmtes N-Angebot benötigt. Diese als Sollwert bezeichnete N-Menge entspricht dem in Feldversuchen ermittelten optimalen N-Angebot im Frühjahr zum ersten Düngetermin.

Daneben ermöglichen moderne Methoden und Werkzeuge der aktuellen Versorgung der Pflanze eine noch genauere Bedarfsermittlung zum jeweiligen Zeitpunkt. Weitere Informationen zu diesen digitalen Möglichkeiten werden in **Abschnitt 4.3** vorgestellt.

Nmin

Die Höhe des Nmin-Gehaltes zu Vegetationsbeginn hängt ganz wesentlich von der Bodentemperatur, Bodenart und den Winterniederschlägen ab. Deswegen ist eine Messung kurz vor Vegetationsbeginn am sinnvollsten und entspricht den Regeln der „guten fachlichen Praxis“. Bei einer zu frühen Messung kann es bei warmen Witterungsbedingungen zu einer weiteren Mineralisation und damit einem gesteigerten N-Angebot kommen, welches durch den gemessenen Wert nicht berücksichtigt wird. Die abgeleitete Handlungsempfehlungen sind somit fehlerbehaftet und ungenau. Dazu werden im durchwurzelbaren Bereich (0 – 30 cm, 30 – 60 cm, 60 – 90 cm) die pflanzenverfügbaren Stickstoffformen Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-) bestimmt. Anderweitig können die Orientierungswerte für die Region vom amtlichen Dienst hinzugezogen werden. Der Nmin-Wert liefert einen Ausgangspunkt für die Düngebedarfsermittlung, sollte jedoch nicht als alleinige Messgröße und Entscheidungsgrundlage verstanden werden. Er stellt eine Momentaufnahme zu den aktuell vorherrschenden Bedingungen dar, die durch eine laufende Bestandbonitur, auch mit Hilfe der in **Abschnitt 4.3** aufgeführten Werkzeuge, berücksichtigt werden müssen.

In der DüV wird der N_{min} nur zum Beginn der Vegetationsperiode betrachtet. Tatsächlich ist die Bezeichnung jedoch zeitunabhängig und verändert sich laufend. Die so verfügbare N-Menge wird auch als Nachlieferung aus dem Boden bezeichnet und richtet sich nach folgenden Faktoren:

- **Witterung (Temperatur und Niederschlag)**
- **Bodenart und Humusgehalt**
- **Fruchtfolge (Vorfrüchte und Zwischenfrucht)**
- **Einsatz organischer Dünger**
- **Art und Intensität der Bodenbearbeitung (inkl. mechanische Unkrautbekämpfung)**

Diese Faktoren beeinflussen wesentlich die Bemessung der Nachdüngung, weshalb sie möglichst gut in den Entscheidungsprozess des Landwirts integriert werden sollten.

Ermittlung des N-Düngebedarfs von Dauergrünland

Die Bestimmung der notwendigen Nährstoffzufuhr auf Grünland orientiert sich wie bei Ackerkulturen an dem erwarteten Aufwuchs und dessen Inhaltsstoffen. Es erfolgt in den seltensten Fällen eine tatsächliche Ermittlung des Ertrages, daher wird beim Grünland die Düngeintensität von der Häufigkeit der Schnittnutzung bzw. dem Weidemanagement abgeleitet. Die nachfolgende Tabelle zeigt, welcher N-Bedarfswert auf Grünland bei unterschiedlicher Intensität laut aktueller Düngerverordnung angesetzt werden darf. Bei abweichender Intensität sind die Werte entsprechend zu korrigieren.

Tabelle 3:

N-Bedarfswerte auf Grünland und Feldfutterbau bei unterschiedlicher Nutzungsintensität
(Quelle: BMEL DüV 2017)

Nutzungsart und Nutzungsintensität	Ertragsniveau	Rohprotein- gehalt (RP)	Stickstoff- Bedarfswert
	in dt TM / ha	in % RP i.d. TM	in kg N / ha
Grünland (Schnittnutzung)			
1-Schnittnutzung	40	8,6	55
2-Schnittnutzung	55	11,4	100
3-Schnittnutzung	80	15,0	190
4-Schnittnutzung	90	17,0	245
5-Schnittnutzung	110	17,5	310
6-Schnittnutzung	120	18,2	350
Weide / Mähweide			
Weide intensiv	90	18,0	130
Mähweide, 60% Weideanteil	94	17,6	190
Mähweide, 20% Weideanteil	98	17,2	245
Weide extensiv	65	12,5	65
Mehrschnittiger Feldfutterbau			
Ackergras (3–4 Schnitte / Jahr)	120	16,2	310
Klee- und Luzernegras (3–4 Schnitte / Jahr)	120	18,2	350
Acker- und Klee gras (5 Schnitte / Jahr)	150	16,6	400
Rotklee oder Luzerne in Reinkultur	110	20,5	360

Rechengang: TM-Ertrag x % RP-Gehalt: 6,25 (zur Umrechnung von RP in N)

Zur Ermittlung des tatsächlichen N-Düngerbedarfs sind von den N-Bedarfswerten folgende Korrekturen vorzunehmen.

1. Zu- und Abschläge für Abweichungen beim Ertrag und beim Rohprotein
2. Abschläge für die Stickstoffbindung durch den Leguminosenanteil
3. Abschläge für die N-Nachlieferung aus dem Boden und der organischen Düngung der Vorjahre

Neben einer qualitätsorientierten Mineraldüngung erfolgt die Nährstoffzufuhr auf Grünland verstärkt über eine organische Düngung mit Gülle oder Gärresten. Die jährlichen Gaben aus organischen Düngemitteln sind gemäß

den Vorgaben der Düngeverordnung auf max. 170 kg Nges/ha*a (in einigen Bundesländern verringert sich dieses Limit auf 130 kg Nges/ha in Roten Gebieten) zu begrenzen. Eine Ausnahme bilden Flächen, die über die Derogationsregelung mit bis zu 230 kg Nges/ha*a aus organischen Düngemitteln beaufschlagt werden dürfen. Neben der Berücksichtigung der maximal auszubringenden Gesamt-N-Menge ist der Anteil an verfügbarem Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) über eine Analyse regelmäßig zu bestimmen. Der gesamte N-Düngebedarf wird neben der Lieferung aus organischen Düngemitteln ergänzt durch eine angepasste Mineraldüngung, da bei intensiver Nutzung die maximale N-Menge aus organischen Düngern nicht ausreicht.

Ermittlung des N-Düngebedarfs von Sonderkulturen

Bei Gemüsekulturen erfolgt die Ernte fast ausnahmslos im vegetativen Zustand, d. h., dass sich die Pflanze noch im vollen Wachstum und mehr oder weniger deutlich vor der generativen Abreifephase befindet. Bis zum Erntezeitpunkt ist daher eine ausreichende N-Versorgung sicherzustellen, damit der vegetative Pflanzenteil keine optischen Beeinträchtigungen durch Nährstoffmangel aufweist. Optisch nicht einwandfreie Gemüsepflanzen sind nicht vermarktbar. In Gemüsekulturen muss über die gesamte Vegetationszeit ausreichend Stickstoff zur Verfügung stehen. Die Ermittlung des N-Gesamtbedarfs orientiert sich dabei am N_{min} -Wert vor der Pflanzung bzw. Aussaat und weiteren N_{min} -Messungen während der Vegetation und dem daraus zu ermittelnden Ergänzungsbedarf. Für jede Kultur ist in Abhängigkeit von der Ertragserwartung eine Düngebedarfsermittlung zu erstellen. Diese muss neben dem N-Gesamtbedarf die im Boden vorgefundenen N-Mengen sowie die während der Vegetationszeit mobilisierten N-Mengen und weitere Zu- und Abschläge berücksichtigen.

Das bisher erläuterte Prinzip der Düngebedarfsermittlung für Stickstoff bezieht sich vorrangig auf klassische Ackerbaukulturen bzw. Grünland und ist bei Dauerkulturen wie Obst, Reben, Hopfen usw. nur unzureichend anzuwenden. Aufgrund der vegetationstypischen Eigenschaften und der mehrjährigen Standzeit entziehen sie in der bilanziellen Betrachtung dem Boden oftmals nur geringe Mengen Stickstoff. Andererseits ist aber der jährliche Bedarf der Pflanzen zur Bildung von Blättern, Holz usw. recht hoch. Vielfach verbleiben große Mengen der jährlich nachwachsenden Pflanzenteile infolge

von Mulchwirtschaft auf der Fläche und bewirken hohe N-Nachlieferungen des Bodens.

Für die Bemessung der N-Düngung gibt es daher zwei Möglichkeiten:

1. Die Kalkulation der N-Nachlieferung aufgrund von Erfahrungswerten. Entscheidende Einflussgrößen sind dabei der Humusgehalt, das Alter der Anlage, die Tiefgründigkeit der Böden und der Witterungsverlauf.
2. Die Analyse des Bodens auf den Gehalt an löslichem Stickstoff (N_{min}) und Ergänzung mit Mineraldünger auf bestimmte Sollwerte. Bei Dauerkulturen haben sich z. T. zwei Termine für die N_{min}-Methode als vorteilhaft erwiesen: der Zeitpunkt des Austriebs und während der Blüte). Gute Erfahrungen liegen im Weinbau mit der EUF-Methode vor.

Wirksamkeit von N-Düngemitteln

Die Nährstoffform des Stickstoffs unterscheidet sich nach dem eingesetzten Düngemittel. Danach richtet sich auch die physiologische Wirksamkeit des Düngemittels.

- Sehr schnell wirksam sind N-Dünger mit hohem Nitratanteil (z.B. KAS).
- Schnell und mäßig schnell wirken Kombinationen mit Nitrat und höherem Ammonium-Anteil (z.B. ASS, Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung AHL).
- Mäßig schnell wirken die reinen Ammoniumdünger und amidhaltigen Dünger wie z.B. Ammoniumsulfat und Harnstoff. Ammonium kann sofort von den Wurzeln aufgenommen werden, ist im Boden aber wenig beweglich. Erst nach Umwandlung in Nitrat wird eine bessere Beweglichkeit erreicht. In diese Gruppe können auch amidhaltige Dünger wie beispielsweise Harnstoff eingereiht werden. Harnstoff muss im Boden zu Ammoniumstickstoff umgewandelt werden, damit eine nennenswerte Pflanzenaufnahme möglich ist.
- Langsam und nachhaltig wirken stabilisierte Dünger sowie Kalkstickstoff.

Neben den stofflichen Einflüssen sind die physikalischen Eigenschaften der Düngemittel für die Pflanzenverträglichkeit zu berücksichtigen. Um beispielsweise bei einem AHL-Einsatz die Gefahr von Ätزشäden an Blättern zu vermeiden, sollte Markenware mit hoher Oberflächenspannung, Düsen mit großen Tropfen und/oder Schleppschläuche verwendet werden (siehe hierzu Anhangstabelle Mineralische Stickstoffdünger).

Die scheinbare Vorliebe mancher Pflanzen für eine bestimmte N-Form (Nitrat für Zuckerrüben, Ammonium für Kartoffeln) ergibt sich unter anderem aus dem unterschiedlichen Einfluss der N-Dünger auf die Bodenreaktion. Abhängig von der agronomischen Strategie des Landwirts unterscheidet sich die optimale Form und Sorte des Stickstoffdüngers. In jedem Fall ist auf eine hohe Produktqualität zu achten, die eine hohe Nutzungseffizienz des eingesetzten Stickstoffs sicherstellt.

3.1.2 Phosphor

Phosphor liegt im Boden in organischen und anorganischen Bindungsformen vor. Dabei nimmt der anorganisch gebundene Phosphor in unseren Mineralböden einen Anteil von 20 bis 80 Prozent ein. Je nach Bindungsform und Löslichkeit trägt er in unterschiedlichem Maß zur Pflanzenernährung bei, es besteht jedoch eine hohe Konkurrenz zwischen verschiedenen Pflanzen und anderen Lebewesen. Aufgrund seiner chemischen Reaktivität und Umwandlungsprozessen im Boden ist es der am wenigsten lösliche und verfügbare Nährstoff.

Vereinfacht dargestellt lassen sich drei unterschiedliche Phosphatfraktionen im Boden unterscheiden:

- **in der Bodenlösung verfügbares Phosphat (direkt pflanzenverfügbar)**
- **labiles Phosphat (leicht gebundenes Phosphat, nach Lösung pflanzenverfügbar)**
- **stabiles Phosphat (fest gebundenes Phosphat, trägt in der Regel nicht zur Pflanzenernährung bei).**

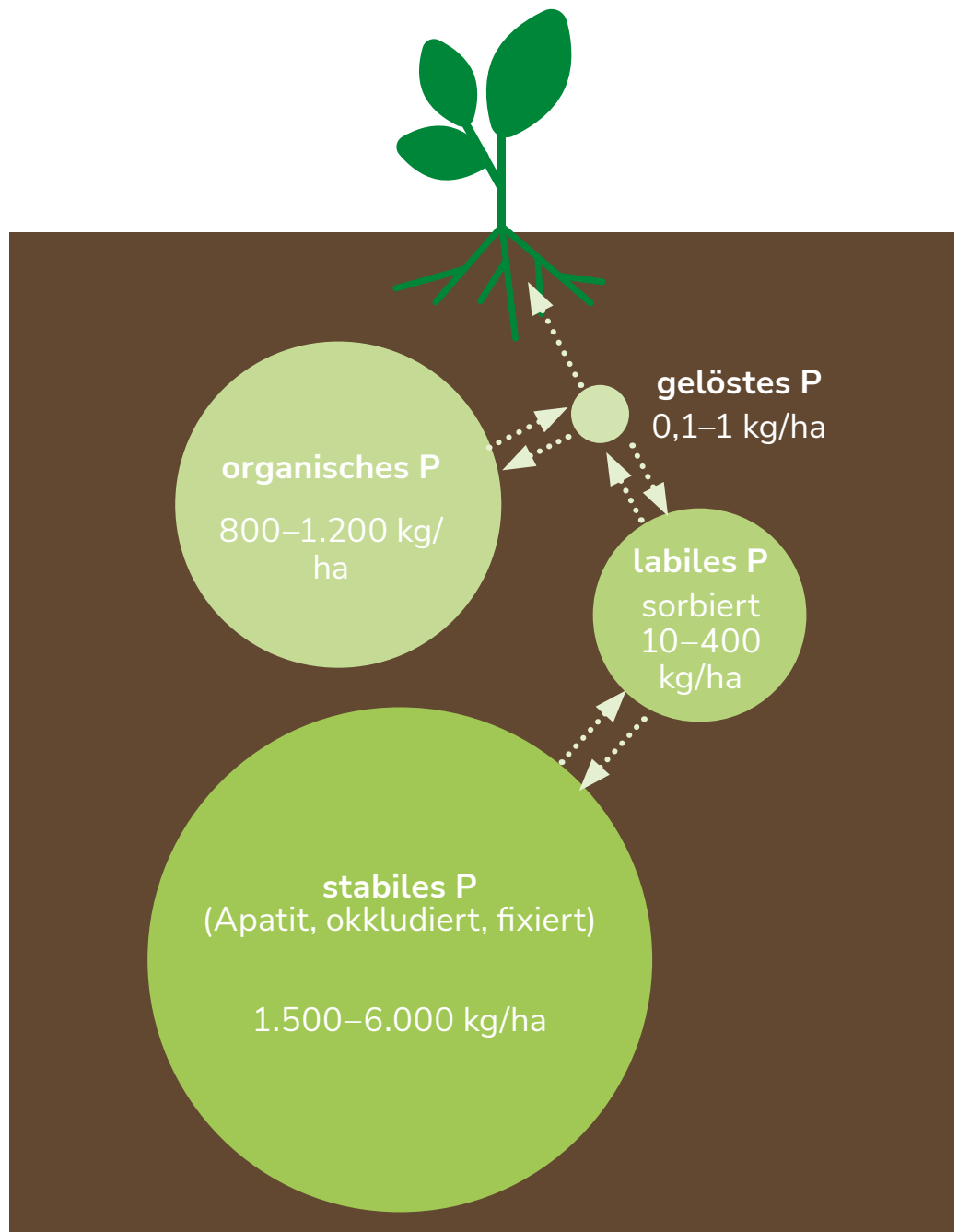


Abbildung 3:

Phosphat im Boden (verändert nach Mengel und Kirkby, Principles of plant nutrition)

In der Bodenlösung befindet sich nur ein sehr geringer Anteil des im Boden vorhandenen Phosphats. Bei gut versorgten Böden sind dies in der Krume etwa 1-2 kg P pro Hektar. Demgegenüber liegen 450-900 kg P in der labilen und zwischen 3000 und 6000 kg P pro Hektar in der stabilen Fraktion vor. Wichtige Vertreter der stabilen Fraktion sind Calcium-, Eisen- und Aluminium-phosphate als anorganische und Phytate als organische Verbindungen. Über Eisen- und Aluminiumoxide austauschbar an feste Bodenteilchen gebundene Phosphate sind ebenso typische Vertreter der labilen Fraktion wie

leicht zu mineralisierende, organisch gebundene Phosphatverbindungen. Zwischen den einzelnen Fraktionen bestehen dynamische Gleichgewichte. Die Erhöhung der Phosphatkonzentration der Bodenlösung, z. B. durch Düngung, hat zur Folge, dass gelöstes Phosphat rasch in gebundene Fraktionen überführt wird.

Die Bildung der unterschiedlichen Phosphatverbindungen im Boden und deren Verfügbarkeit wird in erheblichem Maß vom pH-Wert des Bodens beeinflusst. Am höchsten ist die Mobilität des Phosphats im schwach sauren bis neutralen Bereich, also bei pH-Werten zwischen 6 und 7. Oberhalb und unterhalb dieses Bereiches sinkt die Phosphatverfügbarkeit.

Phosphor erfüllt verschiedene Aufgaben in der Pflanze:

- als Zellbaustein zur Aufrechterhaltung der Zellstruktur (z.B. Zellmembranen)
- als Baustein der DNS und RNS (Träger der Erbinformationen)
- als Bestandteil lebenswichtiger Fermente zur Steuerung von Zellfunktionen
- als Energieträger ist es an allen Stoffwechselvorgängen wie Kohlenhydrat-, Fett- und Eiweißstoffwechsel beteiligt.

Zudem führt eine gute P-Versorgung zu verstärktem Wurzelwachstum. Dadurch werden allgemein die Wasser- und Nährstoffvorräte besser erschlossen. Die Bestockung bei Getreide sowie das vegetative Wachstum der Pflanzen werden positiv beeinflusst. Eine direkte Ertragswirkung besteht, indem Blüten- und Samenbildung, Fruchtansatz und Kornzahl je Ähre durch eine gute P-Versorgung erhöht werden. Daneben verbessert Phosphat die Qualität des Ernteguts wie das Tausendkorngewicht (TKG), Rohproteingehalt und auch Backqualität.

Aufgrund der elementaren Funktionen in der Pflanze trägt Phosphor dazu bei, die Krankheits- und Frostresistenz zu erhöhen.

Einfluss einer Phosphatdüngung auf die Qualität von Ernteprodukten Kartoffeln

Eine optimale Phosphatversorgung erhöht neben dem Knollenertrag auch den Stärkegehalt der Kartoffel. Daneben wird noch der Knollenansatz erhöht, die Keimfähigkeit bei Pflanzkartoffeln verbessert und die Lagereigenschaften der Knollen werden positiv beeinflusst.

Zuckerrüben

Zuckerrüben reagieren besonders dankbar auf eine Phosphatdüngung. Dabei werden nicht nur der Rübenenertrag, sondern auch der Zuckergehalt und die Zuckerausbeute verbessert.

Getreide

Eine ungenügende Phosphatdüngung führt bei allen Getreidearten zu einem Rückgang des Tausendkorngewichtes, des Hektolitergewichtes und zu einer verschlechterten Kornausbildung. Bei Weizen sinken Klebergehalt und Backvolumen, bei Braugerste verringern sich Extraktgehalt und Eiweißlösungsgrad. Zur Erzeugung von Qualitätsgetreide jeglicher Art ist daher eine optimale Phosphatversorgung unumgänglich.

Die eingangs beschriebene geringe Mobilität des Phosphats hat zur Folge, dass nicht das gesamte Bodenvolumen, sondern nur der von den Pflanzen durchwurzelte Teil des Bodens zur Phosphatnahrung der Pflanzen beiträgt. Phosphat im Boden, welches weiter als 3 - 5 Millimeter von den Wurzeln entfernt ist, kann in der Regel nicht mehr aufgenommen werden. Daher muss der Vorrat an pflanzenverfügbarem Phosphat im Boden viel höher sein als die tatsächlich von den Pflanzen aufgenommene Phosphatmenge. Weiterhin ist aus diesem Sachverhalt leicht abzuleiten, dass Kulturarten mit einem relativ weitverzweigten Wurzelsystem (z.B. Getreide) ein größeres Bodenvolumen erschließen und damit ein besseres Phosphataneignungsvermögen besitzen als Pflanzenarten mit einem nur gering ausgebildeten Wurzelsystem (Hackfrüchte, Mais). Dass Getreide besser P aufnehmen können, liegt nicht nur am Wurzelsystem sondern auch an den Mechanismen zum Erschließen von P (Exudation von Säuren und Phytosiderophoren), Dadurch können Getreide, vor allem Weizen, auch P aufschließen, das als Eisenphosphat vorliegt.

Darüber hinaus haben auch Leguminosen und Lupinen eine große Bedeutung für die P-Verfügbarkeit (als Zwischenfrucht), da die Wurzelaktivität - also Ansäuerung der Rhizosphäre - die P-Aufnahme und somit die P-Remobilisierung, steigert.

Die Phosphatdüngung muss sich aus diesen Gründen an der Höhe des pflanzenverfügbaren Bodenvorrates und am Phosphataneignungsvermögen der angebauten Kulturart orientieren.

Die Phosphatverfügbarkeit im Boden wird durch die Bodenuntersuchung festgestellt. Als optimal zur Ausschöpfung des Ertragspotentials ist dabei die Gehaltsklasse C (Tab. 4) anzusehen. Hier wird in der Regel eine Phosphatdü-

gung in Höhe des Entzuges empfohlen. Ernterückstände sind anzurechnen. In den Gehaltsklassen D und E sollte die Phosphatdüngung unterhalb des Entzuges liegen, bzw. in der Gehaltsklasse E wird keine Düngung empfohlen.

Tabelle 4:

Gehaltsklassen und zugehörige Versorgungsstufen für Phosphat auf Acker und Grünland (CAL-Methode)

Gehaltsklasse	mg P ₂ O ₅ / 100g Boden Acker und Grünland
A	< 5
B	5–9
C	10–20
D	21–30
E*	> 30

Liegt die Phosphatversorgung des Bodens unterhalb der Gehaltsklasse C, sind nach der DüV Zuschläge bei der Düngung nicht mehr erlaubt. Innerhalb der Flächen seines Betriebes besteht allerdings für den Landwirt die Möglichkeit, die Phosphatdüngung zu differenzieren. So kann er auf unterversorgten Flächen (Stufe A und B) die Düngung über der Höhe des Entzuges durchführen, wenn im Gegenzug die Phosphatdüngung auf Flächen, die gut oder sehr gut versorgt sind, reduziert wird. Um trotzdem eine möglichst optimale Nährstoffversorgung der Pflanzen und damit einhergehend hohe Erträge zu erreichen, ist es auf diesen Standorten vorteilhaft, Düngephosphate nach der Ausbringung in den Boden einzuarbeiten bzw. in der Nähe der Wurzeln zu platzieren.



Abbildung 4:

P-Mangelsymptome bei Mais (links, ICL) und Raps (rechts, K+S)

Die Phosphatdüngung sollte des Weiteren an der Fruchtfolge ausgerichtet werden. Die bedürftigen Kulturen (Hackfrüchte, Mais) erhalten aufgrund des geringeren Aneignungsvermögens für P auch in der Gehaltsklasse C eine Phosphatdüngung oberhalb des Entzuges. Angestrebt wird hier grundsätzlich der obere Bereich der Gehaltsklasse C (ca. 20 mg P_2O_5 /100g Boden). Das nachfolgende Getreide wird entsprechend weniger mit Phosphat gedüngt, so dass die Phosphatbilanz entlang der Fruchtfolge annähernd ausgeglichen ist.

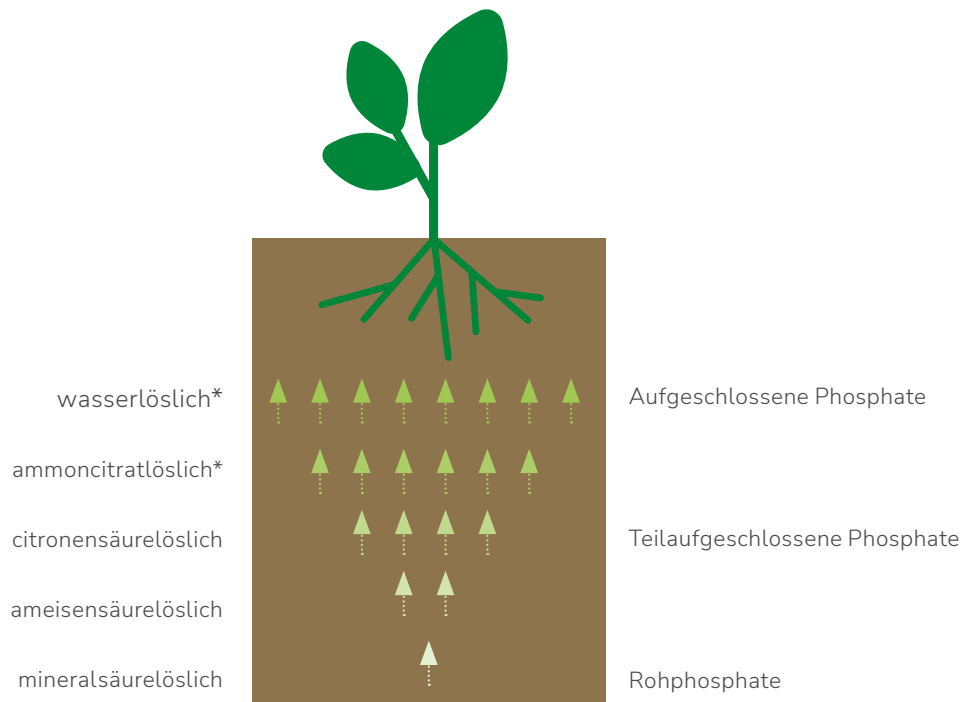
Tabelle 5:

Einflussfaktoren auf die Phosphatverfügbarkeit im Boden und die Phosphataufnahme in die Pflanze

Zunahme	Wirkung auf	Phosphaternährung
Bodenart (Feinerdeanteil)	Phosphatverfügbarkeit	+
Wassergehalt	Phosphatverfügbarkeit	+
Bodendichte	Wurzelwachstum	-
Bodentemperatur	Phosphatverfügbarkeit	+
	Wurzelwachstum	+
	Physiologische Aktivität der Pflanze	+
pH-Wert	Phosphatverfügbarkeit (optimal pH 6-7>)	+
Biologische Aktivität	Phosphatverfügbarkeit (Mineralisierung org. Phosphate)	+
Düngung	Phosphatverfügbarkeit	+

Wirksamkeit von P-Düngemitteln

Die Düngeverordnung berücksichtigt im Zusammenhang mit der P-Bilanzierung nicht die Pflanzenverfügbarkeit des Düngerphosphates. Das heißt, dass die gesamte gedüngte P-Menge, unabhängig von seiner tatsächlichen Pflanzenverfügbarkeit voll angerechnet werden muss. So gilt dies auch für Rohphosphate, obwohl hier die aktuelle Ausnutzungsrate nur sehr gering ist. Auch wenn regulatorisch die Pflanzenverfügbarkeit und somit Wirksamkeit des eingesetzten Düngemittels nicht unterschieden wird, ist sie agronomisch dennoch zu beachten.



* entspricht der Extraktionskraft der natürlichen Chemosphäre des Bodens

Abbildung 5:

Phosphatverfügbarkeit in Abhängigkeit von der eingesetzten P-Düngerform

- Vollaufgeschlossene Phosphate:** Beim Aufschluss der Rohphosphate kommt es darauf an, die Apatitstruktur des Ausgangsmaterials zu zerstören und das Phosphat in eine gut lösliche und pflanzenverfügbare Form zu überführen. Beim Aufschluss von Rohphosphat mit Schwefelsäure entsteht Superphosphat, ein Gemisch aus Monocalciumphosphat und Gips. Ein hochkonzentrierter Phosphatdünger, das Triplesuperphosphat entsteht beim Aufschluss der Rohphosphate mit Phosphorsäure. Dicalciumphosphat bildet sich durch Neutralisation von Phosphorsäure mit Calciumhydroxid. Die technische Herstellung erfolgt durch kontinuierliches Vermischen von feinstvermahlenem Rohphosphat mit den genannten Säuren. Die hier erwähnten Phosphatdünger sind mindestens zu 93 % wasserlöslich.
- Teilaufgeschlossene Rohphosphate:** Phosphatdünger dieser Gruppe unterscheiden sich durch ihre unterschiedlichen Gehalte an Mineralsäurelöslichem und wasserlöslichem Anteil und somit in den unmittelbar wirksamen Phosphatanteilen.

Beim Aufschluss mit Schwefelsäure entsteht Gips (Calciumsulfat, CaSO_4). Mitunter wird Gips mit Kalk gleichgesetzt. Dies ist nicht zutreffend, da Calciumsulfat im Boden neutral wirkt und keinen Einfluss auf den pH-Wert des Bodens ausübt. Eine basische Wirksamkeit besitzt Gips nicht.

- **Phosphate in NP- und NPK-Düngern:** Ähnlich wie mit Schwefelsäure kann der Phosphataufschluss auch mit Salpetersäure durchgeführt werden. Bei diesem Prozess entstehen Stickstoff-Phosphat-Verbindungen. Ein Teil des eingesetzten Rohphosphates wird dabei in wasserlösliche und ammoniumcitratlösliche P-Formen umgewandelt. Der wasserlösliche Anteil liegt dann je nach Herstellungsverfahren bei über 60 %.
- **Rohphosphate:** Unter bestimmten Voraussetzungen können Rohphosphate direkt als Düngerphosphate angewendet werden. In Frage kommen diesbezüglich nur weicherdige Rohphosphate und diese auch nur nach feinsten Vermahlung. Sie sind in erster Linie für saure Böden (unter pH 5,5) und für Moorböden geeignet.
- **Phosphat in Blattdüngern:** Über eine Blattapplikation ist eine Phosphatdüngung grundsätzlich möglich, beispielsweise mit wasserlöslichem Monoammonphosphat (MAP), das Phosphor in pflanzenverfügbarer Form als Phosphat-Ionen (H_2PO_4^- bzw. HPO_4^{2-}) liefert. Nicht geeignet sind dagegen Phosphite, also Salze der phosphorigen Säure (H_3PO_3), die teils fälschlich als „Phosphonate“ bezeichnet werden. In diesen Verbindungen liegt der Phosphor in der Oxidationsstufe +3 vor (H_2PO_3^-) und kann von der Pflanze nicht direkt in den Phosphatstoffwechsel eingebaut werden. Eine nennenswerte Oxidation zu Phosphat erfolgt in Pflanzen kaum; daher sind Phosphite keine wirksame Phosphorquelle, können aber als Pflanzenschutzmittel gegen bestimmte Oomyceten wirken.
- **Recycling-Phosphate:** Das Phosphat wird bei Recycling-Phosphaten überwiegend aus Klärschlamm zurückgewonnen. Neben den Aschen aus der Monoverbrennung von kommunalem Klärschlamm wird auch Struvit (Magnesium-Ammonium-Phosphat) als Düngemittel eingesetzt. Die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphates in P-Recycling-Düngemitteln ist höher als die von Rohphosphaten und nimmt mit steigendem pH-Wert des Bodens ab. Die Klärschlammverordnung hat zum Ziel bis zum Jahr 2029 eine Nährstoffrückgewinnung von Phosphat aus Klärschlamm vorzuschreiben bzw. umzusetzen. Bis dahin sind Qualitäts- und Kostenfragen des recycelten Produkts zu klären.

3.1.3 Kali

Kalium ist ein essenzieller Pflanzennährstoff, der zahlreiche physiologische Prozesse in der Pflanze beeinflusst. Es wird nicht in organische Substanz eingebaut, ist aber entscheidend für die Aktivierung von Enzymen, die Photosynthese, den Wasserhaushalt, die Bildung von Kohlenhydraten und Proteinen sowie die Widerstandsfähigkeit gegenüber Stressfaktoren wie Trockenheit, Frost und Krankheiten. Pflanzen nehmen Kalium als K^+ -Ionen aus der Bodenlösung auf. Die Aufnahme erfolgt über spezifische Transportproteine in den Zellmembranen. In der Pflanze ist Kalium sehr mobil und wird bei Mangel von älteren zu jüngeren Blättern verlagert. Typische Mangelsymptome sind schlaffe und welke Blätter, Blattnekrosen und Wuchsdepressionen. Besondere empfindliche Kulturen sind Hackfrüchte im Allgemeinen, wie beispielsweise Mais, Raps und Zuckerrüben. Auch Wein ist kalibedürftig.

Im Boden liegt Kalium in verschiedenen Formen vor: als sofort verfügbares Kalium in der Bodenlösung, als austauschbares Kalium an Tonmineralen und Humus, sowie als fixiertes Kalium in Zwischenschichten von Tonmineralen oder im Kristallgitter von Silikaten. Nur ein kleiner Teil ist direkt pflanzenverfügbar. Die Nachlieferung aus den nicht sofort verfügbaren Vorräten ist entscheidend für die kontinuierliche Versorgung. Tonreiche Böden haben eine höhere Pufferkapazität, aber auch ein höheres Fixierungspotenzial.

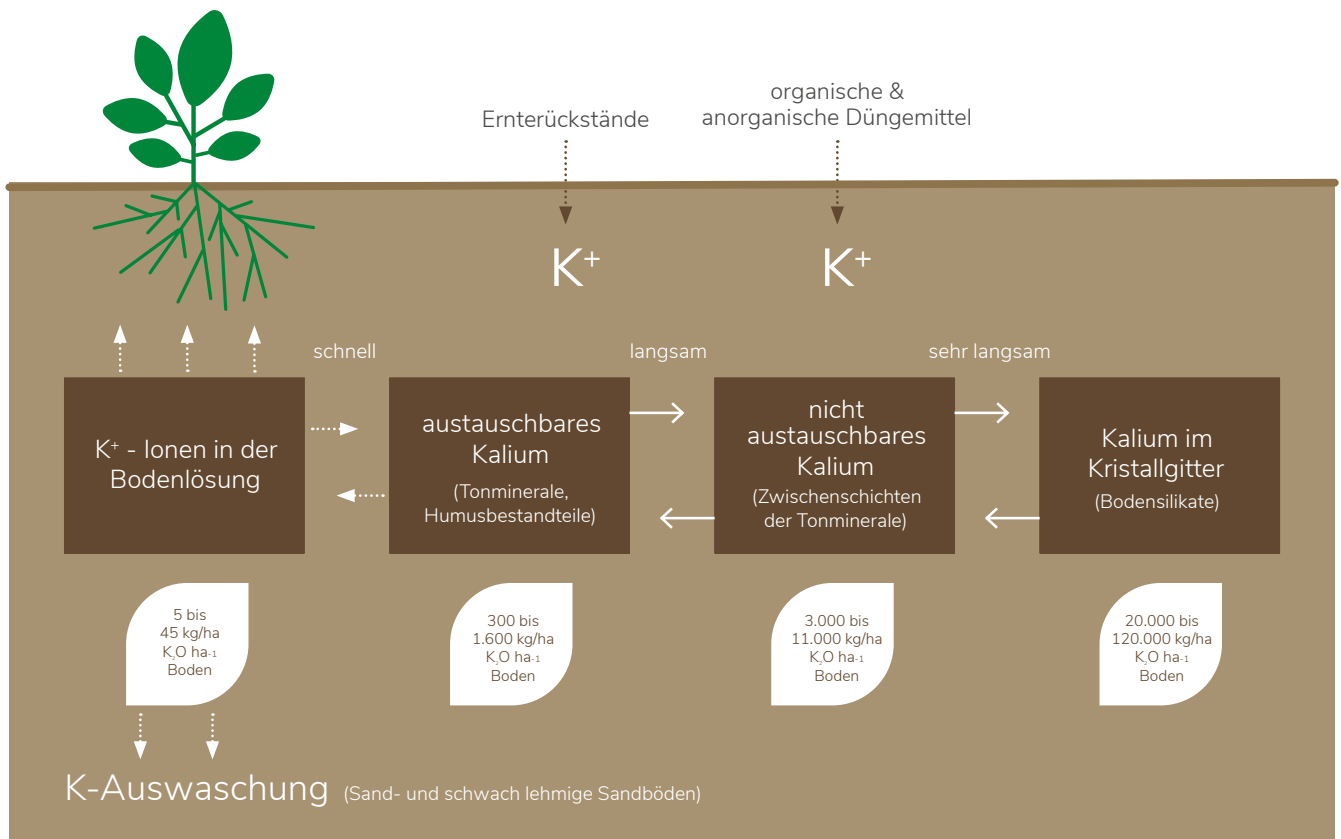


Abbildung 6:
Kaliumdynamik im Boden (nach K+S)

Als sog. Grundnährstoff wird die Kaliumversorgung im Boden nach der VDLU-FA-Methode in Gehaltsklassen (A-E) angegeben, wobei die Gehaltsklasse C, äquivalent zu Phosphat, anzustreben ist. Bei niedrigen Gehaltsklassen (A und B) ist eine Aufdüngung notwendig, bei hohen Klassen (D und E) kann die Düngung reduziert oder ausgesetzt werden. Die Düngung erfolgt idealerweise im Herbst oder Frühjahr, abhängig von Bodenart und Kultur. Auf leichten Böden ist eine Aufteilung der Gabe sinnvoll, um Auswaschungsverluste zu vermeiden. Die Kaliumdüngung beeinflusst auch die Effizienz der Stickstoffnutzung und trägt zur Verbesserung der Wassernutzungseffizienz bei.

Empfehlungen für die Praxis

- **Düngeplanung:** Der Düngebedarf ergibt sich aus dem Entzug durch die Kultur, dem Bodenvorrat und der Rücklieferung durch organische Dünger. Eine regelmäßige Bodenuntersuchung ist unerlässlich.
- **Düngemittelwahl:** Chloridische Kaliumdünger sind für viele Kulturen geeignet, jedoch nicht für chloridempfindliche Pflanzen wie Kartoffeln oder Sonderkulturen. Hier sind sulfatische Kaliumdünger vorzuziehen.

- **Blattdüngung:** Kann bei akutem Mangel oder zur Qualitätsverbesserung (z.B. bei Kartoffeln) ergänzend eingesetzt werden.
- **Ökologischer Landbau:** Kaliumverluste durch Ernte und Auswaschung müssen durch zugelassene Mineraldünger ausgeglichen werden.
- **Umweltaspekte:** Kalium ist nicht umweltrelevant, dennoch sollte eine Überdüngung vermieden werden. Ziel ist die Erhaltung der Gehaltsklasse C.
- **Energieeffizienz:** Die Herstellung von Kaliumdüngern ist energieeffizient. Der Energieeinsatz steht in einem günstigen Verhältnis zur Ertragssteigerung. Die nachfolgenden Düngeempfehlungen basieren auf dem Nährstoffentzug durch das Haupternteprodukt bei Bodengehaltsklasse C (optimaler Versorgungszustand). Die Werte gelten als Richtwerte für die Erhaltungsdüngung:

Tabelle 6:

Kalibedarf von Marktfrüchten und im Futterbau

Kultur	Ertrag (t/ha)	K ₂ O-Bedarf (kg/ha)
Roggen	6,0	144
Qualitätsweizen	9,0	155
Wintergerste	8,0	143
Braugerste	6,5	96
Hafer	6,5	161
Körnermais	9,0	230
Triticale	7,0	149
Raps	4,0	205
Sonnenblumen	3,0	357
Spätkartoffeln	40,0	269
Zuckerrüben	55,0	390
Silomais (28% TS)	55,0	248
Ackerbohne	4,0	160
Erbse	4,0	160
Soja	4,0	228
Grünland	10,0	324

Tabelle 7:

Kalibedarf von Gemüsekulturen

Kultur	Ertrag (t/ha)	K ₂ O-Bedarf (kg/ha)
Blumenkohl	350	126
Chinakohl	700	210
Endiviensalat	450	248
Möhre	600	318
Porree	500	180
Rote Rübe	600	288
Sellerie	500	270
Weißkohl	1000	310
Zucchini	600	120

Zeitpunkt und Form der Düngung

- **Herbstdüngung** ist auf mittleren und schweren Böden sinnvoll, da Kalium dort gut gespeichert wird.
- **Frühjahrsdüngung** ist auf leichten Böden vorzuziehen, um Auswaschungsverluste zu vermeiden.
- **Blattdüngung** kann ergänzend bei akutem Mangel oder zur Qualitätsverbesserung (z.B. bei Kartoffeln) eingesetzt werden.
- **Fruchtfolgedüngung:** Kulturen mit hohem K-Bedarf (z.B. Raps, Zuckerrübe, Kartoffel, Mais) sollten bevorzugt versorgt werden.



Abbildung 7:

Kaliummangelsymptome bei Mais (links) und Raps (rechts) (K+S)

Weitere Informationen zur Kalidüngung und Kalium als Nährstoff in Boden und Pflanze finden Sie in der Kaliumbroschüre des BAD unter dem rechtsstehenden QR-Code sowie auf der IVA-Website unter folgendem Link: <https://www.iva.de/publikationen/kalium-baustein-fuer-eine-nachhaltige-ertragsbildung>.



3.1.4 Schwefel

Schwefel stellt ein essenzielles Element für die Proteinsynthese dar und ist Bestandteil verschiedener Aminosäuren. Zudem ist S beteiligt am Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel und an der Bildung von Vitaminen. Insbesondere Kreuzblütler, wie z.B. Raps, und Lauchgewächse haben einen hohen S-Bedarf. Die Schwefeldüngung rückt verstärkt in den Fokus einer angepassten Pflanzenernährung seit Schwefeleinträge in den Boden aus Industrieemissionen aufgrund einer verbesserten Abluftreinigung weitgehend ausbleiben. Aufgenommen wird Schwefel in Form von Sulfat (SO_4^{2-}), weshalb elementarer Schwefel (auch in organischen Verbindungen) erst mikrobiell zu Sulfat oxidiert werden muss, was bei Temperaturen $<10\text{ }^\circ\text{C}$ mehrere Wochen dauert. Im Boden selbst ist Schwefel meist organisch gebunden und liegt aufgrund seiner hohen Auswaschungsgefährdung nur zu einem kleinen Teil als pflanzenverfügbares Sulfat vor. Aus diesem Grund ist eine Vorratsdüngung nicht sinnvoll, die Versorgung sollte bedarfsgerecht und zeitlich angepasst an die Kulturentwicklung (ähnlich zu Stickstoff) erfolgen.

Schwefeldüngung in der Praxis – Schwefelbedarf und Düngeformen

Ähnlich wie bei Stickstoff hängt die Schwefelverfügbarkeit im Boden von den äußeren Witterungsbedingungen und der Mineralisation von organisch gebundenem Schwefel zu Sulfat ab. Der Düngebedarf richtet sich nach der Kultur und kann mit Hilfe verschiedener Methoden bestimmt werden.

- **Smin-Bodenuntersuchung:** Bestimmung des löslichen Sulfats im Frühjahr.
- **Pflanzenanalyse:** Bestimmung des Schwefelgehalts in der Trockensubstanz (z.B. $>0,55\%$ bei Raps).
- **Schwefel-Schätzrahmen:** Praxisnahes Einschätzungsmodell basierend auf Standort, Witterung, Fruchtfolge etc.

Als Orientierung können dem Landwirt S-Düngebedarfe dienen, die in der folgenden Tabelle zusammengefasst sind:

Tabelle 8:

Schwefeldüngebedarf von Marktfrüchten und im Futterbau (nach VDLUFA)

Kultur	Menge (kg/ha S)	Zeitpunkt
Getreide	10–20	Vegetationsbeginn, ggf. Spätgabe
Raps	20–40	Vegetationsbeginn
Zuckerrüben	10–20	Zur Saat
Kartoffeln	10–20	Zur Pflanzung
Mais	10–20	Zur Saat
Grünland	20–40	Vegetationsbeginn, zu Schnitten
Leguminosen	30–50	Vegetationsbeginn

Obwohl Getreide im Vergleich zu bspw. Raps einen vergleichsweise geringen Schwefelbedarf aufweist, wirkt sich eine Unterlassung der Schwefelversorgung erheblich negativ auf die Erträge und insbesondere der Ertragsqualität aus. Idealerweise wird Schwefel in Kombination mit der Stickstoffdüngung ausgebracht, da die S-Aufnahme weitgehend parallel mit der N-Aufnahme in der Pflanze verläuft (siehe Abbildung 8, oder in Form von Magnesiumsulfat).

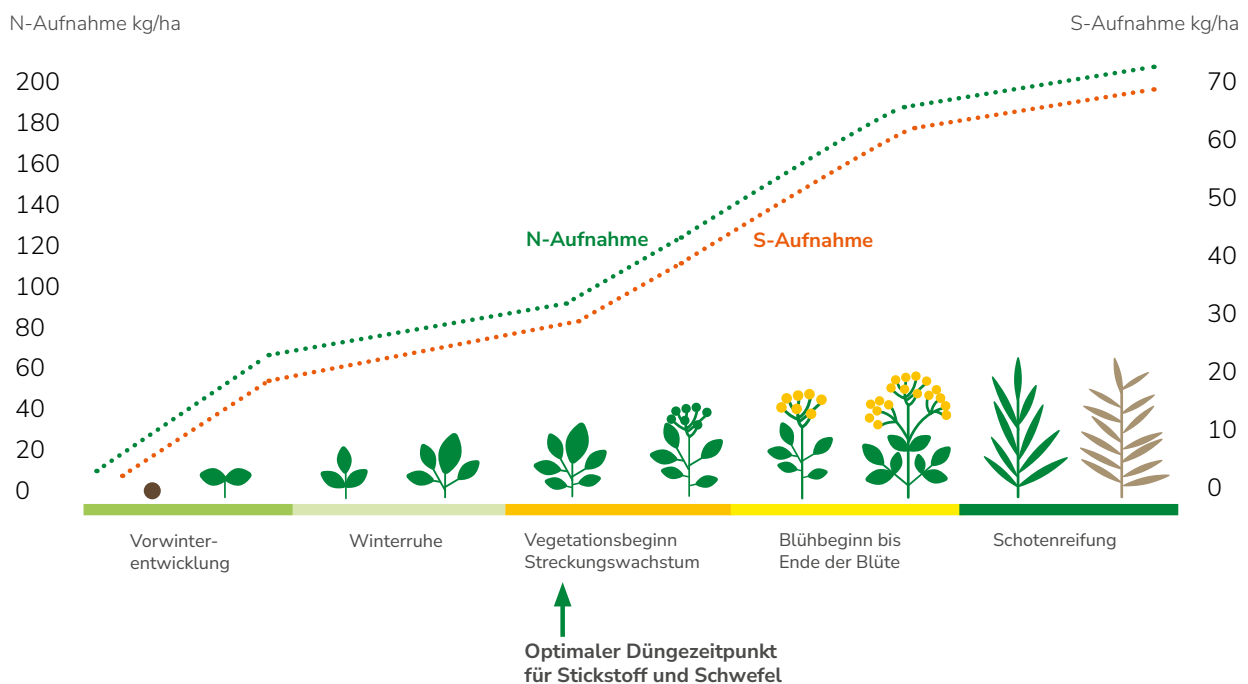


Abbildung 8:

Verlauf der Stickstoff- und Schwefelaufnahme während der Vegetationsperiode bei Winterraps (nach Yara)

S-Düngemittel

- **Sulfatdünger** (z.B. Ammoniumsulfat, Magnesiumsulfat): schnell wirksam.
- **Gips (Calciumsulfat)**: Langzeitwirkung
- **Elementarer Schwefel**: verzögerte Wirkung, nicht zur akuten Mangelbehebung geeignet.
- **Organische Dünger** (z.B. Gülle, Mist): enthalten wenig direkt verfügbaren Schwefel, tragen aber langfristig zur Versorgung bei.

Aufgrund der oben genannten Eigenschaften von Schwefel sind Umweltaspekte unbedingt zu beachten. So sollte eine Überdüngung unbedingt vermieden werden, um den Grenzwert von 250 mg/l Sulfat im Trinkwasser nicht zu überschreiten. Die Landwirtschaft trägt daher eine hohe Verantwortung, der sie über eine angepasste S-Düngung gerecht werden muss.



Abbildung 9:

Schwefelmangelsymptome bei Raps (links) und Wintergerste (rechts) (K+S)

Weitere Informationen zur Schwefeldüngung und Schwefel im Boden und der Pflanze finden Sie in der Schwefelbroschüre des BAD unter dem rechtsstehenden QR-Code sowie auf der IVA-Website unter folgendem Link: <https://www.iva.de/publikationen/schwefel-baustein-fuer-eine-nachhaltige-ertragsbildung>.



3.1.5 Kalkdüngung und Calcium

Kalk ist für Boden und Pflanze gleichermaßen notwendig, wobei die Wirkung des Kalkes auf den Boden im Vordergrund steht.

Kalk fördert:	die Bodengare und Krümelstabilität
	die Wirksamkeit mineralischer und organischer Dünger
	die Nährstoffmobilisierung
	das Bodenleben und
	die Bildung wertvoller Humussubstanzen
Kalk verhindert:	die Bodenversauerung
	die Bodenverdichtung
	die Freisetzung schädlicher Schwermetalle

Durch die Gesundungskalkung saurer Böden werden im Boden gebundene Nährstoffe z.B. Phosphat in erheblichem Umfang freigesetzt. Zu niedrige pH-Werte führen zu Säureschäden und zur Zerstörung von Tonmineralen. Dadurch erhöht sich die Gefahr der Bodenerosion. Eine hohe Belegung der Tonminerale mit Ca- (60-80 %) und Mg (10-15 %)-Ionen ist eine wichtige Voraussetzung für die Bildung von Ton-Humus-Komplexen und damit für eine stabile Krümelstruktur.

Düngungsempfehlung

Die Höhe der erforderlichen Kalkmenge wird bei der Düngungsempfehlung in dt CaO/ha (Reinnährstoff) angegeben.

1 dt CaO entspricht zirka	1,1 dt	Branntkalk 90
	2,0 dt	Kohlensauren Kalk 90/ Kohlensauren Magnesiumkalk 90
	2,3 dt	Konverterkalk

Auf schweren Böden ist der Einsatz von Branntkalk zu empfehlen. Auf leichten und mittleren Böden verwendet man kohlensaure- oder kieselsaure Kalke.

Auf den Warenbegleitscheinen der Kohlensauren-/Kohlensauren Magnesium-Kalke ist neben der Kalkbindungsform(en) (% CaCO_3 / % MgCO_3) der Neutralisationswert (NW), bewertet als CaO (Reinnährstoff) angegeben. Bei allen anderen Kalkdüngemitteltypen wie Branntkalk, Magnesium-Branntkalk, Mischkalk, Hütten- und Konverterkalk sowie Kalkdünger aus ... ist der Kalkgehalt als CaO (Reinnährstoff) deklariert.

Kalkverbrauch - Erhaltungskalkung

Jährlich werden in unseren Böden durch Pflanzenentzug und Säureneutralisation verursacht durch organische Säuren, der Wurzel- und Mikrobenatmung, der physiologisch sauer wirkenden Dünger und des atmosphärischen Säureeintrages ca. 500 kg CaO/ha auf Ackerflächen und 250 – 300 kg CaO/ha auf Grünland verbraucht.

Dieser Kalkverbrauch findet auf allen Standorten statt. Auf leichten Böden macht sich dies durch eine rasche pH-Absenkung bemerkbar. Bei schweren Böden werden zunächst die Kalkreserven verbraucht – dies geht bereits zu Lasten der Bodenstruktur – bevor der pH-Wert absinkt.

In Tabelle 6 des Anhangs ist der theoretische Kalkwert (Kalkbedarfswert) nach Sluijsmans für die wichtigsten Mineraldünger zu sehen. Grundsätzlich gilt: je Kilogramm Ammoniumstickstoff, das zu Nitrat nitrifiziert wird, entsteht ein Kalkverbrauch von 1 kg CaO. Dabei spielt die Herkunft des NH₄-Stickstoffs, ob nun aus Mineraldüngern oder organischen Düngern (Gülle, Gärrest) überhaupt keine Rolle. Wichtig ist jedoch festzuhalten, dass die Verwendung schwefelhaltiger N-Dünger kalkzehrender wirkt, als schwefelfreie N-Dünger.

Tabelle 9:

Höhe der Gesundungs- und Erhaltungskalkung in Abhängigkeit von pH-Wert und freiem Kalk auf Acker (Humusgehalt ≤ 4 %) (Quelle: Gelbes Heft, LfL, 2022)

Bodenart	Bodenschlüssel	Gesundungskalkung (pH-Klasse A/B)		Erhaltungskalkung (pH-Klasse C)		keine Kalkung bei
		pH-Wert	Einmalige Höchstgabe dt CaO/ha	pH-Wert	Menge für 3 Jahre dt CaO/ha	pH-Wert
S	01	< 5,4	15	5,4–5,8	6	> 5,8
l'S	02	< 5,8	20	5,8–6,3	10	> 6,3
lS-uL	03-05	< 6,2	60	6,2–6,5 und 6,6–6,8 (-)	17	> 6,8 und 6,6–6,8 (+)
tL-T	06-08	< 6,4	100	6,4–6,7 und 6,8–7,2 (-)	20	> 7,2 und 6,8–7,2 (+)

(-) kein freier Kalk (nach Salzsäure-Test): Erhaltungskalkung erforderlich

(+) freier Kalk (nach Salzsäure-Test): Erhaltungskalkung nicht erforderlich

Tabelle 10:

Anzustrebender pH-Bereich auf Grünlandböden mit max.15 % Humus Düngbedarf für die Erhaltungskalkung und einmalige Höchstgabe der Gesundungskalkung (Quelle: Gelbes Heft, LfL, 2022)

Bodenart	Bodenschlüssel	anzustrebender pH-Bereich Gehaltsklasse C	Erhaltungskalkung* (in Gehaltsklasse C) (dt CaO/ha)	Gesundungskalkung** (in Gehaltsklasse A/B) (dt CaO/ha)
Sand schwach lehmiger Sand	01 02	4,7–5,0 5,2–5,5	3 4	10 15
stark lehmiger 0 bis schluffiger Lehm	03–05	5,2–5,9	5	25
toniger Lehm bis Ton	06–08	5,7–6,1	6	30

* Erhaltungskalkung alle 3 Jahre in angegebener Höhe

** einmalige Höchstgabe, höhere Gaben sind aufzuteilen

Abbildung 10 zeigt ein Schaubild für die unterschiedliche Wirkungsgeschwindigkeit verschiedener Kalkdünger. Für die Wirkungsgeschwindigkeit gilt: Branntkalk wirkt schneller als kohlen-saure- und kieselsaure Kalke. Je feiner die Vermahlung ungebrannter Kalke ist, desto schneller ist ihre Wirkung. Calciumsulfat (Gips) ist ein Neutralsalz, das den pH-Wert des Bodens nicht verändert. Mit Calciumsulfat ($\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$) werden strukturwirksame Calcium-Ionen und rasch wirksamer Schwefel zur S-Düngung bedürftiger Kulturen ausgebracht.



Abbildung 10:

Wirkungsgeschwindigkeit verschiedener Kalkdünger

pH-Wert und Nährstoffverfügbarkeit

Der pH-Wert ist das Maß für die Wasserstoff-Ionen-(H⁺)-Konzentration in der Bodenlösung. Bei pH 7 (neutral) stehen die sauer wirkenden H⁺-Ionen und die basisch wirksamen OH⁻-Ionen in Gleichgewicht. Fällt der pH-Wert um eine pH-Stufe, steigt die Säurekonzentration um das Zehnfache; fällt der pH-Wert um zwei Stufen, so steigt sie um das Hundertfache an. Zwischen Bodenreaktion (pH-Wert) und Nährstoffverfügbarkeit der Haupt- und Spurenelemente besteht ein enger Zusammenhang.

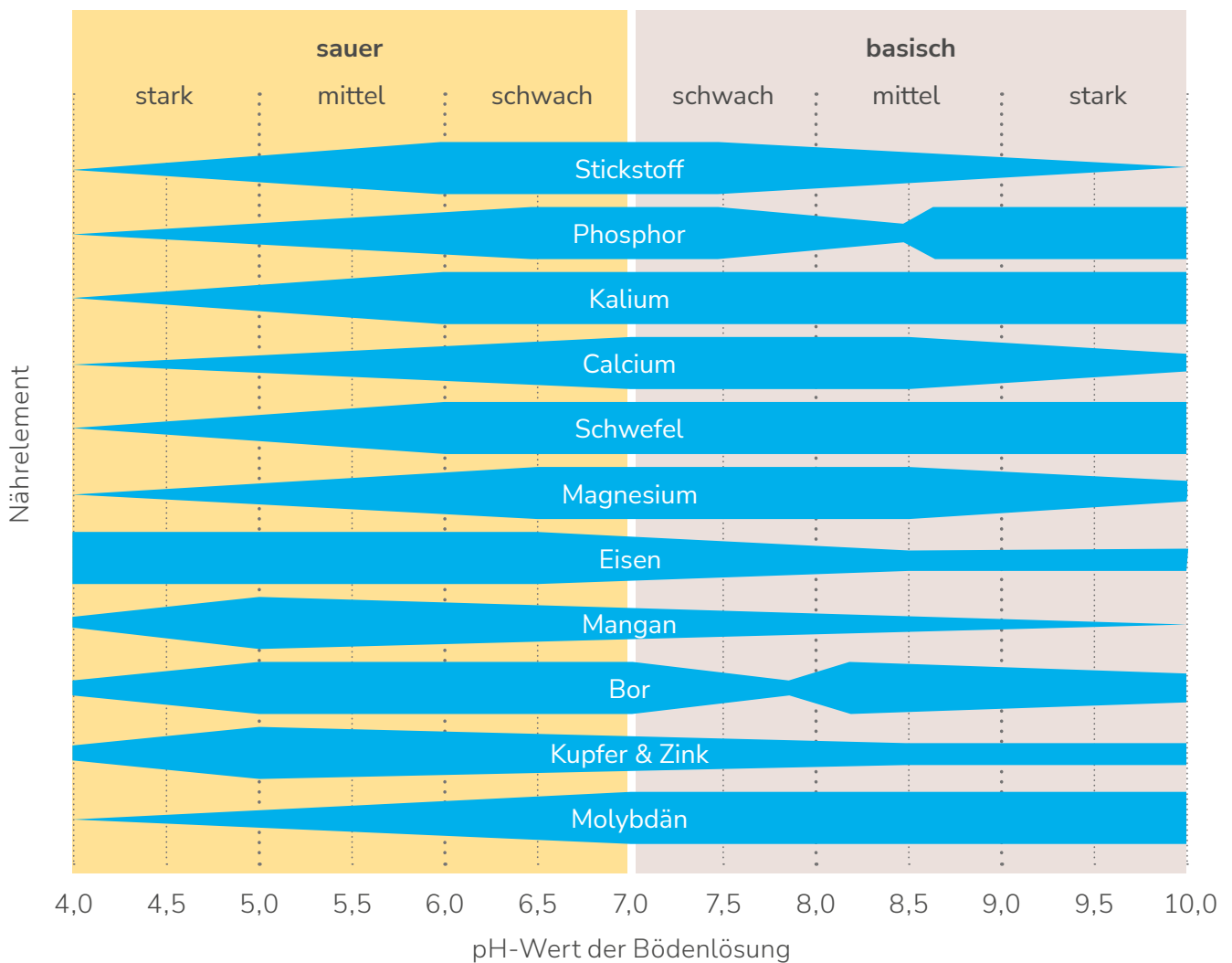


Abbildung 11:

Nährstoffverfügbarkeit in Abhängigkeit des pH-Werts (Beitsma et al., 2011)

3.1.6 Magnesium

Der Magnesiumgehalt im Boden ist vorwiegend abhängig vom geologischen Ausgangsmaterial, aber auch vom Verwitterungsgrad und vom Grad der Bodenbildung. Durch Gesteinsverwitterung geht Magnesium verloren. Zu den typischen Mg-Mangelstandorten gehören leichte Muschelkalk-, reine Kalkstein- und Schotterböden. Besonders arm an Magnesium sind jedoch Sandböden. Böden aus Dolomit und Basalt enthalten dagegen viel Magnesium. Von fachlicher Seite besteht die Forderung, Magnesium in die Standard-BU aufzunehmen.

Magnesium ist ähnlich wie Kalzium im Boden gut beweglich, so dass auf leichten Böden beachtliche Verluste durch Verlagerung und Auswaschung eintreten können. Durch überhöhte S-Düngermengen wird das Problem noch verschärft.

In der Pflanze ist Magnesium zentraler Baustein des Chlorophylls und an über 300 Enzymfunktionen besonders im Eiweißstoffwechsel (Anhäufung von Amiden, schlechte N-Verwertung) und im Kohlenhydratstoffwechsel (Tausendkornmasse, Siebsortierung) beteiligt.

Funktionen in der Pflanze

- Zentralatom im Chlorophyll, steigert dadurch die Photosyntheseleistung
- Steuerung von Stoffwechselfvorgängen, wie der Karotinsynthese und der Nitratreduktion in der Pflanze
- Steigert den Proteingehalt und das Hektolitergewicht des Getreidekorns

Mangelsymptome werden zuerst an den mittleren und älteren Blättern sichtbar. Zuvor wird bereits das Wurzelwachstum beeinträchtigt. (BILD)



Abbildung 12:

Magnesiummangelsymptome bei Mais (links, K+S) und Auswirkungen unterschiedlicher Magnesiumernährung auf Winterweizen (rechts, Cakmak)

Magnesiumbedarf und Düngungsempfehlungen

Magnesium steht bei der Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen in Konkurrenz mit Kalium, Calcium und Ammonium. Daher muss der Magnesiumdüngung besondere Aufmerksamkeit zukommen bei:

- ammoniumbetonter N-Düngung (Gülle, AHL, Harnstoff, DAP, ASS, SSA)
- auf Böden mit sehr niedrigem pH-Wert (Aluminium-Mg – Konkurrenz)
- auf Böden mit hohem Gehalt an freien Kalk (Ca-Mg – Konkurrenz)
- Aufkalkungsmaßnahmen mit Mg-freien oder Mg-armen Kalken (z. B. Carbokalk)
- sehr hohen Kaligehalten im Boden
- hohem Blattfruchtanteil, intensiver Grünlandnutzung und hohem Ertragsniveau (hoher Mg-Bedarf)
- und natürlich bei niedrigen Mg-Bodenwerten (z. B. nach hohen Niederschlägen)

Die Düngung sollte am spezifischen Bedarf der angebauten Frucht ausgerichtet sein. Der Magnesiumentzug der landwirtschaftlichen Kulturen liegt zwischen 20 und 80 kg MgO/ha und Jahr. Bei einer Erhaltungsdüngung sind weiterhin die Standortbedingungen sowie die aktuelle Bodenversorgung zu berücksichtigen. Diese wird, ähnlich der Versorgung von Grundnährstoffen, nach der VDLUFA-(CAL-)Methode in Gehaltsklassen angegeben. Diese wird bestimmt, indem es mit einer Calciumchlorid (CaCl₂)-Lösung extrahiert wird.

Tabelle 11:

Gehaltsklassen für Magnesium in Acker- und Grünland und daraus abgeleitete Düngerbemessung in Bayern (CAL-Methode)

Gehaltsstufe	MgO (mg/100g Boden)			Düngeempfehlung (kg MgO/ha)
	Ackerboden		Grünland	
	Leicht	Mittel und schwer		
A	< 3	< 5	< 7	75–100
B	3–6	5–9	< 10	50–100
C	7–10	10–20	10–20	0–40
D	11–49	21–49	21–30	0–20
E	> 49	> 49	> 30	0

Für die Mg-Düngung leiten sich aus den standort- und bodenspezifischen Anforderungen Handlungsempfehlungen ab:

- Auf Böden, die gleichzeitig kalk- und magnesiumbedürftig sind, werden bevorzugt Mg-haltige Kalke eingesetzt, zumal das Magnesium in diesen Düngemitteln preiswert ist und keinen Mehraufwand erfordert. Für die Ausbringung sind die Monate nach der Getreideernte am besten geeignet.
- Auf Böden ohne Kalkbedarf sollte die erforderliche Magnesiumzufuhr in Form von Magnesiumsulfat erfolgen. Dies gilt ebenso für Böden mit freiem Kalk. Auf auswaschungsgefährdeten Böden empfiehlt sich die Frühjahrsdüngung.
- Um dem hohen Mg-Bedarf des Maises Rechnung zu tragen und sein geringes Nährstoffaneignungsvermögen zu berücksichtigen, gibt es auf Mangelstandorten die Möglichkeit, die Unterfußdüngung durch Kieserit zu ergänzen.
- Magnesiumdünger in sulfatischer Form enthalten in beachtlichen Mengen den Pflanzennährstoff Schwefel als willkommenen Partner.

Akuter oder latenter Mg-Mangel kann über die Mg-Blattdüngung trotz geringer Ausbringmengen schnell behoben werden (sehr hoher Wirkungsgrad). Die Blattdüngung kann die Bodendüngung jedoch nicht ersetzen, sondern nur ergänzen.

Für die Düngung spielen vier Formen eine Rolle:

- Magnesiumcarbonat ($MgCO_3$) in kohlensaurem Magnesiumkalk und in verschiedenen PK- und NPK-Düngern sowie i. d. R. im Kalkammonsalpeter
- Magnesiumoxid (MgO) im Magnesium-Branntkalk
- Magnesiumsilikat in Düngemitteln, die aus Hochofenschlacke gewonnen werden (z.B. Hüttenkalk)
- Magnesiumsulfat ($MgSO_4$) z.B. in Korn-Kali und Patentkali, Kieserit, Bittersalz und Polysulfat

Während Magnesium in Carbonat-, Oxid- oder Silikatform den Pflanzen erst dann zugänglich ist, wenn es in austauschbarer, pflanzenverfügbarer Form vorliegt, ist Magnesiumsulfat gut wasserlöslich und für die Pflanzen sehr schnell verfügbar. Für alle Mg-haltigen Kalke gilt, dass die Mg-Wirkung langsam und nachhaltig ist und mit steigender Mahlfeinheit zunimmt.

Bei der Anwendung von magnesiumhaltigen Düngemitteln ist ferner zu beachten: Magnesiumsulfat bleibt ohne Einfluss auf die Bodenreaktion (= pH-neutral), während Mg-haltige Kalke die Bodenreaktion zur alkalischen Seite verschieben. Außerdem wirkt das Magnesiumsulfat im Gegensatz zu den Magnesiumformen in den Kalken unabhängig vom pH-Wert und Ausbringungszeitpunkt.

Bei der kombinierten Gabe von NP und Mg-Sulfat (z.B. Kieserit) bildet sich unter Einfluss von Feuchtigkeit Ammonium-Magnesium-Phosphat (AMP = Struvit). Durch diese Bindung an Magnesium wird die Bildung von Calciumphosphat, das längerfristig zur Phosphatalterung führt, gemindert. Struvit ist sehr stabil, unterliegt jedoch nicht dem Alterungsprozess und damit der Festlegung des Phosphates durch Kalk. Insbesondere auf Standorten mit hohem pH-Wert und auf frisch gekalkten Böden kommt dieser Vorteil zum Tragen. Die Nährstoffe im Struvit (N, P, Mg) bleiben nachhaltig, auch über einen längeren Zeitraum pflanzenverfügbar, der pH-Wert ist leicht sauer.

3.2 Mikronährstoffe

Neben den Makronährstoffen benötigen die Pflanzen genau acht verschiedene Mikronährstoffe, auch Spurenelemente genannt, wovon Bor (B), Mangan (Mn), Zink (Zn), Kupfer (Cu), Molybdän (Mo) und Eisen (Fe) deutlich im Vordergrund stehen. Chlorid (Cl-) und Nickel (Ni) sind normalerweise in den Böden ausreichend vorhanden. Andere Spurenelemente sind für Pflanzen keine essenziellen Nährstoffe, sondern gelangen nur als Begleitelemente mit dem Saftstrom in die Pflanze.

Der Mikronährstoffgehalt der Böden ist stark abhängig vom geologischen Ausgangsmaterial. Akuter Mikronährstoffmangel bei Kulturpflanzen ist allerdings viel häufiger auf unzureichende Verfügbarkeit als auf absolut niedrige Bodengehalte zurückzuführen.

Die Verfügbarkeit hängt im Wesentlichen vom Wassergehalt des Bodens und dem pH-Wert ab. Bei steigendem pH-Wert sinkt die Verfügbarkeit der Mikronährstoffe, außer bei Molybdän, welches durch Kalkung mobiler wird. Im Bereich des für die einzelnen Bodenarten anzustrebenden pH-Wertes ist in der Regel eine für die Pflanzenernährung ausreichende Verfügbarkeit der Mikronährstoffe ab pH 6,5 sichergestellt. Latenter oder vorübergehender Mangel tritt vorrangig in Trocken- und Kälteperioden auf.

Mikronährstoffdünger unterscheiden sich generell in ihrer Löslichkeit und

damit in ihrer Wirkungsgeschwindigkeit. Bei nicht wasserlöslichen ist in der Deklaration nur der Gesamtgehalt eines Nährstoffes im Produkt angegeben. Wasserlösliche Nährstoffverbindungen sind generell als wasserlöslich gekennzeichnet. Wasserlösliche Anteile in Mischformen sind als wasserlöslich gekennzeichnet, wenn deren Gehalt mehr als 25 % beträgt.

Mikronährstoffe sind immer in Elementform deklariert, Hauptnährstoffe, wie z. B. Magnesium, aber als Oxid. Die Kennzeichnung „wasserlösliches Magnesiumoxid“ bedeutet daher nur, dass das Magnesium in wasserlöslicher Verbindung vorliegt. Ist im Spurennährstoffdünger jedoch reines, nicht wasserlösliches Magnesiumoxid enthalten, dann entfällt bei der Gehaltsangabe der Zusatz „wasserlöslich“.

Die gezielte Düngung mit Mikronährstoffen bedarf zunehmender Beachtung bei höheren Erträgen und damit auch höheren Entzügen. Besonders beim Einsatz von hochkonzentrierten Mineraldüngern ohne Nebenbestandteile ist die Spurennährstoffzufuhr über den Boden oder als Blattdünger nicht zu vernachlässigen.

Zur Sicherung der Versorgung über den Boden stehen mit Mikronährstoffen angereicherte Düngemittel oder Konverterkalke mit Mikronährstoffen als Nebenbestandteil zur Verfügung. Eine vorbeugende Blattdüngung ist ebenfalls immer möglich. Bei akutem Mangel muss die Pflanze aber direkt über das Blatt mit Mikronährstoffen gedüngt werden. Dazu sind wasserlösliche Formen (Chelate, Salze) mit schneller Wirkung auszuwählen.

Im Grünland hat die Mikronährstoffdüngung speziell bei Kupfer besonde-

Tabelle 12:

Entzug von Spurennährstoffen in g/ha

Kultur	Bor	Mangan*	Zink	Kupfer
Getreide, 80 dt/ha Korn Korn + Stroh	25–35 40–50	300–600 500–800	100–200 300–400	30–40 50–60
Zuckerrüben, 600 dt/ha Rübe Rübe + Blatt	250–350 450–550	300–400 600–700	150–200 250–350	50–60 80–90
Raps, 35 dt/ha Korn	250–500	1.300–2.500	400–700	30–60
Silomais, 140 dtTM/ha Gesamtpflanze	130–250	2.400–3.600	310–380	100–200
Kartoffeln, 400 dt/ha Knolle	60–160	50–60	80–160	60

* Bei guter Mangan-Verfügbarkeit können die Entzüge deutlich über dem Düngbedarf liegen

re Bedeutung, da es zugleich zur Versorgung der Tiere benötigt wird. Das für Tiere essenziellen Spurenelement Selen ist kein Pflanzennährstoff, wird aber bei dessen Düngung von den Pflanzen sehr gut angereichert.

Tabelle 13:

Wichtige Mikronährstoffe und ihre Mangelursachen Ernteentzug/ha

Ernteentzug/ha	Mangel häufig bei		Mangel verstärkt durch
	Pflanzenart	Böden*	
Eisen (Fe) bis 1,5kg	Obstarten Wein Zierpflanzen	pH > 6,5	überzogene Kalkung
Mangan (Mn)** bis 2,5kg	Hafer Rüben und Raps Mais Kartoffeln Körnerleguminosen Obstarten	pH > 6	überzogene Kalkung Trockenheit gute Durchlüftung
Zink (Zn) 100–400g	Mais und Raps Obstarten Wein Hopfen	pH > 6,5 oder < 5	überzogene Kalkung
Kupfer (Cu) 50–200g	Mais Getreidearten Zierpflanzen Gemüsearten	pH > 6 und viel organische Substanz	Trockenheit
Bor (B) 100–500g	Raps Rüben und Mais Luzerne Tomaten und Kohl Obstarten Wein	pH > 7	Trockenheit überzogene Kalkung
Molybdän (Mo) wenige g	Leguminosen Blumenkohl Kruziferen	pH > 6	physiologisch saure N-Dünger

* Auf leichten Böden eher als auf mittleren und schweren Böden

** Bei sehr guter Mangan-Verfügbarkeit können die Entzüge deutlich über dem Düngbedarf liegen

3.2.1 Mangan

Die physiologische Bedeutung des Mangans im Stoffwechsel der Pflanze liegt vor allem in der Fähigkeit zum Wertigkeitswechsel, in der Steuerung von Oxydations- und Reduktionsvorgängen sowie des Kohlehydrat- und Eiweißstoffwechsels. Es ist an zahlreichen Enzymreaktionen beteiligt, die zentrale Aufgaben bei der Zucker-, Kohlenhydrat- sowie Stärkeeinlagerung und Zellulosebildung in der Pflanze erfüllen.

Die Verfügbarkeit von Mangan im Boden ist stark abhängig von der jeweiligen Bodenart. Insbesondere auf Böden mit höheren pH-Werten (>6,5) und aufgrund des verfügbaren Sauerstoffs und der resultierenden Oxidation des Mangans in gut durchlüfteten Böden ist die Manganverfügbarkeit eingeschränkt. Dies gilt vor allem für Moorböden, stark gekalkte Böden sowie humose Sandböden in Verbindung mit Trockenheit. Typische Mangelsymptome sind beispielsweise bei Gerste nach Aussaat unter nassen Bedingungen und daraus resultierenden Verdichtungen in den Bereichen neben der verdichteten Fahrspur erkennbar. Häufig, insbesondere aber auf zur Festlegung neigenden Böden, wie z.B. stark Carbonat-haltigen Niedermoorböden, ist Manganmangel durch Bodendüngung nicht zu beheben. Dagegen bringen jährliche Blattspritzungen mit maximal 1,5%iger Lösung von Mangansulfat (4 - 6 kg in 400 l Wasser) bzw. Manganchelat (1 - 2 l/ha bzw. 0,75 - 1,0 kg/ha bei festen Chelaten) meist gute Ergebnisse. Zur Behebung eines latenten Manganmangels bietet sich die Applikation von Blattdüngern in Kombination mit einer Pflanzenschutzmaßnahme an. In der Praxis verbreitet ist die Mangandüngung bei Wintergerste im Herbst. Entscheidend für eine gute Wirksamkeit der Maßnahme ist eine ausreichend große Masse junger Blätter. Der Einsatz physiologisch saurer Dünger (schwefelsaures Ammoniak, Ammonsulfatsalpeter etc.) verbessert die Mn-Verfügbarkeit.

Tabelle 14:

Richtwerte für Mangangehalte (mg/kg Boden) in Ackerböden (CAT-Methode)

Gehaltsstufe	leichte Böden (S-I'S) pH-Wert					mittlere und schwere Böden (IS-T)
	< 5,0	5,0-5,5	5,6-6,0	6,1-6,5	> 6,5	ohne pH-Begrenzung
A	< 3	< 6	< 10	< 25	< 30	< 30
C	3-8	6-15	10-30	25-50	30-60	30-60
E	> 8	> 15	> 30	> 50	> 60	> 60



Abbildung 13:
Manganmangelsymptome bei Wintergerste (links) und Raps (rechts) (K+S)

3.2.2 Zink

Die Löslichkeit von Zink geht mit steigendem pH-Wert und bei sehr hohen Phosphatgehalten im Boden zurück. Zinkmangel kann daher auf neutralen bis alkalischen, Carbonat-reichen Böden, aber auch nach einer stärkeren Kalkung auftreten. Blattreiche, schnellwachsende Kulturen wie Mais, Hopfen und Buschbohnen, haben einen besonders hohen Zinkbedarf. Im klassischen Ackerbau dient Mais gar als Zeigerpflanze für Zinkmangel. Typisch sind weißgelbe Streifen, ein gestauchter Wuchs sowie Chlorosen und Einbuchtungen an den Blättern.



Abbildung 14:
Zinkmangelsymptome bei Mais (links) und Sojabohnen (rechts) (K+S)

Tabelle 15:

Richtwerte für Zinkgehalte (mg/kg Boden) in Ackerböden (CAT-Methode) und Düngeempfehlung in kg Zn/ha

Gehaltsstufe	mg Zn/kg (alle Bodenarten)	Bodendüngung kg Zn/ha für 3–4 Jahre	Blattdüngung kg Zn/ha
A	< 1,1	7–10	0,3
C	1,1–3,0	5–7	0,3
E	> 3,0	0	0

3.2.3 Bor

Für eine Blattdüngung mit Bor ist eine Aufwandmenge von 200 – 400 g Bor/ha zu empfehlen. Zu beachten ist dabei, dass nur Präparate auf Basis von Borsäure den pH-Wert der Spritzlösung leicht absenken, während komplexe Borverbindungen, wie Borethanolamin, den pH-Wert der Spritzlösung erhöhen. Das kann negative Folgen haben für die Stabilität und Wirksamkeit beigemischter Pflanzenschutzmittel. Insbesondere die Wirksamkeit resistenzgefährdeter Pyrethroide (Insektizidwirkstoffe) wird teilweise stark herabgesetzt. Aus diesem Grund ist eine gründliche Planung der Mischungspartner und Spritzfolgen entscheidend. Mit phosphorsäurehaltigen Blattdüngern kann der pH-Wert der Spritzbrühe wieder abgesenkt und die Wirksamkeit der Insektizide erhalten werden.

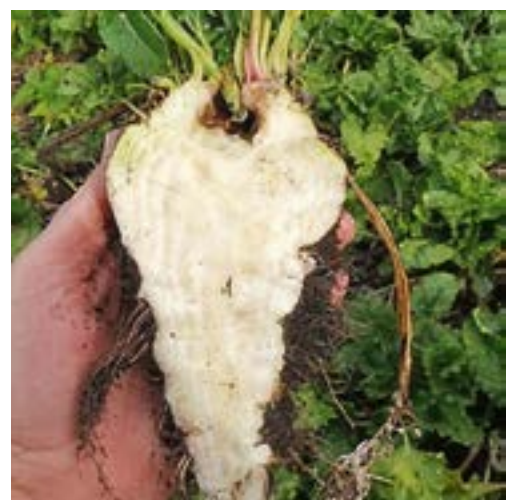


Abbildung 15:

Bormangelsymptome bei Kartoffeln (links) und Zuckerrüben (rechts) (K+S)

Tabelle 16:

Richtwerte für Borgehalte (mg/kg Boden) in Mineralböden auf Ackerland (CAT-Methode)

Gehaltsstufe	Bodenart			
	S	l'S	lS	sL-T
pH-Wert ≤ 6,0*				
A	< 0,10	< 0,12	< 0,15	< 0,20
C	0,10–0,30	0,12–0,40	0,15–0,50	0,20–0,60
E	> 0,30	> 0,40	> 0,50	> 0,60
pH-Wert > 6,0				
A	< 0,15	< 0,20	< 0,25	< 0,35
C	0,15–0,40	0,20–0,60	0,25–0,80	0,35–1,00
E	> 0,40	> 0,60	> 0,80	> 1,00

* Die CAT-Methode ist für die Untersuchung von Böden mit einem pH-Wert < 5 auf den Borgehalt nicht geeignet. Es wird daher auf diesen Böden empfohlen erst ein Jahr nach erfolgter Kalkung die Bodenuntersuchung nach der CAT-Methode durchzuführen.

Tabelle 17:

Empfohlene Bordüngung in Abhängigkeit vom Borgehalt des Bodens (Bodendüngung)

Gehaltsstufe	empfohlene Bordüngermenge kg B/ha			
	leichte Böden		mittlere und schwere Böden	
	Mais, Raps, Kohl	Rüben, Luzerne	Mais, Raps, Kohl	Rüben, Luzerne
A	0,4–0,8	1,0–1,5	0,5–1,0	1,0–2,5
C	0,5	0,5	0,5–1,0	0,5–1,0
E	0	0	0	0

3.2.4 Kupfer

Für die Blattdüngung eignen sich besonders Cu-Chelatdünger (bis 15 % Cu, ca. 0,3 kg Cu-Chelat/ha in 400 l Wasser), aber auch Cu-Sulfat (stark ätzend). Auch als Suspension formuliertes Kupfer kann die Pflanzen übers Blatt ernähren. Blattspritzungen sind frühzeitig zu applizieren (z.B. bei Getreide bereits zur Bestockung). Nach Auftreten der ersten Mangelsymptome während des Schossens bzw. Ährenschiebens ist keine Abhilfe mehr möglich. Da Kupfer eine starke Verdrängungswirkung von Mangan zur Folge hat, sollte eine Cu-Düngung immer mit einer Mangandüngung kombiniert werden.

Tabelle 18:

Richtwerte für Kupfergehalte (mg/kg Boden) in Ackerböden (CAT-Methode) und Düngeempfehlung in kg Cu/ha (Bodendüngung)

Gehaltsstufe	leichte Böden und stark humose Böden (S-I'S)	mittlere und schwere Böden (IS-T)	empfohlene Düngergaben kg Cu/ha
A	< 0,8	< 1,2	5-10
C	0,8-2,0	1,2-4,0	1-3
E	> 2,0	> 4,0	0



Abbildung 16:

Kupfermangelsymptome bei Gerste (links) und Weizen (rechts) (Yara)

3.2.5 Eisen

Eisen (Fe) ist ein essenzielles Mikronährstoffelement in der Pflanzenernährung, das trotz seines häufig hohen Gehalts in Böden oft nur in unzureichender Menge pflanzenverfügbar ist. Es spielt eine zentrale Rolle in zahlreichen physiologischen Prozessen, insbesondere in der Elektronentransportkette

der Photosynthese und Atmung, sowie bei der Chlorophyllsynthese. Eisen ist Bestandteil von Stoffen in der Pflanze, die für die Energieumwandlung und den Stoffwechsel unverzichtbar sind. Ein Mangel führt typischerweise zu Chlorosen junger Blätter, da Eisen in der Pflanze nicht remobilisierbar ist.



Abbildung 17:

Eisenmangelsymptome bei Winterweizen (links) und Wein (rechts) (K+S)

In der Praxis stellt die Eisenversorgung vor allem auf kalkreichen, alkalischen Böden eine Herausforderung dar. Hier liegt Eisen überwiegend in oxidiert, schwer löslicher Form vor, wodurch die Aufnahme durch die Wurzeln stark eingeschränkt ist. Besonders empfindlich reagieren Kulturen wie Soja, Mais, Weinreben und Obstgehölze. Strategien zur Verbesserung der Eisenverfügbarkeit umfassen die Auswahl geeigneter Sorten mit hoher Eisenaufnahmefähigkeit, die Förderung der Wurzelaktivität durch organische Substanz und die gezielte Anwendung von Eisenchelaten über das Boden- oder Blattdüngungsverfahren.

Ein praxisrelevanter Ansatz ist die Nutzung von Blattanalysen zur frühzeitigen Erkennung latenter Mangelsymptome, bevor es zu Ertragseinbußen kommt. Auch die pH-Wert-Regulierung im Wurzelraum durch ammoniumbetonte Düngung oder die Förderung der Rhizosphärenaktivität durch Zwischenfrüchte kann die Eisenmobilisierung verbessern. In Systemen mit hohem pH-Wert oder intensiver Phosphatdüngung sollte die Eisenversorgung regelmäßig überprüft werden, da Phosphat die Eisenaufnahme antagonistisch beeinflussen kann. So lässt sich durch gezielte Maßnahmen die Eisenversorgung optimieren und die physiologische Leistungsfähigkeit der Pflanzen sichern.

3.2.6 Molybdän

In Pflanzen ist Mo für einige Enzyme als Co-Faktor notwendig, insbesondere für die Nitratreduktase und die Sulfitreduktase [oder Nitratreduktion und S-Assimilation]. Ferner ist es als Co-Faktor der Nitrogenase für die bakterielle N₂-Fixierung essenziell. Ein Mangel führt dann zur Anreicherung von Nitrat bzw. zu physiologischem N-Mangel.



Abbildung 18:

Molybdänmangelsymptome bei Raps (links, K+S) und Roggen (rechts, Yara)

Molybdän wird von Pflanzen in Form von Molybdat aufgenommen. Die Verfügbarkeit von Molybdat ist bei niedrigen pH-Werten aufgrund der erhöhten Molybdat-Bindung grundsätzlich vermindert. Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit können pflanzliche Transportsysteme nicht zwischen Sulfat, Molybdat und Selenat unterscheiden (Exklusionsunvermögen). Dies führt in der Praxis zu geringerer Mo und Se-Versorgung mit steigender S-Düngung, während der umgekehrte Fall wegen der Mengenrelationen nicht relevant ist. Bei Anwendung S-haltiger Düngemittel ist aber nicht automatisch eine Mo (oder Se) Ergänzung notwendig. Lediglich bei marginaler Mo-Versorgung drückt eine S-Zufuhr diese in den Mangelbereich. Auf leichten, sauren Böden ist bei hoher S-Zufuhr daher am ehesten mit Molybdän-Mangel zu rechnen. Aktuell liegen jedoch keine Hinweise auf eine unzureichende Molybdän-Versorgung landwirtschaftlich genutzter Flächen in Deutschland vor. Einer Mo-Düngung sollte somit eine Pflanzenuntersuchung vorausgehen.

3.2.7 Chlor

Obwohl wenig beachtet, ist Chlor in Form von Chlorid (Cl⁻) für Pflanze, Tier und Mensch ein lebensnotwendiger Mineralstoff. Der entscheidende Nutzen liegt darin, dass das Chlorid mit dem ebenfalls negativ geladenen Nitrat konkurriert und dadurch hohe und somit unerwünschte Nitratgehalte in der Pflanze verhindert. Pflanzen können Chlorid, je nach Angebot, in großen Mengen (30 – 130 kg/ha) aufnehmen. Dieses Chlorid stammt einerseits aus verwitterten Tonmineralen und zusätzlich aus chloridhaltigen Mineraldüngern wie z.B. Kali-Düngern (siehe auch Kap. 3.1.3).

Chlorid ist in diesem Zusammenhang als ein negativ geladenes Ion oder Anion (Cl⁻) zu betrachten und hat nichts zu tun mit Chlor und dessen teilweise negativen Eigenschaften in elementarer Form (Chlorgas).

3.2.8 Nickel

Die zentrale Rolle von Nickel (Ni) liegt in der Funktion als Kofaktor des Enzyms Urease, das für die Hydrolyse von Harnstoff zu Ammonium verantwortlich ist. Ohne ausreichende Nickelversorgung kann Harnstoff nicht effizient in pflanzenverfügbaren Stickstoff umgewandelt werden, was insbesondere bei Kulturen mit Harnstoffdüngung zu Wachstumsstörungen führen kann. In der Praxis spielt Nickelmangel sowie eine Nickeldüngung keine Rolle, weshalb auch Pflanzen- und Bodenanalysen auf Nickel keinerlei praktische Relevanz haben.

3.3 Weitere nützliche Elemente

Neben den essenziellen (lebensnotwendigen) Elementen der Pflanzenernährung erfüllen weitere Elemente zentrale Aufgaben im Pflanzenbau. Sie werden entweder als Boden- bzw. Pflanzenhilfsstoffe eingesetzt oder wirken sich positiv auf die Produktionsziele (Qualität des Ernteprodukts oder Futterwert) aus.

3.3.1 Silizium / Kieselsäure

Kieselsäure ist kein essenzieller Pflanzennährstoff, aber ein Wirkstoff mit positiver Einflussnahme auf Vorgänge im Boden und in der Pflanze. Sie unterstützt infolge ihrer hohen Quellfähigkeit z.B. die Kalkwirkung, indem sie Bodenteilchen verkittet und somit die Krümelstabilität sowie den Wasserhaushalt und den Luftaustausch verbessert. Des Weiteren besetzt Kieselsäure dieselben Bindungsstellen wie Phosphat. Daher kann sie bereits an Bodenteilchen gebundenes Phosphat wieder freisetzen oder eine schnelle Festlegung von gedüngtem Phosphat verhindern. Es handelt sich dabei um reine Austauschvorgänge, so dass weder gedüngtes Rohphosphat zusätzlich aufgeschlossen noch die Phosphatdüngung dauerhaft eingespart werden könnte. In der Summe aber wird die Ausnutzung des Düngerphosphates verbessert. Die Pflanzen nutzen Kieselsäure hauptsächlich zur Gewebestabilisierung und zur Krankheitsabwehr. Dies geht insbesondere auf die in der Zellwand gebildeten Phytolite zurück, mit diversen positiven Wirkungen für die Resilienz der Pflanzen gegenüber abiotischem und biotischem Stress.

In der Landwirtschaft wurde die Kieselsäurewirkung erst richtig bekannt mit dem Einsatz von Thomasmehl. Mit dem thermischen Aufschluss im Hochofen werden nämlich sämtliche Siliziumverbindungen in silikatischen Kalk umgewandelt. Heute sind der Hütten- und Konverterkalk die einzigen Dünger mit pflanzenverfügbarer Kieselsäure.

Letzterer enthält etwa 12 % Silizium. In diesem Dünger stimmen in etwa der Gesamtgehalt an Silizium (SiO_2) und der Gehalt an dem Silizium überein, das im Boden als Kieselsäure freigesetzt wird.

Auch im Sand ist Silizium, aber eben keine Kieselsäure. So wird bei Bodenhilfsstoffen und Gesteinsmehlen irreführend immer auf den als SiO_2 umgerechneten Gesamtsiliziumgehalt der chemischen Analyse verwiesen und dieser dann, da es leider umgangssprachlich so üblich ist, als Kieselsäure bezeichnet. Düngemittel-rechtlich gibt es bis heute keine Vorschriften, wie Siliziumverbindungen oder deren Löslichkeiten anzugeben sind. Entscheidend für die Wirkungen im Boden und die Pflanzenaufnahme ist jedoch die Bindungsform und damit die Löslichkeit. Lösliche und damit pflanzenverfügbare Siliziumformen sind Wasserglas, freie Kieselsäure und thermisch aufgeschlossenes Silizium.

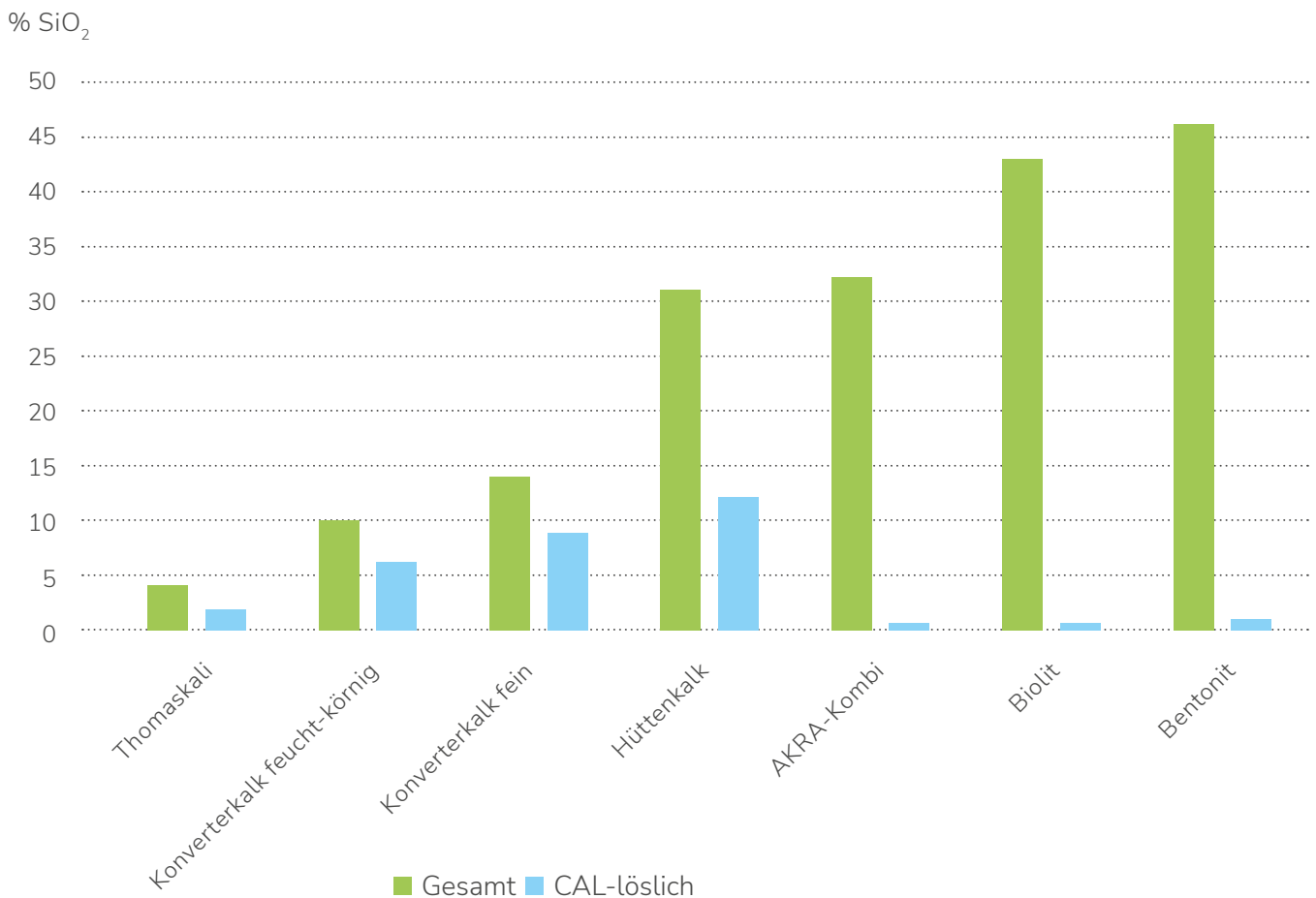


Abbildung 19:
Pflanzenverfügbarkeit von Silizium bei verschiedenen Düngemitteln

3.3.2 Selen

Selen ist kein Spurennährstoff im Sinne der Pflanzenernährung, doch für Mensch und Tier ein essenzielles, also lebensnotwendiges Spurenelement. Es muss stets mit der Nahrung in ausreichenden Mengen aufgenommen werden, weil es vom Körper nicht selbst gebildet werden kann. Pflanzen brauchen Selen als Nährstoff nicht, aber sie nehmen es auf und reichern es auch an. Dabei ist zu beachten, dass Selen nur in der Form von Selenat hochgradig pflanzenverfügbar ist. Dafür wirkt Selenit u. U. nachhaltiger und wird bei neutralem pH-Wert rasch oxidiert. Ähnlich wie bei Molybdat und Sulfat besteht auch ein Aufnahmeantagonismus zwischen Selenat und Sulfat.

In der landwirtschaftlichen Praxis spielt Selen insbesondere in der Rinderhaltung eine Rolle. Unzureichende Selenernährung kann dort zu Gesundheitsproblemen führen. Kühe mit Selenmangel werden häufiger krank und

Kälber sind besonders anfällig. Neben der Zufuhr von Selen über Mineralfutter bietet sich hierfür auch die Möglichkeit, das Selenangebot über das Grundfutter zu verbessern.

Dazu bedarf es jedoch einer guten Selenversorgung im Boden. Insbesondere Süddeutschland weist diesbezüglich deutliche Defizite auf. Vor allem saure Standorte sind betroffen. Um die Selengehalte im Grundfutter auf ein Niveau von 0,1 mg Selen je kg TM (Grenzwert) anzuheben, reichen generell schon geringe Selengaben von nur wenigen Gramm (2-3 g Se/ha) pro Hektar. Hierfür bieten sich selenhaltige Dünger an. Um Selen jedoch über die gesamte Nutzungsperiode anzureichern, sind praktisch mehrere Gaben in dieser Größenordnung zu den einzelnen Aufwüchsen notwendig.

3.3.3 Natrium

Natrium ist für Pflanzen i.d.R. nicht essenziell (= lebensnotwendig), hat allerdings allgemein einen günstigen Einfluss auf den Wasserhaushalt der Pflanzen.

Es gibt allerdings einige Kulturarten, die durchaus relevante Na-Ansprüche aufweisen. Dazu gehören vor allem Rübe, Sellerie, Spinat sowie Raps, Gerste und Grünland. So zeigen z.B. Zuckerrüben bei unzureichender Na-Versorgung rascher Welkeerscheinungen, verbunden mit Ertragseinbußen. Darüber hinaus kann Natriumchlorid (NaCl) den Nitratgehalt im Spinat und Blattsalat senken.

Die Düngung mit Natrium auf Grünland erfolgt also nicht zur Steigerung des Massenertrages, sondern zur Verbesserung der Mineralstoffgehalte und Mineralstoffverhältnisse im Futter. Durch die Düngung mit Natrium in Form von Mg-Kainit kann die Schmackhaftigkeit des Futters und somit die Futteraufnahme verbessert werden. Gleichzeitig wird die Magnesiumaufnahme der Pflanzen gesteigert, was die Gefahr der Weidetetanie bei den Tieren mindert. Bei alleiniger Na-Düngung wird der Mg-Gehalt hingegen gesenkt, was auf einen Kationenantagonismus zurückzuführen ist. Für die Beweidung ist eine Düngung mit natriumhaltigen Düngern zu empfehlen, kann aber auch über angebotene Lecksteine den Tieren bereitgestellt werden. Bei einer hohen Kaliversorgung des Bodens ist mit niedrigen Natriumgehalten im Futter zu rechnen. Die Düngung erfolgt im Frühjahr.

Auf Standorten mit niedrigem Na-Gehalt (unter 2 mg/100 g Boden) ist die Anwendung Na-haltiger Düngemittel zu o.g. Kulturen durchaus vertretbar.

4. Nährstoffermittlung und Untersuchungsmethoden

4.1 Bodenuntersuchung

Zentraler Bestandteil der Düngebedarfsermittlung vieler Nährstoffe (insbesondere N, P, K und Kalkbedarf) stellen verschiedene Methoden der Bodenuntersuchung dar. Für N und P sind Untersuchungen sogar regulatorisch vorgeschrieben. Zunehmend rücken neben den Standarduntersuchungen (meist nach VDLUFA) auch wieder alternative Methoden mit einem stärkeren Fokus auf Mikronährstoffe in den Fokus. Letztere können aber auch mit den üblichen Methoden bestimmt und eingeordnet werden.

Laut DüV ist die Bodenuntersuchung auf den Phosphat-Gehalt verpflichtend für alle Flächen über einem Hektar und muss mindestens alle sechs Jahre erfolgen. Die Grundnährstoffe P und K sowie der pH-Wert sind auch Bestandteil der sog. Standard-BU. Die Untersuchung nach Magnesium und in speziellen Fällen weiteren Mikronährstoffen ist aus agronomischer Sicht anzustreben. Gleiches gilt für kürzere Intervalle in schwach versorgten Böden, wenn eine Aufdüngung erfolgt.

Die Kenntnis der Nährstoffgehalte im Boden ist die erste und wichtigste Orientierungshilfe für jeden Praktiker und Berater in Bezug auf die Düngebedarfsermittlung, auch im Hinblick auf die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben der Düngeverordnung.

In der Praxis stehen dem Landwirt inzwischen vermehrt Werkzeuge zur Verfügung, die eine präzise Handlungsempfehlung für eine ökonomisch und agronomisch optimale Düngeplanung ermöglichen. Nicht zuletzt digitale Werkzeuge können helfen zu bestimmen, welche Nährstoffgehalte für einen bestimmten Standort anzustreben sind (Versorgungsstufe C). Deshalb sind auch die Anforderungen an die BU im Laufe der Jahre deutlich gestiegen.

Häufig jedoch stehen die mit der BU festgestellten Nährstoffgehalte und die durch Düngung erzielten Mehrerträge nicht in enger Beziehung zueinander. Die Ursachen hierfür sind meistens entweder standortbedingt (Boden, Witterung) oder in pflanzenspezifischen Eigenheiten zu finden. Die Höhe der Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen wird nicht nur von den vorhandenen Nährstoffen, sondern auch von deren Verfügbarkeit und dem Aneignungsvermögen der verschiedenen Pflanzen- bzw. Kulturarten bestimmt. Die Nährstoffverfügbarkeit wiederum ist abhängig von zahlreichen Faktoren wie Wassergehalt, Temperatur, dem eingesetzten Düngemittel, Bodenart, Bodenstruktur, Durchwurzelbarkeit, Humusgehalt, pH-Wert und Festle-

gung.

Folglich darf die BU bezüglich ihrer Aussagekraft nicht überschätzt werden, da sie einige Unsicherheiten aufweist. Dennoch gibt es derzeit wohl kein besseres Instrument zur Düngerbedarfsermittlung als die BU. Sie wird daher auch künftig unverzichtbarer Bestandteil der Düngeplanung bleiben. Auch andere Methoden zur Düngerbedarfsermittlung wie zum Beispiel die Pflanzenanalyse und die Nährstoffbilanzierung haben ihre Schwächen. Bilanzierungen müssen um Zu- und Abschläge für Standort- und Witterungsfaktoren ergänzt werden, um den Düngebedarf korrekt zu ermitteln. Dies spricht für die laufende Anpassung während der Vegetationsperiode im Sinne einer dynamischen Düngebedarfsermittlung, wie sie in Abschnitt 4.3 beschrieben ist.

Neben den zeitlich variablen Umweltfaktoren und der damit einhergehenden Unsicherheit über die Nährstoffverfügbarkeit unterscheiden sich Flächen auch hinsichtlich der vorliegenden Böden. Das heißt: neben den konkreten Standortbedingungen variieren auch die Nährstoffgehalte innerhalb eines Schrages, teilweise sogar erheblich. Die vielfältige Abhängigkeit der über die Bodenuntersuchung ermittelten Nährstoffgehalte von spezifischen Standortfaktoren rechtfertigt ohne Weiteres Zu- oder Abschläge, in Einzelfällen sogar über die in Tabelle 19 genannten Düngungsziele in den einzelnen Gehaltsklassen hinaus.

Die Bodenuntersuchung ermittelt den Nährstoff- und Düngerbedarf mit Hilfe langjährig erprobter Standardmethoden. Die wichtigsten sind in der Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 19:

Versorgungsbereiche der Bodennährstoffe und allgemeine Düngungsempfehlungen

Gehaltsklasse	Düngung	Kalkung
A = sehr niedrig	stark erhöhte Düngung	Gesundungskalkung
B = niedrig	mäßig erhöhte Düngung	Aufkalkung
C = anzustreben (optimal)	Erhaltungsdüngung	Erhaltungskalkung
D = hoch	verringerte Düngung	keine Kalkdüngung
E = sehr hoch	vorübergehend keine Düngung	keine Kalkdüngung

Tabelle 20:

Wichtige Bodenuntersuchungsmethoden

Name	Bestimmung von
CAL-Methode (Calcium-Acetat-Lactat)	P, K
DL-Methode (Doppel-Lactat)	P, K
CaCl ₂ -Methode (0,01 M) (Calciumchlorid)	pH-Wert, Mg
EUF-Methode (Elektro-Ultra-Filtration)	N, P, K, Mg, Ca, B
Nmin-Methode nach DSN = Düngeberatungssystem Stickstoff	NO ₃ -N (nach Bodenschichten von je 30cm) NH ₄ -N, N-Gesamt
P-Wasser-Methode	P
CAT-Methode*	Spurenelemente Mn, Zn, Cu und Bor

* gilt in Bayern momentan nur für die vier Spurenelemente Mangan, Zink, Kupfer und Bor, für andere Spurenelemente wie z.B. Molybdän und Eisen werden andere Methoden verwendet

Fehlerquellen bei der BU sind oftmals eine unsachgemäße Probenahme und Probenaufbereitung bzw. -aufbewahrung (Bodenproben müssen gekühlt sein). Außerdem ist die BU nur eine Momentaufnahme des Nährstoffgehaltes. Auch die Witterung hat einen großen Einfluss auf die Mobilisierung weiterer Nährstoffe. Das betrifft vor allem die Nmin-Methode.

Die Nährstoffgehalte für Mineralböden werden in mg/100 g lufttrockenem Feinboden (< 2 mm) angegeben. Lediglich auf Moorböden werden die Nährstoffe auf das Bodenvolumen bezogen (mg/100 ml), weshalb hier die ermittelten Nährstoffgehalte je nach Humusanteil/Raumgewicht zur richtigen Interpretation mindestens halbiert werden müssen.

Die Bewertung der BU-Ergebnisse von Mineralböden unterstellt ein Krümmengewicht von 4,2 Millionen kg/ha (Raumgewicht 1,4 g/cm³, 30 cm Krümmertiefe, Steinfreiheit). Flachgründige Böden oder Böden mit hohem Steinanteil sollten wegen des eingeschränkten Wurzelraumes bei gleicher Ertragerwartung etwa um 5-10 mg höhere Nährstoffgehalte aufweisen.

Bodenreaktion (pH-Wert)

Unter Bodenreaktion versteht man die Konzentration der freien und austauschbaren Wasserstoff-Ionen (H⁺). Die Messgröße dafür ist der pH-Wert. Die Messung des pH-Wertes erfolgt in einer Bodensuspension (Aufschlamm-

mung) mit einer Messelektrode. Als Suspensionsmittel wird standardmäßig eine 0,01 molare CaCl₂-Lösung verwendet. Alternativ geht die pH-Wertmessung auch mit KCl-Lösung oder destilliertem Wasser als Suspensionsmittel. Der mit KCl-Lösung ermittelte pH-Wert ist im Vergleich zur Messung mit CaCl₂-Lösung niedriger, das Ergebnis bei der H₂O-Methode dagegen höher.

EUF-Methode

Aufschluss über die pflanzenverfügbaren Nährstoffe im Boden geben die in Tabelle 21 aufgeführten EUF-Richtwerte. EUF steht für Elektro- Ultra filtration und ist neben den klassischen Verfahren nach VDLUFA ein weiteres labortechnisches Verfahren mit dem Böden auf ihren Nährstoffgehalt hin untersucht werden können. Das grundlegende Prinzip ist eine vakuumunterstützte Wasserextraktion, beschleunigt und gesteuert durch variierte elektrische Spannung und Temperatur. In Deutschland werden Bodenuntersuchungen nach EUF-Methode vor allem durch den Bodengesundheitsdienst (BGD) angeboten, ein Unternehmen von Südzucker.

Tabelle 21:

EUf-Richtwerte (Bodengesundheitsdienst)

N-Aufdüngungsbedarf (kg N/ha)	0 50–100 > 160	= sehr niedrig = mittel = sehr hoch
Verfügbare Phosphormenge als Gesamt-EUF-P* (mg/100g Boden)	< 1,5 3,0–4,0 > 5,0	= sehr niedrig = mittel = sehr hoch
Verfügbare Kaliummenge (mittlerer Boden) Gesamt-EUF-K* (mg/100g Boden)	< 10 15–25 > 30	= sehr niedrig = mittel = sehr hoch
Verfügbare Magnesiummenge als Gesamt-EUF-Mg* (mg/100g Boden)	< 1,5 2,0–3,0 > 4,0	= sehr niedrig = mittel = sehr hoch
Verfügbare Calciummenge als Gesamt-EUF-Ca* (mg/100g Boden)	< 20 30–50 > 60	= sehr niedrig = mittel = sehr hoch

* Phosphor, Kali, Magnesium und Calcium = Elementform

Gesamt-EUF-P bzw. Gesamt-EUF-K umfasst jeweils die im Bescheid ausgewiesenen Fraktionen

P1 und P2 bzw. K1 und K2. Dabei entspricht in etwa (P1+P2) * 4 = CAL-Wert P₂O₅ und K1 + K2 = CAL-Wert K₂O

4.2 Pflanzenuntersuchung

Die Bodenuntersuchung zur Ermittlung der Nährstoffversorgung der bewirtschafteten Flächen reicht häufig nicht aus, ein Bewirtschaftungssys-

tem fachgerecht zu überprüfen. Die klassische Pflanzenanalyse bietet dem Landwirt eine sinnvolle Ergänzung der Bodenuntersuchungen. Über eine Pflanzenanalyse wird der Ernährungszustand der Pflanzen ermittelt, der sich deutlich von dem vorhandenen Nährstoffpool im Boden unterscheiden kann. Nur optimal ernährte Pflanzen bringen Höchstserträge – deshalb sollte die Pflanzenanalyse beim Nährstoffmanagement nicht fehlen.

Insbesondere bei stark auftretenden Mangelsymptomen und Wuchsdepressionen lohnt ein Blick auf die Nährstoffkonzentration in der Pflanze. Häufig konzentriert sich die Analyse dabei auf Mikronährstoffe, aber auch die Versorgung mit Grundnährstoffen und Stickstoff wird betrachtet. Unterschiedliche Boden- und Witterungsverhältnisse beeinflussen die Nährstoffaufnahme. Um den Erfolg und auch den richtigen Zeitpunkt der Düngung zu bestimmen, können begleitende Pflanzenanalysen die Düngeeffizienz unterstützen.

Tabelle 22:

Untersuchungszeitraum und Vorgehensweise bei der Pflanzenanalyse auf Mikronährstoffe

Kultur	Pflanzenorgan	Zeitspanne	definierte Richtwerte für				
			B	Cu	Mn	Mo	Zn
Getreide	Ges. oberird. Pflanze	BBCH 29–45		x	x		x
Mais	Mittlere Blätter bis zur Blüte durch Kolbenblätter	BBCH 21–75	x	x	x		x
Winterraps	Vollentwickelte Blätter	BBCH 53–65	x		x	x	
Grünland, Gras	Ges. oberird. Aufwuchs	vor 1. Schnitt		x	x		
Zuckerrüben	Blattspreiten von gerade voll entwickelten Blättern	BBCH 34–46	x	x	x	x	x
Kartoffeln	Gerade vollentwickelte Blätter	BBCH 51–79	x		x	x	
Luzerne, Rotklee	Gesamter oberird. Aufwuchs	BBCH 51–65	x	x	x	x	x
Bohnen, Erbsen	Vollentwickelte Blätter	BBCH 61	x	x	x		x
Sonnenblumen	Vollentwickelte Blätter	BBCH 61	x	x	x		x

Eine fachlich korrekte Interpretation der Analyseergebnisse sollte obligatorisch sein. So kann im Bedarfsfall der Mangel zeitnah mit einer Sofortmaßnahme behoben werden. Für eine langfristige Betrachtung müssen die Mobilisierungsbedingungen des Bodens berücksichtigt werden, um darauf aufbauend Blattdüngungen zu optimieren.

4.3 Sensortechnik und Digitale Werkzeuge

Neben den klassischen Laborgestützten Analysemethoden für Boden- und Pflanzenuntersuchungen stehen seit vielen Jahren bereits diverse Sensorensysteme und (digitale) Handwerkzeuge zur Bestimmung des Versorgungszustands von Pflanzen zur Verfügung. Die meisten Lösungen auf dem Markt beziehen sich dabei vor allem auf die Versorgung von Stickstoff. Einzelne Systeme leiten daraus eine Düngeempfehlung ab, die auf individuellen Algorithmen basiert. Der Landwirt hat durch die Verfügbarkeit der Technik die Möglichkeit, kurzfristig und kostengünstig Handlungsempfehlungen abzuleiten. Gleichzeitig kann die gewonnene Information in Systeme der Düngebedarfsermittlung integriert werden. Daraus entstehen dann, gestützt durch Informationen über die räumlich variablen Umweltzustände (Bodenart etc.), Entscheidungshilfesysteme für die angepasste Düngeplanung, -applikation und -dokumentation.

Als ein Beispiel ist das Konzept der dynamischen Düngebedarfsermittlung zu nennen, das eine Einordnung der marktverfügbaren Lösungen bietet und Landwirten so die Möglichkeit gibt, aus der Vielfalt der vorhandenen Werkzeuge und Systeme eine optimale Strategie für seinen Betrieb abzuleiten. Das Konzept wird schematisch durch Abbildung 20 dargestellt. Zudem ist unter dem nachfolgenden Link https://dam.iva.de/download/Gesamtkonzept_DEMAND_2025.pdf und dem linksstehenden QR-Code die Beschreibung des Konzepts der Dynamischen Düngebedarfsermittlung hinterlegt.



Unterschieden werden muss zwischen offline- und online-Lösungen, zwischen Kontaktsensoren bzw. Handwerkzeugen, Remote Sensing und Sensoren der Naherkundung (beispielsweise bei der Überfahrt). Während manche Systeme lediglich relative Unterschiede der Nährstoffversorgung über die Blattfarbe ausgeben, können andere spezifische Handlungsempfehlungen ableiten.

Der Wunsch eines allumfassenden Schnelltests mit Hilfe digitaler Werkzeuge bleibt jedoch auch mit den heutigen technischen Möglichkeiten unerfüllt. Bodenuntersuchungen und begleitende Pflanzenanalysen können bisher nicht durch Sensortechnik ersetzt werden. Digitale Lösungen sind aber ein wichtiger und weiterer Baustein für eine effiziente und angepasste Pflanzenernährung und sollten gleichwertig mit Boden- und Pflanzenanalysen zum Standardwerkzeug für Landwirte werden.

Grundannahmen

- Nmin Probe muss immer gezogen werden
- Düngbedarfsermittlung bleibt bestehen, wird aber an Realsituation angepasst durch Module

A (Grundlage)

- Ermittlung des Düngedarfs über oberirdische Biomasse als Richtwert
 - Online / offline
 - Invasiv / nicht-invasiv / kontaklos
- Herausforderung: Nachweis der digital ermittelten Werte muss ortssicher sein
- Ziel: Zeitliche Anpassung des Düngedarfs, Ermittlung des Versorgungszustandes und Abschätzung der Düngemenge

B (Ausbau zu A)

- Hintergrundinformationen für agronomische Orientierung durch
 - Biomassekarten (kurzfristig variabel)
 - Ertragskarten (rückblickend)
 - Teilflächen (fix)
 - Offizielle Bodenkarten (Art & Typ als Zusatzinformation) (fix)
 - Digitale Hof-Boden-Karten (fix)
- Herausforderung: Bodenkarten ungenau als Datengrundlage, Teilflächen nicht objektiv erfasst, Integration der Erfahrungswerte des Betriebs / Landwirts
- Ziel: Räumliche Anpassung des Düngedarfs

C (Ausbau zu A+B)

- Prognosen zur agronomischen Orientierung
 - Witterungsdaten
 - Mineralisierungsgrad
 - Teilflächen (fix)
 - Datenverarbeitung mittels Modell
- Herausforderung: Wie weit ist die Technik hierfür? + Wirtschaftlichkeit, nicht in DüV festschreiben
- Ziel: Optimierte zeitliche Planung der Düngemaßnahmen

Übergeordnete Ziele

- Düngedarfsmittlung durch digitale Tools ergänzt, Düngedarf kann über die Vegetationsperiode rechtssicher angepasst werden
- Weg zum Map Overlay Verfahren bereitet

Abbildung 20:

Konzept der dynamischen Düngedarfsmittlung

5. Düngersorten und -formen

5.1 Abgrenzungen

Düngemittel in verschiedener Form, egal ob organisch oder mineralisch, in flüssiger oder fester Form, als Blattdünger oder über den Boden stellen einen oder mehrere Nährstoffe den angebauten Kulturpflanzen zur Verfügung. Sie dienen dazu die Bodenlösung mit Nährstoffen anzureichern und tragen so zur Bodenfruchtbarkeit und Versorgung der Pflanzen bei. Sie sollten einen wesentlichen Gehalt eines Nährstoffs aufweisen und auch zur Versorgung mit eben diesem Nährstoff oder Nährstoffen ausgebracht werden. Handelbare Düngemittel müssen entweder über die nationale Düngemittelverordnung oder EU-weit über die EU-Düngeprodukteverordnung EU 2019/1009 (FPR) zugelassen werden. Davon abzugrenzen sind vor allem Boden- und Pflanzenhilfsstoffe, Biostimulanzien und Bodenverbesserer, da diese mit einem anderen Ziel als der direkten Nährstoffversorgung ausgebracht werden. Düngung ist also die direkte Versorgung des Bodens und der pflanzen mit Nährstoffen.

Daneben existieren Zusatzstoffe, wie bspw. Urease- und Nitrifikationsinhibitoren, die in direktem Zusammenhang mit der Düngung ausgebracht werden und die Nährstoffapplikation und -aufnahme beeinflussen sollen.

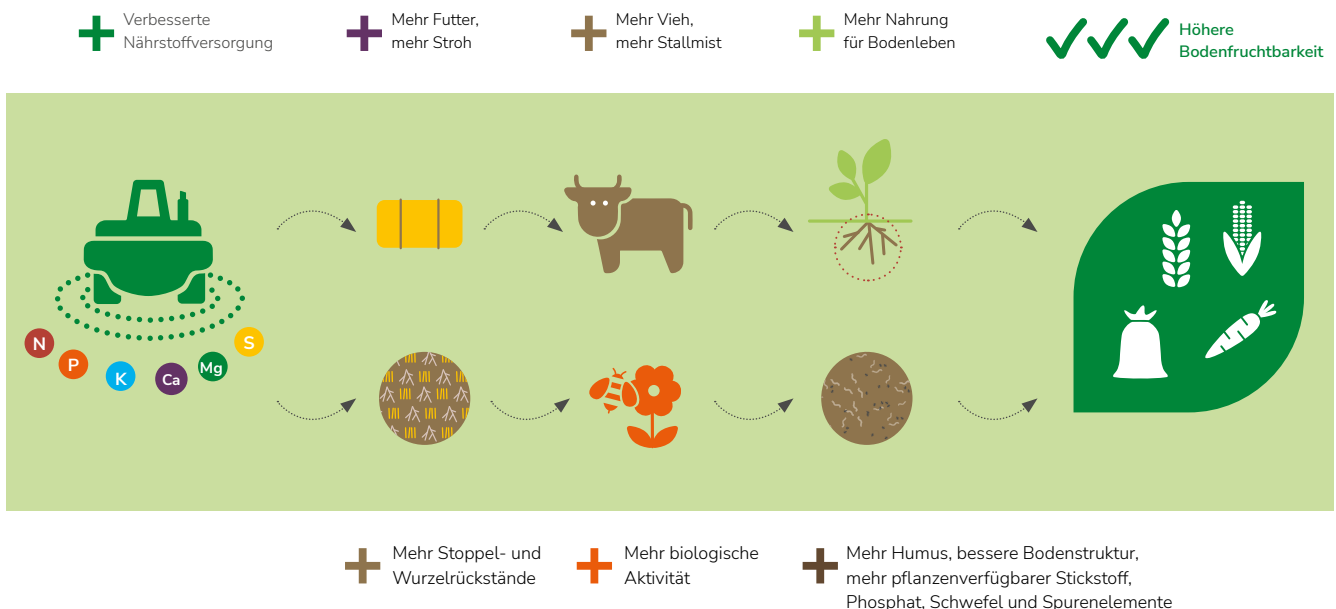


Abbildung 21:

Steigerung der Bodenfruchtbarkeit durch eine bedarfsgerechte Pflanzenernährung in einem landwirtschaftlichen System

5.2 Mineralische Düngemittel

Zentraler Bestandteil der konventionellen Landwirtschaft (für einige mineralische Düngemittel gilt das auch im Ökolandbau) ist der Einsatz mineralischer Düngemittel. Sie werden entweder gezielt durch chemische Prozesse hergestellt, fallen als Nebenprodukt aus der Produktion anderer Stoffe an oder werden bergbaulich gewonnen. Je nach Herkunft und zentralem Nährstoff des Düngemittels unterscheiden sie sich in ihren physikalischen, chemischen und technischen Eigenschaften. Diese müssen sowohl bei der Ausbringungstechnik als auch hinsichtlich der agronomischen Strategie berücksichtigt werden. Mineralische Düngemittel weisen gleichbleibende Nährstoffkonzentrationen sowie eine hohe Nährstoffverfügbarkeit auf und werden auch im Hinblick auf ihren Gehalt an Schadstoffen fortlaufend kontrolliert und überwacht.

Der größte Teil mineralischer Düngemittel liegt in fester, meist granulierter Form vor. Sie sind darauf ausgelegt über Schleuderstreuer, seltener durch Pneumatikstreuer oder platziert in das Saatband, appliziert zu werden. Daneben gibt es einige Düngemittel, insbesondere Stickstoffdünger, teilweise als Mischdünger mit Schwefel, die in flüssiger Form vertrieben werden. Sie eignen sich zur Ausbringung mit Pflanzenschutzspritzen, was im Vergleich zur granulierten Düngung oftmals Vorteile im Hinblick auf die Querverteilung und korrekte Ausbringmenge hat.

Unterschiede in der Wirkungsgeschwindigkeit spielen bei der bedarfsgerechten Pflanzenernährung eine wichtige Rolle. Dies sollte bei der Wahl des Düngers und des Anwendungstermins gezielt genutzt werden. Anzahl und optimaler Einsatzzeitpunkt der Teilgaben sind abhängig von der gewählten Düngerform.

Während die unterschiedlichen Stickstoffdüngemittel sich neben den technischen, physikalischen vor allem in ihren chemischen Eigenschaften und Nährstoffformen unterscheiden, sind die verschiedenen Grundnährstoffdüngemittel insbesondere zwischen ihrer technischen Aufbereitung, ihrer Löslichkeit sowie den physikalischen Eigenschaften zu unterscheiden.

5.2.1 Mikronährstoffdüngung

- **wasserlösliche Verbindungen:** Chelate (Voll-/Teilchelate), Salze, Nitrate (Enthalten das Wort „wasserlöslich“ in der Deklaration)
- **wasserunlösliche Verbindungen:** Oxide, Hydroxide, Carbonate, kristalline Silikate, Legierungen (Hier wird in der Deklaration nur der Gesamtgehalt angegeben)
- **Suspensionen/Dispersionen und Mischformen** (Können wasserunlösliche Bestandteile enthalten)
- **Mischdüngerlösungen, Düngerlösungen** (Sind immer wasserlöslich)

Beachtenswertes bei den Nährstoffformen:

Chelate: Es gibt Voll- und Teilchelate. Vollchelate sind sehr rein und enthalten maximal 1 % Rest-EDTA. Freie EDTA ist dagegen blattaggressiv. Teilchelate sind Mischungen aus Salzlösungen mit EDTA und können bis zu 10 % Rest-EDTA enthalten. Bisher nicht in Deutschland vertrieben, aber in anderen EU-Ländern.

Zusatz von Stoffen mit chelatisierenden Eigenschaften zu spurennährstoffhaltigen Düngemitteln, die düngemittelrechtlich auch nicht als Chelat gekennzeichnet sind. Diese sind weniger stabil und nicht mit reinen Chelaten vergleichbar, die immer deklariert werden müssen.

Sulfate sind in Wirkung und Verträglichkeit stark unterschiedlich: Sehr gute Verträglichkeit und Aufnahme von natürlichem Magnesiumsulfat (Bittersalz), gute Verträglichkeit von reinem Mangansulfat, aber Gefahr von Verbrennungen durch starke Säurewirkung von z.B. Kupfer-, Zink- und vor allem Eisensulfat.

Oxide und Hydroxide erhöhen oft den pH-Wert in Spritzlösungen, wodurch organische Pflanzenschutzmittel an Wirkung einbüßen können.

Carbonate: Düngemittelrechtliche Einordnung unklar; Wirkung als Blattdünger zur schnellen Behebung von Mangelsymptomen eher fraglich. Beispiele: Mangancarbonat, Zinkcarbonat.

Silikate: Siliziumwirkung nur bei löslichen Formen wie Wasserglas, Kieselsäure oder thermisch aufgeschlossenem Silizium. Silikatisch gebundenes Silicium aus Quarz und anderen Silikaten ist nicht pflanzenverfügbar.

Suspensionen: Sollten von der rein chemischen Begriffsdefinition her wasserlöslich sein. Angeboten werden unter dieser Kennzeichnung aber auch Dispersionen, d. h. die Nährstoffe sind nicht wasserlöslich, sondern nur fein

verteilt und mit Trägerstoff(en) versehen (wie Dispersionsfarbe). Grund: höhere Konzentrationsmöglichkeit und Verhinderung von Ausfallreaktionen bei reaktiven Elementen.

5.3 Organische Düngemittel

Soll ein Teil des N-Düngebedarfs durch Wirtschaftsdünger abgedeckt werden, ist dabei die verzögernde Wirkung durch die langsamere Mineralisation zu beachten. Zudem müssen vorab die Nährstoffgehalte überprüft werden. Gerade die Grünlanddüngung zum ersten Schnitt, oder bei Düngung von Ackerflächen während der Bestockung wirkt der organisch gebundene Stickstoff und Schwefel aus der Gülle in Abhängigkeit der enthaltenen Stickstoffform (Ammoniumanteil) entsprechend langsam und steht zum jeweiligen Entwicklungsstadium nur bedingt zur Verfügung. Besonders in dieser Zeit kann es zu hohen gasförmigen Verlusten in Form von Lachgas oder Auswaschung von Nitrat kommen, wenn die Pflanzen die bereitgestellten Stickstoffmengen nicht aufnehmen können. Der Einsatz von Stickstoff-Stabilisatoren verringert die Verluste (Siehe auch Kapitel zu Inhibitoren).

Table 23:

N-Ausnutzung verschiedener Düngemittel in Prozent¹ (Quelle: verändert nach Gutser, Lehrstuhl für Pflanzenernährung der TU München-Weihenstephan)

	Anwendungsjahr	2. Jahr ²	spätere Jahre
Mineraldünger	ø 60 (20–80)	8 (6–10)	2–5
Rindergülle	20–25	6 (4–8)	2–5
Stallmist	10–20	8 (4–8)	2–5
Kompost	0–10	4 (3–5)	2–5

¹ jeweils bezogen auf Gesamt-N

² abhängig von der Kulturart: bei Hackfrüchten ist die Ausnutzungsrate etwas höher anzusetzen als bei Getreide

Zur Vermeidung von gasförmigen NH₃-Verlusten sind alle organischen Dünger auf unbestellten Flächen umgehend einzuarbeiten. Die Ausbringung in Zeiträumen mit hoher Sonneneinstrahlung sind aufgrund der erhöhten Verluste durch Entgasung zu vermeiden. Auf bestellten Flächen ist unbedingt eine bodennahe Ausbringung anzustreben. Für die Düngebilanzierung der ausgebrachten N-Mengen sind nachfolgend aufgeführte Wirksamkeiten in Prozent vom Gesamt-N-Gehalt (org. gebundener N und NH₄-N) der organischen Düngemittel anzusetzen:

Tabelle 24:

Anrechnung organischer Düngemittel (LfL Freising, Agrarökologie)

Düngemittel	Mindestanrechnung im Jahr der Ausbringung in % des Gesamtstickstoffgehalts
Rindergülle	50
Schweinegülle	60
Rinder-, Schaf- und Ziegenmist	25
Schweinefestmist	30
Hühnertrockenkot	60
Geflügel- und Kaninchenfestmist	30
Pferdefestmist	25
Rinderjauche	90
Schweinejauche	90
Klärschlamm flüssig (< 15% TM)	30
Klärschlamm fest (≥ 15% TM)	25
Champignonkompost	10
Grünschnittkompost	3
Sonstige Komposte	5
Gärrest flüssig	50
Gärrest fest (abgepresst)	30

Die Nährstoff- und Trockenmassegehalte organischer Dünger unterliegen durch unterschiedliche Futtergrundlagen, Haltungsformen und Leistungen (Milch, Tageszunahmen) starken Schwankungen. Deshalb sollten als Grundlage für eine gezielte Düngung Gülleanalysen durchgeführt werden. Es wird empfohlen, 1-2 x jährlich im Betrieb eine Gülleanalyse auf den TM-Gehalt und auf Gesamt-N, Phosphat, Kali, Magnesium und Kalk durchführen zu lassen. Bei der Schweinegülle ist auch die gelegentliche Analyse von Kupfer vorteilhaft. Für die Bestimmung des Ammoniumstickstoffs hat sich z.B. der „Gülle-Max“ gut bewährt. Letztere Analyse kann auf dem Hof durchgeführt werden. Für die Höhe der Einzelgabe ist der Ammonium-Gehalt die wichtigste Größe. Zudem bieten mittlerweile unterschiedliche Hersteller die NIRS-Analyse der ausgebrachten Gülle direkt am Güllefass an, wodurch eine bedarfsorientiertere Düngung erfolgen kann.

Liegen keine Analysenwerte vor, ist mit den Faustzahlen für die anrechenba-

ren N-Mengen in organischen Düngern zu rechnen. Diese sind in der Tabelle zu organischen Düngemitteln im Anhang aufgeführt.

Die Rücklieferung von Phosphor über Wirtschaftsdünger ist in viehhaltenden Betrieben erheblich und muss bei der Düngplanung berücksichtigt werden. Allerdings schwanken die Gehalte je nach Besatzstärke, Tierart und Fütterung beachtlich. Auch ist davon auszugehen, dass durch Umstellungen in der Fütterung sowie dem TS-Gehalt der Gülle (Verdünnung!) die P_2O_5 -Gehalte besonders in den Rinder- und Schweinegülle zurückgehen werden.

In der Rinder- und Schweinegülle sind etwa 80 % des Phosphats, in der Hühnergülle 60 % anorganisch gebunden und für die Pflanzen leicht verfügbar; der Rest ist in festen organischen Bindungen (Phytin) eingebaut.

Bioabfallkomposte und Fleischknochenmehle gehören zu den Sekundärrohstoffdüngern. Die darin enthaltenen Phosphate sind zu einem sehr hohen Anteil schwer löslich (Apatite) und deshalb für eine schnell wirkende Phosphatdüngung nicht geeignet.

5.4 Inhibitoren und Zusatzstoffe

Inhibitoren sind chemische Verbindungen, die stickstoffhaltigen Düngemitteln zugefügt werden, um Stickstoffverluste in Form Ammoniak (NH_3), Lachgas (N_2O) und Nitrat (NO_3) nach der N-Düngung auf dem Feld zu reduzieren. Sie verbessern dadurch die Stickstoffnutzungseffizienz (nitrogen use efficiency, NUE). Es gibt zwei Haupttypen von Inhibitoren, die Stickstoffdüngemitteln zugefügt werden: Ureaseinhibitoren (UI), die die hydrolytische Wirkung der Urease-Enzyme auf Harnstoff hemmen, und Nitrifikationsinhibitoren (NI) die die biologische Oxidation von Ammonium zu Nitrat hemmen.

5.4.1 Urease-Inhibitoren

Harnstoff kann von Pflanzen kaum direkt aufgenommen werden. Er muss erst in Ammonium (NH_4^+) oder Nitrat (NO_3^-) umgewandelt werden, um der Pflanze als Stickstoffquelle zu dienen. Für den ersten Schritt dieses Umwandlungsprozesses sind die im Boden überall vorhandenen Urease-Enzyme verantwortlich: Beginnend mit der Ausbringung wird Harnstoff mit dem im Boden vorhandenem Wasser von der Urease in Ammoniak (NH_3) und Carbaminsäure umgewandelt. Die Carbaminsäure spaltet sich dann spontan weiter in Ammoniak und Kohlenstoffdioxid (CO_2) auf. Das entstehende

Ammoniak wird daraufhin in einer Gleichgewichtsreaktion in Ammonium umgewandelt.

Die Aufspaltung (Hydrolyse) des Harnstoffs durch die Urease erzeugt eine

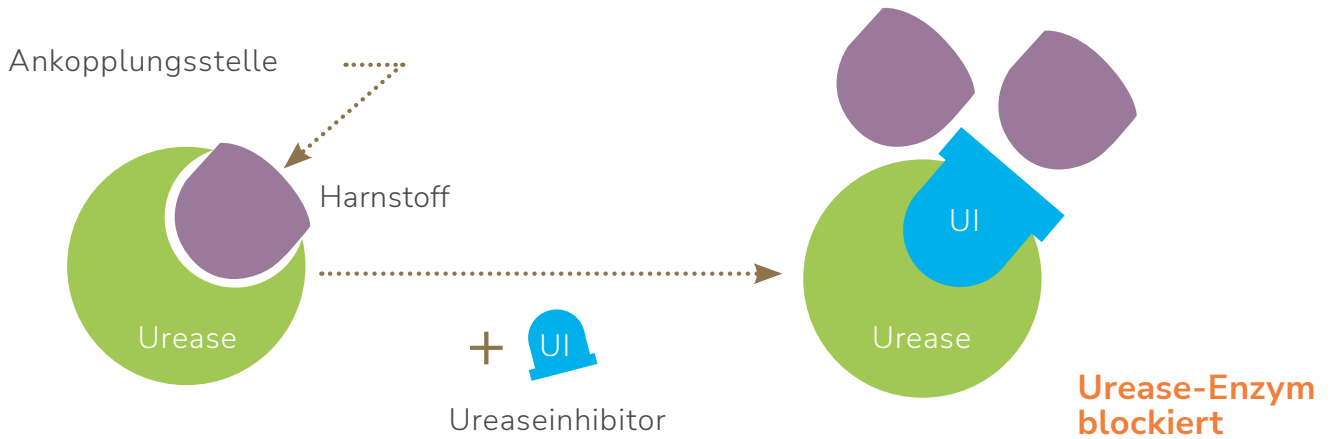


Abbildung 22:

Wirkungsweise von Ureaseinhibitoren

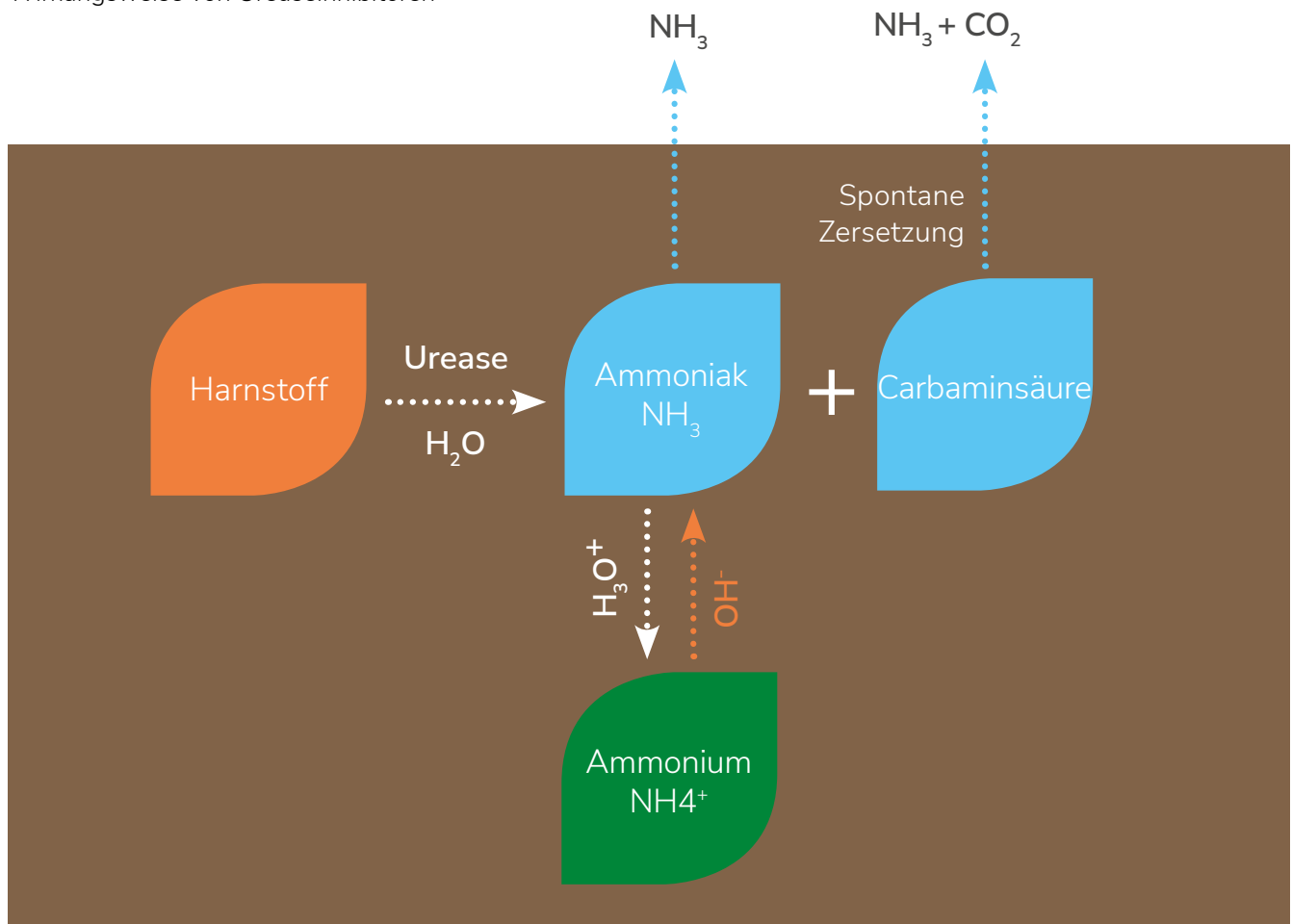


Abbildung 23:

Umwandlung von Harnstoff im Boden

alkalische Zone um das Korn, sodass der lokale pH-Wert stark ansteigt. Dadurch verschiebt sich die Gleichgewichtsreaktion zwischen Ammoniak (NH_3) und Ammonium in Richtung des leicht flüchtigen Ammoniaks und gasförmiges Ammoniak entweicht. Unter anderem bestimmen der pH-Wert und der Gehalt an freiem Kalk des Bodens, ob und wie schnell das Ammoniak in Ammonium umgewandelt wird. Je nach Bodenart verläuft dieser Prozess unterschiedlich. Die wichtigsten Faktoren für die Umwandlung rate und damit die Ammoniakverluste sind die Temperatur, Bodenfeuchte, der pH-Wert, die Kationenaustauschkapazität sowie der Anteil organischer Substanz im Oberboden. So besteht beispielsweise bei reduzierter Bodenbearbeitung die Gefahr höherer Ammoniakemissionen aufgrund der Urease, die in Pflanzenresten enthalten ist und die Umwandlung begünstigt. In Laborversuchen konnten Ammoniakverluste von bis zu 80 Prozent festgestellt werden. Allerdings beeinflussen im Freiland verschiedenste Faktoren diesen Prozess. Laut IPCC (2019) gehen durchschnittlich ca. 18 Prozent des gedüngten Harnstoff-Stickstoffs als Ammoniak (= 15 Prozent Ammoniak-Stickstoff) durch Verflüchtigung verloren. Diese gasförmigen Verluste können erheblich reduziert werden, wenn Harnstoff durch Regen beziehungsweise Bewässerung in den Boden eingewaschen oder mechanisch in den Boden eingearbeitet wird. Häufig ist Letzteres aufgrund der Bewirtschaftung jedoch nicht möglich (Winterkulturen, Grünland, fehlende Bewässerung, Trockengebiete, Direktsaat usw.).

5.4.2 Nitrifikationsinhibitoren

Das Ammonium aus dem Harnstoff und anderen ammoniumhaltigen Düngemitteln wird nach der Ausbringung durch den Nitrifikationsprozess im Boden temperaturabhängig in mehreren Schritten über Nitrit (NO_2^-) zu Nitrat umgewandelt. Der Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren hemmt diesen Prozess. Beim ersten Schritt der Nitrifikation (Umwandlung / Oxidation von Ammonium zu Nitrit) kann es zu Stickstoffverlusten in Form von klimaschädlichem Lachgas (N_2O) kommen. Nitrifikationsinhibitoren (NI) hemmen vorübergehend das für diesen Schritt verantwortliche Enzym Ammonium-Monooxygenase des Bodenbakteriums *Nitrosomonas* ssp. So verzögern sie die mikrobielle Umwandlung von Ammoniumstickstoff im Boden. Vor allem die Umgebungstemperatur bestimmt, wie lange dieser Schritt der Nitrifikation durch einen NI gehemmt werden kann. Bei niedriger Temperatur ist dieser

Zeitraum recht lang. Er wird bei höherer Bodentemperatur deutlich kürzer, dauert aber dennoch einige wenige Wochen.

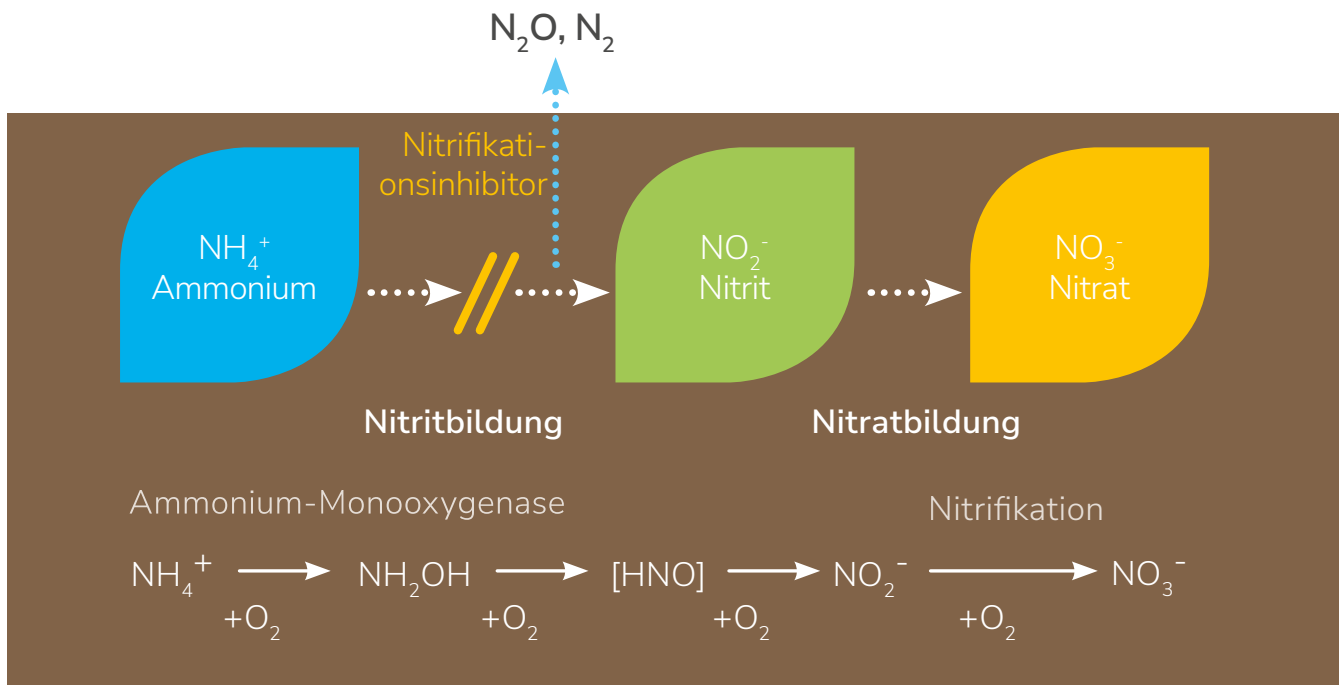


Abbildung 24:

Nitrifikation in Böden und Wirkungsweise von Nitrifikationsinhibitoren

Das entstehende Nitrat ist im Bodenwasser sehr mobil. Daher kann es unter bestimmten Bedingungen, wie sandigen Böden, hohem Wassereintrag und flach wurzelnden Pflanzen auch während der Vegetationsperiode zur ungewollten Auswaschung des Nitrats ins Grundwasser kommen. Die Zugabe von Nitrifikationsinhibitoren bei ammoniumhaltigen Düngemitteln, wie beispielsweise Ammonsulfatsalpeter (ASS), kann dieses Risiko erheblich minimieren. Die Nitrifikation von Ammonium und Denitrifikation von Nitrat sind Quellen von Lachgas (N_2O), einem bedeutenden Treibhausgas. Lachgas-Emissionen stellen den Hauptbeitrag der Landwirtschaft zum Klimawandel dar. Lachgas ist in der Atmosphäre mit einer mittleren atmosphärischen Lebensdauer von 114 Jahren sehr stabil und beeinflusst auch den Ozonabbau. Das Treibhauspotenzial von Lachgas ist 273-mal höher als das von Kohlenstoffdioxid. Der Einsatz von Düngemitteln mit Nitrifikationsinhibitoren reduziert die Emission dieses Treibhausgases beträchtlich. Denn aufgrund der verzögerten Nitrifikation ist auch die Menge an Nitrat während des Inhibitionsprozesses deutlich reduziert und kann somit nicht zu Lachgas umgewandelt werden.

Weitergehende Informationen über Inhibitoren sowie ergänzende Grafiken finden Sie unter dem rechtsstehenden QR-Code oder in der Broschüre zu Inhibitoren unter folgendem Link:

<https://www.iva.de/publikationen/inhibitoren>.



5.5 Coatings

Die Beschichtungen von Düngemittelkörnern mittels wasserdurchlässiger Materialien – ist eine innovative Technologie zur Steuerung der Nährstofffreisetzung. Ziel ist es, die Effizienz der Düngung zu erhöhen, Umweltbelastungen zu reduzieren und die Nährstoffverfügbarkeit besser an den Pflanzenbedarf anzupassen.

Funktionsweise

Ein Coating besteht aus einer dünnen Schicht aus polymeren, organischen oder mineralischen Materialien, die den Dünger umhüllt. Diese Schicht wirkt als Diffusionsbarriere, wodurch die Freisetzung der Nährstoffe verzögert oder kontrolliert erfolgt. Die Freisetzung wird durch verschiedene Umweltfaktoren beeinflusst, wie bspw. Temperatur, Feuchtigkeit, mikrobielle Aktivität im Boden und dem pH-Wert des Bodens.:

Je nach Zusammensetzung des Coatings kann die Freisetzung über Tage bis Wochen gestreckt werden.

Typen von Coatings

- **Polymer-Coatings:** Synthetische Polymere (z.B. Polyurethan) mit definierter Porosität.
- **Schwefel-Coatings:** Schwefel als mineralische Barriere, oft kombiniert mit Mikronährstoffen.
- **Bio-basierte Coatings:** Auf Stärke, Cellulose oder pflanzlichen Ölen basierende Materialien – zunehmend relevant im ökologischen Landbau.
- **Hybrid-Coatings:** Kombinationen aus mehreren Materialien zur gezielten Steuerung.

Für die Praxis ergeben sich daraus einige Vorteile wie bspw. die reduzierte Auswaschung von Nitrat und Eutrophierung von Phosphat (geringere Umweltbelastung) und eine höhere Nährstoffeffizienz, insbesondere bei Dauerkulturen. Zudem lassen sich arbeitswirtschaftliche Vorteile aufgrund zusammengefasster Düngergaben realisieren.

Ummantelte Düngemittel finden Anwendung in Intensivkulturen (z.B. Gemüse, Sonderkulturen) und in der Düngung von Sportrasen. Außerdem eignen sie sich auch für den Einsatz im klassischen Ackerbau für eine Bodenbevorratung und auf Flächen mit schlechter Befahrbarkeit.

5.6 Sonstiges

5.6.1 Ansäuerung

Die Ansäuerung von Wirtschaftsdüngern wie Gülle und Gärresten ist eine bewährte Maßnahme zur Reduktion von Ammoniakemissionen. Durch die Zugabe von Schwefelsäure oder anderen Säuerungsmitteln wird der pH-Wert gesenkt, wodurch weniger Ammoniak in die Luft entweicht. Das verbessert die Stickstoffeffizienz und kann den Mineraldüngereinsatz reduzieren. Besonders bei der Ausbringung auf Grünland oder in der Nähe sensibler Gebiete ist die Ansäuerung ein wichtiger Beitrag zum Umweltschutz. Zudem kann sie Geruchsbelästigungen verringern.

Entscheidend sind sicherheitsrelevante Aspekte beim Umgang mit Säuren zur Behandlung der Düngemittel, die umfassend berücksichtigt werden müssen.

5.6.2 Kalkstickstoff

Die agronomische Bedeutung des Kalkstickstoffs ist vor allem in der länger anhaltenden und gleichmäßigen Stickstoffwirkung sowie im hohen Gehalt an wasserlöslichem Kalk begründet. Durch die chemischen Eigenschaften des Calciumcyanamids erfolgt die Umwandlung in pflanzenverfügbare Stickstoffformen in Abhängigkeit der Bodenfeuchte verzögert. Ähnlich wie bei stabilisierten Düngemitteln kann Kalkstickstoff somit seine Düngewirkung über einen längeren Zeitraum strecken und kommt daher in bestimmten agronomischen Fällen zur Anwendung. Zudem weist Kalkstickstoff einige phytosanitären Eigenschaften auf.

6. Ausbringtechnik und Applikationsformen mineralische Dünger

6.1 Breitverteilung

Die am weitesten verbreitete Applikationsform von Düngemitteln ist die Breitverteilung. Dies gilt sowohl für feste als auch für flüssige Mineraldünger. Im Bereich der organischen Dünger ist die Breitverteilung vor allem für feste Dünger noch immer Standard, während die streifenförmige Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger wie Gülle und Gärreste aufgrund regulatorischer Vorgaben die Breitverteilung zunehmend verdrängt.

Die Breitverteilung granulierter Mineraldünger erfolgt in den meisten Fällen über Schleuderstreuer. Hierbei können aufgrund fehlerhafter Einstellungen des Düngerstreuers Streufehler auftreten, die erheblichen Einfluss auf die Effektivität der Düngung und die Erträge haben können.



Abbildung 25:

Ausbringung von granuliertem Mineraldünger mit einem Pneumatikstreuer

Neben Schleuderstreuern werden granuliert Dünger vereinzelt auch über pneumatisch angetriebene Düngerstreuer ausgebracht. Die Streugenaugkeit ist hier aufgrund des Gestänges und der damit verbunden geringeren Wurfweiten deutlich besser und mit der Ausbringung von flüssigen Mineraldüngern mit einer Feldspritze vergleichbar. Die Flüssigdüngung in Breitverteilung hat erhebliche Vorteile hinsichtlich der Auslastung vorhandener Technik und der Applikationsgenauigkeit. Voraussetzung dafür ist die Möglichkeit der Lagerung flüssiger Dünger in dafür geeigneten Tanks.

Folgende Faktoren müssen beachtet werden, um eine präzise Düngung zu gewährleisten:

- **Mensch und Bediener:**
 - Fahrgeschwindigkeit
 - Zapfwelldrehzahl bzw. Antrieb des Ausbringgeräts (bspw. auch der Düsendruck von Feldspritzen bei flüssigen Mineraldüngern)
 - Korrekte Einstellung des Ausbringgeräts
- **Maschine / Streutechnik**
 - Art des Streubilds (Gleichmäßiger Druck bei Feldspritzen)
 - Art der Überlappung
 - Einstellbarkeit des Ausbringgeräts
 - Auslegung der Maschine auf Arbeitsbreite und Mengendurchfluss
- **Umweltbedingungen**
 - Wind
 - Luftfeuchtigkeit
 - Bodenunebenheiten
 - Relief (Geländeform und Hangneigung)
- **Düngerqualität**
 - Oberflächenbeschaffenheit
 - Kornform
 - Korngrößenspektrum
 - Kornhärte
 - Spezifisches Korngewicht (Dichte)
 - Mischdünger (Entmischungsgefahr)

6.1.1 Blattdüngung

Von der klassischen Breitverteilung flüssiger mineralischer Düngemittel zu unterscheiden ist die Blattdüngung, die vor allem für Mikronährstoffdünger verbreitet ist, aber auch für geringere Mengen aufgelöster Makronährstoffdünger (bspw. Harnstoff, Ammoniumsulfat) und flüssige Mineraldünger praktische Relevanz hat. Sie kann bspw. bei sichtbaren Mangelerscheinungen, also bei akutem Mangel, erfolgen.

Die Kombination verschiedener Mikronährstoffe in einem Produkt ist sehr verbreitet. Häufig erfolgt die Düngung in Kombination mit einer Pflanzenschutzmaßnahme. Voraussetzung ist jedoch eine ausgewogene Bereitstellung von Grundnährstoffen über den Boden.

Dennoch kann sie trotz der geringen Ausbringmengen sinnvoll sein, weil der Wirkungsgrad der über das Blatt ausgebrachten Nährstoffe bis zu fünfmal höher ist als der über den Boden gedüngten Nährstoffe.

6.2 Platzierte Düngung

Um trotz der hohen und restriktiven Anforderungen der Düngeverordnung dennoch eine hohe Nährstoffverfügbarkeit zu erreichen, verbreiten sich in der Praxis verstärkt technische Möglichkeiten zur platzierten Düngung. Diese sollen entweder die räumliche Nähe zwischen Pflanze und bereitgestellten Nährstoffen erhöhen (und dadurch Verluste durch nicht aufgenommene Nährstoffe verhindern) oder die Wurzelentwicklung in Richtung des applizierten Düngerdepots begünstigen.

Die klassische Form der platzierten Düngung ist die sog. Unterfußdüngung, die bei Reihenkulturen, insbesondere bei Mais, weit verbreitet ist. Dabei wird (meistens granulierter) Mineraldünger in einem Arbeitsgang mit der Aussaat unterhalb oder leicht versetzt neben das Saatkorn abgelegt. Technisch wird dieses Verfahren durch Sämaschinen mit mehreren Tanks ermöglicht. Zudem ist auch die Applikation flüssiger Wirtschaftsdünger in einem Gülleband unterhalb der Saatreihe gängige Praxis, hier jedoch üblicherweise in zwei verschiedenen Arbeitsgängen.



Abbildung 26: Maisaussaat mit pneumatischer Unterfußdüngung von granuliertem Mineraldünger in die Saatreihe

Die platzierte Applikation flüssiger Mineraldünger ist in Deutschland weniger verbreitet, was insbesondere auf die etwas aufwändigere Handhabung des Düngers zurückzuführen ist. Eine Ausnahme stellt das sog. CULTAN-Verfahren (Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition, deutsch: kontrollierte Langzeitammoniumernährung) dar. Hierbei werden durch Injektion Vorratsdepots meist aus einer Ammoniumsulfatlösung appliziert. Dadurch soll der Pflanzenbestand aus den Depots heraus über einen längeren Zeitraum, meist über die gesamte Vegetationsperiode, durch Ammoniumernährung versorgt werden. Das Verfahren wird hauptsächlich in Getreide und Raps eingesetzt, seltener in Mais und anderen Sommerkulturen.

7. Lagerung und Mischbarkeit

Neben den ernährungsphysiologischen Eigenschaften sind die physikalischen Eigenschaften von Düngemitteln entscheidend für eine effiziente Ausbringung und Wirksamkeit. Die korrekte Lagerung und Mischung von Düngemitteln beeinflussen dabei erheblich deren Qualität und damit auch die Genauigkeit der Ausbringung, insbesondere bei granulierten Düngern. Daher sind einige wichtige Punkte zu beachten, um Qualitätsverluste zu minimieren.

Entlang der Lieferkette (oftmals mehrmaliger Umschlag) sind lose Dünger vielen äußeren Einflüssen ausgesetzt (z.B. Feuchtigkeit, Staub, Verunreinigungen). Dadurch verlieren sie mit der Zeit mitunter an Qualität. Trotz größter Sorgfalt beim Lieferprozess und der Lagerung in der Düngerboxe ist ein gewisser Qualitätsverlust bei losen Düngern nicht immer und vollständig zu verhindern. Eine wichtige Maßnahme zur Vorbeugung von schleichenden Qualitätsverlusten in der Düngerbox ist die konsequente Abdeckung mit dafür geeigneten Folien. Auch bei palettierter und geschrumpfter Sackware ist eine ordnungsgemäße Lagerung unabdingbar. Damit die Düngerqualität nicht beeinträchtigt wird, sollte bei Sackware und BigBags vermieden werden, sie über einen längeren Zeitraum im Freien der Sonneneinstrahlung auszusetzen. Zusätzlich ist bei BigBags noch zu beachten, dass sie nicht dauerhaft auf dem blanken Boden stehen, sondern auf Paletten oder Ähnlichem abgestellt werden. Die physikalischen Eigenschaften, bspw. die Ballistik der Düngerkörner, leiden bei Qualitätsverlusten und dem Anspruch einer hohen Dünge- und Ausbringgenauigkeit kann nicht mehr entsprochen werden.



Abbildung 27:

Klumpenbildung und Qualitätsmängel von Mineraldüngern aufgrund ungünstiger Lagerung


Dies ist auch bei einer unsachgemäßen Mischung verschiedener Düngearten neben sicherheitsrelevanten Aspekten wahrscheinlich. Bei der Mischung kommt es darauf an, Düngerarten mit unterschiedlichen Eigenschaften möglichst homogen zu mischen, um ein Entmischen und dadurch eine inhomogene Ausbringung zu vermeiden.

Neben den physikalischen Anforderungen an eine geeignete Lagerung und Mischbarkeit von Düngemitteln stehen insbesondere sicherheitsrelevante Aspekte im Fokus. So können Fehler Lagerung und Transport das Risiko für Brände und sogar Explosionen erhöhen. Daher sind die Vorgaben aus der Broschüre „Sichere Lagerung von festen Düngemitteln in Deutschland“ des IVA unbedingt zu beachten. Sie ist unter dem nachfolgenden Link oder unter dem rechtsstehenden QR-Code abrufbar: https://www.iva.de/sites/default/files/2023-06/Merkblatt-Lagerung_20230620_FINAL.pdf.



Tabelle 25:

Mischbarkeit fester mineralischer Düngemittel (Bundesverband der Düngemischer, 2015)

 mischbar
  begrenzt mischbar im Hinblick auf Qualitätsprobleme
  Begrenzt mischbar aufgrund rechtlicher oder Sicherheitsprobleme
  nicht mischbar

	Ammonnitrat (Ammonsalpeter)	Kalkammonsalpeter	Kalksalpeter (Düngemittelqualität)	Ammoniumsulfatsalpeter	Kaliumnitrat (Kalisalpeter)/Natriumnitrat	Schwefelsaures Ammoniak	Harnstoff	Rohphosphat	Aufgeschlossenes Rohphosphat mit Säure	Superphosphat/Tripelsuperphosphat	Monoammonphosphat	Diammonphosphat	Phosphatkali	Kaliumchlorid	Kaliumsulfat/ Magnesiumsulfat (Kieserit)	NPK, NP, NK (auf AN-Basis)	NPK, NP, NK (auf Harnstoffbasis)	Kalk/Dolomit/Kalziumsulfat/Kalziumkarbonat
Ammonnitrat (Ammonsalpeter)			1	2		3	NM		4	4				5		5	NM	
Kalkammonsalpeter			6	2		2	NM			7				5		5	NM	
Kalksalpeter (Düngemittelqualität)	1	6		8	8	8	8			8	8	8	8	8	9	8	8	
Ammoniumsulfatsalpeter	2	2	8		2		NM	1	4	7				5		5	NM	
Kaliumnitrat (Kalisalpeter)/ Natriumnitrat			8	2		1										12	13	
Schwefelsaures Ammoniak	3	2	8		1											5		
Harnstoff	NM	NM	8	NM					1	1				1		NM		
Rohphosphat				1														
Aufgeschlossenes Rohphosphat mit Säure	4			4			14					17						
Superphosphat/ Tripelsuperphosphat	4	7	8	7			15					17				4	14	17
Monoammonphosphat			8															
Diammonphosphat			8					1	1									
Phosphatkali			8															
Kaliumchlorid	5	5	8	5			1									5		
Kaliumsulfat/ Magnesiumsulfat (Kieserit)			9															
NPK, NP, NK (auf AN-Basis)	5	5	8	5	1	5	NM			4				5			NM	
NPK, NP, NK (auf Harnstoffbasis)	NM	NM	8	NM	13					14							NM	
Kalk/Dolomit/Kalziumsulfat/ Kalziumkarbonat										17								
Schwefel (elementar)	NM	NM	8	NM	NM											NM		

HAFTUNGS AUSSCHLUSS: Dieses Dokument wurde für die Mitglieder der Fertilizers Europe (Europäische Vereinigung der Düngemittelproduzenten) erstellt. Die enthaltenen Informationen und Anleitungen werden nach bestem Wissen gegeben. Die Vereinigung, ihre Mitglieder, Berater und Angestellten übernehmen keinerlei Haftung für Verluste oder Schäden, die durch die Benutzung dieses Handbuchs entstehen.

8. Rechtliches

8.1 Gute Fachliche Praxis

Pflanzen benötigen die Nährstoffe in einem ausgewogenen Verhältnis, damit sie optimal wachsen können. Eine Düngung nach guter fachlicher Praxis versorgt die Pflanzen mit den notwendigen Nährstoffen und erhält bzw. fördert zusätzlich die Bodenfruchtbarkeit. Zur Änderung des nationalen Düngerechts kam es deswegen, um es den neuen fachlichen Erfordernissen (Verringerung von akuten Umweltbelastungen) und dem neuesten Stand der Fachkenntnisse (Verbesserung der Düngerwirkung) anzupassen. Ziel ist eine maximale Nährstoffeffizienz. Der Inhalt der neuen DüV gibt die Regeln für die gute fachliche Praxis beim Düngen klar vor.

Eine fachlich gute Düngung muss sich allerdings auch daran orientieren, dass die durch das Pflanzenwachstum dem Boden entzogenen Nährstoffe wieder zurückgeführt werden. Eine permanent negative Nährstoffbilanz ist unter diesem Aspekt nicht als nachhaltig und somit auch nicht als gute fachliche Praxis einzustufen. So garantiert die Optimierung der Düngung auch eine hohe Effizienz der anderen eingesetzten Betriebsmittel und damit letztendlich eine hohe Effizienz aus sozialer und ökonomischer, und nicht nur aus ökologischer Sicht.

Beispielsweise kann der langjährige Verzicht auf Grunddüngung und Kalkung hohe Kosten aufgrund langfristig geringerer Erträge und teurer Aufdüngung auf einen akzeptablen Nährstoffgehalt verursachen. Um den Nährstoffgehalt in einer 30 cm dicken Ackerkrume um nur 1 mg/100 g anheben zu wollen, sind über den Nettoentzug hinaus z. B. bei Phosphat immerhin 80 – 100 kg P_2O_5 /ha und bei Kali 80 (Lehm) – 180 (Sand) kg K_2O /ha notwendig.

8.2 Düngeverordnung in Bund und Ländern

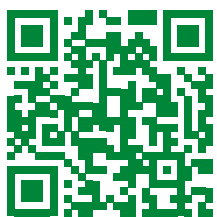
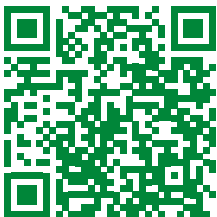
Die Düngeverordnung regelt bundesweit die Anwendung von Düngemitteln mit dem Ziel, Nährstoffeinträge in Boden und Gewässer zu minimieren und die Vorgaben der EU-Nitratrichtlinie umzusetzen. Sie betrifft alle landwirtschaftlichen Betriebe, die organische oder mineralische Düngemittel ausbringen.

Grundpflichten für landwirtschaftliche Betriebe

- **Düngebedarfsermittlung (§3 DüV):** Vor jeder Ausbringung von Düngemitteln mit relevantem Nährstoffgehalt muss der Düngebedarf von Stickstoff und Phosphor auf Basis von Kulturart, Ertragserswartung und Standortbedingungen schriftlich ermittelt werden. Diese Ermittlung ist jährlich zu aktualisieren und dient als Grundlage für alle weiteren Maßnahmen.
- **Sperrfristen (§6 DüV):** Für stickstoff- und phosphathaltige Düngemittel gelten kultur- und regionalspezifische Sperrzeiten. Beispielsweise ist die Ausbringung von Gülle auf Grünland in der Regel vom 1. November bis 31. Januar verboten.
- **Abstandsregelungen (§5 DüV):** In Gewässernähe gelten Mindestabstände (in der Regel 1–5 m), abhängig von Hangneigung und Bewirtschaftungsform. In bestimmten Fällen sind technische Maßnahmen wie bodennahe Ausbringung erforderlich.
- **Dokumentationspflicht (§10 DüV):** Alle Düngemaßnahmen müssen innerhalb von zwei Tagen dokumentiert werden. Die Aufzeichnungen müssen fünf Jahre aufbewahrt und auf Verlangen vorgelegt werden.

Für mit Nitrat belastete Gebiete (aktuell in §13a DüV geregelt, Stand 2025) gelten verschärfte Anforderungen, die darüber hinaus länderspezifisch geregelt und spezifiziert werden. Neben der Düngeverordnung existieren daher Landesdüngerverordnungen für jedes Bundesland. Auf den Internetseiten der Landwirtschaftskammern, Landesanstalten etc. sind die länderspezifischen Regelungen praxisgerecht kommuniziert.

Das Düngerecht erfährt wiederkehrende Anpassungen, weshalb unter nachfolgenden Links und nebenstehenden QR-Codes auf die aktuell geltende Düngeverordnung (https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/) und das der DüV zugrundeliegende Düngegesetz (https://www.gesetze-im-internet.de/d_ngg/) verwiesen wird.



Fazit für die Praxis

Die Düngeverordnung stellt hohe Anforderungen an die Planung, Dokumentation und technische Umsetzung der Düngung. Für Betriebe ist eine enge Zusammenarbeit mit Beratungseinrichtungen und Behörden essenziell, um rechtskonform und effizient zu wirtschaften.

8.3 Deklaration und Zulassung von Düngemitteln

Düngeprodukte können in der europäischen Union sowohl national als auch unionsübergreifend zugelassen werden. Es obliegt dabei dem antragstellenden Unternehmen, welches Verfahren es angeht.

Europäische Regelung: EU-Düngeprodukteverordnung (FPR – Verordnung (EU) 2019/1009)

Die FPR ist seit dem 16. Juli 2022 vollständig anwendbar und ersetzt die bisherige Richtlinie 2003/2003/EG. Die Verordnung schafft gemeinsame Sicherheits-, Qualitäts-, und Kennzeichnungsvorschriften für alle in der EU gehandelten, CE-gekennzeichneten Düngeprodukte. Darüber hinaus öffnet sie den Markt für Produktgruppen, die bisher nicht unter die Harmonisierungsvorschriften fallen, wie organische und organisch-mineralische Düngemittel, Biostimulanzien, Kultursubstrate. Sie eröffnet damit neue Möglichkeiten – auch über die Bereitstellung von Düngerproduktmischungen. Eine weitere Neuerung ist, dass das bekannte System der Düngemitteltypen einschließlich der vertrauten Bezeichnungen in der Verordnung abgeschafft wurde. An ihre Stelle tritt ein völlig neues System zum Inverkehrbringen von Düngeprodukten. Die Düngemitteltypen werden durch sechs bzw. sieben allgemein definierte Produktfunktionskategorien definiert, welche die Produkteigenschaften sowie Mindestgehalte, Löslichkeiten oder Schadstoffgrenzwerte, zum Beispiel für Cadmium, festlegen.

Die Nutzung der neuen Verordnung ist nicht zwingend vorgeschrieben. Es besteht weiterhin die Option nationale Rechtsvorschriften zu nutzen, um Produkte in einzelnen Mitgliedsstaaten in Verkehr zu bringen. Sollen Produkte jedoch über die FPR zugelassen werden, müssen sie je nach ihrer Einstufung durch eine unabhängige Konformitätsbewertungsstelle geprüft werden.

Die Verordnung legt auch zeitgleich die Vorgaben zur Kennzeichnung fest, die zudem in einem Leitfaden ausführlicher beleuchtet werden.

Nationale Regelung: Düngemittelverordnung (DüMV) und Düngegesetz (DüG)

Die DüMV konkretisiert die Anforderungen des Düngegesetzes (DüG) für das Herstellen, Inverkehrbringen von organischen und organisch-mineralischen Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln in Deutschland. Damit unterliegen auch Wirtschaftsdünger den Vorgaben der Düngemittelverordnung.

Düngemittel und Wirtschaftsdünger dürfen nur dann verkauft oder an Dritte abgegeben werden, wenn ihre sachgerechte Anwendung weder die Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigt noch die Gesundheit von Menschen, Tieren oder Pflanzen gefährdet. Ebenso dürfen sie den Naturhaushalt nicht negativ beeinflussen. Die Anlage 1 der Düngemittelverordnung listet dabei die zugelassenen Düngemitteltypen auf. In der Anlage 2 sind die erlaubten organischen Ausgangsstoffe sowie Hilfsmittel zur Aufbereitung aufgeführt, die bei der Herstellung von Düngemitteln verwendet werden dürfen.

Nur Düngemittel, die diesen Vorgaben entsprechen, dürfen auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Flächen ausgebracht werden. Dabei können zusätzliche Einschränkungen und Anwendungsvorgaben gelten.

Für das Inverkehrbringen organischer Düngemittel gelten Grenzwerte für Schadstoffe wie Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber und Dioxine. Zudem müssen Anforderungen zur Seuchenhygiene und Phytohygiene erfüllt sein.

Ist ein Düngemittel gleichzeitig Bioabfall, so müssen sowohl die Anforderungen der Bioabfallverordnung (Untersuchungspflichten, Nachweispflichten, Schadstoffgrenzwerte), als auch die Vorgaben der Düngemittelverordnung beachtet werden.

Düngemittel sowie Wirtschaftsdünger dürfen nur dann in den Verkehr gebracht werden, wenn sie gemäß den Vorgaben der Düngemittelverordnung (DüMV) korrekt gekennzeichnet sind.

Für Wirtschaftsdünger muss die Kennzeichnung insbesondere folgende Informationen enthalten:

- **Gehaltsangaben zu allen relevanten Nährstoffen**, wie Stickstoff und Phosphat,
- **Angaben zu eventuell enthaltenen Schadstoffen**, sofern relevant,
- **Informationen zur Zusammensetzung** bzw. den verwendeten Ausgangsstoffen,
- **Mengenangabe** des abgegebenen Produkts (z.B. Gewicht oder Volumen),
- **Name und Anschrift des Herstellers oder Inverkehrbringers**.

Diese Kennzeichnung dient nicht nur der rechtlichen Absicherung, sondern auch der Information der Anwender, etwa Landwirte, die auf Basis dieser Angaben ihre Düngemaßnahmen planen und dokumentieren müssen. Daher müssen alle Düngemittel und Wirtschaftsdünger entsprechend den Vorgaben der Düngemittelverordnung gekennzeichnet sein, bevor sie in Verkehr gebracht werden.

Deklarationspflichten nach DüMV:

- **Kennzeichnungspflicht (§6 DüMV): Verpackte und lose Düngemittel müssen mit folgenden Angaben versehen sein:**
 - Handelsbezeichnung
 - Art des Düngemittels (z.B. organisch, mineralisch)
 - Gehalte an Haupt- und Spurennährstoffen
 - Anwendungsempfehlungen
 - Herstellerangaben und Chargennummer
- **Nährstoffgehalte (§4 DüMV):** Müssen als Mindestgehalte angegeben werden, bezogen auf die Originalsubstanz oder Trockenmasse.
- **Grenzwerte für Schadstoffe (§5 DüMV):** Für bestimmte Stoffe (z.B. Schwermetalle) gelten Höchstgehalte, insbesondere bei organischen Düngern.
- **Spezielle Anforderungen für bestimmte Düngemittelgruppen:** z.B. für Komposte, Gärprodukte, Klärschlämme gelten zusätzliche Anforderungen an Hygiene und Herkunftsnachweise.

9. Weiterführende Literatur

Neben den verlinkten Broschüren des IVA können als weiterführende Literatur insbesondere das Gelbe Heft der LfL-Bayern (Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland), diverse VDLUFA-Standpunkte sowie DLG-Merkblätter genannt werden.

- **DLG-Merkblätter, u.a. zum Themengebiet Pflanzenernährung:**
 - <https://www.dlg.org/mediacenter/dlg-merkblaetter#c29303>
- **VDLUFA-Standpunkte**
 - Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf
 - Anforderungen an Bodenuntersuchungsmethoden zur Düngebedarf
 - ermittlung
 - Georeferenzierte Bodenprobenahme
- **LfL-Bayern**
 - Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland („Gelbes Heft“)

Daneben existiert eine Vielzahl weiterer Veröffentlichungen bspw. der Landesanstalten und Landwirtschaftskammern auf Bundeslandebene, die eine wertvolle Lektüre für eine angepasste Pflanzenernährung in der Praxis darstellen.

10. Anhang

LfL-Tabelle

Listen mit Düngemitteln der Mitgliedsunternehmen zu den einzelnen Nährstoffen.

Tabelle 26:

Nährstoffgehalte organischer Dünger zum Zeitpunkt der Ausbringung, nach Berücksichtigung der anrechenbaren Stall- und Lagerungsverluste (nach LfL, Gelbes Heft, 2025)

Organische Dünger mit Code	Einheit	Nährstoffgehalt in kg/T bzw. m ³ Frischmasse ¹					Mindest-wirksamkeitsgrad N _{Gesamt} in % ²	
		N _{Gesamt}	NH ₄ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	Acker	Grünland
Rind								
11 Milchviehgülle (Grünland, 6% TM)	m ³	3,3	1,65	1,4	4,2	1,1	60	50
12 Milchviehgülle (Grünland, 7,5% TM)	m ³	4,1	2,05	1,7	5,3	1,3	60	50
14 Milchviehgülle (Acker, 6% TM)	m ³	3,1	1,55	1,4	3,7	0,9	60	50
15 Milchviehgülle (Acker, 7,5% TM)	m ³	3,9	1,95	1,7	4,7	1,2	60	50
16 Mastbullengülle (7,5% TM)	m ³	4,1	2,05	1,9	4,0	1,0	60	50
17 Rindermist, geringe Einstreu (18,5% TM)	t	3,7	0,37	2,5	5,9	1,9	25	25
18 Rindermist, hohe Einstreu (23% TM)	t	4,1	0,41	2,1	8,1	1,7	25	25
19 Rinderjauche(1,8% TM)	m ³	3,2	2,88	0,2	7,9	0,2	90	90
Schwein								
21 Mastschweinegülle (5% TM), Standardfutter	m ³	5,7	3,42	3,0	3,5	1,3	70	60
22 Mastschweinegülle (5% TM), N-/P-red. Fütterung	m ³	5,5	3,3	2,6	3,4	1,2	70	60
23 Mastschweinegülle (5% TM), stark N-/P-red. Fütterung	m ³	5,0	3,00	2,4	3,3	1,2	70	60
24 Zuchtsauengülle (5% TM), N-/P-red, Fütterung	m ³	4,6	2,76	2,5	2,9	1,0	70	60
25 Zuchtsauengülle (5% TM), N-/P-red. Fütterung	m ³	4,1	2,46	2,2	2,7	1,0	70	60
26 Zuchtsauengülle (5% TM), stark N-/P-red, Fütterung	m ³	3,9	2,34	2,1	2,7	1,0	70	60
27 Schweinemist (21% TM), geringe Einstreu	t	6,0	0,60	4,3	6,2	2,0	30	30
29 Schweinemist (25% TM), hohe Einstreu	t	5,2	0,52	2,9	7,0	1,5	30	30
28 Schweinejauche (1,8% TM)	m ³	3,3	2,97	0,2	3,1	0,2	90	90
Geflügel								
31 Hühnermist (50 % TM)	t	20,3	9,14	16,0	18,0	6,9	(30) 45	(30) 45
32 Hühnerkot (50 % TM)	t	22,1	9,95	17,5	18,9	7,5	60	60
34 Masthähnchenmist (60 % TM)	t	19,7	8,87	15,7	19,7	7,5	(30) 45	(30) 45

Organische Dünger mit Code	Einheit	Nährstoffgehalt in kg/T bzw. m ³ Frischmasse ¹					Mindest- wirksamkeitsgrad N _{Gesamt} in % ²	
		N _{Gesamt}	NH ₄ ⁻ - N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	Acker	Grünland
35 Pekingenten- und Gänsemist (30 % TM)	t	6,5	2,93	6,0	6,2	2,3	(30) 45	(30) 45
36 Flugentenmist (30 % TM)	t	7,8	3,51	8,1	6,9	2,5	(30) 45	830) 45
Sonstige tierische Herkunft								
41 Pferdemist (30 % TM)	t	3,6	0,36	2,7	9,3	1,9	25	25
42 Schaf-, Alpaka- und Ziegenmist (30 % TM)	t	5,9	0,59	3,1	11,3	2,6	25	25
43 Kaninchenmist (30 % TM)	t	5,6	0,56	5,7	9,2	2,1	30	30
Gärrückstände, Klärschlamm								
61 Biogasgärrest flüssig (7,5 % TM)	m ³	6,0	3,6	3,0	5,0	1,5	60	(50) 60
62 Biogasgärrest fest (25 % TM)	t	6,0	2,4	5,0	5,0	1,5	(30) 40	(30) 40
66 Klärschlamm flüssig (5 % TM)	m ³	1,8	0,18	1,6	0,2	0,5	30	30
68 Klärschlamm fest (50 % TM)	t	7,5	0,75	12,0	1,0	4,0	25	25
Sonstige pflanzliche Herkunft								
71 Gerstenstroh (86 % TM)	t	5,0	0,00	3,0	17,0	1,0	0	0
72 Haferstroh (86 % TM)	t	5,0	0,00	3,0	17,0	2,0	0	0
73 Roggenstroh (86 % TM)	t	5,0	0,00	3,0	20,0	2,0	0	0
74 Weizenstroh (86 % TM)	t	5,0	0,00	3,0	14,0	2,0	0	0
75 Körnermaisstroh (86 % TM)	t	9,0	0,00	2,0	20,0	4,0	0	0
76 Streuwiese (86 % TM)	t	11,0	0,00	4,0	15,6	2,8	0	0
82 Kartoffelfruchtwasser (48 % TM)	t	22,0	0,00	12,0	80,0	7,0	50	50
83 Schlempe (Kartoffeln) (5 % TM)	m ³	2,8	0,00	1,1	4,9	0,5	50	50
84 Traubentrester (40 % TM)	t	7,4	0,20	2,3	8,0	0,0	20	20
88 Pilzsubstrat/ Champost (33 % TM)	t	8,6	0,30	4,0	9,0	3,7	10	10
90 Kompost BioAbfV (Grüngut) (60 % TM)	t	6,6	0,70	3,9	5,1	8,2	(3) 11	(3) 11
91 Kompost BioAbfV (Bioabfall) (60 % TM)	t	8,5	0,90	5,4	7,9	10,0	(5) 11	(5) 11
95 Heilpflanzenstiele, frisch (15 % TM)	t	2,3	0,00	1,3	9,2	0,6	10	10
96 Rebhäcksel (Hopfen) (27 % TM)	t	6,0	0,00	1,3	5,9	2,1	10	10

¹ Die anrechenbaren gasförmigen Stall- und Lagerungsverluste der organischen Dünger sind bei den angegebenen N_{Gesamt} und NH₄-N-Gehalten bereits abgezogen.

² Wenn der Prozentanteil des Ammoniums (NH₄-N) am N_{Gesamt}-Gehalt höher ist als die Mindestwirksamkeit, ist der prozentuale Ammoniumanteil als Wirksamkeit anzusetzen. Die Zahl in () ist die Mindestwirksamkeit nach DüV. Die nebenstehende Zahl ist die anzusetzende Wirksamkeit, die sich aufgrund des hier enthaltenen Prozentanteils des Ammoniums (NH₄-N) am N_{Gesamt}-Gehalt ergibt.

Tabelle 27:

Wirkungsweise verschiedener Phosphatdünger

Produkt	Aufschlussgrad	P ₂ O ₅ -Gehalt in %	Löslichkeitsform des Phosphats	weitere Nährstoffe
Superphosphat	Vollaufschluss	18	neutral-ammoncitratlöslich, davon 16,7% wasserlöslich	12% S
Tripelsuperphosphat	Vollaufschluss	46	neutral-ammoncitratlöslich, davon 43% wasserlöslich	
Dicalciumphosphat	Vollaufschluss	38	alkalisch- ammoncitratlöslich (Petermann)	
Novaphos	Teilaufschluss	23	mineralsäurelöslich, davon 11,5% wasserlöslich	13% CaO 9% S
Dolophos	Weicherdiges Rohphosphat	26	mineralsäurelöslich, in 2%-iger Ameisensäure	31% CaO 3% MgO

Neben den in nachfolgender Tabelle aufgeführten Düngemitteln für den professionellen Gebrauch, bieten einige BAD-Mitglieder eine breite Palette von Düngemitteln für den Haus- und Kleingarten an. Unter folgenden Links oder den nebenstehenden QR-Codes können diese abgerufen werden:



Evergreen Garden Care:

<https://www.lovethegarden.com/de-de/produkte/dunger>



Compo Expert:

<https://compo-expert.com/de-DE/kulturen>

Gruppe	Handelsname	Anwendung	Formulierung	Ausgangsmaterial/ Bestandteile/ Düngemittel- typ nach DüMV	Hersteller/ Firma	Nährstoffgehalte in kg pro dt bzw. %														Kalkwert-kg CaO je 100 kg Dünger							
						Ngesamt	P ₂ O ₅ gesamt (mineräure- löslich)	K ₂ Ogesamt	CaO	CaCO ₃	MgCO ₃	MgO	Sgesamt	Na	Bgesamt	Mn gesamt	Cugesamt	Zngesamt	Fe		Ca	Mo wasserlöslich	Se (ppm)				
	DOLOMIX® Bio 4/2	Bodendüngung	gemahlen, angefeuchtet	Kohlensaurer Magnesiumkalk mit weicherdigem Rohphosphat und Calciumsilfat (Gips)	DüKa	4			46	26	2																38
	DOLOPHOS® 6	Bodendüngung	gemahlen, angefeuchtet	Kohlensaurer Magnesiumkalk mit Phosphat- asche aus der Verbrennung von Klärschlamm	DüKa	6			40	22																	36
	DOLOPHOS® 16	Bodendüngung	granuliert	Kohlensaurer Magnesiumkalk mit Weicherdigem Rohphosphat	DüKa	16			65	15																	30
	CINIPUR®	Bodendüngung	gemahlen, angefeuchtet	Kalkdünger aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe (Holzasche)	DüKa	1	3	15		2																	17
	CINICAL®	Bodendüngung	gemahlen, angefeuchtet	Kohlensaurer Kalk mit basisch wirksamer Pflanzenasche (Holzasche)	DüKa		1,3	76																			43
	CINIDOL®	Bodendüngung	gemahlen, angefeuchtet	Kohlensaurer Ma- gnesiumkalk mit basisch wirksamer Pflanzenasche (Holzasche)	DüKa		1,3	50	28																		47
	Hersbrucker Gesteinsmehl	Bodendüngung	gemahlen, trocken	Kalkdünger aus der Gewinnung oder Verarbeitung von Kalkstein oder Dolomit (Kalksteinmehl und Ornatenton- mehl)	DüKa		2	21		12																	34
	Branntkalk	Bodendüngung	gemahlen	gebrannter Kalkstein	DüKa			75- 90																			75-90
	Branntkalk	Bodendüngung	körnig	gebrannter Kalkstein	DüKa			75- 90																			75-90
	Magnesium-Brannt- kalk	Bodendüngung	gemahlen	gebrannter Dolomit	DüKa			60		25																	95
	Magnesium-Brannt- kalk	Bodendüngung	körnig	gebrannter Dolomit	DüKa			60		25																	95

FEMIKAL®	Bodendüngung	angefeuchtet	Mischkalk: Kohlensaurer Magnesiumkalk mit Brantkalk	DüKa						10										55
Hüttenkalk 47	Bodendüngung	gemahlen	Kieselsaurer Kalk aus Calcium- und Magnesiumsili- katen (Hochofen- schlacke)	sonstige						7										50
Konverterkalk	Bodendüngung	feucht-körnig	Kieselsaurer Kalk aus Calcium- und Magnesiumsili- katen aus abgebie- ter Konverter- schlacke	Rheinkalk, Thyssen- krupp	1.3					6			1.3						13	46
Schwarzkalk	Bodendüngung	fein, feucht	Kalkdünger aus der Herstellung von Stickstoff- düngemitteln	DüKa					67											37
Carbokalk	Bodendüngung	feucht	Kalkdünger aus der Verarbeitung von Zuckerrüben	Südzucker (Nord- zucker)	1.4 (1.5)	0.1 (0.1)	27 (29)	48 (51)	36 (2,0)	1.7 (1,0)	0.23 (0,22)									27 (29)
6	PK-Dünger																			
PKPlus 11-25 (+4MgO+19SO3)	Bodendüngung	granuliert	PK(Mg,S)-Dünger	ICL	11	25	15			4	7.6									0
PKPlus 10-25 (+3MgO+18SO3)	Bodendüngung	granuliert	PK(Mg,S)-Dünger	ICL	10	25	16			3	7.2									0
PKPlus 12-24 (+0MgO+18SO3)	Bodendüngung	granuliert	PK(Mg,S)-Dünger	ICL	13	24	17			0	7.2									0
PKPlus 13-19 (+4MgO+21SO3)	Bodendüngung	granuliert	PK(Mg,S)-Dünger	ICL	13	19	15			4	8.5									0
PKPlus 13-24 (+2MgO+19SO3)	Bodendüngung	granuliert	PK(Mg,S)-Dünger	ICL	13	24	15.7			2	7.8									0
PKPlus 17-12 (+2MgO+26SO3)	Bodendüngung	granuliert	PK(Mg,S)-Dünger	ICL	17	12	20			2	10.4									0
PKPlus 16-16 (+2MgO+23SO3)	Bodendüngung	granuliert	PK(Mg,S)-Dünger	ICL	16	16	20			2	9.2									0
PKPlus 21-05 (+2MgO+25,9SO3)	Bodendüngung	granuliert	PK(Mg,S)-Dünger	ICL	21	5	26.2			2	10.4									0
PK 26-25	Bodendüngung	granuliert	PK Dünger	ICL	26	25	15.5													0
PK 07+40(+10SO3)	Bodendüngung	granuliert	PK(S)-Dünger	ICL	7	40	11				4									0
Basfoliar® P-Max SL	Blattdüngung	flüssig	Flüssiges PK (MgO) Düngemit- tel, 29,5-5 (+4,5) mit Zink	COMPO EXPERT	29,5	5				4,5									3.1	
Basfoliar® K Pre- mium SL	Blattdüngung	flüssig	Flüssiger PK- Blattdünger, 1,6- 18 mit Bor (B)	COMPO EXPERT	1,6	18							0,79							
YaraVita™ Kom- biPhos	Blattdüngung	flüssig	PK-Düngertlösung mit Magnesium, Mangan und Zink	Yara	44	7,5				6,7									5	0

Tabelle 29:

Liste der Stickstoffinhibitoren („Stabilisatoren“) und inhibierter Düngemittel der BAD-Mitgliedsunternehmen (Stand Dezember 2025)

Technologie	Wirkstoffe	Produktname	Anbieter	Anwendung für	zur Behandlung von	für Endkunden
Nitrifikationsinhibitor						
	DMPP	Vibelsol®	BASF	Düngemittelproduzenten, -distributoren und -händler	festen und flüssigen Mineraldüngern (> 50% aus Harnstoff-N und Ammonium-N an Gesamt-N-Gehalt)	Landwirt erhält ein ready-to-use product aus Dünger+DMPP
	DMPSA-K2	Ampliqan®	BASF	Düngemittelproduzenten, -distributoren und -händler	festen und flüssigen Mineraldüngern (> 50% aus Harnstoff-N und Ammonium-N an Gesamt-N-Gehalt)	Landwirt erhält ein ready-to-use product aus Dünger+DMPSA-K2
	DMPP	Vizura®	BASF	Landwirte	flüssigen stickstoffhaltigen organischen Düngemittel aus Tierhaltung sowie Biogasgülten auf dem lw. Betrieb	Landwirt mischt Produkt und Dünger auf dem lw. Betrieb und bringt die Mischung auf den Feldern aus
					stickstoffhaltigen flüssigen Mineraldüngern wie z.B. AHL28, AHL30 und AHL32	Landwirt mischt Produkt und Dünger auf dem lw. Betrieb und bringt die Mischung auf den Feldern aus
					bewuchslosem Boden oder Grünland max. 24 h vor der Ausbringung von flüssigen oder festen stickstoffhaltigen organischen Düngern	Landwirt mischt Produkt und Wasser auf dem lw. Betrieb und bringt die Mischung auf den Feldern aus
					Ernterückständen vor der Einarbeitung in den Boden	Landwirt mischt Produkt und Wasser auf dem lw. Betrieb und bringt die Mischung auf den Feldern aus
	DMPSA-K2	Ampliqan® Perform	BASF	Landwirte	flüssigen stickstoffhaltigen organischen Düngemittel aus Tierhaltung sowie Biogasgülten auf dem lw. Betrieb	Landwirt mischt Produkt und Dünger auf dem lw. Betrieb und bringt die Mischung auf den Feldern aus
					bewuchslosem Boden oder Grünland max. 24 h vor der Ausbringung von flüssigen oder festen stickstoffhaltigen organischen Düngern	Landwirt mischt Produkt und Wasser auf dem lw. Betrieb und bringt die Mischung auf den Feldern aus
					Ernterückständen vor der Einarbeitung in den Boden	Landwirt mischt Produkt und Wasser auf dem lw. Betrieb und bringt die Mischung auf den Feldern aus
	DMPSA	ENTEC® EVO™	EuroChem	Landwirte	stickstoffhaltigen flüssigen Mineraldüngern wie z.B. AHL28, AHL30 und AHL32	Landwirt mischt Produkt und Dünger auf dem lw. Betrieb und bringt die Mischung auf den Feldern aus
	DMPP	ENTEC®	EuroChem	Landwirte	festen Mineraldüngern (> 50% aus Harnstoff-N und Ammonium-N an Gesamt-N-Gehalt)	Landwirt erhält Ready to use produkt aus Dünger+ DMPSA
	3-MP /MPA	PIADIN®	SKW Piesteritz	Landwirte	flüssigen stickstoffhaltigen organischen Düngemittel aus Tierhaltung sowie Biogasgülten auf dem lw. Betrieb	Landwirt mischt Produkt und Dünger auf dem lw. Betrieb und bringt die Mischung auf den Feldern aus

Ureaseinhibitor

Limus (NBPT+NPPT (3:1))	Limus® Direct	BASF	Düngemittelproduzenten, -distributoren und -händler	festen und flüssigen harnstoffhaltigen Mineraldüngern (> 50% Harnstoff-N an Gesamt-N-Gehalt)	Landwirt erhält ein ready-to-use product aus Dünger+Limus
Limus (NBPT+NPPT (3:1))	Limus® Care 2.0	BASF	Düngemittelproduzenten, -distributoren und -händler	festen und flüssigen harnstoffhaltigen Mineraldüngern (> 50% Harnstoff-N an Gesamt-N-Gehalt)	Landwirt erhält ein ready-to-use product aus Dünger+Limus
Limus (NBPT+NPPT (3:1))	Limus® Care Flex 2.0	BASF	Düngemittelproduzenten, -distributoren und -händler	festen und flüssigen harnstoffhaltigen Mineraldüngern (> 50% Harnstoff-N an Gesamt-N-Gehalt)	Landwirt erhält ein ready-to-use product aus Dünger+Limus
Limus (NBPT+NPPT (3:1))	Limus® Perform 2.0	BASF	Landwirte	flüssigen harnstoffhaltigen Mineraldüngern	Landwirt mischt Produkt und Dünger auf dem lw. Betrieb und bringt die Mischung auf den Feldern aus

Bundesarbeitskreis Düngung (BAD)

Mitglieder

AlzChem AG

Dr.-Albert-Frank-Straße 32
83308 Trostberg
Tel. +49 8621 86-0
www.alzchem.de

BASF SE

Polyamides & Precursors Europe
Cluster Fertilizers
Carl-Bosch-Straße 38
67056 Ludwigshafen
Tel. +49 621 60-0
www.basf.com

COMPO Expert GmbH

Krögerweg 10
48155 Münster
Tel. +49 251 29798-1000
www.compo-expert.com

DOMO Caproleuna GmbH

Am Haupttor
Bau 3101
06234 Leuna
Tel. +49 3461 43-2200
www.domo.org

Kalkverband Agrar

im Bundesverband der Deutschen
Kalkindustrie e. V.
Annastraße 67-71
50969 Köln
Tel. +49 221 934674-30
www.naturkalk.de

Eurochem Agro GmbH

Postfach 10 10 47
68010 Mannheim
www.eurochemdach.com

Evergreen Garden Care

Deutschland GmbH

Wilhelm-Theodor-Römheld-
Straße 30
55130 Mainz
Tel. +49 6131 2106-0
www.lovethegarden.com/de-de

FEhS - Institut für Baustoff- Forschung e. V.

Bliersheimer Straße 62
47229 Duisburg
Tel. +49 2065 9945-0
www.fehs.de

ICL Fertilizers Deutschland GmbH

Giulinistraße 2
67065 Ludwigshafen
Tel. +49 621 5793-6
www.iclfertilizers.com

K+S Minerals and Agriculture GmbH

Bertha-von-Suttner-Straße 7
34131 Kassel
Tel. +49 561 9301-0
www.kpluss.com

OCI Nitrogen Europe

Poststraat 1
6135 KR Sittard, NL

SKW Piesteritz

Möllensdorfer Str. 13
06886 Lutherstadt Wittenberg
www.skwp.de

YARA Brunsbüttel GmbH

Holstendamm 2
25535 Brunsbüttel
Tel. +49 4852 82-1
www.yara.de

YARA GmbH & Co. KG

Hanninghof 35
48249 Dülmen
Tel. +49 2594 798-0
www.yara.de

Weitere Informationen
finden Sie unter

www.iva.de

Herausgeber:

Industrieverband Agrar e. V. (IVA)

Pflanzenernährung

Mainzer Landstraße 55

60329 Frankfurt am Main

www.iva.de

Bildnachweis:

Aleksa - stock.adobe.com: Titel; K+S Minerals and Agriculture GmbH: S. 23, 30, 32, 33, 38, 45, 46, 49, 50;

Cakmak: S.38; YARA: S. 48,50

Urheberschaft:

Aktualisierte Version auf Grundlage einer Broschüre des Landesarbeitskreises Düngung (LAD) Bayern

Unter Mitarbeit der Mitglieder des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD)

Redaktion:

Dr. T. Scheile, Dr. J. Monath

Industrieverband Agrar e. V. (IVA), Frankfurt am Main

Satz/ Layout:

Seippel & Weihe Kommunikationsberatung GmbH

Offenbach am Main , www.seippel-weihe.com

Stand: Februar 2026

Die aktuelle Broschüre kann als Download-Datei unter www.iva.de/publikationen
abgerufen werden.

