

RESILIENTE DÜNGERVERSORGUNG



© CC0 (Craig Cooper/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Mineralische Stickstoff-, Phosphor- und Kalidünger sind Segen und Fluch zugleich. Sie steigern die landwirtschaftliche Produktivität, verursachen aber gleichzeitig Klima- und Umweltprobleme und machen die Ernährungssicherung von wenigen Ländern und fossilen Energieträgern abhängig. Für eine resiliente, dekarbonisierte und nachhaltige Nährstoffversorgung ist die Erforschung und Anwendung alternativer Ansätze und Technologien notwendig. Beispiele hierfür sind die Entwicklung neuer Verfahren zur Stickstoffproduktion, die Nutzung sekundärer Phosphorquellen, insbesondere Klärschlamm, und von Polyhalit als Ersatz für chloridhaltige Kalisalze, aber auch die Züchtung neuer Pflanzensorten, die Nährstoffe aus dem Boden mobilisieren können, der Einsatz von Pflanzenkohle und die effiziente Nährstoffdüngung durch KI und Precision Agriculture. Die kohärente Zusammenführung der verschiedenen Ansätze erfordert eine kontextspezifische Bewertung der für Österreich geeigneten Technologien und Maßnahmen zur Nährstoffversorgung und die Entwicklung einer nationalen Strategie für eine resiliente, klimaneutrale und effiziente Nährstoffversorgung.

*Technologiek Bewertung
und Entwicklung
einer nationalen
Nährstoffstrategie
für eine resiliente,
klimaneutrale und
effiziente
Düngerversorgung
in Österreich*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Mineraldünger mit den für das Pflanzenwachstum wichtigen Nährstoffen Stickstoff, Phosphor und Kalium haben in der Landwirtschaft zu erheblichen Ertragssteigerungen geführt. Produktion und Anwendung von Mineraldüngern sind jedoch nicht nachhaltig. Stickstoff wird großindustriell durch chemische Synthese von Ammoniak aus atmosphärischem Stickstoff und Wasserstoff nach dem Haber-Bosch-Verfahren gewonnen. Die Ammoniaksynthese erfolgt an einem eisenhaltigen Katalysator bei etwa 150 bis 350 bar und 400 bis 500 °C und verursacht etwa 5 % der globalen Treibhausgasemissionen (Gao & Cabrera Serrenho, 2023).

Phosphor und Kalium sind räumlich und mengenmäßig begrenzt, da sie mineralisch gebunden in Lagerstätten vorkommen (v. a. Apatit und Sylvit). Phosphor steht seit 2017 auf der EU-Liste der kritischen Ressourcen¹, da die Versorgung von wenigen Förderländern wie Nordafrika, Jordanien, Russland und China, und deren geopolitischer Stabilität abhängt. Der Abbau von Phosphor ist ökologisch problematisch und die Mineralien enthalten gesundheitsgefährdende Metalle und radioaktive Substanzen wie Cadmium oder Uran (Issaoui et al., 2021). Diese schränken den Einsatz als Düngemittel zunehmend ein. Auch der Einsatz von Mineraldünger führt zu Umweltproblemen. Bei der derzeitigen landwirtschaftlichen Praxis werden nur 14 % des Stickstoffs und 16 % des Phosphors von den Pflanzen genutzt (Daneshgar et al., 2018). Der Großteil der Nährstoffe geht verloren und führt zu Luft-, Boden- und Wasserverschmutzung, Klimawirkungen durch Ammoniak- und Lachgasemissionen und Biodiversitätsverlust. Vor allem in Regionen mit viel Vieh wird durch den hohen Anfall von Wirtschaftsdüngern häufig mehr Stickstoff auf die Flächen ausgebracht, als die Kulturpflanzen aufnehmen können. Überdüngung wirkt sich auch auf die Gesundheit aus, da hohe Stickstoffgehalte in Blatt- und Wurzelgemüse bei der Verdauung in Nitrit umgewandelt werden können, das für die Gesundheit schädlich ist.² Mit der „Farm to Fork Strategy“ will die EU-Kommission das Nährstoffmanagement verbessern und bis 2030 den Mineraldüngereinsatz um 20 % und die Nährstoffverluste um 50 % reduzieren.³ Selbst in den ambitioniertesten Szenarien zeigen neuere Studien, dass diese Ziele lediglich von 4 bis 5 Ländern erreicht werden können, Österreich gehört nicht dazu (Batoool et al., 2025).

Der Einsatz von Mineraldüngern hat auch eine sozioökonomische Dimension. Denn Versorgungsgapse und Preissteigerungen bei Mineraldüngern, insbesondere aufgrund höherer Energiekosten, wirken sich auf die Verbraucherpreise für Nahrungsmittel aus. Vor dem Hintergrund der ökonomischen, ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen der Mineraldüngerproduktion und -anwendung sowie begrenzter Substitutionsmöglichkeiten ist die Transformation der Nährstoffversorgung in ein effizientes Kreislaufsystem für die Entwicklung nachhaltiger Wertschöpfungsketten unabdingbar. Dazu bedarf es einer langfristigen Konzeption der Nährstoffpolitik und einer nationalen Nährstoffstrategie, die ver-

Mineraldünger-versorgung ist weder resilient noch nachhaltig

Dekarbonisierung und Transformation der Nährstoffversorgung ist für die landwirtschaftliche Produktion unerlässlich

Nährstoffverluste durch Düngung belasten Luft, Boden und Wasser und gefährden Klima und Biodiversität.

EU Strategie „Farm to Fork“ reduziert Düngereinsatz um 20 %

Preissteigerungen bei Düngemitteln verteuern Nahrungsmittel

Effizientes Kreislaufsystem notwendig

¹ eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474.

² landeszentrum-bw.de/Lde/Startseite/wissen/nitrat-im-gemuese-wirklich-so-bedenklich.

³ food.ec.europa.eu/document/download/472acca8-7f7b-4171-98b0-ed76720d68d3_en?filename=f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf.

schiedene politische Ziele, Technologien und Strategien von der Düngemittelproduktion über die Anwendung bis hin zum Nährstoffrecycling umfasst.

Der Abbau von Polyhalit, einem Mineral, das Kaliumchlorid, Kalzium, Schwefel und Magnesium enthält, kann helfen, die Versorgung mit Kalidüngemitteln zu verbessern. Abbau und Nutzung sind aufgrund der mineralischen Zusammensetzung, der schwer erreichbaren Lage (200 bis 1.000 m unter der Erde) und des relativ geringen Reinheitsgrades schwierig und begrenzt (Tan et al., 2022). In einem Naturpark in North Yorkshire, Großbritannien, plant Sirius Minerals den weltweit größten Abbau von hochwertigem Polyhalit und hat dafür das österreichische Bauunternehmen STRABAG beauftragt.⁴ Polyhalit kann als chloridärmer Kalidünger vermarktet werden, ist aber aufgrund des geringeren Kaliumgehalts kein vollständiger Ersatz für Kalidünger.

Alternativ wird an der Verbesserung der Aufnahme von Kalium und Phosphor aus dem Bodenvorrat geforscht, da die in der Regel großen Bodenvorräte überwiegend nicht pflanzenverfügbar sind. Durch die Züchtung von Genotypen kann die Freisetzung organischer Säuren aus Pflanzenwurzeln erhöht und damit die Verfügbarkeit von im Boden gebundenem Phosphor und Kalium verbessert werden⁵ (Zörb et al., 2014). Mikroben wie das stickstofffixierende Bakterium *Pseudomonas chlororaphis*, die gebundenen Phosphor für Pflanzen bioverfügbar machen, sind ebenfalls Gegenstand der Forschung. Die Mikroben sind jedoch aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Stressfaktoren wie Temperatur und Feuchtigkeit schwierig zu produzieren und zu transportieren, was eine großflächige Einführung in der Landwirtschaft erschwert (Burke et al., 2023).

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, *Phosphor aus Klärschlamm zu recyceln*. In Österreich fielen im Jahr 2018 rund 237.000 Tonnen (t) Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen an, wovon der Großteil (53 %) thermisch behandelt wurde. Etwa 20 % dieses Klärschlamm wurde direkt auf landwirtschaftlich genutzte Flächen aufgebracht und ca. 27 % einer weiteren Behandlung (z. B. Kompostierung) zugeführt. Durch die Nutzung von Phosphor aus kommunalem Klärschlamm (6.700 t/a) und tierischen Abfällen (5.500 t/a) könnten theoretisch 75 % der Mineraldüngerimporte substituiert werden (Leonhardt & Pinkl, 2020). Durch die thermochemische Behandlung kann der Phosphorgehalt im Klärschlamm auf unter 2 % reduziert und als Produkt z. B. Struvit gewonnen werden, das zur Herstellung von Phosphordünger geeignet ist (Clemens & Teloo, 2020). Die Verfahren sind jedoch weder großtechnisch etabliert noch konkurrenzfähig (Leonhardt & Pinkl, 2020). Zudem erfordern Rezyklate wie Struvit eine professionelle Vermarktung, die aufgrund der vergleichsweise geringen Düngemittelmengen nicht wirtschaftlich ist (Clemens & Teloo, 2020). Instrumente zur Förderung des Recyclings sind z. B. Recyclingquoten für die Düngemittelindustrie oder Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung für Kläranlagen, so wie sie in Deutschland ab 2029 für Kläranlagen mit mehr als 50.000 Einwohnern verpflichtend sind (Kind, 2020). Ähnliche rechtliche Rahmenbedingungen und Anreize für ein effizientes Recycling sind auch in Österreich angedacht.

*Hoffnungsträger
Polyhalit als Ersatz
für Kalidünger*

*Forschung
zur verbesserten
Pflanzenaufnahme von
Kalium und Phosphor*

*Phosphorrecycling
aus Klärschlamm hat
großes Potenzial*

⁴ strabag.com/databases/internet/_public/content.nsf/web/861E4C21EBCAF2C1C125825F002C32A1.

⁵ d-nb.info/964804751/34.

Bei der Stickstoffproduktion kann das energieintensive Haber-Bosch-Verfahren zur Synthese von Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff durch technische Modifikationen zur Nutzung von grünem Wasserstoff und erneuerbarem Strom überwiegend klimaneutral gestaltet werden. Dies zeigt die erste kommerzielle Anlage zur Herstellung von grünem Ammoniak in Puertollano (Spanien).⁶ Alternative Ansätze sind Power-to-Ammonia-Prozesse, die mit neuen Katalysatoren bei deutlich niedrigeren Temperaturen und Drücken sowie mit neuen Strategien zur Wärmeintegration als Dampfersatz arbeiten. Sie ermöglichen flexible und dezentrale Ammoniakreaktoren und Energieeinsparungen von bis zu 50 % (Torrente-Murciano & Smith, 2023). Andere forschen an Katalysesystemen, die Licht als Energiequelle für die Ammoniakproduktion nutzen (Ashida et al., 2022). Allerdings sind Verfahren, bei denen Stickstoff mithilfe von Licht, Wasser und Molybdän-Katalysatoren bei Raumtemperatur erzeugt wird, noch weit von der industriellen Reife entfernt (Durrani, 2024).

*Erforschung
alternativer
Verfahren zur
Stickstofferzeugung*

In Ergänzung zu alternativen Verfahren zur Mineraldüngerherstellung kann die Resilienz der Düngerversorgung durch Effizienzsteigerungen in der landwirtschaftlichen Praxis erhöht werden. Die konventionelle Landwirtschaft arbeitet aufgrund der regionalen Konzentration der Tierhaltung teilweise mit hohen Stickstoff- und Phosphorüberschüssen. Diese können ohne Ertragseinbußen reduziert werden. Geeignete Ansätze zur Verbesserung der Nährstoffeffizienz sind Methoden zur Bestimmung der Nährstoffe in Wirtschaftsdüngern und Technologien zur Verbesserung der Ausbringungsverteilung. Precision-Farming-Technologien können die Effizienz des Düngereinsatzes weiter steigern.⁷ Mit Hilfe von KI und Daten, z. B. von Stickstoffsensoren und Satelliten, werden Düngerapplikationskarten erstellt und die Düngerausbringung gezielt angepasst. Der Einsatz von Precision Farming in der Landwirtschaft erfolgt trotz der Vorteile allerdings nur zögerlich.

*Verbesserung der
Nährstoffeffizienz
durch Precision
Farming*

Auch die im Rahmen der „Farm-to-Fork“-Strategie geplante Ausweitung des ökologischen Landbaus in der EU auf 25 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche kann einen Beitrag zur Erreichung einer resilienten Düngerversorgung leisten. Der Anteil der biologisch bewirtschafteten Fläche in Österreich liegt zwar bereits bei 27 %, ist aber noch ausbaufähig.⁸ In der biologischen Landwirtschaft werden organische Düngemittel eingesetzt und es wird weitgehend auf mineralische Düngemittel verzichtet. Die Nährstoffversorgung wird durch den Anbau von stickstoffsammelnden Leguminosen sichergestellt, die mit Hilfe von Knöllchenbakterien Luftstickstoff in den Boden einbringen. Auch Pflanzenkohle aus der pyrolytischen Verkohlung von pflanzlichen Reststoffen wird in Österreich als Nährstoffspeicher zur Steigerung der Düngeeffizienz und als Bestandteil von Terra Preta hergestellt und gilt als *Negativ-Emissionstechnologie*.⁹ Es bestehen jedoch Wissenslücken über die Wirkung von Pflanzenkohle.¹⁰

*Höherer Anteil an
Bioland verringert
Bedarf an
Mineraldünger durch
Nutzung organischer
Dünger und
Pflanzenkohle*

⁶ fertiberia.com/en/greenammonia/h2f-project/.

⁷ tab-beim-bundestag.de/projekte_digitalisierung-der-landwirtschaft.php.

⁸ landwissen.at/wp-content/uploads/2023/11/BML_Broschuere_Biologische_Landwirtschaft_231108_BF.pdf.

⁹ parlament.gv.at/dokument/XXV/AB/8575/imfname_538434.pdf.

¹⁰ bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/faktenblatt-pflanzenkohle-2022.pdf.download.pdf/D_Faktenblatt_Pflanzenkohle.pdf.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Die Regulierung von Pflanzennährstoffen ist in europäischen und nationalen Rechtsbereichen verankert. Trotz ihrer zentralen Bedeutung für die Landwirtschaft und Ernährungssicherung ist eine nachhaltige Bereitstellung und Nutzung von Düngemitteln jedoch nicht gewährleistet. Es fehlt an einem Bewusstsein in Politik und Öffentlichkeit für dieses hochrelevante Thema und an einer kohärenten Strategie zum Düngemanagement (Brownlie et al., 2021) sowie an ökonomischen Instrumenten, um die Governance-Defizite des Ordnungsrechts auszugleichen (Garske et al., 2020). Um die Investitionsanreize und die Marktreife einzelner Technologien zu erhöhen und Skaleneffekte zu nutzen, bedarf es einer klugen Förderpolitik. Zudem ist zu prüfen, ob durch die Verfahren und Techniken ein Mehrwert für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen erzielt werden kann. In diesem Zusammenhang sind auch die Anforderungen aus der Praxis zu berücksichtigen. Es bedarf einer Analyse der ökonomischen, ökologischen und soziökonomischen Chancen und Herausforderungen einer Transformation der Düngemittelversorgung und -nutzung, z. B. durch KI und Precision Farming (Rösch, 2006) und deren Trade-offs für Landwirtschaft, Klima und Umwelt. Mit dieser Analyse wird die Wissensbasis geschaffen, um die komplexen Produktions- und Konsummuster nachhaltig zu verbessern und optimierte Strategien zu entwickeln, mit denen die Akzeptanz sowohl bei den Landwirten als auch bei den Verbrauchern erhöht werden kann (Kurniawati et al., 2023).

*Gesetzgebung
und Förderpolitik
für eine resiliente,
nachhaltige und
am Kreislaufprinzip
orientierten
Nährstoffversorgung
und
Ernährungssicherung*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Um für Österreich geeignete Strategien und Maßnahmen zur Reduktion des Düngereinsatzes um 20 % (Farm-to-Fork-Strategie) und für ein effizientes und klimaneutrales Nährstoffmanagement zu entwickeln, bedarf es einer umfassenden Analyse des Forschungs- und Wissensstandes sowie der rechtlichen Rahmenbedingungen. Dazu gehören die Schließung nationaler und regionaler Nährstoffkreisläufe und eine gesellschaftliche Diskussion über die Zukunft der Nährstoffbereitstellung und -nutzung. Voraussetzung ist die Schaffung einer aktuellen Wissensbasis, um die verschiedenen Technologien und Verfahren für eine resiliente und klimaneutrale Versorgung mit mineralischen und organischen Nährstoffen bewerten zu können. Dabei sollten ökonomische, ökologische und soziökonomische Aspekte sowie Chancen und Risiken entlang der Wertschöpfungskette berücksichtigt und Stakeholder und Bürger:innen integriert werden, um die Relevanz der Studie und den Transfer der Ergebnisse in die Praxis zu verbessern.

*Bewertung von
Technologien und
Verfahren als
Grundlage einer
österreichischen
Strategie für eine
resiliente und
klimaneutrale
Düngerversorgung*

ZITIERTE LITERATUR

- Ashida, Y., et al 2022. „Catalytic Nitrogen Fixation Using Visible Light Energy“. *Nature Communications* 13(1):7263. doi.org/10.1038/s41467-022-34984-1.
- Brownlie, W. J., et al. 2021. „Global Actions for a Sustainable Phosphorus Future“. *Nature Food* 2(2):71–74. doi.org/10.1038/s43016-021-00232-w.
- Burke, B., et al. 2023. „Self-Assembled Nanocoatings Protect Microbial Fertilizers for Climate-Resilient Agriculture“. *JACS Au* 3(11):2973–80. doi.org/10.1021/jacsau.3c00426.
- Clemens, J., und Teloo. 2020. „Anforderungen an Phosphorzyklate aus der Aufbereitung von Klärschlamm aus Sicht eines Düngemittelherstellers“.
- Daneshgar, S., Callegari, A., Capodaglio, A. und Vaccari, D.. 2018. „The Potential Phosphorus Crisis: Resource Conservation and Possible Escape Technologies: A Review“. *Resources* 7(2):37. doi.org/10.3390/resources7020037.
- Durrani, J. 2024. Ammoniakproduktion „Jenseits von „Haber-Bosch“. *Spektrum der Wissenschaft*, (2.24), pp. 66–72.
- Gao, Y. und A. Cabrera Serrenho. 2023. „Greenhouse Gas Emissions from Nitrogen Fertilizers Could Be Reduced by up to One-Fifth of Current Levels by 2050 with Combined Interventions“. *Nature Food* 4(2):170–78. doi.org/10.1038/s43016-023-00698-w.
- Garske, B., et al. 2020. „Sustainable Phosphorus Management in European Agricultural and Environmental Law“. *Review of European, Comparative & International Environmental Law* 29(1):107–17. doi.org/10.1111/reel.12318.
- Issaoui, R., et al. 2021. „Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Beneficiated Phosphate Rock Production in Tunisia“. *Sustainability Management Forum | NachhaltigkeitsManagementForum* 29(2):107–18. doi.org/10.1007/s00550-021-00522-8.
- Kind, S. 2020. *Nachhaltige Phosphorversorgung*. doi.org/10.5445/IR/1000133950.
- Kurniawati, A., et al. 2023. „Understanding the Future of Bio-Based Fertilisers: The EU's Policy and Implementation“. *Sustainable Chemistry for Climate Action* 3:100033. doi.org/10.1016/j.scca.2023.100033.
- Leonhardt, C., und J. Pinkl. 2020. Strategieprozess Zukunft Pflanzenbau Herausforderungen. Wien.
- Rösch, C. 2006. „Precision Agriculture – Landwirtschaft per Satellit und Sensor“ ISBN: 978-3-86641-080-0. KITOpen-ID: 1000103648
- Tan, H., et al. 2022. „Toward the Replacement of Conventional Fertilizer with Polyhalite in Eastern China to Improve Peanut Growth and Soil Quality“. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 9(1):94. doi.org/10.1186/s40538-022-00363-7.
- Torrente-Murciano, L., und C. Smith. 2023. „Process Challenges of Green Ammonia Production“. *Nature Synthesis* 2(7):587–88. doi.org/10.1038/s44160-023-00339-x.
- Zörb, C. et al. 2014. „Potassium in Agriculture – Status and Perspectives“. *Journal of Plant Physiology* 171(9):656–69. doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008.