

Schadstoffgrenzwerte für mineralische Recyclingdünger: das Schweizer Konzept

Jochen Mayer¹, Michael Zimmermann², Karin Weggler¹, René Reiser¹, Diane Bürge¹, Thomas Bucheli¹ und Walter Richner¹

¹Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

²Bundesamt für Landwirtschaft BLW, 3003 Bern, Schweiz

Auskünfte: Jochen Mayer, E-Mail: jochen.mayer@agroscope.admin.ch



Mineralische Recyclingdünger werden aus Klärschlamm sowie Knochen- und Fleischmehl hergestellt. Diese stellen ein grosses Substitutionspotenzial für mineralische Phosphordünger dar. Abbaubare Phosphor-Vorräte sind zunehmend mit Cadmium und Uran belastet. Die Verwendung von mineralischen Recyclingdüngern könnte die Schadstoffbelastung von Schweizer Böden deshalb deutlich senken. (Foto: Weerapat Kiatdumrong, www.123rf.com)

Einleitung

Phosphor (P) ist ein für das Pflanzenwachstum essenzieller Nährstoff. Er ist ein wichtiger Baustein der Desoxyribonukleinsäure (DNA) und unabdingbar für den Energiestoffwechsel der Pflanze. Mehr als 90 % des global geförderten P wird als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt. Die globalen P-Reserven – 70 % der Lagerstättenvorräte lagern in Marokko (USGS 2018) – sind jedoch endlich. Die noch abbaubaren Vorräte weisen zunehmende Schadstoffbelastungen, primär mit Cadmium (Cd)

und Uran, auf, so dass schon heute der Schweizer Grenzwert für P-Mineraldünger von 50 mg Cd pro kg P häufig nicht mehr eingehalten werden kann (Kratz *et al.* 2016).

Die Schweiz verfügt ihrerseits über keine P-Lagerstätten und ist komplett auf P-Düngerimporte angewiesen. Die P-Mineraldüngerimporte betragen 2015 rund 4200 Tonnen (t) P. Das P-Recyclingpotenzial in Abfallstoffen wie Klärschlamm und Schlachtabfällen, das bisher nicht genutzt wird, übersteigt die P-Importe bei weitem und beträgt rund 9600 t P pro Jahr. Allein der Klärschlamm trägt 5800 t P pro Jahr dazu bei (Mehr *et al.* 2018). Ein effizientes P-Recycling könnte die schweizerischen P-Mineraldüngerimporte daher vollständig ersetzen.

Aus diesem Grund wurde 2016 in der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) eine Pflicht für das P-Recycling aus Klärschlamm, Knochen- und Fleischmehl aufgenommen. Die Regelung ist ab 2026 verpflichtend. Aus dem Recyclingprozess sollen neue P-Mineraldünger entstehen, für die eine neue Düngerkategorie «mineralische Recyclingdünger» geschaffen wurde. Sie bilden einen Düngertyp, der zwischen den organischen Recyclingdüngern und den Mineraldüngern angesiedelt ist. Die neuen mineralischen Recyclingdünger sollen vergleichbare agronomische Eigenschaften wie Mineraldünger aufweisen und durch den Ersatz der cadmium- und uranhaltigen P-Mineraldünger dazu beitragen, die Schadstoffbelastungen von Böden deutlich zu senken.

Deshalb wurde für mineralische Recyclingdünger ein Konzept von Schadstoffgrenzwerten für anorganische (Schwermetalle) und organische Schadstoffe entwickelt, das eine gefahrlose Anwendung der Dünger in der Landwirtschaft sicherstellt. Die Basis zur Ableitung der Schadstoffgrenzwerte bildete die Agroscope-Studie «Entwicklung agronomischer und ökologischer Anforderungen an die Mindestqualität von mineralischen Recyclingdüngern (MinRec)» (Weggler *et al.* 2017).

Konzeptentwicklung und Methoden

Gemäss den Umweltzielen Landwirtschaft (BAFU und BLW 2008) darf die Bodenfruchtbarkeit und die Gesundheit durch anorganische oder organische Schadstoffe nicht beeinträchtigt werden. Der Eintrag einzelner Schadstoffe aus der Landwirtschaft in Böden muss daher kleiner als deren Austrag und – im Fall von organischen Schadstoffen – deren Abbau sein. Auf Basis dieser Grundlage wurden für anorganische und organische Schadstoffe Ableitungskonzepte für Schadstoffgrenzwerte entwickelt, die bei guter landwirtschaftlicher Düngungspraxis zu keiner Anreicherung von Schadstoffen in Böden führen.

Eine Anreicherung kann ausgeschlossen werden, wenn die Einträge kleiner sind als die Austräge. Schwermetalle werden primär mit Düngern und über atmosphärische Deposition in landwirtschaftliche Böden eingetragen. Sie werden von der Pflanze aufgenommen und über Ernteprodukte beziehungsweise Sickerwasser von den Flächen ausgetragen. Damit können für Schwermetalle Grenzwerte aufgrund von Ein- und Austragsbilanzen festgelegt werden.

Für persistente organische Schadstoffe wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenyle (PCB) und polychlorierte Dibenzo-*p*-Dioxine und Furane (PCDD/F) werden dieselben Eintragspfade angenommen wie für Schwermetalle. Im Boden werden sie sehr langsam abgebaut, jedoch nur in geringem Masse ausgewaschen und von Pflanzen praktisch nicht aufgenommen. Deshalb kann für organische Schadstoffe kein Bilanzansatz angewandt werden, der auf Ein- und Austrägen basiert. Hier wird deshalb das Konzept «Gleiches zu Gleichem» eingesetzt. Dieses Prinzip geht davon aus, dass Stoffe, die einem System zugeführt werden, höchstens die gleiche Schadstoffkonzentration aufweisen wie die Schadstoffkonzentration im System selber. Organische Schadstoffe, die mit Düngern ausgebracht werden, dürfen deshalb keine höheren Schadstoffkonzentrationen aufweisen als dies maximal für die Bodenmatrix als nachhaltig angesehen wird. Diese sind als Grenzwerte in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) festgelegt. Der Ansatz erlaubt, dass die bei organischen Schadstoffen geringen Austräge über Pflanzen, Sickerwasser, Abbau und Verflüchtigung nicht berücksichtigt werden müssen.

Momentan beschränkt sich die Recyclingpflicht der VVEA auf P aus Klärschlamm, Knochen- und Fleischmehl. Deshalb wurden die Schadstoffgrenzwerte nur für *Mineralische Phosphor-Recyclingdünger* abgeleitet, die im Weiteren als *MinRec* abgekürzt werden.

Zusammenfassung

Phosphor ist ein für das Pflanzenwachstum essenzieller Nährstoff. Die Schweiz ist auf den Import von Phosphordüngern angewiesen. Diese stammen aus Lagerstättenvorräten und sind zunehmend mit Schadstoffen belastet. Demgegenüber stehen bisher nicht genutzte Phosphor-Vorräte in Klärschlamm und Schlachtabfällen, die die Düngerimporte vollständig ersetzen könnten. In der Schweiz wurde deshalb eine Recyclingpflicht für Phosphor aus Klärschlamm sowie Knochen- und Fleischmehl eingeführt. Damit verbunden entstehen neue «mineralische Recyclingdünger», mit denen die Schadstoffeinträge in Schweizer Böden deutlich verringert werden sollen. Deshalb wurde für mineralische Recyclingdünger ein Konzept von Schadstoffgrenzwerten für anorganische und organische Schadstoffe entwickelt, das eine gefahrlose Anwendung der Dünger in der Landwirtschaft sicherstellt. Dieser Beitrag dokumentiert die Ableitung der für die Schweiz in Kraft gesetzten Schadstoffgrenzwerte für mineralische Phosphor-Recyclingdünger.

Anorganische Schadstoffe: «Eintrag = Austrag»

Das Potenzial des zulässigen Eintrags von Schwermetallen über MinRec wurde anhand von Eintrag-Austrag-Bilanzen für Schweizer Ackerflächen abgeschätzt. Hierzu wurden allen Schwermetall-Einträgen über atmosphärische Deposition sowie Stickstoff- und Kalium-Mineraldüngern die Austräge über die Abfuhr von Erntegütern und über die Auswaschung durch Sickerwasser gegenübergestellt (Abb. 1). Die Differenz dieser Bilanzgrößen ergibt eine zulässige Schadstoffgrenzfracht, die mit MinRec ausgebracht werden darf (Abb. 1).

Austräge

Zur Abschätzung der Austräge über Ernteprodukte wurden je Kultur die mittleren Trockenmasse-Ernterträge (Richner und Sinaj 2017) ermittelt und mit der mittleren Schadstoffkonzentration der Ernteprodukte multipliziert. Für die Schadstoffkonzentrationen wurde auf zwei Datenbanken zurückgegriffen: die Schweizer Datenbank RECOL (BAFU 2018) und die TRANSFER-Datenbank des Umweltbundesamtes in Deutschland (Knoche *et al.* 1997). Die so ermittelten Schadstoffausträge pro Kultur und ha wurden mit den Flächenanteilen der jeweiligen Kultur gewichtet und daraus der mittlere Schadstoffaustrag pro ha für die Schweiz berechnet (Kulturenmix, Tab. 1).

Tab. 1 | Eintrag-Austrag-Bilanzen für Schwermetalle auf Ackerböden der Schweiz und theoretischer Schadstoffgrenzwert für Schwermetalle von MinRec bezogen auf Phosphor.

	Cd	Ni	Cr	Hg	As	Pb	Zn	Cu
Einträge	(mg ha ⁻¹ Jahr ⁻¹)							
Atmosphärische Deposition	380	6840	2000	na	1370	9860	63 000	21 900
Stickstoff-Mineraldünger	60	490	730	na	350	530	1330	1570
Kalium-Mineraldünger	20	440	380	na	130	380	3540	420
Austräge								
Sickerwasser	220	29 000	11 100	140	1340	600	44 000	10 900
Pflanzliche Ernteprodukte (Kulturenmix)	1570	9300	6400	270	5300	8350	504 000	72 000
	Nettoaustrag (mg ha ⁻¹ Jahr ⁻¹)							
Bilanzsaldo = zulässige Grenzfracht	1330	30530	14390	410	4790	-1820	480 130	59 010
	Nettoaustrag / 34 kg P ha ⁻¹ und Jahr							
Theoretischer Grenzwert (mg kg⁻¹ P)	39	890	420	12	140	-53	14 000	1720

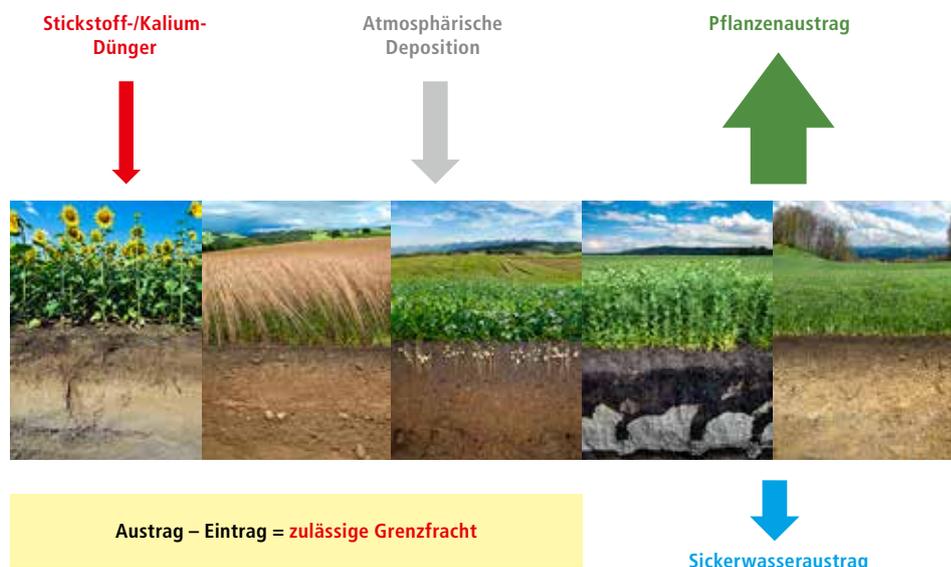
Cd = Cadmium, Ni = Nickel, Cr = Chrom, Hg = Quecksilber, As = Arsen, Pb = Blei, Zn = Zink, Cu = Kupfer, na = nicht analysiert

Einträge

Für die Sickerwasserausträge wurde von einer für die Schweiz eher konservativen Sickerwassermenge von 200 l pro m² und Jahr ausgegangen. Für die Schadstoffkonzentrationen des Sickerwassers wurde auf die Angaben von Bielert *et al.* (1999) zurückgegriffen.

Für die Einträge über atmosphärische Deposition wurden Daten des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe der Schweiz (NABEL 2016) herangezogen. Für Chrom lagen keine Depositionswerte für die Schweiz vor. Deshalb wurden Werte aus Deutschland verwendet (Bannick *et al.* 2001). Für die Einträge durch Stickstoff- und Ka-

liumdünger wurde eine mittlere Normdüngung für das jeweilige Element berechnet. Als Grundlage dazu dienten die «Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz» (Richner und Sinaj 2017), in der für jede Kultur eine Normdüngung festgelegt ist. Diese Normdüngung wurde mit dem Flächenanteil der jeweiligen Kultur gewichtet. Die mittlere Normdüngung beträgt für Stickstoff 118 kg pro ha und für Kalium 167 kg pro ha. Die daraus resultierenden Düngermengen wurden mit den von Gisler und Schwab (2012) ermittelten Schadstoffkonzentrationen multipliziert.


Abb. 1 | Berücksichtigte Bilanzgrößen zur Ermittlung der zulässigen Schadstoff-Grenzfracht für Schwermetalle anhand von Eintrag-Austrag-Bilanzen.

Tab. 2 | Mediane der Relationen von Schwermetall zu Phosphor für MinRec aus verschiedenen verfahrenstechnischen Klärschlamm-Recyclingprozessen (Schwermetallgehalte basierend auf Herstellerangaben und Literatur; Weggler *et al.* 2017). Rot markierte Relationen übersteigen, grün markierte unterschreiten die theoretischen Grenzwerte (Tab. 1).

MinRec-Verfahren	Cd	Ni	Cr	Hg	As	Pb	Zn	Cu
	Median Relationen (mg kg ⁻¹ P)							
Kristallisation	4,4	75	112	1,49	11,3	74	752	339
Säureaufschluss aus Klärschlamm	3,1	96	46	0,35	34,5	92	1346	171
Säureaufschluss aus Asche	29,0	134	259	1,53	77,1	125	10611	4781
Thermochemischer Aufschluss aus Asche	3,2	733	1649	2,23	33,3	222	13322	3661
Pyrolyse	10,2	1142	1887	1,21	97,5	1212	28008	8422

Theoretische Schadstoffgrenzwerte

MinRec stammen aus unterschiedlichen P-Recyclingverfahren und weisen eine sehr grosse Spannweite der P-Gehalte von 60–200 mg pro kg P auf. Die Schadstoffgrenzwerte wurden deshalb nicht auf die Trockensubstanz, sondern auf den Phosphor bezogen. Die Bezugsgrösse P hat den Vorteil, dass bei einer konstanten P-Düngung gleich grosse Schadstofffrachten ausgebracht werden. Hierzu wurde für die Schweiz eine P-Normdüngung für Ackerkulturen analog zu Stickstoff und Kalium abgeleitet (siehe vorherigen Abschnitt). Die so ermittelte mittlere Normdüngung beträgt 34,3 kg P pro ha und Jahr. Der theoretische Schadstoffgrenzwert berechnet sich nun mit der zulässigen Grenzfracht geteilt durch die P-Normdüngung:

$$\text{Grenzwert [mg Schadstoff kg}^{-1}\text{ P]} = \frac{\text{zulässige Grenzfracht Schadstoff [g ha}^{-1}\text{]}}{34,3 \text{ [kg P ha}^{-1}\text{]}}$$

Die bilanzierten Ein- und Austräge sowie den Bilanzsaldo zeigt Tabelle 1. Der Bilanzsaldo entspricht der zulässigen Grenzfracht an Schadstoffen, die über MinRec eingetragen werden dürfen.

Der aus der Bilanzrechnung abgeleitete theoretische Grenzwert zeigt, dass für Blei ein negativer Bilanzsaldo resultiert. Auch ohne MinRec-Applikation übersteigen die Einträge die Austräge. Folglich dürften keine weiteren Dünger appliziert werden!

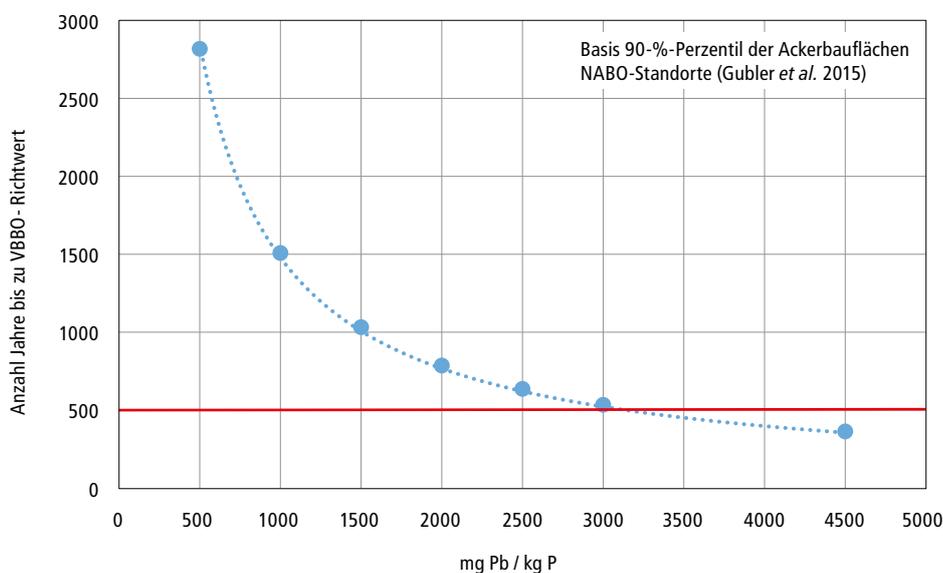


Abb. 2 | Zusammenhang zwischen Schadstoffkonzentration in MinRec und Akkumulationszeit bis zum Erreichen des VBBO-Richtwertes am Beispiel von Blei (Pb).

Tab. 3 | Grenzwerte für MinRec-P-Dünger. Für die betrachteten anorganischen Schadstoffe sind jeweils der Ableitungsansatz zur Bestimmung der Minimalanforderung, die berechnete Minimalanforderung als maximale Belastung mit dem jeweiligen Schadstoff, der nach technischem Potenzial (Stand 2017) einhaltbare Belastungswert sowie der gemäss ALARA-Prinzip festgelegte Grenzwert in Relation zum Phosphorgehalt aufgezeigt.

Schadstoff	Ansatz Definition Minimalanforderung	Minimalanforderung (mg kg ⁻¹ P)	Technisches Potenzial	Grenzwert MinRec
Arsen	Bilanz	140	97	100
Cadmium	Bilanz	39	21	25
Nickel	Bilanz	890	313	500
Quecksilber	Bilanz	12	1,9	2
Zink	Bilanz	14 000	8879	10 000
Blei	Akkumulation	2842	416	500
Chrom	Akkumulation	1820	922	1000
Kupfer	Akkumulation	4931	2939	3000

Auch zeigt der Vergleich der theoretischen Grenzwerte mit den Schwermetall-zu-Phosphor-Relationen aktueller MinRec-Recyclingverfahren (Stand 2016), dass die theoretischen Grenzwerte nicht bei allen Verfahren eingehalten werden können (Tab. 2). Dies gilt für Blei, Chrom und Kupfer.

Zu tolerierende gemässigte Schadstoffakkumulation

Übersteigt die tatsächliche Schadstoffbelastung den theoretischen Grenzwert oder kann dieser im Falle von Blei gar nicht abgeleitet werden, kann ein Grenzwert auf Basis einer zu *tolerierenden gemässigten Schadstoffakkumulation* der Böden abgeleitet werden. Dies wird hier am Beispiel von Blei (Pb) exemplarisch erläutert. Grundlage für die Berechnungen ist der Richtwert für Böden der VBBo. Bis zu diesem Richtwert dürfen Böden mit einem Schadstoff maximal aufgefüllt werden. Ausgangspunkt sind die realen Belastungen Schweizer

Böden. Hier wurde als konservativer Wert das 90-%-Perzentil der heute gemessenen Belastungen als Ausgangswert verwendet. Das Auffüllpotenzial ist demnach die Menge Schadstoff in 0–20cm Bodentiefe, die mit MinRec appliziert werden darf, bis – ausgehend vom 90-%-Perzentil der aktuellen Schadstoffbelastung der Böden – die Schadstoffkonzentration des VBBo-Richtwertes erreicht wird. Bei der Berechnung wurde wiederum ein Bilanzansatz verwendet, der Einträge über atmosphärische Deposition, Stickstoff- und Kaliumdünger sowie Austräge über Ernteprodukte einschliesst. Austräge über Sickerwasser wurden hier nicht berücksichtigt, da die Variabilität dort sehr hoch sein kann und die geringe Verfügbarkeit von Sickerwasserdaten eine differenzierte Betrachtung nicht erlaubt.

Werden nun MinRec mit unterschiedlichen Schadstoffbelastungen appliziert, ergeben sich unterschiedliche Akkumulationszeiten, bis der VBBo-Richtwert im Boden erreicht ist. Abbildung 2 zeigt exemplarisch diesen Zusammenhang. Ein Dünger, der eine Belastung von 500 mg Pb pro kg P enthält, kann über einen Zeitraum von 2800 Jahren bis zum Erreichen des VBBo-Richtwertes appliziert werden. Steigt die Schadstoffkonzentration auf 3000 mg Pb pro kg P, sind dies nur noch 520 Jahre (Abb. 3).

Zur Ableitung der Grenzwerte wurde von einer Mindestdauer von 500 Jahren ausgegangen. Dieser Zeitraum erlaubt hinreichend Reaktionszeit, um Fehlentwicklungen zu erkennen oder auf technische Entwicklungen zu reagieren. Der Bleigrenzwert für eine Akkumulationszeit von 500 Jahren bis zum Erreichen des VBBo-Richtwertes liegt bei 2840 mg Pb pro kg P.

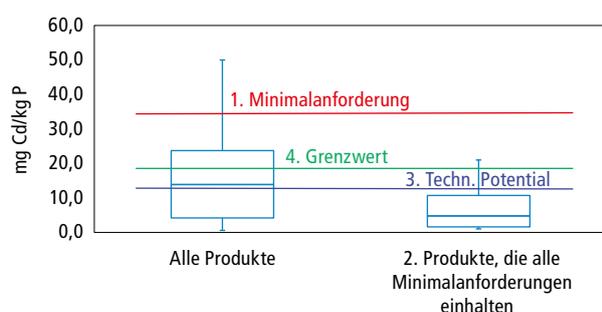


Abb. 3 | Cadmium(Cd)-Belastungen in untersuchten mineralischen Recyclingdüngern und Beispiel für die Herleitung des Grenzwertes nach ALARA-Prinzip für Cadmium.

Tab. 4 | Organische Schadstoffe: Konzentration, Applikation und theoretische Grenzwerte bei MinRec mit unterschiedlichem P₂O₅-Gehalt¹.

	PAK	PCB	PCDD/F
MinRec	(μg kg ⁻¹ TS)		(ng I-TEQ kg ⁻¹ TS)
Empfehlung Grenzwert organische Schadstoffe (Bezug Trockensubstanz)	1000	20	5
Schadstoff-Eintrag bei Normdüngung	(mg ha ⁻¹ a ⁻¹)		(μg ha ⁻¹ a ⁻¹)
Applikation mit MinRec (5 % P ₂ O ₅)	1573	31,0	7,9
Applikation mit MinRec (10 % P ₂ O ₅)	786	15,7	3,9
Applikation mit MinRec (20 % P ₂ O ₅)	393	7,9	2,0
Theoretischer Grenzwert des Schadstoffs (Bezug Phosphor; 34,3 kg P)	(mg kg ⁻¹ P)	(mg kg ⁻¹ P)	(ng I-TEQ kg ⁻¹ P)
MinRec (5 % P ₂ O ₅)	45,8	0,916	229
MinRec (10 % P ₂ O ₅)	22,9	0,458	115
MinRec (20 % P ₂ O ₅)	11,5	0,229	57
Grenzwert organischer Schadstoff	25	0,5	120

PAK = polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PCB = polychlorierte Biphenyle, PCDD/F = Summe der polychlorierten Dibenzo-p-dioxine und polychlorierten Dibenzofurane, I-TEQ = *International toxic equivalents*, TS = Trockensubstanz

¹P-Gehalt wird hier in P₂O₅ angegeben, da dies der Praxis der Angaben bei P-Düngern entspricht.

Grenzwerte für Schwermetalle

Ausgehend von den oben definierten Minimalanforderungen wurden die theoretischen Grenzwerte gemäss ALARA-Prinzip (*as low as reasonably achievable*: so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar) so weit gesenkt, wie sie verfahrenstechnisch nach heutigem Entwicklungsstand für MinRec erreichbar sind. Aus allen bekannten P-Recyclingverfahren wurden diejenigen ausgewählt, welche die Minimalanforderungen für alle betrachteten anorganischen Schadstoffe erfüllen. Aus dieser Gruppe von Produkten wurde dann das technische Potenzial zur weiteren Senkung der Grenzwerte unter die Minimalanforderungen bestimmt. Dabei wurde jeweils die höchste gemessene Konzentration als technisch machbar eingestuft. Die Produkte wurden in vier Rückgewinnungskategorien unterteilt:

1. Kristallisation von P-Salzen
2. Säurefällung aus Klärschlamm direkt

3. Säurefällung aus Klärschlammasche
4. thermochemische Prozesse (Pyrolyse, Verbrennung mit Additiven und metallurgische Verfahren)

In jeder Kategorie existiert bereits heute mindestens je ein Verfahren, das sämtliche Minimalanforderungen einhalten kann. Die Grenzwerte wurden dann unter Berücksichtigung der Schwankungen der Messwerte so festgelegt, dass diese maximal 20 % über dem technisch einhaltbaren Wert und mindestens 10 % unter den Minimalanforderungen liegen.

Abbildung 3 veranschaulicht am Beispiel von Cadmium die Ableitung des Grenzwertes anhand des ALARA-Prinzips. Grundlage bildete die Minimalanforderung für Cd nach Bilanzansatz von 39 mg Cd pro kg P (Abb. 3, Schritt 1). MinRec-Produkte, welche die Minimalanforderungen nicht erfüllten (Weggler *et al.* 2017) (Abb. 3, Schritt 2), wurden nicht berücksichtigt. Im nächsten

Dünger-Schadstoffkonzentration ≤ VBBö-Richtwert

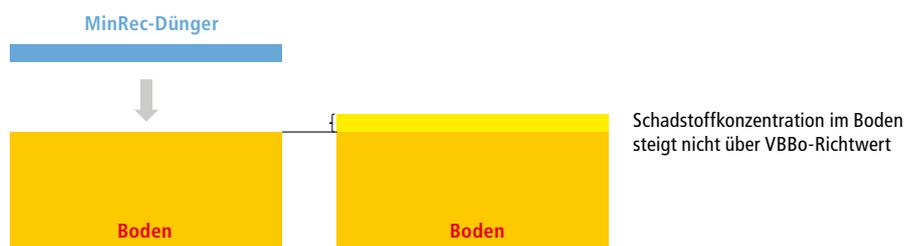


Abb. 4 | Prinzip des Ableitungskonzeptes «Gleiches zu Gleichem».

Tab. 5 | Schadstoffgrenzwerte für mineralische Phosphor-Recyclingdünger in der Schweiz.

	Grenzwert
Anorganische Schadstoffe	
	(mg kg ⁻¹ P)
Arsen	100
Blei	500
Cadmium	25
Chrom	1000
Kupfer	3000
Nickel	500
Quecksilber	2
Zink	10000
Organische Schadstoffe	
	(mg kg ⁻¹ P)
PAK ¹	25
PCB ²	0,5
	(ng I-TEQ kg ⁻¹ P)
PCDD/F ³	120

Abkürzungen s. Tab. 4

¹Die Beurteilungswerte gelten für die Summe der folgenden 16 PAK-Leitverbindungen der EPA (*Priority Pollutants List der Environmental Protection Agency* der USA): Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthren, Pyren, Benzo(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(a)pyren, Indeno(1,2,3-c,d)pyren, Dibenzo(a,h)anthracen und Benzo(g,h,i)perylene.

²Summe der sieben Kongeneren gemäss IRMM (*Institute for Reference Materials and Measurements*), IUPAC-Nr. 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180.

³PCDD/F = Summe der polychlorierten Dibenzo-p-dioxine und polychlorierten Dibenzofurane.

Schritt wurden von den verbleibenden Produkten das technische Potenzial zur weiteren Senkung der Grenzwerte bestimmt (21 mg Cd pro kg P) (Abb. 3, Schritt 3) und in einem vierten Schritt der Grenzwert auf Grund der Schwankungen der Daten etwas höher bei 25 mg Cd pro kg P festgelegt. Tabelle 3 zeigt die bei diesem Vorgehen abgeleiteten Grenzwerte für MinRec.

Grenzwerte für organische Schadstoffe

Aufgrund der sehr geringen Konzentrationen der organischen Schadstoffe in den untersuchten MinRec-Produkten wurde das Prinzip «Gleiches zu Gleichem» angewandt. Damit dürfen die Gehalte in MinRec den VBBo-Richtwert, der als obere Grenze für den langfristigen Erhalt der Bodenfruchtbarkeit abgeleitet wurde, nicht überschreiten. Ein Ausbringen eines solchen Düngers führt zu einer geringfügigen Erhöhung der mineralischen Substanz des Bodens, aber nicht zu einer Erhöhung der Schadstoffkonzentration über den VBBo-Richtwert hinaus (Abb. 4).

Die Analysen verschiedener MinRec-Produkte haben gezeigt, dass die organischen Schadstoffkonzentrationen

relativ gering waren. Vier MinRec-Proben wiesen relativ hohe PAK-Werte von rund 9000 µg pro kg Trockensubstanz auf, 15 Proben waren im Mittel bei 100 µg pro kg Trockensubstanz. Die PCB-Konzentrationen waren mit <2 µg pro kg Trockensubstanz für alle Produkte sehr niedrig. Die mittleren Werte von PCDD/F lagen bei rund 3 ng WHO-TEQ2005 pro kg Trockensubstanz, mit Proben bis zu 18 ng WHO-TEQ2005 pro kg Trockensubstanz (WHO-TEQ2005: Toxic Equivalents gemäss WHO 2005, Einheit für die Angabe der PCB-Belastung)

Die Richtwerte nach VBBo wurden in einem ersten Schritt als Grenzkonzentrationen (µg beziehungsweise ng an organischen Schadstoffen pro kg Dünger Trockensubstanz) ausgedrückt (Tab. 4). Da für PCB kein VBBo-Richtwert besteht, wurde der Prüfwert um den Faktor 10 reduziert und als «Richtwert» angenommen. Dieser Wert von 20 µg pro kg (Summe der sechs Indikator-PCBs) ist um einen Faktor 10 höher als der momentane Hintergrundwert von PCB in landwirtschaftlichen Böden.

Wird von der Normdüngung (34,3 kg P pro ha und Jahr) ausgegangen, ergeben sich in Abhängigkeit vom P-Gehalt des Düngers unterschiedliche Schadstofffrachten (Tab. 4). Diese werden in einem zweiten Schritt wiederum auf Phosphor bezogen (Tab. 4). Zur Festlegung des Grenzwertes wurde von einem mittleren P-Gehalt von 10 % P₂O₅ bzw. 4,4 % P in den untersuchten MinRec-Produkten (5–20 % P₂O₅ bzw. 2,2–8,8 % P) ausgegangen (grüne Werte in Tab. 4). Die gerundeten Werte von 25 mg PAK pro kg P, 0,5 mg PCB pro kg P bzw. 120 ng I-TEQ pro kg P für PCDD/F (Tab. 4) ergeben Auffüllzeiten von 20 000 bis 90 000 Jahren bis zum Erreichen des Richtwertes, wenn allein mit den eingebrachten Frachten an Schadstoffen (d. h. ohne die mineralische Matrix) gerechnet wird. Damit ist eine ausreichende Sicherheit gegeben.

Das Schweizer Konzept

Für die Schweiz ergeben sich nach dem oben erläuterten Vorgehen die in Tabelle 5 gezeigten Grenzwerte für anorganische und organische Schadstoffe. Diese werden 2019 in die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) aufgenommen und eine eigene Düngerkategorie «Mineralische Recyclingdünger» in der Düngerverordnung (DüV) neu definiert. Die Schweiz verfügt damit als erstes Land in Europa über ein wissenschaftlich basiertes und nachvollziehbares Konzept für mineralische Recyclingdünger, das die Phosphorressourcen nachhaltig schont und dazu beiträgt, Böden in Zukunft durch Phosphordünger geringer mit Schadstoffen zu belasten. ■

Riassunto**Concetto svizzero dei valori limite di sostanze nocive per i concimi ottenuti da riciclaggio**

Il fosforo è un elemento nutritivo essenziale per la crescita delle piante. La Svizzera dipende dalle importazioni di concimi a base di fosforo che provengono dai depositi e sono sempre più contaminate da sostanze nocive. D'altra parte vi sono scorte di fosforo, finora non utilizzate, nei fanghi di depurazione e nei rifiuti dei macelli, che potrebbero sostituire completamente le importazioni di concimi. In Svizzera è stato pertanto introdotto l'obbligo di riciclaggio per il fosforo proveniente dai fanghi di depurazione nonché dalle farine di ossa e di carne. A tal proposito vi sono nuovi «concimi minerali ottenuti da riciclaggio» grazie a cui le immissioni di sostanze nocive nei suoli svizzeri saranno notevolmente diminuite. È stato sviluppato un nuovo concetto di valori limite delle sostanze nocive per i concimi minerali ottenuti da riciclaggio per le sostanze inorganiche e organiche che garantisce un utilizzo sicuro dei concimi nell'agricoltura. Il presente contributo documenta l'adeguamento dei valori soglia delle sostanze nocive validi in Svizzera per i concimi minerali a base di fosforo ottenuti dal riciclaggio.

Summary**Pollutant threshold values for mineral recycling fertilisers: the Swiss concept**

Phosphorus is an essential nutrient for plant growth. Switzerland is reliant upon the import of phosphorus fertilisers, which come from deposit reserves and are increasingly burdened with pollutants. On the other hand, there are hitherto unused phosphorus stocks in sewage sludge and slaughterhouse waste that could completely replace fertiliser imports. Therefore, Switzerland has introduced the mandatory recycling of phosphorus from both sewage sludge and meat and bone meal. This creates new 'mineral recycling fertilisers', which have the potential to substantially reduce pollutant inputs in Swiss soils. A concept of threshold values for inorganic and organic pollutants has therefore been developed for mineral recycling fertilisers that will ensure a hazard-free application of the fertilisers in agriculture. This paper documents how the pollutant threshold values, which are implemented in Swiss legislation, were derived for mineral phosphorus recycling fertilisers.

Key words: mineral recycling fertilizers, phosphorus, sewage sludge, threshold value.

Literatur

- BAFU & BLW, 2008. Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. *Umwelt-Wissen* Nr. 0820, Bundesamt für Umwelt, Bern, 221 S.
- BAFU, 2018. Revision der Prüf- und Sanierungswerte von anorganischen Stoffen in belasteten Böden nach VBBo bzw. AltIV. Interne Datenbank, Agroscope.
- Bannick C.G., Bieber E., Böken H. & Brach M., 2001. Grundsätze und Massnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden. Umweltbundesamt (D), Dessau-Rosslau, Texte 59/01, Zugang: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/grundsaeetze-massnahmen-fuer-eine> [6.11.18].
- Bielert U., Heinrichs H. & Becker K.-W., 1999. Validierung von Boden-Eluatgehalten zur Prognose von Inhaltsstoffen des Boden-Sickerwassers für das untergesetzliche Regelwerk/BBodSchV. Umweltbundesamt (D), Dessau-Rosslau, Forschungsbericht 297 73 008/02.
- Gisler A. & Schwab L. 2015. Marktkampagne Dünger 2011/2012. Kennzeichnung und Schwermetalle. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R.G. & Keller A., 2015. Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2009. Zustand und Veränderung der anorganischen Schadstoffe und Begleitparameter. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 81 S.
- Richner W. & Sinaj S., 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung Schweiz* 8 (6), Spezialpublikation, 276 S.
- Knoche H., Klein M. & Hester A., 1997. Datenbanksystem zur Analyse des Transfers von Schwermetallen vom Boden in die Pflanze. In: *FifU Oekotoxikologie* (ed).
- Kratz S., Schick J. & Schnug E., 2016. Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany. *Science of the Total Environment* 542, 1013–1019.
- Mehr J., Jedelhauser M. & Binder C.R., 2018. Transition of the Swiss phosphorus system towards a circular economy-part 1: Current state and historical developments. *Sustainability* (Switzerland) 10.
- NABEL, 2016. Luftbelastung 2015: Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 132 S.
- USGS, 2018. U.S. Geological Survey, 2018. Mineral commodity summaries, 2018. U.S. Geological Survey, Reston. Zugang: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf> [6.11.18].
- Weggler K., Richner W., Reiser R., Bucheli T., Bürge D. & Mayer J., 2017. Entwicklung agronomischer und ökologischer Anforderungen an die Mindestqualität von Mineralischen Recyclingdüngern (MinRec), Teil I: Grundlagen. Bericht an das Bundesamt für Landwirtschaft, 75 S. Zugang: <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/produktionsmittel/duenger.html> [6.11.18].