



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Issue Brief 08 – März 2025

Neuartige Düngemittel und ihre Wirkungsweise

des Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Content

- 3 Kernpunkte
- 5 Was ist das Problem?
- 6 Die Effizienz der Nährstoffverwendung in der Landwirtschaft
- 10 Neuartige Technologien für effizientere Düngemittel
- 20 Barrieren für eine weite kommerzielle Nutzung neuer Düngemitteltechnologien
- 22 Bewertung neuartiger Düngemittelprodukte
- 27 Wer muss was tun?
- 28 Wie würde Erfolg aussehen?
- 29 Referenzen
- 33 Autoren, Zitation und Kontakt



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Kernpunkte

Die Effizienz herkömmlicher Düngemittel liegt bei Stickstoff aufgrund von Verlusten durch Auswaschung und Verflüchtigung oft unter 60 % und bei Phosphor und Spurenmineralien aufgrund der starken Bodenbindung sogar noch niedriger.

Innovative Düngemittel und deren Anwendung haben ein erhebliches Potenzial, die Nährstoffeffizienz zu steigern. Bei diesen Düngemitteln handelt es sich um fortschrittliche Formulierungen, die darauf abzielen, die Effizienz der Nährstoffnutzung und die Leistung der Pflanzen zu verbessern während die Umweltauswirkungen gering bleiben. Da sich die Landwirtschaft auf Nachhaltigkeit konzentriert, ist die Entwicklung dieser Düngemittel entscheidend für die gleichzeitige Erzielung von Produktivitäts- und Umwelteffekten.

Zu den Technologien mit verbesserter Effizienz (Abb. 1) gehören Düngemittel basierend auf Inhibitoren, Formulierungen mit langsamer und kontrollierter Freisetzung, mikrobielle Beschichtungen, Nanodünger und neuartige Trägertechnologien (z. B. Graphen, geschichtete Doppelhydroxide und metall-organische Gerüste). Viele Innovationen sind zwar vielversprechend, stehen aber vor Herausforderungen in Bezug auf Kosten, Skalierbarkeit und langfristige ökologische und agronomische Leistung.

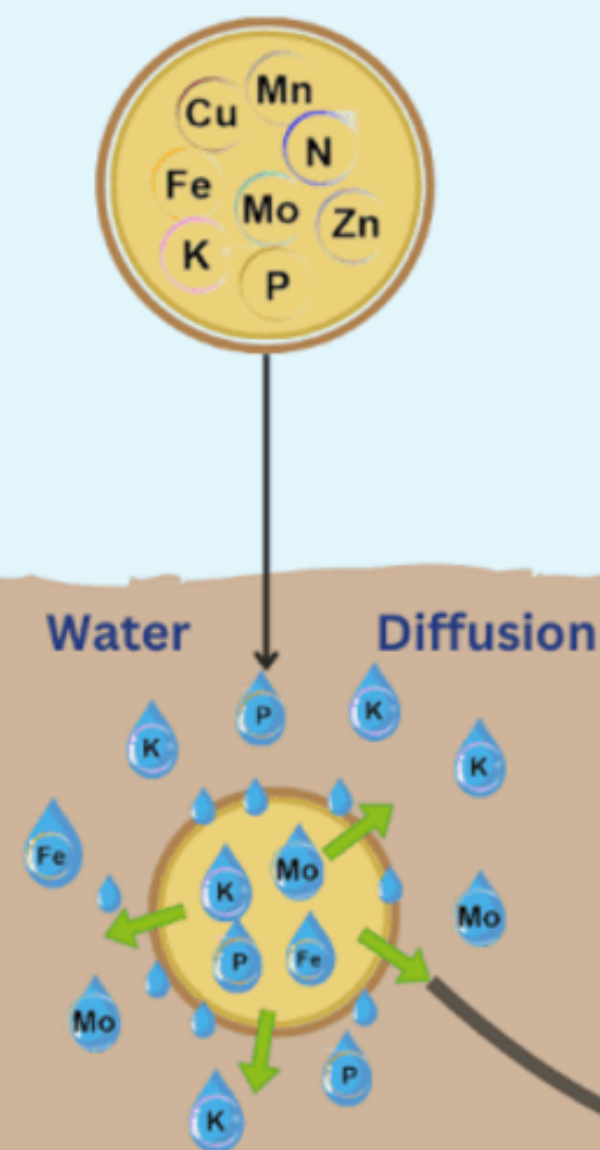
Die Einführung neuartiger Düngemittel ist oft durch höhere Kosten, uneinheitliche agronomische Vorteile, logistische Probleme, Komplexität der Herstellung und rechtliche Hürden eingeschränkt. Darüber hinaus fehlt es vielen Innovationen an soliden Feldversuchen, die den Landwirten eindeutige wirtschaftliche und ökologische Vorteile aufzeigen. Um neue Düngerformulierungen zu bewerten, sollten vier Aspekte dokumentiert werden: (1) Wirkungsweise, (2) agronomische und ökologische Effizienz, (3) einfache Handhabung und Logistik sowie (4) Kosten, Komplexität und der ökologische Fußabdruck der Herstellung. Rigorose Tests unter Feldbedingungen und standardisierte Versuchsprotokolle sind für die Validierung entscheidend.

Regierungen, Industrie, Forscher und Landwirte müssen zusammenarbeiten, um nachhaltige Düngemitteltechnologien zu entwickeln, zu bewerten und einzuführen. Politische Maßnahmen, Anreize und vereinfachte rechtliche Rahmenbedingungen sind notwendig, um die Entwicklung und den breiteren Einsatz zu fördern. Erfolgreich wären Düngemittel mit geringeren Treibhausgasemissionen, höherer Effizienz, besserer agronomischer Leistung und einem geringeren ökologischen Fußabdruck.

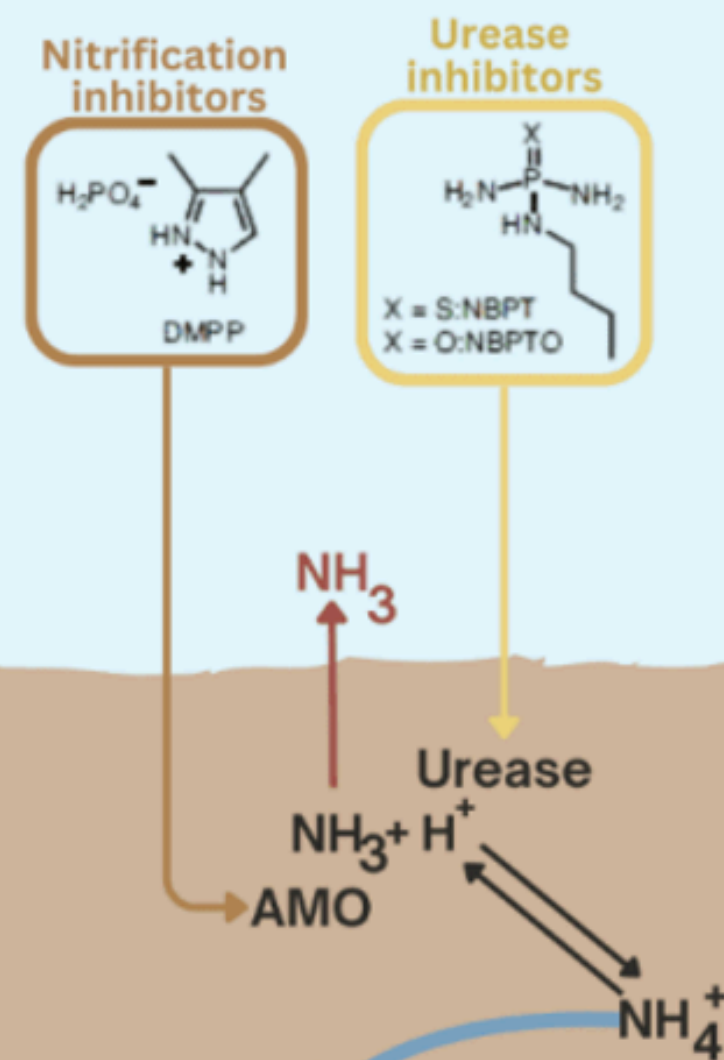


Novel fertilizers and their modes of action

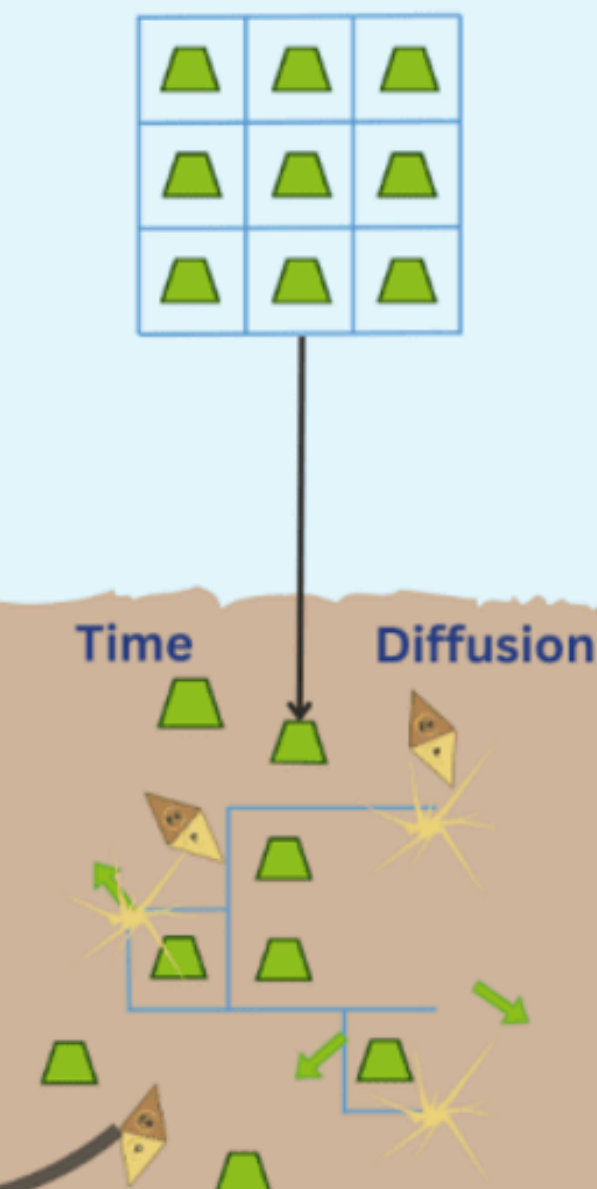
Coated fertilizers



Inhibitor-treated fertilizers



Metal-organic frameworks



Soil nutrients
available to plants

Abbildung 1. Beispiele für effizientere Düngemitteltechnologien und ihre Funktionsweise auf dem Feld.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Was ist das Problem?

Neuartige Düngemittel sind Formulierungen, die Beschichtungen, Trägerstoffe, Inhibitoren, Mikroorganismen, Nanomaterialien usw. enthalten und speziell darauf ausgerichtet sind, die Nährstoffnutzungseffizienz (NuUE) zu verbessern, die Leistung der Pflanzen in Bezug auf Ertrag oder Qualität zu steigern und/oder negative Umweltauswirkungen zu verringern.

Diese Formulierungen zielen darauf ab, die Versorgung mit einem breiten Spektrum an essentiellen oder nützlichen Elementen für das Pflanzenwachstum zu verbessern (1). Sie basieren auf unterschiedlichen Wirkmechanismen und werden für verschiedene Zwecke eingesetzt. Mit dem weltweiten Bestreben, die Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktionsverfahren zu verbessern, hat die Zahl der Veröffentlichungen, Patente und Produkte im Zusammenhang mit neuartigen Düngetechnologien deutlich zugenommen. Das Verständnis der Wirkungsweise neuartiger Düngemittel, die Entwicklung geeigneter Protokolle für ihre Bewertung und die eindeutige Dokumentation der Leistungsergebnisse anhand geeigneter Messgrößen sind unerlässlich, um den Endverbrauchern dieser Produkte fundierte Entscheidungen zu ermöglichen.

Angesichts der zunehmenden Anzahl und Art neuartiger Düngemittel auf dem Markt sind klare Definitionen der Produktkategorien, ihrer Wirksamkeit und der Art und Weise, wie sie am besten bewertet werden können, um Behauptungen zu stützen, unerlässlich. Im Folgenden geben wir einen Überblick über die wichtigsten Wirkungsweisen, die zur Verbesserung der Effizienz des Nährstoffeinsatzes erforderlich sind, über die Arten neuartiger Düngemittel und über robuste Methoden zur Leistungsbewertung. Wir konzentrieren uns hier auf anorganische Düngemittel vorwiegend synthetischen oder mineralischen Ursprungs und berücksichtigen keine rein organischen Düngemittel, mikrobiellen Produkte oder andere Biostimulanzen.





SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Die Effizienz der Nährstoffverwendung in der Landwirtschaft

Die Effizienz der Nährstoffnutzung durch Nutzpflanzen kann auf verschiedene Weise definiert und gemessen werden (2). Die agronomische Effizienz (AE) definiert die Steigerung des Ernteertrags pro ausgebrachter Düngereinheit.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Für Landwirte ist die agronomische Effizienz ein sehr wichtiges Maß, da sie sowohl die Effizienz der Nährstoffaufnahme aus dem Dünger als auch die Umwandlung des Düngers in ein Ernteprodukt berücksichtigt. Um hohe Effizienz der Zugabe eines bestimmten Düngemittels, Produkts oder einer Ausbringungsmethode in verschiedenen Kulturen und Umgebungen zu vergleichen, ist die Düngerrückgewinnungseffizienz (RE) das bevorzugte Maß. Sie wird berechnet als die Zunahme der Nährstoffaufnahme in der oberirdischen Pflanzenbiomasse pro ausgebrachter Nährstoffeinheit im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle (2). Für die Quantifizierung der AE und RE von Düngemitteln werden Feldstudien bevorzugt, da die Aufnahmeeffizienz von Nährstoffen, die auf den Boden oder die Blätter aufgebracht werden, je nach Nährstoff, Ausbringungsmethode und -ort, Zeitpunkt, Ausbringungsrate, Boden- und Pflanzentyp sowie Umweltbedingungen variiert. Die AE- und RE-Werte müssen aufgrund dieser Störfaktoren unter Sorgfalt interpretiert werden. Um die Wirkungsweise neuartiger Düngemittel zu verstehen, insbesondere die Nährstoffaufnahme, -umsetzung, -verteilung und -umverteilungseffizienz in der Pflanze, werden zusätzliche Pflanzenindikatoren benötigt (2).

Stickstoff (N) ist der Makronährstoff, der am leichtesten aus der Wurzelzone durch Auswaschung und Abfluss oder an die Atmosphäre verloren geht. Die Auswaschungsverluste von Stickstoff sind hoch. Unabhängig von der Form des Stickstoffdüngers, die dem Boden zugeführt wird, wandeln chemische, mikrobielle und enzymatische Prozesse den zugeführten Stickstoff in unterschiedliche Formen um, die verloren gehen können. Mikrobielle und enzymatische Prozesse im Boden wandeln den zugeführten N in Ammonium (NH_4^+) oder Nitrat (NO_3^-) um. Da Nitrat anionisch ist, wird es im Boden nicht stark zurückgehalten, da die Oberflächen kolloidaler Partikel im Allgemeinen negativ geladen sind. Ammoniak (NH_3) wird durch chemische und enzymatische Prozesse aus Harnstoff und Düngemitteln auf Ammoniumbasis erzeugt und kann in die Atmosphäre

entweichen (Verflüchtigung). Außerdem können Mikroorganismen NO_3^- in andere Gase (wie N_2 und Distickstoffoxid, N_2O) umwandeln, die leicht in die Atmosphäre gelangen. Diese gasförmigen N-Formen entstehen abhängig von der Form des zugeführten N-Düngers und den Bodenbedingungen, was zu einer mikrobiellen oder enzymatischen Umwandlung von N von einer Art in eine andere führt (3).

Infolge der N-Umwandlung und N-Verluste schwankt die in Feldversuchen gemessene Effizienz der Pflanzen bei der Aufnahme von Dünger-N (RE) zwischen 10 % und 75 %. Der weltweite Durchschnitt hierbei liegt bei etwa 50 % (2, 4). Sowohl präzisere agronomische Praktiken als auch die Düngemittelformulierung zielen darauf ab, die N-Nutzungseffizienz zu erhöhen. Das allgemeine Ziel besteht darin, die Bewegung von N im Boden zu verringern (durch Kontrolle der Nährstofffreisetzung oder Verringerung der Umwandlung in Nitrat) oder dessen Umwandlung in Ammoniak (NH_3), Distickstoffoxid (N_2O) und andere N-haltige Gase zu verringern.

Innovationen bei der Entwicklung von Stickstoffdüngern konzentrieren sich häufig auf Formulierungen mit langsamer oder kontrollierter Freisetzung, wobei diese beiden Optionen nicht verwechselt werden sollten. Ein Langzeitdünger ist definiert als ein "Dünger, dessen Pflanzen-verfügbare Nährstoffe durch Hydrolyse und/oder biologischen Abbau und/oder begrenzte Löslichkeit im Vergleich zu einem "löslichen" Referenzprodukt über einen längeren Zeitraum verteilt sind" (5). Ein Düngemittel mit kontrollierter Freisetzung ist definiert als ein Düngemittel, bei dem die Nährstofffreisetzung kontrolliert ist und die angegebene Freisetzungsrate des Nährstoffs und die angegebene Freisetzungszeit bei einer bestimmten Temperatur eingehalten werden" (5). Dabei wird die kontrollierte Freisetzungsrate der Nährstoffe durch die Modifizierung leicht verfügbarer Nährstoffformen mit anerkannten physikalischen Mechanismen wie Beschichtungen,



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

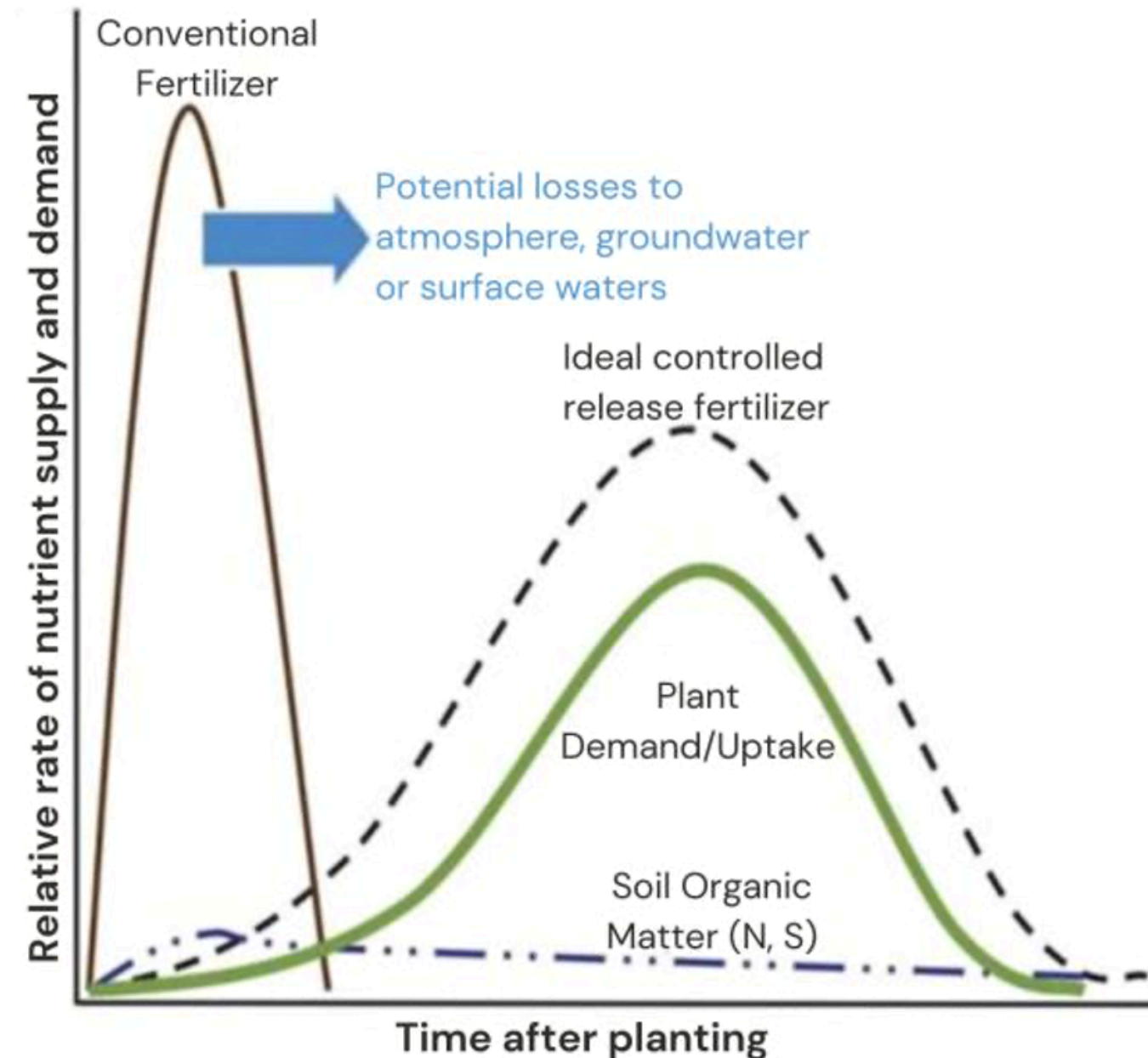


Abbildung 2. Relative Raten des Nährstoffbedarfs von Pflanzen (z. B. Stickstoff) und des Angebots aus verschiedenen Quellen. Dünger mit kontrollierter Freisetzung zielen darauf ab, die Nährstofffreisetzung zu verzögern, um eine größere Synchronität mit dem Nährstoffbedarf der Pflanzen zu erreichen. Quelle: angepasst von Lam et al. 2024 (6).

Verschlüssen oder ähnlichen Mitteln. Beide zielen darauf ab, eine größere Synchronität zwischen der Nährstofffreisetzung aus dem Dünger und dem Nährstoffbedarf der Pflanzen zu erzielen (Abb. 2), wodurch Verluste verringert und die Verwertungseffizienz erhöht werden.

Phosphor wird dem Boden hauptsächlich in Form von anionischen Ortho- oder Polyphosphaten zugeführt. Im Gegensatz zu Nitrat reagieren Phosphat-Ionen stark mit Bodenkationen wie Aluminium (Al), Eisen (Fe), Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) und bilden schwer lösliche Niederschläge oder stark gebundene Oberflächenkomplexe. Die Verluste in die Atmosphäre sind vernachlässigbar und auch die Verluste durch Auswaschung oder Oberflächenabfluss sind in den meisten Böden relativ gering. Die Rückgewinnungseffizienz von Dünger-P ist im Jahr der Ausbringung gering und liegt im Allgemeinen bei 3-35 % (2, 7, 8). Der stark im Boden gebundene Dünger-P ist für die Pflanzen jedoch nicht völlig unzugänglich. Im Laufe der Zeit können die Pflanzen auf einen Teil des zurückgehaltenen P zugreifen, der oft als "Vermächtnis P" bezeichnet wird (9). Durch die kontinuierliche Ausbringung von P auf einen Boden mit P-Mangel steigt der RE des ausgebrachten P und kann bei Böden mit großen P-Altbeständen über 90 % betragen (10).

Auf Böden mit P-Mangel sollten Produkte, die die Effizienz des P-Düngereinsatzes erhöhen, die Bodenmobilität des zugegebenen P steigern. Auf Böden, bei denen in der Vergangenheit mehr P-Dünger ausgebracht wurde, als die Pflanzen aufnehmen konnten, sollte das Ziel darin bestehen, den Zugang der Pflanzen zum gespeicherten P zu verbessern. Damit kann ein hoher RE erreicht werden während die Menge des im Boden gespeicherten P verringert wird. In der Praxis bedeutet dies, dass mehrere Jahre lang mit einer Rate gedüngt wird, die geringfügig unter dem Entzug durch die Ernte liegt, bevor zu Ersatzraten zurückgekehrt wird. Für diese Böden sollten neue chemische oder mikrobielle Produkte entwickelt werden, die einen Teil des gespeicherten P für die Aufnahme durch die Pflanzen freisetzen.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Die Effizienz des K-Düngereinsatzes ist weniger gut untersucht worden. Im Allgemeinen liegt die RE allerdings zwischen 30 % und 50 %, basierend auf Daten zur Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen. Mit Hilfe einer Isotopenmarkierungstechnik unter Gewächshausbedingungen wurden Werte bis zu 80 % ermittelt (11).

Über die Rückgewinnungseffizienz von Sekundär- (z. B. Ca, Mg) und Mikronährstoffdüngern liegen relativ wenige Daten vor. Im Jahr der Ausbringung kann die RE stark variieren. Dies hängt insbesondere von der Form des Düngers ab; ob er über den Boden oder über das Blatt hinzugegeben wurde. So haben beispielsweise die Mikronährstoffkationen Kupfer (Cu), Mangan (Mn), Eisen (Fe) und Zink (Zn) besonders niedrige RE-Werte, da der Boden sie stark zurückhält. Die direkte Ausbringung auf die Blätter kann hingegen zu wesentlich höheren RE-Werten führen. Wie bei P-Düngern gibt es jedoch eine anhaltende agronomische Restwirkung von im Boden ausgebrachten Mikronährstoffen (12). Damit wird die jährliche Ausbringung über den Bedarf der Kultur hinaus nicht notwendig. Um die Düngeleistung für diese Nährstoffe zu erhöhen, sollten sich neuartige Mikronährstoffdünger darauf konzentrieren, die Mobilität im Boden zu erhöhen oder die Nährstoffe direkt auf das Blattwerk in Formulierungen aufzubringen, die eine wirksame Aufnahme und/oder Bewegung durch die Pflanze gewährleisten.

Die Blattdüngung kann die Pflanzenernährung im Boden ergänzen, indem sie nachteilige Bodenprozesse umgeht. Ihre Anwendung erfordert jedoch eine gute Durchdringung der mineralischen Elemente durch die Blattbarrieren und eine wirksame Übertragung der Nährstoffe (13). Da die Wirkung von Blattdüngern nur von kurzer Dauer ist und nur geringe Nährstoffmengen auf Blätter aufgebracht werden können, sind oft wiederholte Anwendungen erforderlich, um den Nährstoffgehalt aufrechtzuerhalten. Außerdem kann die Anwendung von Blattdüngern in hohen Konzentrationen oder unter heißen, sonnigen

Bedingungen zu Blattverbrennungen oder -schäden führen. Außerdem ist die Blattdüngung in früheren Wachstumsstadien, wenn das Blätterdach noch nicht geschlossen ist, möglicherweise nicht wirksam. Nährstoffe können auch vom Blatt abfließen, insbesondere bei starken Niederschlägen.

Da der RE vieler Nährstoffe im Jahr der Zugabe in der Regel gering ist, gibt es beträchtliche Möglichkeiten, die Effizienz des Düngemiteleinsatzes durch neue Technologien zur Entwicklung von Düngemitteln mit verbesserter Effizienz (EEF) zu steigern. Hier fassen wir die wichtigsten Technologien und jüngsten Innovationen zur Herstellung neuartiger Düngemittel zusammen.





SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Neuartige Technologien für effizientere Düngemittel

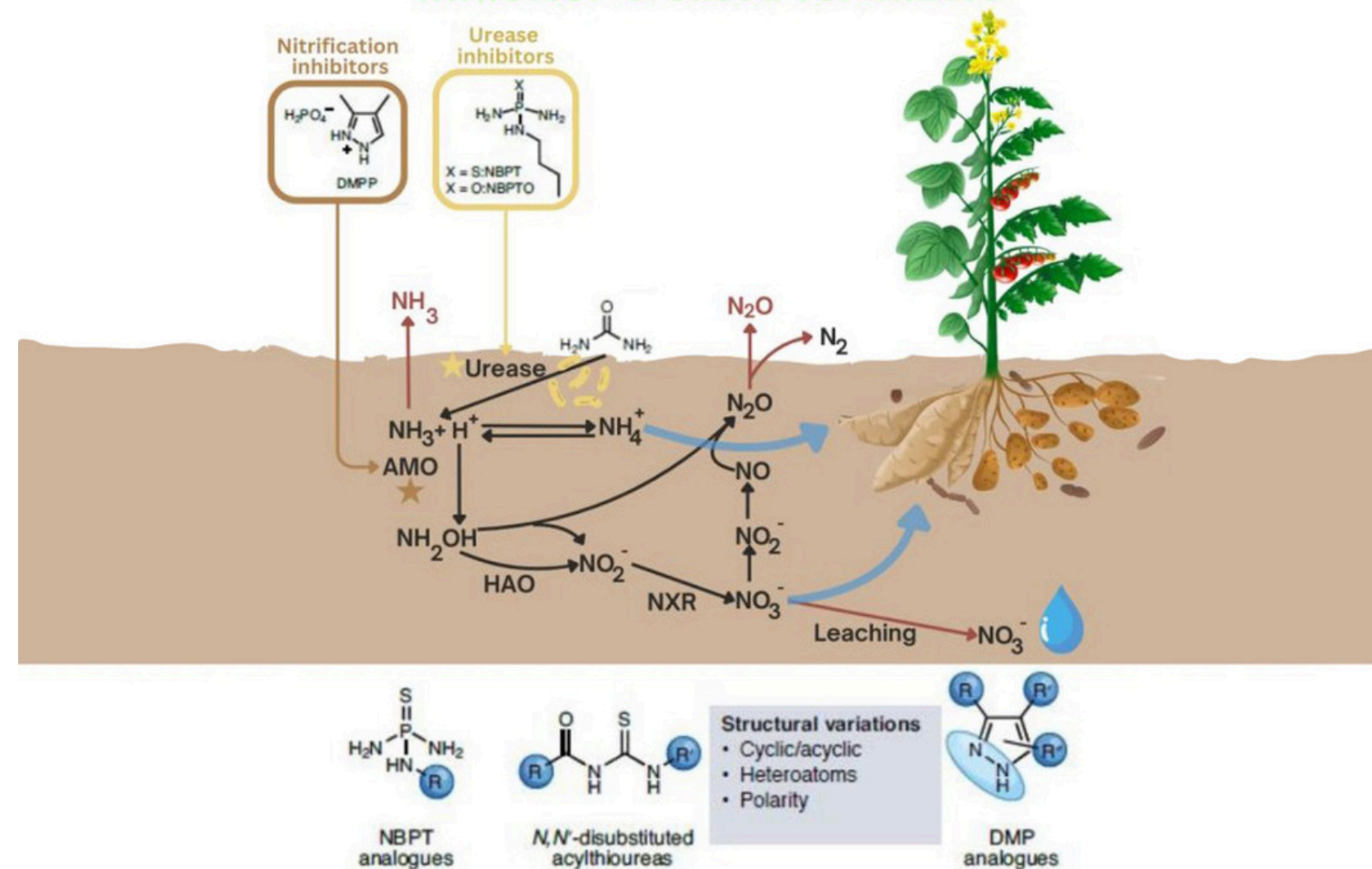
Mit den Fortschritten in der Nanochemie, der Materialwissenschaft, der Polymerchemie, der Mechanochemie, der Biochemie und den umweltfreundlichen Herstellungsverfahren entstehen immer effizientere Düngemittelooptionen unter Verwendung neu entwickelter Materialien. Im Folgenden geben wir einen Überblick über die am meisten untersuchten Innovationen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass zahlreiche wissenschaftliche Analysen zu diesem Thema kürzlich an anderer Stelle veröffentlicht worden sind (13-17).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Inhibitor-treated fertilizers



Mit Inhibitoren behandelte Düngemittel

Diese Gruppe von Düngemitteln, die auch als stabilisierte Düngemittel bezeichnet werden, ist an sich keine neue Technologie. Sie stellt die am meisten etablierte und kommerziell verfügbare Art von fortschrittlichen Düngerformulierungen dar und zielt darauf ab, die N-Nutzungseffizienz zu erhöhen. Die Inhibitortechnologie für N konzentriert sich darauf die Umwandlung von Harnstoff in Ammonium zu verlangsamen, wobei Ureaseinhibitoren und Nitrifikationsinhibitoren zumeist eingesetzt werden (Abb. 3).

Nitrifikations- und Ureaseinhibitoren wurden vor mehr als 60 Jahren entdeckt (18, 19), und viele auf dem Markt befindliche Produkte basieren auf einigen wenigen Hauptwirkstoffen. NBPT (N-(n-Butyl)-thiophosphorsäuretriamid) und 2-NPT (N-(2-Nitrophenyl)-phosphorsäuretriamid) sind häufig verwendete Ureaseinhibitoren. Dicyandiamid (DCD), Nitrapyrin und 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP) sind die gebräuchlichsten Nitrifikationsinhibitoren. In den letzten zehn Jahren sind neue Inhibitoren auf den Markt gekommen, z.B., DMPA (20) und Pronitridin (21), ein Reaktionsprodukt von Harnstoff mit Ammoniumhydroxid, DCD und Formaldehyd. Diese sind jedoch hauptsächlich für die Verwendung mit flüssigem Harnstoff-Ammoniumnitrat (UAN) oder wasserfreiem Ammoniak bestimmt.

Chemische N-Inhibitoren haben allgemein bekannte Wirkungsweisen und sind besonders nützlich, um die Verflüchtungsverluste von Ammoniak und die Emission von Treibhausgasen wie Lachgas zu verringern (3). Studien zum kombinierten Einsatz von Urease- und Nitrifikationsinhibitoren haben gezeigt, dass die gasförmigen N-Verluste stark reduziert werden können (30-75 %), während die Steigerung der Ernteerträge (1-9 %) und der N-Nutzungseffizienz (8-15 %) eher bescheiden ausfällt (6). Derzeit werden mehrere Verbindungen darauf untersucht den Nitrifikationsprozess zu hemmen (16, 22-24). Gleichzeitig ist es wahrscheinlich, dass bald weitere neue Inhibitoren auf den Markt kommen werden. Es muss allerdings sichergestellt werden, dass die neuen chemischen Verbindungen keine Gefahr für die Bodenqualität oder die Lebensmittelsicherheit darstellen (25).

Abbildung 3: Chemische Inhibitoren der gegenwärtigen und der nächsten Generation; die Prozesse, auf die die chemischen Inhibitoren abzielen, sind durch Sterne gekennzeichnet (gelb für Harnstoffinhibitoren mit NBPT als Beispiel; blau für Nitrifikationsinhibitoren mit DMPP als Beispiel); HAO - Hydroxylaminoxidoreduktase; NXR - Nitritoxidoreduktase; strukturelle Modifikationen der gegenwärtigen Harnstoff- und Nitrifikationsinhibitoren können die Effizienz unter verschiedenen landwirtschaftlichen Bedingungen verbessern. Quelle: adaptiert von Lam et al. 2022 (16).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Beschichtungen

Beschichtungen werden in der Regel bei hochlöslichen Granulatdüngern verwendet. Diese kontrollieren die Freisetzung von Nährstoffen aus dem Granulat (Abb. 4) und minimieren den Verlust von Nährstoffen aus dem Boden in die Atmosphäre (N), in die Auswaschung oder in den Abfluss (N, P und S) (26).

Wie Hemmstofftechnologien sind auch Düngerbeschichtungen an sich nicht neu, da sie seit vielen Jahrzehnten erforscht werden (27, 28). Beschichtungen können aus verschiedenen Materialien bestehen, darunter Nährstoffe oder Bodenzusätze (z. B. Schwefel, Gips, Kalk), synthetischen Chemikalien (z. B. Asphalt, Thermoplaste, Polyurethane, Harze, Polymere), natürlichen organischen Materialien (z. B. Wachse, Öle, Biokohle, biobasierte Polymere, Hydrogele) oder mikrobiellen Inokulanzen (z. B. Bakterien, Pilze).

Die Hersteller bevorzugen häufig Beschichtungstechnologien, da die zugrunde liegende Herstellung der Basisdüngerprodukte keine Änderungen erfordert. Somit wird die endgültige Düngerformulierung flexibler gestaltet indem dem Grundprodukt andere Nährstoffe, Biostimulanzen oder Mikroorganismen hinzugefügt werden. Auf diese Weise kann die Beschichtung dezentralisiert und näher an den Verwendungsort verlagert werden, wodurch das Risiko des Abbaus der Beschichtung während des Transports verringert wird. Die wichtigsten Voraussetzungen für die Kommerzialisierung neuer Beschichtungstechnologien sind: i) niedrige Kosten für das Beschichtungsmaterial; ii) kosteneffiziente und skalierbare Beschichtungstechnologien; iii) biologische Abbaubarkeit im Boden; iv) zeitlich auf den Bedarf der Pflanzen abgestimmte Nährstofffreisetzung; v) temperaturgesteuerte Freisetzung und vi) geeignete physikalische Qualität und Stabilität des Granulats (z. B. keine Risse während der Verarbeitung, des Transports oder der Anwendung).

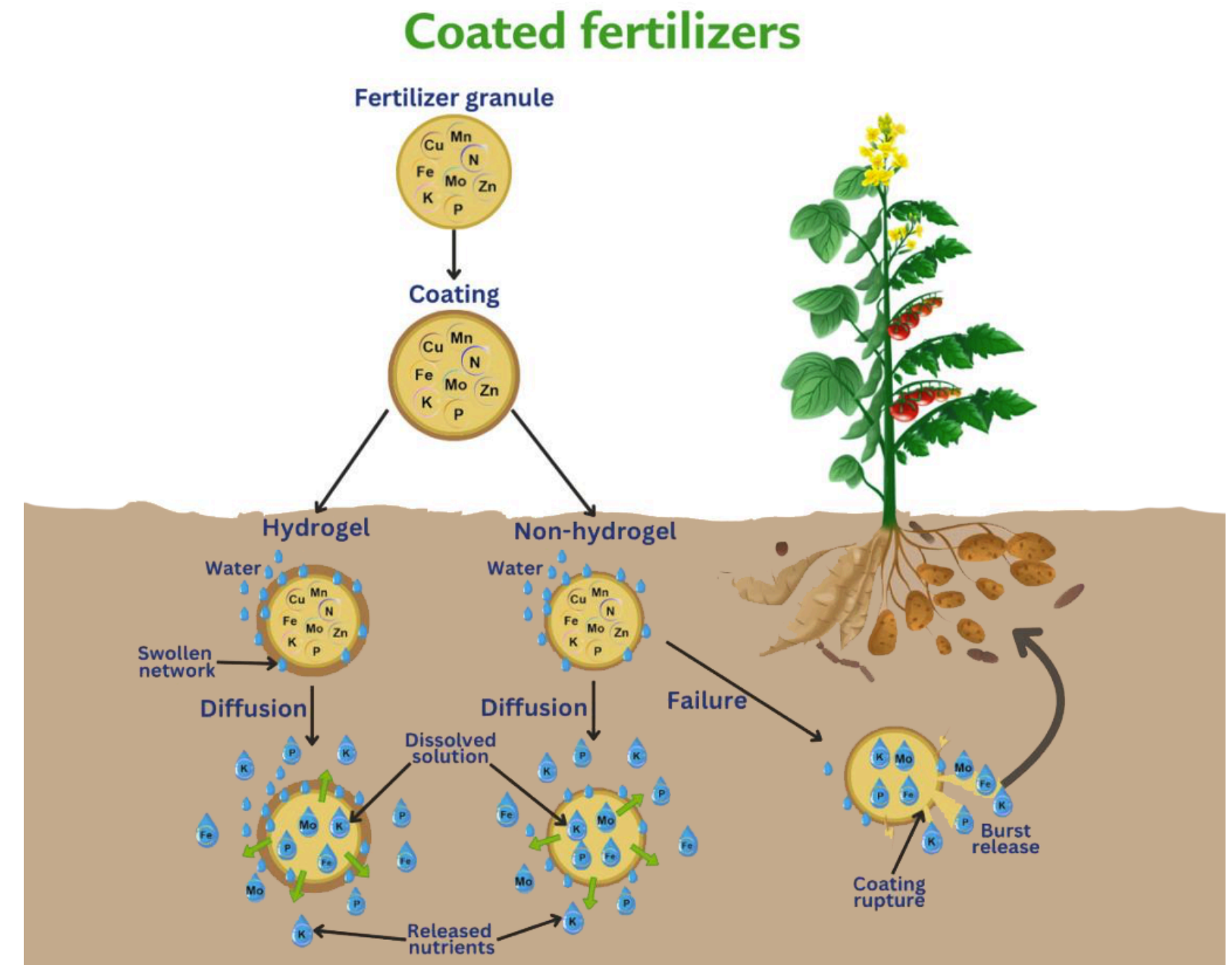


Abbildung 4. Neueste Trends bei Technologien für neuartige Polymer-beschichtete Düngemittel (PCF). Quelle: adaptiert von Kassem et al. 2024 (15).

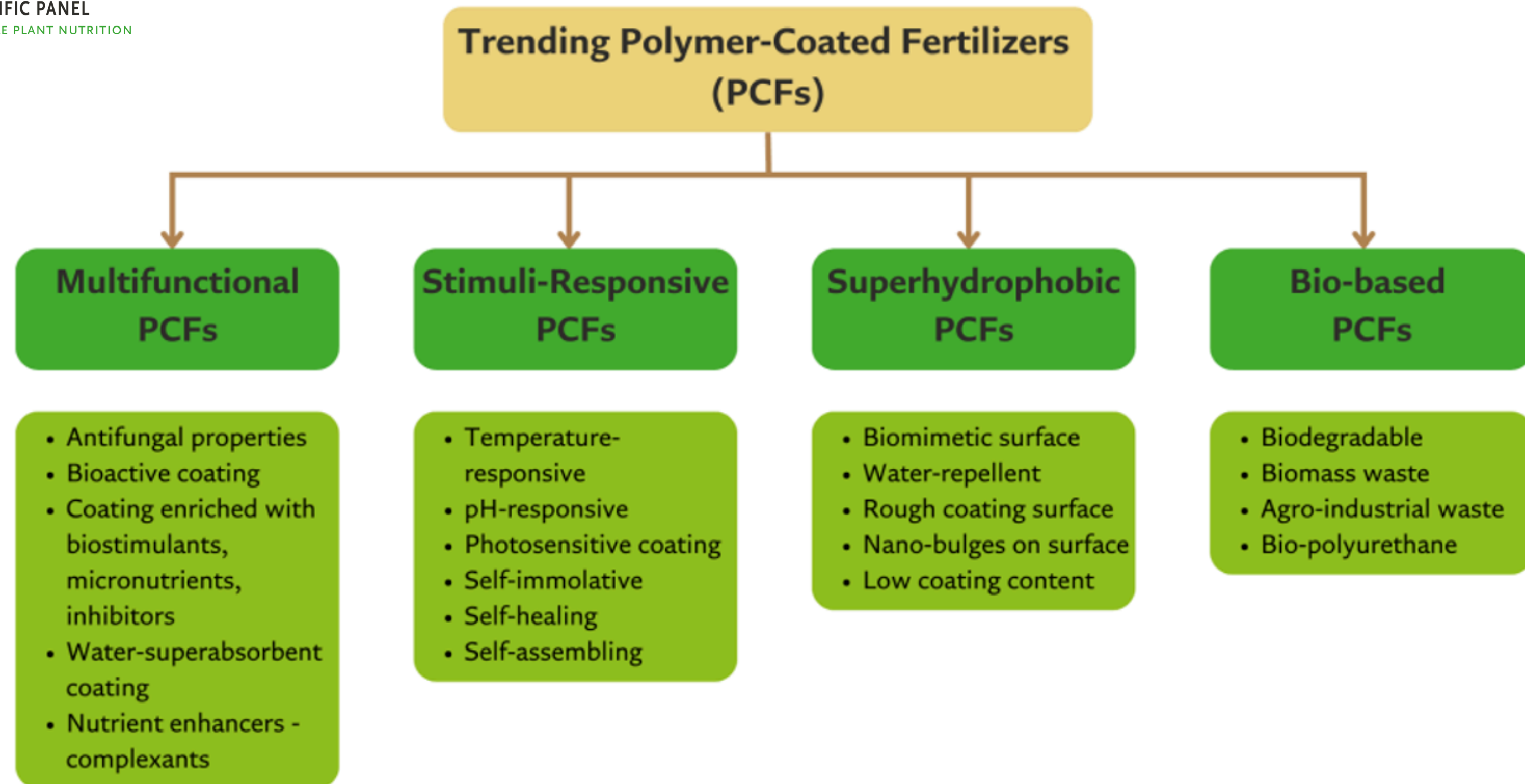


Abbildung 5. Neueste Trends bei Technologien für neuartige Polymer-beschichtete Düngemittel (PCF). Quelle: adaptiert von Kassem et al. 2024 (15).



SCIENTIFIC PANEL

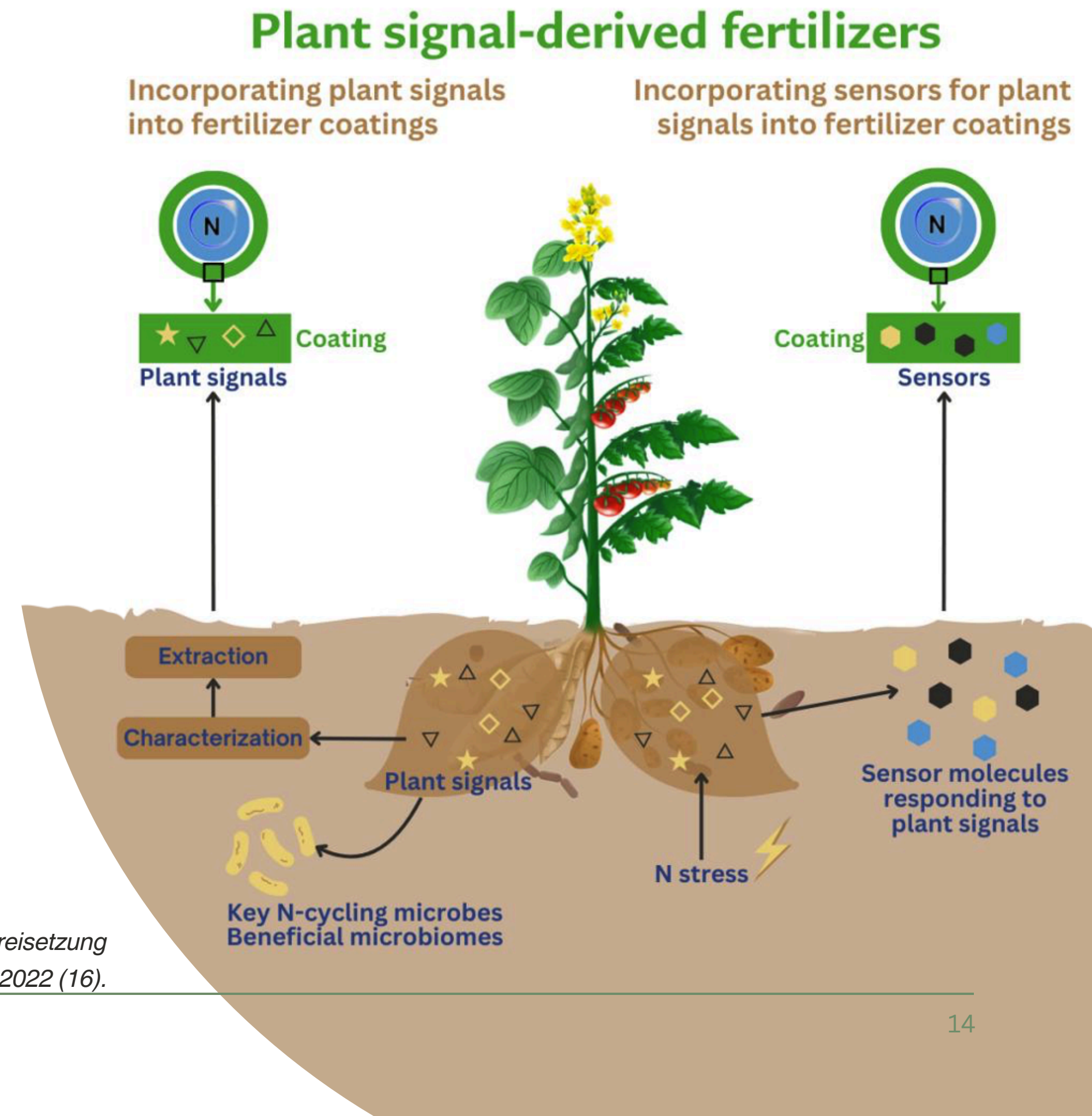
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Die Verschmutzung der Böden durch Kunststoffe aufgrund langlebiger Polymerbeschichteter Düngemittel kann bei häufiger Anwendung problematisch sein (29). Daher konzentrieren sich Innovationen für Düngerbeschichtungen (Abb. 5) verstärkt auf abbaubare Polymere biologischen Ursprungs, Hydrogel-Beschichtungsmaterialien und stimulierend wirkende Beschichtungen oder Materialien mit besserer Bodenabbaubarkeit (14, 15, 17, 30).

Das Ziel sollte allerdings nicht darin bestehen, die Freisetzung per se zu verlangsamen, sondern vielmehr die Freisetzung zu steuern, um die Verfügbarkeit von Nährstoffen besser mit dem Wachstumsbedarf der Pflanzen zu synchronisieren. "Intelligente" Düngerbeschichtungen zielen darauf ab, die eingeschlossenen löslichen Nährstoffe freizusetzen, entweder als Reaktion auf Veränderungen in der Chemie der Rhizosphäre, der Bodentemperatur oder auf Signalstoffe aus den Wurzeln (Abb. 6), die die Wurzel- oder Mikrobenfunktion beeinflussen (16, 31-33). Bislang sind dies allerdings nur vorgeschlagene Ideen, deren Wirkungsweise für die Herstellung effizienterer Düngemittel noch wissenschaftlich und kommerziell umgesetzt werden müssen.

Manche innovative Polymerbeschichtungen erhöhen den NuUE und die P-Verfügbarkeit, indem sie chemische Wechselwirkungen mit Al, Fe und Ca-haltigen Bodenbestandteilen verringern. Allerdings gibt es erhebliche wissenschaftliche Diskussionen über die agronomische Wirksamkeit dieser Beschichtungen (34-37), und die behauptete Wirkungsweise wurde bei kommerziellen Ausbringungsmengen nicht eindeutig nachgewiesen (38, 39).

Abbildung 6. Künftige "intelligente" Düngemittel könnten Beschichtungen enthalten, die die Freisetzung von Nährstoffen in Reaktion auf Pflanzensignale ermöglichen. Quelle: adaptiert von Lam et al. 2022 (16).





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Ein neuerer Fortschritt ist die kommerzielle Entwicklung biologischer Beschichtungen, die für die Ausbringung als herkömmliche körnige (z. B. Harnstoff, Monomammoniumphosphat (MAP), Diammoniumphosphat (DAP), Triple-Superphosphat (TSP)) oder flüssige Düngemittel (z. B. Harnstoff-Ammoniumnitrat (UAN), Ammoniumpolyphosphat (APP), flüssige Spurenelemente) formuliert sind. Einige von ihnen behaupten sogar, die NuUE des Grundprodukts zu erhöhen. Diese können entweder aus lebenden Bakterien oder Pilzen oder deren Sporen oder aus Enzymen bestehen. Es gibt nur wenige veröffentlichte Informationen darüber, ob diese Mikroorganismen überleben oder die Enzyme nach der Ausbringung im Boden aktiv bleiben, noch über ihre Wirkungsweise oder die Auswirkungen auf den Ernteertrag (40). Das Bodenporenwasser, das das lösliche Düngemittelgranulat oder die Düngerflüssigkeit (z. B. Harnstoff-Ammoniumnitrat, Ammoniumpolyphosphat, flüssige Spurenelemente) nach der Zugabe in den Boden umgibt, produziert ein besonderes chemisches Milieu. Aufgrund der hohen Ionenstärke der Lösung, des oft ungünstigen pH-Werts und der in einigen Fällen hohen Konzentrationen potenziell toxischer Elemente wie Zn, ist dieses oft nicht förderlich für das Überleben der Mikroorganismen (41). Bei der Innovation von mikrobiellen Beschichtungen für üblicherweise verwendeten wasserlöslichen Düngemittel müssen Formulierungen entwickelt werden, die das Überleben und Wachstum von Mikroorganismen maximieren. Burke et al. (42) haben zum Beispiel gezeigt, dass selbstorganisierte Nanobeschichtungen mikrobielle Düngemittel schützen können.

Technologien basierend auf neuartigen Trägerstrukturen

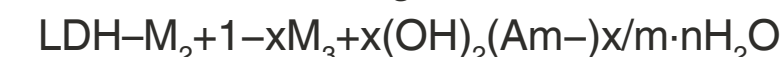
Diese Gruppe von Technologien basiert auf dem Prinzip, dass Nährstoffe auf eine "Trägerstruktur" geladen werden, welche aus Nährstoffen oder Nährstoff-freien Elementen besteht. Dabei beeinflusst die Trägermatrix in irgendeiner Weise die Freisetzung der

Nährstoffe, sodass der freigesetzte Dünger andere Eigenschaften hat als hoch-lösliche Dünger. Im Folgenden beschreiben wir drei Kategorien von Trägermaterialien.

Geschichtete Doppelhydroxide

Geschichtete Doppelhydroxide (Layered Double Hydroxides, LDH) bestehen aus positiv geladenen Schichten von Metallhydroxiden. Zwischen den Schichten gleichen negativ geladene Ionen und Wassermoleküle die Ladung aus. Diese Materialklasse wird oft als "anionische Tonminerale" bezeichnet, da sie die Anionen zwischen den Schichten austauschen können, was sie für die Verwendung als Düngemittel geeignet macht (43).

Geschichtete Doppelhydroxide haben die allgemeine Formel



wobei M ein Metall und A ein Anion ist. Ursprünglich wurden diese als natürliche oder synthetische Mineralien eingesetzt, um anionische Schadstoffe, einschließlich Phosphat, aus der Wasserversorgung zu entfernen (44, 45). Schnell erweckte dadurch das Interesse, P-beladene Materialien als Düngemittel zu verwenden, und kürzlich auch in der Entwicklung neuer Molybdändünger mit langsamer Freisetzung (46).

Die Freisetzung von P aus P-beladenen LDH-Düngern erwies sich als langsam, aber die agronomische Effizienz übertraf die von löslichen P-Düngern in sauren Böden um das bis zu 4,5-fache (47, 48), wobei die RE-Werte immer noch extrem niedrig blieben (<3%). Daraufhin wurde festgestellt, dass die bessere agronomische Leistung des LDH auf die Auflösung des LDH zurückzuführen ist. Dieses wirkt im Boden als Kalkungsmittel und beeinflusst nicht die P-Freisetzungseigenschaften des Düngers.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

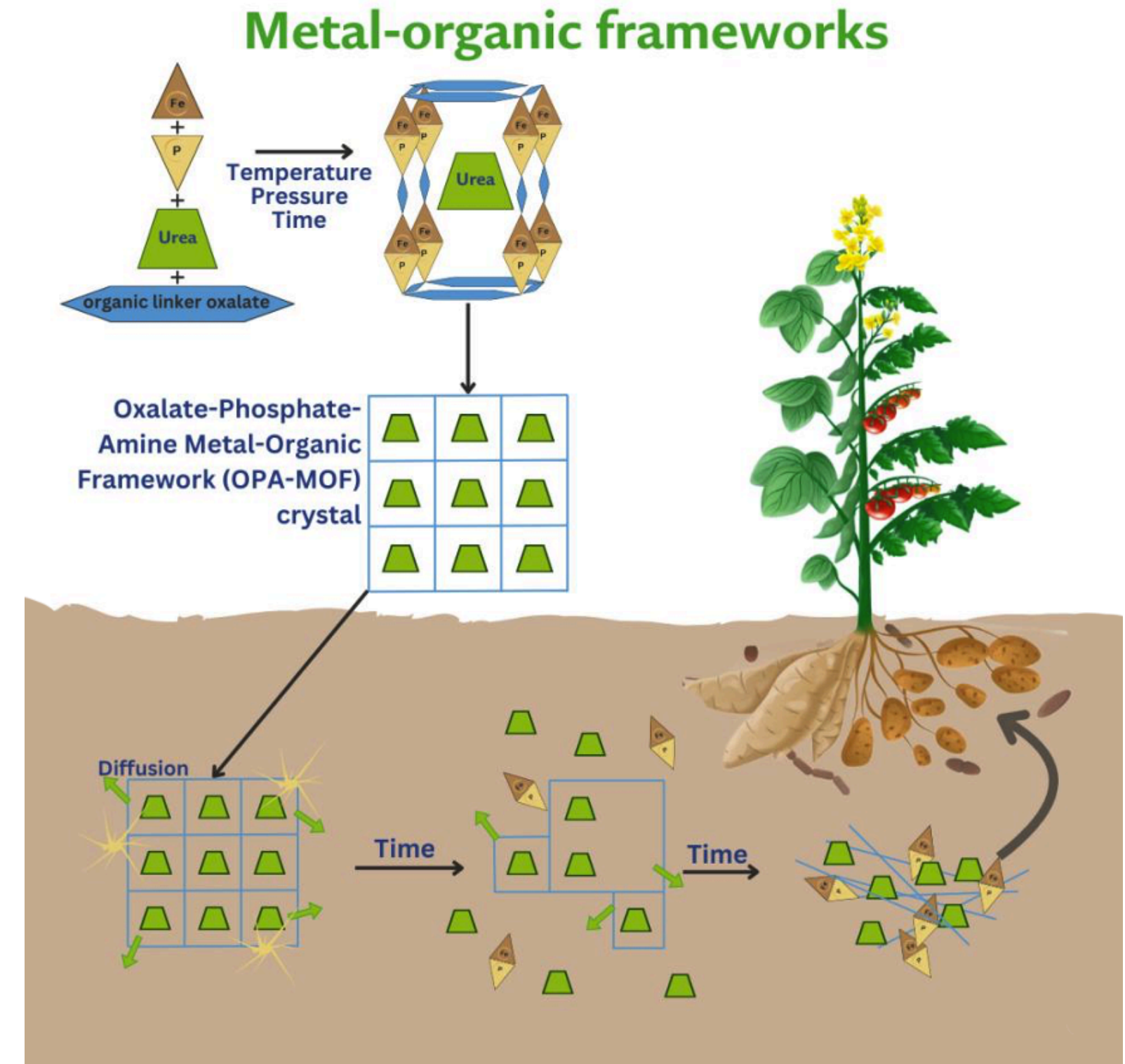
Wie bei vielen langsam freisetzenden P-Quellen sind die Form und die Platzierung des Düngers entscheidend für die Auflösung und Wirksamkeit bei der Aufnahme durch die Pflanzen. Die Granulierung der pulverförmigen Materialien verringert die Auflösung und Aufnahme der Nährstoffe durch die Pflanzen drastisch (48). Daher sollten Produkte in der Form bewertet werden, in der sie am Wahrscheinlichsten von den Landwirten verwendet werden. Eine weitere Einschränkung bei LDHs ist der Nährstoffgehalt der Endprodukte. Häufig enthält das Trägergerüst Elemente, welche nicht als Nährstoffe gelten. Wenn diese dem Boden zugegeben werden, führt das grundsätzlich zu niedrigeren Nährstoffgehalten in Düngemitteln, z. B. <10 % P (49).

Metall-organische Gerüste

Metallorganische Gerüste (MOFs, Abb. 7) sind poröse Molekülstrukturen, die aus Metallionen (z. B. Cu, Fe, Zn usw.) bestehen, die durch organische Moleküle verbunden sind. Die Poren in der Struktur können so gestaltet werden, dass sie Gase oder Ionen zurückhalten, wodurch sich MOFs für Anwendungen in vielen Branchen eignen. Über die mögliche Anwendung von MOFs bei der Formulierung von Düngemitteln wurde erst kürzlich berichtet (50, 51). Die Wirkungsweise dieser Materialien besteht darin, dass sich die organischen Verbindungen im Boden langsam abbauen und dadurch die eingeschlossenen Nährstoffe aus der Porenstruktur langsam freigesetzt werden.

Ähnlich wie bei LDH-Materialien ist es vorteilhaft, wenn die Metalle in der Trägerstruktur gleichzeitig Pflanzennährstoffe sind (die sonst auch in den Boden eingebracht werden müssten). Dadurch ist der Nährstoffgehalt der Formulierung hoch. Kürzlich wurde

Abbildung 7. Grundaufbau eines Metall-organischen Gerüsts auf N-, P- und Fe-Basis und seine Wirkungsweise nach Zugabe in den Boden. Quelle: adaptiert von Anstoetz et al. 2015 (50).





SCIENTIFIC PANEL

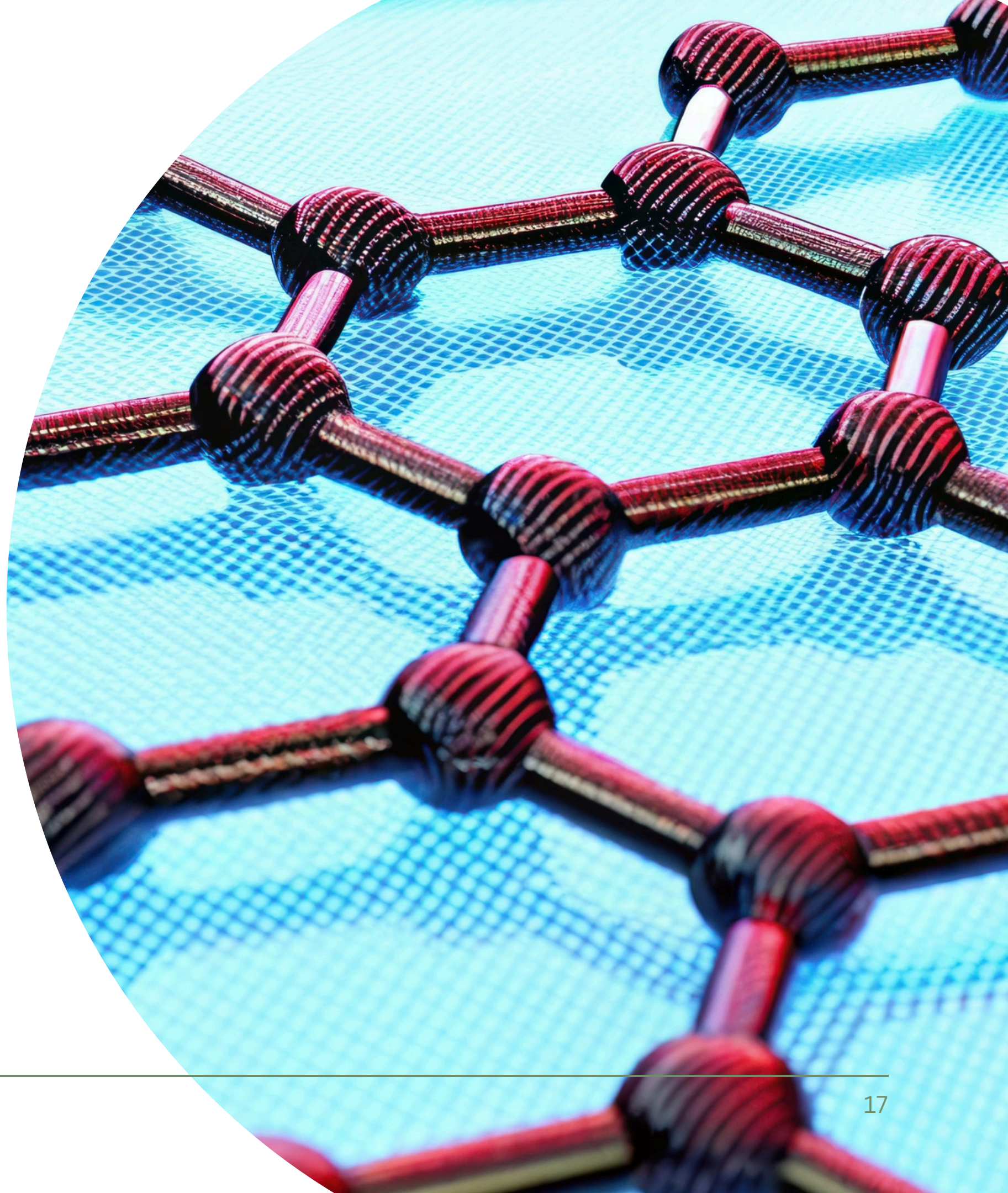
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

nachgewiesen, dass die Herstellung von MOF-Düngemitteln im großen Maßstab möglich ist (52). Signifikante Ertragsvorteile oder Kosteneinsparungen durch die Verwendung dieser Materialien als Düngemittel im Vergleich zu herkömmlichen Produkten müssen jedoch erst noch umfassend nachgewiesen werden.

Materialien auf Graphenbasis

Das 2004 entdeckte Material Graphen besteht aus ultradünnen zweidimensionalen Schichten aus Kohlenstoffatomen mit einzigartigen chemischen und physikalischen Eigenschaften, die breit in der Industrie angewendet werden. Graphen kann zu Graphenoxid oxidiert werden, was der Materialoberfläche eine stark negative Ladung zu verleiht. Dadurch werden kationische Nährstoffe zurückgehalten oder anionische Nährstoffe durch Kationenbrücken gebunden. Zhang et al. (53) waren die ersten, die Kaliumnitrat (KNO_3)-Granulat mit Graphenoxid beschichteten um dem Dünger die Fähigkeit zu verleihen langsam freigesetzt zu werden. Seitdem haben mehrere Studien die Fähigkeit von Materialien auf Graphenbasis untersucht, entweder als Träger für Nährstoffe (54, 55), als Beschichtungen zur langsamen Nährstofffreisetzung (56) oder zur Verbesserung der physikalischen Qualität von Düngemitteln (57) zu fungieren.

Wie bei anderen Trägertechnologien besteht auch bei der Verwendung von Materialien auf Graphenbasis als Düngemittel das Problem, dass der Nährstoffgehalt in der Endformulierung durch das C im Trägermaterial verdünnt wird. Es ist unwahrscheinlich, dass Graphen-basiertes C aus Düngemitteln der Bodengesundheit zugute kommt, da es keine C-Quelle für Mikroorganismen ist und Bedenken wegen der Persistenz im Boden aufwerfen könnte (58). Darüber hinaus könnten Kosten für Rohstoffe und Skalierung die kommerzielle Einführung dieser Düngemitteltechnologie behindern. Letztendlich muss die Wirksamkeitsprüfung neuer Formulierungen vom Labor/Glashaus in die Produktionsanlage und auf den Acker verlagert werden, damit sie kommerziell akzeptiert und umgesetzt werden können.





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Nanomaterialien

Nanomaterialien bestehen zu mindestens 50 % aus Partikeln oder Bestandteilen mit einer Dimension im Bereich von 1-100 nm (59). Diese Materialien sind interessant, weil sich das Verhalten von Materialien im Nanomaßstab drastisch von dem des gleichen Materials in Massengröße unterscheidet, da das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen groß ist. Außerdem sind Nanomaterialien aufgrund ihrer geringen Größe und je nach Oberflächenladung im Boden mobiler als der entsprechende Nährstoff in ionischer Form (60). Dadurch gelangen sie über andere Wege in die Pflanzen als Nährstoffe in ionischer Form (13, 61, 62). In den letzten 15 Jahren wurde in mehreren Studien die potenzielle Anwendung von Nanomaterialien für die Entwicklung von Düngemitteln untersucht, entweder als Nanomaterialien oder als Nanoträger für Nährstoffe (61, 63-67). Dabei handelt es sich in der Regel um neuartige Suspensionsdünger, bei denen die suspendierten Feststoffe in Nanogröße vorliegen. Einige Nanodünger bieten auch als Biostimulanzien einen nicht Nährstoff-bezogenen Nutzen für das Pflanzenwachstum. Zum Beispiel erhöhen sie die Effizienz der Photosynthese indem sie den Lichtreaktionsbereich der Chloroplasten erweitern und den Elektronen-Shuttle verbessern (68). Da nur geringe Mengen an Nährstoffen über Blätter an die Pflanze gegeben werden können sind nanoskalige Mikronährstoffdünger wahrscheinlich agronomisch erfolgreicher als nanoskalige Makronährstoffdünger für Blätter.

Die präzise Verabreichung von Nährstoffen oder anderen Molekülen an Pflanzen auf Nanobasis befindet sich derzeit in der Entwicklung, wobei noch erhebliche wissenschaftliche und gesellschaftliche Hindernisse zu überwinden sind (69). Derzeit gibt es mehr als 600 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, die Nano-Dünger im Titel führen (ISI Web of Science, Zugriff im Februar 2025), aber mit der bemerkenswerten Ausnahme von Produkten wie Nano-Harnstoff oder Nano-DAP in Indien sind ihre kommerziellen

Anwendungen noch immer begrenzt. In vielen Fällen fehlt es an einer strengen agronomischen Bewertung von im Boden ausgebrachten Nanodüngern unter Feldbedingungen. Gleichzeitig kommt es zu Bedenken hinsichtlich der Gesundheit der Belegschaft infolge der Ausbringung von Nanodüngern, wobei flüssige Suspensionen nicht unter Kritik stehen. Langfristige Umwelt- oder Gesundheitsrisiken als Folge der regelmäßigen Ausbringung von Nanopartikeln in bewirtschaftete und natürliche Ökosysteme und ihre Nahrungsketten müssen noch vollständig bewertet werden (70).

Nanodünger wurden auch unter Gewächshausbedingungen untersucht, aber auch diesen Studien mangelt es oft an Genauigkeit und Feldrelevanz (71). Obwohl der Verbleib von Nanopartikeln im Boden nur unzureichend erforscht ist, haben Studien zur Nanotoxikologie im Boden gezeigt, dass Nanomaterialien mit Bodenkolloiden aggregieren (Heteroaggregation) und dabei ihre "Nano"-Form verlieren (72). Es wurde vermutet, dass Nano-Blattdünger wirksamer sind als herkömmliche Blattdünger (32, 69). Die Ergebnisse grundlegender mechanistischer Studien deuten zwar auf neuartige Mechanismen der Aufnahme in die Pflanzen und der Translokation hin, doch sind die Behauptungen über die Wirksamkeit im Vergleich zu konventionellen Produkten noch nicht solide belegt (13, 73). Gleichzeitig bestehen noch große Lücken bei der rigorosen Bewertung in der Praxis (13). Wie bereits erwähnt, Nanomaterialien könnten als Beschichtungen für Düngemittel basierend auf nützlichen Mikroorganismen dienen. In dem Fall würden sie das mikrobielle Überleben verbessern(42), wobei auch hier eine kommerzielle Umsetzung noch aussteht.

In diesem sich schnell verändernden Bereich deutet eine frühe Metaanalyse der Wirksamkeit von Nanodüngern im Vergleich zu herkömmlichen Produkten darauf hin, dass der NuUE-Wert um bis zu 29 % gesteigert werden könnte (74). Die Kosten für die Herstellung von Nanodüngern sind jedoch noch immer ein großes Hindernis für eine breite



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Akzeptanz (75), selbst wenn man von einem wesentlich höheren NuUE als bei konventionellen Produkten ausgeht (7- bis 27-facher NuUE). Da die Effizienz des konventionellen Nährstoffeinsatzes derzeit zwischen 10 und 80 % liegt, ist der Spielraum für eine Steigerung des NuUE um mehr als das Zehnfache natürlich begrenzt.

Die ersten Nanodünger, insbesondere Nano-Harnstoff und Nano-DAP, wurden kürzlich in Indien auf den Markt gebracht (76, 77). Diese dargestellten Fallstudie bieten ein großes Lernpotenzial. Allerdings sollten Bedenken der Wissenschaftler ausgeräumt werden (78) insbesondere im Hinblick auf das zugrundeliegende wissenschaftliche Verständnis der Wirkungsweise sowie auf eine rigorose Feldbewertung. Obwohl hydroponische Studien erste Hinweise auf biostimulierende Wirkungen von Nano-Harnstoff auf die N-Assimilation und die Chlorophyll-Biosynthese geliefert haben (79), hat die Forschung bisher noch keine eindeutige (plausible) Wirkungsweise aufgezeigt. Darüber hinaus weisen viele der bisher durchgeführten Feldversuche methodische Lücken in Bezug auf die experimentelle Durchführung (z. B. Fehlen geeigneter Kontrollen, Fehlen vollständiger N-Wirkungskurven, verwendete N-Raten), Messungen oder Datenanalyse und -interpretationen auf. Letztendlich wird eine unabhängige agronomische und wirtschaftliche Bewertung der neuen Nanoprodukte darüber entscheiden, welche Nanodünger für die Landwirte wirksam und wirtschaftlich sind (siehe unten).



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Barrieren für eine weite kommerzielle Nutzung neuer Düngemitteltechnologien

Der kommerzielle Einsatz von Düngemitteln wird weltweit immer noch von "Standardprodukten" wie Harnstoff, MAP, DAP und Kaliumhydroxid (MOP) dominiert. Diese basieren auf Technologien, die Mitte des letzten Jahrhunderts entwickelt wurden.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Neben einer zunehmenden Vielfalt an Formulierungen und Nährstoffkombinationen in Düngemitteln sind die seither am häufigsten verwendeten Innovationen in der Düngemitteltechnologie die Inhibitoren, die zur "Stabilisierung" von N-Produkten eingesetzt werden, und die Düngerbeschichtungen, die die Freisetzung von Nährstoffen (vor allem N) verlangsamen oder kontrollieren. Dennoch machen diese Produkte heute nur einen kleinen Prozentsatz des weltweiten Düngemittelmarktes aus. Woran liegt das?

Die derzeitigen EEFs sind in der Regel teurer als herkömmliche Produkte, und die agronomischen oder NuUE Vorteile sind im Vergleich zu den zusätzlichen Kosten oft nicht groß (80). Die meisten Landwirte setzen auf einen eindeutigen wirtschaftlichen Nutzen bevor sie sich für eine neue Technologie entscheiden, es sei denn, es werden andere, umfassendere Anreize geboten. In den Vereinigten Staaten beispielsweise bieten Initiativen wie das Environmental Quality Incentives Program und das Conservation Stewardship Program finanzielle und technische Unterstützung für Landwirte, die EEFs, einschließlich stabilisierter N-Produkte, einsetzen. Diese Programme zielen darauf ab, Stickstoffverluste zu verringern und gleichzeitig die Produktivität der Kulturen und die ökologische Nachhaltigkeit zu fördern. In Kanada bieten Initiativen wie das Canola 4R Advantage Program, das vom On-Farm Climate Action Fund unterstützt wird, Anreize für die Umsetzung von 4R Nutrient Stewardship-Praktiken, zu denen auch der Einsatz von EEFs wie stabilisierten N-Düngern gehört.

Zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen befassen sich mit der Entwicklung neuartiger Düngemittelformulierungen. Doch nur wenige der vorgeschlagenen Technologien sind als kommerzielle Produkte für Landwirte erhältlich. Woran liegt das? Erstens müssen wir die Lücke in der Rückgewinnungseffizienz berücksichtigen und schließen - im Durchschnitt gewinnen die Pflanzen 40-60% des in Düngemitteln

ausgebrachten N und K zurück. Im Vergleich dazu schwankt die P-Rückgewinnung von Düngemitteln zwischen <10% in Böden mit P-Mangel und >80% in Böden mit langjährigem Düngemiteleinsatz. Viele Effizienzsteigerungen bleiben unter realistischen Feldbedingungen begrenzt; daher sind übertriebene Behauptungen über Effizienzsteigerungen mit Vorsicht zu genießen.

Viele neue Technologien, die in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben werden, werden nicht kommerziell entwickelt. Oft sind deren Innovationsvorteile in Bezug auf Ertrag, NuUE oder Umweltschutz nicht signifikant genug um die erhöhten Produktions- oder Anwendungskosten zu rechtfertigen. Darüber bleiben für eine wirksame Kommerzialisierung einer neuen Technologie viele Fragen offen, die nichts mit der Agronomie, dem NuUE oder den Umweltvorteilen zu tun haben. Dies beinhaltet Energie- und Rohstoffkosten, die Sicherheit der Rohstoffversorgung, neue Kapitalanforderungen für die Herstellung, die Skalierbarkeit der Herstellung, die Logistik und die Kosten für den Transport, die Handhabung und die Anwendung neuer Produkte sowie Überlegungen zur Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz. Diese Aspekte werden in wissenschaftlichen Publikationen nur selten berücksichtigt (70).

Schließlich bestehen auch politische oder rechtliche Barrieren für die Einführung neuer Technologien, z. B. Bedenken hinsichtlich der Umwelt und der menschlichen Gesundheit in Bezug auf Mikroplastik (aus Polymerbeschichtungen), Nanomaterialien, sowie die mögliche Übertragung von Chemikalien in die Lebensmittelkette (25). Diese müssen bereits in einem frühen Stadium der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Geeignete und transparente Informationen und Daten würden in dem Fall Vertrauen in die Produktsicherheit schaffen.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Bewertung neuartiger Düngemittelprodukte

Bei der Bewertung einer neuartigen Düngemittelformulierung müssen vier Aspekte berücksichtigt werden: das Verständnis der Wirkungsweise des Düngemittels, die Bewertung der agronomischen und ökologischen Effizienz, sowie der Logistik und Handhabung und die Einfachheit, Kosten und der ökologische Fußabdruck der Herstellung.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION



Wirkungsweise

Die behauptete Wirkungsweise sollte getestet, veröffentlicht und verifiziert werden. Die Experimente zur Verifizierung der Wirkungsweise hängen hauptsächlich von der Art des Düngemittels und der Erfindung ab. Als Beispiel für ein neues N-Produkt, das behauptet, die Freisetzung Pflanzen-verfügbarer N-Formen zu verzögern: Dieses muss auf die Kinetik der N-Freisetzung untersucht werden, vorzugsweise im Boden, und mit der N-Freisetzung eines von Landwirten üblicherweise verwendeten Referenzdüngers verglichen werden. Als Beispiel für ein neues Produkt, das angibt, P aus nicht verfügbaren Formen im Boden freizusetzen: Dieses muss auf die Auflösung/Freisetzung von P in die Bodenlösung aus der festen Phase im Boden geprüft werden, vorzugsweise unter Verwendung von Isotopenverdünnungsprinzipien, mit denen sowohl P in Lösung als auch an der festen Phase, die sich im Gleichgewicht mit der Bodenlösung befindet, adsorbiertes P gemessen werden kann (81). Hingegen ein Nanodünger, der den Ertrag oder die Effizienz der Nährstoffnutzung steigern soll, muss auf direkte Nährstoffabgabe sowie auf biostimulierende Reaktionen, die das Wachstum beeinflussen können, getestet werden (71). Um die Wirkungsweise zu verstehen, sind detaillierte Untersuchungen mit fortschrittlichen wissenschaftlichen Techniken erforderlich. So erfordert beispielsweise die Untersuchung der Bewegung von Nanopartikeln in Böden oder Pflanzen große Sorgfalt und verschiedene Techniken (71), einschließlich verschiedener Markierungstechniken (82). Ebenso sind detaillierte Analysen der Genexpression sowie physiologische Messungen erforderlich, um die spezifischen (hormonellen) Reaktionen auf die Anwendung eines Produkts zu entschlüsseln, das nicht nur Nährstoffe enthält, sondern auch als Biostimulans wirken kann.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Agronomische und ökologische Leistung

Sowohl die agronomischen als auch die ökologischen Effizienzgewinne müssen überprüft werden. Erste Anhaltspunkte für die RE eines neuen Produkts können unter kontrollierten Umwelt- oder Gewächshausbedingungen gewonnen werden, wenn geeignete Versuchsmethoden angewandt werden, d. h. wenn die Menge, Form und Platzierung des Produkts ähnlich sind wie bei der Anwendung auf dem Feld. Zur Bewertung neuer Produkte werden in Gewächshäusern allzu oft ungeeignete Wachstumsmedien verwendet, z. B. Vermiculit, Perlit, Topfmischungen, reiner Sand und nicht repräsentative Produktmengen, -formen und -platzierungen (z. B. feine Pulver, die gleichmäßig in die Erde gemischt werden, während das vorgesehene Produkt unter Feldbedingungen in Granulatform ausgebracht wird).

Letztendlich und so früh wie möglich muss die Effizienz neuer Produkte unter Feldbedingungen bewertet werden. Kürzlich wurden allgemeine Leitlinien für die Bewertung neuartiger Lösungen für die Pflanzenernährung vorgeschlagen (83).

Die Evaluierung auf dem Feld sollte an mehreren Standorten/Jahren und mit der (für das Produkt) geeigneten Kulturart, Platzierung und Bewirtschaftung erfolgen.

Leitlinien für die Bewertung von Düngemitteln mit verbesserter Effizienz (83):

- Ein wissenschaftlicher Ausschuss erstellte Protokolle, die sich auf die Versuchsplanung, Pflanzen- und Bodenmessungen, die Bewertung von Umweltschäden und die Datenverwaltung konzentrieren.
- Die Richtlinien wurden mit Beiträgen von internationalen Forschern, Industrievertretern und landwirtschaftlichen Organisationen entwickelt, um die EEF-Forschung zu standardisieren, den Datenaustausch zu fördern und das wissenschaftliche Verständnis von EEF zu verbessern.

Kernkomponenten der Versuchsplanung und minimale Datensätze:

- Die Versuche müssen Kontrollbehandlungen, Standarddüngervergleiche und unterschiedliche EEF-Raten umfassen.
- Eine ordnungsgemäße Replikation, Blockierung und Einbeziehung wichtiger Metadaten (z. B. Feldgeschichte, Bodeneigenschaften) sind für zuverlässige Ergebnisse erforderlich.
- Die konsequente Erfassung der wichtigsten Daten gewährleistet die Vergleichbarkeit und Integration der verschiedenen Versuche.
- Zu den Metadaten gehören die Boden- und Erntegeschichte, Umweltbedingungen und Versuchsmethoden.

Dreistufiger Rahmen:

- Ebene 1: Versuchsplanung und Metadaten.
- Ebene 2: Agronomische und bodenkundliche Leistungskennzahlen.
- Ebene 3: Messungen von Umweltverlusten (z. B. Nährstoffabfluss und gasförmige Emissionen).

Messungen der Umweltauswirkungen:

- Das Dokument skizziert Methoden zur Bewertung von Nährstoffverlusten über das Wasser (z. B. Nitratauswaschung) und gasförmige Emissionen (z. B. Lachgas und Ammoniak).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Natürlich muss die Kombination aus Standort/Boden/Kulturpflanze einen Mangel an dem/den zu beurteilenden Nährstoff(en) aufweisen. Der experimentelle Aufbau erfordert dabei geeignete Kontrollparzellen (ohne Nährstoffzugabe). Ein Feldversuch, bei dem ein mit Blättern ausgebrachtes Produkt bewertet werden soll, erfordert beispielsweise eine Kontrollfläche, die nur Wasser erhält, während alle anderen Nährstoffeinträge gleich bleiben. Ebenso erfordert die Evaluierung eines über das Blatt zugegebenen Nanodüngers mit biostimulierender Wirkung eine zusätzliche Kontrolle, bei der nur der gelöste Nährstoff über das Blatt zugegeben wird ohne Nanopartikel.

Ein weitere Frage ist womit man die angewandten Düngemittelmengen vergleichen kann. Viele Feldversuche vergleichen beispielsweise die Zugabe eines neuen Düngemittels in Kombination mit einer reduzierten oder vollen "empfohlenen N-Rate" mit der Ausbringung von N in der empfohlenen N-Rate. War die empfohlene N-Menge jedoch von Anfang an zu hoch (agronomisch oder wirtschaftlich nicht optimal), führt eine reduzierte N-Menge wahrscheinlich zum gleichen (oder sogar zu einem geringfügig höheren) Ertrag, unabhängig davon, ob ein neuartiges Produkt eingesetzt wurde oder nicht. Dieses Phänomen tritt besonders häufig bei neueren Studien über Nanodünger und mikrobiellen Produkten auf. Um die Wirksamkeit eines solchen Produkts richtig beurteilen zu können, müssen Feldversuche mit mindestens 4-5 verschiedenen N-Gehalten durchgeführt werden, jeweils mit und ohne das zu bewertende neue Produkt. Auf diese Weise lässt sich die Leistung des neuen Produkts bei der aus der N-Wirkungskurve abgeleiteten optimalen N-Menge abschätzen.

Eine angemessene statistische Datenanalyse erfordert weitere Aspekte einer rigorosen Versuchsplanung: Randomisierung, Wiederholung und eine robuste statistische Analyse der Daten (84). Die Kombination von Pflanzenreaktionen auf das neue Produkt über mehrere Standorte/Böden/Jahre in einer kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilung ist eine überzeugende Methode um die Wirksamkeit neuer Produkte zu bewerten (85, 86). Wie Karamanos et al. (87) auf elegante Weise gezeigt haben, kann allerdings eine falsch parametrisierte statistische Analyse leicht zu falsch positiven Ergebnissen führen (Fehler vom Typ 1).





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Physikalische Qualität, Handhabung und Sicherheit

Neben der agronomischen Effizienz des Produkts sind auch die Logistik und einfache Handhabung der neuen Formulierung von Bedeutung. Das Produkt sollte physikalisch robust sein - bei granulierten Produkten bedeutet dies eine gute Granulathärte, geringe Hygroskopizität, gute Abriebfestigkeit, geringe Staubentwicklung, geringe Verklumpungsneigung und gute Fließfähigkeit. Auch die Kompatibilität mit anderen Düngemitteln sollte geprüft werden. Die Entwicklung neuer Produkte muss weiterhin sicherstellen, dass die neuen Formulierungen aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften, z. B. Nanostäube oder andere gefährliche lungengängige Inhaltsstoffe, bei der Herstellung oder Handhabung durch die Landwirte keine Probleme für die Gesundheit oder Sicherheit auf dem Feld mit sich bringen.

Herstellung

Bei der Entwicklung neuer Formulierungen müssen Herstellungsaspekte berücksichtigt werden, z. B. Rohstoffkosten, Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit, Kapitalkosten für die Installation neuer Produktionsanlagen, Komplexität und Skalierbarkeit der Herstellung, Energieaufwand sowie Erzeugung und Behandlung von Abfallströmen.

Der Grund dafür, dass viele neue Düngerformulierungen, die in der wissenschaftlichen Literatur identifiziert werden, keinen kommerziellen Erfolg haben, liegt darin, dass sie nicht alle oben genannten Faktoren angemessen berücksichtigen und sich mitunter zu stark auf nur eine oder zwei der Hauptanforderungen konzentrieren. Die Untersuchung verschiedener Produktdesigns und der Skalierbarkeit in Bezug auf Herstellung und Kosten sollte ein integraler Bestandteil des Innovationsprozesses werden, und zwar in einem früheren Stadium als dies häufig der Fall ist.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Wer muss was tun?

Regierungen:

Die Einführung politischer Maßnahmen und Programme, die sektorübergreifend zwischen Regierung, Industrie und Wissenschaft wirken, um Anreize für Innovationen bei Düngemitteltechnologien zu schaffen und belohnen. Verbesserung und Straffung von rechtlichen Rahmenbedingungen, bei denen die Wirksamkeit unabhängig und mit international vereinbarten, wissenschaftlich strengen Protokollen nachgewiesen wird. Förderung des Wissenstransfers, der Bildung und Zusammenarbeit zwischen den Sektoren sowie Anreize für Ansätze der Kreislaufwirtschaft. Gegebenenfalls sollten finanzielle Anreize für die Einführung von Technologien geschaffen werden.

Industrie:

Bereitstellung von Ressourcen und Förderung von Innovationen sowohl intern als auch extern zur Entwicklung neuer Düngemitteltechnologien. Zusammenarbeit mit staatlichen Stellen und Wissenschaftlern bei der Entwicklung von EEFs, die negative Auswirkungen auf die Umwelt minimieren, einschließlich stabiler N-Dünger, intelligenter/kontrollierter Freisetzungsdünger und bahnbrechender Technologien. Bewertung neuer Produkte anhand vereinbarter Protokolle, die robuster und transparenter sind (83). Festlegung von Kohlenstoffreduktionszielen und Verpflichtung zu Nachhaltigkeitszielen. Transparente Kommunikation der Produkteigenschaften und -vorteile.

Forscher:

Innovation von Technologien, die NuUE verbessern und die Umweltbelastung minimieren. Engere Zusammenarbeit von Wissenschaftlern und Ingenieuren aus der Industrie in frühen Stadien, um Produkte zu entwickeln, die kostengünstig und mit geringem Energiebedarf formuliert und hergestellt werden können. Fachübergreifende Zusammenarbeit um neue Denkansätze und Innovationen in die Entwicklung von Düngemitteln einzubringen. Bewertung von Kosten/Nutzen neuer Produkte in einem frühen Stadium der Forschungsprogramme und Zusammenarbeit mit Landwirten/ Praktikern um Formulierungen zu entwickeln, die in der Praxis am besten anwendbar, praktisch und sicher sind. Notwendigkeit kritisch den eigenen Innovationen zu bleiben und ein schneller Übergang zu Feldversuchen auf Basis von robusten und standardisierten Bewertungsrichtlinien (83). Veröffentlichung von Forschungsergebnissen in frei zugänglichen Fachzeitschriften (wenn möglich) und Kommunikation von sowohl negativen als auch positiven experimentellen Resultaten.

Landwirte und andere Praktiker:

Beteiligen Sie sich an Feldbewertungsprogrammen für neue Düngemittelprodukte, und geben Sie fundierte Rückmeldungen über die einfache Handhabung und die Leistung im Betrieb. Setzen Sie sich für nachhaltigere Produkte ein, fordern Sie Leistungstransparenz und unterstützen Sie lokale Innovatoren.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Wie würde Erfolg aussehen?

1

Viele neue Düngemittel sind verfügbar, die die Ernteerträge und die Effizienz der Nährstoffnutzung erhöhen, die Treibhausgasemissionen und andere Nährstoffverluste in die Umwelt reduzieren, die Lebensmittelqualität verbessern, bessere Handhabungseigenschaften aufweisen, einen geringeren Energie-Fußabdruck bei der Herstellung haben und die Produktion von Abfallströmen minimieren.

2

Regierungen führen Evidenz-basierte Kriterien für die Registrierung und Kennzeichnung neuer Düngemittelprodukte ein, die eine unabhängige Bewertung der agronomischen und ökologischen Leistung umfassen.

3

Die Industrie stellt mehr Ressourcen für neue Düngemitteltechnologien bereit und entwickelt Partnerschaften mit Regierungen und Hochschulen, um Innovationen voranzutreiben. Außerdem werden zunehmend standardisierte Versuchsprotokolle zur Bewertung der agronomischen und ökologischen Leistung neuer Düngemittelprodukte eingesetzt. Regierungen und andere Investoren bieten Anreize für sektorübergreifende Forschungsprojekte zur Entwicklung neuer Düngemittelprodukte und fördern öffentlich-private Partnerschaften sowie eine offeneren, vorwettbewerbliche Forschung zu neuen Wirkungsweisen, Materialien, Formulierungen usw.

4

Landwirte haben Zugang zu einer breiten Palette von Düngemitteln mit nachgewiesenen Leistungsvorteilen und nehmen an Programmen zur Bewertung von Düngemitteln nach harmonisierten Protokollen teil. Informationen über die Produktleistung werden transparenter und stehen den Landwirten zur Verfügung, damit sie Evidenz-basierte Entscheidungen treffen können.



Referenzen

1. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Plant nutrients are essential for the alleviation of chronic and hidden hunger. *Issue Brief 05* (2023).
2. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Defining nutrient use efficiency in responsible plant nutrition. *Issue Brief 04* (SPRPN, Paris, France, 2023).
3. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Mitigating greenhouse gas emissions through responsible plant nutrition. *Issue Brief 07* (2024).
4. L. You et al., Global mean nitrogen recovery efficiency in croplands can be enhanced by optimal nutrient, crop and soil management practices. *Nat Commun.* 14, 5747 (2023).
5. ISO, International Standard ISO/DIS 7851 Fertilizers, soil conditioners and beneficial substances —Classification (ISO, 2021).
6. S. K. Lam, B. Pan, X. Liang, A. R. Mosier, D. Chen, in Improving nitrogen use efficiency in crop production, J. K. Ladha, Ed. (Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK, 2024), pp. 201–221.
7. T. M. McBeath, M. J. McLaughlin, J. K. Kirby, R. D. Armstrong, The effect of soil water status on fertiliser, topsoil and subsoil phosphorus utilisation by wheat. *Plant Soil.* 358, 337–348 (2012).
8. X. Yu, C. Keitel, F. A. Dijkstra, Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. *Global Food Security.* 29, 100545 (2021).
9. B. L. Turner, P. J. Kim, Terminology for residual and legacy phosphorus. *Plant Soil.* 501, 237–239 (2024).
10. A. E. Johnston, J. K. Syers, A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. *Better Crops with Plant Food.* 93, 14–16 (2009).
11. X.-Y. Chen et al., Natural potassium (K) isotope fractionation during corn growth and quantification of K fertilizer recovery efficiency using stable K isotope labeling. *ACS Earth and Space Chemistry.* 6, 1876–1889 (2022).
12. R. F. Brennan, Residual value of zinc fertiliser for production of wheat. *Aust. J. Exp. Agric.* 41, 541 (2001).
13. S. Husted et al., What is missing to advance foliar fertilization using nanotechnology? *Trends in Plant Science.* 28, 90–105 (2023).
14. E. Priya, S. Sarkar, P. K. Maji, A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 12, 113211 (2024).
15. I. Kassem, E.-H. Ablouh, F.-Z. El Bouchtaoui, M. Jaouahar, M. El Achaby, Polymer coated slow/ controlled release granular fertilizers: Fundamentals and research trends. *Progress in Materials Science.* 144, 101269 (2024).
16. S. K. Lam et al., Next-generation enhanced-efficiency fertilizers for sustained food security. *Nat Food.* 3, 575–580 (2022).
17. S. Govil, N. van Duc Long, M. Escribà-Gelonch, V. Hessel, Controlled-release fertiliser: Recent developments and perspectives. *Industrial Crops and Products.* 219, 119160 (2024).
18. A. M. Hyson, Fertilizer composition comprising urea and dithiocarbamates. *United States Patent Office Patent* 3,073,064, 15th January 1960, assigned to E.I. du Pont de Nemours and Company, USA (1960).
19. C. A. I. Goring, Control of nitrification by 2-chloro-6-(trichloro-methyl) pyridine. *Soil Sci.* 93 (1962).
20. M. Staal et al., Process for obtaining a fertilizer composition comprising a DMPSA nitrification inhibitor via adding DMPSA or the salts thereof into the fertilizer melt. *Patent WO2020127870A1* (2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referenzen

21. K. D. Gabrielson, M. L. Epling, Reaction products and methods for making and using same. United States Patent Office Patent US9440890B2 (2016).
22. T. O. Brito et al., Design, syntheses and evaluation of benzoylthioureas as urease inhibitors of agricultural interest. RSC Adv. 5, 44507–44515 (2015).
23. B. I. Taggert, C. Walker, D. Chen, U. Wille, Substituted 1,2,3-triazoles: a new class of nitrification inhibitors. Sci Rep. 11, 14980 (2021).
24. D. Bobeck, A. A. Iman, S. L. Wertz, Agricultural compositions and methods for making and using same. In: USPTO (ed) United States Patent Office Patent Application Publication US2023/0112532 A1 (2023).
25. FAO, Food safety implications from the use of environmental inhibitors in agrifood systems. Food Safety and Quality Series, No. 24, FAO. 2023. Food safety implications from the use of environmental inhibitors in agrifood systems. Food Safety and Quality Series, No. 24. Rome. (2023).
26. M. E. Trenkel, Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers (International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris, 2010).
27. K. Lawton, Fertilizer coatings, the effect of coatings on the dissolution of fertilizers and the uptake of fertilizer potassium by plants. J. Agric. Food Chemistry. 9, 276–280 (1961).
28. A. Shaviv, Advances in controlled-release fertilizers. Adv.Agronomy. 71, 1–49 (2001).
29. I. Sa'adu, A. Farsang, Plastic contamination in agricultural soils: a review. Environmental Sciences Europe. 35, 13 (2023).
30. D. Lawrencia et al., Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release. Plants. 10 (2021).
31. X. Zhang, D. Chabot, Y. Sultan, C. Monreal, M. C. DeRosa, Target-molecule-triggered rupture of aptamer-encapsulated polyelectrolyte microcapsules. ACS Applied Materials & Interfaces. 5, 5500–5507 (2013).
32. C. M. Monreal, M. DeRosa, S. C. Mallubhotla, P. S. Bindraban, C. Dimkpa, Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. Biol. Fertil. Soils. 52, 423–437 (2016).
33. H. Mansouri et al., Advances in controlled release fertilizers: cost-effective coating techniques and smart stimuli-responsive hydrogels. Adv. Sustainable Syst. 7, 2300149 (2023).
34. R. E. Karamanos, D. Puurveen, Evaluation of a polymer treatment as enhancer of phosphorus fertilizer efficiency in wheat. Can. J. Soil Sci. 91, 123–125 (2011).
35. S. Cahill, R. J. Gehl, D. Osmond, D. Hardy, Evaluation of an organic copolymer fertilizer additive on phosphorus starter fertilizer response by corn. Crop Management. 12, CM-2013-0322-01-RS (2013).
36. S. H. Chien, D. Edmeades, R. McBride, K. L. Sahrawat, Review of maleic–itaconic acid copolymer purported as urease inhibitor and phosphorus enhancer in soils. Agron. J. 106, 423–430 (2014).
37. B. G. Hopkins, K. J. Fernelius, N. C. Hansen, D. L. Eggett, AVAIL Phosphorus Fertilizer Enhancer: Meta-Analysis of 503 Field Evaluations. Agronomy Journal. 110, 389–398 (2018).
38. F. Degryse, B. Ajiboye, R. D. Armstrong, M. J. McLaughlin, Sequestration of phosphorus-binding cations by complexing compounds is not a viable mechanism to increase phosphorus efficiency. Soil Sci. Soc. Am. J. 77, 2050–2059 (2013).
39. S. Doydora, D. Hesterberg, W. Klysubun, Phosphate solubilization from poorly crystalline iron and aluminum hydroxides by AVAIL copolymer. Soil Science Society of America Journal. 81, 20–28 (2017).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referenzen

40. W. Overbeek, T. Jeanne, R. Hogue, D. L. Smith, Effects of microbial consortia, applied as fertilizer coating, on soil and rhizosphere microbial communities and potato yield. *Frontiers in Agronomy*. 3 (2021).
41. I. T. Riley, M. H. Ryder, J. R. Rathjen, T. V. Lai, M. D. Denton, In vitro assessment indicates that fertilizers commonly used in legume production differentially inhibit commercial Rhizobial strains. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 56, 687–700 (2025).
42. B. Burke, G. Fan, P. Wasuwanich, E. B. Moore, A. L. Furst, Self-assembled nanocoatings protect microbial fertilizers for climate-resilient agriculture. *JACS Au*. 3, 2973–2980 (2023).
43. G. G. C. Arizaga, K. Satyanarayana, F. Wypych, Layered hydroxide salts: Synthesis, properties and potential applications. *Solid State Ionics*. 178, 1143–1162 (2007).
44. M. C. Hermosin, I. Pavlovic, M. A. Ulibarri, J. Cornejo, Removal of trinitrophenol from water by a layered double hydroxide. *Fresenius Environmental Bulletin*. 4, 41–46 (1995).
45. Y. Seida, Y. Nakano, Removal of phosphate by layered double hydroxides containing iron. *Water Research*. 36, 1306–1312 (2002).
46. M. Everaert et al., Layered double hydroxides as slow-release fertilizer compounds for the micronutrient molybdenum. *J. Agric. Food Chemistry*. 69, 14501–14511 (2021).
47. M. Everaert et al., Phosphate-exchanged Mg–Al layered double hydroxides: a new slow release phosphate fertilizer. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 4, 4280–4287 (2016).
48. M. Everaert, F. Degryse, M. J. McLaughlin, D. de Vos, E. Smolders, Agronomic effectiveness of granulated and powdered P-exchanged Mg–Al LDH relative to struvite and MAP. *J. Agricultural Food Chemistry*. 65, 6736–6744 (2017).
49. M. Everaert et al., Enhancing the phosphorus content of layered double hydroxide fertilizers by intercalating polymeric phosphate instead of orthophosphate: A feasibility study. *Journal of Colloid and Interface Science*. 628, 519–529 (2022).
50. M. Anstoetz et al., Novel applications for oxalate-phosphate-amine metal-organic-frameworks (OPA-MOFs): can an iron-based OPA-MOF be used as slow-release fertilizer? *PLoS ONE*. 10, e0144169 (2015).
51. S. Basak et al., Metal-organic framework as nanocarriers for agricultural applications: a review. *Frontiers in Nanotechnology*. 6 (2024).
52. K. Wu, X. Xu, F. Ma, C. Du, Fe-based metal–organic frameworks for the controlled release of fertilizer nutrients. *ACS Omega*. 7, 35970–35980 (2022).
53. M. Zhang et al., Slow-release fertilizer encapsulated by graphene oxide films. *Chemical Engineering Journal*. 255, 107–113 (2014).
54. S. Kabiri et al., Graphene oxide: a new carrier for slow release of plant micronutrients. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 9, 43325–43335 (2017).
55. I. B. Andelkovic et al., Graphene oxide-Fe(III) composite containing phosphate – A novel slow release fertilizer for improved agriculture management. *Journal of Cleaner Production*. 185, 97–104 (2018).
56. T. Li, B. Gao, Z. Tong, Y. Yang, Y. Li, Chitosan and graphene oxide nanocomposites as coatings for controlled-release fertilizer. *Water Air Soil Pollut.* 230, 1–9 (2019).
57. S. Kabiri et al., Cogranulation of low rates of graphene and graphene oxide with macronutrient fertilizers remarkably improves their physical properties. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 6, 1299–1309 (2018).
58. D. A. Navarro, M. Kah, D. Losic, R. S. Kookana, M. J. McLaughlin, Mineralisation and release of ¹⁴C-graphene oxide (GO) in soils. *Chemosphere*. 238, 124558 (2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referenzen

59. European Union Observatory for Nanomaterials, Definition of nanomaterial (2024).
60. L. Xiong, P. Wang, P. M. Kopittke, Tailoring hydroxyapatite nanoparticles to increase their efficiency as phosphorus fertilisers in soils. *Geoderma*. 323, 116–125 (2018).
61. R. Nair et al., Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*. 179, 154–163 (2010).
- J. A. Raven, Commentary on the use of nutrient-coated quantum dots as a means of tracking nutrient uptake by and movement within plants. *Plant Soil*. 476, 535–548 (2022).
62. H. Guo, J. C. White, Z. Wang, B. Xing, Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 6, 77–83 (2018).
63. L. Marchiol, M. Iafisco, G. Fellet, A. Adamiano, Nanotechnology support the next agricultural revolution: Perspectives to enhancement of nutrient use efficiency. *Adv. Agronomy*. 161, 27–116.
64. P. M. Kopittke, E. Lombi, P. Wang, J. K. Schjoerring, S. Husted, Nanomaterials as fertilizers for improving plant mineral nutrition and environmental outcomes. *Environmental Science: Nano*. 6, 3513–3524 (2019).
65. R. Liu, R. Lal, Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Sci. Total Environ*. 514, 131–139 (2015).
66. S. Gupta, G. S. Gupta, P. Madheshiya, A. K. Mishra, S. Tiwari, Nano fertilizers for sustaining future farming : A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 62, 103446 (2024).
67. Z. Wang et al., Natural xylose-derived carbon dots towards efficient semi-artificial photosynthesis. *Journal of Colloid and Interface Science*. 629, 12–21 (2023).
68. G. V. Lowry et al., Towards realizing nano-enabled precision delivery in plants. *Nat. Nanotechnol*. 19, 1255–1269 (2024).
69. T. Hofmann et al., Technology readiness and overcoming barriers to sustainably implement nanotechnology-enabled plant agriculture. *Nature Food*. 1, 416–425 (2020).
70. S. Husted et al., Nanotechnology papers with an agricultural focus are too frequently published with a superficial understanding of basic plant and soil science. *ACS Nano*. 18, 33767–33770 (2024).
71. G. Cornelis, K. Hund-Rinke, T. Kuhlbusch, N. van den Brink, C. Nickel, Fate and bioavailability of engineered nanoparticles in soils: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 44, 2720–2764 (2014).
72. C. L. Doolette, T. L. Read, N. R. Howell, T. Cresswell, E. Lombi, Zinc from foliar-applied nanoparticle fertiliser is translocated to wheat grain: A ⁶⁵Zn radiolabelled translocation study comparing conventional and novel foliar fertilisers. *Science of The Total Environment*. 749, 142369 (2020).
73. M. Kah, R. S. Kookana, A. Gogos, T. D. Bucheli, A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature Nanotech*. 13, 677–684 (2018).
74. Y. Su et al., Cost-benefit analysis of nanofertilizers and nanopesticides emphasizes the need to improve the efficiency of nanoformulations for widescale adoption. *Nat. Food*. 3, 1020–1030 (2022).
75. K. N. Tiwari, Y. Kumar, Nano fertilizers for smart agriculture : A review. *Indian Journal of Fertilisers*. 19, 632–653 (2023).
76. Y. Kumar, T. Singh, R. Raliya, K. N. Tiwari, Nano fertilizers for sustainable crop production, higher nutrient use efficiency and enhanced profitability. *Indian Journal of Fertilisers*. 17, 1206–1214 (2021).
77. M. Frank, S. Husted, Is India's largest fertilizer manufacturer misleading farmers and society using dubious plant and soil science? *Plant Soil*. 496, 257–267 (2024).
- 78.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referenzen

79. N. Jangir et al., Nano urea outperforms equimolar bulk urea in the hydroponic growth of Arabidopsis thaliana by inducing higher levels of nitrogen assimilation and chlorophyll biosynthesis genes. *Journal of Plant Growth Regulation* (2024).
80. Y. P. Timilsena et al., Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 95, 1131–1142 (2015).
81. D. S. HAYMAN, B. Mosse, Plant growth responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza III. Increased uptake of labile P from soil. *New Phytol.* 71, 41–47 (1972).
82. H. Chen et al., Approaches to nanoparticle labeling: a review of fluorescent, radiological, and metallic techniques. *Environment & Health*. 1, 75–89 (2023).
83. S. E. Lyons et al., Field trial guidelines for evaluating enhanced efficiency fertilizers. *Soil Science Society of America Journal* (2024).
84. R. Norton, How do you know that? - The need for evidence. *Better Crops*. 95, 24 (2011).
85. D. C. Edmeades, The agronomic effectiveness of lime-reverted and dicalcic superphosphates: A review. *New Zealand J. Agric. Res.* 43, 1–6 (2000).
86. D. C. Edmeades, The effects of liquid fertilisers derived from natural products on crop, pasture, and animal production: A review. *Aus. J. Agr. Res.* 53, 965 (2002).
87. R. E. Karamanos, D. N. Flaten, F. C. Stevenson, Real differences – A lesson from an agronomist's perspective. *Canadian J. Plant Sci.* 94, 433–437 (2013).

Autoren, Zitation und Kontakt

Autoren: Mitglieder des Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition (Leadautor unterstrichen).

Patrick H Brown (University of California-Davis, USA), Tom Bruulsema (Plant Nutrition Canada), Deli Chen (University of Melbourne, Australia), Achim Dobermann (International Fertilizer Association, France), Mariangela Hungria (Embrapa, Brazil), Jian Feng Ma (Okayama University, Japan), Michael McLaughlin (University of Adelaide, Australia), Bernard Vanlauwe (International Institute of Tropical Agriculture, Kenya), Marta Vasconcelos (Universidade Católica Portuguesa, Portugal), Claudia Wagner-Riddle (University of Guelph, Canada), Fangjie Zhao (Nanjing Agricultural University, China),

Zitation: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. 2025. Novel fertilizers. Issue Brief 08. Available at <https://sprpn.org>.

Weitere Informationen: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, info@sprpn.org