

Plastikströme in der Schweizer Landwirtschaft und ihr Risikopotenzial für Böden

Andreas Kalberer¹, Delphine Kawecki-Wenger² und Thomas D. Bucheli¹

¹Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

²Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), 9014 St. Gallen, Schweiz

Auskünfte: Thomas D. Bucheli, E-Mail: thomas.bucheli@agroscope.admin.ch



Abb. 1 | In der Schweizer Landwirtschaft werden unterschiedlichste Plastikprodukte eingesetzt. Diese reichen von Siloballenfolien (links) über Mulchfolien bis zu Stütznetzen (rechts).
(Fotos: Andreas Kalberer, Agroscope)

Einleitung

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Plastikeinträgen in landwirtschaftliche Böden unterscheiden. Beim primären Eintrag werden die Eigenschaften der jeweiligen Plastikprodukte beabsichtigt und nutzbringend eingesetzt. Ein gewisser Plastikeintrag wird dabei in Kauf genommen. Beispiele solcher Anwendungen sind der Einsatz von Vogelschutznetzen oder Siloballenfolien (Abb. 1). Es handelt sich hierbei hauptsächlich um Poly-

ethylen-Produkte (PE) (Kalberer *et al.* 2019). Beim sekundären Eintrag ist der Plastik unerwünscht und erfüllt keinen landwirtschaftlichen Nutzen. Dies ergibt sich beispielsweise durch Plastik-Littering oder der Verwendung von plastikverunreinigtem Gärgut- oder Kompostdünger. Bestrebungen zu einer Reduktion dieser Fremdstoffe sind gegenwärtig im Gang (Henle 2019). Laut Überschlagsrechnungen von Nizzetto *et al.* (2016) könnte die

jährliche Plastikbelastung der Europäischen Landwirtschaftsflächen diejenige der Ozeane übertreffen.

In Analogie mit europäischen Schätzungen (verschiedene Autoren, zitiert in Kalberer *et al.* 2019) steuert die Schweizer Landwirtschaft 2 bis 4 % zur nationalen Plastiknachfrage bei. Kawecki *et al.* (2018) schätzt die jährlich in der Schweizer Landwirtschaft eingesetzte Menge an Plastik auf 19507 Tonnen pro Jahr ($t a^{-1}$). Bisher existieren für die Schweiz insbesondere Daten zu Plastikeinträgen in den Boden durch Gärgut- und Kompostdünger (Schleiss 2017). Mengenerhebungen zum Einsatz einzelner landwirtschaftlicher Plastikprodukte sowie zum Eintrag dieser Produkte in den Boden fehlen bis auf die kürzlich erschienene Übersichtsstudie von Kawecki und Nowack (2019) vollständig.

Der vorliegende Artikel versteht sich als Synthese der Agroscope-Studie «Plastik in der Landwirtschaft. Stand des Wissens und Handlungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Forschung, Praxis, Industrie und Behörden» (Kalberer *et al.* 2019). Sein Ziel ist es, die Informationen zu den Plastikströmen und die maximale Plastikbelastung landwirtschaftlicher Nutzflächen in der Schweiz zusammenzufassen und diese einer erstmaligen Risikoevaluation zu unterziehen. Des Weiteren werden Empfehlungen mit dem Umgang und der Verwendung von Plastik in der Landwirtschaft ausgesprochen.

Material und Methode

Die erarbeitete Stoffstromanalyse (Abb. 2, Tab. 1) beruht auf Expertenbefragungen und Produktinformationen (Kalberer *et al.* 2019). In Abbildung 2 sind links ausgewählte Plastikproduktgruppen (gelb hinterlegt) aufgelistet. Die Mengen dieser Produkte werden in Tonnen pro Jahr angegeben (graue Pfeile links). Die rechte Seite der Abbildung zeigt die verschiedenen Kulturen (grün hinterlegt), für welche die Produkte verwendet werden. Die Kulturen sind in Kategorien (Kulturkategorien) zusammengefasst. Es findet ein durch verschiedenfarbige Pfeile signalisierter Plastikstrom in t pro Jahr von den Quellen zu den Kulturkategorien statt. Ein Teil dieser Plastikmengen wird später wieder aus der jeweiligen Kulturkategorie abgeführt und allenfalls wiederverwertet, recycelt oder thermisch verwertet (graue Pfeile rechts). Die in der Kulturkategorie verbleibende Plastikmenge wird als Plastikeintrag in die Böden definiert und ist im Kästchen der jeweiligen Kulturkategorie als jährliche Plastikakkumulation in t angegeben (grünes Lager). Die angegebenen Werte sind nicht als effektive Werte zu betrachten, sondern als Schätzungen, die als ungefähre Grösseneinordnung dienen. Weitere, als

Zusammenfassung

Plastikprodukte sind in unserem Alltag omnipräsent und auch in der modernen Landwirtschaft als vielseitige und effiziente Hilfsmittel schwer wegzudenken. Zusammen mit Littering und als Fremdstoffe in Gärgut- und Kompostdüngern sind sie aber auch die hauptsächlichen Quellen von Plastikeinträgen auf landwirtschaftliche Nutzflächen. Mit Hilfe einer Stoffstromanalyse wird in dieser Studie die jährlich auf landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz ausgebrachte Plastikmenge auf 16000 t geschätzt. Davon verbleiben rund 160 t Plastik pro Jahr in den Böden, was über die Jahre zu einer maximalen Konzentration von bis zu $0,02 \pm 0,01 \%$ ($200 \pm 100 \text{ mg kg}^{-1}$) führen kann. Die wenigen bisher verfügbaren ökotoxikologischen Studien beschreiben Effekte auf Bodenorganismen ab einem Plastikgehalt von 0,1 %. Somit besteht nach bisherigem Stand des Wissens kein Risiko für Bodenorganismen in der Schweiz. Für eine belastbarere Risikobetrachtung bedarf es allerdings vertiefter Untersuchungen zu Exposition und Effekten von Plastik in der landwirtschaftlichen Umwelt. Da dieser im Boden generell unerwünscht ist und dessen Abbau nur sehr langsam erfolgt, empfehlen wir zur Minimierung der Einträge die Anwendung von landwirtschaftlichen Plastikprodukten weiter zu optimieren und die Fremdstoffanteile in Gärgut- und Kompostdüngern weiter zu reduzieren.

eher unerheblich eingestufte und hier ausgeschlossene Eintragspfade sind in Kalberer *et al.* (2019) aufgeführt. Die zur Risikobeurteilung berechnete Konzentration im Boden (*Predicted Environmental Concentration* PEC) beruht auf einem Worst-Case-Szenario mit geschätzten mehrjährigen Maximaleinträgen der relevantesten Eintragsquellen (Kalberer *et al.* 2019; Tab. 2). Diese PEC wird mit den in der Literatur verfügbaren Effektstudien und deren *Predicted No Effect Concentrations*¹ (PNEC) aus kontrollierten Laborexperimenten mit plastikverunreinigten Böden (Tab. 3) verglichen, um ein mögliches Risiko auf Bodenorganismen abzuschätzen.

¹Vorausgesetzte Konzentration eines Stoffes, bis zu der sich keine Auswirkungen auf den jeweiligen getesteten Organismus zeigen.

Resultate und Diskussion

Stoffstromanalyse

Den Schätzungen zufolge ist in der Schweiz mit einer jährlich ausgebrachten Plastikmenge von 16000 ± 1300 t auf landwirtschaftliche Nutzflächen zu rechnen. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den 19507 t a^{-1} , die von Kawecki *et al.* (2018) für die Schweiz berechnet wurden. Unter den nachfolgend erläuterten Annahmen bleibt nur ein kleiner Anteil davon (ca. 1 %) als Plastikeintrag im Boden zurück.

Tabelle 1 zeigt die ausgebrachte Menge pro Plastikprodukt sowie deren absoluter und flächenbezogener Plastikeintrag. Da sich der Einsatz einiger Plastikprodukte auf bestimmte Kulturkategorien mit definierten und

z. T. geringen Flächen beschränkt, unterscheiden sich absoluter und relativer Eintrag teilweise deutlich.

Mit jährlich 80 ± 30 t ausgebrachtem Plastik ist Littering für den absolut grössten Eintrag in die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz verantwortlich. Dessen durchschnittlicher flächenbezogener Eintrag ist mit $80 \pm 30 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ aber kleiner als für andere Quellen geschätzt (z. B. PE-Mulchfolien: $2000 \pm 2000 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Gärgut- und Kompostdünger gehören mit einer geschätzten Menge von 50 ± 7 t pro Jahr ebenfalls zu den grossen absoluten Einträgen. Da sich Gärgut- und Kompostdünger weniger grossflächig verteilen, als dies beispielsweise beim Littering der Fall ist, kann es lokal zu höheren Frachten kommen ($4000 \pm 1000 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$).

Tab. 1 | Bedeutende landwirtschaftliche Plastikprodukte, deren jährlich ausgebrachte Mengen sowie die geschätzten Eintragsraten mit den absoluten und flächenbezogenen Bodeneinträgen.

Plastikprodukt	Ausgebrachte Menge (t a ⁻¹)	Eintragsrate (%) ^a	Erwarteter absoluter Eintrag in Böden (t a ⁻¹) ^b	Flächenbezogener Eintrag in Böden (g ha ⁻¹ a ⁻¹) ^c
Siloballenfolie	6000 ± 800	0,01–0,1 %	0,6–6	60 ± 50
Gewächshausfolie/Witterungsschutz	3000 ± 800	0,01–0,1 %	0,3–3	900 ± 800
Hagelnetz	2000 ± 600	0,01–0,1 %	0,2–2	200 ± 200
Vogelschutznetze	1000 ± 300	0,01–0,1 %	0,1–1	100 ± 100
Vliese und Lochfolie	500 ± 100	0,1–1 %	0,5–5	1000 ± 900
Bändchengewebe	500 ± 100	0,01–0,1 %	0,05–0,5	600 ± 500
Tröpfchenbewässerung	400 ± 50	0,1–1 %	0,4–4	400 ± 400
PE-Mulchfolien	300 ± 100	0,1–1 %	0,3–3	2000 ± 2000
Nicht biologisch abbaubare Kunststoffbinder etc.	300 ± 80	1–10 %	3–30	1000 ± 1000
Insektenschutznetze	300 ± 90	0,01–0,1 %	0,03–0,3	100 ± 100
Schattiernetze	300 ± 100	0,01–0,1 %	0,03–0,3	800 ± 700
Strohballenschnur	200 ± 50	0,1–1 %	0,2–2	10 ± 9
Wuchshülle	200 ± 60	0,01–0,1 %	0,02–0,2	200 ± 200
Niedertunnelfolien	100 ± 50	0,01–0,1 %	0,01–0,1	500 ± 500
Klimaschutznetze	100 ± 40	0,01–0,1 %	0,01–0,1	200 ± 200
Biomulchfolien	80 ± 30	0,1–1 %	0,08–0,8	800 ± 700
Plastik durch Littering	80 ± 30	100 %	80	80 ± 30
Plastik in Gärgut- und Kompostdünger	50 ± 7	100 %	50	4000 ± 1000
Isolationsfolie	40 ± 10	0,001–0,01 %	0,004–0,04	400 ± 300
Kapillarbewässerungszubehör (Verteiler, Spaghetti, Stecker)	30 ± 9	0,1–1 %	0,03–0,3	400 ± 400
Kunststoffstütznetze	6 ± 2	0,01–0,1 %	0,0006–0,006	40 ± 40
Düngersackfolie	500 ± 60	–	–	–
Chemikalienbehälter	200 ± 30	–	–	–

^aErläuterungen zur Eintragsrate sind Kalberer *et al.* (2019) zu entnehmen.

^bAusgebrachte Menge multipliziert mit der Eintragsrate.

^cDie jeweiligen Flächen beruhen auf den Daten des Bundesamts für Statistik (BFS) (https://www.pxweb.bfs.admin.ch/pxweb/de/px-x-0702000000_106/px-x-0702000000_106/px-x-0702000000_1a06.px). Zur Berechnung wurde der Median des Eintragsintervalls herangezogen. Die Unsicherheit aus der Intervallschätzung wurde durch ein CV_{Intervall} von 82 % angenommen. Dies entspricht der Abweichung des Intervallmedian zu den Extremwerten des Intervalls.

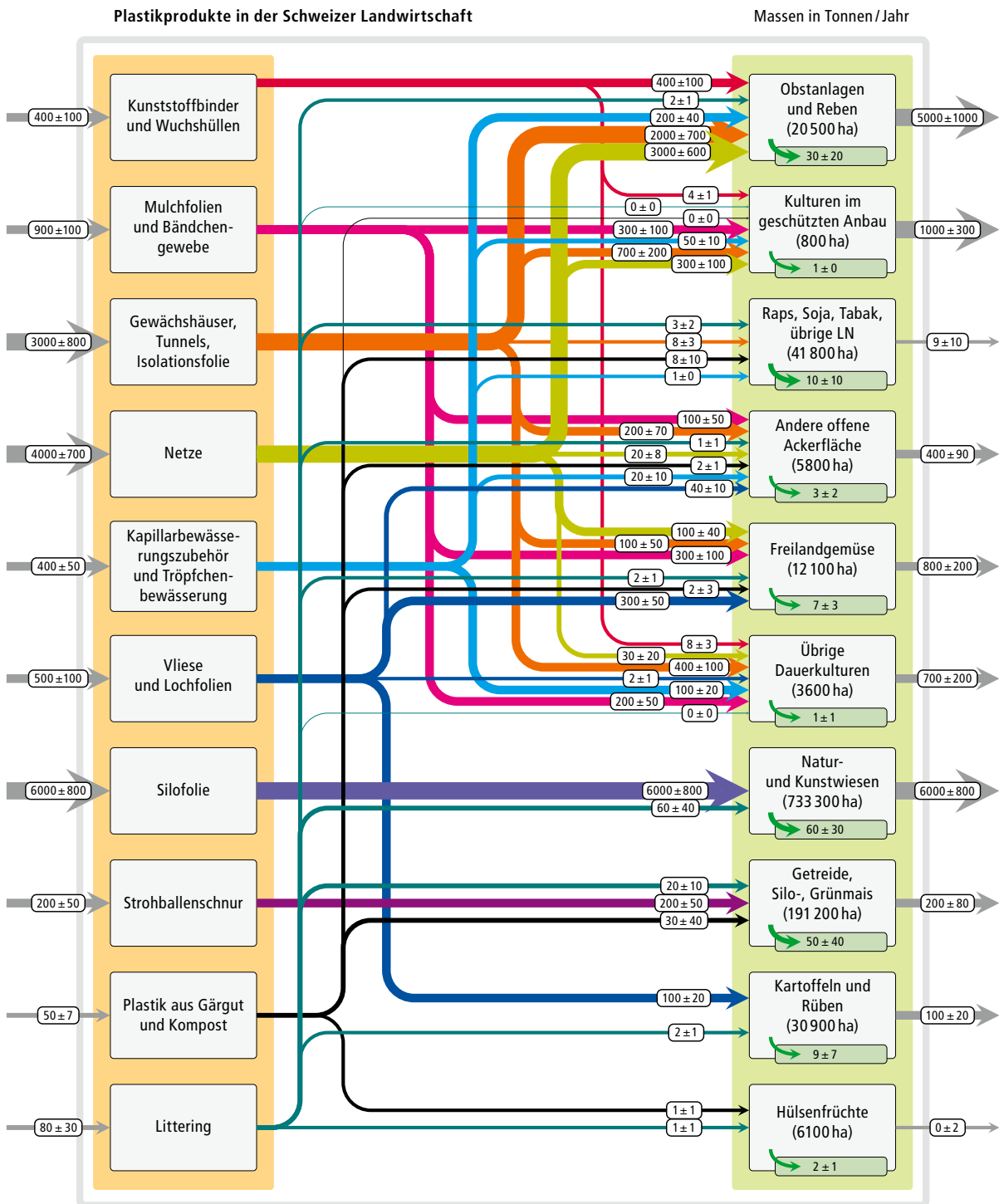


Abb. 2 | Stoffstromanalyse relevanter Plastikprodukte in der Schweizer Landwirtschaft. Die Systemgrenzen werden durch die jährlich in der Schweiz angewendete Menge an Plastikprodukten bis zu ihrer Wiederverwendung im nächsten Jahr oder deren Entfernung definiert. Alle Werte sind mit einer Standardabweichung (\pm) versehen. Negative Werte sind nicht möglich. Von links nach rechts ist die Stoffstromanalyse wie folgt aufgebaut: Der Inputstrom (grauer Pfeil links) beschreibt die ausgebrachte Menge an verschiedenen Plastikquellen in $t a^{-1}$. Die Verteilung auf die verschiedenen Kulturkategorien wird durch verschiedenfarbige Pfeile, ausgehend von den Quellen, dargestellt (in $t a^{-1}$). Das Lager (grüne Box innerhalb der Kulturkategorie) umschreibt die jährlich auf den jeweiligen Kulturkategorien verbleibenden Plastikmengen in t (Einträge). Die restlichen Plastikmengen werden der Kulturkategorie in Form eines Exportstroms ($t a^{-1}$) entzogen (grauer Pfeil rechts) und je nach Produkt thermisch verwertet, recycelt oder erneuert verwendet. Da die Werte der einzelnen Stoffströme gerundet sind, entsprechen deren Summen nicht zwingend den angegebenen Gesamtwerten. Dies gilt insbesondere bei der Summierung von mehreren grossen Stoffströmen (siehe Beispiel Obstanlagen und Reben).

Bei den Folienprodukten zählen Siloballenfolien ($6000 \pm 800 \text{ t a}^{-1}$), Gewächshausfolien/Witterungsschutz ($3000 \pm 800 \text{ t a}^{-1}$), Bändchengewebe ($500 \pm 100 \text{ t a}^{-1}$) sowie PE-Mulchfolien ($300 \pm 100 \text{ t a}^{-1}$) zu den mengenmässig meistgenutzten Produkten (Abb. 2, Tab. 1). Im Vergleich mit Siloballenfolien und Gewächshausfolien/Witterungsschutz sind die Mulchfolien dem Wetter, dem Erdreich, verschiedenen Pflanzenschutzmitteln und mechanischer Bearbeitung stärker ausgesetzt und tendieren eher zum Zerfall, was eine höhere (geschätzte) Eintragsrate zur Folge hat (Tab. 1).

Weitere potenzielle Plastikquellen wie der Luft eintrag ($0,4 \pm 0,2 \text{ t a}^{-1}$), Wasser für die Bewässerung ($0,08 \pm 0,01 \text{ t a}^{-1}$) sowie Dünger und Pflanzenschutzmittel verursachen nach den Berechnungen lediglich vernachlässigbare Einträge. Der Oberflächenabfluss von Strassen auf landwirtschaftliche Nutzflächen, Chemikalienbehälter und Düngersackfolien (Tab. 1) wurden aufgrund der relativ geringen betroffenen Flächen, der kleinen Mengen, der kurzen Einsatzdauer und der Schwierigkeiten bei der Zuordnung zu entsprechenden Kulturen aus der Stoffstromanalyse ausgeschlossen (Kalberer et al. 2019). Die hier geschätzten Einträge von Plastik in landwirtschaftliche Böden (Tab. 1) sind um einen Faktor fünf geringer als die von Kawecki und Nowack (2019) angegebenen jährlichen Frachten von Makroplastik aus der Landwirtschaft (rund 800 t). Dieser Unterschied beruht auf unterschiedlichen Annahmen bei der Festlegung der Eintragsraten. Während die vorliegende Arbeit auf produktspezifischen und lokalen Expertenmeinungen basiert, beziehen sich Kawecki und Nowack (2019) auf eine französische Studie und verwenden Eintragsraten zwischen 2 % und 9 %.

Tab. 2 | Beitragende Quellen von Plastik in Landwirtschaftsböden und der sich daraus ergebende PEC (Worst-Case-Annahme^a). Aufgrund von Rundungen weicht die totale Menge von der Summe der angegebenen Einzelwerte leicht ab.

Quelle	Absolute Menge pro Hektar
Littering	2 kg ha ⁻¹ (1950–2018)
Klärschlammdüngung	261 kg ha ⁻¹ (1970–2005)
Gärgut-/Kompostdüngung	125 kg ha ⁻¹ (2006–2018)
PE-Mulchfolie	146 kg ha ⁻¹ (1960–2018)
Total	534 kg ha ⁻¹
PEC ^b (Predicted Environmental Concentration)	0,02 ± 0,01 %; 200 ± 100 mg kg ⁻¹

^aAusgehend von einer hypothetischen landwirtschaftlichen Fläche, die über die in Klammern angegebenen Zeiträume Plastikeinträge der jeweiligen Quellen erfährt. Diese Einträge werden als inert und immobil angenommen.

^bBei einer Bodendichte von 1200 kg m⁻³ und einer Plastikakkumulation in den obersten 25 cm Boden.

Tab. 3 | Zusammenstellung der vorhandenen Effektstudien von Plastik auf terrestrische Organismen (Zusammenfassung von Zuh et al. 2019). Die im Text hergeleitete PEC (Predicted Environmental Concentration) ist zweckdienlich.

Studie	Untersuchte terrestrische Organismen	Unterscheidung der Effekte
Rillig et al. (2017)	Gemeiner Regenwurm <i>Lumbricus terrestris</i>	chronisch (z. B. Gewicht, Reproduktion)
		akut (Mortalität)
Zuh et al. (2018)	Springschwanzart <i>Folsomia candida</i>	chronisch (z. B. Gewicht, Reproduktion)
		akut (Mortalität)
Rodríguez-Seijo et al. (2017)	Regenwurmart <i>Eisenia andrei</i>	chronisch (z. B. Gewicht, Reproduktion)
		akut (Mortalität)
Rodríguez-Seijo et al. (2018)	Kompostwurm <i>Eisenia fetida</i>	chronisch (z. B. Gewicht, Reproduktion)
		akut (Mortalität)
Cao et al. (2017)	Kompostwurm <i>Eisenia fetida</i>	chronisch (z. B. Gewicht, Reproduktion)
		akut (Mortalität)
Kokalj et al. (2018)	Kellerassel <i>Porcellio scaber</i>	chronisch (z. B. Gewicht, Reproduktion)
		akut (Mortalität)
Qi et al. (2018)	Brotweizen <i>Triticum aestivum</i>	chronisch (z. B. Gewicht, Reproduktion)
		akut (Mortalität)
Huerta Lwanga et al. (2016)	Gemeiner Regenwurm <i>Lumbricus terrestris</i>	chronisch (z. B. Gewicht, Reproduktion)
		akut (Mortalität)
Sforzini et al. (2016)	Schleimpilzart <i>D. discoideum</i>	chronisch (z. B. Gewicht, Reproduktion)
		akut (Mortalität)
Sforzini et al. (2016)	Erbse <i>S. saccharatum</i> , Gartenkresse <i>L. sativum</i> , Regenwurmart <i>E. andrei</i>	chronisch (z. B. Gewicht, Reproduktion)
		akut (Mortalität)

Beständigkeit

P: Persistent

A: Abbaubar

Enthält Additive

J: Ja

N: Nein

Studienbefunde

■ Signifikant negativer Unterschied zu Kontrolle

■ Kein signifikanter negativer Unterschied zu Kontrolle

Beim Gärgut- und Kompostdünger unterscheiden sich die Plastikanteile je nach Ausgangsmaterial und Behandlungsverfahren. Nach Angaben von Biomasse Suisse stellen insbesondere nicht fachgerecht entsorgte Begleitstoffe in der Sammlung von privaten biogenen Abfällen ein Problem dar. Andere Eintragspfade von Plastik in Gärgut- und Kompostdünger sind über Ausschusswaren aus dem Detailhandel möglich. Bei den Mulchfolienprodukten ist festzustellen, dass ein wachsender Anteil durch abbaubare Folien ersetzt wird. Die tatsächliche Abbaubarkeit dieser Produkte ist allerdings zu prüfen. Im Vergleich zu den meisten Ländern erfolgt

he Organismen. Berücksichtigt wurden alle den Autoren bekannten Studien, die Dosis-Wirkungsbeziehungen beinhalten (Literaturverweise in Kalberer *et al.* des Risikobetrachtung miteingefügt und bezieht sich auf die obersten 25 cm eines Bodens mit einer Dichte von 1200 kg m⁻³.

Konzentration (w/w)																	Plastik-eigenschaften		
0,006 %	0,013 %	0,02 % ± 0,01 %	0,025 %	0,03 %	0,05 %	0,1 %	0,25 %	0,4 %	0,5 %	1 %	1,25 %	2 %	7 % (1 % vol)	28 % (5 % vol)	45 % (10 % vol)	60 % (15 % vol)	Abbaubarkeit	Additive	
		PEC		■													P	N	
					■													P	J
							■											P	J
■	■			■		■	■											P	J
■	■			■		■	■											P	J
								■		■	■			■				P	J
									■	■	■							P	J
																		P, A	J
														■	■	■	■	P	J
												■						A	J
												■						A	J

in der Schweiz kein Eintrag über Verfrachtungen aus Abfalldeponien und Klärschlamm, dessen Ausbringung auf Feldern nach der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) seit 2006 verboten ist. In Europa wird der jährliche Mikroplastikeintrag, der über das Ausbringen von Klärschlamm in die Umwelt gelangt, auf 125–850 t pro Million Einwohner geschätzt (Nizzetto *et al.* 2016). Vergleicht man diese Frachten und die Annahmen aus Tabelle 2 mit denjenigen in Tabelle 1 und Abbildung 2, ist davon auszugehen, dass Klärschlamm, wenn entsprechend eingesetzt, die relevanteste Quelle für Plastikeinträge in landwirtschaftliche Flächen ist.

Risikoevaluation

Die in Tabelle 2 dargelegten *Worst-Case*-Annahmen hinsichtlich des Plastikeintrags in Landwirtschaftsflächen führen über einen Zeitraum von 1950 bis 2018 zu einer Belastung von rund 534 kg ha⁻¹. Unter der Annahme (1) einer homogenen Verteilung in den obersten 25 cm des Bodens (Pflugtiefe), (2) eines zu vernachlässigenden Abbaus und (3) von keinerlei Verfrachtungen ergibt sich daraus eine PEC von 0,02 ± 0,01 % (entspricht 200 ± 100 mg kg⁻¹, Tab. 2). Die bis anhin noch sehr spärliche, ausschliesslich Laborstudien-basierte, und damit mit Vorsicht zu betrachtende, Literatur zu ökotoxikolo-

gischen Effekten von Plastik auf für die Bodengemeinschaft repräsentative Bodenorganismen zeigt erst bei Konzentrationen ab 0,1 % signifikante Effekte. Bis und mit 0,05 % Plastikanteile sind keine Effekte beobachtbar (Tab. 3). Daher wurde die «Predicted No Effect Concentration (PNEC)» auf 0,05 % geschätzt. Der daraus resultierende Risikoquotient (RQ) von 0,4 ($RQ = PEC/PNEC$) liegt somit unter 1 (Kalberer *et al.* 2019). Dies bedeutet, dass die maximal zu erwartenden Plastikmengen in landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz nach bisherigem Stand des Wissens kein Risiko für Bodenorganismen darstellen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die in dieser Studie skizzierten Plastikstoffströme der Schweizer Landwirtschaft beinhalten neben den unbeabsichtigten Quellen auch die wichtigsten landwirtschaftlichen Plastikprodukte. Obschon bei den maximal zu erwartenden Plastikkonzentrationen in Laborstudien bisher keine negativen Effekte auf wenige ausgewählte Bodenorganismen beobachtet wurden, sollte dem Plastikeinsatz auf landwirtschaftlichen Nutzflächen im Sinne des Vorsorgeprinzips und in Anbetracht des beschränkten bisherigen Wissens weiterhin Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Wir gehen davon aus, dass der Plastikeinsatz in der Schweizer Landwirtschaft weiterwachsen wird. Obschon in der Schweiz bedeutende Quellen wie die Klärschlammdüngung eliminiert wurden und zurzeit beträchtliche Anstrengungen zur Entwicklung abbaubarer Plastikprodukte unternommen werden, gilt es, weitere bedeutsame Quellen wie beispielsweise die Gärgut-/Kompostdüngung zu optimieren.

Die Vergär- und Kompostbranche ist sich der Problematik bewusst und unternimmt ihrerseits Anstrengungen zur Verbesserung der Situation. Diese Bemühungen sind wichtig, um eine langfristige Entkoppelung der eingesetzten Plastikmengen und deren persistenter Einträge zu erreichen. Seitens der Forschung gilt es für eine vertiefte Risikobewertung einerseits analytische Methoden zur Quantifizierung der effektiven Exposition von Landwirtschaftsböden mit Plastik bereitzustellen und andererseits, deren Effekte auf weitere relevante Bodenorganismen unter praxisnäheren Bedingungen zu bestimmen. ■

Dank

Wir bedanken uns bei Katja Knauer (Bundesamt für Landwirtschaft, BLW) und Corinne Jud (Agroscope) für das Gegenlesen und die wertvollen Kommentare.

Riassunto**Flussi di plastica nell'agricoltura svizzera e loro potenziale di rischio per i suoli**

I prodotti plastici sono onnipresenti nel nostro quotidiano e difficilmente impensabili anche nell'agricoltura moderna, quali prodotti ausiliari versatili ed efficienti. Insieme all'abbandono dei rifiuti e come sostanze estranee nel digestato e nel compost, sono però anche la fonte principale di immissioni di plastica nelle superfici agricole utili. Servendosi di un'analisi dei flussi di sostanze, questo studio stima in 16 000 tonnellate la quantità di plastica che finisce annualmente nelle superfici agricole in Svizzera. Di queste, circa 160 tonnellate rimangono nel suolo ogni anno, che può portare nel corso degli anni a una concentrazione massima di fino allo $0,02 \pm 0,01 \%$ ($200 \pm 100 \text{ mg kg}^{-1}$). I pochi studi ecotossicologici finora disponibili rilevano effetti sugli organismi del suolo a partire da un tenore di plastica dello 0,1%. In base alle conoscenze attuali non vi è pertanto alcun rischio per gli organismi del suolo in Svizzera. Una valutazione dei rischi più accurata richiede tuttavia ricerche più approfondite sull'esposizione e gli effetti della plastica nell'ambiente agricolo. Visto che quest'ultima è generalmente indesiderata nel suolo e la sua decomposizione avviene molto lentamente, per ridurre al minimo l'apporto si consiglia di ottimizzare ulteriormente l'uso di prodotti agricoli in plastica e di continuare a ridurre la percentuale di sostanze estranee presenti nel digestato e nel compost.

Summary**Plastic waste flows in Swiss agriculture and their risk potential for soils**

Plastic products are omnipresent in our everyday lives and are so versatile and efficient that it is difficult to imagine modern agriculture without them. However, in combination with littering and as foreign materials in digestate and compost fertilisers, they are also the main source of plastic inputs on agricultural land. Using material flow analysis, this study estimates the annual amount of plastic spread on agricultural land in Switzerland at 16,000 tonnes. Around 160 tonnes of this annual figure remains in the soil, which can lead to concentrations of up to $0.02 \pm 0.01 \%$ ($200 \pm 100 \text{ mg kg}^{-1}$) over the years. The few ecotoxicological studies available to date describe effects on soil organisms starting from a plastic content of 0.1%. On the basis of current knowledge, therefore, there is no risk to soil organisms in Switzerland. However, a more reliable risk assessment would require more in-depth studies on exposure and the effects of plastic in the agricultural environment. As plastic is generally undesirable in soil and degrades only very slowly, we recommend further refining the use of agricultural plastics and continuing to reduce the foreign material content of digestate and compost fertilisers in order to minimise plastic inputs.

Key words: plastic in Swiss agriculture, plastic contamination, mass flow analysis.

Literatur

- BAFU, 2002. Wegleitung für den Gewässerschutz bei der Entwässerung von Verkehrswegen. Hrsg. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. Zugang: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/gewaesserschutz-entwaesserung-verkehrswegen.html> [31.05.2019].
- ChemRRV, 2005. Verordnung vom 18. Mai 2005 zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV). Der Bundesrat, Bern. Zugang: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20021520/quotes.html> [31.05.2019].
- Henle C., 2019. Gemeinsam gegen Fremdstoffe. *Compostmagazine* 1/2019, 3–5.
- Kalberer A., Kawecky-Wenger D. & Bucheli T.D., 2019. Plastik in der Landwirtschaft. Stand des Wissens und Handlungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Forschung, Praxis, Industrie und Behörden. Agroscope, Zürich, und Empa, St. Gallen. *Agroscope Science* 89, 57 S. Zugang: <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/42595> [19.11.19].
- Kawecky D., Scheeder P.R. & Nowack B., 2018. Probabilistic Material Flow Analysis of Seven Commodity Plastics in Europe. *Environmental Science & Technology* 52 (17), 9874–9888.
- Kawecky D. & Nowack B., 2019. Polymer-Specific Modeling of the Environmental Emissions of Seven Commodity Plastics as Macro- and Microplastics. *Environmental Science & Technology* 53 (16), 9664–9676.
- Nizzetto L., Futter M. & Langaas S., 2016. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology* 50 (20), 10777–10779.
- Schleiss K., 2017. Bericht zur Analyse von Fremdstoffen in Kompost und festem Gärgut der Kompostier- und Vergärungsanlagen in der Schweiz gemäss ChemRRV. UMWEKO GmbH, Grenchen. Zugang: https://www.mpsecure.ch/cvis/public/pdf/2017-12-22_Bericht_Fremdstoffanalysen_Auftrag_BAFU.pdf [31.05.2019].