



7/ Düngung und Umwelt

Walter Richner¹, Daniel Bretscher¹, Harald Menzi² und Volker Prasuhn¹

¹ Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

² Agroscope, 1725 Posieux, Schweiz

Auskünfte: walter.richner@agroscope.admin.ch

Inhalt

1. Die Düngung als Teil des Nährstoffkreislaufs	7/3
2. Eignung und potenzielle Umweltgefährdung der Dünger	7/3
3. Massnahmen zur Verhinderung von Nährstoffverlusten	7/4
3.1 Ammoniakverflüchtigung	7/4
3.2 Denitrifikation	7/6
3.3 Versickerung: Auswaschung und Drainageverluste	7/6
3.4 Oberflächenabfluss: Abschwemmung und Erosion	7/7
4. Folgen einer Überdüngung	7/8
5. Schadstoffe und Krankheitserreger in Düngern	7/8
6. Rechtsgrundlagen	7/10
7. Zusammenfassende Empfehlungen für eine umweltschonende Düngung	7/10
8. Literatur	7/11
8.1 Zitierte Literatur	7/11
8.2 Weiterführende Literatur	7/11
9. Tabellenverzeichnis	7/12
10. Abbildungsverzeichnis	7/12

Foto auf der Vorderseite: Agroscope.

1. Die Düngung als Teil des Nährstoffkreislaufs

Durch die Düngung werden dem Boden Nährstoffe zugeführt, die ihm durch die pflanzliche Produktion entzogen wurden. Auf vielen Betrieben wird gemäss dem schweizerischen Düngungskonzept (vgl. Modul 1/ Einleitung, Abbildung 2) zuerst mit den Hofdüngern und Ernterückständen ein Grossteil der geernteten Nährstoffe zurückgeführt. Erst in zweiter Linie werden mit betriebsfremden Düngern (organische Dünger und Mineraldünger) mögliche Defizite zwischen dem Nährstoffbedarf der Kulturen und dem betriebsinternen Nährstoffanfall ausgeglichen.

Um umweltbelastende Nährstoffverluste zu verhindern und die Ertragsfähigkeit des Bodens nachhaltig zu sichern, ist unter Beachtung der Nährstoffkreisläufe (vgl. Modul 1/ Einleitung, Abbildung 1) die Zu- und Wegfuhr von Nährstoffen so gut wie möglich auszugleichen. Zur Sicherstellung einer ausgeglichenen Nährstoffbilanz auf Betriebsebene ist die Suisse-Bilanz (Agridea und BLW 2016), die den Anfall an Nährstoffen dem Nährstoffbedarf der Kulturen gegenüberstellt, ein bewährtes Hilfsmittel.

Auf viehhaltenden Betrieben muss insbesondere der Nährstoffanfall in den Hofdüngern auf den Nährstoffbedarf der Kulturen und den Nährstoffgehalt des Bodens abgestimmt sein. Dabei sollte auf eine dem Standort angepasste Bewirtschaftungsintensität geachtet werden. Der Nährstoffanfall aus der Tierhaltung wird nicht nur durch den auf dem Betrieb gehaltenen Tierbestand, sondern auch durch die Fütterung massgeblich bestimmt. Zentral ist eine dem aktuellen Bedarf der Tiere entsprechende Fütterung von Energie, Proteinen und Mineralstoffen. Dies bedingt eine auf die leistungsabhängigen Bedarfsempfehlungen abgestützte Fütterungsplanung. Erreicht werden kann die bedarfsgerechte Fütterung über die Zusammensetzung der Grundfütterration, z.B. durch Zufütterung von energie- und rohfaserreichen Grundfütterkomponenten neben proteinreichem Gras, durch eine korrekte Dosierung von Kraftfutter und Mineralstoffergänzung oder auch durch spezielle Futtermittel (z. B. stickstoff- und phosphorreduziertes Schweinefutter).

Bezüglich des Ziels einer ausgeglichenen betrieblichen Nährstoffbilanz gilt es auch, das standortspezifische Produktionspotenzial zu beachten. Im Talbetrieb kann daher eine grössere Nährstoffmenge umgesetzt werden als im Bergbetrieb und somit der Tierbesatz pro Flächeneinheit höher liegen. Weiterhin sollte im Sinne einer optimalen Bodenfruchtbarkeit eine ausgeglichene Nährstoffversorgung angestrebt werden. Überschüsse einzelner Nährstoffe können bei Mangel an anderen Nährstoffen unter Umständen nicht genutzt werden und daher ein erhöhtes Umweltgefährdungspotenzial darstellen.

Auch wenn eine ausgeglichene betriebliche Nährstoffbilanz ein sehr wichtiges Ziel ist, garantiert sie alleine noch nicht, dass die Düngung keine umweltrelevanten Probleme verursacht. Dafür ist zusätzlich die gezielte und umweltschonende Anwendung aller Dünger, insbesondere

der Hofdünger, eines Betriebes notwendig. Empfehlungen dafür finden sich im Modul 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern.

2. Eignung und potenzielle Umweltgefährdung der Dünger

Aufgrund ihrer Eigenschaften haben die einzelnen Dünger ein unterschiedliches Umweltgefährdungspotenzial (Tabelle 1). Der Aufwand für die umweltschonende Lagerung und Ausbringung der verschiedenen Dünger ist ebenfalls unterschiedlich.

Hof- und Recyclingdünger weisen ein erhöhtes Umweltbelastungspotenzial auf. Dafür gibt es mehrere Gründe:

- Der erst nach der Mineralisierung zur Wirkung kommende organisch gebundene Stickstoff (N) lässt sich bezüglich Menge und Freisetzungzeitpunkt nur ungenügend dem Kulturenbedarf anpassen; dies kann zu erhöhten N-Verlusten auf verschiedenen Verlustpfaden (v.a. Nitratauswaschung und Lachgasausgasung) führen.
- Der mineralische N-Anteil liegt mehrheitlich in Form von Ammonium (NH_4^+) vor und kann in Form von Ammoniak (NH_3) in die Atmosphäre entweichen.
- Die Nährstoffgehalte sind in der Regel weniger genau bekannt und weniger konstant als bei Mineraldüngern.
- Die Hof- und Recyclingdünger fallen zu einem grossen Teil in flüssiger Form an und unterliegen deshalb speziellen Verlustrisiken (Abschwemmung, Versickerung).

Da bei jeder Produktion von tierischen Lebensmitteln Hofdünger anfallen, ist es naheliegend, diese auf dem Betrieb umweltschonend pflanzenbaulich zu verwerten. Dabei sind möglichst alle Massnahmen für eine umweltschonende Hofdüngewirtschaft (optimierte Nährstoffgehalte in den Futtermitteln, Lagerung, Ausbringzeitpunkt und -technik) zu nutzen. Eine wichtige Voraussetzung, um das Verlustrisiko zu minimieren, ist eine genügend grosse Hofdüngelagerkapazität (vgl. Modul 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern, Kapitel 2.5.1), damit die Ausbringung von N-haltigen Düngern wie Gülle und Mist ausserhalb der Wachstumsperiode der Pflanzen vermieden werden kann. Auf die Problematik der Düngerausbringung während der Vegetationsruhe wird in diesem Modul nicht weiter eingegangen, weil diese Thematik in der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft, Modul Nährstoffe und Verwendung von Düngern in der Landwirtschaft (BAFU und BLW 2012), ausführlich beschrieben ist.

Wichtig zu beachten ist, dass in der Regel die Umweltbelastungsrisiken mit steigendem (Hof-)Düngeranfall pro Fläche, das heisst mit steigender Düngeintensität, überproportional zunehmen. In diesem Sinne muss der Tierbestand eines Betriebes unbedingt der betriebseigenen Futterproduktion, die vom standortspezifischen Produktionspotenzial abhängt, angepasst sein. Überschüssige Hof-

Tabelle 1 | Umweltgefährdungspotenzial beim Einsatz verschiedener Düngerarten und Aufwand zur Reduktion der Belastung von Boden, Wasser und Luft.

Die Angaben in dieser Tabelle basieren auf wissenschaftlichen Grundlagen und Expertenwissen. Es wurde angenommen, dass alle Dünger mengenmässig und zeitlich optimal eingesetzt werden. Als Systemgrenze wurde die Güllegrube, der Miststock beziehungsweise der Betrieb gewählt. Das Umweltgefährdungspotenzial der Hofdünger im Stall, der Recyclingdünger bei der Herstellung und beim Transport sowie der Mineraldünger bei der Gewinnung und beim Transport blieben unberücksichtigt.

Düngertyp	Belastungspotenzial für:				Technische und ökonomische Kriterien		
	Boden ¹	Grundwasser ²	Oberflächengewässer ³	Luft ⁴	Aufwand für Lagerung und Handhabung	Aufwand für exakte Ausbringung	Aufwand und Einschränkungen für umweltschonende Ausbringung ⁸
Gülle	3	3	3	3	3	3	3
Mist	2	3	2	2	2	2	3
Gärgut flüssig ⁵	3	3	3	3	2	3	3
Gärgut fest ⁵	2	3	2	2	2	2	3
Kompost	2	2	2	2	2	2	2
Min. N-Dünger ^{6, 7}	1	2	1	2	1	2	2
Min. P-Dünger ^{6, 7}	2	1	1	0	1	2	1
Min. K-Dünger ^{6, 7}	1	2	1	0	1	2	1
Min. Mg-Dünger ^{6, 7}	1	1	1	0	1	2	1
Min. S-Dünger ^{6, 7}	1	2	1	0	1	2	1

Bewertungsskala für Belastungspotenzial sowie technischen und ökonomischen Aufwand:
0 = fehlend, 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch.

Düngertyp: Min. = mineralisch, N = Stickstoff, P = Phosphor, K = Kalium, Mg = Magnesium, S = Schwefel.

¹ Eintrag von Schadstoffen und physikalische Bodenbelastung.

² Belastung mit Nitrat (NO₃⁻), Chlor, Sulfat, Krankheitserregern und weiteren Stoffen.

³ Belastung mit Phosphor und Stickstoff, Krankheitserregern und weiteren Stoffen.

⁴ Emission von Ammoniak und Lachgas.

⁵ Aus landwirtschaftlichen und gewerblich-industriellen Vergärungsanlagen.

⁶ Umweltbelastungen durch Herstellung und Transport zum Hof nicht berücksichtigt.

⁷ Bei Mehrnährstoffdüngern wird bei der Beurteilung der Kriterien jeweils der höchste Wert einer Teilkomponente des Düngers herangezogen.

⁸ Investitionen (Gebäude, Maschinen), Arbeitszeit.

dünger müssen weggeführt und umweltgerecht verwertet werden.

Auch der Einsatz von Mineraldüngern belastet die Umwelt. Zum einen ist ihre Produktion unmittelbar mit der Nutzung von meist nicht erneuerbaren Ressourcen (fossile Energie, Rohstoffe) verbunden, zum anderen können die Dünger bei nicht optimalem Einsatz (Dosierung, Ausbringzeitpunkt, Ausbringtechnik) negative Auswirkungen auf die Umwelt haben (z. B. durch NO₃⁻-Auswaschung, Eutrophierung). Allerdings können die Mineraldünger im Unterschied zu den Hofdüngern meist gezielter eingesetzt werden, da die Gehalte und die Wirkungsgeschwindigkeit der Nährstoffe bekannt sind.

3. Massnahmen zur Verhinderung von Nährstoffverlusten

Nährstoffverluste sind ökonomische Verluste für den landwirtschaftlichen Betrieb und eine ernst zu nehmende Belastung der Umwelt. Von Bedeutung sind hauptsächlich Verluste durch NH₃-Verflüchtigung, Denitrifikation, Versi-

ckerung (Auswaschung und Drainageverluste) und Oberflächenabfluss (Abschwemmung und Erosion). Durch eine unsachgemässe Düngung wird das Verlustrisiko erhöht.

3.1 Ammoniakverflüchtigung

Aus NH₄⁺ entstehendes NH₃ entweicht als Gas in die Luft und wird später zum grössten Teil wieder auf der Erdoberfläche abgelagert. Empfindliche Ökosysteme können durch den N-Eintrag aus der Luft geschädigt werden (Überdüngung, Versauerung) und die NO₃⁻-Auswaschung kann durch den aus der Luft eingetragenen N verstärkt werden. Zusätzlich werden durch NH₃ verschiedene unerwünschte Prozesse in der Atmosphäre beeinflusst. NH₃ reagiert in der Atmosphäre mit Salpetersäure und Schwefelsäure zu sekundären Aerosolen, die massgeblich zur Feinstaubbelastung der Luft beitragen (Spirig und Neftel 2006).

Eine Verringerung der NH₃-Verluste kommt auch dem Landwirtschaftsbetrieb direkt zugute, indem mehr N für die Pflanzen verfügbar ist und die zugeführte Menge N-Dünger entsprechend reduziert werden kann. Eine Reduk-

tion der NH_3 -Verluste im Stall und während der Hofdüngerlagerung wird erreicht, indem die verschmutzte Fläche gering gehalten und oft gereinigt wird sowie Güllelagerbehälter gedeckt werden.

Grosse NH_3 -Verluste treten nach dem Ausbringen der Hofdünger auf. Einfache Massnahmen zur Verringerung dieser Verluste sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Wichtig ist dabei die Wahl eines geeigneten Ausbringzeitpunktes (Witterung, Bodenzustand, Bodenbedeckung im Ackerbau). Zudem können die NH_3 -Verluste und die Geruchsemissionen durch den Einsatz besonderer Ausbringtechniken (Schleppschauch, Schleppschuh, Gülledrill, gleichzeitiges Einarbeiten) deutlich reduziert werden (vgl. Modul 5/ Ausbringtechnik bei Hof-, Recycling- und Mineräldüngern). Wenn die Topographie es erlaubt, sollten daher solche verlustreduzierende Gülleaushängetechniken (Abbildung 1) eingesetzt werden. Mist sollte beim Einsatz im Ackerbau innerhalb weniger Stunden nach dem Ausbringen eingearbeitet werden.



Abbildung 1 | Mit Hilfe von Schleppschauchverteilern mit bodennaher, streifenförmiger Ablage von flüssigen Düngern können Ammoniakverluste im Vergleich zu breitflächiger Ausbringung mit Pralltellern verringert werden (Foto: Harald Menzi, Agroscope).

Tabelle 2 | Faktoren, welche die Ammoniakverflüchtigung beeinflussen, und Massnahmen zur Reduktion der Emissionen.

Die Angaben in dieser Tabelle basieren auf wissenschaftlichen Grundlagen und Expertenwissen.

Kriterium	Verhältnisse	Risiko	Massnahmen zur Vermeidung hoher Ammoniakverluste	
			Gülle und flüssiges Gärgut	Mist und festes Gärgut
Witterung	hohe Lufttemperatur, trockene Luft, windig	hoch	Ausbringung an Tagen mit kühlfeuchter Witterung durchführen	Ausbringung an Tagen mit kühlfeuchter Witterung durchführen
	kühl, feucht, windstill	mittel	am späten Nachmittag oder abends ausbringen	
	Niederschlag während des Ausbringens	gering	kurz vor oder während leichtem Regen ausbringen (Vorsicht: Abschwemmung)	kurz vor oder während leichtem Regen ausbringen (Vorsicht: Abschwemmung)
Bodenzustand	wassergesättigte, ausgetrocknete, verdichtete, verschlammte, verkrustete Bodenoberfläche	hoch	Gülle nur auf aufnahmefähigen Boden ausbringen	
	feuchter, aufnahmefähiger Boden	gering bis mittel		
Bodenbedeckung im Ackerbau	Strohhäckseldecke, Mulchschicht, Pflanzenreste (Direktsaat)	hoch	Stoppelbearbeitung mit gleichzeitiger Injektion (Güllegrubber) oder Boden vor der Gülleanwendung mit Schälgrubber bearbeiten	
	dichter, hoher Pflanzenbestand	mittel bis hoch	Gülledüngung im Mais: Versickerung der Gülle im Boden fördern (z. B. vorgängig zwischen den Reihen hacken), Unterblattausbringung	
	Boden ohne Bedeckung	mittel	Gülle ausreichend verdünnen	
Verdünnungsgrad der Gülle ¹	unverdünnt	hoch	Rindvieh-Vollgülle: mind. 1 : 1, besser 1 : 2 verdünnen; kotarme Gülle, Schweinegülle: mind. 1 : 2, besser 1 : 3 verdünnen	
	mässig verdünnt (bis 1 : 1)	mittel		
	stark verdünnt (über 1 : 2)	gering		
Ausbringtechnik (vgl. Modul 5/ Ausbringtechnik bei Hof-, Recycling- und Mineräldüngern)	breitflächige Ausbringung	hoch	Ausbringung mittels Schleppschauch-/Schleppschuhverteiler, Schlitzdrill, Tiefinjektion, Güllegrubber	Sofortige Einarbeitung (innerhalb der ersten Stunden nach dem Ausbringen) mit Pflug oder Grubber
	streifenförmige bodennahe Ausbringung ²	mittel		
	direkte Einbringung in Boden ^{2, 3}	gering		

¹ Teile Gülle: Teile Wasser. ² Nur bei Gülle und flüssigem Gärgut möglich. ³ Keine spezielle Verdünnung erforderlich.

3.2 Denitrifikation

Nitrifikation bezeichnet die Umwandlung von NH_4^+ in NO_3^- . Die weitere Umwandlung von NO_3^- in gasförmigen N (N_2) wird als Denitrifikation (NO_3^- -Atmung) bezeichnet und bedeutet aus Sicht der Düngung immer einen Nährstoffverlust. Sowohl bei der Nitrifikation als auch bei der Denitrifikation kann Lachgas (Distickstoffmonoxid, N_2O) als Nebenprodukt respektive Zwischenprodukt entstehen. N_2O ist ein starkes Treibhausgas, das in bedeutendem Ausmass zur Erwärmung der Erdatmosphäre beiträgt. Für die Bestimmung der Emissionen von Lachgas und anderen Spurengasen aus landwirtschaftlichen Systemen ist eine aufwändige Messtechnik nötig (Abbildung 2).

Ideale Bedingungen für die Nitrifikation sind hohe Temperaturen und eine gute Sauerstoffversorgung (nicht zu hoher Bodenwassergehalt). Häufig ist jedoch die Denitrifikation der hauptverantwortliche Prozess für die N_2O -Produktion und den N-Verlust. Sie findet nur statt, wenn praktisch kein Sauerstoff im Boden vorhanden ist, also unter anaeroben Bedingungen. Diese entstehen in Böden an Stellen mit hoher mikrobieller Aktivität, wenn nicht genügend Sauerstoff durch gasförmige Diffusion nachgeliefert werden kann. Optimale Bedingungen für Nährstoffverluste durch Denitrifikation herrschen somit vor allem im Innern von Bodenaggregaten, wenn genügend Nitrat und organisches Material vorhanden sind, die Temperatur

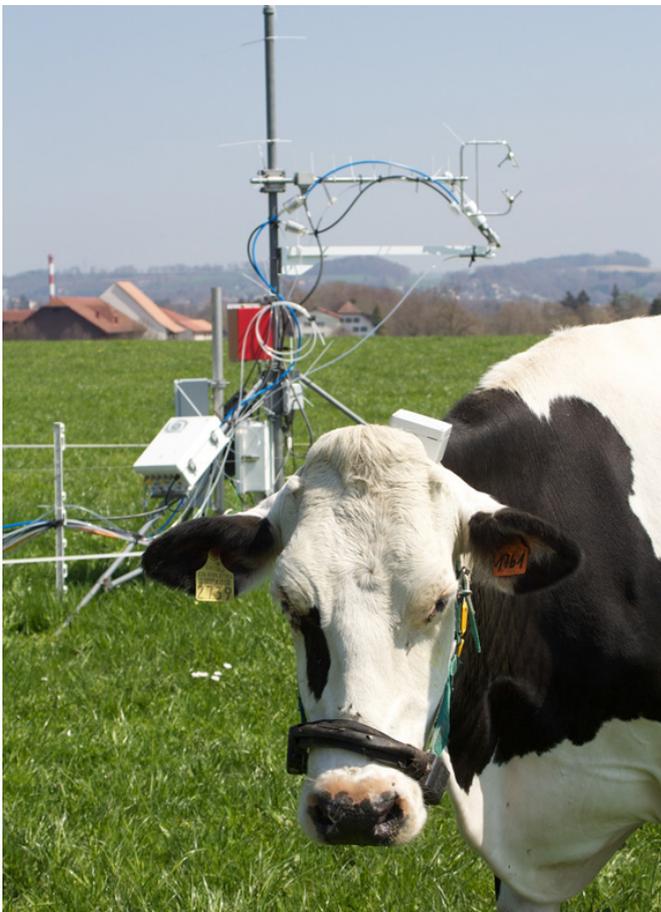


Abbildung 2 | Messung der Lachgasemission in einem Weideversuch mittels der Eddy-Kovarianz-Methode (Foto: Raphael Felber, Agroscope).

nicht zu tief ist und die Diffusion von Sauerstoff durch einen hohen Bodenwassergehalt eingeschränkt ist. Zusätzlich können grössere Mengen an N_2O während Gefrier- und Tauzyklen im Herbst und im Frühjahr gebildet werden, wobei die entsprechenden biochemischen Prozesse noch relativ schlecht bekannt sind.

Durch N-Einträge in Form von Hof-, Mineral-, Recyclingdüngern oder Ernterückständen wird die Verfügbarkeit von NH_4^+ und NO_3^- im Boden erhöht, wodurch Nitrifikation und Denitrifikation in der Regel zunehmen. Diese natürlichen Prozesse sind meist nur schwierig durch Bewirtschaftungsmassnahmen beeinflussbar. Im Durchschnitt wird ein Prozent des Stickstoffeintrages in Form von N_2O emittiert (Default Emission Factor nach IPCC 2006). Durch vollständige Denitrifikation zu N_2 können jedoch im Allgemeinen bis zu 10 %, teilweise noch grössere Anteile des Stickstoffs, verloren gehen. Zudem konnte in verschiedenen Studien gezeigt werden, dass die Emissionen bei hoher Verfügbarkeit von mineralischem Stickstoff, und insbesondere bei Düngung über dem Pflanzenbedarf, überproportional zunehmen (Snyder *et al.* 2009; Van Groenigen *et al.* 2010). Daher gilt es, zeitliche und lokale Überschüsse von NH_4^+ und NO_3^- im Boden durch eine möglichst bedarfsgerechte N-Düngung so gering wie möglich zu halten.

Nitrifikation und Denitrifikation finden nicht nur in den landwirtschaftlichen Böden statt, sondern sind wegen der Verfrachtung von NH_3 und NO_3^- aus der Landwirtschaft in seminaturliche Ökosysteme auch in diesen Systemen von Bedeutung. Die entsprechenden N-Emissionen sind oft überdurchschnittlich hoch. Im Sinne einer klimafreundlichen Landwirtschaft ist es deshalb wichtig, die Gesamtheit der N-Flüsse zu betrachten und sämtliche Verluste von Stickstoff gemäss den Empfehlungen in den Tabellen 2–4 möglichst gering zu halten.

3.3 Versickerung: Auswaschung und Drainageverluste

Bei der Auswaschung werden lösliche Nährstoffe (NO_3^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} usw.) mit dem Wasser, das durch den Boden sickert, bis ins Grundwasser transportiert (Matrixfluss). Flüssige Dünger können unter bestimmten Bodenbedingungen auch über Makroporen versickern (präferenzialer Fluss) und den Wurzelraum der Pflanzen verlassen. Beide Arten der Nährstoffverlagerung in tiefere, nicht durchwurzelte Bodenschichten beeinträchtigen die Qualität des Grundwassers. Die Auswaschung von Nährstoffen in Abhängigkeit der landwirtschaftlichen Nutzung wird häufig mit Lysimetern (Abbildung 3) untersucht.

Spezielle Vorsicht ist bei der Düngung von drainierten Flächen geboten. Auf drainierten Flächen ist die Bodenpassage des Sickerwassers deutlich verkürzt. Dadurch ist das Risiko von Stoffverlusten durch Matrixfluss und präferenzialen Fluss deutlich erhöht. Drainageverluste können deshalb die Qualität der Oberflächengewässer beeinträchtigen.

Im Substratanbau von Spezialkulturen ist das Drainagewasser in Rinnen aufzufangen und zu rezyklieren bzw. agronomisch sinnvoll in anderen Kulturen einzusetzen.

Durch geeignete Massnahmen können die Gefahren von Auswaschung und Drainageverlusten stark vermindert werden (Tabelle 3).

3.4 Oberflächenabfluss: Abschwemmung und Erosion

Auf der Bodenoberfläche liegende Dünger können durch Niederschläge oberflächlich abgeschwemmt oder mit dem Erosionsmaterial abgetragen werden. Die darin enthaltenen Nährstoffe belasten die Oberflächengewässer (Eutro-

Tabelle 3 | Faktoren, welche die Versickerung von Nährstoffen aus Düngern durch Auswaschung und Drainageverluste beeinflussen, sowie Empfehlungen zur verlustarmen Ausbringung von flüssigen Düngern.

Die Angaben in dieser Tabelle basieren auf wissenschaftlichen Grundlagen und Expertenwissen.

Kriterien	Verhältnisse	Risiko von Auswaschung und Drainageverlusten	Belastbarkeit mit flüssigen Düngern; Massnahmen bezüglich des Ausbringens von flüssigen Düngern, u. a. maximale Einzelgaben ¹
Witterungsverhältnisse	starke oder andauernde Niederschläge	sehr hoch	nicht belastbar; Ausbringen unterlassen
Porenzustand des Bodens	a. Porenverteilung und -form:		
	– rasch durchlässig, grobporig, klüftig, künstliche Sickerhilfen	hoch	wenig bis nicht belastbar; bis 25 m ³ /ha
	– gehemmt durchlässig, feinporig, stauend	mittel	reduziert belastbar; bis 40 m ³ /ha
	– normal durchlässig, mittelporig	gering	normal belastbar; bis 60 m ³ /ha *
	b. Porenfüllung:		
	– Boden nicht saugfähig, wassergesättigt	sehr hoch	nicht belastbar; Ausbringen unterlassen
	– Boden saugfähig, mögliche Flüssigkeitsaufnahme 3–5 mm	mittel	reduziert belastbar; bis 40 m ³ /ha
– Boden gut saugfähig, mögliche Flüssigkeitsaufnahme > 5 mm	gering	normal belastbar; bis 60 m ³ /ha *	
Mächtigkeit des Bodenfilters	a. ungenügende bis geringe pflanzennutzbare Gründigkeit (< 30 cm)	hoch	wenig belastbar; bis 25 m ³ /ha
	b. genügende pflanzennutzbare Gründigkeit (30–50 cm)	mittel	reduziert belastbar; bis 40 m ³ /ha
	c. gute bis sehr gute pflanzennutzbare Gründigkeit (> 50 cm)	gering	normal belastbar; bis 60 m ³ /ha *
Rückhaltevermögen des Bodenfilters	a. Böden mit geringem Rückhaltevermögen: Humusgehalt < 2 % Tongehalt < 10 %	hoch	wenig belastbar; bis 25 m ³ /ha
	b. Böden mit reduziertem Rückhaltevermögen: Humusgehalt < 5 % Tongehalt > 30 %	mittel	reduziert belastbar; bis 40 m ³ /ha
	c. Böden mit gutem Rückhaltevermögen: Humusgehalt 2–10 % Tongehalt 10–30 %	gering	normal belastbar; bis 60 m ³ /ha *
Bepflanzung ² (Nährstoffbedarf der angebauten Kultur)	a. Nährstoffbedarf vorhanden oder kurz bevorstehend	gering	normal belastbar; Ausbringen angemessener Mengen
	b. Nährstoffbedarf nicht vorhanden:		
	– Ackerland	sehr hoch	nicht belastbar; Ausbringen unterlassen
– Wiesland	hoch	wenig belastbar; bis 25 m ³ /ha	

¹ Die angegebenen maximalen Ausbringmengen beziehen sich auf ausreichend verdünnte Gülle. Bei geringerer Verdünnung sind die Mengen unter Berücksichtigung der max. zulässigen N-Einzelgaben zu reduzieren: für Ackerkulturen siehe Tabelle 26 des Moduls 8/ Düngung von Ackerkulturen und für Grünland die Angaben im Modul 9/ Düngung von Grasland.

² Zur Beurteilung, ob ein Nährstoffbedarf von Kulturen vorhanden ist, kann das Konzept der Vegetationsruhe herangezogen werden. Detaillierte Angaben dazu sind in BAFU und BLW (2012) enthalten.

* Diese Menge ist als Einzelgabe in der Regel zu hoch und sollte daher in zwei Teilgaben ausgebracht werden.



Abbildung 3 | Raps-, Kunstwiese- und Zuckerrübenverfahren in einer Lysimeteranlage von Agroscope am Standort Zürich-Reckenholz (Foto: Volker Prasuhn, Agroscope).



Abbildung 4 | Oberflächenabfluss aus einem Acker direkt in einen Strasseneinlaufschacht führt zu Einträgen von Nährstoffen und anderen landwirtschaftlichen Hilfsstoffen in Oberflächengewässer (Foto: Volker Prasuhn, Agroscope).

phierung, Fischsterben usw.). Flüssige Dünger können bei unsachgemäßem Einsatz sowie bei ungünstigen Boden- und/oder Witterungsbedingungen auch direkt nach der Ausbringung oberflächlich abfließen. Geneigte Flächen, die einen direkten Anschluss an ein Oberflächengewässer haben oder die indirekt über Einlaufschächte von entwässerten Strassen und Wegen mit einem Oberflächengewässer verbunden sind (Abbildung 4), haben ein besonders hohes Risiko für Stoffeinträge (sogenannte beitragende

Flächen; Frey *et al.* 2011). Ausreichend breite Pufferstreifen entlang von Gewässern und entwässerten Strassen und Wegen können das Eintragsrisiko reduzieren. Tabelle 4 zeigt, wie die Düngungsmassnahmen zu gestalten sind, damit diesen Gefahren wirksam vorgebeugt werden kann.

4. Folgen einer Überdüngung

Wird während längerer Zeit von einem Nährstoff mehr zuzus als mit dem Pflanzenertrag weggeführt, so reichert sich der Nährstoff im Boden an oder gelangt durch Verluste in Gewässer und/oder in die Atmosphäre. Eine starke Anreicherung im Boden kann verschiedene negative Auswirkungen zur Folge haben:

- ein gestörtes Nährstoffgleichgewicht im Boden
- unerwünscht hohe Nährstoffgehalte in den Pflanzen infolge von Luxuskonsum – z. B. von NO_3^- , Kalium. Dies kann die Qualität von Lebens- oder Futtermitteln reduzieren.
- eine veränderte Artenzusammensetzung von Wiesen (Verunkrautung, Artenverarmung)
- steigende Gefahren von Nährstoffverlusten

Nährstoffverluste in die Umwelt können u. a. zu einer Beeinträchtigung von Gewässern, zur Belastung der Luft und zur Eutrophierung von naturnahen Ökosystemen und damit einhergehend zu einem Artenschwund führen.

Die negativen Auswirkungen einer Überdüngung nehmen überproportional zu, je stärker die Nährstoffzufuhr den Nährstoffbedarf der Kulturen übersteigt. Eine bedarfsgerechte Düngung, unter Einbezug der Nährstoffvorräte des Bodens, ist deshalb zentral für eine möglichst geringe Belastung der Umweltressourcen. Durch eine konsequente Berücksichtigung der Nährstoffgehalte bei der Düngungsbemessung gemäss den Angaben des Moduls 2/ Bodeneigenschaften und Bodenanalysen können überhöhte Bodennährstoffgehalte wieder in den gewünschten Bereich der Versorgungsklasse C (Beurteilung «genügend») zurückgeführt werden. Dafür sind je nach Nährstoff langjährige Zeiträume nötig.

5. Schadstoffe und Krankheitserreger in Düngern

Schadstoffe können durch die Düngung in den Boden gelangen und sich dort anreichern. Die Zulassungsvorschriften für Dünger in der Dünger- (DüV, Systematische Rechtsammlung SR 916.171) und Düngerbuchverordnung (DüBV, SR 916.171.1) sowie die Schadstoffgrenzwerte in Anhang 2.6 der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV, SR 814.81) haben unter anderem das Ziel, die Belastung des Bodens und der Ernteprodukte durch Schadstoffe aus Düngern zu minimieren.

Besonders beachtet werden müssen bei den Schadstoffen in Düngern die Schwermetalle. Diese werden nicht nur über Recyclingdünger zugeführt, sondern auch durch Hof- (z. B. Kupfer und Zink in Schweinegülle) und Mineraldün-

Tabelle 4 | Faktoren, die den Oberflächenabfluss von Nährstoffen aus Düngern durch Abschwemmung und Erosion beeinflussen, und Empfehlungen zur verlustarmen Ausbringung von flüssigen Düngern.

Die Angaben in dieser Tabelle basieren auf wissenschaftlichen Grundlagen und Expertenwissen.

Kriterien	Verhältnisse	Risiko von Abschwemmung und Erosion	Belastbarkeit mit flüssigen Düngern; Massnahmen bezüglich des Ausbringens von flüssigen Düngern, u. a. maximale Einzelgaben ¹
Witterungsverhältnisse	Dauer- oder Gewitterregen bevorstehend	sehr hoch	nicht belastbar; Ausbringen unterlassen
Porenzustand des Bodens	a. unbewachsener Boden²		
	– beschränkt einsickerungsfähig (verdichtet, verkrustet, verschlämmt, wassergesättigt, hart gefroren, undurchlässige Oberfläche)	sehr hoch	nicht belastbar; Ausbringen unterlassen
	– gut einsickerungsfähig (locker, abgetrocknet, Boden mit rauer Oberfläche)	mittel bis gering	reduziert bis normal belastbar; bis 60 m ³ /ha *
	b. bewachsener Boden		
	– beschränkt einsickerungsfähig (verdichtet, verkrustet, verschlämmt, wassergesättigt, hart gefroren, undurchlässige Oberfläche)	sehr hoch	nicht belastbar; Ausbringen unterlassen
	– gut einsickerungsfähig (locker, abgetrocknet, Boden mit rauer Oberfläche)	gering	normal belastbar; bis 60 m ³ /ha *
	c. Schneedecke		
	– trockene, unterkühlte Schneedecke	sehr hoch	nicht belastbar; Ausbringen unterlassen
– schmelzende Schneedecke	sehr hoch	nicht belastbar; Ausbringen unterlassen	
Topographische Verhältnisse	Ackerbau Wassererosionsgefährdung gemäss der Erosionsrisikokarte im 2x2-Meter-Raster (ERK2) ³ und der Gewässeranschlusskarte (GAK2) ⁴		
	– keine Erosionsgefährdung	gering	normal belastbar; bis 60 m ³ /ha *
	– Erosionsgefährdung	mittel	reduziert belastbar; bis 40 m ³ /ha
	– hohe Erosionsgefährdung	hoch	wenig belastbar; bis 25 m ³ /ha [△]
	Futterbau Hangneigung		
	≤ 18 %	gering	normal belastbar; bis 60 m ³ /ha *
	19–35 %	mittel	reduziert belastbar; bis 40 m ³ /ha
	> 50 %	sehr hoch	nicht belastbar; Ausbringen unterlassen

¹ Die angegebenen maximalen Ausbringmengen beziehen sich auf ausreichend verdünnte Gülle. Bei geringerer Verdünnung sind die auszubringenden Mengen unter Berücksichtigung der zu düngenden Nährstoffmengen zu reduzieren.

² Das Feld ist bereits bestellt, oder es wird zeitnah nach dem Ausbringen des flüssigen Düngers gesät oder gepflanzt.

³ Angaben zur Erosionsrisikokarte sind in Gisler *et al.* (2011) und auf der Geoinformationsplattform der Schweizerischen Eidgenossenschaft zu finden: <https://map.geo.admin.ch/> > Geokatalog > Natur und Umwelt > Boden > Erosionsrisiko qualitativ 2.

⁴ Angaben zur Gewässeranschlusskarte sind in Alder *et al.* (2015) und auf der Geoinformationsplattform der Schweizerischen Eidgenossenschaft zu finden: <https://map.geo.admin.ch/> > Geokatalog > Natur und Umwelt > Boden > Gewässeranschluss.

* Diese Menge ist als Einzelgabe in der Regel zu hoch und sollte daher in zwei Teilgaben ausgebracht werden.

[△] Zusätzlich zur Erosionsgefährdung gemäss ERK2 ist für die Bemessung der Düngung die aktuelle Bodenbedeckung durch die angebaute Kultur zu berücksichtigen.

ger (z.B. Cadmium in Phosphordüngern). Die Anwender von Düngern verfügen in der Regel über keine Angaben zu den Schwermetallgehalten der einzelnen zugeführten Düngerchargen. Die gesetzliche Verantwortung für die Bereitstellung von Düngern mit geringen Schwermetallgehalten liegt bei den Düngerherstellern und -importeuren sowie bei den Kompostierungs- und Vergärungsanlagen. Schadstoffgehalte von Düngern werden periodisch von den Kantonen im Auftrag des Bundesamts für Landwirtschaft BLW überprüft.

Noch wenig bekannt sind die Auswirkungen der Anreicherung von Veterinärpharmaka (insbesondere Antibiotika), organischen Schadstoffen, hormonähnlichen Stoffen und des radioaktiven Schwermetalls Uran im Boden. Diese Stoffe werden primär über Hof- und Recyclingdünger zugeführt, mit Ausnahme von Uran, das über mineralische Phosphordünger in die Böden gelangen kann.

Auch **Krankheitserreger** können durch Hof- und Recyclingdünger (Fuchs *et al.* 2014) auf Boden oder Pflanzen gelan-

gen und dort teilweise während mehrerer Monate überleben. Die Güllelagerung und die Hitzeperiode bei der Kompostierung helfen mit, Krankheitserreger auf ein meist unschädliches Mass zu reduzieren.

6. Rechtsgrundlagen

Zum Schutz der Umwelt sind bei der Zulassung und bei der Verwendung von Düngern verschiedene bundesrechtliche Grundlagen zu beachten (BAFU und BLW 2012), u. a.:

- Chemikalienverordnung (ChemV, SR 813.11)
- Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, SR 814.12)
- Gewässerschutzgesetz (GSchG, SR 814.20)
- Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201)
- Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV, SR 814.81)
- Umweltschutzgesetz (USG, SR 814.01)
- Landwirtschaftsgesetz (LwG, SR 910.1)
- Dünger-Verordnung (DüV, SR 916.171)
- Düngerbuch-Verordnung (DüBV, SR 916.171.1)

Die Vorgaben dieser Gesetzeswerke für die Verwendung von Düngern werden für den Vollzug durch verschiedene Module der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft konkretisiert, primär durch die Module Nährstoffe und Verwendung von Düngern (BAFU und BLW 2012) und Baulicher Umweltschutz (BAFU und BLW 2011).



Abbildung 5 | Für eine gezielte und umweltschonende Düngung müssen Dünger in bedarfsgerechter Menge und in einem Zeitraum ausgebracht werden, in dem die Pflanzen Nährstoffe effizient nutzen können (Foto: Gabriela Brändle, Agroscope).

Betriebe, die gemäss dem Ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN) bewirtschaftet werden, haben zusätzlich die Vorgaben der Direktzahlungsverordnung (DZV, SR 910.13) und der davon abgeleiteten Vollzugsinstrumente (z.B. Suisse-Bilanz) zu befolgen. Bei der Teilnahme an weiteren freiwilligen Programmen sind auch die Vorschriften der entsprechenden Verordnungen einzuhalten:

- Bio-Verordnung (SR 910.18)
- Verordnung des Eidgenössischen Departements für Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF über die biologische Landwirtschaft (SR 910.181)

7. Zusammenfassende Empfehlungen für eine umweltschonende Düngung

Eine gezielte und umweltschonende Düngung gewährleistet eine nachhaltige Ertragsfähigkeit des Bodens, verringert vermeidbare Nährstoffverluste und somit Düngerkosten und leistet einen Beitrag zur Erhaltung unbelasteter Grund- und Oberflächengewässer sowie zur Schonung von Luft und Klima. Allerdings ist es oft schwierig, alle Bedingungen für eine umweltschonende Düngung gleichzeitig zu erfüllen. Es ist die Aufgabe aller Landwirtinnen und Landwirte, mit ihren Erfahrungen, der Hilfe der Beratung sowie der zur Verfügung stehenden Hilfsmittel die Düngung so zu organisieren, dass sie dem Bedarf der Pflanzen gerecht wird, die Bedingungen des Standortes und der Witterung berücksichtigt und zum richtigen Zeitpunkt erfolgt (Abbildung 5). Dabei ist zu beachten, dass Massnahmen, die Nährstoffverluste auf einem bestimmten Verlustpfad reduzieren, Verluste auf anderen Pfaden fördern können (*Pollution Swapping*; Stevens und Quinton 2009). So kann z.B. eine Massnahme, welche die NH_3 -Emissionen verringert, den Gehalt von mineralischem Stickstoff im Boden erhöhen und so die NO_3^- -Auswaschung und die Bildung von Lachgas (Denitrifikation) steigern. Deshalb ist es wichtig, bei Massnahmen zur Reduktion der Umweltbelastungen stets das Gesamtsystem im Auge zu behalten.

Das 4R-Prinzip nach Roberts (2007) veranschaulicht in knapper Form die wesentlichen Punkte zur Optimierung der Düngung:

- richtiger Dünger
- richtige Ausbringungsmenge
- richtiger Anwendungszeitpunkt
- richtiger Anwendungsort

Wichtigste Massnahmen, um Umweltbelastungen durch die Düngung zu minimieren:

- Tierbesatz dem Standort und dem Nährstoffbedarf der Kulturen anpassen.
- Düngungsmassnahmen sorgfältig planen (parzellenscharfe Düngungsplanung) und dabei die Fruchtfolge und zuverlässige Bodenuntersuchungsergebnisse berücksichtigen.
- Die Nährstoffe in den betriebseigenen Hofdüngern gezielt einsetzen. Dafür sind periodische Untersuchungen der Nährstoffgehalte der Hofdünger hilfreich.
- Betriebsfremde Dünger (zugeführte Hofdünger, Recyclingdünger, Mineraldünger) nur zur Deckung eines durch die Hofdünger nicht abgedeckten Bedarfs einsetzen.
- Zeitpunkt, Menge und Form der einzelnen Düngergabe möglichst genau auf die Entwicklung der Pflanzen und den Gehalt des Bodens abstimmen sowie den Standort- und Witterungsverhältnissen anpassen.
- Gaben von stickstoffhaltigen Düngern ausserhalb der Wachstumsperiode der Pflanzen unterlassen (genügend Lagerraum für Gülle und Mist schaffen).
- Flüssige Dünger nur ausbringen, wenn der Boden saugfähig ist (nicht auf wassergesättigte, stark verdichtete, verschlammte, schneebedeckte oder gefrorene Böden). Spezielle Vorsicht ist bei drainierten Böden geboten.
- Flüssige Hof- und Recyclingdünger zur Verringerung der NH₃-Verluste mit emissionsarmer Technik ausbringen.
- Gülle und Mist bei kühler Witterung und geringen Windgeschwindigkeiten ausbringen (beim Ausbringen und möglichst während der folgenden 24 Stunden: Temperatur < 15 °C und relative Luftfeuchtigkeit > 70 %). Im Ackerbau ist vor der Ausbringung, wo immer möglich, zu hacken, oder die Dünger sind möglichst rasch einzuarbeiten.
- Unbewachsene Flächen im Ackerbau vermeiden (durch Zwischenfutterbau, Gründüngung, Unter- und Einsaaten, Mulchsaat usw.).

8. Literatur

8.1 Zitierte Literatur

- Agridea & BLW, 2016. Wegleitung Suisse-Bilanz, Auflage 1.13. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern. 25 S.
- Alder S., Prasuhn V., Liniger H.P., Herweg K., Hurni H., Candinas A. & Gujer H.U., 2015. A high-resolution map of direct and indirect connectivity of erosion risk areas to surface waters in Switzerland – A risk assessment tool for planning and policy-making. *Land Use Policy* 48, 236–249.
- BAFU & BLW, 2011. Baulicher Umweltschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Umwelt-Vollzug Nr. 1101. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. 123 S.
- BAFU & BLW, 2012. Nährstoffe und Verwendung von Düngern in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Umwelt-Vollzug Nr. 1225. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. 62 S.
- Frey M., Konz N., Stamm C. & Prasuhn V., 2011. Identifizierung von Flächen, die überproportional zur Gewässerbelastung beitragen. *Agrarforschung Schweiz* 2 (4), 156–161.
- Fuchs J., Baier U., Berner A., Philipp W. & Schleiss K., 2014. Abschätzung des hygienischen Risikos im Zusammenhang mit der Anwendung von flüssigem Gärgut in der Schweiz – Schlussbericht. Publikation Nr. 290982. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Gisler S., Liniger H.P. & Prasuhn V., 2011. Erosionsrisikokarte im 2x2-Meter-Raster (ERK2). *Agrarforschung Schweiz* 2 (4), 148–155.
- IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 «Agriculture, Forestry and Other Land Use», Chapter 11 «N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application». Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf. Zugang: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html> [6. 10. 2016].

- Roberts T.L., 2007. Right product, right rate, right time, and right place ... the foundation of BMPs for fertilizer. *Better Crops* 91 (4), 14–15.
- Snyder C.S., Bruulsema T.W., Jensen T. L. & Fixen P.E., 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133 (3–4), 247–266.
- Spirig C. & Neftel A., 2006. Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft und Feinstaub. *Agrarforschung* 13 (9), 392–397.
- Stevens C.J. & Quinton J.N., 2009. Diffuse pollution swapping in arable agricultural systems. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 39 (6), 478–520.
- Van Groenigen J., Velthof G.L., Oenema O., Van Groenigen K.J. & Van Kessel C., 2010. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. *European Journal of Soil Science* 61 (6), 903–913.

8.2 Weiterführende Literatur

- BDU, 2004. Hofdünger – gezielt eingesetzt. Beratergruppe «Boden Düngung Umwelt» BDU, Lindau. 4 S.
- BDU-Arbeitsgruppe «Ammoniak», 2005. Ammoniakverluste bei der Hofdüngerausbringung reduzieren. *UFA-Revue* 12, 33–34.
- BDU-Arbeitsgruppe «Ammoniak», 2011. Ammoniakverluste aus der Landwirtschaft – Wissenswertes in Kürze. 2. aktualisierte Auflage. Beratergruppe «Boden Düngung Umwelt» BDU, Lindau. 2 S.
- BLW & BUWAL, 2004. Merkblatt «Düngen zur richtigen Zeit». 2. unveränderte Auflage. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau FAL, Zürich. 4 S.
- UNECE, 2014. Leitfaden zur Vermeidung und Verringerung von Ammoniakemissionen aus landwirtschaftlichen Quellen. Deutschsprachige Version des Dokuments ECE/EB.AIR/120ECE/EB.AIR/120, erstellt im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU, Bern. 98 S.

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Umweltgefährdungspotenzial beim Einsatz verschiedener Düngerarten und Aufwand zur Reduktion der Belastung von Boden, Wasser und Luft.	7/4
Tabelle 2 Faktoren, welche die Ammoniakverflüchtigung beeinflussen, und Massnahmen zur Reduktion der Emissionen.	7/5
Tabelle 3 Faktoren, welche die Versickerung von Nährstoffen aus Düngern durch Auswaschung und Drainageverluste beeinflussen, und Empfehlungen zur verlustarmen Ausbringung von flüssigen Düngern.	7/7
Tabelle 4 Faktoren, die den Oberflächenabfluss von Nährstoffen aus Düngern durch Abschwemmung und Erosion beeinflussen, sowie Empfehlungen zur verlustarmen Ausbringung von flüssigen Düngern.	7/9

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Mit Hilfe von Schleppschlauchverteilern mit bodennaher, streifenförmiger Ablage von flüssigen Düngern können Ammoniakverluste im Vergleich zu breitflächiger Ausbringung mit Pralltellern verringert werden.	7/5
Abbildung 2 Messung der Lachgasemission in einem Weideversuch mittels der Eddy-Kovarianz-Methode.	7/6
Abbildung 3 Raps-, Kunstwiese- und Zuckerrübenverfahren in einer Lysimeteranlage von Agroscope am Standort Zürich-Reckenholz.	7/8
Abbildung 4 Oberflächenabfluss aus einem Acker direkt in einen Strasseneinlaufschacht führt zu Einträgen von Nährstoffen und anderen landwirtschaftlichen Hilfsstoffen in Oberflächengewässer.	7/8
Abbildung 5 Für eine gezielte und umweltschonende Düngung müssen Dünger in bedarfsgerechter Menge und in einem Zeitraum ausgebracht werden, in dem die Pflanzen Nährstoffe effizient nutzen können.	7/10