



Issue Brief 03 – Januar 2022

Förderung des 4R- Nutrient Stewardship

des Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Inhalt

- 3 Kernpunkte
- 5 Was ist das Problem?
- 7 Welche Ergebnisse hat das 4R-Konzept in verschiedenen Regionen hervorgebracht?
- 11 Welche Hürden hindern die Anwendung und Quantifizierung der Vorteile von 4R?
- 13 Wie kann der 4R-Rahmen auf zukünftige landwirtschaftliche Systeme abgestimmt werden?
- 16 Welche neuen Grundprinzipien werden für Quelle, Menge, Zeit und Ort benötigt?
- 20 Wie kann 4R zur Berichterstattung über die Nachhaltigkeitsleistung beitragen?
- 24 Wer muss was tun?
- 26 Wie wird Erfolg aussehen?
- 28 Referenzen
- 33 Autoren, Zitierung und Kontakt



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Kernpunkte

Die Umsetzung des 4R Nutrient Stewardships muss mit den sich immer verändernden landwirtschaftlichen Zielen einhergehen, die ein breiteres Spektrum von Nachhaltigkeitszielen unterstützen.

Das neue Paradigma für verantwortungsvolle Pflanzenernährung bietet eine Perspektive für eine solche Integration. Wir schlagen Änderungen vor, um es mit zukünftigen landwirtschaftlichen Systemen in Einklang zu bringen, die die Produktion intensivieren, die menschliche Ernährung verbessern, die biologische Vielfalt schützen und fördern, den Umwelt- und Kohlenstoff-Fußabdruck verringern und die Nährstoffflüsse zirkulärer gestalten.

4R Nutrient Stewardship hat bereits weltweite Anerkennung gefunden. Und doch wird dessen Wirkung oft durch verschiedene Faktoren eingeschränkt. Positive Ergebnisse hängen nicht nur von guten 4R-Praktiken ab, sondern auch von verschiedenen Aspekten der landwirtschaftlichen Systeme. Die Prioritäten unter den 12 in Abbildung 1 (1) dargestellten Ergebnissen variieren von Region zu Region und von Land zu Land, ebenso wie die spezifischen 4R-Entscheidungen für die Nährstoffausbringung. Vielerorts gibt es jedoch Möglichkeiten, datengesteuerte digitale Lösungen zur Unterstützung von Entscheidungen verstärkt einzusetzen und Innovationen durch adaptives Management in den Betrieben zu beschleunigen. Bei der Auswahl von Nährstoffquellen müssen mehr

zirkuläre und klimafreundliche Attribute berücksichtigt werden. Gleichzeitig sollten die Menge, der Zeitpunkt und der Ort der Ausbringung präziser und dynamischer werden.

Die Rechenschaftspflicht für die Leistung erfordert die Kommunikation von Fortschritten an alle Akteure in der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette. Dies schließt Endverbraucher, Umweltbehörden und Industrie mit ein. Die fortschrittliche Leistungsberichterstattung umfasst die Verfolgung der 4R-Praktiken, die Messung der wirtschaftlichen Ergebnisse auf Betriebsebene und die Bewertung der Vorteile für Boden, Umwelt und Gesellschaft. Bessere Möglichkeiten zur Überwachung der Einführung und der wichtigsten Ergebnisse sind dringend erforderlich, einschließlich wissenschaftlich fundierter Zielvorgaben und einer umfassenderen Anwendung digitaler Technologien. Die Düngemittelindustrie muss weiter mit dem Agrar- und Ernährungssektor zusammenarbeiten, um Nachhaltigkeitsstandards für das Management landwirtschaftlicher Systeme zu entwickeln und einzuführen, die ganzheitliche 4R-Praktiken und Leistungskennzahlen umfassen.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

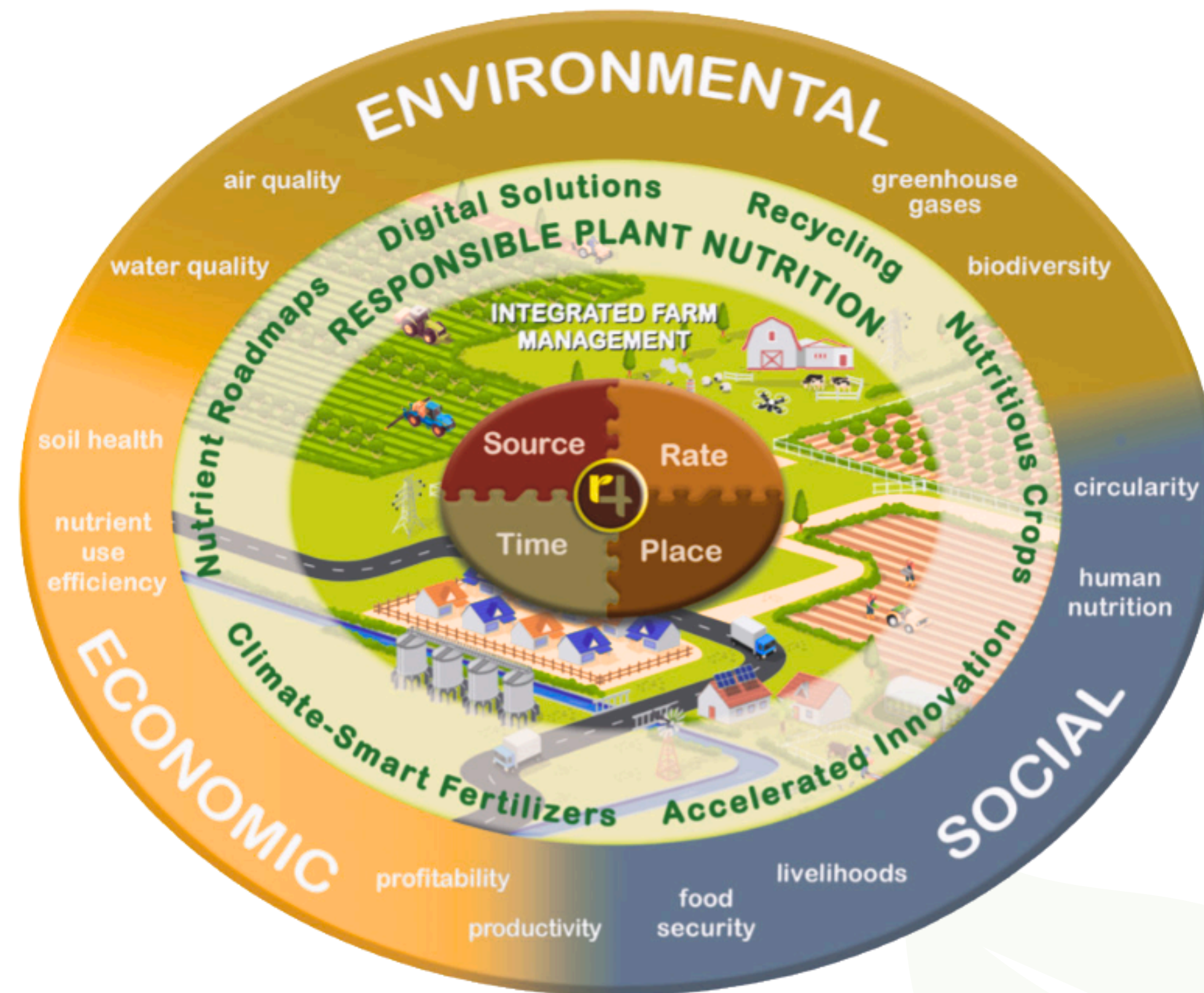


Abbildung 1. Die Förderung der 4R-Nutrient Stewardship erfordert die Integration in landwirtschaftliche Systeme, um die sechs Maßnahmen der verantwortungsvollen Pflanzenernährung zu unterstützen und über die erzielten Nachhaltigkeitsergebnisse zu berichten.



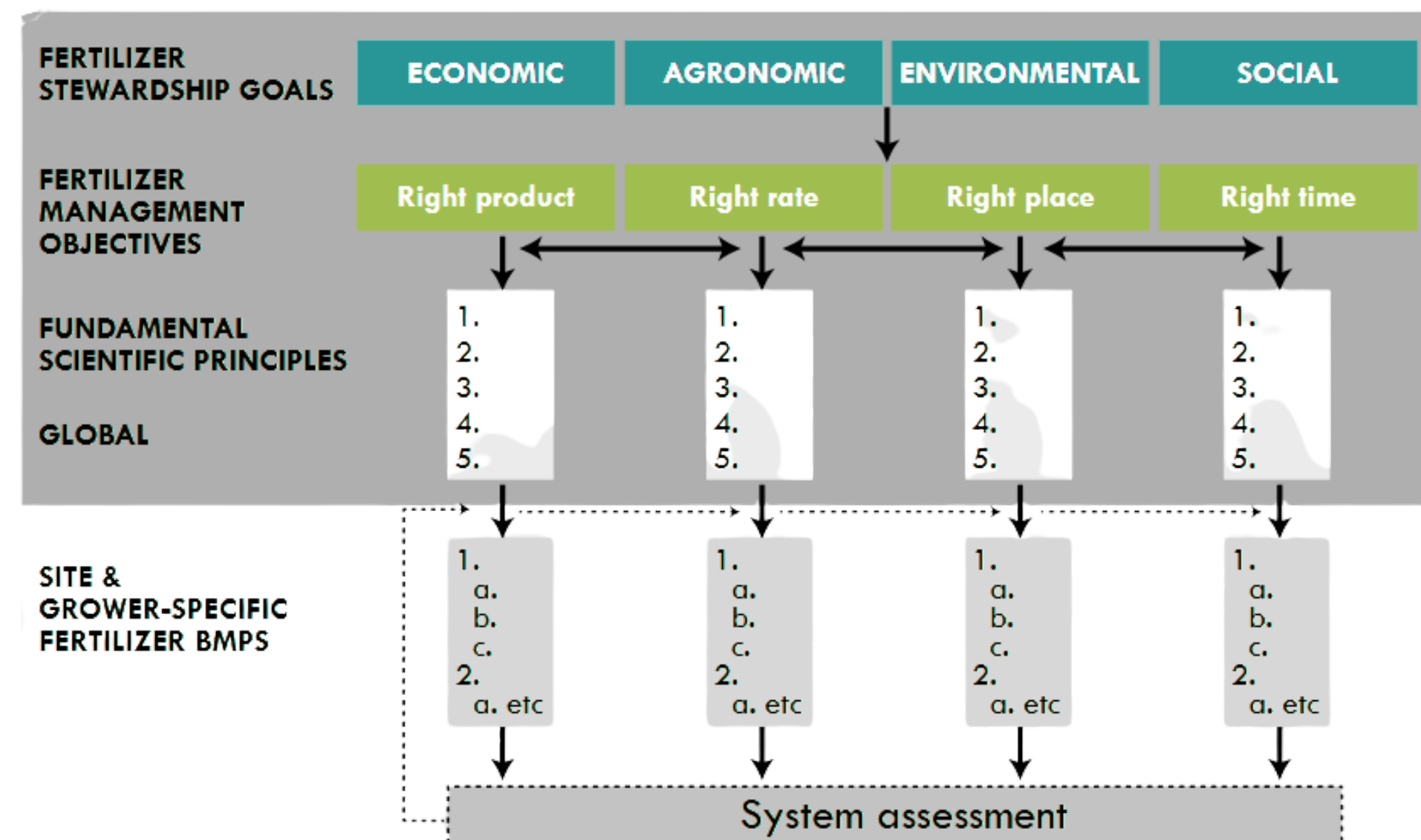
Was ist das Problem?

Die Ausbringung von Nährstoffen macht einen großen Teil der Nährstoffströme in den meisten landwirtschaftlichen Systemen aus und wird direkt von den Landwirten und ihren Dienstleistern verwaltet.

Daher wurden im ursprünglichen Rahmen der 4R-Nutrient Stewardship vier kritische Entscheidungen als global relevante Managementziele für die Nährstoffausbringung dargestellt, die durch regions- und anbausystemspezifische Lösungen umgesetzt werden müssen (Abbildung 2). Für jede der vier Komponenten der richtigen Entscheidungen zur Nährstoffausbringung wurden Kernprinzipien definiert, die das zugrunde liegende wissenschaftliche Verständnis zusammenfassen.

Das neue Paradigma für verantwortungsvolle Pflanzenernährung hat den Umfang der Nährstoffverantwortung erweitert (2). Die Konzentration auf Quelle, Menge, Zeitpunkt und Ort der Nährstoffausbringung ist für dieses neue Paradigma nach wie vor sehr wichtig. Aber das 4R-Konzept, wie es ursprünglich konzipiert und in der Vergangenheit angewandt wurde, erfüllt nicht alle seine Ziele. Die Verbindung kann verbessert werden um die Relevanz von 4R innerhalb des neuen Paradigmas zu erweitern.

Abbildung 2. Ursprünglicher Rahmen für 4R Nutrient Stewardship, vorgestellt im Jahr 2007 (Fixen, 2020).





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Die sechs Kernaktionen für die Umsetzung einer verantwortungsvollen Pflanzenernährung eröffnen Bedürfnisse und Möglichkeiten für Programme zur Umsetzung von 4R. Diese umfassen:

1. Nährstoff-Strategien: Einbindung von 4R-Praktiken in Politik, Geschäftsmodelle, Plattformen und Programme zur Überprüfung der Nachhaltigkeit.
2. Digitale Lösungen: Bereitstellung von datengesteuerten, präziseren und dynamischeren 4R-Ernährungsentscheidungen.
3. Wiederverwertung: Die Optimierung der Nutzung erneuerbarer Nährstoffressourcen erfordert die Wahl der "richtigen Quelle", um recycelte Formen zu berücksichtigen, wo dies möglich ist.
4. Nährstoffreiche Pflanzen: Nährstoffapplikationen für Pflanzen, die die menschliche Ernährung und Gesundheit verbessern.
5. Klimagerechte Düngemittel: Berücksichtigung des Kohlenstoff-Fußabdrucks der Nährstoffquelle, einschließlich der mit ihrer Herstellung und Verwendung verbundenen Emissionen.
6. Beschleunigte Innovation: Erprobung von 4R-Komponenten in adaptiven Managementsystemen zur schnelleren Umsetzung in die Praxis.

Was passiert gerade?

Das Konzept des 4R-Nutrient Stewardship hat weltweite Anerkennung gefunden, aber seine Wirkung in größerem Maßstab bleibt weiterhin begrenzt. Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) hat die Grundsätze des 4R Nutrient Stewardship in den Internationalen Verhaltenskodex für die nachhaltige Nutzung und das Management von Düngemitteln aufgenommen (3). Das 4R Plant Nutrition Manual (IPNI, 2016) (1), ein 130-seitiges Dokument, das die globalen Prinzipien von 4R Nutrient Stewardship beschreibt, wurde in acht Sprachen übersetzt und in Amerika, Asien, Afrika und Ozeanien weit verbreitet.



Abbildung 3: Die vielen Sprachen von 4R



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Welche Ergebnisse hat das 4R-Konzept in verschiedenen Regionen hervorgebracht?

Die regionalen Erfahrungen mit der Umsetzung des 4R-Konzepts und die Herausforderungen für seine Förderung sind weltweit unterschiedlich. Einige dieser Umsetzungen laufen unter der Marke 4R, während andere nicht unter dieser Marke laufen, aber ähnliche Ansätze darstellen. Eine lange Geschichte der Forschung auf dem Gebiet der Bodenfruchtbarkeit und der Pflanzenernährung fließt weiterhin in die Wahl der 4R-Praktiken ein, auch wenn die Forschung nicht unter der 4R-Marke durchgeführt wurde.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

NORDAMERIKA

4R Nutrient Stewardship hat sich zu einem anerkannten Konzept entwickelt, zunächst in der Düngemittelindustrie, dann unter Agrarumweltwissenschaftlern, die sich mit landwirtschaftlichen Nährstoffen beschäftigen (4). Die Anwendung von 4R-Praktiken wurde zur Verringerung der Treibhausgasemissionen anerkannt. Im Rahmen des ersten Quantifizierungsprotokolls, das zur Verringerung der landwirtschaftlichen Lachgasemissionen eingeführt wurde, hat die Provinzregierung von Alberta in Kanada im Jahr 2010 4R Nutrient Stewardship anerkannt (5). Eine Bewertung natürlicher Klimälösungen für Kanada kam zu dem Schluss, dass eine verstärkte Einführung von 4R-Praktiken die Treibhausgasemissionen in Kanada bis 2030 um zusätzliche 6,3 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente pro Jahr reduzieren könnte, was 3 % der Verpflichtung Kanadas im Rahmen des Pariser Abkommens ausmacht (6). Innerhalb von zwei Jahren nach seinem Start im Jahr 2014 wuchs das erste 4R-Zertifizierungsprogramm für Nährstoffmanagement in den USA und beeinflusste die Nährstoffausbringung auf fast 40 % der Anbauflächen im westlichen Einzugsgebiet des Eriesees (7). Dadurch wurden die Phosphorverluste, die zu Algenblüten führen, begrenzt. Während sich die Effizienz der Nährstoffnutzung in den letzten Jahrzehnten verbessert hat, bleibt die Quantifizierung der tatsächlichen Verringerung von Lachgasemissionen und Phosphorverlusten eine Herausforderung.

SÜDASIEN

Von 2009 bis 2019 wurde das 4R-Nutrient-Stewardship-Konzept in mehreren Ländern in nationale Forschungs- und Beratungsprogramme aufgenommen und Teil der agronomischen Schulungen und Feldprogramme der Düngemittelindustrie. Eine breitere Umsetzung in den landwirtschaftlichen Betrieben über die Forschungsflächen hinaus bleibt jedoch eine Herausforderung. Die Festlegung der Düngemittel-"Rechte" - Quelle, Menge,

Zeitpunkt und Ort - für die vielen Kulturen und Anbausysteme des Subkontinents überstieg die Kapazitäten der meisten Kleinbauern und ihrer Berater, aber auch vieler Forscher. Der Bedarf an einem einfachen, benutzerfreundlichen Instrument zur Entscheidungshilfe, das das 4R-Konzept in feldspezifische Düngeempfehlungen umsetzt, führte zur Entwicklung der Software Nutrient Expert (8), die einem neuen Ansatz für ein standortspezifisches Nährstoffmanagement folgt, der erstmals in den 1990er Jahren entwickelt wurde (9). Nutrient Expert nutzt eine robuste Datenbank mit Informationen über die erzielbaren Erträge, den Einsatz von Düngemitteln und Dung, die Nährstoffbilanz und andere Anbaubedingungen. Der Einsatz des Tools in den Betrieben führte zu Vorteilen in Bezug auf die Nachhaltigkeit, einschließlich der Auswirkungen auf Ertrag, Rentabilität, Bodengesundheit, Effizienz des Nährstoffeinsatzes, Energie- und Wassernutzung und Treibhausgasemissionen (10).

SÜDOSTASIEN

Das Internationale Institut für Pflanzenernährung unterstützt bis 2019 umfangreiche Forschungs- und Beratungsmaßnahmen für Feldkulturen (Reis, Mais) und Plantagenkulturen (Ölpalme, Kaffee, Kakao). Feldhandbücher zu den 4R-Prinzipien wurden für Ölpalmen, Reis, Zuckerrohr, Maniok, Kautschuk, Mango, Wassermelone und Trauben veröffentlicht. Bei Kakao-Kleinbauern in Indonesien wurde festgestellt, dass sie sehr unterschiedliche Fähigkeiten im Düngemittelmanagement haben (11). Untersuchungen zum Düngermanagement bei Ölpalmen ergaben keine Auswirkungen des Zeitpunkts, aber erhebliche Auswirkungen der Ausbringungsrates auf die Effizienz der Nährstoffnutzung (12). Düngeempfehlungen auf der Grundlage von 4R Nutrient Stewardship halfen Maniokbauern, die Vorteile ihrer Düngerinvestitionen zu nutzen (13). 2011 wurde ein Standard für die nachhaltige Produktion von Reis entwickelt, der Grundsätze für anorganische und organische Düngemittel, den Zeitpunkt und die Menge enthält (14).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

CHINA

Die Landwirtschaft in den meisten Teilen Chinas ist typischerweise kleinbäuerlich geprägt. Die Konzentration auf hohe Erträge durch einen hohen Düngemiteleinsatz hat die ökologische Nachhaltigkeit des Landes beeinträchtigt (15). Durch den Einsatz des digitalen Tools Nutrient Expert für 4R-Praktiken konnten Ertrag und Rentabilität aufrechterhalten und gleichzeitig die Effizienz der Nährstoffnutzung erhöht werden (16, 17). Die Umsetzung von 4R Nutrient Stewardship in Verbindung mit Verbesserungen im Agrarmanagement könnte die Leistung im Vergleich zu definierten Stickstoffüberschuss-Benchmarks verbessern und so die Ernährungssicherheit und eine höhere Stickstoffnutzungseffizienz gewährleisten und gleichzeitig die ökologische Nachhaltigkeit und den wirtschaftlichen Ertrag verbessern (18). Die regionale Umsetzung von Technologien und Bewirtschaftungspraktiken nach den 4R-Prinzipien muss sorgfältig auf die standortspezifischen biophysikalischen Gegebenheiten abgestimmt werden (19). Die Anwendung eines integrierten Boden-Pflanzen-System-Management-Ansatzes hat nachweislich sowohl die Stickstoffnutzung als auch die Ernteerträge von mehr als 20 Millionen Landwirten in China im Zeitraum 2005 bis 2015 verbessert (20).

AFRIKA SÜDLICH DER SAHARA

Der Düngemittelgipfel in Abuja 2006 hat erkannt, dass die Ernteerträge in der kleinbäuerlichen Landwirtschaft in Afrika südlich der Sahara gesteigert werden müssen, um die zahlreichen Herausforderungen zu bewältigen, mit denen diese Gemeinschaften konfrontiert sind. Die Allianz für eine grüne Revolution in Afrika hat diese Forderung in ihre Bodenstrategie integriert, die sich auf das integrierte Bodenfruchtbarkeitsmanagement (ISFM) konzentriert. ISFM wird beschrieben als eine Reihe von Praktiken zur Bewirtschaftung der Bodenfruchtbarkeit, die notwendigerweise den Einsatz von Düngemitteln, organischen Stoffen und verbessertem Keimplasma umfassen, kombiniert

mit dem Wissen, wie diese Praktiken an die lokalen Bedingungen angepasst werden können, mit dem Ziel, die agronomische Nutzungseffizienz der eingesetzten Nährstoffe zu maximieren und die Produktivität der Pflanzen zu verbessern. Alle Betriebsmittel müssen nach soliden agronomischen Grundsätzen verwaltet werden" (21). ISFM umfasst somit die 4R-Prinzipien, fügt aber gute agronomische Praktiken hinzu. Der Einsatz von ISFM-Praktiken, einschließlich Hybridsorten und Kombinationen von organischen Inputs mit Düngemitteln, erhöhte die agronomische Effizienz pro kg ausgebrachten Stickstoffs auf Werte von bis zu 40 kg, verglichen mit 17 kg bei lokalen Praktiken (22). Die Übernahmequoten für "vollständiges ISFM" liegen in der Regel in der Größenordnung von 10-25 % der beteiligten Kleinbauerngemeinschaften (23). In jüngster Zeit wurden in Afrika südlich der Sahara auch Nutrient Expert und andere Instrumente für ein standortspezifisches Nährstoffmanagement bei Reis, Mais und Maniok entwickelt und getestet (24). Es bleibt noch viel zu tun, um eine breitere Anwendung zu erreichen.

AUSTRALIEN-NEUSEELAND

In Australien gibt es mehrere Programme, die die Grundsätze von 4R aufgreifen, aber nicht unbedingt als solche gekennzeichnet sind. In Queensland hat die Besorgnis über den Abfluss von Nährstoffen aus küstennahen Einzugsgebieten in das Great Barrier Reef dazu geführt, dass die Zuckerindustrie das Nährstoffmanagementprogramm "Six-Easy Steps Toolbox" entwickelt hat (25). Das Fertcare-Programm der Düngemittelindustrie umfasst ausdrücklich die 4R-Nährstoffverantwortung. Es hat fast 4000 Fachleute im Düngemittelmanagement geschult, um die Produktivität zu





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

steigern, Umweltprobleme zu minimieren und die Lebensmittelsicherheit zu gewährleisten. Die Milch- und Getreideindustrie hat die 4R in ihre Empfehlungen für den Einsatz von Düngemitteln aufgenommen. Das Nährstoffmanagement profitierte auch von der koordinierten Forschung unter dem Motto "Better Fertiliser Decisions for Crops" (Bessere Düngeentscheidungen für Nutzpflanzen), die gesammelte Informationen über die Reaktionen von Nutzpflanzen und Weiden auf Düngemittel lieferte und eine dokumentierte Grundlage für maßgeschneiderte Nährstoffempfehlungen in den landwirtschaftlichen Betrieben bot (26). In Neuseeland, wo die Weidewirtschaft vorherrscht, wird die von OverseerFM unterstützte Nährstoffbudgetierung von über 11.000 landwirtschaftlichen Betrieben genutzt, was auf die Umweltgesetzgebung hinsichtlich der Qualität des Oberflächen- und Grundwassers zurückzuführen ist (27).

LATEINAMERIKA

Während der Phosphoreintrag in die Kulturen in Brasilien derzeit einen erheblichen Überschuss gegenüber der Aufnahme durch die Pflanzen aufweist, deuten Feldversuche darauf hin, dass der kombinierte Einsatz von Direktsaat, Deckfrüchten und 4R-Verfahren die Gesamteffizienz der Phosphornutzung verbessern könnte (28). Im Gegensatz dazu sind die Nährstoffbilanzen der Kulturen in Argentinien und Bolivien defizitär (29). Wenn 4R-Praktiken in die Fruchtfolge, den Deckfruchtanbau und die ausgewogene Ausbringung von Düngemitteln integriert werden, tragen sie nicht nur zur landwirtschaftlichen Produktivität, sondern auch zum Schutz und zur Erhaltung der Böden bei (30). Feldforschungen mit Mais in der argentinischen Pampa haben gezeigt, dass "ökologisch intensive" Bewirtschaftungsmethoden, die 4R-Praktiken für Stickstoffquelle, -menge und -zeitpunkt beinhalten, die Produktivität von Mais verbessern, ohne die Lachgasemissionen zu erhöhen (31). Eine andere Studie in Argentinien ergab geringere Lachgasemissionen pro Produktionseinheit

bei Sojabohnen in Fruchtfolge mit Getreide im Vergleich zu Sojabohnen-Monokulturen (32). Es wurde festgestellt, dass eine Reihe von Praktiken der konservierenden Landwirtschaft, die ein Stickstoffdüngermanagement beinhalten, die Bodenerosion verringern und die Bodengesundheit sowie die Rentabilität der Pflanzenproduktion in der Andenregion Ecuadors verbessern (33).

EUROPA

Die Ansätze der Agrarumweltpolitik in Europa unterscheiden sich deutlich von denen in Nordamerika, ebenso wie die Trends beim Nährstoffeinsatz in der Landwirtschaft. In Europa liegt der Schwerpunkt eher auf regulatorischen als auf freiwilligen Ansätzen (34). In der Vergangenheit waren die Nährstoffüberschüsse in Westeuropa größer als in den Vereinigten Staaten. Der kumulierte Phosphorüberschuss des letzten Jahrhunderts in Europa entspricht 63 Jahren des aktuellen Pflanzenentzugs, während die gleiche Zahl für die Vereinigten Staaten 18 Jahre beträgt (35). Die in den letzten 25 Jahren in der Europäischen Union vorgenommenen Änderungen der Rechtsvorschriften haben die Nitratbelastung der Gewässer durch die Landwirtschaft verringert und die Effizienz der Nährstoffnutzung verbessert, aber diese Fragen stehen weiterhin im Vordergrund der Umwelt- und Agrarpolitik, die die Landwirtschaft bestimmt. Die europäische Wasserqualität ist beispielsweise durch das steigende N:P-Verhältnis bedroht (36). Die europäische Düngemittelindustrie hat 4R in ihr Infinite-Nutrient-Stewardship-Konzept aufgenommen und Initiativen entwickelt, um die politischen Ziele auf nationaler und EU-Ebene zu erfüllen. Dazu gehören Technologien für die Präzisionslandwirtschaft, ein Instrument zur Abschätzung des Kohlenstoff-Fußabdrucks der Düngemittelherstellung (37), ein Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft und die Unterstützung bei der Einführung eines Indikators für die Stickstoffnutzungseffizienz (38).



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Welche Hürden hindern die Anwendung und Quantifizierung der Vorteile von 4R?

Trotz der oben beschriebenen regionalen Unterschiede bei der Umsetzung von 4R Nutrient Stewardship sind auch Gemeinsamkeiten zu erkennen, insbesondere die Notwendigkeit einer besseren Integration mit bewährten Praktiken für Agronomie, Bodenschutz und Umweltmanagement.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Der ursprüngliche 4R-Rahmen sah eine Bewertung der Nachhaltigkeitsergebnisse und eine kontinuierliche Verfeinerung durch adaptives Management vor, wie in Abbildung 2 dargestellt. Zwar wurden in Abschnitt 9.3 des 4R-Handbuchs für Pflanzenernährung (1) Messgrößen für solche Bewertungen beschrieben, doch die Fortschritte bei der Berichterstattung sind begrenzt. In einigen Regionen sind die Branchenverbände in der Lage, die Anbauflächen und die Anzahl der Landwirte oder Berater zu erfassen, die ein gewisses Maß an 4R-Nährstoffverantwortung praktizieren. Aber nicht viel mehr.

Die Hauptgründe für die bisherige Einführung sind Rentabilität und Risikominderung - der wirtschaftliche Nutzen für den Betrieb. Es ist notwendig, die Anerkennung der umfassenderen ökologischen und sozialen Vorteile von 4R zu erhöhen, indem Landwirte für die Einführung von 4R-Verfahren belohnt werden.

Die Messung des Beitrags, den die Einführung von 4R-Verfahren zu diesen Ergebnissen leistet, ist mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, darunter:

- Mangel an Ressourcen für eine eingehende Überwachung und Bewertung
- Mehrere Faktoren bestimmen die "richtigen" Entscheidungen für ein bestimmtes landwirtschaftliches Feld
- Fragen des Datenschutzes, die die Bereitschaft und Fähigkeit von Agrarhändlern und Landwirten einschränken, Daten auszutauschen
- Unzureichende Forschung, die die Auswirkungen spezifischer 4R-Praktiken dokumentiert (4)
- Metriken umfassen eine Reihe von Maßstäben, und Kompromisse und Synergien sind schwer zu bewerten (39)

Die Kombinationen von Quelle, Menge, Zeitpunkt und Ort der Nährstoffausbringung, die die Nachhaltigkeit von Anbausystemen verbessern, sind standortspezifisch, denn:

- Die Böden unterscheiden sich in ihrem Nährstoffliefervermögen und anderen Eigenschaften
- Die Kulturen haben einen unterschiedlichen Nährstoffbedarf.
- Pflanzen reagieren je nach Boden, Klima, Wetter und Bewirtschaftung durch den Landwirt unterschiedlich auf Nährstoffgaben
- Die Prozesse, die sich auf die Nährstoffverluste auswirken, und das Ausmaß der potenziellen Verluste variieren je nach Boden, Landschaft, Klima und Wetter
- Die Umweltbelastung durch Nährstoffverluste variiert je nach Form des verlorenen Nährstoffs und den Merkmalen des Ökosystems, in das er fließt.
- Die Produktionsziele der Landwirte unterscheiden sich je nach Umfang und sozioökonomischer Lage
- Die Prioritäten der Beteiligten in Bezug auf die von der Nährstoffausbringung beeinflussten Ergebnisse sind regional unterschiedlich, je nach sozioökonomischem Status, kulturellen Werten, politischen Maßnahmen sowie wahrgenommenen und tatsächlichen Risiken



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Wie kann der 4R-Rahmen auf zukünftige landwirtschaftliche Systeme abgestimmt werden?



Die folgenden Konzepte sollten bei der Entwicklung zukünftiger Programme zur Umsetzung von 4R Nutrient Stewardship im Vordergrund stehen.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Integration in landwirtschaftliche Systeme im Wandel

Die integrierten Landwirtschaftssysteme der Zukunft werden 4R-Praktiken beinhalten, aber auch die Bewirtschaftungsentscheidungen für viele andere Komponenten - einschließlich Agronomie, Kulturpflanzenvielfalt, Entwässerung, Viehbestand, Schädlinge, Saatgut, Bodenerhaltung und Wasser (Abbildung 1) - beeinflussen die Nährstoffflüsse in der Landwirtschaft. Die Erhaltung des Bodens ist besonders wichtig, um die Kriterien der noch in Entwicklung befindlichen Definition der regenerativen Landwirtschaft (40) zu erfüllen, ebenso wie die Integration von Viehhaltungssystemen (41). Bewirtschaftungssysteme, die die biologische Stickstofffixierung durch Fruchtfolgen, Zwischenfrüchte und Deckfrüchte nutzen, erhöhen ebenfalls die Effizienz der Stickstoffnutzung. Auf Landschaftsebene sollten die Nährstoffflüsse zwischen Acker-, Weide- und Viehzuchtanlagen integriert und optimiert werden (42). Die Wiederherstellung der Verbindungen zwischen Viehzucht und Ackerland bietet Möglichkeiten für eine nachhaltige Intensivierung der Landwirtschaft in China (43) und anderen Regionen. Mechanisierung, Bewässerung und Düngung bieten große Möglichkeiten, die Auswahlmöglichkeiten der Landwirte bei der Steuerung der Nährstoffausbringung zu erweitern und die Produktivität des Gesamtsystems und die Effizienz der Nährstoffnutzung zu steigern. Dies ist für die derzeitigen kleinbäuerlichen Anbausysteme von besonderer Bedeutung.

Die Pflanzenvielfalt und die Nahrungsmittelsysteme müssen sich ebenfalls verändern, um den Bedürfnissen der menschlichen Gesundheit und Ernährungssicherheit besser gerecht zu werden (44). Getreidekäufer, Verarbeiter und Regierungen müssen Anreize schaffen, um den Nährwert der erzeugten Pflanzen zu erhöhen, wie dies beispielsweise mit Selen in Finnland geschehen ist (45). Die Düngung von Nahrungsmittelpflanzen mit gezielten Mikronährstoffen durch agronomische Ansätze kann verschiedene Vorteile für die Gesundheit der Verbraucher mit sich bringen (46). Die Blattdüngung mit Stickstoff während

und/oder unmittelbar nach der Anthese hat besondere Auswirkungen auf das Getreideprotein (47). Die Blattdüngung mit Mikronährstoffen nach der Blüte wirkt sich auch auf die Konzentrationen von Zink, Selen und Jod im Korn aus und gilt als äußerst wirksame Strategie zur Bekämpfung des versteckten Hungerproblems in den Entwicklungsländern (48). Es wurde auch gezeigt, dass eine angemessene Stickstoffdüngung für eine erfolgreiche Biofortifikation von Weizen (49) und Silomais (50) mit Zink und Eisen erforderlich ist. Im Rahmen der HarvestPlus-Initiative wurden bereits neue, mit Zink, Eisen und Vitamin A angereicherte Kulturpflanzen entwickelt, die derzeit mehr als 20 Millionen Menschen erreichen und auf eine Milliarde Menschen ausgeweitet werden können (51). Dies erfordert auch gezielte Lösungen zur Anreicherung mit Düngemitteln in großem Maßstab.

Nutzung datengesteuerter digitaler Lösungen zur Unterstützung von Entscheidungen

In vielen Ländern bieten Düngemittelhändler und andere Dienstleister inzwischen GPS-gesteuerte Nährstoffapplikationen, Bodenproben in Teilbereichen des Feldes und die Überwachung der Ernte an. Diese Technologien ermöglichen eine präzisere Ausbringung, minimale Überlappungen und eine hohe Feldeffizienz. Viele Agrarunternehmen bieten auch Dienstleistungen an, bei denen Ertragsüberwachungsdaten und Satelliten- oder Luftaufnahmen als Entscheidungshilfe für das Nährstoffmanagement dienen. Diese Technologien konzentrieren sich oft auf die Menge und den Zeitpunkt der Nährstoffausbringung, können aber auch Änderungen an der Quelle und der Platzierung erfordern. Es gibt viele Möglichkeiten, diese Technologien und Lösungen besser zu verknüpfen, um alle verfügbaren Daten für Entscheidungen auf Betriebsebene zu nutzen (52). Unterschiedliche Technologien sind für die Landwirtschaft in verschiedenen Größenordnungen geeignet. Der Einsatz von Nutrient Expert oder ähnlichen Entscheidungshilfetools ist ein Beispiel für eine digitale Lösung, die für Kleinbauern relevant ist. Modellgestützte Entscheidungshilfen



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

für das Stickstoffmanagement wurden auch bei Trockenlandbauern in Australien unter Verwendung von APSIMd angewandt (53). Der Einsatz digital unterstützter Beratungssysteme und die Mechanisierung mit geeigneten skalenneutralen Technologien wie der Laser-Landnivellierung (54) können für Millionen von Kleinbauern von Bedeutung sein.

Innovation durch adaptives Management

Anpassungsfähiges Management in den Betrieben und angewandte Forschung, die an offenen Innovationssystemen teilnehmen, können zu einer beschleunigten Entwicklung und Verfeinerung praktischer Technologien führen, die wirtschaftliche und ökologische Vorteile bieten (55). Zu den jüngsten Innovationen, die in Nordamerika weiterentwickelt werden, gehört zum Beispiel der Einsatz von wettergesteuerten Erntemodellen zur Vorhersage der optimalen Stickstoffmenge, die von Jahr zu Jahr variiert. Climate Fieldview von Bayer, Encirca Premium von Corteva und Adapt-N von Yara ermöglichen den Landwirten die Nutzung von Echtzeit-Wetterdaten, um die Stickstoffausbringung auf die standort- und saisonbedingten Anforderungen ihrer Felder abzustimmen (56). Diese Lösungen können zwar auch als datengesteuerte digitale Lösungen betrachtet werden, aber die Zusammenführung der Daten vieler Erzeuger in einer Region ermöglicht eine schnellere Innovation und Verfeinerung der Entscheidungsalgorithmen und unterstützt so ein adaptives Management. Öffentlich-private Partnerschaften, die Daten über die Reaktion von Nutzpflanzen auf Nährstoffe austauschen, können zur Unterstützung dieser Ziele beitragen (57).





SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Welche neuen Grundprinzipien werden für Quelle, Menge, Zeit und Ort benötigt?

Die Grundsätze für die vier Komponenten (Quelle, Menge, Zeit, Ort) gelten am unmittelbarsten auf der Ebene des Feldes und Betriebs. Spezifische Entscheidungen, die diesen Grundsätzen folgen, müssen auf bestimmte Böden, Kulturen, Klimazonen, Anbausysteme und sogar Wertschöpfungsketten zugeschnitten sein. Sie sollten auch den Betriebstyp, die Risikoaversion und das Finanzkapital berücksichtigen. Wir schlagen hier neue 4R-Prinzipien vor, die die zuvor identifizierten Lücken bei der Verwirklichung einer verantwortungsvollen Pflanzenernährung schließen, und begründen sie. Die verbleibenden ursprünglichen Grundsätze sind ebenfalls aufgeführt, werden aber in IPNI (2016) (1) ausführlicher beschrieben.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Neue Grundprinzipien für die richtige Quelle

1. **Nährstoffe in quantifizierbarer und verfügbarer Form bereitstellen.** Die ausgebrachte Form kann entweder sofort oder langsam pflanzenverfügbare Nährstoffe freisetzen, aber ihr Nährstoffgehalt muss bekannt sein, wenn der Bedarf der Pflanzen gedeckt werden soll. Handelsdünger werden auf der Grundlage von Standards für Qualität und Löslichkeit verkauft; Dünger und wiederverwertete Quellen können auf Nährstoffgehalt und -verfügbarkeit analysiert werden, oder es können geeignete Nährstoffgehaltstabellen verwendet werden (58).
2. **Verwendung klimaverträglicher Formen.** Klimaschonende Düngemittel müssen sowohl bei der Herstellung als auch nach der Ausbringung weniger Treibhausgase freisetzen. Düngemittel unterscheiden sich stark in ihrem ökologischen Fußabdruck pro ausgebrachter Nährstoffeinheit (59). Innovationen in der Industrie zur Herstellung von Solardüngern (60), grünem Ammoniak und blauem Harnstoff (61) könnten in Zukunft zu einem kleineren Stickstoff-Fußabdruck führen (62). Inhibitoren der Nitrifikation und der Harnstoffhydrolyse sowie Düngerbeschichtungen sind seit Jahrzehnten erhältlich, werden aber nur begrenzt eingesetzt. Ein Hauptgrund dafür sind ihre Kosten im Verhältnis zu ihrer Wirksamkeit in Bezug auf die Verbesserung der Erträge und der Effizienz der Nährstoffnutzung (63), die oft relativ geringer ist als die 20- bis 40-prozentige Verringerung der Lachgasemissionen, die sie erreichen können (64). Künftige Innovationen umfassen nanopartikuläre Formen von Nährstoffen, Aptamere und Beschichtungen, die auf Pflanzensignale reagieren und "intelligente Düngemittel" darstellen, die Nährstoffe in Abhängigkeit von der mikrobiellen Aktivität und dem Pflanzenbedarf freisetzen (65). Die Wahl emissionsarmer Formen trägt zur Verringerung der Scope-3-Emissionen des Düngemittelsektors bei.

Ursprüngliche Grundprinzipien für die richtige Quelle

1. Anpassung der physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften.
 2. Erkennen von Synergien zwischen Nährstoffelementen und -quellen.
 3. Die Kompatibilität der Materialien untereinander erkennen.
 4. Erkennen der Vorteile und Empfindlichkeiten gegenüber assoziierten Elementen.
 5. Kontrolle der Auswirkungen von Elementen ohne Funktion.
3. **Verwendung recycelter Formen, wo dies möglich ist.** Die Ausbringung von Gülle, Klärschlamm und Kompost verringert den Bedarf an Kunstdünger und trägt dazu bei, den gesamten ökologischen Fußabdruck der Landwirtschaft zu verringern. In landwirtschaftlichen Betrieben, die Viehfutter importieren, können die Nährstoffe in der Gülle jedoch den Bedarf der Pflanzen auf den verfügbaren Flächen übersteigen. Technologien zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus Dung in konzentrierteren Formen wie Struvit (66) oder Kalziumphosphaten (67) ermöglichen den Transport von Nährstoffen über größere Entfernungen. Es wurden Leitlinien und Fahrpläne für die Entwicklung solcher biobasierten Düngemitteltechnologien vorgeschlagen (68). Die Innovation schreitet voran, um verschiedene Abfallströme zu neuartigen Formen von Düngemitteln zu verarbeiten, die ein ausgezeichnetes Anwendungspotenzial haben. Das Struvit-Verfahren von Ostara beispielsweise gewinnt Phosphor aus Kläranlagen in Atlanta, Edmonton, Saskatoon und insgesamt 22 Systemen weltweit und kann jährlich 25.000 Tonnen Ammonium-Magnesium-Phosphat-Dünger mit kontrollierter Freisetzung produzieren. Anuvia aus Florida vermarktet organische Pflanzennährstoffe, die aus Lebensmittelabfällen hergestellt werden. Erwähnenswert sind auch Ductor, das Bioenergie und einen flüssigen Stickstoffdünger aus Biogasanlagen herstellt, Elemental, das im Vereinigten Königreich Düngemittel aus verschiedenen Formen von



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Lebensmittelabfällen produziert, und Grassland Fertilisers, das granulierte Formen mit geringer Analyse aus Rindermast-abfällen herstellt.

3. **Einsatz biologischer Impfstoffe.** Bei Leguminosen ist der Einsatz verschiedener Rhizobienstämme als Methode zur biologischen Fixierung beträchtlicher Stickstoffmengen bekannt und anerkannt, und ihre Optimierung ist für eine nachhaltige Intensivierung entscheidend (69). Als Biodünger werden lebende Mikroben bezeichnet, die die Pflanzenernährung verbessern, indem sie entweder Nährstoffe mobilisieren oder deren Verfügbarkeit im Boden erhöhen (70). Verschiedene nützliche Bakterien und Pilze werden derzeit als Biodünger eingesetzt und können erfolgreich die Rhizosphäre, die Rhizoplane oder das Wurzelinnere besiedeln. Trotz ihres Potenzials müssen Biodünger jedoch noch herkömmliche chemische Düngemittel in der kommerziellen Landwirtschaft ersetzen. Die Wachstumsreaktionen auf die Inokulation mit arbuskulären Mykorrhizapilzen sind im Großen und Ganzen uneinheitlich (71).

Neue Grundprinzipien für die richtige Dosierung

1. **Berücksichtigen Sie die Variabilität in der Reaktion der Pflanzen.**

Witterungsschwankungen von Jahr zu Jahr und räumliche Schwankungen innerhalb und zwischen Feldern sowie deren Wechselwirkung führen zu Unterschieden in der Reaktion der Pflanzen auf die ausgebrachten Nährstoffe (72, 73). Das Wetter ist ein wichtiger Faktor für den Nährstoffbedarf der Pflanzen, aber die herkömmlichen Empfehlungen variieren oft nicht von Jahr zu Jahr. Es hat sich gezeigt, dass die Einbeziehung des Wetters in den Entscheidungsprozess für die Stickstoffdosierung die Ergebnisse im Maisanbau in Nordamerika (74), bei kommerziellen Kulturen in Australien (53) und bei einem Weizen-Mais-System in der nordchinesischen Tiefebene (75) verbessert.

Ursprüngliche Grundprinzipien für die richtige Dosierung

1. Bewertung des Nährstoffbedarfs der Pflanzen.
2. Bewertung des Nährstoffangebots im Boden.
3. Vorhersage der Effizienz des Düngemiteleinsatzes.
4. Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Bodenressourcen.
5. Ökonomie und das Gesetz des abnehmenden Ertrags berücksichtigen

Neue Grundprinzipien für den richtigen Zeitpunkt

1. **Berücksichtigung von Veränderungen des Nährstoffbedarfs während der Vegetationsperiode.** Eine dynamische Anpassung der Nährstoffgaben während der Vegetationsperiode hat sich in vielen Anbausystemen als machbar erwiesen, darunter Ölpalmen (76), Mais (77), Baumwolle mit Fertigstellung (78) und Weizen (79, 80). Ein Ansatz des maschinellen Lernens, der meteorologische Daten während der Saison verwendet, hat sich als vielversprechend für die Vorhersage des Stickstoffbedarfs im kalifornischen Mandelanbau (81) und im ostkanadischen Rapsanbau (82) erwiesen. Eine solche dynamische Anpassung ist auch mit so einfachen Hilfsmitteln wie Blattfarbkarten, Smartphones oder visuellen Mangelsymptomen möglich.

Ursprüngliche Grundprinzipien für den richtigen Zeitpunkt

1. Bewertung des Zeitpunkts der Pflanzenaufnahme.
2. Dynamik der Nährstoffversorgung im Boden abschätzen.
3. Dynamik des Nährstoffverlustes im Boden erkennen.
4. Die Logistik der Feldarbeiten bewerten.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Neue Grundprinzipien für die richtige Platzierung

1. **Nährstoffe so platzieren, dass sie nicht verloren gehen.** Die richtige räumliche Platzierung von Nährstoffen in der Landschaft kann Nährstoffverluste außerhalb des Standortes minimieren. Viele Unternehmen entwickeln Fern- oder Naherkundungssysteme, um vorherzusagen, wo die Nährstoffe am besten ausgebracht werden, indem sie Technologien zur variablen Ausbringung von Düngemitteln einsetzen (83). Die Ausbringung von Düngemitteln mit variabler Rate bei wilden Heidelbeeren auf der Grundlage von Hangneigung und Pflanzendecke verringerte die Abflussverluste von Phosphor, ohne den Ertrag zu verringern, verglichen mit der Ausbringung mit einheitlicher Rate (84). In einem Mais-Sojabohnen-System in Iowa wurde festgestellt, dass eine Düngung mit variabler Dosierung den Phosphoreintrag und die räumliche Variabilität der Bodenuntersuchungswerte reduziert und damit das Potenzial für Phosphorverluste verringert (85). In Böden mit hohem pH-Wert kann die Einarbeitung von Harnstoff, anstatt ihn auf der Oberfläche zu belassen, Ammoniakverluste verringern (86, 87). Die Platzierung von Phosphatquellen unter der Bodenoberfläche kann die Konzentrationen und die Belastung von gelöstem Phosphor im Drainagewasser verringern (88), insbesondere in Anbausystemen mit konservierender Bodenbearbeitung (89).

Ursprüngliche Grundprinzipien für die richtige Platzierung

1. Berücksichtigung wo Pflanzenwurzeln wachsen.
2. Berücksichtigung der chemischen Reaktionen des Bodens.
3. Anpassung der Ziele des Bodenbearbeitungssystems.
4. Beherrschung der räumlichen Variabilität.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Nährstoffquellen zirkulärer und klimafreundlicher gestaltet werden müssen und die Menge, die Zeit und der Ort der Ausbringung präziser und dynamischer sein müssen.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Wir kann 4R zur Berichterstattung über die Nachhaltigkeitsleistung beitragen?

Landwirte, Industrie, Zivilgesellschaft und Regierungen haben einen zunehmenden, aber unterschiedlichen Bedarf an Überwachung und Berichterstattung über Nachhaltigkeitsleistungen im Hinblick auf wissenschaftlich fundierte Ziele.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Dort, wo die 4R-Implementierung ein gewisses Maß an Anerkennung erlangt hat, wurde sie häufig durch gezielte Erwartungen der Interessengruppen vorangetrieben. So konzentrierte sich das 4R-Zertifizierungsprogramm für den Eriesee auf Praktiken, die Phosphorverluste und Algenblüten reduzieren und gleichzeitig die Rentabilität der Pflanzenproduktion gewährleisten. Das integrierte Bodenfruchtbarkeitsmanagement konzentrierte sich auf die Steigerung der pflanzlichen Produktion und der Ernährungssicherheit, indem es die Rentabilität erhöhte und die Risiken für Kleinbauern verringerte. Jede Region und jedes Anbausystem hat andere Prioritäten für die Beteiligten.

Die Ermittlung der Prioritäten der Interessengruppen erfolgt jedoch auf einer Ebene, die weit über den landwirtschaftlichen Maßstab hinausgeht, und ist im Wesentlichen die Aufgabe von Nachhaltigkeitsplattformen wie Field to Market oder anderen Organisationen, deren Führungsstrukturen für die Vertretung der Interessen der Interessengruppen geeignet sind. Aus diesem Grund beschreiben wir stattdessen einige zentrale universelle Komponenten der Rechenschaftspflicht als Rahmen für 4R und wie sie mit einer der bestehenden Nachhaltigkeitsplattformen verknüpft werden können. Der Rahmen erfordert die Verfolgung von 4R-Praktiken und wirtschaftlicher Leistung auf Betriebsebene. Die Berichterstattung über ökologische und soziale Auswirkungen, die nicht direkt auf Betriebsebene gemessen werden können, würde auf regionaler oder Programmebene im Rahmen von Kooperationsprogrammen und -initiativen erfolgen, die wissenschaftlich fundierte Schätzmethode und Modelle beinhalten. Die Quantifizierung dieser Auswirkungen erfordert oft detaillierte Daten über die angewandten betriebsspezifischen Verfahren und die spezifischen Bodeneigenschaften.

Verfolgung von 4R-Verfahren und wirtschaftlicher Leistung auf Betriebsebene

Das Kerngerüst der 4R-Implementierung auf Betriebsebene umfasst die Verfolgung der vier Verfahrenskomponenten und ihrer unmittelbaren wirtschaftlichen Ergebnisse auf Betriebsebene. Ein Ansatz zur Nachverfolgung von 4R-Praktiken verwendet Tabellen, die unter Mitwirkung von Experten entwickelt wurden und spezifische Pakete von Quelle-Rate-Zeit-Ort-Praktiken für bestimmte Anbausysteme auf grundlegenden, mittleren und fortgeschrittenen Managementebenen beschreiben (90). Zu den vier Leistungskennzahlen in Abbildung 1, die auf Betriebsebene messbar sind, gehören Produktivität, Rentabilität, Effizienz der Nährstoffnutzung und Bodengesundheit.

- Produktivität, definiert als Ertrag an marktfähigen Produkten.
- Die Rentabilität, die Differenz zwischen Einnahmen und Ausgaben, sichert den Lebensunterhalt der Landwirte.
- Die Nährstoffnutzungseffizienz kann als Verhältnis zwischen Output und Input oder als Überschuss oder Defizit verfolgt werden.
- Die Bodengesundheit kann sich auf die Bodenfruchtbarkeit konzentrieren, umfasst aber auch biologische und physikalische Aspekte des Bodens, die die Produktivität, die verfügbare Wasserhaltekapazität und die Kohlenstoffspeicherung unterstützen.

Die Informationen zu diesen vier Leistungsbereichen kommen dem Betriebsleiter zugute, können aber auch zur Berichterstattung über die ökologische und soziale Leistung beitragen, wenn sie unter angemessenem Schutz der Privatsphäre an einen Aggregator weitergegeben werden. Mehrere dieser Metriken wurden wegen ihrer Bedeutung für die Erbringung von Ökosystemleistungen befürwortet. So wurde beispielsweise die Phosphorkonzentration im Bodentest als Messgröße für die Auswirkungen der Landwirtschaft auf



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

die biologische Vielfalt, die Bodengesundheit und das Risiko der Wasserverschmutzung im Zusammenhang mit der Weideproduktivität in Neuseeland vorgeschlagen (39). Außerdem wurde der Stickstoffüberschuss als Indikator für Lachgasemissionen vorgeschlagen, der von Unternehmen der Lebensmittelversorgungskette und anderen genutzt werden kann, um aggregierte Veränderungen der Treibhausgasemissionen auf regionaler Ebene zu quantifizieren (91). Maßgeschneiderte Ansätze, die die Stickstoffbilanzen innerhalb sicherer Grenzen halten, helfen, Kompromisse zwischen Lachgasemissionen und hohen Ernteerträgen zu vermeiden (92). Eine Analyse von mehr als 10.000 Feld-Jahres-Kombinationen von Betriebsdaten in den Niederlanden - gemeinsam mit einem Beratungsunternehmen, das Entscheidungshilfen anbietet - zeigte, wie Management- und Wettereffekte auf Erträge und Stickstoffnutzungseffizienz genutzt werden können, um die Produktions-, Wirtschafts- und Umweltleistung zu bewerten (93).

Gemeinsame Nutzung nachverfolgter Daten zur Leistungsberichterstattung

Die Quantifizierung der wichtigsten materiellen Ergebnisse liefert wichtige Informationen für alle an der Wertschöpfungskette Beteiligten, vom Landwirt bis zum Verbraucher. Nicht alles, was erfasst wird, muss weitergegeben und berichtet werden, aber die Quantifizierung dieser Ergebnisse ist mit den wichtigsten Praktiken verbunden. Zu den Umweltergebnissen im Zusammenhang mit 4R in landwirtschaftlichen Systemen, die von Bedeutung sein können, gehören Biodiversität (94), Netto-Treibhausgasemissionen (einschließlich Kohlenstoffsinken im Boden) sowie Luft- und Wasserqualität (siehe Abbildung 1). Ein 4R-Plan kann einen wichtigen Teil der Informationen über die



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

landwirtschaftlichen Aktivitäten liefern, die für einschlägige Nachhaltigkeitsplattformen - Kooperationen der Agrar- und Lebensmittelindustrie, zu denen bereits viele Düngemittelhersteller und Einzelhändler gehören - erforderlich sind, die den Interessengruppen über Umweltergebnisse berichten. So erkennt beispielsweise die Field to Market Alliance for Sustainable Agriculture in ihrer Fieldprint-Plattform (95) spezifische Suiten von 4R-Stickstoffpraktiken für die Berechnung der Lachgasemissionen von Mais- und Weizenanbausystemen in den Vereinigten Staaten an. Sie verlangt Daten zu 4R-Nährstoffpraktiken in vier ihrer acht Metriken: biologische Vielfalt, Treibhausgase, Energie und Wasserqualität. Das Ecosystem Services Market Consortium (Konsortium für den Markt für Ökosystemdienstleistungen) verwendet noch detailliertere Daten zu 4R-Praktiken, um marktfähige Gutschriften zu generieren, indem es validierte Modelle zur Wirksamkeit bei der Reduzierung von Treibhausgasemissionen verwendet. Mehrere andere Plattformen sind im Entstehen begriffen, darunter die von der Industrie geführten, freiwilligen Carbon Farming-Plattformen von Indigo Ag, Truterra, Bayer, Nutrien, Yara und vielen anderen. Viele Lebensmittelunternehmen und Lieferanten landwirtschaftlicher Betriebsmittel versuchen derzeit, ihre "Scope 3"-Emissionen und ihren Fußabdruck zu definieren und zu reduzieren. Dies kann alle Indikatoren in dieser Kategorie umfassen, die mit der landwirtschaftlichen Produktion in ihrer Lieferkette verbunden sind.

Ein 4R-Plan - oder sogar ein Plan für die Bewirtschaftung des gesamten Betriebs - bezieht sich weniger direkt auf die sozialen Auswirkungen auf die Lebensmittelsicherheit, die menschliche Ernährung, den Lebensunterhalt und die Kreislaufwirtschaft (Abbildung 1).

Aber diese Auswirkungen sind kollektive Ergebnisse der Aktivitäten auf den einzelnen Betrieben und in der gesamten Lieferkette. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, die Zusammenhänge durch Bemühungen von Kooperationsplattformen und staatlichen Verzeichnissen herzustellen. Indikatoren für die Lebensmittelsicherheit und menschliche Ernährung auf globaler und nationaler Ebene werden von der FAO, nationalen Regierungen und anderen Organisationen veröffentlicht. Lebensgrundlagen spiegeln den Nutzen für das Einkommen der Landwirte wider. Dieser ergibt sich aus der Einführung lohnender Praktiken, die den gesellschaftlichen Nutzen unterstützen und umfasst auch die in der Agrarindustrie geschaffenen Arbeitsplätze in neuen innovativen Aktivitäten, die die Förderung von 4R unterstützen. Bei der Umsetzung von 4R-Programmen kann auch ein gerechterer Zugang zur Teilnahme und zum Nutzen in Betracht gezogen werden (96). Die Kreislauffähigkeit von Nährstoffen ist eine relativ neue Kennzahl, die den Beitrag zu einer stärker kreislaforientierten Wirtschaft durch verstärkte Wiederverwendung und Recycling widerspiegeln soll, wodurch die Erschöpfung endlicher Ressourcen verringert wird. Eine Methodik zur Berechnung von Indikatoren für den zirkulären Übergang wurde veröffentlicht (97). Wie sie genau gemessen, berechnet oder mit dem Nährstoffverbrauch auf Betriebsebene in Beziehung gesetzt werden, muss noch erörtert werden. Dennoch sollten sie eine optimalere Verteilung von Viehdung und anderen Bioabfällen auf Böden widerspiegeln, in denen die Nährstoffe am dringendsten benötigt werden, sowie das sichere Recycling von Nährstoffen um die Erschöpfung endlicher natürlicher Ressourcen zu verringern (98).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Wer muss was tun?

Die folgenden Richtlinien skizzieren die Rollen der einzelnen Interessengruppen bei der Förderung von 4R Nutrient Stewardship. Sie basieren auf den Rollen, die von der FAO (3) und dem Wissenschaftlichen Gremium für verantwortungsvolle Pflanzenernährung (2) beschrieben wurden. Spezifische Empfehlungen und Maßnahmen werden von Land zu Land unterschiedlich sein, je nach regionalen Prioritäten und technischem Entwicklungsstand.

Düngemittelhändler, Anbauberater, Agrardienstleister:

Versorgung der Landwirte mit evidenzbasierten Informationen über spezifische 4R-Praktiken und verantwortungsvolle agronomische Praktiken. Verstärkte Zusammenarbeit mit Landwirten das adaptive Management in den Betrieben und die Forschung, die Düngemittelprodukte und -zusätze sowie die damit verbundenen Praktiken für die Ausbringung von Düngemitteln im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf den Ertrag, die Effizienz der Nährstoffnutzung und die Bodengesundheit bewertet. Sicherstellen, dass die Ausbringungsdienste den 4R-Praxis- und Qualitätsstandards entsprechen. Unterstützung und Förderung des sicheren und angemessenen Einsatzes von Nährstoffen, die aus recycelten Quellen stammen.

Landwirte und andere Düngemittelanwender:

Optimize nutrient management with available source-rate-time-place combinations, based on crop needs and soil fertility conditions, and using appropriate decision support tools. Participate in on-farm evaluations of specific 4R combinations. Seek out recommendations from professionally recognized, certified, agri-service providers. Where feasible share data on 4R and agronomic practices to platforms reporting, recognizing, and rewarding improved sustainability performance. Ensure that locally available nutrient sources—including animal manures, composts, crop residues—are utilized appropriately.

Wissenschaftler:

Definition und Beschreibung in Zusammenarbeit mit Anbauberatern und Landwirten 4R-Praxisstandards, die für regenerative Anbausysteme relevant sind. Entwicklung, Validierung und Glaubwürdigkeit von Methoden zur Vorhersage ökologischer und sozialer Ergebnisse solcher Veränderungen in landwirtschaftlichen Systemen und Unterstützung ihrer Einbeziehung in Plattformen für die Berichterstattung über Nachhaltigkeitsleistungen. Untersuchung sozioökonomischer und ökologischer Hindernisse für die Übernahme von 4R-Praktiken durch die Landwirte und Ermittlung politischer und technologischer Möglichkeiten zur Beseitigung dieser Hindernisse. Entwicklung von Methoden zur mehrstufigen Bewertung von 4R-Umsetzungsprogrammen. Entwicklung neuer, effizienterer, klimafreundlicher und kreislaufwirtschaftlich sinnvoller Nährstoffquellen.

Regierungen:

Erleichterung der Sammlung statistischer Daten mit größerer Detailtiefe zur Unterstützung der Berichterstattung über 4R-Praktiken. Unterstützung von Wissenschaftlern und wissenschaftlicher Forschung bei der Entwicklung von Modellen zur Bewertung der Auswirkungen von 4R-Praktiken auf die Nachhaltigkeitsleistung. Verabschiedung von Maßnahmen, die Anreize und Belohnungen für die Einführung von 4R-Praktiken, die Produktion von nährstoffreicheren Lebensmitteln, die Entwicklung und Verwendung von klimafreundlichen Düngemitteln und Innovationen beim Recycling von Nährstoffen aus Abfällen schaffen. Die gemeinsame EPA-USDA-Partnerschaft und der Wettbewerb für Düngemittel der nächsten Generation zur Förderung der landwirtschaftlichen Nachhaltigkeit in den Vereinigten Staaten ist ein hervorragendes Beispiel für die Zusammenarbeit der Regierung mit der Industrie, um Anreize für Innovationen bei der Entwicklung von Düngemitteln zu schaffen.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Wer muss was tun?

Düngemittelindustrie:

Einführung von Entscheidungshilfesystemen und Empfehlungen für die Wahl von Quelle, Menge, Zeit und Ort im Einklang mit den 4R-Prinzipien. Lieferung oder Bereitstellung der richtigen Quellen zur richtigen Zeit. Den Käufern, einschließlich Landwirten, Informationen über den ökologischen Fußabdruck von Düngemitteln zur Verfügung stellen. Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen, Regierungen und zivilgesellschaftlichen Organisationen bei der Entwicklung von Nachhaltigkeitsstandards für die landwirtschaftliche Wertschöpfungskette unter Einbeziehung von 4R-Praxisstandards und Leistungskennzahlen. Schulung von Einzelhändlern, Agronomen und Landwirten zu 4R-Prinzipien, standortspezifischen 4R-Praktiken und verantwortungsvollen Anbausystemen. Förderung von Innovationen und Bereitstellung von Ressourcen zur Entwicklung von Technologien für die Wiederverwendung und das Recycling von Nährstoffen zur sicheren Verwendung als Düngemittel. Auf regionaler Basis die öffentliche Forschung zu wichtigen Fragen im Zusammenhang mit den 4R unterstützen.

Lebensmittelhändler, -verarbeiter und -einzelhändler:

Anerkennung und Belohnung von 4R-Praktiken, die für verkaufte Produkte verwendet werden. Aufnahme von 4R-Praktiken und Leistungskennzahlen in nachhaltige Produktionsstandards, um die Übernahme verbesserter 4R-Praktiken durch Landwirte zu beschleunigen.

Organisationen der Zivilgesellschaft:

Einsetzung für die Anerkennung und Belohnung von 4R Nutrient Stewardship in Kooperationsplattformen, die eine nachhaltige Landwirtschaft fördern. Kommunikation von Erfolgen bei der Verhaltensänderung und die daraus resultierenden Vorteile für Ökosysteme und die Gesellschaft.

Investoren:

Investitionen in Technologien, Unternehmen und Organisationen, die 4R als anerkanntes Mittel zur Förderung der Nährstoffbewirtschaftung unterstützen.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Wie wird Erfolg aussehen?

Die Förderung von 4R Nutrient Stewardship mit einer neuen Reihe von Prinzipien kann innerhalb der nächsten zehn Jahre zu folgenden Ergebnissen führen.

1

Die Zusammenarbeit innerhalb der Agrar- und Ernährungsindustrie hat zur Entwicklung von vertrauenswürdigen Agenturen geführt, mit denen Landwirte bereit sind, Daten über Nährstoffausbringungspraktiken zum Zwecke der Überwachung, Bewertung und Berichterstattung über Nachhaltigkeitsergebnisse auszutauschen.

2

Die Düngemittel- und Viehzuchtindustrie hat gemeinsam 4R-Praxisstandards entwickelt, die das Düngemittel- und Abfallmanagement integrieren, um den Nährstoffkreislauf zwischen Ackerland, Weideland und Viehbestand zu berücksichtigen.

3

Digitale Technologien werden zunehmend in landwirtschaftlichen Betrieben unterschiedlicher Größenordnung eingesetzt, sowohl für Zwecke der betrieblichen Forschung und des adaptiven Managements als auch für den Austausch von Daten zur Berichterstattung über Nachhaltigkeitsergebnisse.

4

Ein grünes Gütesiegel für landwirtschaftliche Produkte, die mit Methoden zum Schutz der biologischen Vielfalt angebaut werden, erkennt die 4R-Praktiken und Leistungsdaten an und erfordert diese.



Wie wird Erfolg aussehen?

5

Innovationen in Technologie und Management haben zu registrierten Düngemitteln geführt, die Stickstoff und Phosphor aus Dung und anderen Bioabfällen in transportfähiger Form als Düngemittel verwenden.

6

Regenerative Anbausysteme, die für eine ausgedehnte Begrünung des Bodens sorgen, werden durch 4R-Praxisempfehlungen unterstützt.

7

Es wurden robuste Methoden und Standards eingeführt, um den Umgang mit Nährstoffen besser beurteilen zu können und weitere Investitionen in die Forschung und in politische Maßnahmen zur Förderung beschleunigter Innovationen auf der Ebene der Betriebe, der Landschaften und der Länder zu lenken.

8

Anerkannte Praxisstandards für Quelle, Menge, Zeitpunkt und Ort, die spezifische Prioritäten regionaler Anbausysteme berücksichtigen, werden von Landwirten angewandt und von Käufern landwirtschaftlicher Erzeugnisse anerkannt.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referenzen

1. IPNI. 4R plant nutrition manual: A manual for improving the management of plant nutrition. (International Plant Nutrition Institute, 2016).
2. SPRPN. A new paradigm for plant nutrition. Issue Brief 01. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Paris, France. (2020).
3. FAO. International code of conduct for the sustainable use and management of fertilizers. (2019).
4. Fixen, P. E. A brief account of the genesis of 4R nutrient stewardship. Agron. J. 112, 4511–4518 (2020).
5. Alberta Government. Quantification Protocol for Agricultural Nitrous Oxide Emission Reductions Specified Gas Emitters Regulation, version 2.0. (2015).
6. Drever, C. R. et al. Natural climate solutions for Canada. Sci. Adv. 7, (2021).
7. Vollmer-Sanders, C., Allman, A., Busdeker, D., Moody, L. B. & Stanley, W. G. Building partnerships to scale up conservation: 4R Nutrient Stewardship Certification Program in the Lake Erie watershed. J. Great Lakes Res. 42, 1395–1402 (2016).
8. Pampolino, M. F., Witt, C., Pasuquin, J. M., Johnston, A. & Fisher, M. J. Development approach and evaluation of the Nutrient Expert software for nutrient management in cereal crops. Comput. Electron. Agric. 88, 103–110 (2012).
9. Dobermann, A. et al. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. F. Crop. Res. 74, 37–66 (2002).
10. Sapkota, T. B. et al. Crop nutrient management using Nutrient Expert improves yield, increases farmers' income and reduces greenhouse gas emissions. Sci. Rep. 11, 1564 (2021).
11. Hoffmann, M. P. et al. Fertilizer management in smallholder cocoa farms of Indonesia under variable climate and market prices. Agric. Syst. 178, 102759 (2020).
12. Tao, H.-H. et al. Fertilizer management effects on oil palm yield and nutrient use efficiency on sandy soils with limited water supply in Central Kalimantan. Nutr. Cycl. Agroecosystems 112, 317–333 (2018).
13. Luar, L. et al. Cassava Response to Fertilizer Application. Better Crop. with Plant Food 102, 11–13 (2018).
14. SRP. The SRP Standard for Sustainable Rice Cultivation (Version 2.1), Sustainable Rice Platform. (2020).
15. Wu, Y. et al. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 115, 7010 (2018).
16. Xu, X. et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. F.Crop.Res.157,27–34 (2014).
17. Wang, Y. et al. Agronomic and environmental benefits of nutrient expert on maize and rice in Northeast China. Environ. Sci. Pollut. Res. (2020).
18. Zhang, C., Ju, X., Powlson, D. S., Oenema, O. & Smith, P. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China. Environ. Sci. Technol. (2019).
19. Li, T. et al. Exploring optimal nitrogen management practices within site-specific ecological and socioeconomic conditions. J. Clean. Prod. 241, 118295 (2019).
20. Cui, Z. et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. Nature 555, 363–366 (2018).
21. Vanlauwe, B. et al. Integrated Soil Fertility Management: Operational Definition and Consequences for Implementation and Dissemination. Outlook Agric. 39, 17–24 (2010).
22. Vanlauwe, B. et al. Integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: unravelling local adaptation. SOIL 1, 491–508 (2015).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referenzen

23. Nkonya, E. Replication Data for: Mapping Adoption of ISFM Practices Study - The Case of Kenya, Rwanda & Zambia. (2017).
24. Chivenge, P., Saito, K., Bunquin, M. A., Sharma, S. & Dobermann, A. Co-benefits of nutrient management tailored to smallholder agriculture. Glob. Food Sec. 30, 100570 (2021).
25. Pearson, R. G., Connolly, N. M., Davis, A. M. & Brodie, J. E. Fresh waters and estuaries of the Great Barrier Reef catchment: Effects and management of anthropogenic disturbance on biodiversity, ecology and connectivity. Mar. Pollut. Bull. 166, 112194 (2021).
26. Conyers, M. K. et al. Making Better Fertiliser Decisions for Cropping Systems in Australia (BFDC): knowledge gaps and lessons learnt. Crop Pasture Sci. 64, 539–547 (2013).
27. Murray, W. & Freeman, M. Effective use of Overseer in regulation. In: L. D. Currie and M. J. Hedley, editors, Science and policy: nutrient management challenges for the next generation. Occasional Report No. 30, Fertiliser and Lime Research Centre, Palmerston North, NZ. p. 1-6. (2017).
28. Withers, P. J. A. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. Sci. Rep. 8, 2537 (2018).
29. Jobbágy, E., Aguiar, S., Garibaldi, L. & Piñeiro, G. Impronta ambiental de la agricultura de granos en Argentina: revisando desafíos propios y ajenos. Cienc. Hoy 29, (2021).
30. Fontana, M. B. et al. Long-term fertilizer application and cover crops improve soil quality and soybean yield in the Northeastern Pampas region of Argentina. Geoderma 385, 114902 (2021).
31. Picone, L. I. et al. Nitrous oxide emissions in maize on mollisols in the Pampas of Argentina. Geoderma Reg. e00362 (2021).
32. Piccinetti, C. F., Bacigaluppo, S., Di Ciocco, C. A., De Tellería, J. M. & Salvagiotti, F. Soybean in rotation with cereals attenuates nitrous oxide emissions as compared with soybean monoculture in the Pampas region. Geoderma 402, 115192 (2021).
33. Barrera, V. H., Delgado, J. A. & Alwang, J. R. Conservation agriculture can help the South American Andean region achieve food security. Agron. J., (2021).
34. van Grinsven, H. J. M. et al. Losses of Ammonia and Nitrate from Agriculture and Their Effect on Nitrogen Recovery in the European Union and the United States between 1900 and 2050. J. Environ. Qual. 44, 356–367 (2015).
35. Bruulsema, T. W., Peterson, H. M. & Prochnow, L. I. The science of 4R nutrient stewardship for phosphorus management across latitudes. J. Environ. Qual. 48, (2019).
36. Bouwman, A. F. et al. Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. Sci. Rep. 7, 40366 (2017).
37. Hoxha, A. & Christensen, C. The carbon footprint of fertiliser production: Regional reference values. Proceedings 805. Paper presented to the International Fertiliser Society, Prague, Czech Republic, 8 May 2018.
38. EUNEP. EU Expert Panel, Nitrogen Use Efficiency (NUE). Guidance document for assessing NUE at farm level (Wageningen University, Alterra, Wageningen, NL). (2016).
39. Macintosh, K. A. et al. Transforming soil phosphorus fertility management strategies to support the delivery of multiple ecosystem services from agricultural systems. Sci. Total Environ. 649, 90–98 (2019).
40. Schreefel, L., Schulte, R. P. O., de Boer, I. J. M., Schrijver, A. P. & van Zanten, H. H. E. Regenerative agriculture – the soil is the base. Glob. Food Sec. 26, 100404 (2020).
41. Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A. & Sumberg, J. Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. Outlook Agric. 0030727021998063 (2021).
42. Spiegat, S. et al. Manuresheds: Advancing nutrient recycling in US agriculture. Agric. Syst. 182, 102813 (2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referenzen

43. Jin, S. et al. Decoupling livestock and crop production at the household level in China. Nat. Sustain. 4, 48–55 (2021).
44. Fears, R., ter Meulen, V. & von Braun, J. Global food and nutrition security needs more and new science. Sci. Adv. 5, eaba2946 (2019).
45. Alfthan, G. et al. Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. J. Trace Elem. Med. Biol. 31, 142–147 (2015).
46. Chen, X.-P. et al. Harvesting more grain zinc of wheat for human health. Sci. Rep. 7, 7016 (2017).
47. Ferrari, M. et al. Comparing Soil vs. Foliar Nitrogen Supply of the Whole Fertilizer Dose in Common Wheat. Agronomy 11, (2021).
48. Zou, C. et al. Simultaneous Biofortification of Wheat with Zinc, Iodine, Selenium, and Iron through Foliar Treatment of a Micronutrient Cocktail in Six Countries. J. Agric. Food Chem. 67, 8096–8106 (2019).
49. Kutman, U. B., Yildiz, B. & Cakmak, I. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. Plant Soil 342, 149–164 (2011).
50. Grujicic, D., Yazici, A. M., Tutus, Y., Cakmak, I. & Singh, B. R. Biofortification of Silage Maize with Zinc, Iron and Selenium as Affected by Nitrogen Fertilization. Plants 10, (2021).
51. Bouis, H. E. & Saltzman, A. Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. Glob. Food Sec. 12, 49–58 (2017).
52. Basso, B. & Antle, J. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. Nat. Sustain. 3, 254–256 (2020).
53. Carberry, P. S. et al. Re-inventing model-based decision support with Australian dryland farmers. 3. Relevance of APSIM to commercial crops. Crop Pasture Sci. 60, 1044–1056 (2009).
54. Aryal, J. P., Mehrotra, M. B., Jat, M. L. & Sidhu, H. S. Impacts of laser land leveling in rice–wheat systems of the north–western indo-gangetic plains of India. Food Secur. 7, 725–738 (2015).
55. Steinke, J., Ortiz-Crespo, B., van Etten, J. & Müller, A. Participatory design of digital innovation in agricultural research-for-development: insights from practice. Agric. Syst. 195, 103313 (2022).
56. Sela, S., Woodbury, P. B. & van Es, H. M. Dynamic model-based N management reduces surplus nitrogen and improves the environmental performance of corn production. 13, 54010 (2018).
57. Ransom, C. J. et al. Data from a public–industry partnership for enhancing corn nitrogen research. Agron. J. (2021).
58. Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W. & Beaton, J. p 412-420 in Soil Fertility and Fertilizers: an Introduction to Nutrient Management, 8th edition. Pearson. (2014).
59. Hasler, K., Bröring, S., Omta, S. W. F. & Olf, H.-W. Life cycle assessment (LCA) of different fertilizer product types. Eur. J. Agron. 69, 41–51 (2015).
60. Comer, B. M. et al. Prospects and Challenges for Solar Fertilizers. Joule 3, 1578–1605 (2019).
61. Driver, J. G. et al. Blue Urea: Fertilizer With Reduced Environmental Impact. Frontiers in Energy Research 7, 88 (2019).
62. Tallaksen, J., Bauer, F., Hulteberg, C., Reese, M. & Ahlgren, S. Nitrogen fertilizers manufactured using wind power: greenhouse gas and energy balance of community-scale ammonia production. J. Clean. Prod. 107, 626–635 (2015).
63. Abalos, D., Jeffery, S., Sanz-Cobena, A., Guardia, G. & Vallejo, A. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. Agric. Ecosyst. Environ. 189, 136–144 (2014).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referenzen

64. Thapa, R., Chatterjee, A., Awale, R., McGranahan, D. A. & Daigh, A. Effect of Enhanced Efficiency Fertilizers on Nitrous Oxide Emissions and Crop Yields: A Meta-analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 80, 1121–1134 (2016).
65. Monreal, C. M., DeRosa, M., Mallubhotla, S. C., Bindraban, P. S. & Dimkpa, C. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. Biol. Fertil. Soils 52, 423–437 (2016).
66. do Nascimento, C. A. C., Pagliari, P. H., Faria, L. de A. & Vitti, G. C. Phosphorus Mobility and Behavior in Soils Treated with Calcium, Ammonium, and Magnesium Phosphates. Soil Sci. Soc. Am. J. 82, 622–631 (2018).
67. Szogi, A. A. & Vanotti, M. B. Removal of Phosphorus from Livestock Effluents. J. Environ. Qual. 38, 576–586 (2009).
68. Vaneeckhaute, C., Belia, E., Meers, E., Tack, F. M. G. & Vanrolleghem, P. A. Nutrient recovery from digested waste: Towards a generic roadmap for setting up an optimal treatment train. Waste Manag. 78, 385–392 (2018).
69. Mendoza-Suárez, M. A. et al. Optimizing Rhizobium-legume symbioses by simultaneous measurement of rhizobial competitiveness and N₂ fixation in nodules. Proc. Natl. Acad. Sci. 117, 9822 LP – 9831 (2020).
70. Mitter, E. K., Tosi, M., Obregón, D., Dunfield, K. E. & Germida, J. J. Rethinking Crop Nutrition in Times of Modern Microbiology: Innovative Biofertilizer Technologies. Front. Sustain. Food Syst. 5, 29 (2021).
71. Ryan, M. H. & Graham, J. H. Little evidence that farmers should consider abundance or diversity of arbuscular mycorrhizal fungi when managing crops. New Phytol. 220, 1092–1107 (2018).
72. Ichami, S. M., Shepherd, K. D., Sila, A. M., Stoorvogel, J. J. & Hoffland, E. Fertilizer response and nitrogen use efficiency in African smallholder maize farms. Nutr. Cycl. Agroecosystems 113, 1–19 (2019).
73. Sogbedji, J. M., van Es, H. M., Klausner, S. D., Bouldin, D. R. & Cox, W. J. Spatial and temporal processes affecting nitrogen availability at the landscape scale. Soil Tillage Res. 58, 233–244 (2001).
74. Ransom, C. J. et al. Improving publicly available corn nitrogen rate recommendation tools with soil and weather measurements. Agron. J., (2021).
75. Michalczyk, A. et al. Model-based optimisation of nitrogen and water management for wheat–maize systems in the North China Plain. Nutr. Cycl. Agroecosystems 98, 203–222 (2014).
76. Webb, M. A conceptual framework for determining economically optimal fertiliser use in oil palm plantations with factorial fertiliser trials. Nutr. Cycl. Agroecosystems 83, 163–178 (2009).
77. Kabir, T., De Laporte, A., Nasielski, J. & Weersink, A. Adjusting Nitrogen Rates with Split Applications: Modelled Effects on N Losses and Profits Across Weather Scenarios. Eur. J. Agron. 129, 126328 (2021).
78. Bronson, K. F. et al. Improving Nitrogen Fertilizer Use Efficiency in Surface- and Overhead Sprinkler-Irrigated Cotton in the Desert Southwest. Soil Sci. Soc. Am. J. 81, 1401–1412 (2018).
79. Dick, C. D., Thompson, N. M., Epplin, F. M. & Arnall, D. B. Managing Late-Season Foliar Nitrogen Fertilization to Increase Grain Protein for Winter Wheat. Agron. J. 108, 2329–2338 (2016).
80. Kersebaum, K. C. et al. Operational use of agro-meteorological data and GIS to derive site specific nitrogen fertilizer recommendations based on the simulation of soil and crop growth processes. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C 30, 59–67 (2005).
81. Zhang, Z., Jin, Y., Chen, B. & Brown, P. California Almond Yield Prediction at the Orchard Level With a Machine Learning Approach. Front. Plant Sci. 10, 809 (2019).
82. Wen, G. et al. Machine learning-based canola yield prediction for site-specific nitrogen recommendations. Nutr. Cycl. Agroecosystems 121, 241–256 (2021).
83. Fastellini, G. & Schillaci, C. Chapter 7 - Precision farming and IoT case studies across the world. in Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming (eds. Castrignanò, A. et al.) 331–415 (Academic Press, 2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referenzen

84. Rashid Saleem, S. et al. Impact of Variable Rate Fertilization on Nutrients Losses in Surface Runoff for Wild Blueberry Fields. Appl. Eng. Agric. 30, 179–185 (2014).
85. Wittry, D. J. & Mallarino, A. P. Comparison of uniform- and variable-rate phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. Agron. J. 96, 26–33 (2004).
86. Sheppard, S. C., Bittman, S. & Bruulsema, T. W. Monthly ammonia emissions from fertilizers in 12 Canadian Ecoregions. Can. J. Soil Sci. 90, (2010).
87. Woodley, A. L. et al. Ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, and corn yields as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers. Soil Sci. Soc. Am. J. n/a, (2020).
88. King, K. W. et al. Phosphorus Transport in Agricultural Subsurface Drainage: A Review. J. Environ. Qual. 44, 467–485 (2015).
89. Jarvie, H. P. et al. Increased soluble phosphorus loads to lake erie: Unintended consequences of conservation practices? J. Environ. Qual. 46, (2017).
90. Snyder CS. Suites of 4R Nitrogen Management Practices for Sustainable Crop Production and Environmental Protection. International Plant Nutrition Institute. (2016).
91. Eagle, A. J. et al. Quantifying On-Farm Nitrous Oxide Emission Reductions in Food Supply Chains. Earth's Futur. 8, e2020EF001504 (2020).
92. Maaz, T. M. et al. Meta-analysis of yield and nitrous oxide outcomes for nitrogen management in agriculture. Glob. Chang. Biol. n/a, (2021).
93. Silva, J. V. et al. Agronomic analysis of nitrogen performance indicators in intensive arable cropping systems: An appraisal of big data from commercial farms. F. Crop. Res. 269, 108176 (2021).
94. SPRPN. Achieving nature-positive plant nutrition: fertilizers and biodiversity. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. Paris, France. 12 (2021).
95. Young, K. M. & Thomson, A. Relating agronomic practices to environmental sustainability outcomes: energy use and greenhouse gases. Crop. Soils 52, 14–42 (2019).
96. Farnworth, C. R. et al. Gender and inorganic nitrogen: what are the implications of moving towards a more balanced use of nitrogen fertilizer in the tropics? Int. J. Agric. Sustain. 15, 136–152 (2017).
97. WBCSD. Circular transition indicators v2.0. World Business Council for Sustainable Development. (2021).
98. van der Wiel, B. Z. et al. Restoring nutrient circularity in a nutrient- saturated area in Germany requires systemic change. Nutr. Cycl. Agroecosystems 121, 209–226 (2021).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Autoren, Zitierung und Kontakt

Autoren: Mitglieder des Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition

Tom Bruulsema (Plant Nutrition Canada), Ismail Cakmak (Sabanci University, Turkey), Achim Dobermann (International Fertilizer Association, France), Bruno Gerard (UM6P, Morocco), Kaushik Majumdar (African Plant Nutrition Institute, Morocco), Michael McLaughlin (University of Adelaide, Australia), Pytrik Reidsma (Wageningen University & Research, The Netherlands), Bernard Vanlauwe (International Institute of Tropical Agriculture, Kenya), Eva Wollenberg (CGIAR Climate Change, Agriculture & Food Security Program, USA), Fusuo Zhang (China Agricultural University, China), Xin Zhang (University of Maryland Center for Environmental Science, USA)

Danksagung: Wir danken Fernando Garcia, Raul Jaramillo, Luis Prochnow und Eros Francisco für ihre Beiträge zu den 4R-Ergebnissen in Lateinamerika sowie den Mitgliedern von Fertilizer Canada, The Fertilizer Institute und der International Fertilizer Association für ihre Überprüfungs Kommentare.

Zitierung: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. 2021. Furthering 4R Nutrient Stewardship. Issue Brief 03. Herunterzuladen von <https://sprpn.org>.

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