

Cadmium- Grenzwerte in phosphorhaltigen Düngemitteln

Wie wirkt sich Cadmium auf die Ökosystemleistungen, die Agrar- und Ernährungswirtschaft und die Gesundheit in Europa aus, und wie kann Abhilfe geschaffen werden?



OPERA Research bietet einfache und pragmatische Lösungen, um europäische und nationale Entscheidungsprozesse zu unterstützen. Seit 2010 arbeitet das Forschungszentrum und der Think Tank der Università Cattolica del Sacro Cuore mit Landwirten, Verbänden, Nichtregierungsorganisationen und Regierungen zusammen, um Nachhaltigkeit in den Agrar- und Lebensmittelsektor zu fördern. Unsere Vision ist es, qualitativ hochwertige Informationen und Analysen zu den neuesten Entwicklungen in der EU-Agrar- und Ernährungspolitik bereitzustellen und einen ausgewogenen Dialog zwischen den Beteiligten zu fördern. Auf der Grundlage bestehender und neuer Forschungsergebnisse entwickeln wir in Zusammenarbeit mit unseren Partnern klare und pragmatische Ansätze und naturverträgliche Lösungen für die europäische Landwirtschaft.

OPERA Research möchte allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe Bodengesundheit und Bodenfruchtbarkeit für ihren substantiellen Beitrag, ihre konstruktive Haltung und ihre wertvollen Anregungen bei der Erarbeitung des White Books sowie allen Experten danken, die mit ihren Erkenntnissen zur Überarbeitung des Dokuments beigetragen haben.

Die Erstellung dieses Dokuments wurde durch die Unterstützung von Safer Phosphates™ ermöglicht.

OPERA Research, November 2021.

Vorwort

Für das menschliche Auge oft unsichtbar, beeinflusst Verschmutzung viele Aspekte unseres Lebens. Die Verunreinigung des Bodens stellt eine erhebliche Bedrohung für die Gesundheit und Fruchtbarkeit des Bodens dar. Sie beeinträchtigt die Qualität von Lebensmitteln, Wasser und Luft und stellt eine Gefahr für die Umwelt und die menschliche Gesundheit dar.

Um die Lebensmittelsicherheit und die Ernährung auf der ganzen Welt zu gewährleisten, müssen wir unsere Böden kultivieren und schützen. Der Boden erbringt wesentliche Ökosystemleistungen für eine rasch wachsende Bevölkerung und muss vor Verschlechterung, Ertragsminderung und Verunreinigung, wie z. B. Cadmiumrückständen in Phosphatdüngern, die seine Gesundheit gefährden, geschützt werden. Ein umsichtiger Einsatz von Phosphatdüngern erhöht die landwirtschaftliche Produktivität, verringert den Bedarf an zusätzlichen Anbauflächen und hilft, Bodendegradation und Ernteauffälle zu vermeiden.

Die Stellungnahmen von EFSA¹ und ANSES² zeigen eindeutig, dass Phosphatdünger mit hohem Cd-Gehalt zu einer Anreicherung dieses allgegenwärtigen und hochgiftigen Schadstoffs im Boden und zu einer Übertragung in die Nahrungskette führen, die der Umwelt und der menschlichen Gesundheit schweren Schaden zufügen kann.

Trotz einer lebhaften wissenschaftlichen und politischen Diskussion fehlen in Europa seit etwa drei Jahrzehnten entscheidende Maßnahmen zur Minimierung von Cd in Düngemitteln, seiner Anreicherung im Boden und seiner Übertragung auf Nutzpflanzen. OPERA schließt sich den vielen Stimmen an, die dringende Maßnahmen fordern, um den Verkauf von ausschließlich Cd-armen Düngemitteln zu empfehlen, Ökolabels und grüne Aufkleber informativ und präzise zu gestalten und in Schulungs- und Beratungsprogramme für Landwirte zu investieren.



Prof. Ettore Capri
Direktor, OPERA Forschung

INDEX

Zusammenfassung	7
Was steht auf dem Spiel?	10
Was ist Cadmium?	12
Warum enthalten Düngemittel Cadmium?	13
Wie der Boden Cadmium zurückhält	15
Anreicherung von Cadmium im Boden	16
Wie Kulturpflanzen Cadmium aufnehmen	17
Überwachung des Bodenzustands	19
Die Auswirkungen von Cadmium auf die menschliche Gesundheit	20
Wie die EU-Düngemittelpolitik das Thema widerspiegelt	21
Wie andere EU-Verordnungen das Problem widerspiegeln	22
Nationale Cadmium-Grenzwerte der EU und der EU Mitgliedstaaten	23
Wie der GAP-Überprüfungsprozess das Thema widerspiegelt	24
Empfehlungen	25
Schlussfolgerungen	26
Anmerkungen	28

Zusammenfassung

Cadmium (Cd) ist ein Schwermetall, das sich im Boden und in lebenden Organismen anreichert und schwere und dauerhafte Schäden verursacht. Sein Vorkommen im Boden hängt weitgehend von der Verwendung von **Phosphatdüngern ab**³. Phosphatdünger werden aus Phosphorit- und Apatit Gestein hergestellt, das neben Phosphatdioxid auch mehrere andere Mineralien, darunter Cd, enthält. Die in Phosphatdüngern enthaltene Cd-Menge hängt von der Art des Phosphorit- und Apatit Gesteins (mit niedrigem oder hohem Cd-Gehalt) ab. Wenn Cd mit dem Boden in Berührung kommt, wird es aufgrund der organischen Beschaffenheit des Bodens zurückgehalten und für die Pflanzen leicht verfügbar gemacht⁴.

Die **europäischen Böden weisen** aufgrund der milden Temperaturen und der langanhaltenden sommerlichen Trockenheit **ideale Eigenschaften für die Anreicherung von Cd auf**. Darüber hinaus kann die hohe Mobilität von Cd im Oberflächen- und Grundwasser dazu führen, dass aus einer punktuellen Kontamination schnell eine diffuse Kontamination wird. Sobald die Kulturpflanzen Cd aufnehmen, gelangt es in die Nahrungskette.

Lebensmittel sind die Hauptquelle der Cd-Exposition (für die nicht rauchende Bevölkerung)^{5/6}, wobei Getreide, Nüsse und Hülsenfrüchte, stärkehaltige Wurzeln, Kartoffeln und Fleisch den größten Beitrag leisten. Die fortschreitende Anreicherung von Cd im Menschen beeinträchtigt die Nierenfunktion, wirkt sich auf die Leber aus und verursacht eine Demineralisierung der Knochen.

Die Einstufung von Cd als Karzinogen für den Menschen geht auf die 1990er Jahre zurück. Die Europäische Union hat die Verordnung (EU) 2019/1009 erlassen, die den Cd-Gehalt in Phosphatdüngern auf 60 mg/kg begrenzt.



Das Verbot des Inverkehrbringens von Phosphatdüngern mit einem Gehalt von mehr als 60 mg/kg wird am 16. Juli 2022 in Kraft treten. Dieser Schwellenwert scheint im Vergleich zu den Cd-Grenzwerten in einigen EU-Ländern unzureichend: 12 Mitgliedsstaaten haben einen Cd-Grenzwert zwischen 20 und 50 mg Cd/kg P₂O₅, 8 haben den gleichen Grenzwert wie

in der Verordnung vorgeschlagen und 2 haben einen höheren Grenzwert.

Düngemittel mit niedrigem Cd-Gehalt, deren Schwellenwert nicht über 20 mg Cd/kg P₂O₅ liegt, würden die Bioakkumulation wirksam begrenzen⁷. Inzwischen wird in der bevorstehenden neuen GAP-Vereinbarung ausdrücklich auf den Schutz der Bodengesundheit und -fruchtbarkeit sowie auf die Begrenzung von Schadstoffen in Düngemitteln hingewiesen⁸.

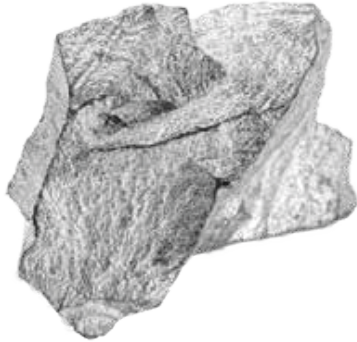
Darüber hinaus hat das Europäische Parlament in seinem Bericht zur “Farm to Fork”-Strategie vom Oktober 2021 betont, dass Schwermetalle Teil der Bewertung der nachhaltigen Nutzung von Düngemitteln sein sollten.

Es ist an der Zeit, eine Kombination aus harten und weichen Rechtsvorschriften für Cd einzuführen, einschließlich einer Verordnung mit strengen Grenzwerten und genauer Kennzeichnung, Subventionen für Landwirte und Anreizsystemen für Akteure der Wertschöpfungskette, die freiwillige Systeme fördern.

Cadmium-Grenzwerte in Phosphordüngern

Die Verunreinigung des Bodens stellt eine erhebliche Bedrohung für die Gesundheit und Fruchtbarkeit des Bodens dar. Sie beeinträchtigt die Qualität von Lebensmitteln, Wasser und Luft und stellt eine Gefahr für Umwelt und menschliche Gesundheit dar.

Was ist Cadmium?



Cd
Kadmium

Cadmium (Cd) ist ein Schwermetall, das sich im Boden und in lebenden Organismen anreichert und diese schwer und dauerhaft schädigt. Das Vorhandensein von Cadmium in Böden hängt weitgehend von der Verwendung von Phosphatdüngern ab. Sobald Kulturpflanzen Cadmium über Düngemittel aufnehmen, gelangt es in die Nahrungskette.



In Europa und Eurasien ist die Bodenverschmutzung die drittgrößte Umweltbedrohung. Kupfer (wenn als Pflanzenschutzmittel verwendet) und Kadmium (in Verbindung mit Phosphatdüngern) sind die häufigsten und am weitesten verbreitete Ursache für Verunreinigungen in landwirtschaftlichen Böden in Europa.

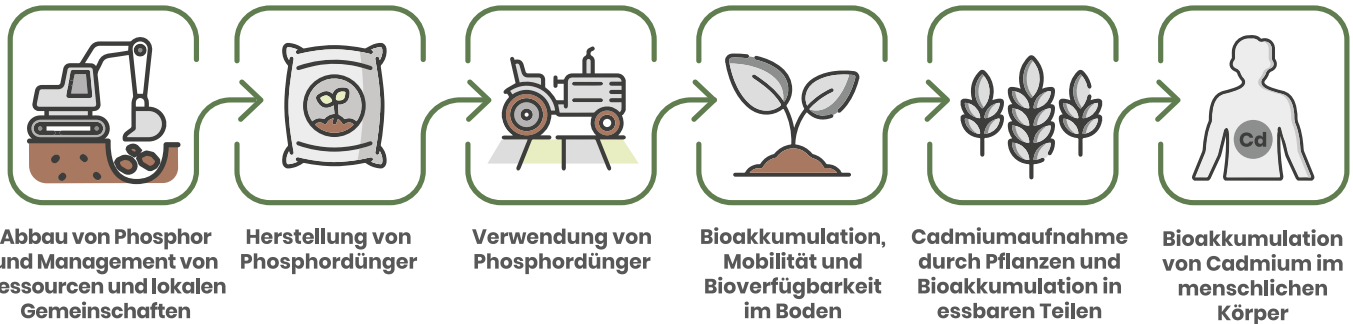


Lebensmittel sind die Hauptquelle der Belastung, wobei **Getreide, Nüsse und Hülsenfrüchte, Wurzeln, Kartoffeln und Fleisch** den größten Beitrag leisten.



Die fortschreitende Anreicherung von Cd beim Menschen beeinträchtigt die **Nierenfunktion, schädigt die Leber und führt zu Knochenabbau.**

Lebenszyklus von Cadmium in Phosphordüngern



Was wird unternommen?

Die Europäische Union wird das Inverkehrbringen von Phosphatdüngern mit einem **Cadmiumgehalt von mehr als 60 mg/kg im Juli 2022 verbieten.**

Düngemittel mit niedrigem Cadmiumgehalt (nicht mehr als 20 mg/kg) wären mehr erfolgreich das Eindringen von Cadmium in die Lebensmittelkette zu reduzieren.



Das ist nicht genug. Was muss getan werden?

- 1 Einführung der harmonisierten europäischen "Toleranzschwelle" für Cadmium auf dem niedrigsten Niveau möglich (20mg/kg).**
- 2 Einführung einer klaren Kennzeichnung für Phosphordünger.**
- 3 Anreize für Landwirte schaffen, Düngemittel mit geringerem Cadmiumgehalt zu verwenden, etwa durch GAP-Subventionen, Aufklärung und andere Anreize.**
- 4 Schaffung eines Umfelds, das es benachbarten Sektoren ermöglicht, durch freiwillige Maßnahmen zu kontinuierlichen Verbesserungen beizutragen.**
- 5 Ausweitung und Harmonisierung der Boden- und Wasserüberwachungssysteme in Europa.**

Was steht auf dem Spiel?

Mehrere Studien weisen darauf hin, dass Mineraldünger⁹ eine wichtige Quelle für die Verunreinigung der landwirtschaftlichen Böden und damit auch der Ernährung der Europäer mit Cadmium (Cd) ist. **Cd ist ein giftiger Schadstoff, der schwerwiegende und oft irreversible Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit¹⁰ und natürliche Ökosysteme^{11/12/13} haben kann.** Die Verwendung von mineralischen Phosphordüngern (P) ist hauptsächlich für die Anreicherung von Cd in landwirtschaftlichen Böden und Wassereinzugsgebieten verantwortlich¹⁴.

45%

Cd-Kontamination der Anbauflächen durch P-Dünger



Durch die Anreicherung im Boden erhöht sich der Cd-Gehalt in den Pflanzen und die Möglichkeit, dass der Mensch Mengen aufnimmt, die über dem Schwellenwert liegen, bei dem keine gesundheitsschädlichen Auswirkungen auftreten^{15/16/17/18/19/29/21/22}. Darüber hinaus kann Cd in Süßwasserreservoirs und Tierfutter gelangen^{23/24/25/26}.

In Europa tragen mineralische P-Dünger zu 45% der gesamten Cd-Kontamination von Ackerland bei. Gleichzeitig sind 55 % der gesamten Cd-Aufnahme des europäischen Durchschnittsverbrauchers auf die Nahrungsaufnahme von Cd-belasteten Böden zurückzuführen^{27/28/29/30}. Die langfristigen Folgen der Cd-Kontamination für das Ökosystem des Bodens sind nicht vollständig vorhersehbar^{31/32/33}.

Darüber hinaus zeigen einige Studien, dass selbst eine diffuse Kontamination mit niedrigen Konzentrationen bei effizientem Cd-Transfer vom Boden auf die Pflanzen zu Cd-Anreicherungen in essbaren Pflanzenteilen führen kann, die die für den menschlichen Verzehr empfohlenen Werte überschreiten. Dies gilt selbst dann, wenn die Pflanzen keine Toxizitätssymptome zeigen³⁴. Allein diese Unsicherheiten sprechen dafür, dass die Einführung strengerer Grenzwerte, die die Gesamtauswirkungen der Cd-Akkumulation, die Verschmutzung der landwirtschaftlichen Böden und der natürlichen Ökosysteme in Europa verringern können, eine angemessene Lösung des Problems darstellt^{35/36}.

In diesem Zusammenhang ist die Verordnung (EU) 2019/1009 ein wichtiger Schritt, da sie dazu beiträgt, strengere Grenzwerte für Cd in Düngemitteln festzulegen und die Bioakkumulation in landwirtschaftlichen Böden zu begrenzen.

In Anbetracht der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse und Überwachungsdaten können wir jedoch nicht umhin, die Maßnahme als unzureichend zu betrachten, um das Cd-Risiko vollständig anzugehen.

Was ist Cadmium?

Cadmium (Cd) ist ein silbrig-weißes, weiches und dehnbares Metall. Es kommt in der Natur relativ selten vor und gehört zusammen mit 20 anderen Mineralien zur Gruppe der so genannten "Schwermetalle", ein Name, der sich von dem für diese Elemente typischen hohen Molekulargewicht ableitet². Es kann durch natürliche Aktivitäten, wie Erosion, Flusstransport und vulkanische Aktivitäten und vor allem durch die Verwendung von Phosphatdüngern in die Umwelt gelangen, was zu diffuser und punktueller Verschmutzung führen kann³⁷.

Cd ist nach Quecksilber (Hg) und Blei (Pb) der drittgefährlichste Schadstoff für die Umwelt. Es ist biopersistent und kann, wenn es einmal von einem Organismus aufgenommen wurde, viele Jahre lang in ihm verbleiben. Die US Environmental Protection Agency (US EPA, 2021) und die International Agency for Research on Cancer (IARC 2021) stufen Cd als krebserregend für den Menschen ein, da es sich im Körper anreichern und schwere und dauerhafte Schäden verursachen kann.

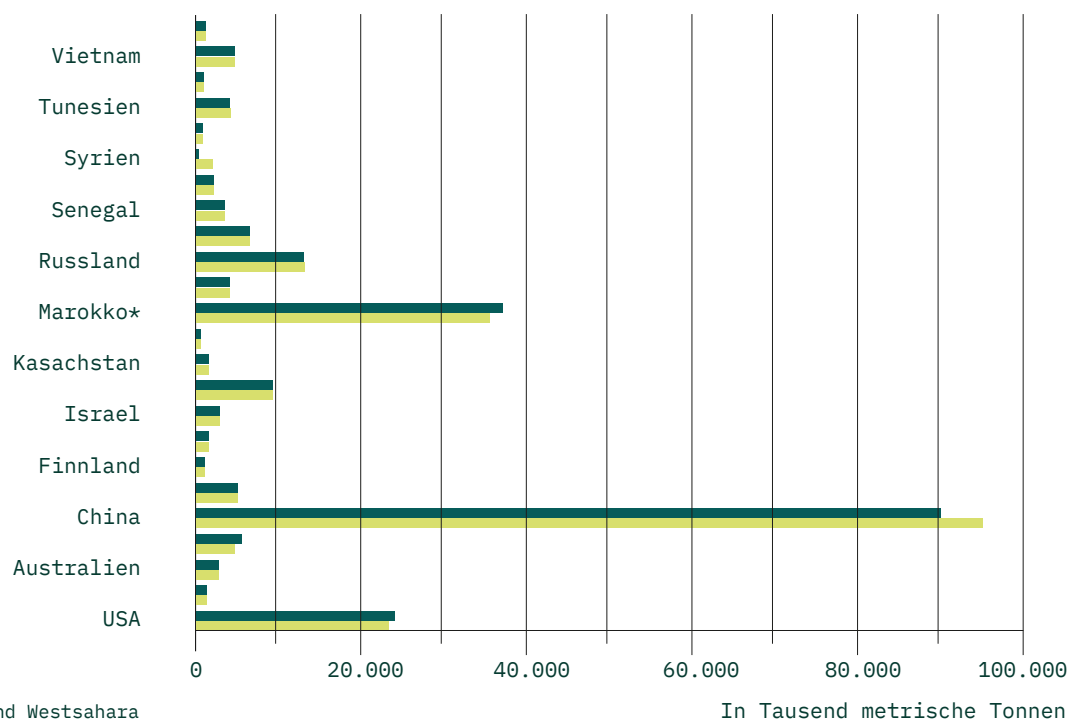
Warum enthalten Düngemittel Cadmium?

Cadmium (Cd) in Phosphatdüngern hängt von Phosphatgestein (Apatit und Phosphorit) ab, das in der Regel Phosphatdioxid (P_2O_5), Kalk, Ton, Gips, Dolomit, Kieselsäure und verschiedene andere Mineralien enthält, darunter Schwermetalle und Metalloide wie Cd, Pb und Arsen (As). Bei der Herstellung von Phosphordüngern werden diese Verunreinigungen zusammen mit Phosphaten in das Endprodukt eingebracht.

Verschiedene Arten von Phosphatgestein³⁸ weisen unterschiedliche Cd-Gehalte auf. Daher ist Cd in erheblichen Mengen in Düngemitteln enthalten, die aus Mineralien, die

PHOSPHATE ROCKS EXTRACTION ACCORDING TO UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY 2020

● 2020 ● 2019



(United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2020)

bereits von Natur aus einen hohen Cd-Gehalt aufweisen. Die Herstellung von Phosphatdüngern aus Gestein mit geringem Cd-Gehalt würde immer zu Produkten mit geringem Cd-Gehalt führen³⁹.

Cadmium ist in allen Phosphatgesteinen enthalten.

Die Konzentrationen variieren jedoch je nach Herkunft der Gesteine. Eruptive oder Apatit Gesteine weisen sehr niedrige Cadmiumkonzentrationen auf (Teilweise sogar weniger als 1 mg pro kg P₂O₅). Während Sedimentgesteine enthalten Cadmium in Konzentrationen von weniger als 20 bis zu mehr als 200 mg pro kg P₂O₅⁴⁰.

CADMIUMGEHALTE IN PRIMÄREN HANDELSÜBLICHEN PHOSPHATGESTEINEN NACH VERSCHIEDENEN QUELLEN⁴⁰.

Herkunft	Cadmiumgehalt (mg pro kg P₂O₅)		
	(1)	(2)	(3)
IGNEOUS			
Kola (Russland)	< 13	0.3	0.25
Phalaborwa (Südafrika)	< 13	0.1	0.38
SEDIMENTÄR			
Florida (USA)	23	19.8 - 32.7	24
Jordanien	< 30	12.01.28	18
Khouribga (Marokko)	46	17 - 63	55
Syrien	52	13 - 46	22
Algerien	60	42 - 62.6	
Ägypten	74		
Bu-Cra (Marokko)	100	101 - 115	97
Nahal Zin (Israel)	100	81 - 112	61
Youssoufia (Marokko)	121	164.7	120
Gafsa (Tunesien)	137	94	173
Togo	162	164 - 179	147
North Carolina (USA)	166	125	120
Taiba (Senegal)	203	165 - 180.6	221
Nauru	243		

Quellen: **(1)** Davister (1996); **(2)** Botschek und Van Balken (1999); **(3)** Demandt (1999).

Wie der Boden Cadmium zurückhält

Wenn ein Phosphordünger mit dem Boden in Kontakt kommt, durchläuft er verschiedene biochemische, mikrobiologische und physikalische Prozesse, durch die er schrittweise abgebaut, reduziert und im Boden zurückgehalten wird. Die Schadstoffe im Dünger folgen demselben Schicksal⁴¹. Die Fähigkeit des Bodens, Stoffe zurückzuhalten, ist der Grund für die Anreicherung schädlicher Verbindungen⁴². Im Falle von Cd spielen sowohl die organische Substanz als auch der Ton eine wesentliche Rolle bei der Absorptions- und Rückhaltefähigkeit des Bodens. Sandige Böden hingegen erleichtern das Eindringen von Cd in das Grundwasser und Flüsse⁴³.

Je nach Boden- und Klimateigenschaften sind die verschiedenen Ökosysteme unterschiedlich widerstandsfähig gegen mögliche Schäden. Böden können sich von Verunreinigungen erholen und im Laufe der Zeit regenerieren. Allerdings können spontane und natürliche Regenerationen komplexer sein, wenn äußere Einflüsse vorhanden sind, die die Reaktions- und Anpassungsfähigkeit des Ökosystems ständig verändern^{44/45}. Dies kann z. B. ein kontinuierlicher Düngungsprozess sein, der sich über Jahre hinweg in allen ländlichen Gebieten Europas hinzieht.

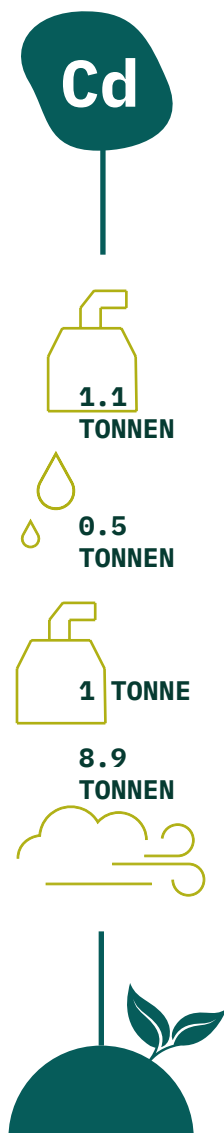


+ 1 %

The Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity, and the Environment (CSTEE) estimated that the annual net accumulation of cadmium (Cd) in the soil is about 1% of the amount already present in agricultural soils.

Anreicherung von Cadmium im Boden

Im Jahr 2002 schätzte der *Wissenschaftliche Ausschuss für Toxizität, Ökotoxizität und Umwelt* (CSTEE), dass die jährliche Nettoakkumulation von Cadmium (Cd) im Boden etwa 1 % der bereits in landwirtschaftlichen Böden vorhandenen Menge beträgt. Die europäischen Mitgliedstaaten, die spezifische Risikobewertungen durchgeführt haben, kamen zu dem Schluss, dass die jährliche Nettoakkumulation allein durch Phosphatdünger (mit einem geschätzten Cd-Gehalt von 60 mg/kg P_2O_5) zwischen 0,4 und 1,25 % der bereits in landwirtschaftlichen Böden vorhandenen Menge liegt.



Aus der Literatur geht auch hervor, dass sich der Beitrag der Cd-Kontamination durch die Ausbringung von Phosphatdünger auf landwirtschaftlichen Flächen in gefährlicher Weise mit dem Beitrag anderer Quellen überschneidet. Eine Schätzung der Cd-Belastung in der Schweiz im Jahr 1990 zeigt, dass jährlich etwa 1,1 Tonnen Cd durch Mineraldünger, 0,5 Tonnen durch Klärschlamm, 1 Tonne durch organische Düngemittel und 8,9 Tonnen durch atmosphärische Deposition in die landwirtschaftlichen Böden eingetragen wurden⁴⁶.

Faktoren wie der Cd-Gehalt, das Klima, der pH-Wert des Bodens, die organische Substanz, der Salzgehalt, die Bodenbearbeitung, Makro- und Mikronährstoffe, die Art des Ausgangsgesteins, die Pflanzenarten und -sorten spielen eine wesentliche Rolle bei der Bioakkumulation im Boden und haben langfristige Auswirkungen auf die ökologischen Systeme und die Gesundheit der Lebewesen. In Europa reichert sich Cd aufgrund der milden Temperaturen und der lang anhaltenden sommerlichen Trockenheit eher in den Oberflächenschichten des Bodens an. Dort ist die Präsenz von Mikrofauna und Wurzelpilzen, die die Aufnahme von Mineralstoffen effizient erleichtern können, besonders hoch⁴⁷.

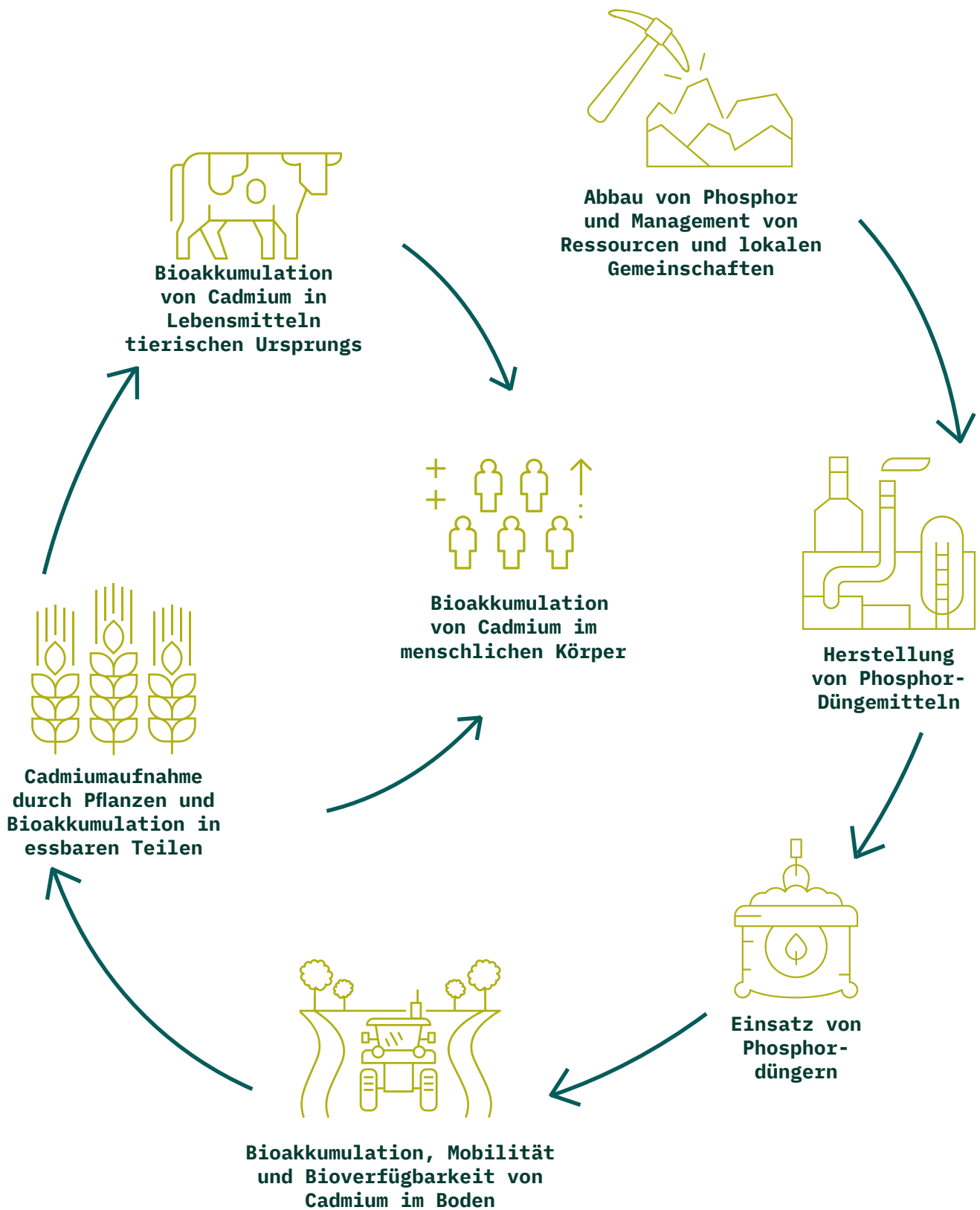
Wie Kulturpflanzen Cadmium aufnehmen

Obwohl Cd ein für Pflanzenorganismen nicht essentielles Element ist, hat es eine hohe Übertragungsrate vom Boden auf die Pflanze. Es verhält sich sehr ähnlich wie Zink (Zn), ein Element, das für eine gute Entwicklung von Pflanzen und Menschen notwendig ist. Wenn die mineralische Versorgung des Bodens mit Zn nicht ausreicht, um den Bedarf der Pflanzen zu decken, wird aufgrund der Ähnlichkeit zwischen den beiden Elementen, Cd anstelle von Zn durch die Pflanze aufgenommen⁴⁸.

Darüber hinaus kann organisches Material mineralische Elemente binden, so dass sie für Pflanzen leicht verfügbar sind. Aus diesem Grund wird die Fähigkeit der Pflanzen, Cd aufzunehmen, erheblich beeinträchtigt, da sich das Wurzelsystem bevorzugt in oberflächlichen Horizonten entwickelt, in denen Cd normalerweise stärker vorhanden ist.

Die Cd-Kontamination ist ein bedeutender Stressfaktor für Pflanzen und kann zytotoxische und genotoxische Auswirkungen haben. Darüber hinaus kann das Wachstum und das Fortpflanzungspotenzial der Pflanze negativ beeinflusst werden⁴⁹.

Selbst wenn, eine niedrige Konzentration der Bodenkontamination besteht, kann in Verbindung mit einer effizienten Übertragung von Cd vom Boden Richtung Pflanzen bedeuten, dass die essbaren Pflanzenteile selbst bei einer geringen Kontamination und selbst dann, wenn die Pflanzen keine Toxizitätssymptome zeigen, eine höhere Cd-Anreicherung aufweisen können, als für den menschlichen Verzehr zulässig ist⁵⁰. Diese Auswirkung kann bei Pflanzen, die in aquatischen Ökosystemen wachsen, am stärksten sein⁵¹.



LEBENSZYKLUS VON CADMIUM IN PHOSPHORDÜNGERN

Überwachung des Bodenzustands

In Europa und Eurasien ist die Bodenverschmutzung die drittgrößte Umweltgefahr⁵². Nach den jüngsten von der *Europäischen Umweltagentur* (EUA 2021) veröffentlichten Daten gibt es **in Europa mehr als 2,5 Millionen** kontaminierte oder potenziell **kontaminierte Standorte**⁵³, wobei Schwermetalle der häufigste Schadstoff sind.

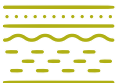
Europäische Überwachungsprogramme zeigen eine weit verbreitete Kontamination in Oberflächengewässern (Deutschland, Slowakei) und Böden (Griechenland, Italien, Frankreich, Österreich, Irland)⁵⁴. Weitere Analysen zeigen, dass Kupfer (Cu) (als Pflanzenschutzmittel verwendet) und Cd (in Verbindung mit Phosphatdüngern) die häufigsten und am weitesten verbreiteten Kontaminanten in europäischen landwirtschaftlichen Böden sind (EUA, 2010).

2.5 Mil.

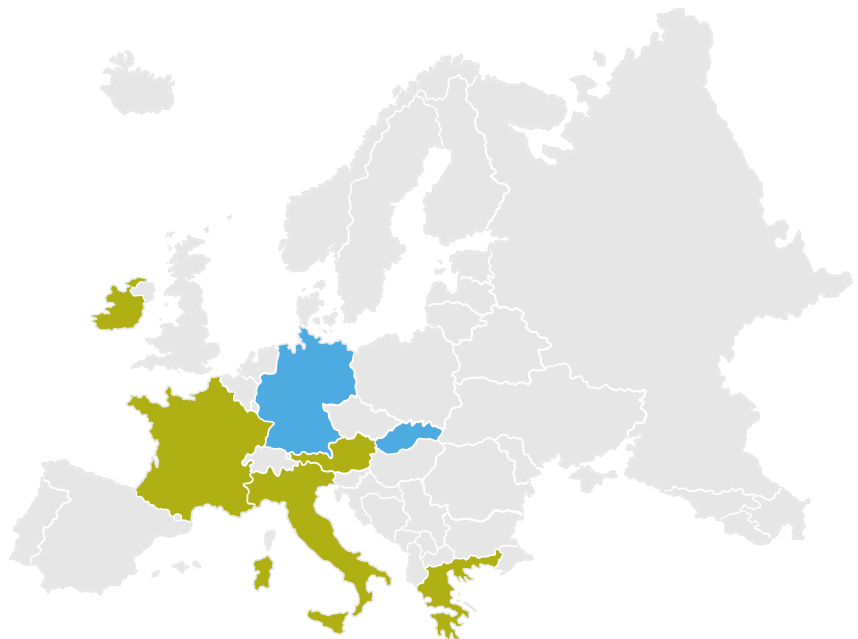
KONTAMINIERTER
STANDORTE IN EUROPA



Kontamination in
Oberflächengewässern
Deutschland und Slowakei



Kontamination von
Oberflächenböden
*Griechenland, Italien,
Frankreich, Österreich,
Irland*



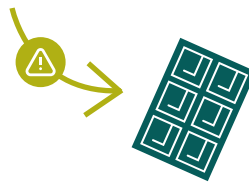
Die Auswirkungen von Cadmium auf die menschliche Gesundheit



In der wissenschaftlichen Literatur wird Cadmium (Cd) als ein für lebende Organismen nicht essentielles Element bezeichnet. Cd ist vor allem giftig für die Nieren und die Leber, kann eine Demineralisierung der Knochen verursachen und ist als Karzinogen für den Menschen eingestuft (IARC, 2021; EFSA, 2021; ANSES, 2021).

Lebensmittel sind die Hauptquelle der Cd-Exposition^{55/56/57}. Getreide, Gemüse, Nüsse und Hülsenfrüchte, stärkehaltige Wurzeln und Kartoffeln sowie Fleisch tragen am meisten zur Exposition des Menschen. Hohe Konzentrationen kommen auch in Algen, Fisch und Meeresfrüchten, Nahrungsergänzungsmitteln, Pilzen und Schokolade vor. Angesichts der geringeren durchschnittlichen Aufnahme sind dies in der Regel keine signifikanten Expositionsquellen.

Allerdings wird Schokolade relevant, wenn es um die Aufnahme durch Kinder geht.



Wie die EU-Düngemittelpolitik das Thema widerspiegelt

Die Europäische Union ist seit den 1970er Jahren über Cd besorgt, aber erst im **Juni 2019**⁵⁹ hat die EU offiziell die Verordnung 2019/1009 erlassen, mit der **Grenzwerte für den Cd-Gehalt in Phosphordüngern von 60 mg/kg**⁶⁰ eingeführt wurden.

Mit dieser Bestimmung hat die EU den regulativen Grundsatz des „precautionary principle“ und des Stillstandes genutzt, indem sie einen Schwellenwert auf der Grundlage der geschätzten durchschnittlichen Cd-Akkumulation in den Böden der EU festlegte und keinen kontinuierlichen Reduktionsplan vorsah. Die Bioverfügbarkeit (für die Aufnahme durch Nutzpflanzen), Mobilität und potenzielle Kontamination von Oberflächen- und Grundwasser hat bei der Bewertung keine gleichberechtigte Rolle gespielt haben, so dass viele der bei der Diskussion der Vorschrift vorgebrachten Bedenken in Bezug auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit nicht berücksichtigt wurden^{61/62/63/64/65/66}.

Darüber hinaus wurde ein **Schwellenwert von 60 mg/kg P₂O₅ bereits nach der** Stellungnahme des Wissenschaftlichen Ausschusses für Toxizität, Ökotoxizität und Umwelt aus **dem Jahr 2002 in Frage gestellt** und durch das von Römken 2018 entwickelte Modell, das eine Anreicherung von Cd bereits bei einem Schwellenwert von 20 mg/kg P₂O₅⁶⁷ voraussagt, völlig überholt.

Wie andere EU-Verordnun- gen das Problem widerspiegeln

Die EU möchte als die fortschrittlichste Region im Bereich des Bodenschutzes und der Bodenerhaltung gelten^{68/69/70/71}, aber trotz der politischen Bedeutung, die diesem Thema beigemessen wird, fallen bodenbezogene Maßnahmen in die alleinige Zuständigkeit der Mitgliedstaaten.

Im Allgemeinen haben sie keinen kohärenten regionalen Ansatz. Darüber hinaus gibt es in der EU keine umfassende und rechtsverbindliche rechtliche Regelung für den Boden (Castelo-Grande et al., 2018), und dies trotz des Zusammenspiels verschiedener kontextbezogener Rechtsrahmen (GAP, Wasserrichtlinien, Stickstoffrichtlinie), die den Boden und die Düngemittel regeln, jedoch mit eingeschränkten Ergebnissen^{72/73/74/75/76}.

Nationale Cadmium- Grenzwerte der EU und der EU Mitgliedstaaten

Harmonisierte Vorschriften schaffen einen transparenten und berechenbaren Rechtsrahmen für alle Unternehmen (z. B. Anbieter von Agrartechnologie, Landwirte, Lebensmittelverarbeiter und -händler). Dies ist eine Voraussetzung für einen gesunden Wettbewerb und ein größeres Bewusstsein für Risiken und Strategien zur Risikominderung entlang der Wertschöpfungskette ist.

Der Höchstschwellenwert von 60 mg/kg P₂O₅ wird 2022 in einer EU in Kraft treten. 12 Mitgliedstaaten wenden bereits niedrigere Schwellenwerte an, 8 Mitgliedstaaten haben ähnliche Werte und 2 Mitgliedstaaten haben einen höheren Schwellenwert festgelegt⁷⁷. Daher ist es schwierig dies als Durchbruch oder Harmonisierung des Binnenmarktes zu betrachten⁷⁸; (Schroeder, Anggraeni und Weber, 2019)⁷⁹.

Wie der GAP-Überprüfungsprozess das Thema widerspiegelt

Im Oktober 2020 hat das Europäische Parlament im Rahmen der laufenden GAP-Überprüfung erfolgreich einige Änderungen⁸⁰ angenommen, die die GAP mit der Reduzierung von Schwermetallen in Düngemitteln verknüpfen. Der Text war Teil der Verhandlungsposition des Europäischen Parlaments gegenüber dem Rat. Im Juni dieses Jahres bestätigten die EU-Agrarminister die vorläufige Einigung mit dem Europäischen Parlament über die GAP-Reform.

Am 9. September 2021 billigte der AGRI-Ausschuss des Europäischen Parlaments mit großer Mehrheit das gesamte GAP-Paket, auf das man sich während des informellen Trilogs im Juni geeinigt hatte. Die vorläufige Einigung enthält einen ausdrücklichen Verweis auf den Schutz der Bodengesundheit und -fruchtbarkeit und die Reduzierung von Schadstoffen in Düngemitteln.

Sofern die derzeitige Bestimmung in das endgültige Abkommen aufgenommen wird, könnten finanzielle Anreize für Landwirte die Verwendung von Phosphaten mit niedrigem Cd-Gehalt vorschreiben⁸¹.



EMPFEHLUNGEN

Soil is particularly vulnerable, and with it, our agri-food systems and our health as consumers.

We must pursue ambitious approaches to both continuing to improve fertility and control contamination. We need a combination of hard and soft law:

- **Festlegung harmonisierter europäischer Grenzwerte** für Phosphordünger zum Schutz der am meisten gefährdeten Umwelt und Bevölkerung.
- Die **Landwirte sollen dazu angeregt werden**, ihre Nutzungs- und Bewirtschaftungspraktiken kontinuierlich zu verbessern.
- **Schaffung eines Umfelds**, das es benachbarten Sektoren ermöglicht, durch freiwillige Maßnahmen zu kontinuierlichen Verbesserungen beizutragen.

In der Praxis müsste die EU die Wirksamkeit der Verordnung (EU) 2019/1009 überdenken, indem sie strenge Schwellenwerte für Cd setzt und eine genaue Kennzeichnung für Phosphordünger einführt, welche die Cross-Compliance und die Anreize der GAP zugunsten eines Mindeststandards und freiwilliger Regelungen überdenkt⁸².

Die EU sollte die “Toleranzschwelle” so niedrig wie möglich ansetzen (z. B. 20 mg/kg)⁸³, da es global gesehen viele Lagerstätten mit Phosphatmineralien vorhanden sind, welche einen geringen Cd-Gehalt aufweisen⁸⁴. Darüber hinaus werden die Gewinnungsmethoden ständig verbessert, so dass die Anzahl und Menge der Verunreinigungen reduziert werden kann⁸⁵.

Schlussfolgerungen

Die Sorge über die Gesundheit und Fruchtbarkeit der Böden und ihre Auswirkungen auf die Lebensmittelsicherheit und die öffentliche Gesundheit haben in den letzten Jahrzehnten aufgrund des zunehmenden Bewusstseins über der Verschlechterung und Verunreinigung der europäischen Böden an Bedeutung gewonnen.

Die Bodenqualität und die Gesundheit der Verbraucher sind durch die Bioakkumulation von Cadmium (Cd) in Böden und die Bioverfügbarkeit von Cd in organischem Material gefährdet. Die Anreicherung hängt hauptsächlich von der Verwendung von Phosphatdüngern mit hohem Cd-Gehalt ab. Die Bioverfügbarkeit hängt von der gleichen natürlichen Bodenzusammensetzung, dem Wasserreichtum und dem milden Klima ab, die Europa zu einem fruchtbaren Land mit hoher Produktivität und lebendiger Agrobiodiversität machen.

Aufgrund der hohen Mobilität von Cd im Oberflächen- und Grundwasser wird aus einem lokalen Problem schnell eine weit verbreitete Kontamination.

Eine Begrenzung der Bioakkumulation ist möglich durch Phosphordünger mit niedrigem Cd-Gehalt, klare Kennzeichnung, Subventionen und Anreize für Landwirte im Zusammenhang mit der Verwendung von Düngemitteln mit niedrigem Cd-Gehalt, Anreize für freiwillige Initiativen von Akteuren der Wertschöpfungskette sowie Boden- und Wasserüberwachung.

Gemeinsam werden diese Programme die ordnungsgemäße Bewirtschaftung und die Abschwächung der Auswirkungen der Cd-Kontamination fördern.

Weitere Forschungen über Düngemittelproduktionsmethoden und die Gesundheit und Fruchtbarkeit des Bodens sind entscheidend für die Entwicklung geeigneter Maßnahmen zur Vermeidung oder Abschwächung potenzieller Schäden. Darüber hinaus müssen die Überwachungssysteme in Europa erweitert, verbessert und harmonisiert werden.

Die Arbeiten zur Erreichung dieses Ziels schreiten stetig voran. Die jüngsten politischen Diskussionen und Vereinbarungen zur Einbeziehung dieses Themas in die GAP gehen in die richtige Richtung. Die Europäische Union steht kurz davor, ihr Konzept für die Gesundheit des Bodens und des Menschen so zu verfeinern, dass es mit ihrer langfristigen Vision und ihren Zielen übereinstimmt und mit den Bedürfnissen des Agrar- und Ernährungssektors vereinbar ist. Momentan ist jedoch ein kritischer Zeitpunkt, an dem alle Interessengruppen aufgerufen sind, diesen entscheidenden Wandel der europäischen Lebensmittelsysteme zu unterstützen.

Schließlich können wir die Bedeutung der Kennzeichnung, der Aufklärung über den nachhaltigen Einsatz von Düngemitteln und der Kommunikation nicht hoch genug einschätzen. Die moderne Landwirtschaft erfordert bessere technische Kenntnisse und Fähigkeiten für die Anwendung in den Betrieben und eine bessere Kommunikation, um das Vertrauen der Verbraucher zu erhalten.

ANMERKUNGEN

¹ <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2903/j.efsa.2009.980>

² <https://www.anses.fr/fr/system/files/VSR2015SA0140.pdf>

³ Global assessment of soil pollution: Report, FAO and UNEP, 2021, <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cb4894en>

⁴ Apatit und Phosphorit sind die wichtigsten natürlichen Phosphatmineralgruppen und kommen in Eruptivgestein bzw. Sedimentablagerungen vor.

Der überwiegende Teil der jährlichen Weltproduktion von Rohphosphat (47 Millionen Tonnen) stammt laut Literatur, die Daten über mehr als 1.600 Phosphatlagerstätten, Minen und Vorkommen enthält aus sedimentären Ablagerungen. Große (sedimentäre) Vorkommen gibt es in Nordafrika, China, im Nahen Osten und in den Vereinigten Staaten, und (eruptive) in Brasilien, Kanada, Finnland, Russland und Südafrika. Darüber hinaus enthalten die kontinentalen Hochebenen und die Seeberge des Atlantiks und des Pazifiks bedeutende Phosphatvorkommen. Der weltweite Vorrat an Rohphosphat übersteigt 300 Milliarden Tonnen, und es wird nicht mit einer Verknappung gerechnet. USGS Phosphate Rock Statistics and Information, 2021, <https://www.usgs.gov/centers/nmic/phosphate-rock-statistics-and-information> Cooper, J., Lombardi, R., Boardman, D. and Carliell-Marquet, C., 2011. The future distribution and production of global phosphate rock reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, [online] 57, pp.78–86. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.009>

⁵ Qin, S., Liu, H., Nie, Z., Rengel, Z., Gao, W., Li, C. and Zhao, P., 2020. Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: A review. *Pedosphere*, [online] 30(2), pp.168–180. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60002-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60002-9).

⁶ Authority (EFSA), E.F.S., 2009. Cadmium in food - Scientific opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. *EFSA Journal*, [online] 7(3), p.980. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.980>.

⁷ Laut dem Wissenschaftlichen Ausschuss für Toxizität, Ökotoxizität und Umwelt (CSTEE) ist bei Düngemitteln mit 20 mg Cd/kg P₂O₅ oder weniger in den meisten Böden nicht mit einer langfristigen Akkumulation im Boden zu rechnen: https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/sct/documents/out162_en.pdf.

In der interinstitutionellen Vereinbarung über die neue Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) der EU, die im Sommer 2021 zwischen dem Rat der EU und dem Europäischen Parlament geschlossen wurde, werden die EU-Mitgliedstaaten ausdrücklich aufgefordert, im Rahmen der GAP-Strategiepläne Maßnahmen zur Verringerung der Schadstoffbelastung des Bodens zu ergreifen. Diese Intervention über GAP-Subventionen sollte die Verwendung von Düngemitteln mit niedrigem Kohlenstoffgehalt belohnen - insbesondere bei der Produktion von Grundnahrungsmitteln wie Getreide und Reis.

⁸ Die interinstitutionelle Vereinbarung über die neue Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) der EU, die im Sommer 2021 zwischen dem EU-Rat und dem Europäischen Parlament geschlossen wurde, fordert die EU-Mitgliedstaaten ausdrücklich auf, im Rahmen der GAP-Strategiepläne Maßnahmen zur Verringerung der Bodenverunreinigungen zu ergreifen. Diese Intervention über GAP-Subventionen sollte die Verwendung von Düngemitteln mit niedrigem Kohlenstoffgehalt belohnen - insbesondere bei der Produktion von Grundnahrungsmitteln wie Getreide und Reis.

⁹ FAO and UNEP, 2021. Global assessment of soil pollution. [online]. <https://doi.org/10.4060/cb4827en>.

¹⁰ European Environment Agency, 2021. Environment and health. [Publication] Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2005_10> [Accessed 30 Sep. 2021].

¹¹ Satarug, S., Garrett, S.H., Sens, M.A. and Sens, D.A., 2010. Cadmium, environmental exposure, and health outcomes. *Environmental Health Perspectives*, 118(2), pp.182–190. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901234>.

¹² Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives and World Health Organization eds., 2011. Safety evaluation of certain food additives and contaminants. WHO food additives series. Geneva: World Health Organization.

¹³ Schroeder, P., Anggraeni, K. and Weber, U., 2019. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, [online] 23(1), pp.77–95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>.

¹⁴ Schroeder, P., Anggraeni, K. and Weber, U., 2019. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, [online] 23(1), pp.77–95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>.

¹⁵ Copat, C., Arena, G., Fiore, M., Ledda, C., Fallico, R., Sciacca, S. and Ferrante, M., 2013. Heavy metals concentrations in fish and shellfish from eastern Mediterranean Sea: Consumption advisories. *Food and Chemical Toxicology*, [online] 53, pp.33–37. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.11.038>.

¹⁶ Gundacker, C. and Hengstschläger, M., 2012. The role of the placenta in fetal exposure to heavy metals. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, [online] 162(9), pp.201–206. <https://doi.org/10.1007/s10354-012-0074-3>.

¹⁷ Hassanin, M., Kerek, E., Chiu, M., Anikovskiy, M. and Prenner, E.J., 2016. Binding Affinity of Inorganic Mercury and Cadmium to Biomimetic Erythrocyte Membranes. *The Journal of Physical Chemistry B*, [online] 120(50), pp.12872–12882. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b10366>.

¹⁸ Kerek, E.M. and Prenner, E.J., 2016. Inorganic cadmium affects the fluidity and size of phospholipid-based liposomes. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, [online] 1858(12), pp.3169–3181. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2016.10.005>.

¹⁹ Everson, T.M., Punshon, T., Jackson, B.P., Hao, K., Lambertini, L., Chen, J., Karagas, M.R. and Marsit, C.J., 2018, n.d. Cadmium-Associated Differential Methylation throughout the Placental Genome: Epigenome-Wide Association Study of Two U.S. Birth Cohorts. *Environmental Health Perspectives*, [online] 126(1), p.017010. <https://doi.org/10.1289/EHP2192>.

- ²⁰ Pizzol, M., Smart, J.C.R. and Thomsen, M., 2014. External costs of cadmium emissions to soil: a drawback of phosphorus fertilizers. *Journal of Cleaner Production*, [online] 84, pp.475–483. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.080>.
- ²¹ Reeves, P.G. and Chaney, R.L., 2008. Bioavailability as an issue in risk assessment and management of food cadmium: A review. *Science of The Total Environment*, [online] 398(1), pp.13–19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.009>.
- ²² Van Kerkhove, E., Pennemans, V. and Swennen, Q., 2010. Cadmium and transport of ions and substances across cell membranes and epithelia. *BioMetals*, [online] 23(5), pp.823–855. <https://doi.org/10.1007/s10534-010-9357-6>.
- ²³ Marini, M., Caro, D. and Thomsen, M., 2020. The new fertilizer regulation: A starting point for cadmium control in European arable soils? *Science of The Total Environment*, [online] 745, p.140876. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140876>.
- ²⁴ Rietra, R.P.J.J., Heinen, M., Dimkpa, C.O. and Bindraban, P.S., 2017. Effects of Nutrient Antagonism and Synergism on Yield and Fertilizer Use Efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, [online] 48(16), pp.1895–1920. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>.
- ²⁵ Alterra - Sustainable soil management, Alterra - Soil, water and land use, Sub-department of Toxicology, VLAG, WIMEK, Rietra, R.P.J.J., Mol, G., Rietjens, I.M.C.M. and Römkens, P.F.A.M., 2017. Cadmium in soil, crops and resultant dietary exposure. [online] Wageningen: Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/403611>
- ²⁶ Rodrigues, S.M. and Römkens, P.F.A.M., 2018. Chapter 9 - Human Health Risks and Soil Pollution. In: A.C. Duarte, A. Cachada and T. Rocha-Santos, eds. *Soil Pollution*. [online] Academic Press. pp.217–250. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00009-1>.
- ²⁷ Rietra, R.P.J.J., Heinen, M., Dimkpa, C.O. and Bindraban, P.S., 2017. Effects of Nutrient Antagonism and Synergism on Yield and Fertilizer Use Efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, [online] 48(16), pp.1895–1920. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>.
- ²⁸ Alterra - Sustainable soil management, Alterra - Soil, water and land use, Sub-department of Toxicology, VLAG, WIMEK, Rietra, R.P.J.J., Mol, G., Rietjens, I.M.C.M. and Römkens, P.F.A.M., 2017. Cadmium in soil, crops and resultant dietary exposure. [online] Wageningen: Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/403611>
- ²⁹ Rodrigues, S.M. and Römkens, P.F.A.M., 2018. Chapter 9 - Human Health Risks and Soil Pollution. In: A.C. Duarte, A. Cachada and T. Rocha-Santos, eds. *Soil Pollution*. [online] Academic Press. pp.217–250. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00009-1>.
- ³⁰ Wang, W., Kong, W., Shen, T., Man, Z., Zhu, W., He, Y., Liu, F. and Liu, Y., 2020. Application of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in Detection of Cadmium Content in Rice Stems. *Frontiers in Plant Science*, [online] 11, p.2073. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.599616>.
- ³¹ Wang, W., Kong, W., Shen, T., Man, Z., Zhu, W., He, Y., Liu, F. and Liu, Y., 2020. Application of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in Detection of Cadmium Content in Rice Stems. *Frontiers in Plant Science*, [online] 11, p.2073. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.599616>.
- ³² Pizzol, M., Christensen, P., Schmidt, J. and Thomsen, M., 2011. Impacts of “metals” on human health: a comparison between nine different methodologies for Life Cycle Impact Assessment (LCIA). *Journal of Cleaner Production*, [online] 19(6), pp.646–656. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.05.007>.
- ³³ Sarwar, N., Saifullah, Malhi, S.S., Zia, M.H., Naeem, A., Bibi, S. and Farid, G., 2010. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, [online] 90(6), pp.925–937. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3916>.
- ³⁴ Marwa, J., Lufingo, M., Noubactep, C. and Machunda, R., 2018. Defeating Fluorosis in the East African Rift Valley: Transforming the Kilimanjaro into a Rainwater Harvesting Park. *Sustainability*, [online] 10(11), p.4194. <https://doi.org/10.3390/su10114194>.
- ³⁵ Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. and Foley, J., 2009. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, [online] 14(2). Available at: <<https://www.jstor.org/stable/26268316>> [Accessed 20 Sep. 2021].
- ³⁶ Steffen, W., K. Richardson, J. Rockström, S.E. Cornell, I. Fetzer, E.M. Bennett, R. Biggs, S.R. Carpenter, W. De Vries, C.A. De Wit, C. Folke, D. Gerten, J. Heinke, G.M. Mace, L.M. Persson, V. Ramanathan, B. Reyers, S. Sörlin. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347: 736, 1259855
- ³⁷ Bodenkontamination ist definiert als das Vorhandensein einer Chemikalie, die der typischen Bodenumgebung fremd ist und die Arten, die ihr direkt oder indirekt ausgesetzt sind, beeinträchtigen kann (main report Status of the world’s soil resources., 2015). Schadstoffe können natürlichen Ursprungs sein (z. B. aus mineralischen Bestandteilen im Muttergestein, das den Bodenschichten zugrunde liegt, oder gelöst im Oberflächen- und Grundwasser), die meisten sind jedoch anthropogenen Ursprungs. Bodenbewirtschaftungspraktiken, bei denen diese Schadstoffe nicht berücksichtigt werden, können zu lokalen oder großflächigen Anreicherungen führen. Die Anhäufung von Schadstoffen kann mit der Zeit toxisch werden (Cachada, Rocha-Santos und Duarte, 2018);(Bundschuh et al., 2012);(Luo et al., 2009). Zusätzlich zu den anthropogenen Aktivitäten kann die Kontamination auftreten aus Wasser oder atmosphärischen Ablagerungen (Rodríguez et al., 2014). In der Regel sind die oberflächlichsten Bodenschichten von der Kontamination betroffen, wo es typischerweise zu Wechselwirkungen mit der Atmosphäre, der Flora und Fauna und anthropogenen Aktivitäten kommt (Reimann, Filzmoser und Garrett, 2005); (Salminen, Gregorauskiene und Tarvainen, 2008). Die Kontamination in tieferen Teilen des Bodens kann mit den physikalischen Eigenschaften des darunter liegenden Muttergesteins (Shacklette und Boerngen, 1984) oder mit der Mobilität einiger Schadstoffe zusammenhängen, die mit Hilfe von Wasser von der Oberfläche in tiefere Teile des Bodens gelangen. Cachada, A., Rocha-Santos, T. and Duarte, A.C., 2018. Chapter 1 - Soil and Pollution: An Introduction to the Main Issues. In: A.C. Duarte, A. Cachada and T. Rocha-Santos, eds. *Soil Pollution* [online] Academic Press. pp.1-28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00001-7>.
- Reimann, C., Filzmoser, P. and Garrett, R.G., 2005. Background and threshold: critical comparison of methods

- of determination. *Science of The Total Environment*, [online] 346(1), pp.1–16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.023>.
- Salminen, R., Gregorauskiene, V. and Tarvainen, T., 2008. The normative mineralogy of 10 soil profiles in Fennoscandia and north-western Russia. *Applied Geochemistry*, [online] 23(12), pp.3651–3665. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.09.007>. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00001-7>.
- Shacklette, H.T. and Boerngen, J.G., 1984. Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States. US Government Printing Office Washington, DC
- ³⁸ Swe Mar und Masanori Okazaki verglichen in ihrer Studie “Investigation of Cd contents in several phosphate rocks used for the production of fertilizer” (Untersuchung des Cd-Gehalts in verschiedenen Phosphatgesteinen, die für die Herstellung von Düngemitteln verwendet werden) aus dem Jahr 2012 verschiedene Apatitgesteine, die für die Herstellung von Phosphatdünger verwendet werden. Der Vergleich von Phosphatgestein aus den USA (Wyoming, Florida, Idaho), Marokko (Qued Zem), Russland (Slyudanka) und Japan (Okinawa) ergab, dass die Phosphatkonzentration in allen Proben zwischen 6 und 38 % und der Cd-Gehalt zwischen 0,15 und 507 mg kg lag. Mar, Swe and Okazaki, M., 2012. Investigation of Cd contents in several phosphate rocks used for the production of fertilizer. *Microchemical Journal*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.03.020>.
- ³⁹ Der verantwortungsvolle Einsatz von Phosphatdüngern umfasst den gesamten Lebenszyklus des Produkts, einschließlich des Abbaus des Erzes. Der Bergbau hat erhebliche lokale Auswirkungen auf die Gemeinden und die Umwelt. Im Rahmen eines strukturierten Risikomanagementplans ist die Gewinnung von Erzen mit geringem Cadmiumgehalt eine wichtige Maßnahme zur Risikominderung, die das Risiko der Freisetzung von Schadstoffen erheblich verringert. Auch bei Verfahren zur Entfernung von Cadmium aus Erzen stellt sich die Frage der verantwortungsvollen Entsorgung von Verarbeitungsrückständen (F.H. Oosterhuis, F.M. Brouwer, H.J. Wijnants, A possible EU wide charge on cadmium in phosphate fertilisers: Economic and environmental implications Final Report to the European Commission, 2000).
- ⁴⁰ Oosterhuis, F. H., Brouwer, F. M., & Wijnants, H. J. (2000). A possible EU wide charge on cadmium in phosphate fertilisers: Economic and environmental implications. IVM Report, (E-00/02).
- ⁴¹ Blum, A. and Blum, A., 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*, [online] 56(11), pp.1159–1168. <https://doi.org/10.1071/AR05069>.
- ⁴² Navarro, S., Vela, N. and Navarro, G., 2007. Review. An overview on the environmental behaviour of pesticide residues in soils. *Spanish journal of agricultural research*, [online] (3), pp.357–375. Available at: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2344189>> [Accessed 12 Sep. 2021].
- ⁴³ Böden, die reich an organischen Stoffen sind, halten Schwermetalle aktiv zurück. Das Ausmaß, in dem Metalle von den Wurzeln aufgenommen werden, hängt von der chemischen Form ab, in der sie im Boden vorkommen. Das Vorhandensein von Wasser hat einen großen Einfluss auf ihre Mobilität und Verfügbarkeit für Pflanzen. Fijałkowski K., Kacprzak M., Grobelak A., Placek A., 2012, The influence of selected soil parameters on the mobility of heavy metals in soils, in *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, t. 15, nr 1, s. 81-92
- ⁴⁴ Bundschuh, J., Litter, M.I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H.B., Jean, J.-S., Liu, C.-W., López, D., Armienta, M.A., Guilherme, L.R.G., Cuevas, A.G., Cornejo, L., Cumbal, L. and Toujaguez, R., 2012. One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of The Total Environment*, [online] 429, pp.2–35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>.
- ⁴⁵ Luo, L., Ma, Y., Zhang, S., Wei, D. and Zhu, Y.-G., 2009. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China. *Journal of Environmental Management*, [online] 90(8), pp.2524–2530. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.011>.
- ⁴⁶ FitzGerald, R. and Roth, N., 2015. Cadmium in mineral fertilizers – human and environmental risk update. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26451.17442>.
- ⁴⁷ Roberts, T.L., 2014. Cadmium and Phosphorous Fertilizers: The Issues and the Science. *Procedia Engineering*, [online] 83, pp.52–59. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.012>.
- ⁴⁸ Haisel, D., Cyrusová, T., Vaněk, T. and Podlipná, R., 2019. The effect of nanoparticles on the photosynthetic pigments in cadmium–zinc interactions. *Environmental Science and Pollution Research*, [online] 26(4), pp.4147–4151. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-04060-7>.
- ⁴⁹ Roy, S., 2019. Chapter 9 - Cadmium Accumulation in Crops and the Increasing Risk of Dietary Cadmium Exposure: An Overview. In: M. Hasanuzzaman, M.N. Vara Prasad and K. Nahar, eds. *Cadmium Tolerance in Plants*. [online] Academic Press. pp.247–254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815794-7.00009-6>.
- ⁵⁰ Ismael, M.A., Elyamine, A.M., Moussa, M.G., Cai, M., Zhao, X. and Hu, C., 2019. Cadmium in plants: uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers. *Metallomics*, [online] 11(2), pp.255–277. <https://doi.org/10.1039/C8MT00247A>.
- ⁵¹ Shi, Z., Carey, M., Meharg, C., Williams, P.N., Signes-Pastor, A.J., Triwardhani, E.A., Pandiangan, F.I., Campbell, K., Elliott, C., Marwa, E.M., Jiujin, X., Farias, J.G., Nicoloso, F.T., De Silva, P.M.C.S., Lu, Y., Norton, G., Adomako, E., Green, A.J., Moreno-Jiménez, E., Zhu, Y., Carbonell-Barrachina, Á.A., Haris, P.I., Lawgali, Y.F., Sommella, A., Pigna, M., Brabet, C., Montet, D., Njira, K., Watts, M.J., Hossain, M., Islam, M.R., Tapia, Y., Oporto, C. and Meharg, A.A., 2020. Rice Grain Cadmium Concentrations in the Global Supply-Chain. *Exposure and Health*, [online] 12(4), pp.869–876. <https://doi.org/10.1007/s12403-020-00349-6>.
- ⁵² Status of the world's soil resources: main report., 2015, FAO. [online] <http://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/>
- ⁵³ Die von der Bodenverschmutzung betroffene Fläche wird weltweit auf 22 Millionen Hektar geschätzt *Global Assessment of Human-induced Soil Degradation (GLASOD)*, 2021);(de Ploey, Imeson and Oldeman, 1991). de Ploey, J., Imeson, A. and Oldeman, L.R., 1991. Soil Erosion, Soil Degradation and Climatic Change. In: F.M. Brouwer, A.J. Thomas and M.J. Chadwick, eds. *Land Use Changes in Europe*, The GeoJournal Library. [online] Dordrecht: Springer Netherlands. pp.275–292. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3290-9_12.
- ⁵⁴ Pan, L., Wang, Y., Ma, J., Hu, Y., Su, B., Fang, G., Wang, L. und Xiang, B., 2018. A review of heavy metal pollution

levels and health risk assessment of urban soils in Chinese cities. *Environmental Science and Pollution Research*, [online] 25(2), pp.1055-1069. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0513-1>.

⁵⁵ Das EU Monitoring zeigt, dass Cadmium in messbaren und oft hohen Mengen in Gemüse in ganz Europa gefunden werden kann. Die jüngsten Überarbeitungen der zulässigen Höchstwerte für Cadmium in Lebensmitteln haben dazu geführt, dass mehrere Produkte nicht mehr in die EU eingeführt werden dürfen. Dazu gehören Kakao und Schokolade aus Peru aufgrund des hohen Cadmiumgehalts in den örtlichen Böden (Chavez et al., 2015);(Engbersen et al., 2019). Chavez, E., He, Z.L., Stoffella, P.J., Mylavarapu, R.S., Li, Y.C., Moyano, B. and Baligar, V.C., 2015. Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of The Total Environment*, [online] 533, pp.205–214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>.

Engbersen, N., Gramlich, A., Lopez, M., Schwarz, G., Hattendorf, B., Gutierrez, O. and Schulin, R., 2019. Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars. *Science of The Total Environment*, [online] 678, pp.660–670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.001>

⁵⁶ Im Juli 2021 wurden im Rahmen des französischen Human-Biomonitoring-Programms die Ergebnisse einer Querschnittserhebung namens Esteban (Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition) vorgestellt, die auf einer repräsentativen Stichprobe der französischen Bevölkerung beruht. Esteban ist eine nationale französische Studie zur öffentlichen Gesundheit, die darauf abzielt, die Belastung der Bevölkerung mit Schwermetallen zu messen, wobei der Schwerpunkt auf den Ernährungsgewohnheiten und chronischen Krankheiten liegt. Die Ergebnisse zeigten, dass Cadmium bei 100 % der an der Studie teilnehmenden Erwachsenen und Kinder vorhanden war. Bei Kindern erhöhte der Verzehr von Frühstückscerealien die Cadmiumaufnahme, was hauptsächlich auf die in der konventionellen Landwirtschaft verwendeten cadmiumreichen Phosphatdünger und den täglichen Verzehr dieser Cerealien zurückzuführen ist. Bei nicht rauchenden Erwachsenen war der Verzehr von Schalentieren die Hauptquelle der Exposition (<https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2021/exposition-aux-metaux-de-la-population-francaise-resultats-de-l-etude-esteban>).

⁵⁷ In Italien weist die Stiftung Umberto Veronesi seit mehreren Jahren darauf hin, dass einige Schwermetalle im Blut und Urin von Menschen, die sich glutenfrei ernähren, höhere Konzentrationen erreichen können. Der Stiftung zufolge hängt die höhere Aufnahme von Schwermetallen (Arsen, Cadmium, Blei und Quecksilber) bei einer glutenfreien Ernährung mit dem höheren Konsum von Reis (Arsen und Cadmium) und Fisch (Quecksilber) zusammen.

⁵⁸ Einige Autoren (Leita und Ciavatta, 2017) weisen den unmittelbaren Handlungsbedarf in diesem Bereich zurück und argumentieren, dass die zunehmende Akkumulation auf jährlicher Basis wahrscheinlich kein kurzfristiges Problem für die menschliche Gesundheit darstellt. Leita, L. und Ciavatta, C., 2017. Cadmio nei fertilizzanti fosfatici: allarmismo ingiustificato. *Geografili Info*.

⁵⁹ Am 5. Juni 2019, nach drei Jahren intensiver interinstitutioneller Verhandlungen zwischen dem Europäischen Parlament und dem Rat der EU.

⁶⁰ Darüber hinaus wurde ein freiwilliges "grünes Etikett" für Phosphordünger mit einem Cadmiumgehalt von unter 20 mg/kg vorgesehen. Die Europäische Kommission hat Anfang 2020 einen detaillierten Leitfaden veröffentlicht, der Folgendes ermöglicht verantwortungsbewusste Unternehmen, diese Kennzeichnung zu übernehmen. Schließlich können die Mitgliedstaaten, die strengere nationale Grenzwerte für den Cadmiumgehalt beibehalten wollen, die den auf Unionsebene geltenden Grenzwerten entsprechen oder darunter liegen, dies auch nach dem Inkrafttreten der Verordnung am 16. Juli 2022 tun.

⁶¹ Nawara, S., Dael, T.V., Merckx, R., Amery, F., Elsen, A., Odeurs, W., Vandendriessche, H., Mcgrath, S., Roisin, C., Jouany, C., Pellerin, S., Denoroy, P., Eichler-Löbermann, B., Börjesson, G., Goos, P., Akkermans, W. and Smolders, E., 2017. A comparison of soil tests for available phosphorus in long-term field experiments in Europe. *European Journal of Soil Science*, [online] 68(6), pp.873–885. <https://doi.org/10.1111/ejss.12486>.

⁶² Stubenrauch, J., Garske, B. and Ekardt, F., 2018. Sustainable Land Use, Soil Protection and Phosphorus Management from a Cross-National Perspective. *Sustainability*, [online] 10(6), p.1988. <https://doi.org/10.3390/su10061988>.

⁶³ Wragg, J., Cave, M., Basta, N., Brandon, E., Casteel, S., Denys, S., Gron, C., Oomen, A., Reimer, K., Tack, K., Ekardt, F., 2016. Justice and Van de Wiele, T., 2011. An inter-laboratory trial of the unified BARGE bioaccessibility method. *Sustainability: Normative Criteria for arsenic, cadmium, the Use of Phosphorus, Agriculture: 100 % Zero*. [online] 409(19), Dordrecht: Springer Netherlands. pp.4016–4030. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.019> https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.0191007/978-94-017-7612-7_15.

⁶⁴ Ekardt, F., 2016. Justice and Sustainability: Normative Criteria for the Use of Phosphorus. In: E. Schnug and L.J. De Kok, eds. *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. [online] Dordrecht: Springer Netherlands. pp.317–330. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7612-7_15.

⁶⁵ Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L.J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J.A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., Afshin, A., Chaudhary, A., Herrero, M., Agustina, R., Branca, F., Lartey, A., Fan, S., Crona, B., Fox, E., Bignet, V., Troell, M., Lindahl, T., Singh, S., Cornell, S.E., Srinath Reddy, K., Narain, S., Nishtar, S. and Murray, C.J.L., 2019. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, [online] 393(10170), pp.447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4).

⁶⁶ Kauwenbergh, S.J. van, 1997. Cadmium and other minor elements in world resources of phosphate rock. *Proceedings - Fertiliser Society (United Kingdom)*. [online] Available at: <https://scholar.google.com/scholar_

⁶⁷ Rodrigues, S. M., & Römken, P. F. A. M. (2018). Human health risks and soil pollution. In A. C. Duarte, A. Cachada, & T. Rocha-Santos (Eds.), *Soil Pollution: From Monitoring to Remediation* (pp. 217-250). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00009-1>

⁶⁸ Alvarenga, P., Palma, P., Mourinha, C., Farto, M., Dôres, J., Patanita, M., Cunha-Queda, C., Natal-da-Luz, T., Renaud, M. and Sousa, J.P., 2017. Recycling organic wastes to agricultural land as a way to improve its quality: A field study to evaluate benefits and risks. *Waste Management*, [online] 61, pp.582–592. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.004>

⁶⁹ Stürck, J., Levers, C., van der Zanden, E.H., Schulp, C.J.E., Verkerk, P.J., Kuemmerle, T., Helming, J., Lotze-Campen,

- H., Tabeau, A., Popp, A., Schrammeijer, E. and Verburg, P., 2018. Simulating and delineating future land change trajectories across Europe. *Regional Environmental Change*, [online] 18(3), pp.733–749. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0876-0>.
- ⁷⁰ Ronchi, S., Salata, S., Arcidiacono, A., Piroli, E. and Montanarella, L., 2019. Policy instruments for soil protection among the EU member states: A comparative analysis. *Land Use Policy*, [online] 82, pp.763–780. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.017>.
- ⁷¹ Alvarenga, P., Palma, P., Mourinha, C., Farto, M., Dôres, J., Patanita, M., Cunha-Queda, C., Natal-da-Luz, T., Renaud, M. and Sousa, J.P., 2017. Recycling organic wastes to agricultural land as a way to improve its quality: A field study to evaluate benefits and risks. *Waste Management*, [online] 61, pp.582–592. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.004>
- ⁷² Stubenrauch, J., Garske, B. and Ekaradt, F., 2018. Sustainable Land Use, Soil Protection and Phosphorus Management from a Cross-National Perspective. *Sustainability*, [online] 10(6), p.1988. <https://doi.org/10.3390/su10061988>.
- ⁷³ Garske, B., Heyl, K., Ekaradt, F., Weber, L.M. and Gradzka, W., 2020. Challenges of Food Waste Governance: An Assessment of European Legislation on Food Waste and Recommendations for Improvement by Economic Instruments. *Land*, [online] 9(7), p.231. <https://doi.org/10.3390/land9070231>.
- ⁷⁴ FitzGerald, R. and Roth, N., 2015. Cadmium in mineral fertilizers – human and environmental risk update. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26451.17442>.
- ⁷⁵ Ulrich, A.E., 2019. Cadmium governance in Europe’s phosphate fertilizers: Not so fast? *Science of The Total Environment*, [online] 650, pp.541–545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.014>.
- ⁷⁶ Am 17. November 2021 sollte die Europäische Kommission die überarbeitete Thematische Strategie der EU für den Boden annehmen: https://ec.europa.eu/environment/soil/three_en.htm. Die laufenden Diskussionen über die Bodenverschmutzung könnten dann zu einem ganzheitlicheren Ansatz für den Bodenschutz zusammengeführt werden.
- ⁷⁷ Obwohl Artikel 114 Absatz 5 des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union (EUR-Lex - 12012E/TXT - EN - EUR-Lex, 2021) den Mitgliedstaaten nicht erlaubt, selbständig Grenzwerte für Cadmium in Düngemitteln festzulegen, kann die EU auf der Grundlage neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse Ausnahmen gewähren (FitzGerald und Roth, 2015). Aus diesem Grund haben wir derzeit: 12 Mitgliedstaaten mit Cd-Grenzwerten ≤ 50 mg Cd/kg P2O5 (CZ, DK, FI, DE, PL, HU, IT, SK, BG, SE, NL, NO), 8 MS mit Cd-Grenzwerten von 60 mg Cd/kg P2O5 (FR, CY, LT, S, RO, SI, GR, LU), 2 MS (Österreich und Belgien) mit höheren Cd-Grenzwerten.
- ⁷⁸ FitzGerald, R. and Roth, N., 2015. Cadmium in mineral fertilizers – human and environmental risk update. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26451.17442>.
- ⁷⁹ Ulrich, A.E., 2019. Cadmium governance in Europe’s phosphate fertilizers: Not so fast? *Science of The Total Environment*, [online] 650, pp.541–545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.014>.
- ⁸⁰ Amendments 784-826
- ⁸¹ EU Farm to Fork Strategy: https://ec.europa.eu/food/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf
- ⁸² Oosterhuis, F.H., Brouwer, F.M. and Wijnants, H.J., 2000. A possible EU wide charge on cadmium in phosphate fertilisers: economic and environmental implications. IVM Report. Amsterdam: Institute for Environmental Studies.
- ⁸³ Hinsichtlich der Kontrolle der Kontamination landwirtschaftlicher Böden und der Nahrungsmittelproduktion empfiehlt die ANSES einen Cadmiumgehalt von 20 mg Cd/kg oder weniger. AVIS de l’Agence nationale de sécurité sanitaire de l’alimentation, de l’environnement et du travail relatif à l’Exposition au cadmium (CAS n°7440-43-9) – Propositions de valeurs toxicologiques de référence (VTR) par ingestion, de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques (sang, urine, ...) et de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales. ANSES, 2019
- ⁸⁴ Es gibt mehr als 30 Länder, die cadmiumarmes Gestein liefern können, darunter Lagerstätten in Australien, China, Ägypten, Jordanien, Marokko, Russland, Syrien und den Vereinigten Staaten sowie Saudi-Arabien (Kauwenbergh, 1997). Darüber hinaus zeigen die Daten der Industrie, dass die Hälfte der weltweiten Gesteinsproduktion im Jahr 2016 bereits die strengere EU-Anforderung von 20 mg/kg erfüllt haben könnte (5. Jahrestag des ersten Vorschlags für europaweite Cadmiumgrenzwerte, 2021).
- ⁸⁵ Der Cadmiumgehalt von Phosphatdüngern kann durch die Verwendung von Phosphaten mit niedrigem Cadmiumgehalt oder durch den Zerfall von Phosphatgestein oder Phosphorsäure verringert werden. Die Verwendung von Phosphatgestein mit niedrigem Cadmiumgehalt ist die vorherrschende Marktstrategie. Die Dekadmierung ist teurer und bringt einen Cadmiumstrom im Dekadmiumabfall mit sich, der in den Erzeugerländern Umweltprobleme verursachen kann (Europäische Kommission, 2000).

OPERA RESEARCH
Piacenza | Brussels

www.operaresearch.eu