



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

## PFLANZENNÄHRSTOFFE SIND UNERLÄSSLICH UM CHRONISCHEN UND VERBORGENEN HUNGER ZU LINDERN

Issue Brief 05, Oktober 2023

### SCHLÜSSELPUNKTE

Die meisten der für die menschliche Ernährung bedeutsamen Mineralstoffe, essentiellen Aminosäuren, Vitamine und Antioxidantien, Kohlenhydrate, Proteine und Fette werden direkt oder indirekt durch den Konsum von pflanzlichen oder tierischen Nahrungsmitteln aufgenommen (Abb. 1). Die Ernährung der Menschheit hängt daher davon ab, in weit landwirtschaftlich genutzte Pflanzen mit allen Nährstoffen versorgt werden, die sowohl ein optimales Wachstum fördern als auch Lebensmittel von geeigneter Qualität für die menschliche Gesundheit erzeugen.

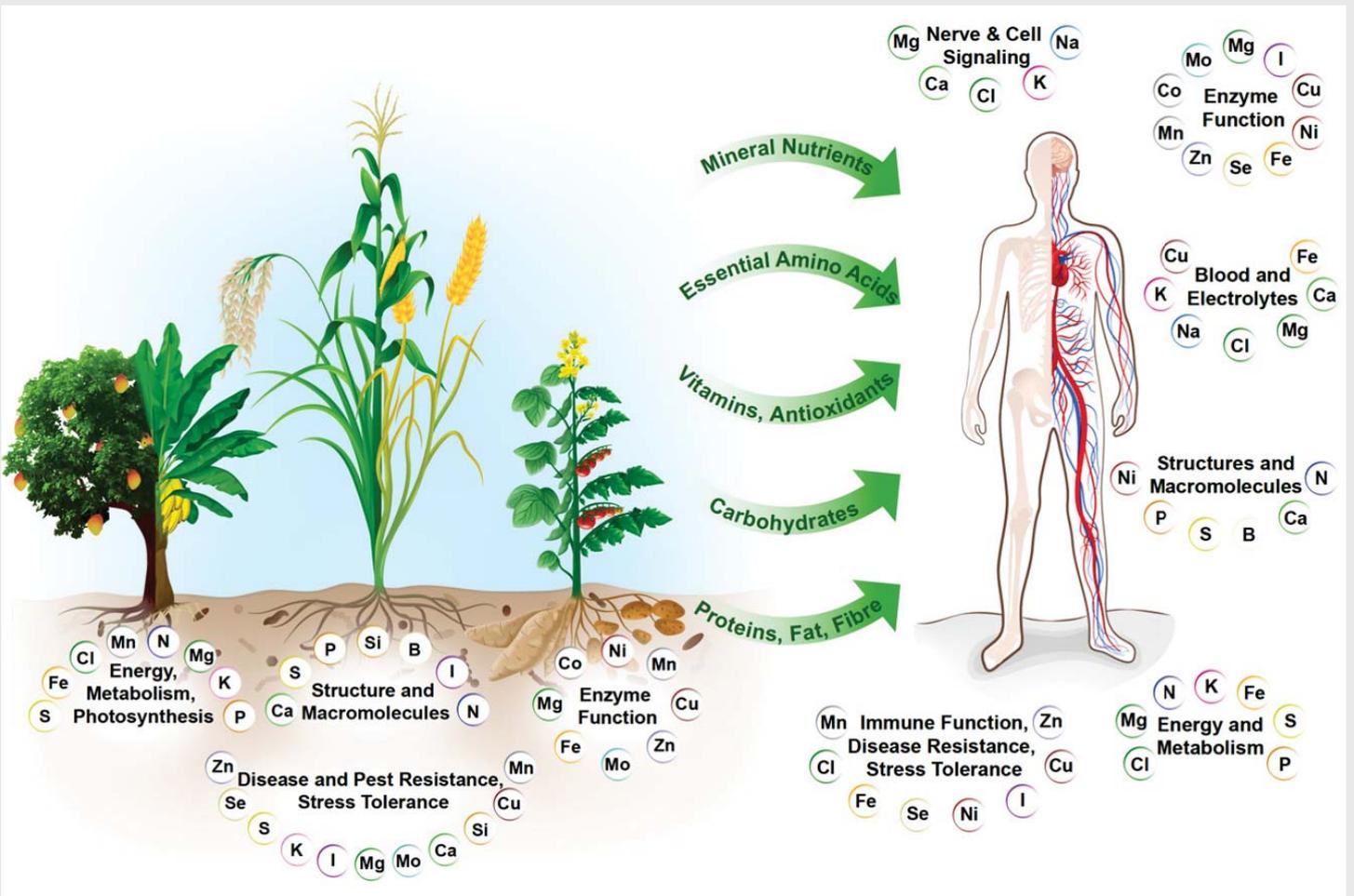


Abbildung 1. Neunzehn Mineralstoffe (plus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff) sind für ein optimales Pflanzenwachstum erforderlich und unterstützen die ernährungsphysiologische Qualität der für den menschlichen Verzehr geernteten Lebensmittel (1, 2).

Mineralstoffe spielen somit eine Doppelrolle für die Pflanzenernährung und die menschliche Gesundheit, was auch in der Düngenanwendung berücksichtigt werden muß. Getreide ist die wichtigste Nährstoffquelle für den größten Teil der Weltbevölkerung. Daher hat die Verbesserung der Getreideproduktivität und Nährstoffbioverfügbarkeit durch Züchtung und Versorgung mit Pflanzennährstoffen besonders großes Potenzial, Hunger und Mangelernährung zu lindern. Früchte, Nüsse, Gemüse, Ölpflanzen, Hülsenfrüchte und Wurzel- und Knollengemüse sorgen für eine vielfältige Ernährung und sind hervorragende Nährstoffquellen. Ihr Verzehr erhöht oft auch die Bioverfügbarkeit von Getreidenährstoffen.

## EINLEITUNG

Fast 10% der Weltbevölkerung leiden unter chronischem Hunger, dem anhaltenden Unvermögen, genug Nahrung zum Essen zu bekommen. Gleichzeitig sind 25% von verborgenem Hunger betroffen, der durch einen Mangel an spezifischen Mineralien oder Vitaminen in der Ernährung verursacht wird (3, 4). Für etwa drei Milliarden Menschen sind nahrhafte und gesunde Ernährungsgewohnheiten unerreichbar (4, 5). Trotz der enormen Anstrengungen in den letzten fünf Jahrzehnten, halten chronischer und verborgener Hunger immer noch an und nehmen teilweise sogar zu (6, 7). Ein Grund für diesen Trend ist der niedrige Nährstoffstatus eines großen Teils der landwirtschaftlich genutzten Böden der Welt. Diese Mängel sind das Ergebnis schlechter landwirtschaftlicher Praktiken, des anhaltenden Entzuges von Nährstoffen in geernteten Nutzpflanzen, oder schlechter Böden. Eine unzureichende oder unausgewogene Pflanzenernährung führt zu geringeren Erträgen und beeinträchtigt den Nährwert und die Qualität der erzeugten Lebensmittel (8, 9).

Ein weiterer Grund, warum chronischer und verborgener Hunger auf globaler Ebene anhält, ist mangelndes Bewusstsein. Lebensmittelsysteme konzentrieren sich nicht ausreichend auf die Gesundheit der Verbraucher, die Produktion und Verteilung von Lebensmitteln ist ungerecht und viel Essen geht verloren oder wird verschwendet (10). Ein Mangel an Ernährungsvielfalt, eine hohe Abhängigkeit von wenigen Grundnahrungsmitteln und ein schlechter Zugang zu nährstoffreichen pflanzlichen und tierischen Lebensmitteln beeinflussen aber auch die menschliche Gesundheit in vielen Ländern. Zur Linderung des menschlichen Hungers sind kosteneffiziente Methoden erforderlich, die an die lokalen Pflanzennährstoffbedürfnisse angepasst sind. Wirtschafts- und Regulierungspolitik muss Märkte erleichtern und die Umsetzung geeigneter agronomischer und didaktischer Praktiken zur effizienten und sicheren Nutzung von Pflanzennährstoffen unterstützen.

Aufgrund der lokalen und globalen Herausforderungen besteht ein dringender Bedarf i) das Bewusstsein und Wissen darüber zu erweitern, wie Pflanzenernährung und menschliche Ernährung voneinander abhängen, und ii) umweltfreundliche und wirtschaftlich nachhaltige Praktiken zu entwickeln, um die benötigten Mineralstoffe zur Unterstützung der menschlichen Gesundheit bereitzustellen. Hier erklären wir, wie verantwortungsbewusste Pflanzenernährung dazu beitragen kann, chronischen und verborgenen Hunger zu mildern und somit das zweite Nachhaltigkeitsziel der Vereinten Nationen zu erreichen, nämlich 'Hunger zu beenden, die Ernährungssicherheit und verbesserte Ernährung zu gewährleisten und nachhaltige Landwirtschaft zu fördern'.

**Verantwortungsbewusste Pflanzenernährung (11) zielt darauf ab:**

- das Einkommen, die Produktivität, Nährstoffeffizienz und Resilienz der Landwirtschaft zu verbessern.
- die menschliche Gesundheit durch ernährungssensible Landwirtschaft zu verbessern.
- die Bodengesundheit zu erhalten und zu verbessern.
- Nährstoffrückgewinnung und -recycling aus Abfall zu steigern.
- Treibhausgasemissionen, Nährstoffverschmutzung und den Verlust an Biodiversität zu minimieren.

## WAS SIND DIE PROBLEME?

**PROBLEM 1: PFLANZENNÄHRSTOFFE HABEN MILLIARDEN MENSCHEN VOR DEM VERHUNGERN GERETTET, JEDOCH BLEIBT CHRONISCHER HUNGER WEIT VERBREITET.**

Menschen leiden unter chronischem Hunger wenn sie regelmäßig nicht genug Nahrung zu Essen bekommen können. Während extreme Unterernährung in den letzten Jahrzehnten durch erhöhte Nahrungsmittelproduktion stark reduziert werden konnte, ist der weltweite Anteil von Unterernährten von etwa 8% im Jahr 2019 auf über 9% gestiegen und besonders hoch in Subsahara-Afrika (Abb. 2). Die Zahl der Menschen, die an chronischem Hunger leiden, lag 2022 zwischen 691 und 783 Millionen, was einer Zunahme von 122 Millionen seit dem Ausbruch der COVID-19-Pandemie entsprach (4). Mehr als eine Viertel Milliarde Menschen sind dabei akutem Hunger ausgesetzt.

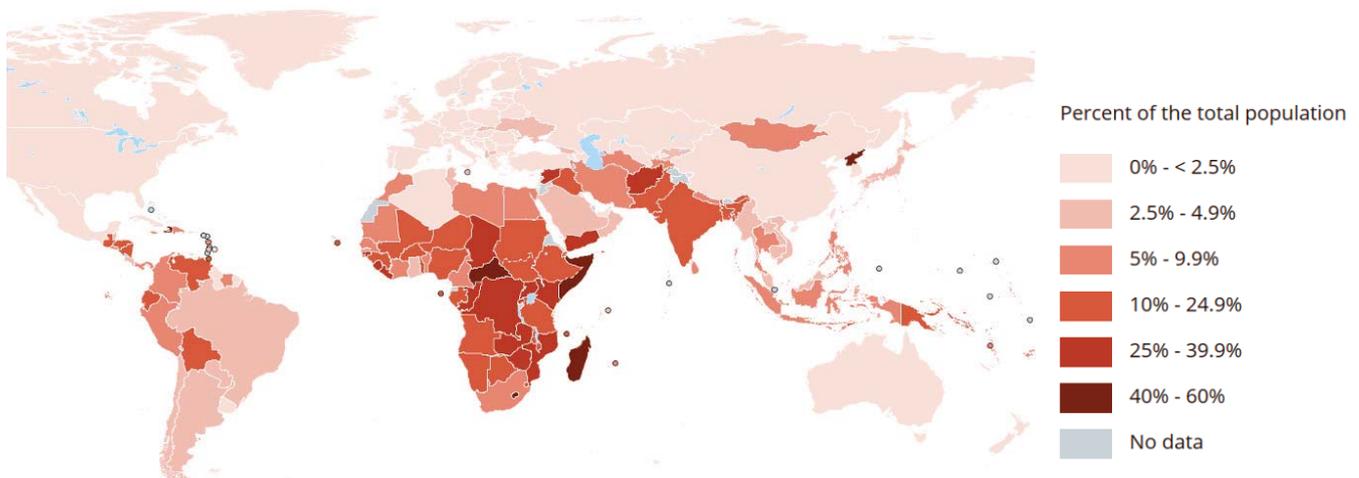


Abbildung 2. Weltweite Verbreitung von Unterernährung. Durchschnitt 2020-2022 (4).

Die zentrale Rolle, welche die Pflanzenernährung für die menschliche Ernährung und die wirtschaftliche Entwicklung spielt, wird durch die enge Beziehung zwischen Produktivitätssteigerungen bei Nutzpflanzen und Düngemittelverbrauch (12) veranschaulicht. Mineraldünger, insbesondere Stickstoff (N), Kalium (K) und Phosphor (P), haben die Erträge in weiten Teilen der Welt gesteigert. Während die von Mineraldüngern bereitgestellten Pflanzennährstoffe mittlerweile etwa die Hälfte der Weltbevölkerung ernähren (13, 14), bestehen immer noch enorme regionale Unterschiede (11).

Besonders besorgniserregend ist die Situation in Afrika, wo chronischer Hunger und Mangelernährung in großem Maße anhalten weil der Zugang zu und die Nutzung von Düngemitteln stark eingeschränkt sind (15). Die durchschnittliche Düngemittelanwendung in Ost-, Zentral- und Westafrika liegen meist noch unter 20 kg NPK/ha, obwohl in den letzten Jahren ermutigende Aufwärtstrends in Äthiopien, Kenia, Tansania, Malawi, Sambia, Ghana, Nigeria und Mali zu

verzeichnen waren (16). In ganz Afrika stehen zuverlässige Daten zur regionalen Nährstoffnutzung nur für N, P und K zur Verfügung; über die restlichen Pflanzennährstoffe ist wenig bekannt. Jedoch weiß man, dass Mangelerscheinungen bei Mikronährstoffen in Böden, Nutzpflanzen und Menschen in vielen afrikanischen Ländern häufig vorkommen (16–18).

Unzureichende Pflanzennährstoffversorgung führt zu Ertragseinbußen, geringer Produktivität und Unterernährung (19). Pflanzennährstoffmängel zählen zu den kritischsten Ertragsproblemen in Subsahara-Afrika und anderen ressourcenarmen Regionen (20, 21). Kalorien, Proteine und Mineralien werden als Nutzpflanzenprodukte aus Ackerböden und Weiden exportiert, um Menschen und Tiere zu ernähren. Wenn die exportierten Nährstoffe jedoch nicht ersetzt werden, nimmt die Produktivität von Nutzpflanzen und Weiden und damit die Qualität der Lebensmittel unweigerlich ab. So gibt es in Subsahara-Afrika seit über 30 Jahren weit verbreitete negative Nährstoffbilanzen - insbesondere für N, P und K - bei denen die Nährstoffausträge die Nährstoffeinträge übersteigen (22, 23). Eine neuere Analyse der Stickstoffbilanzen in 52 afrikanischen Ländern zeigte, dass kaum Fortschritte erzielt wurden (24). Die anhaltenden negativen Nährstoffbilanzen wirken sich weitreichend auf die Produktivität aus, variieren aber regional stark.. Die Auswirkungen sind jedoch am kritischsten in marginalen landwirtschaftlichen Gebieten mit geringer natürlicher Bodenfruchtbarkeit und wenigen Ressourcen zur Wiederherstellung der exportierten Nährstoffe mit anorganischen oder organischen Düngemitteln.

Die Nahrungsmittelkrise 2021 in Sri Lanka ist ein drastisches Beispiel dafür, wie eine verantwortungsvolle Pflanzenernährung die Ernährungssicherheit untermauert. Im Mai 2021 verbot die Regierung von Sri Lanka den Import von anorganischen Düngemitteln und Agrochemikalien mit dem Ziel, die Landwirtschaft in Sri Lanka strikt biologisch zu gestalten. Die Verfügbarkeit organischer Düngemittel auf nationaler Ebene war jedoch unzureichend und konnte die Nährstoffe nicht ersetzen, die durch Mineraldünger geliefert wurden. Sofort gingen die Erträge von Grundnahrungsmitteln wie Reis, Mais und Gemüse um 20-60% zurück. Obwohl das Düngemittelverbot im November 2021 aufgehoben wurde und der Düngemittelverbrauch allmählich auf das Niveau vor dem Verbot anstieg, wird die Getreideproduktion 2023 voraussichtlich immer noch 14% niedriger sein als der letzte vorherige Fünfjahresdurchschnitt (25). Diese unbeabsichtigten Rückgänge in der Nutzpflanzenproduktion aufgrund des Mangels an Nährstoffeinträgen unterstreichen erneut, dass die Lebensmittelproduktion stark auf den ausgeglichenen Einsatz von Pflanzennährstoffen angewiesen ist, unabhängig von der Art des verwendeten Düngemittels.

**PROBLEM 2: VERBORGENER HUNGER AUFGRUND DER UNZUREICHENDEN VERSORGUNG MIT MINERALISCHEN MIKRONÄHRSTOFFEN UND VITAMINEN IN LEBENSMITTELN IST EIN GLOBALES PROBLEM.**

Verborgener Hunger bezeichnet den Mangel an Vitaminen oder mineralischen Mikronährstoffen, die für die menschliche Gesundheit unerlässlich sind, einschließlich der körperlichen Entwicklung, Funktionen des Gehirns, der Schilddrüse und des Immunsystems (Abb.1). In vielen Fällen kann es zu verborgenem Hunger durch den Verzehr einer energiereichen, aber nährstoffarmen Diät kommen (26). Solche Diäten führen zur Aufnahme ausreichender Mengen an Energie in Form von Kalorien, jedoch nicht der benötigten Nährstoffe. Mehr als 2 Milliarden Menschen weltweit sind von verschiedenen Formen von verborgenem Hungers betroffen, insbesondere in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen, wo die Ernährung wenig abwechslungsreich ist und die Auswahlmöglichkeiten aufgrund von Armut eingeschränkt sind (27). Verborgener Hunger ist am weitesten verbreitet auf dem afrikanischen Kontinent und in Südasien, wobei Kinder und Frauen im gebärfähigen Alter am stärksten gefährdet sind (7, 28).

Sieben Minerale – Eisen (Fe), Zink (Zn), Kupfer (Cu), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Selen (Se) und Jod (I) – sowie mehrere Vitamine fehlen oft in der menschlichen Ernährung. Die häufigsten Mängel sind auf den Mangel an Fe, Zn, Vitamin A und Vitamin B9 (Folsäure) zurückzuführen (29), von denen alleine oder in Kombination 30 - 90% aller Vorschulkinder oder nicht schwangeren Frauen weltweit betroffen sind (Abb. 3). Insgesamt haben die Hälfte aller Vorschulkinder und zwei Drittel aller nicht schwangeren Frauen im gebärfähigen Alter weltweit Mängel an Fe, Zn oder I (7). Ein weit verbreiteter Zn-Mangel in der Bevölkerung, insbesondere in Süd- und Südostasien, ist auch mit der hohen Inzidenz und Schwere von Kinderkrankheiten verbunden (28).

Die globale Herausforderung des verborgenen Hungers ist riesig, beschränkt sich aber nicht nur auf Entwicklungsländer. Mikronährstoffmängel sind auch in Ländern mit hohem Einkommen ein großes Problem. 50% der Frauen in Großbritannien und 33% der Frauen in den USA leiden jeweils an mindestens einem Mikronährstoffmangel (7). Eine zu geringe Nahrungsaufnahme mehrerer Mikronährstoffe, insbesondere Fe, Zn und I, wird zunehmend für europäische Bevölkerungsgruppen gemeldet (30, 31). Übliche Diäten, die von älteren Menschen in Europa konsumiert werden, sind an Mikronährstoffen unzureichend, während ein hoher Alkoholkonsum deren Aufnahme im Darm beeinträchtigt und somit Mikronährstoffmängel verschlimmert. Veganer und Vegetarier sind ebenfalls stark gefährdet, weniger Mineralstoffe zu sich zu nehmen (31).

Weltweit hat das Risiko, Zn- und Vitamin-A-Mängel zu entwickeln, in den letzten drei Jahrzehnten abgenommen, während das Risiko einen Fe-Mangel zu entwickeln relativ hoch geblieben ist (Abb. 4). In Indien und der Türkei ist der Rückgang der Prävalenz von Zn-Mangel zumindest teilweise auf erhöhte Zn-Düngungsmaßnahmen zurückzuführen (32, 33).

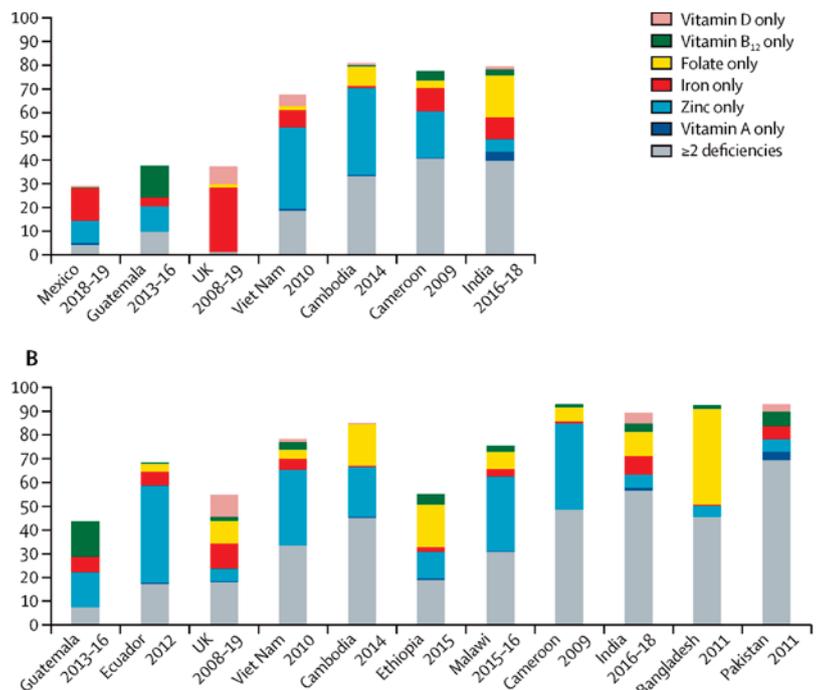
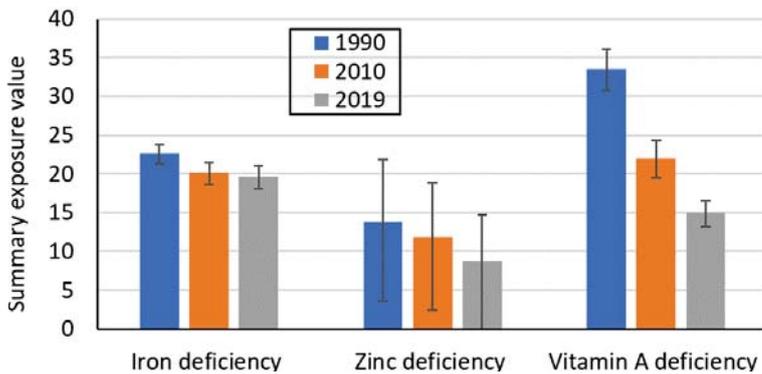


Abbildung 3. Anteil von zwei oder mehr Mikronährstoffmängeln in % bei A) schulpflichtigen Kindern von 5-59 Monaten und B) nicht schwangeren Frauen im Alter von 15-49 Jahren (7).



**Abbildung 4.** Globale altersstandardisierte Zusammenfassung der Expositionswerte (SEV) für den Mangel an Eisen, Zink und Vitamin A im Jahr 1990, 2010 und 2019. Fehlerbalken stellen 95 % Konfidenzintervalle

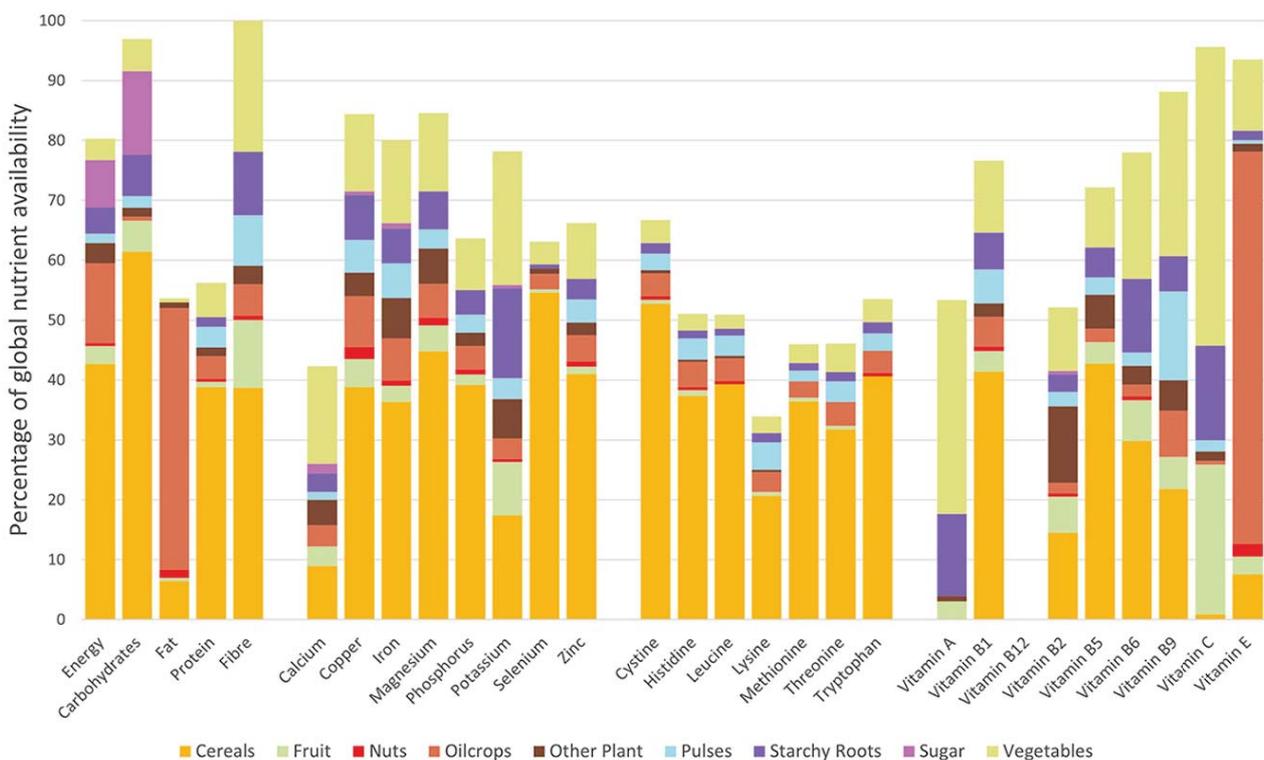
Ein weiterer essentieller Mikronährstoff, der manchmal nicht in ausreichender Menge mit der Nahrung aufgenommen wird, ist Selen (Se), welches wichtige Rollen in der Schilddrüsenfunktion, der kognitiven Entwicklung und als entzündungshemmende Komponente spielt (35, 36). Bis zu 0,5 - 1 Milliarde Menschen weltweit könnten an einer unzureichenden Se-Zufuhr leiden, einschließlich Bevölkerungsgruppen in West- und Nordeuropa, Ostsibirien und Zentralsibirien, Neuseeland und Teilen Chinas (37, 38). Ein schwerer Se-Mangel verursacht endemische menschliche Krankheiten wie die Keshan-Krankheit (eine Kardiomyopathie) und die Kaschin-Beck-Krankheit (eine Osteoarthropathie). Während die Keshan-Krankheit durch die Einnahme von Se-Tabletten beseitigt wurde, tritt die Kaschin-Beck-Krankheit noch in einigen Gebieten der Sichuan-Tibet-Region Chinas und im Südosten Sibiriens auf (39). Ein Mangel an Se wurde auch in vielen Ländern Afrikas diagnostiziert (40-42). Se-Mangel aufgrund einer unzureichenden Nahrungsaufnahme wird durch niedrige Konzentrationen von pflanzenverfügbarem Se in einigen landwirtschaftlichen Böden

verursacht. Hurst et al. (42) fanden einen sehr starken Zusammenhang zwischen der Se-Verfügbarkeit im Boden und der täglichen Se-Aufnahme durch die Nahrung. Die niedrigste tägliche Nahrungsaufnahme wurde in Dörfern gefunden, in denen die Böden sauer waren, während Menschen in Dörfern mit hohen pH-Werten des Bodens die höchste tägliche Se-Dosis zu sich nahmen. Die chemische Verfügbarkeit und Resorption von Se ist in sauren Böden extrem niedrig, während sie in Böden mit hohem pH-Wert sehr hoch ist.

Trotz des weltweiten Gebrauchs von jodiertem Salz bleibt auch Jodmangel weit verbreitet. Jodmangel wirkt sich hauptsächlich auf die Schilddrüsen- und Gehirnfunktion sowie die geistige Entwicklung aus (43). Es wird geschätzt, dass rund 2 Milliarden Menschen, insbesondere in westlichen Ländern, gefährdet sind (44, 45). Es gibt auch zunehmende Belege für eine ernährungsphysiologische Rolle von Jod in Pflanzen (46).

### PROBLEM 3: GERINGER NÄHRSTOFFGEHALT IN PFLANZEN UND MANGEL AN VIELFÄLTIGEN ERNÄHRUNGSSYSTEMEN SIND DIE HAUPTURSACHEN FÜR VERBORGENEN HUNGER.

Pflanzen sind die wichtigsten Nahrungsquellen für Makro- und Mikronährstoffe, die der Mensch benötigt. Abbildung 5 veranschaulicht, dass pflanzliche Nahrungsmittel etwa 80 % der Kalorien, 56 % der Eiweiße, 50 - 95 % der Vitamine und 40 - 85 % der Mineralstoffe für die Ernährung der Weltbevölkerung beisteuern (47). Die verbleibenden menschlichen Ernährungsbedürfnisse werden durch tierische Produkte gedeckt, die ihrerseits von der Pflanzenproduktion abhängen. Die Werte in Abbildung 5 verbergen jedoch große Schwankungen innerhalb und zwischen den Ländern. Der relative Beitrag pflanzlicher Lebensmittel ist am höchsten in Ländern mit niedrigem Einkommen, in denen der Verzehr von Fleisch, Fisch, Eiern und Milchprodukten gering ist. Tierische Lebensmittel haben eine höhere Bioverfügbarkeit von Fe und Zn; daher sind in Regionen, in denen tierische Lebensmittel verzehrt werden, die relativen Beiträge pflanzlicher Lebensmittel zu bioverfügbarem Fe und Zn erheblich geringer als in Abbildung 5 dargestellt. Im Gegensatz dazu stellt in Regionen mit wenig oder gar keinem Verzehr von tierischen Lebensmitteln Getreide mit geringer Nährstoffdichte und Bioverfügbarkeit einen großen Prozentsatz von Fe und Zn bereit. Eine solche pflanzenbasierte Ernährung liefert jedoch kaum alle kritischen Nährstoffe, um grundlegende menschliche Bedürfnisse zu erfüllen.



**Abbildung 5.** Auswirkungen von Pflanzennahrung auf die Nahrungsenergie, Kohlenhydrate, Fett, Protein, Ballaststoffen, Mineralstoffen, Aminosäuren und Vitaminen. Diese Werte wurden mit dem DELTA-Modell® berechnet und auf Abfall und ungenießbare Teile korrigiert. Die Bioverfügbarkeit/Verdaulichkeit wurde für Proteine und Aminosäuren korrigiert, aber nicht für andere Kategorien. Wo die Balken nicht 100% der Nahrungsversorgung darstellen, wird der Rest überwiegend von Lebensmitteln aus tierischer Produktion bereitgestellt (47).

Aus Pflanzen mit geringem Nährstoffgehalt werden Nahrungsmittel mit geringem Nährwert und begrenzter Vielfalt in der Ernährung – die Hauptursachen für verborgenem Hunger – produziert. Getreide, Wurzel- und Knollenfrüchte sind Grundnahrungsmittel für die meisten Bevölkerungsgruppen in Ländern mit niedrigem Einkommen. Diese Kulturen haben jedoch relativ niedrige Konzentrationen an Fe, Zn (Tabelle 1) und Vitaminen. Darüber hinaus werden einige Getreidesorten, wie Reis und Weizen, vor dem Verzehr zu weißem Reis oder Mehl poliert oder gemahlen, wodurch sich die Konzentrationen der Mineralstoffe weiter verringern (Tabelle 1). Eisen und Zink aus pflanzlichen Lebensmitteln sind im Allgemeinen auch weniger bioverfügbar für die menschliche Aufnahme als aus tierischen Lebensmitteln (48). Daher kann eine Ernährung, die nur auf Getreide, Wurzeln und Knollen basiert, nicht ausreichende Mengen an Fe, Zn und Vitaminen liefern. Stattdessen erhöht die zusätzliche Aufnahme von Gemüse, Obst, Hülsenfrüchten und einigen tierischen Produkten die Nährstoffaufnahme, was den menschlichen Bedarf deckt (9). Obst und Gemüse sind nicht nur bessere Quellen für Vitamine und Mineralien als Getreide und Knollen; sie enthalten auch Ascorbinsäure (Vitamin C), was die Fe-Aufnahme im menschlichen Darm fördert.

Nicht viele Diäten erfüllen die Empfehlungen für eine gesunde Nährstoffaufnahme. Weltweit liegt der Verzehr von Gemüse, Obst und Hülsenfrüchten jeweils 40 %, 60 % und 74 % unter den empfohlenen Werten (3). Aus unterschiedlichen Gründen dominieren nur eine Handvoll Grundnahrungsmittel mit niedriger Nährstoffdichte, darunter Mais, Weizen und Reis, die weltweiten Nahrungsmittel- und Futtermittelketten. In einigen vielfältigeren landwirtschaftlichen Systemen haben diese primären Grundnahrungsmittel die nährstoffreicheren traditionellen Nahrungsmittel verdrängt. Dank der Grünen Revolution hat sich die Produktion von Grundnahrungsmitteln seit Mitte der 1960er Jahre mehr als verdoppelt, während die Produktion von Hülsenfrüchten hinterherhinkt. Infolgedessen sind die relativen Preise für Grundnahrungsmittel gesunken, während die von Hülsenfrüchten, Fleisch und Fisch gestiegen sind (9). Aufgrund dieser Veränderungen müssen Menschen mit geringem Einkommen eher auf Grundnahrungsmittel zurückgreifen, auf Kosten von nährstoffreichen Hülsenfrüchten und tierischen Produkten.

		Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
REIS	Vollkornreis	5 - 15	15 - 25
	Polierter Reis	3 - 10	5 - 15
WEIZEN	Vollkorn	20 - 35	15 - 35
	Weißmehl	5 - 15	4 - 10
MAIS		20 - 30	15 - 30
HIRSE		30 - 60	25 - 50
BOHNE		30 - 70	20 - 50
ERBSEN	Getrocknet	30 - 70	30 - 60
LINSE		40 - 70	30 - 50
MANIOKWURZEL		5 - 10	4 - 10
SÜBKARTOFFEL		5 - 15	5 - 10
KARTOFFEL		3 - 5	3 - 5

Tabelle 1. Durchschnittlicher Eisen- und Zinkkonzentrationen von ausgewählten Getreide, Knollen und Hülsenfrüchten.

Die Zucht von Kulturpflanzen hat erfolgreich die Erträge der wichtigsten Getreidekulturen auf der ganzen Welt verbessert. Dennoch hat die Mineralstoffkonzentration dieser Getreidekulturen oft abgenommen. Gründe dafür sind Nährstoffverdünnung durch höhere Erträge, Pflanzenzüchtung und/oder Bodennährstoffverarmung (49, 50). Ein Langzeitexperiment in Rothamsted zeigte, dass die Konzentrationen von Zn, Fe, Cu und Mn im Weizenkorn seit der Einführung von ertragreichen, Kurzstrohsorten in den 1960er Jahren um 30 - 50 % gesunken sind (Abb. 6). Dies passierte obwohl die Mengen dieser Mikronährstoffe im Boden stabil blieben. Solche Nährstoffverdünnungseffekte wurden auf globaler Ebene durch gesteigerte Produkterträge um die wachsende Bevölkerung mit mehr Nahrung zu versorgen, jedoch größtenteils ausgeglichen (51). Das Risiko, dass die sinkende Konzentrationen von Mikronährstoffen in Getreidekörnern zu geringeren Nährstoffaufnahmen durch die Nahrung führen, kann allerdings weiter wachsen, wenn die Ernährungsmuster unverändert bleiben.

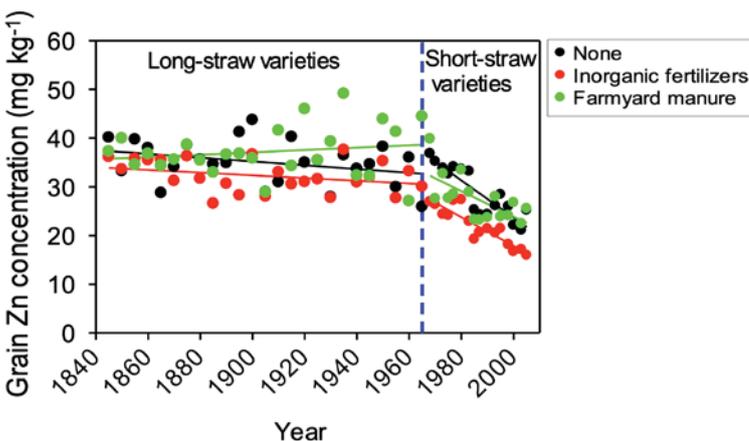


Abbildung 6. Abnehmende Zinkkonzentration im Weizenkorn seit der Einführung ertragreicher Weizensorten im Rothamsted Broadbalk Dauerversuch. Andere Mineralstoffe (Fe, Cu, Mn und Mg) zeigen ähnlich abnehmende Trends (49).

Der Klimawandel wird das Problem des Mikronährstoffmangels wahrscheinlich weiter verschärfen, da die steigende Konzentration von atmosphärischem CO<sub>2</sub> die Nährstoffkonzentrationen in wichtigen Nahrungspflanzen negativ beeinflusst (52-54). Feldstudien haben gezeigt, dass der Gehalt an Protein, Fe und Zn in Samen von Kulturen wie Weizen, Reis, Erbsen und Sojabohnen bei erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration um 5 - 10 % abnahm. Andere Kulturen, wie Mais und Sorghum, waren weniger betroffen (52, 53). Die Gründe für diese Beobachtungen sind nicht völlig klar, könnten aber Faktoren wie Nährstoffverdünnung aufgrund gesteigerter Erträge, reduzierte Transpiration, die den Massenfluss und die Nährstoffverlagerung begrenzt, gestörte Nährstoffaufnahme und -assimilation und/oder Veränderungen in der Nährstoffverfügbarkeit in der Rhizosphäre einschließen (53, 55). Erhöhte atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen könnten auch dazu führen, dass in den nächsten 50 Jahren zusätzlich 175 Millionen Menschen Zn-Mangel und 122 Millionen Menschen Protein-Mangel entwickeln (54). Für 1,4 Milliarden Frauen im gebärfähigen Alter und Kinder unter fünf Jahren, die in Ländern mit einer Anämie-Prävalenz von >20 % leben, könnte der Klimawandel die Fe-Verfügbarkeit in der Nahrung weiter verringern.

Jones et al. (38) prognostizierten, dass Veränderungen des Klimas und des Gehalts an organischer Bodensubstanz zu sinkenden Se-Konzentrationen in landwirtschaftlichen Gebieten führen könnten, wodurch sich Se-Mangel weiter verbreiten würde. Die Kombination von erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sowie Dürre- und Hitzestress kann die Bodenmobilität und Assimilation von Mineralstoffen weiter einschränken, wodurch sich die Nährstoffkonzentrationen in den essbaren Teilen von Nahrungspflanzen weiter verringern. Schließlich beeinflusst die Bodenfeuchtigkeit direkt die Diffusion von Mineralstoffen zur Wurzeloberfläche wo sie von der Pflanze aufgenommen werden. Dies ist insbesondere für weniger lösliche Nährstoffen wie Zn und Fe der Fall (56). Es ist daher nicht überraschend, dass Zn-Mangel aufgrund niedriger Konzentrationen in Getreidekulturen häufiger in Regionen mit geringen Niederschlägen auftritt (32).

## LÖSUNGEN UND ERFORDERLICHE MASSNAHMEN

Gesündere Ernährungsweisen erfordert eine tiefgreifende Umgestaltung des Ernährungssystems basierend auf kontinuierlichen Lernerfahrungen (57). Zum Beispiel könnten die von der EAT-Lancet-Kommission vorgeschlagenen Ernährungsweisen auch zu neuen Mängeln von Mineralstoffen wie Ca, Fe und Zn führen. Ein Ausweg diese zu modifizieren wäre es, mehr Lebensmittel aus tierischen Quellen und spezifische pflanzliche Interventionen einzubeziehen (58). Im Folgenden skizzieren wir die wichtigsten Lösungen um die nahrungsbasierte Mineralstoffversorgung zu verbessern. Wir konzentrieren uns auf Strategien basierend auf der primären Pflanzenproduktion, wo Mineralstoffe hauptsächlich in das globale Ernährungssystem eintreten.

### 1. AUF DIE KRITISCHE ROLLE DER VERANTWORTUNGSVOLLEN PFLANZENERNÄHRUNG BEI DER BEKÄMPFUNG VON CHRONISCHEM UND VERBORGENEM HUNGER AUFMERKSAM MACHEN

Die enge Beziehung zwischen Pflanzen- und menschlicher Ernährung (Abb. 1) wird immer noch unterbewertet und oft von öffentlichen Meinungen und politischen Entscheidungen überschattet. Die Betonung der negativen Folgen einer Überdüngung, die in Teilen der Welt auftritt, ignoriert oft die enorme negative Auswirkung einer schlechten Pflanzenernährung auf Milliarden von Menschen, insbesondere in Ländern mit niedrigem Einkommen.

Es ist unerlässlich, die Nährstoffe verantwortungsbewusst zu ersetzen, die in geernteten Produkten entfernt oder aufgrund von Bodendegradation verloren gehen, um die Produktivität und Lebensmittelqualität zu erhöhen und somit Hunger zu reduzieren. Eine verantwortungsvolle Pflanzenernährung ist die Voraussetzung für eine nachhaltigere Intensivierung, regenerativere Landwirtschaft, bessere Ernährung und Gesundheit sowie dem Schutz von Ökosystemen. Keine dieser kritischen Initiativen kann erfolgreich sein, ohne zunächst ausreichend Nährstoffe für das Pflanzenwachstum, den Ernteertrag und die Erntequalität bereitzustellen (15, 59-61).

In den kommenden Jahrzehnten müssen zwei Herausforderungen im Zusammenhang mit der Düngemittelanwendung behoben werden (11, 59, 62, 63): In Regionen mit hoher Düngemittelrate (z.B. Nordamerika, Europa, Süd- und Ostasien, Teile anderer Regionen), besteht die Herausforderung darin, übermäßige Nährstoffüberschüsse und -verluste aus Düngemitteln und anderen Quellen zu reduzieren, während gleichzeitig Ernteerträge und -qualität erhalten oder sogar verbessert werden sollten. Anderen Regionen werden unzureichende Nährstoffverfügbarkeiten überwinden müssen, die zu geringer Ertragsproduktivität und schlechter Ernährungsqualität, negativen Nährstoffbilanzen und Bodendegradation führen, was auch Hauptursachen für chronischen und verborgenen menschlichen Hunger sind. Unter diesen Bedingungen ist das Potenzial für Umweltschäden durch eine erhöhte Düngemittelanwendung minimal, während die gesellschaftlichen Vorteile enorm wären.

Die Erkennung und Betonung dieser beiden Herausforderungen für die Pflanzennährstoffnutzung ist unerlässlich. Jedes Land sollte eine nationale Nährstoff-Strategie entwickeln. Diese sollten die landesspezifischen Bedürfnisse berücksichtigen, klare Ziele setzen für die Nährstoffnutzung aus verschiedenen Quellen, einschließlich Düngemitteln, und eine wissenschaftlich fundierte Grundlage bieten für den Fortschritt der verantwortungsvollen Nährstoffnutzung mit damit verbundenen Technologien, Politiken und Investitionen.

Nährstoff-Strategien müssen auch die spezifischen Beiträge berücksichtigen, die die Pflanzenernährung zur Bewältigung von Problemen mit verborgenem Hunger leisten kann. Die historisch enge Definition von Pflanzennährstoffen schränkt jedoch die Verwendung von einigen Pflanzennährstoffen als Düngemittel in der Landwirtschaft (64) ein, da sie die menschliche Ernährung nicht berücksichtigt. Eine neue Definition eines Pflanzennährstoffs wurde entwickelt, welche besagt: „Ein mineralischer Pflanzennährstoff ist ein Element, das für das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen oder für die Qualitätsmerkmale des geernteten Produkts nötig ist“ (1). Diese Definition erweitert die Anzahl der betrachteten Elemente um Mineralstoffe, die besonders auch für die menschliche Ernährung von Bedeutung sind (z.B. Se, I). Staaten sollten diese neue Definition in ihre Düngemittel-Gesetzgebung aufnehmen, um die Bereitstellung weiterer wichtiger Mineralstoffe durch Düngemittel zu erlauben. .

### 2. ZIELORIENTIERTE VERBESSERUNG DER PFLANZENSPEZIFISCHEN NÄHRSTOFFZUFUHR

Weitreichende Lösungen um chronischen und verborgenen Hunger mit pflanzenbasierten Maßnahmen zu überwinden, erfordern eine zielgerichtete Vorgehensweise, d. h. die Kenntnis über die spezifischen Bodenbedingungen, Pflanzenanforderungen und menschlichen Bedürfnisse. Nährstoffarme Böden spielen eine zentrale Rolle bei chronischem und verborgenem Hunger, da sie direkte Auswirkungen auf die Pflanzenernährung und damit die menschliche Ernährung haben. Zum Beispiel wurden in Subsahara-Afrika statistisch signifikante Beziehungen zwischen Bodennährstoffen und Kindersterblichkeit, Wachstumsverzögerung, Unterentwicklung und Untergewicht gefunden (65). Daher beginnt jede strategische Lösung mit der Kenntnis der lokalen Bodenbedingungen. Um dies zu erreichen, ist die Boden- und Pflanzenanalyse seit langem ein Hauptbestandteil von Düngemittel-Empfehlungen. Boden- und Pflanzenanalysen sind jedoch häufig zu teuer, weitgehend nicht verfügbar und schwer zu interpretieren – daher unpraktisch im kleinen Maßstab und in abgelegenen Gebieten, in denen viele der bedürftigsten landwirtschaftlichen Produzenten leben.

Bei fehlenden hyperlokalen Boden- und Pflanzenanalysen bedarf es alternativer Strategien zur Empfehlung und Zielsetzung der Pflanzennährstoffversorgung. Auf regionaler Ebene kann die Unbrauchbarkeit traditioneller Boden- und Pflanzenanalysestrategien teilweise durch die Entwicklung robuster, praktischer Entscheidungshilfen bewältigt werden. Der Einsatz von digitalen und neuartigen Analysetechnologien, Modellierung und künstlicher Intelligenz kann dabei helfen, Mängel an Pflanzen- und menschlichen Nährstoffen zu analysieren, vorherzusagen und zu beheben. Günstige und einfache Spektroskopie von Bodenproben hat beispielsweise die Beurteilung von Bodenbedingungen in einem viel breiteren Maßstab und mit einer höheren Auflösung ermöglicht, als dies durch Laborbodenanalysen hätte erreicht werden können (66). Es gibt auch gute Fortschritte bei der Erstellung einer globalen spektralen Kalibrierungsbibliothek für Böden (67). Die für Afrika entwickelte digitale Bodenkarte mit einer Auflösung von 30 m (68) ist ein hervorragendes Beispiel für die integrierte Nutzung neuer digitaler Technologien. Sie bietet einen soliden Einstiegspunkt für agronomische und pflanzennährstoffbezogene Zielsetzungen und Beratungsanwendungen, wie den von iSDA (Innovation Solutions for Decision Agriculture) entwickelten Virtual Agronomist. Informationen über die Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen auf lokaler Ebene können auch durch die Funktionen des Getreidenährstoffgehaltes zusammen mit Bodeneigenschaften und Umwelt- und agronomischen Kovariaten abgeleitet werden (69).

Aufgrund dieser und anderer Informationen können regional oder lokal angepasste Düngemittelmischungen entwickelt werden. Das schließt Mikronährstoffe mit ein, die sowohl den Anforderungen an die Ertragsproduktivität als auch an die menschliche Ernährung gerecht werden. Die Auswirkungen dieser Produkte auf die Ernährung von Pflanzen und Menschen müssen sorgfältig bewertet werden. Gleichzeitig müssen Qualitätskontrollsysteme entwickelt werden, um sicherzustellen, dass das Produkt, das der Endbenutzer erhält, die Nährstoffe in den Mengen und Reinheitsgraden enthält, die sie gekauft haben.

### 3. ENTWICKLUNG NACHHALTIGER STRATEGIEN FÜR DIE NÄHRSTOFFZUFUHR DURCH AGRO-BIOFORTIFIKATION

In Regionen mit Bodennährstoffdefiziten stellen Düngemittel eine nachhaltige Strategie dar. Durch die Zugabe von Mikronährstoffen mit Düngemitteln können Landwirte die Ernteerträge, ihr Einkommen, den Mikronährstoffgehalt in Kulturprodukten und letztlich die menschliche Gesundheit fördern. Agronomische Biofortifikation ist sowohl ein Mittel um die Ertragsproduktivität und den wirtschaftlichen Gewinn zu optimieren als auch nährstoffdichte Lebensmittel für die Bevölkerung zu produzieren, insbesondere in ländlichen, ressourcenarmen Gebieten (70). Die Machbarkeit der agronomischen Biofortifikation im Kampf gegen verborgenen Hunger hängt von Faktoren wie der Düngemittelverfügbarkeit, dem Pflanzentyp, der Pflanzensorte, den Anbaumaßnahmen, dem Klima und dem Boden ab (70). Viele Studien haben die positiven Auswirkungen von Düngemittel-basierten Biofortifikationen mit Se, Zn oder I auf den Gehalt dieser Elemente im Korn, hauptsächlich in Getreidekulturen, nachgewiesen. Die Türkei, Pakistan, Indien und Finnland halten erfolgreiche Beispiele bereit für agronomische Biofortifikationsprogramme.

In den 1990er Jahren wurde in der Türkei der Zusammenhang zwischen Zn-Mangel in Böden und Getreidekörnern mit menschlichen Zn-Mängeln nachgewiesen (71). Seitdem konnte durch die Zn-Düngung sowohl die Getreideproduktion als auch die Zn-Konzentrationen im Getreide erhöht werden (72). An einigen Orten in Zentralanatolien war der Zn-Gehalt im Boden so niedrig, dass Weizenpflanzen auf Zn-Düngung mit beeindruckenden 5-fachen Erhöhungen des Ertrags und 2-fachen Erhöhungen der Zn-Konzentration im Korn reagierten. Nach diesen Erkenntnissen stieg die Verwendung von Zn-haltigen NP- und NPK-Düngemitteln in der Türkei von null im Jahr 1993 auf über 600.000 Tonnen im Jahr 2020 (Toros Agri; unveröffentlichte Ergebnisse), was sowohl die Gewinne der Landwirte als auch die menschliche Zn-Ernährung verbesserte.

Ähnlich verhielt es sich in den Provinzen Punjab und Sindh in Pakistan, wo Zn-Düngung den Weizenertrag im Durchschnitt um 8% und 14% erhöhte. Dies war für die Landwirte sehr rentabel, erhöhte die Zn-Zufuhr durch die Ernährung um 16% und halbierte fast die Verbreitung von Zn-Mängeln in den Bevölkerungen dieser beiden Regionen (73). In Indien investierte die Regierung in die Erhöhung des Zn-Gehalts von Kulturen, weil die Kosten von Biofortifikationsstrategien niedriger befunden wurden als die menschlichen und wirtschaftlichen Kosten, die mit verborgenem Hunger verbunden sind (74). Die indische Regierung sowie die Landesregierungen subventionierten Zn-Düngemittel, um deren Anwendungen zu fördern. Zum Beispiel startete die Regierung von Andhra Pradesh im Jahr 2015 ein Programm, das eine 50%-ige Subvention für Mikronährstoffe vorsah. Bodendaten wurden verwendet, um Gebiete zu identifizieren, in denen kritischer Mikronährstoff-Mangel herrschte. Landwirte in mangelhaften Gebieten konnten dann Zink, Gips und Boron zu reduzierten Preisen bei den landwirtschaftlichen Abteilungen des Staates kaufen. Im Jahr 2017–18 wurde die Subvention erhöht, um den berechtigten Landwirten Mikronährstoffe kostenlos zur Verfügung zu stellen (33). Insgesamt stieg die Verwendung von  $ZnSO_4$  im Dünger in ganz Indien um 65% von 2004/2005 bis 2020/2021.

Das finnische Se-Biofortifikationsprogramm ist ein hervorragendes Beispiel für die Wirksamkeit agronomischer Biofortifikationen und die Bedeutung der fortlaufenden Überwachung zur Feinabstimmung solcher Interventionen (75). Im Jahr 1984 wurde die Aufnahme von Se in Mineraldüngern verpflichtend, wobei die Menge des zugesetzten Se zunächst auf 16 mg/kg Dünger festgelegt wurde (1984–1990). Dank dieser Verordnung vervierfachte sich die nahrungsbedingte Se-Aufnahme, während sich die Plasma-/Serum-Se-Konzentrationen bei Erwachsenen verdoppelten (Abb. 7). Die nachfolgenden Anpassungen der Anreicherung auf 6 mg/kg Dünger (1990–1998), 10 mg/kg Dünger (1998–2007) und 15 mg/kg Dünger (seit 2007) stabilisierten die Plasma-/Serum-Se-Konzentrationen finnischer Erwachsener auf ein optimales Niveau (Abb. 7). Durch diese landesweite Biofortifikationsstrategie erhöhte sich nicht nur der Se-Gehalt von Weizenkorn für den direkten menschlichen Verzehr, sondern auch der Se-Gehalt von Tierfutter, was der Tiergesundheit zugute kam und den Se-Gehalt von Milch und Fleisch für den menschlichen Verzehr erhöhte (76).

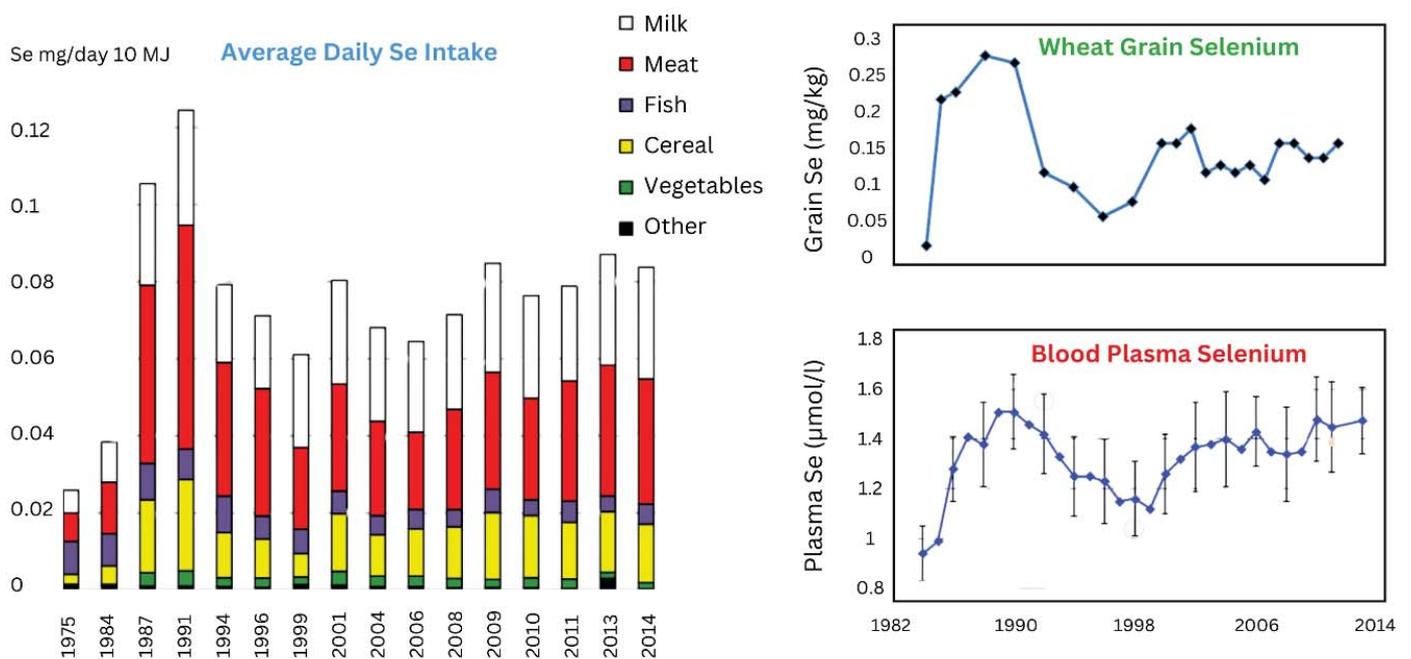


Abbildung 7. Die Anreicherung von Düngemitteln mit Se hat die Se-Ernährung der Menschen in Finnland verbessert. Links: Durchschnittliche Se-zufuhr der finnischen Bevölkerung aus verschiedenen Nahrungsquellen in Reaktion auf die Agro-Biofortifikation von Se in Düngern. Rechts: Veränderung des Se-Gehaltes in Weizen und des Blutplasma-Serum-Se in Erwachsenen nach Anreicherung von Düngemitteln mit Se. Modifiziert nach Alfthan et al. (75) und Eurola et al. (76).

Die Anreicherung von Grundnahrungsmitteln mit Se durch Düngemittel wurde auch in anderen Ländern und bei anderen Lebensmitteln nachgewiesen, einschließlich Sojabohnen in Brasilien (77) und Mais in Malawi (78, 79). Das Blattspritzen mit Se, zum Beispiel in Form von Na-Selenat, war sehr wirksam um die Se-Konzentrationen in Weizen und Reis zu erhöhen (80, 81). Da Se eine Schlüsselrolle in antioxidativen Abwehrmechanismen spielt, weisen Se-biofortifizierte Kulturen auch eine bessere Toleranz gegenüber Umweltstressbedingungen auf (82).

Neuere Studien zeigen, dass das Blattspritzen von jodhaltigen Düngemitteln auch zu beeindruckenden Erhöhungen der Jodkonzentrationen von Weizen und Reis (80, 83), Äpfeln (84), Gemüse und anderen Kulturen (40, 85) führen kann. Durch die Düngung von I zusammen mit Zn und Se können sogar mehrere Mängel effektiv behoben werden.

Neue Technologien wie Nano-Dünger bieten ein großes Potenzial um Kulturpflanzen kritische Mineralstoffe zielgenau zuzuführen, insbesondere auch Mikronährstoffe, die für verborgenen Hunger wichtig sind, wie Zn oder Fe (86, 87). Dieser Ansatz kann die Entwicklung effizienterer Blattdüngungsprodukte für diejenigen Nährstoffe ermöglichen, die im Boden oder in der Pflanze weniger mobil sind (86). Allerdings müssen alle diesen neuartigen Lösungen gründlich in Bezug auf das Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen, die tatsächliche Ernährungsleistung der Kulturpflanzen im Feld und mögliche Umweltrisiken bewertet werden.

Die Hauptherausforderung für agronomische Biofortifizierungslösungen besteht darin, sie schnell in den Regionen zu skalieren, in denen sie am meisten benötigt werden und am effektivsten sein können. Wo Düngemittelanreicherung sowohl den Ertrag als auch die menschliche Ernährung verbessert, sollten hauptsächlich landwirtschaftliche Betriebe und Agrarunternehmen die Einführung von und den Zugang zu den richtigen Düngemitteln mit effektiver landwirtschaftlicher Beratung vorantreiben. Wenn jedoch die Düngemittelanreicherung hauptsächlich die menschliche Ernährung verbessert, ohne die Produktivität der Kulturen zu steigern oder einen Preiszuschlag für die Erzeugung angereicherter Lebensmittel zu erzielen, besteht weniger Anreiz für Landwirte, in diese Praxis zu investieren. Unter diesen Umständen sind staatliche Politiken oder nicht-staatliche Unterstützungen erforderlich, um die Kosten solcher Praktiken zu decken und sicherzustellen, dass lebenswichtige Mikronährstoffe denen zur Verfügung gestellt werden, die sie benötigen.

Obwohl zunächst staatliche oder NGO-Unterstützung in Situationen erforderlich sein kann, in denen Marktmechanismen nicht ausreichen, kann die anhaltende Verteilung subventionierter Mikronährstoffdünger für Regierungen finanziell herausfordernd sein und auch kommerzielle Investitionen verdrängen. Es ist notwendig, marktorientierte Lösungen zu entwickeln, die Mikronährstoffe von menschlicher Bedeutung in nachhaltige Lebensmittelproduktionsstandards integrieren. Dies erfordert auch die Integration der menschlichen Ernährung in öffentliche und private landwirtschaftliche Beratungsdienste (88).

#### 4. DIVERSIFIZIERUNG DER ANBAUSYSTEME UND GENTECHNISCHE ANREICHERUNG VON PFLANZENSORTEN

Diäten, die neben Grundnahrungsmitteln auch Hülsenfrüchte, Gemüse und Obst beinhalten, liefern mehr Mikronährstoffe und Vitamine als solche, die hauptsächlich auf Getreide basieren. Eine Erweiterung der Vielfalt der Anbausysteme durch den Anbau nahrhafterer Pflanzen ist generell wünschenswert, erfordert jedoch geeignete Umweltbedingungen und Märkte (89). Wo immer möglich, sollte mehr Aufmerksamkeit auf die Verbesserung und den Anbau vernachlässigter oder weniger genutzter Kulturen gelegt werden. Viele davon sind reich an Nährstoffen oder können als wichtige genetische Quellen die Ernährungsvielfalt der in günstigeren Lagen angebauten Grundnahrungsmittel verbessern (90, 91). Zum Beispiel enthalten Hirse und nährstoffreiche Kulturen wie Quinoa, Chia oder Teff reichere Ballaststoffquellen und eine höhere Proteinqualität mit mehr angereicherten essentiellen Aminosäuren als moderne Reis- und Weizensorten (90). Die geringe Produktivität dieser Arten begrenzt jedoch ihren potenziellen Einfluss. Selbst wenn diese nährstoffreichen Kulturen stärker genutzt würden, wären effizientere Strategien erforderlich, um die Grundnahrungsmittel der Welt zu verbessern und die in den geernteten Kulturen exportierten Pflanzennährstoffe zu ersetzen (92).

Die globale Ernährung könnte sich durch größere Investitionen in die Steigerung des Nährwertes von Grundgetreide, Wurzeln und Knollen verbessern, da diese Kategorien einen großen Anteil an der menschlichen Ernährung ausmachen (Abb. 5). Um jedoch die potenziellen Vorteile aus der genetischen Verbesserung zu erhalten, sollten agronomische mit genetischen Bioanreicherungsansätzen integriert werden. Beispielsweise sind in Böden mit Zn-Mängeln Boden- oder Blattanwendungen von Zn erforderlich, um das Bioanreicherungs potenzial von Hoch-Zn-Pflanzensorten zu realisieren (93). Ebenso führt eine Erhöhung der N-Düngerdosis innerhalb eines gewissen Bereichs oft auch zu erhöhten Konzentrationen von Fe und Zn im Korn, da Fe- und Zn-Konzentrationen im Getreidekorn mit dem Proteingehalt korrelieren (94).

Die genetische Bioanreicherung wurde erfolgreich eingesetzt, um den Fe und Zn-Gehalt in Getreide und Hülsenfrüchten zu erhöhen. Das HarvestPlus-Programm hat beispielsweise erfolgreich «Eisenbohnen» und «Eisenhirse»-Sorten gezüchtet, welche 60 - 90% höhere Fe-Konzentrationen im Samen im Vergleich zu nicht angereicherten Sorten aufweisen. Bei regelmäßigem Verzehr können diese bis zu 80% des täglichen Fe-Bedarfs decken und den Fe-Status und die kognitive Leistung von Frauen und schulpflichtigen Jugendlichen erheblich verbessern, wie in Ruanda und Indien gezeigt wurde (95, 96). Ähnlich wurden Sorten von Zn-angereicherter Weizen, Reis und Mais und Provitamin A-angereicherter Maniok, Mais und orangefarbener Süßkartoffel in vielen Ländern gezüchtet und zum Teil auch schon freigegeben. Etwa 8,5 Millionen landwirtschaftliche Haushalte in 40 Ländern in Afrika, Asien und Lateinamerika bauen diese angereicherten Kulturen an. Es wurde geschätzt, dass diese angereicherten Kulturen jeweils zusätzliche 25%, 35% und >85% des durchschnittlichen Bedarfs an Zn, Fe und Provitamin A liefern können (29).

In manchen Fällen wird die konventionelle Züchtung die Bioanreicherungsziele nicht erreichen da ein geeigneter Stoffwechselweg fehlt oder die natürliche genetische Variation begrenzt ist. Dann kann Gentechnik eingesetzt werden um den Mikronährstoffgehalt von Kulturpflanzen zu erhöhen. Ein hervorragendes Beispiel ist Golden Rice, der so entwickelt wurde, dass er die Biosynthesegene für  $\beta$ -Carotin (Provitamin A) im Reisendosperm enthält, obwohl Reis diese sonst nicht besitzt (97). Der Ersatz von herkömmlichem Reis durch Golden Rice könnte 89-113% und 57-99% des empfohlenen Vitamin-A-Bedarfs für Vorschulkinder in Bangladesch und den Philippinen decken (98). Golden Rice hat sich im Feld gut bewährt (99) und wurde vor kurzem zur Kultivierung auf den Philippinen zugelassen. Dank transgener Ansätze könnten Grundnahrungsmittel erfolgreich mit transgenen Ansätzen angereichert werden, um die Aufnahme, Translokation, Speicherung und Bioverfügbarkeit von Fe und Zn zu verbessern (29, 100, 101). Transgene Ansätze können auch zu besserem Verständnis der zugrunde liegenden biologischen Prozesse beitragen, wodurch natürliche genetische Variationen durch konventionelle Züchtung genutzt werden könnten (102).

Die Geneditierung ist eine weitere leistungsstarke Technologie um Kulturen mit Mikronährstoffen und Vitaminen anzureichern (103). Beispielsweise enthalten die meisten Lebensmittel nur geringe Mengen an Vitamin D, da Pflanzen sehr schlechte Quellen für dieses Vitamin sind. Mit Hilfe der Geneditierung konnte ein einzelnes Gen in Tomaten so verändert werden, dass diese mehr Provitamin D produzieren, welches der Mensch in Vitamin D umwandelt (104). Durch die Kombination von Genmodifikationen, Geneditierung und konventioneller Züchtung sollte es möglich werden, mehrere Mikronährstoffe und Vitamine in derselben Kultur anzureichern, wodurch Grundnahrungsmittel zu vollständigeren Nahrungsquellen werden als sie es derzeit sind. Solche technologischen Innovationen gelten als sehr kosteneffektiv um verborgenen Hunger zu bekämpfen, erfordern jedoch eine breitere Akzeptanz in der Gesellschaft (29).

Die Bioanreicherung, ob durch Züchtung, Düngung oder molekulare Techniken, ist jedoch keine Allheilmittel-Lösung für die Probleme des verborgenen Hungers in der Welt. Sie kann nur erfolgreich sein, wenn es keine Ertrags- oder Einkommensverluste gibt und wenn sie in holistische Strategien zur Ernährungsverbesserung eingebettet ist (105). Um Landwirte zu motivieren und zu ermutigen, die Nährstoffdichte in Kulturen zu erhöhen und gleichzeitig hohe Erträge zu erzielen, sollten Wert-basierende Lösungen gefunden werden. Neue Kennzahlen wie «Kornnährstoffausbeute» könnten in globalen und lokalen Pflanzenhandel und Märkten in Betracht gezogen und angepasst werden (106), als effiziente Innovation zur Problemlösung von verborgenem Hunger.

## WER MUSS WAS TUN?

**Bildungsbeauftragte, Journalisten, Kommunikatoren und Influencer:** Bewusstsein schaffen für die Bedeutung der Pflanzenernährung für die menschliche Ernährung; die weltweiten Probleme von chronischem und verborgenem Hunger; und die Notwendigkeit, Pflanzennährstoffe sicher und effektiv zur Unterstützung der Pflanzenproduktivität und Lebensmittelqualität für die menschliche Gesundheit bereitzustellen.

**Politiker:** Überwachung und Bewertung des Ernährungszustands der Bevölkerung, Umsetzung kosteneffektiver Strategien zur Bewältigung von chronischem und verborgenem Hunger und Förderung der Entwicklung einer nachhaltigen Düngemittelpolitik. Änderung der Düngemittelvorschriften, um alle Nährstoffe einzubeziehen, die für das Pflanzenwachstum und die menschliche Ernährung wichtig sind.

**Düngemittelindustrie:** Entwicklung, Produktion und Vertrieb von kosteneffektiven Düngemittelprodukten zur Steigerung der Produktivität und Bekämpfung von chronischem und verborgenem Hunger.

**Landwirte, Berater, landwirtschaftliche Berater und Dienstleister:** Bildung und Schulung von Landwirten über den Bedarf und Nutzen von Pflanzennährstoffen um die Produktivität und Lebensmittelqualität zu steigern. Entwicklung von Mechanismen um Pflanzennährstoffe ohne Umweltschäden nachhaltig bereitzustellen. Anpassung von Technologien um die Produktivität und Ernährung von Kulturen zu verbessern, Nährstoffverluste zu reduzieren und die Rentabilität zu verbessern. Einbeziehung der menschlichen Ernährung in landwirtschaftliche Beratungssysteme (88).

**Verbraucher:** Diversifizierung der Ernährung für eine bessere und ausgewogenere Ernährung und Reduzierung der Lebensmittelverschwendung. Nachfrage nach nährstoffreicheren Lebensmitteln.

**Lebensmittelindustrie:** Kreieren einer stärkeren Nachfrage nach nährstoffreichen Lebensmitteln und Belohnung der Landwirte für deren Produktion.

**Investoren:** Investition in die Entwicklung von ernährungsfokussierten Düngemittelmärkten durch innovative Marketing- und Vertriebsketten, Entwicklung von innovativen Informationssystemen und Bereitstellung von Kredit- und Versicherungssystemen.

**Wissenschaftler:** Entwicklung kosteneffektiverer und skalierbarer Methoden um den Nährstoffstatus von Pflanzen und Böden zu beurteilen. Entwicklung und Erweiterung von soliden Nährstoffmanagementpraktiken, die die Nährstoffeffizienz verbessern. Produktion von Pflanzensorten, die Ernten mit angereicherten Mikronährstoffen und Vitaminen hervorbringen.

**Organisationen der Zivilgesellschaft:** Anerkennung der Schlüsselrolle, die Pflanzennährstoffe für die menschlichen Ernährung spielen. Unterstützung der angemessenen und umweltverträglichen Entwicklung und Verbreitung von Pflanzennährstoffprodukten. Aufklärung der Bevölkerung über die entscheidende Rolle der Pflanzenernährung bei der Bekämpfung von chronischem und verborgenem Hunger. Akzeptanz moderner, wissenschaftlich basierter genetischer Verbesserungstechnologien.

## WIE WÜRDE ERFOLG AUSSEHEN?

Chronischer Hunger wird erheblich reduziert indem die Produktivität landwirtschaftlicher Kulturen durch erhöhte Verfügbarkeit und optimierten Einsatz von Pflanzennährstoffen, insbesondere in Afrika gesteigert wurde.

Verborgener Hunger wird beseitigt durch agronomische Methoden und Bioanreicherung von Mikronährstoffen, Diversifizierung der Ernährung, und Entwicklung von Pflanzensorten mit angereicherten Vitaminen und Mikronährstoffen.

Eine allgemeine gesellschaftliche Anerkennung der Schlüsselrolle der Pflanzenernährung um Hunger und Mangelernährung zu reduzieren und die menschliche Gesundheit weltweit zu verbessern.

## REFERENZEN

- P. H. Brown, F.-J. Zhao, A. Dobermann, What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. *Plant Soil*. **476**, 11–23 (2022), doi:10.1007/s11104-021-05171-w.
- E. A. Kirkby, Introduction, definition, and classification of nutrients. in *Marschner's mineral nutrition of plants, 4th edn*, Z. Rengel, I. Cakmak, P. J. White, Eds. (Academic Press, San Diego, CA, USA, 2023), pp. 3–9.
- Global Nutrition Report, *2022 Global Nutrition Report* (Development Initiatives, Bristol, UK, 2022). <https://globalnutritionreport.org/reports/2022-global-nutrition-report/>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO, *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural-urban continuum* (FAO, Rome, 2023). <https://www.fao.org/documents/card/en?details=cc3017en>
- Y. Bai, R. Alemu, S. A. Block, D. Headey, W. A. Masters, Cost and affordability of nutritious diets at retail prices: Evidence from 177 countries. *Food Policy*. **99**, 101983 (2021), doi:10.1016/j.foodpol.2020.101983.
- D. Byerlee, J. Fanzo, The SDG of zero hunger 75 years on: Turning full circle on agriculture and nutrition. *Global Food Security*. **21**, 52–59 (2019), doi:10.1016/j.gfs.2019.06.002.
- G. A. Stevens, T. Beal, M. N. N. Mbuya, H. Luo, L. M. Neufeld, Micronutrient deficiencies among preschool-aged children and women of reproductive age worldwide: a pooled analysis of individual-level data from population-representative surveys. *The Lancet Global Health*. **10**, e1590–e1599 (2022), doi:10.1016/S2214-109X(22)00367-9.
- T. W. Bruulsema, P. Heffer, M. R. Welch, I. Cakmak, K. Moran, *Fertilizing crops to improve human health: a scientific review* (International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris, 2012), <https://www.fertilizer.org/resource/fertilizing-crops-to-improve-human-health-a-scientific-review/>
- R. M. Welch, R. D. Graham, I. Cakmak, *Linking agricultural production practices to improving human nutrition and health. Expert paper written for ICN2 Second International Conference on Nutrition Preparatory Technical Meeting, 13-15 November, Rome, Italy* (2013), <http://www.fao.org/3/a-as574e.pdf>
- W. Willett *et al.*, Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*. **393**, 447–492 (2019), doi:10.1016/S0140-6736(18)31788-4.
- A. Dobermann *et al.*, Responsible plant nutrition: A new paradigm to support food system transformation. *Global Food Security*. **33**, 100636 (2022), doi:10.1016/j.gfs.2022.100636.
- J. W. McArthur, G. C. McCord, Fertilizing growth: Agricultural inputs and their effects in economic development. *J. Dev. Econ*. **127**, 133–152 (2017), doi:10.1016/j.jdeveco.2017.02.007.
- J. W. Erisman, M. A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont, W. Winiwarter, How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geosci*. **1**, 636–639 (2008), doi:10.1038/ngeo325.
- W. M. Stewart, D. W. Dobb, A. E. Johnston, T. J. Smyth, The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agron. J*. **97**, 1–6 (2005).
- B. Vanlauwe, A. Dobermann, Sustainable intensification of agriculture in sub-Saharan Africa: first things first! *Front. Agr. Sci. Eng.* **7**, 376–382 (2020), doi:10.15302/J-FASE-2020351.
- B. Vanlauwe *et al.*, *Fertilizer and soil health in Africa: The role of fertilizer in building soil health to sustain farming and address climate change* (2023), <https://ifdc.org/resources/fertilizer-and-soil-health-in-africa-the-role-of-fertilizer-in-building-soil-health-to-sustain-farming-and-address-climate-change/>
- J. Kihara, P. Bolo, M. Kinyua, J. Rurinda, K. Piikki, Micronutrient deficiencies in African soils and the human nutritional nexus: opportunities with staple crops. *Environ Geochem Health*. **42**, 3015–3033 (2020), doi:10.1007/s10653-019-00499-w.
- D. Gashu *et al.*, The nutritional quality of cereals varies geospatially in Ethiopia and Malawi. *Nature*. **594**, 71–76 (2021), doi:10.1038/s41586-021-03559-3.
- P. Tittonell, K. E. Giller, When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Res.* **143**, 76–90 (2013).
- N. D. Mueller *et al.*, Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*. **490**, 254–257 (2012), doi:10.1038/nature11420.
- M. K. van Ittersum *et al.*, Can sub-Saharan Africa feed itself? *Proc. Natl. Acad. Sci.* **113**, 14964–14969 (2016), doi:10.1073/pnas.1610359113.
- J. J. Stoorvogel, E. M. A. Smaling, B. H. Janssen, Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. 1. Supra-national scale. *Fert. Res.* **35**, 227–235 (1993).
- E. M. A. Smaling, J. J. Stoorvogel, P. N. Windmeijer, Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. 2. District scale. *Fert. Res.* **35**, 237–250 (1993).
- A. S. Elrys, M. K. Abdel-Fattah, S. Raza, Z. Chen, J. Zhou, Spatial trends in the nitrogen budget of the African agro-food system over the past five decades. *Environ. Res. Lett.* **14**, 124091 (2019), doi:10.1088/1748-9326/ab5d9e.
- FAO, *Special Report – FAO/WFP Crop and Food Security Assessment Mission (CFSAM) to the Democratic Socialist Republic of Sri Lanka* (2023), <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc6202en>
- N. M. Lowe, The global challenge of hidden hunger: perspectives from the field. *The Proceedings of the Nutrition Society*. **80**, 283–289 (2021), doi:10.1017/S0029665121000902.
- K. von Grebmer *et al.*, *2022 Global Hunger Index: Food systems transformation and local governance* (2022), <https://www.globalhungerindex.org>
- K. L. Harding, V. M. Aguayo, P. Webb, Hidden hunger in South Asia: a review of recent trends and persistent challenges. *Public health nutrition*. **21**, 785–795 (2018), doi:10.1017/S1368980017003202.
- D. van der Straeten *et al.*, Multiplying the efficiency and impact of biofortification through metabolic engineering. *Nat Commun*. **11**, 5203 (2020), doi:10.1038/s41467-020-19020-4.
- The Krakow Declaration on iodine: Tasks and responsibilities for prevention programs targeting iodine deficiency

- disorders. *European thyroid journal*. **7**, 201–204 (2018), doi:10.1159/000490143.
31. A. G. L. Assunção *et al.*, Micronutrient homeostasis in plants for more sustainable agriculture and healthier human nutrition. *J Exp Bot*. **73**, 1789–1799 (2022), doi:10.1093/jxb/erac014.
32. I. Cakmak, Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant Soil*. **302**, 1–17 (2008), doi:10.1007/s11104-007-9466-3.
33. S. Gupta, A. Kishore, M. F. Alvi, V. Singh, Designing better input support programs: Lessons from zinc subsidies in Andhra Pradesh, India. *PLOS ONE*. **15**, e0242161 (2020), doi:10.1371/journal.pone.0242161.
34. C. J. L. Murray *et al.*, Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*. **396**, 1223–1249 (2020), doi:10.1016/S0140-6736(20)30752-2.
35. S. J. Fairweather-Tait *et al.*, Selenium in human health and disease. *Antioxidants & redox signaling*. **14**, 1337–1383 (2011), doi:10.1089/ars.2010.3275.
36. D. Gashu, B. J. Stoecker, Selenium and cognition: mechanism and evidence. in *Handbook of Famine, Starvation, and Nutrient Deprivation* (Springer, Cham, 2017), pp. 1–17.
37. G. F. Combs, Selenium in global food systems. *The British journal of nutrition*. **85**, 517–547 (2001), doi:10.1079/bjn2000280.
38. G. D. Jones *et al.*, Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **114**, 2848–2853 (2017), doi:10.1073/pnas.1611576114.
39. R. Stone, A medical mystery in middle China. *Science (New York, N.Y.)*. **324**, 1378–1381 (2009), doi:10.1126/science.324\_1378.
40. G. Lyons, Biofortification of cereals with foliar selenium and iodine could reduce hypothyroidism. *Front. Plant Sci*. **9**, 730 (2018), doi:10.3389/fpls.2018.00730.
41. I. S. Ligowe *et al.*, Selenium deficiency risks in sub-Saharan African food systems and their geospatial linkages. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 1–11 (2020), doi:10.1017/S0029665120006904.
42. R. Hurst *et al.*, Soil-type influences human selenium status and underlies widespread selenium deficiency risks in Malawi. *Sci Rep*. **3**, 1425 (2013), doi:10.1038/srep01425.
43. E. N. Pearce, M. Andersson, M. B. Zimmermann, Global iodine nutrition: Where do we stand in 2013? *Thyroid : official journal of the American Thyroid Association*. **23**, 523–528 (2013), doi:10.1089/thy.2013.0128.
44. M. B. Zimmermann, M. Andersson, Update on iodine status worldwide. *Current opinion in endocrinology, diabetes, and obesity*. **19**, 382–387 (2012), doi:10.1097/MED.0b013e328357271a.
45. A. Hatch-McChesney, H. R. Lieberman, Iodine and iodine deficiency: a comprehensive review of a re-emerging issue. *Nutrients*. **14**, 3474 (2022), doi:10.3390/nu14173474.
46. C. Kiferle *et al.*, Evidences for a nutritional role of iodine in plants. *Front. Plant Sci*. **12**, 616868 (2021), doi:10.3389/fpls.2021.616868.
47. N. W. Smith, A. J. Fletcher, P. Millard, J. P. Hill, W. C. McNabb, Estimating cropland requirements for global food system scenario modeling. *Front. Sustain. Food Syst*. **6** (2022), doi:10.3389/fsufs.2022.1063419.
48. M. G. Ferruzzi, J. Kruger, Z. Mohamedshah, H. Debelo, J. R. Taylor, Insights from in vitro exploration of factors influencing iron, zinc and provitamin A carotenoid bioaccessibility and intestinal absorption from cereals. *Journal of Cereal Science*. **96**, 103126 (2020), doi:10.1016/j.jcs.2020.103126.
49. M.-S. Fan *et al.*, Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. **22**, 315–324 (2008), doi:10.1016/j.jtemb.2008.07.002.
50. P. R. Shewry, T. K. Pellny, A. Lovegrove, Is modern wheat bad for health? *Nature Plants*. **2**, 16097 (2016), doi:10.1038/nplants.2016.97.
51. R. J. Marles, Mineral nutrient composition of vegetables, fruits and grains: The context of reports of apparent historical declines. *Journal of Food Composition and Analysis*. **56**, 93–103 (2017), doi:10.1016/j.jfca.2016.11.012.
52. S. S. Myers *et al.*, Increasing CO<sub>2</sub> threatens human nutrition. *Nature*. **510**, 139–142 (2014), doi:10.1038/nature13179.
53. J. C. Soares, C. S. Santos, S. M. P. Carvalho, M. M. Pintado, M. W. Vasconcelos, Preserving the nutritional quality of crop plants under a changing climate: importance and strategies. *Plant Soil*. **443**, 1–26 (2019), doi:10.1007/s11104-019-04229-0.
54. M. R. Smith, S. S. Myers, Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions on global human nutrition. *Nat. Clim. Chang*. **8**, 834–839 (2018), doi:10.1038/s41558-018-0253-3.
55. A. Gojon, O. Cassan, L. Bach, L. Lejay, A. Martin, The decline of plant mineral nutrition under rising CO<sub>2</sub>: physiological and molecular aspects of a bad deal. *Trends in plant science*. **28**, 185–198 (2023), doi:10.1016/j.tplants.2022.09.002.
56. H. Marschner, Zinc uptake from soils. in *Zinc in soils and plants*, A. D. Robson, Ed. (Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 1993), pp. 59–77.
57. S. Biesbroek *et al.*, Toward healthy and sustainable diets for the 21st century: Importance of sociocultural and economic considerations. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **120**, e2219272120 (2023), doi:10.1073/pnas.2219272120.
58. T. Beal, F. Ortenzi, J. Fanzo, Estimated micronutrient shortfalls of the EAT-Lancet planetary health diet. *The Lancet Planetary Health*. **7**, e233–e237 (2023), doi:10.1016/S2542-5196(23)00006-2.
59. P. S. Bindraban, C. O. Dimkpa, S. Angle, R. Rabbinge, Unlocking the multiple public good services from balanced fertilizers. *Food Sec*. **10**, 273–285 (2018), doi:10.1007/s12571-018-0769-4.

60. J. Nyamangara, J. Kodzwa, E. N. Masvaya, G. Soropa, The role of synthetic fertilizers in enhancing ecosystem services in crop production systems in developing countries. in *The role of ecosystem services in sustainable food systems*, L. Rusinamhodzi, Ed. (Academic Press, 2020), pp. 95–117.
61. K. E. Giller, R. Hijbeek, J. A. Andersson, J. Sumberg, Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. *Outlook Agric*, 003072702199806 (2021), doi:10.1177/0030727021998063.
62. S. Snapp *et al.*, Spatially differentiated nitrogen supply is key in a global food-fertilizer price crisis. *Nat Sustain* (2023), doi:10.1038/s41893-023-01166-w.
63. L. F. Schulte-Uebbing, A. H. W. Beusen, A. F. Bouwman, W. de Vries, From planetary to regional boundaries for agricultural nitrogen pollution. *Nature*. **610**, 507–512 (2022), doi:10.1038/s41586-022-05158-2.
64. D. I. Arnon, P. R. Stout, The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiol*. **14**, 371–375 (1939), doi:10.1104/pp.14.2.371.
65. E. D. Berkhout, M. Malan, T. Kram, Better soils for healthier lives? An econometric assessment of the link between soil nutrients and malnutrition in Sub-Saharan Africa. *PLoS ONE*. **14**, e0210642 (2019), doi:10.1371/journal.pone.0210642.
66. M. Nocita *et al.*, Soil spectroscopy: an opportunity to be seized. *Global Change Biol*. **21**, 10–11 (2015), doi:10.1111/gcb.12632.
67. K. D. Shepherd *et al.*, A global soil spectral calibration library and estimation service. *Soil Security*. **7**, 100061 (2022), doi:10.1016/j.soisec.2022.100061.
68. T. Hengl *et al.*, African soil properties and nutrients mapped at 30 m spatial resolution using two-scale ensemble machine learning. *Sci. Rep.* **11**, 6130 (2021), doi:10.1038/s41598-021-85639-y.
69. L. Botoman *et al.*, Soil and landscape factors influence geospatial variation in maize grain zinc concentration in Malawi. *Sci Rep*. **12**, 7986 (2022), doi:10.1038/s41598-022-12014-w.
70. D. Teklu, D. Gashu, Joy, Edward J. M., T. Amede, M. R. Broadley, Effectiveness of agronomic biofortification strategy in fighting against hidden hunger. *Agronomy*. **13** (2023), doi:10.3390/agronomy13082173.
71. I. Cakmak *et al.*, Zinc deficiency as a practical problem in plant and human nutrition in Turkey: A NATO-science for stability project. *Field Crops Res*. **60**, 175–188 (1999), doi:10.1016/S0378-4290(98)00139-7.
72. I. Cakmak *et al.*, Zinc deficiency as a critical problem in wheat production in Central Anatolia. *Plant Soil*. **180**, 165–172 (1996), doi:10.1007/BF00015299.
73. Joy, Edward J. M. *et al.*, Valuing increased zinc (Zn) fertiliser use in Pakistan. *Plant Soil*. **411**, 139–150 (2017), doi:10.1007/s11104-016-2961-7.
74. A. J. Stein, M. Qaim, The human and economic cost of hidden hunger. *Food and nutrition bulletin*. **28**, 125–134 (2007), doi:10.1177/156482650702800201.
75. G. Alfthan *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. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. **31**, 142–147 (2015), doi:10.1016/j.jtemb.2014.04.009.
76. M. Eurola *et al.*, «Seleenityöryhmän raportti 2016» 978-952-326-253-9. (Luonnonvarakeskus; Helsinki; FI, 2016; https://jukuri.luke.fi/handle/10024/535830).
77. M. A. Silva *et al.*, Selenium biofortification of soybean genotypes in a tropical soil via Se-enriched phosphate fertilizers. *Front. Plant Sci*. **13**, 988140 (2022), doi:10.3389/fpls.2022.988140.
78. A. D. Chilimba *et al.*, Agronomic biofortification of maize with selenium (Se) in Malawi. *Field Crops Res*. **125**, 118–128 (2012), doi:10.1016/j.fcr.2011.08.014.
79. E. J. M. Joy *et al.*, Biofortified maize improves selenium status of women and children in a rural community in Malawi: results of the addressing hidden hunger with agronomy randomized controlled trial. *Front. Nutr*. **8**, 788096 (2021), doi:10.3389/fnut.2021.788096.
80. C. Zou *et al.*, Simultaneous biofortification of wheat with zinc, iodine, selenium, and iron through foliar treatment of a micronutrient cocktail in six countries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. **67**, 8096–8106 (2019), doi:10.1021/acs.jafc.9b01829.
81. C. Prom-u-thai *et al.*, Simultaneous biofortification of rice with zinc, iodine, iron and selenium through foliar treatment of a micronutrient cocktail in five countries. *Front. Plant Sci*. **11**, 589835 (2020), doi:10.3389/fpls.2020.589835.
82. M. Schiavon, S. Nardi, F. Dalla Vecchia, A. Ertani, Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant Soil*, 1–26 (2020), doi:10.1007/s11104-020-04635-9.
83. I. Cakmak *et al.*, Fate and bioaccessibility of iodine in food prepared from agronomically biofortified wheat and rice and impact of cofertilization with zinc and selenium. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. **68**, 1525–1535 (2020), doi:10.1021/acs.jafc.9b05912.
84. P. Wójcik, M. Wójcik, Preharvest iodine sprays at high rates are more effective in biofortification of apples than soil application. *Plant Soil*. **465**, 317–334 (2021), doi:10.1007/s11104-021-04992-z.
85. S. Gonzali, C. Kiferle, P. Perata, Iodine biofortification of crops: agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Current Opinion in Biotechnology*. **44**, 16–26 (2017), doi:10.1016/j.copbio.2016.10.004.
86. S. Husted *et al.*, What is missing to advance foliar fertilization using nanotechnology? *Trends in plant science*. **28**, 90–105 (2023), doi:10.1016/j.tplants.2022.08.017.
87. C. O. Dimkpa, P. S. Bindraban, Nanofertilizers: new products for the industry? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. **66**, 6462–6473 (2018), doi:10.1021/acs.jafc.7b02150.
88. J. C. Fanzo *et al.*, Educating and training a workforce for nutrition in a post-2015 world. *Advances in Nutrition*. **6**, 639–647 (2015), doi:10.3945/an.115.010041.
89. D. Hunter *et al.*, The potential of neglected and underutilized species for improving diets and nutrition. *Planta*. **250**, 709–729 (2019), doi:10.1007/s00425-019-03169-4.
90. K. H. M. Siddique, X. Li, K. Gruber, Rediscovering Asia's forgotten crops to fight chronic and hidden hunger. *Nat. Plants*. **7**, 116–122

- (2021), doi:10.1038/s41477-021-00850-z.
91. R. K. Singh, N. Sreenivasulu, M. Prasad, Potential of underutilized crops to introduce the nutritional diversity and achieve zero hunger. *Funct Integr Genomics*. **22**, 1459–1465 (2022), doi:10.1007/s10142-022-00898-w.
92. A. Henry, N. F. Chaves, P. J. Kleinman, J. P. Lynch, Will nutrient-efficient genotypes mine the soil? Effects of genetic differences in root architecture in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on soil phosphorus depletion in a low-input agro-ecosystem in Central America. *Field Crops Res*. **115**, 67–78 (2010), doi:10.1016/j.fcr.2009.10.004.
93. M. H. Zia *et al.*, Site-specific factors influence the field performance of a Zn-biofortified wheat variety. *Front. Sustain. Food Syst*. **4**, 135 (2020), doi:10.3389/fsufs.2020.00135.
94. U. B. Kutman, B. Yildiz, I. Cakmak, Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. *Plant Soil*. **342**, 149–164 (2011), doi:10.1007/s11104-010-0679-5.
95. S. P. Scott *et al.*, Cognitive performance in Indian school-going adolescents is positively affected by consumption of iron-biofortified pearl millet: A 6-month randomized controlled efficacy trial. *The Journal of nutrition*. **148**, 1462–1471 (2018), doi:10.1093/jn/nxy113.
96. L. E. Murray-Kolb *et al.*, Consumption of iron-biofortified beans positively affects cognitive Performance in 18- to 27-year-old Rwandan female college students in an 18-week randomized controlled efficacy trial. *The Journal of nutrition*. **147**, 2109–2117 (2017), doi:10.3945/jn.117.255356.
97. J. A. Paine *et al.*, Improving the nutritional value of Golden Rice through increased pro-vitamin A content. *Nature Biotechnology*. **23**, 482–487 (2005), doi:10.1038/nbt1082.
98. Mallikarjuna Swamy, B. P. *et al.*, Compositional analysis of genetically engineered GR2E «Golden Rice» in comparison to that of conventional rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. **67**, 7986–7994 (2019), doi:10.1021/acs.jafc.9b01524.
99. B. P. Mallikarjuna Swamy *et al.*, Development and characterization of GR2E Golden rice introgression lines. *Sci. Rep*. **11**, 2496 (2021), doi:10.1038/s41598-021-82001-0.
100. J. M. Connorton, J. Balk, Iron biofortification of staple crops: lessons and challenges in plant genetics. *Plant and Cell Physiology*. **60**, 1447–1456 (2019), doi:10.1093/pcp/pcz079.
101. K. R. Trijatmiko *et al.*, Biofortified indica rice attains iron and zinc nutrition dietary targets in the field. *Sci Rep*. **6**, 19792 (2016), doi:10.1038/srep19792.
102. J. Balk *et al.*, Improving wheat as a source of iron and zinc for global nutrition. *Nutr Bull*. **44**, 53–59 (2019), doi:10.1111/nbu.12361.
103. J. M. Matres *et al.*, Genome editing in cereal crops: an overview. *Transgenic Research*. **30**, 461–498 (2021), doi:10.1007/s11248-021-00259-6.
104. J. Li *et al.*, Biofortified tomatoes provide a new route to vitamin D sufficiency. *Nat. Plants*. **8**, 611–616 (2022), doi:10.1038/s41477-022-01154-6.
105. M. van Ginkel, J. Cherfas, What is wrong with biofortification. *Global Food Security*. **37**, 100689 (2023), doi:10.1016/j.gfs.2023.100689.
106. R. DeFries *et al.*, Metrics for land-scarce agriculture: nutrient content must be better integrated into planning. *Science*. **349**, 238–240 (2015).

## AUTOREN, ZITATION UND KONTAKT

**Autoren:** Members of the Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. Patrick H Brown (University of California-Davis, USA), Fang-jie Zhao (Nanjing Agricultural University, China), Ismail Cakmak (Sabanci University, Turkey), Achim Dobermann (International Fertilizer Association, France), Tom Bruulsema (Plant Nutrition Canada), Bruno Gerard (UM6P, Morocco), Mariangela Hungria (Embrapa, Brazil), Kaushik Majumdar (African Plant Nutrition Institute, Morocco), Michael McLaughlin (University of Adelaide, Australia), Bernard Vanlauwe (International Institute of Tropical Agriculture, Kenya), Claudia Wagner-Riddle (University of Guelph, Canada), Xin Zhang (University of Maryland, USA),

**Zitation:** Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. 2023. Plant nutrients are essential for the alleviation of chronic and hidden hunger. Issue Brief 05. Available at <https://sprpn.org>

**Weitere Informationen:** Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, c/o IFA, 49, avenue d'Iéna, 75116 Paris, France; [info@sprpn.org](mailto:info@sprpn.org)