

Versuch zur Langfristwirkung der Klärschlammanwendung

38 Jahre Nährstoff- und Schwermetall-Gehalte untersucht

In Deutschland fallen derzeit jährlich etwa 1,7 Mio. Tonnen Klärschlamm (Trockenmasse) aus kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen an. Davon wurden im Jahr 2017 etwa 18 Prozent in der Landwirtschaft und weitere 10 Prozent im Landschaftsbau stofflich verwertet. Der Anteil des stofflich verwerteten Klärschlammes ist rückläufig. So wurden im Jahr 2010 noch etwa 30 Prozent des Klärschlammes in der Landwirtschaft und 14 Prozent im Landschaftsbau verwertet.



Durch die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm können Nährstoffe im Kreislauf gehalten und die Böden mit organischer Substanz versorgt werden. Foto: agrar-press

In Rheinland-Pfalz liegt der Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung bei einem jährlichen Klärschlammanfall von etwa 76 000 t Trockenmasse (TM, 2017) mit 56 Prozent noch wesentlich höher als im Bundesdurchschnitt. Dieser betrug im Jahr 2010 noch etwa 70 Prozent und ist daher ebenfalls rückläufig.

Klärschlamm könnte 10 Prozent des P-Bedarfes decken

Durch die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm können Nährstoffe im Kreislauf gehalten und die Böden mit organischer Substanz versorgt werden. Berechnungen des wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen (2015) weisen für Phosphor dem aktuell in der Landwirtschaft verwerteten Klärschlamm einen Anteil von 3 Prozent am nationalen Düngbedarf zu. Für Stickstoff und die Humusproduktion beträgt der Anteil nur etwa 1 Prozent. Die gesamte in öffentlichen Kläranlagen anfallende Klärschlammmenge könnte nach diesen Berechnungen zu etwa 10 Prozent den aktuellen Phosphor-Bedarf der Landwirtschaft decken.

Neben einer Nährstoffquelle ist Klärschlamm allerdings auch eine Senke für anorganische und organische Schadstoffe. Um deren Anreicherung im Boden zu minimieren, wurde im Jahr 2017 die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) novelliert. Im Zuge dieser Novellierung wurden die Schadstoffgrenzwerte im Klärschlamm und Boden abgesenkt, was wesentlich zum Rückgang der in der

Tabelle 1: Varianten des Klärschlammversuches

Variante	Klärschlammmenge t TM pro ha und Jahr	Mineraldüngung ^{b)}
1	ohne Klärschlamm	N, P, K
2	1,66 jährlich	N, K
3	3,32 jährlich	N, K
4	5,0 alle 3 Jahre	N, K
5	10,0 alle 3 Jahre	N, K
6	5,0 alle 3 Jahre	K ^{c)}
7	10,0 alle 3 Jahre	K ^{c)}

a) bis zum Jahr 1989 wurden die 3-fachen Klärschlamm-mengen ausgebracht;
 b) bis zum Jahr 1992 erhielten die Varianten 2 – 7 eine mineralische P-Düngung;
 c) bis zum Jahr 1986 mineralische Stickstoff-Düngung in den Varianten 6 und 7 in den Jahren ohne Klärschlamm-Anwendung

Tab. 2: Durchschnittliche N-, P- und K-Düngung mit Mineraldüngern sowie mit Klärschlamm

Variante	(Wert in Klammern = Klärschlamm)	Stickstoff (N)*	Phosphor (P)*	Kalium (K)*
1	Ohne Klärschlamm	150 (-)	28 (-)	96 (-)
2	1,67 t jährlich	133 (67)	11 (51)	92 (5)
3	3,32 t jährlich	121 (134)	11 (103)	92 (9)
4	5,0 t alle 3 Jahre	137 (65)	11 (53)	96 (4)
5	10,0 t alle 3 Jahre	124 (130)	11 (106)	96 (8)
6	5,0 t alle 3 Jahre; ohne N	24 (65)	11 (53)	92 (4)
7	10,0 t alle 3 Jahre; ohne N	24 (130)	11 (106)	92 (0)

*Angaben jeweils in kg pro Hektar und Jahr

Landwirtschaft verwerteten Anteile geführt haben dürfte.

Zur Untersuchung der langfristigen Auswirkungen landwirtschaftlicher Klärschlammverwertung wird auf der Versuchsstation Rinkenbergerhof der LUFA Speyer bereits seit 1981 ein Versuch mit unterschiedlichen Ausbringungsintensitäten von Klärschlamm durchgeführt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse dieses Langzeitversuches im Hinblick auf die Phosphor-, Stickstoff- und Schwermetallbilanzen dargestellt.

Versuche zur Langzeitwirkung laufen seit 1981

Der Versuchsstandort Rinkenbergerhof liegt in der Oberrheinebene nördlich von Speyer auf 99 m über NN. Bei dem Boden handelt es sich um eine Braunerde bis Pseudogley-Braunerde aus Terrassensanden des Rheins und des Speyerbaches mit einer Ackerzahl von 25. Die nutzbare Feldkapazität beträgt etwa 10 Prozent. Im langjährigen Mittel fallen knapp 600 mm Jahresniederschlag, die durchschnittliche Jahrestemperatur beträgt 10 °C. Aufgrund der geringen Wasserkapazität des Bodens und des relativ niedrigen Grundwasserstandes von rund 3 m wird der Versuch zur Vermeidung von extremen Trockenschäden im Bedarfsfall beregnet.

Der Klärschlamm-Versuch wird seit 1981 mit der Fruchtfolge Zuckerrübe – Winterweizen – Wintergerste durchgeführt. Seit 2005 wird die Zuckerrübe in der Fruchtfolge durch Körnermais ersetzt.

Klärschlamm-Anwendung erfolgt seit 1990 in zwei Intensitätsstufen:

- in Höhe der nach der derzeit gültigen Klärschlammverordnung (AbfKlärV) zulässigen Aufbringungsmenge sowie
- der doppelten Aufbringungsmenge (Tabelle 1).
- **Zusätzlich** wird eine Kontroll-Variante ohne Klärschlamm-Anwendung untersucht.

In Abweichung zu den in Tabelle 1 angegebenen Mengen wurden bis 1989

auf der Basis der bis dahin geltenden Regelung die 3-fachen Klärschlamm-Mengen ausgebracht. Die Klärschlamm-Anwendung erfolgt in den Varianten 2 und 3 jährlich und in den Varianten 4 bis 7 jeweils alle drei Jahre zur Sommerung (Zuckerrübe beziehungsweise Körnermais). Die Ernterückstände wurden mit Ausnahme des Maisstrohs ab 2005 in allen Varianten von der Fläche abgefahren.

Bei der Bemessung der mineralischen Stickstoff-Düngermenge wurden im Anwendungsjahr von Klärschlamm 20 Prozent der Stickstoff-Menge im Klärschlamm als pflanzenverfügbar angenommen. In den Varianten 6 und 7 wurde bis zum Jahr 1986 nur in den Jahren ohne Klärschlamm-Anwendung eine mineralische Stickstoff-Düngung durchgeführt. Seit 1987 wird in diesen Varianten kein mineralischer Stickstoff mehr gedüngt.

Bis zum Jahr 1992 wurde der gesamte Versuch einheitlich mit mineralischem Phosphor gedüngt. Seit 1993 erfolgt in den Varianten mit Klärschlamm-Anwendung keine mineralische Phosphor-Düngung mehr. Die im Mittel der 38 Versuchsjahre mit Mineraldüngern ausgebrachten N-, P- und K-Mengen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Nährstoffmengen im Klärschlamm

Mit der im jeweiligen Zeitraum zulässigen Klärschlamm-Menge (5 t TM/ha und Jahr bis 1989; 1,67 t TM/ha und Jahr ab 1990) wurden im Mittel der 38 Versuchsjahre etwa 2,48 t TM, 574 kg organischer Kohlenstoff, 66 kg Gesamtstickstoff, 52 kg Phosphor, 16 kg Magnesium und 4 kg Kalium pro Hektar und Jahr ausgebracht (Tabelle 2). Diese Zahlen bestätigen, dass Klärschlamm vor allem eine bedeutende Stickstoff- und Phosphatquelle ist, während die Kaliumzufuhr mit Klärschlamm vernachlässigbar ist.

Aufgrund der Konditionierung des verwendeten Klärschlammes wurden auch relativ hohe Mengen an Calcium

(157 kg/ha und Jahr) ausgebracht. In den Varianten 3, 5 und 7 mit der doppelten Klärschlamm-Aufbringung wurden erwartungsgemäß auch die Nährstoffausbringungsmengen verdoppelt.

Ertragswirkung des Klärschlammes

Im Versuch wurden auch die durchschnittlichen relativen Kornerträge von Getreide und Körnermais sowie die relativen Rüben-erträge verglichen. Die Kontrollvariante ohne Klärschlamm-Anwendung (Variante 1) wurde gleich 100 Prozent gesetzt. Bei Getreide und Körnermais wurden in den Klärschlammvarianten mit niedriger Aufwandmenge und zusätzlicher Stickstoff-Düngung nach Bedarf (Varianten 2 und 4) vergleichbare Erträge erzielt. Etwas niedrigere Erträge wurden bei Anwendung der hohen Klärschlammmenge erzielt (Varianten 3 und 5). Wurde dagegen kein zusätzlicher mineralischer Stickstoff gedüngt (Varianten 6 und 7), so wurden nur noch 61 beziehungsweise 68 Prozent der Erträge der Kontrolle erzielt.

Im Vergleich zum Getreide reagierte die Zuckerrübe insgesamt ungünstiger auf die Klärschlamm-Anwendung. Statistisch gesicherte Mindererträge wurden hier vor allem bei den Klärschlamm-Aufbringungen im 3-jährigen Abstand (Varianten 4 und 5) gemessen. Besonders deutlich zeigte dies die Variante 5, bei der die Zuckerrüben-Erträge auf 79 Prozent der Kontroll-Variante abfielen. In den Klärschlamm-Varianten war gegenüber der Kontrolle eine deutlich erhöhte Blattmasse erkennbar. Ohne zusätzliche Stickstoff-Düngung wurden 69 beziehungsweise 72 Prozent der Erträge der Kontrolle ermittelt.

Schwermetall-Gehalte und -Frachten des Klärschlammes

Neben seiner positiven Nährstoffwirkung müssen mögliche Schädigungen aufgrund kritischer Gehalte an Schwer-

Tabelle 3: Vergleich der aus der BioAbfV und Altlastenverordnung abgeleiteten Grenzfrachten mit den im Versuch ausgebrachten Schwermetallmengen

	Grenzfracht (g/ha und Jahr)		Fracht Klärschlamm-Versuch LUFA Speyer 1990 - 2018 (g/ha und Jahr)	
	BioAbfV	BBoSchV	Variante 2	Variante 3
Pb	1000	400	165	331
Cd	10	6	2	4
Cr	667	300	84	169
Cu	667	360	796	1592
Ni	334	100	56	113
Hg	6,7	1,5	1,7	3,4
Zn	2668	1200	2028	4056

metallen und organischen Schadstoffen im Klärschlamm in die Betrachtung mit einbezogen werden. Dazu lohnt sich ein Blick auf die Entwicklung der Schwermetallgehalte des im Versuch eingesetzten Klärschlammes (Grafik). Mit wenigen Ausnahmen (1991 und 1993) wurde Klärschlamm aus derselben Kläranlage verwendet. Die zeitliche Entwicklung der Gehalte zeigt insgesamt einen sehr deutlichen Rückgang der Gehalte an Cadmium (Cd), Blei (Pb), Chrom (Cr) und Quecksilber (Hg) auf rund 10 bis 20 Prozent der Maximalwerte zu Beginn der Untersuchungen. Demgegenüber waren die Rückgänge der Gehalte an Nickel (Ni) und Zink (Zn) nur moderat. Bei Kupfer (Cu) ist sogar eine leichte Zunahme der Gehalte zu erkennen.

Als Eintragspfade kommen Kupfer- und Zinkrinnen beziehungsweise -bleche für die Dachentwässerung in Betracht. Bei der Interpretation der Gehalte dieser Schwermetalle ist zu berücksichtigen, dass Kupfer und Zink auch essentielle Mikronährstoffe für die Pflanzen sind. Gegenwärtig liegen alle Schwermetall-Gehalte des verwendeten

gesetzlich zulässigen Klärschlammmenge (3,32 t TM pro Hektar und Jahr) wurden die Grenzfrachten bei Kupfer (Cu) und Zink (Zn) sowohl nach BBodSchV als auch nach BioAbfV, bei Nickel (Ni) und Quecksilber (Hg) nur nach BBodSchV überschritten.

In der Summe wurden über die 38 Versuchsjahre die in Tabelle 4 aufgeführten Schwermetallmengen eingebracht. Neben Schwermetall-Einträgen mit Klärschlamm wurden hier auch die Einträge über den Mineraldünger berücksichtigt. Diese wurden auf Grundlage von Daten einer UBA-Studie zur Schwermetallkonzentration in Mineraldüngern abgeschätzt. Erwartungsgemäß waren die Schwermetalleinträge in der Kontrollvarianten mit ausschließlicher Mineraldüngeranwendung am niedrigsten. Allerdings ist vor allem mineralischer P-Dünger eine nicht unerhebliche Quelle für Einträge von Cadmium (Cd) und Chrom (Cr). So betrug etwa die im Versuch über Mineraldünger eingetragene Schwermetallmenge an Cadmium zwischen 20 und 50 Prozent des mit dem Klärschlamm

Tabelle 4: Schwermetalleinträge mit Mineraldünger + Klärschlamm 1981 bis 2018 (kg/ha)

Var.	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn
1	0,5	0,2	1,8	0,17	0,27	<0,01	2,8
2	18	0,4	9	39	4,1	0,2	138
3	35	0,8	18	79	8,1	0,4	274
4	19	0,6	10	40	4,4	0,2	138
5	38	1,1	20	79	8,6	0,4	274
6	19	0,6	10	39	4,3	0,2	138
7	37	1,1	19	79	8,6	0,4	274

Dies unterstreicht auf der einen Seite die positive P-Wirkung von Klärschlamm, zeigt aber auch, dass vor Klärschlamm-Anwendungen der Nährstoffbedarf zu überprüfen ist, um Umweltschäden zu vermeiden und die Vorgaben der Düngeverordnung einzuhalten. Die Kalium- und Magnesiumgehalte wurden durch die Klärschlamm-Anwendung erwartungsgemäß nicht beeinflusst. Während die Borgehalte in zurückliegenden Bodeninventuren bei Klärschlamm-Anwendung einen leichten Anstieg aufwiesen hatte im Jahr 2018 die Kontrollvariante die höchsten Borgehalte.

Schwermetallgehalte unter den Grenzwerten

Die Schwermetallgehalte im Boden stiegen infolge der langjährigen Klärschlamm-Düngung zwar nicht besorgniserregend an, insbesondere bei Blei (Pb), Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Quecksilber (Hg) ist allerdings eine deutliche Abhängigkeit der Bodenwerte von der Klärschlamm-Ausbringung festzustellen (Tabelle 6). Bei Anwendung der zulässigen Klärschlamm-mengen (Varianten 2, 4 und 6) liegen die Schwermetallgehalte im Boden auch nach langjähriger Klärschlamm-Anwendung unterhalb der Grenzwerte nach AbfKlärV. Diese wurden mit der Novellierung der AbfKlärV im Jahr 2017 den Vorsorgewerten nach BBodSchV angeglichen.

Tabelle 5: Bodenuntersuchungsergebnisse in 0-30 cm Bodentiefe nach 38 jähriger Klärschlamm-Anwendung (Probenahme August 2018)

Variante	pH-Wert CaCl ₂	C _{org} (%)	N _{ges} (%)	P ₂ O ₅ mg/100 g	K ₂ O mg/100 g	Mg mg/100 g	B mg/kg
1	6,3	0,68	0,042	19	8	3,2	0,36
2	6,2	0,79	0,060	23	10	3,5	0,22
3	6,2	0,90	0,086	33	9	4,5	0,28
4	6,0	0,72	0,049	20	8	4,0	0,21
5	6,1	0,89	0,087	40	8	4,4	0,33
6	6,3	0,75	0,052	33	10	4,5	0,24
7	6,4	0,93	0,086	56	10	5,2	0,37

ten Klärschlammes unterhalb der Grenzwerte der AbfKlärV, nur im Jahr 2016 wurde der Grenzwert bei Quecksilber (Hg) leicht überschritten.

Zusätzlich zu den Schadstoffkonzentrationen sind für die Risikobetrachtung auch Schadstofffrachten zu beachten. Dazu sind die im Versuch ausgebrachten Frachten den gesetzlich zugelassenen Grenzfrachten nach Bioabfallverordnung (BioAbfV) und Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) gegenübergestellt. Dabei wird in Tabelle 3 lediglich der Zeitraum mit den aktuell gültigen Aufwandmengen und gleichzeitig geringeren Schwermetallkonzentrationen berücksichtigt.

Überschreitungen der Grenzfrachten nach BBodSchV ergeben sich dabei für Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg) und Zink (Zn). Die aus der BioAbfV abgeleiteten Grenzfrachten wurden dagegen nur für Kupfer (Cu) überschritten. Bei Ausbringung der doppelten als der

eingetragenen Cadmiums. Für alle weiteren Schwermetalle gilt, dass deren überwiegender Anteil mit dem Klärschlamm eingetragen wurde. Eine Verdopplung der Klärschlammmenge führte erwartungsgemäß zu einer Verdopplung der Schwermetalleinträge.

Nährstoffe und Schwermetalle im Boden nach 38 Versuchsjahren

Im Vergleich zur Kontrolle wurden 38 Jahre nach Versuchsbeginn in den Varianten mit Klärschlamm-Anwendung deutlich erhöhte Humus-, Stickstoff und Phosphatgehalte im Boden gemessen (Tabelle 5). Die pH-Werte zeigten keine Differenzierung, da die Kontrollvariante zum Ausgleich der Kalkwirkung des Klärschlammes gekalkt wurde. Nach langjähriger Klärschlamm-Ausbringung ist zu beachten, dass die P-Gehalte im Boden auch deutlich über der empfohlenen Gehaltsklasse „C“ liegen können.

Tabelle 6: Schwermetallgehalte in 0-30 cm Bodentiefe im Klärschlammversuch

Variante	Pb	Cd ^{a)}	Cr ^{a)}	Cu	Zn	Ni ^{a)}	Hg ^{a)}
mg / kg Trockenmasse							
1	19	<0,2	12	11	42	6,5	0,07
2	21	<0,2	12	15	55	6,6	0,09
3	23	0,21	14	20	74	7,4	0,13
4	22	<0,2	12	13	52	6,6	0,08
5	26	0,21	14	20	73	7,1	0,11
6	34	<0,2	12	14	59	6,4	0,08
7	29	0,2	13	22	86	6,8	0,12
Grenzwert AbfKlärV ^{b)}	40	0,4	30	20	60	15	0,1

a) Bodenuntersuchung 2010; b) Grenzwert für die Bodenart Sand

Tabelle 7: N- und P-Salden (Ø Einträge Min.dünger und KS minus Abfuhr) sowie Wiederfindung der Mehrsalden im Vergleich zur Kontrollvariante

Vari- ante	Stickstoff in 0-90 cm Tiefe		Phosphor in 0-90 cm Tiefe	
	Saldo (kg/ha und Jahr)	Wiederfindung im Boden (%) aufgrund der Klärschlamm- Anwendung	Saldo (kg/ha und Jahr)	Wiederfindung im Boden (%) aufgrund der Klärschlamm- Anwendung
1	10	(Kontrolle)	1,2	(Kontrolle)
2	66	46	38	83
3	124	44	92	63
4	70	3	40	24
5	124	43	94	54
6	18	26	49	29
7	77	71	101	68

Allerdings ist der Abstand zum neuen Grenzwert durch dessen Absenkung vor allem für Zink (Zn) deutlich geringer geworden. Bei überhöhter Klärschlamm-Anwendung (Varianten 3, 5 und 7) wurden die aktuellen Grenzwerte bei Kupfer (Cu) und Zink (Zn) erreicht beziehungsweise überschritten. Außerdem zeigten sich bei überhöhter Klärschlamm-Anwendung bei Blei (Pb), Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Quecksilber (Hg) auch Anreicherungen in der Bodenschicht 30 bis 60 cm (nicht dargestellt). In der untersten Bodenschicht (60 bis 90 cm) wurde dagegen keine Erhöhung der Schwermetallgehalte durch die Klärschlamm-Anwendung festgestellt.

Im Klärschlammversuch Speyer wurde auch die Schwermetallakkumulation in den Pflanzen untersucht. Wie aufgrund der Bodengehalte zu erwarten, ergaben sich dabei keine einheitlichen beziehungsweise signifikant höheren Werte in den Pflanzen als Folge der Klärschlammdüngung.

Stickstoff- und Phosphorbilanzen

In Tabelle 7 sind die durchschnittlichen Stickstoff- und Phosphor-Salden der Versuchsvarianten, sowie die berechneten Wiederfindungen der Mehrsalden aufgrund der Klärschlamm-Anwendung im Boden dargestellt. Im Mittel der 38 Versuchsjahre wies die Kontrollvariante ohne Klärschlamm-Anwendung fast ausgeglichene Stickstoff- und Phosphor-Salden auf (10 beziehungsweise 1,2 kg/ha und Jahr). Bei Klärschlamm-Anwendung erhöhten sich diese Salden erwartungsgemäß deutlich.

In den Varianten mit zusätzlicher Mineralstickstoff-Düngung (Varianten 2 bis 5) wurden beim N-Saldo Erhöhungen um rund 60 (niedrige Klärschlamm-Menge) beziehungsweise um fast 120 kg/ha und Jahr (hohe Klärschlamm-Menge) festgestellt. In den Varianten ohne N-Mineraldüngung war

der N-Saldo dagegen deutlich weniger erhöht (8 beziehungsweise 67 kg/ha und Jahr). Die „Mehrmengen“ an Stickstoff wurden im Boden erwartungsgemäß nicht vollständig wiedergefunden (Vergleich mit Kontrolle ohne Klärschlamm). Bei zusätzlicher Mineralstickstoff-Düngung (Varianten 2 bis 6) wurden mit Ausnahme von Variante 4 etwa 45 Prozent des zusätzlichen Stickstoffs im Boden bis in 90 cm Tiefe wiedergefunden.

Der überwiegende Teil des nicht im Boden wiedergefundenen Stickstoffs dürfte durch Auswaschung mit dem Sickerwasser in tiefere Bodenschichten beziehungsweise das Grundwasser verlagert worden sein. Zusätzlich sind in geringen Anteilen auch gasförmige Stickstoff-Verluste denkbar. Die niedrigen Wiederfindungen bei Variante 4 sind nicht erklärbar. Die geringe Wiederfindung in Variante 6 ist dagegen durch ein niedriges „Mehrsaldo“ im Vergleich zur Kontrolle und folglich vergleichsweise kleine, analytisch nur schwer erfassbare Unterschiede in den Bodengehalten zu erklären. Mit 71 Prozent Wiederfindung ist der Anteil von Variante 7 (hohe Klärschlamm-Menge ohne zusätzliche Stickstoff-Mineraldüngung) höher als in den Varianten mit zusätzlicher Mineralstickstoff-Düngung.

Die potenziellen Verlustmengen für Phosphor sind im Vergleich zu Stickstoff als niedriger einzustufen. Die hier

infrage kommenden Verlustpfade über Erosion, Drainagen oder Auswaschung sind für den Standort zudem nur in geringer Höhe zu erwarten. Es sollten daher hohe Anteile der zusätzlich über die Klärschlamm-Anwendung als „Mehrsaldo“ auftretenden Phosphor-Menge im Boden gefunden werden (als Gesamt-Phosphor). Während in Variante 2 mit einem Anteil von 83 Prozent dieser Erwartung entspricht, sind die Wiederfindungen der andern Varianten deutlich niedriger. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten lassen sich nicht erklären. Im Mittel über alle Varianten wird etwa die Hälfte des „Mehrsaldos“ von Phosphor durch die Klärschlamm-Anwendung im Boden wiedergefunden. Auch bei Berücksichtigung von Mess- und Verfahrensfehlern bei der hier vorgestellten Bilanzierungsmethode ist daher zu vermuten, dass die Auswaschung von löslichem Phosphor am Standort offensichtlich weit ausgeprägter als angenommen ist.

Schwermetalle im Oberboden angereichert

In Tabelle 8 sind die im Vergleich zur Kontrollvariante mit dem Klärschlamm eingetragenen Mehrmengen an Schwermetallen der Wiederfindung im Boden (ebenfalls im Vergleich zur Kontrolle) im 0 bis 30 cm Tiefe gegenübergestellt. Unter Berücksichtigung der Fehler einer solchen Betrachtung kann für die Schwermetalle Blei (Pb), Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg) und Zink (Zn) festgestellt werden, dass hohe Anteile der Mehreinträge mit dem Klärschlamm erwartungsgemäß im Oberboden wiedergefunden wurden.

Für Cadmium (Cd), Chrom (Cr), und Nickel (Ni) wurden dagegen deutlich geringere Anteile berechnet. Eine Berücksichtigung des Bodens bis in 90 cm Tiefe führte hier sogar zu negativen Wiederfindungen (nicht dargestellt). Bei diesen Schwermetallen musste auf zurückliegende Bodendaten aus dem Jahr 2010 zurückgegriffen werden. Dies könnte teilweise die niedrigeren Wie-

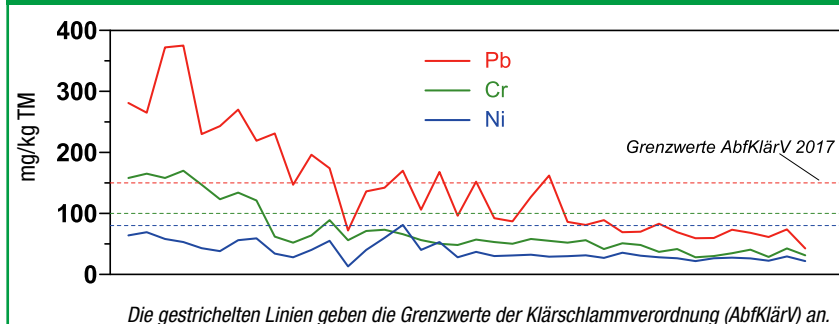
Tabelle 8: Mehrmengen des Eintrags an Schwermetallen mit Klärschlamm (1. Zahl) im Vergleich zur Wiederfindung im Boden 0-30 cm (2. Zahl)

Vari- ante	Pb	Cd ^{a)}	Cr ^{a)}	Cu	Ni ^{a)}	Hg ^{a)}	Zn	Alle Werte in kg pro Hektar
2	17. Jul	0,2 / <0,1	08. Jan	39 / 15	4 / <1	0,2 / 0,1	135 / 59	
3	35 / 19	0,6 / 0,1	16. Aug	79 / 37	08. Apr	0,4 / 0,3	272 / 141	
4	18 / 14	0,4 / <0,1	08. Jan	39 / 9	4 / <1	0,2 / <0,1	135 / 45	
5	37 / 30	0,9 / 0,1	18. Aug	79 / 39	08. Mrz	0,4 / 0,2	271 / 138	
6	18 / 70	0,4 <0,1	08. Jan	39 / 14	4 / -1	0,2 / 0,1	134 / 74	
7	37 / 46	0,9 <0,1	18. Mai	79 / 67	08. Jan	0,4 / 0,2	271 / 196	

a) Werte für Boden aus dem Jahr 2010

Bodendaten für Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Nickel (Ni) und Quecksilber (Hg) aus dem Jahr 2010.

Grafik 2: Blei- Chrom- und Nickel-Gehalte im eingesetzten Klärschlamm im Zeitraum 1981 – 2018



derfindungen erklären. Daher soll in einer zukünftigen Bodeninventur auf diese Fragestellung detaillierter eingegangen werden.

Fazit: in Pflanzen keine erhöhten Schwermetallgehalte

Klärschlamm ist ein nährstoffreicher organischer Dünger, der allerdings auch eine Senke für Schwermetalle und organische Schadstoffe darstellt und pathogene Keime enthalten kann. Die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm wird daher kontrovers diskutiert. Der hier vorgestellte 38-jährige Langzeitversuch zeigt, dass durch Klärschlammaufbringung insbesondere beträchtliche Mengen an Phosphor in Form von Mineräldüngergaben eingespart werden konnten.

Die Stickstoffeinsparung war wesentlich geringer, weil zur Aufrechterhaltung eines hohen Ertragsniveaus immer eine zusätzliche mineralische N-Gabe erforderlich war. In diesem Fall konnten bei Körnermais und Getreide vergleichbare Erträge wie bei ausschließlicher Mineräldüngung erzielt werden. Ohne zusätzliche mineralische Stickstoff-Düngung wurden noch 60 bis 70 Prozent der Erträge der mineralgedüngten Kontrollvariante erzielt.

Bei Einhaltung der derzeit zulässigen Aufbringungsmengen wurden die aus der Bioabfallverordnung abgeleiteten Schwermetall-Grenzfrachten mit Ausnahme von Kupfer eingehalten, Überschreitungen der niedrigeren Grenzfrachten nach Bundesbodenschutzverordnung traten nur in geringem Maße bei Kupfer (Cu), Quecksilber (Hg) und Zink (Zn) auf. Daher konnte auch nach 38-jähriger Klärschlamm-Anwendung noch keine Überschreitung der Schwermetall-Grenzwerte nach aktuell Klärschlammverordnung im Boden festgestellt werden (entspricht den Vorsorgewerten nach Bundesbodenschutzverordnung), auch wenn im Vergleich zur Kontrolle zum Teil eine Zunahme der Schwermetallgehalte im Boden erkenn-

bar war. Diese spiegelte sich noch nicht in erhöhten Schwermetallgehalten in den Pflanzen wider.

Die mit dem Klärschlamm ausgebrachten Nährstoffe und Schwermetalle führten zu Bilanzüberschüssen, die zu einem gewissen Anteil plausibel im Bodenvorrat zu finden waren. Allerdings konnte der Verbleib der Mehrmengen an Phosphor und manchen Schwermetallen nicht abschließend geklärt werden.

*Dr. Martin Armbruster,
Prof. Franz Wiesler,
LUFA Speyer*