

## Steuerung der Stoffkreisläufe landwirtschaftlicher Betriebe durch effiziente Verwertung der Wirtschaftsdünger

REINHOLD GUTSER, THOMAS EBERTSEDER

### 1 Einleitung

Der Erfolg jeglichen Wirtschaftens wird heute sehr wesentlich von einer möglichst effizienten Wiederverwertung der beim Produktionsprozess anfallenden Reststoffe mitgeprägt. Dies trifft besonders für die Primärproduktion zu. So weist beispielsweise die relativ geringe Effizienz des in der Landwirtschaft eingesetzten Produktionsmittels Stickstoff mit ca. 35 % im Mittel aller Betriebe der BRD – von 100 kg eingesetztem N wird nur etwa ein Drittel in pflanzlichen und tierischen Verkaufsprodukten verwertet – auf beachtliche Schwierigkeiten in der Wiederverwertung des in den Reststoffen der pflanzlichen (Ernterückstände) und tierischen (Wirtschaftsdünger) Produktion enthaltenen Stickstoffs hin. Ursache für diese insgesamt niedrige Effizienz ist der hohe Anteil der tierischen Veredelung. Gegenüber der Pflanzenproduktion (ca. 70–85 %ige Verwertungsrate für N) beträgt deren N-Verwertung nur 15–30 %. Der in den Reststoffen anfallende Stickstoff lässt sich keinesfalls verlustfrei wiederverwerten, was zwangsläufig zu Umweltbeeinträchtigungen führen muss.

Zielsetzung dieses Beitrages ist es, auf Grundsätze einer optimalen Verwertungsstrategie tierischer Ausscheidungen in der Pflanzenproduktion landwirtschaftlicher Betriebe hinzuweisen. Neben Phosphor wird der Schwerpunkt insbesondere auf das N-Recycling gelegt. Möglichkeiten der Effizienzsteigerung und Verlustminimierung durch Aufbereitung und Applikationstechniken werden ebenso angesprochen wie gesetzliche Regelungen, welche die Rahmenbedin-

gung für eine gute fachliche Praxis der Verwertung dieser Reststoffe mit sowohl ökonomischer als auch ökologischer Zielsetzung definieren sollen.

### 2 Grundsätzliches zur Verwertung der N- und P-Ausscheidungen der Nutztiere

#### 2.1 Ausscheidung und Düngermenge

Die Kalkulationen für eine sachgerechte Verwertung der Wirtschaftsdünger gehen zunächst von den ausgeschiedenen N- und P-Mengen, bezogen auf die Tiereinheit oder die zur Verwertung vorhandene Fläche, aus (Abb. 1). Die ausgeschiedene N- und P-Menge je Tier ist sehr wesentlich vorgegeben durch die Fütterung. Konsequente Anwendung von Fütterungsempfehlungen lassen eine überhöhte P- und Proteinversorgung vermeiden und führen somit tierartabhängig (Schweine in höherem Maße als Rinder) zu einer Reduktion der Ausscheidungen von 10–40 % (WINDISCH 2000). Die P- und N-Emission der Tiere nimmt mit steigendem Leistungsniveau sogar relativ ab – für eine flächengebundene Tierhaltung muss die angestrebte Milch- und Mastleistung allerdings auf die Bonität des unter den jeweiligen Standortbedingungen erzielbaren Grundfutters abgestimmt werden.

Im Gegensatz zu P unterscheidet sich die letztlich für die Düngung verwertbare Stickstoffmenge erheblich von der ausgeschiedenen Menge. Als Folge von  $\text{NH}_3$ -Verlusten verbleiben davon je nach Aufstallung der

Tiere und Lagerbedingungen der Exkremente nur noch 50–90 %. Die Größenordnungen der  $\text{NH}_3$ -Verluste in Stall und Lager schwanken zwischen 17 und 50 % der ausgeschiedenen N-Menge (Abb. 2). Die Beispiele für Legehennen verdeutlichen, dass die Zielsetzungen „artgerechte Tierhaltung“ und „Minimierung von  $\text{NH}_3$ -Emissionen“ beachtliches Konfliktpotenzial beinhalten können.

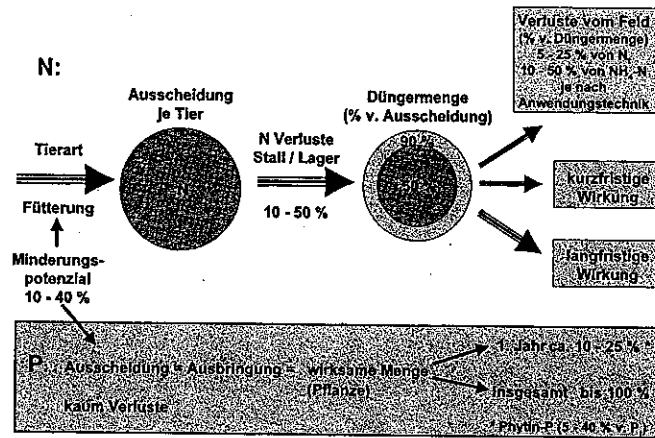


Abb. 1: Verwertung der N- und P-Ausscheidung der Nutztiere

## 2.2 Lagerkapazität als Voraussetzung für eine gute N-Verwertung der Gülle

Gülle-N wird im ersten Jahr grundsätzlich dann am besten verwertet, wenn die Ausbringung in den wachsenden Pflanzenbestand erfolgt (s. Tab. 1: Lysimeter-Versuch Weihenstephan). „November“-Gülle führt zu den höchsten Verlusten durch Auswaschung; der über „August“-Gülle zugeführte Stickstoff wird durch die Zwischenfrucht konserviert und ist im Folgejahr nur teilweise pflanzenverfügbar. Kurz vor der Zuckerrübensaat applizierte „März“-Gülle ist dagegen wenig auswaschungsgefährdet und wird von den Pflanzen am besten genutzt. Zudem wird deutlich, dass im Jahr der Anwendung der Mineraldünger-N wesentlich besser von den Pflanzen verwertet wird als der  $\text{NH}_4$ -Stickstoff der Gülle.

Insbesondere Ackerkulturen (nicht so deutlich Grünland) nutzen den ab September über Gülle verabreichten  $\text{NH}_4$ -Stickstoff zunehmend schlechter. Entsprechend nimmt das Risiko für N-Auswaschungsverluste zu; dieses ist besonders groß für im Spätherbst oder Winter ausgebrachten Gülle-Stickstoff. Deshalb untersagt die Düngeverordnung eine Gülleaushbringung im Winter (derzeit von 15. November bis 15. Januar). Um eine optimale Verwertung über einen zeitlich gezielten Einsatztermin der Gülle sicherzustellen, ist eine Lagerkapazität für Gülle in Höhe von etwa 50 % der jährlich anfallen-

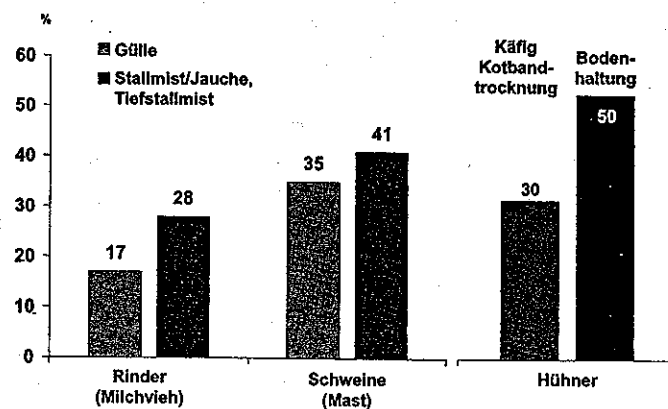


Abb. 2:  $\text{NH}_3$ -Verluste in Stall und Lager (Durchschnittswerte) (eigene Berechnungen aus DÖHLER et al. 2002)

den Menge zu fordern (z. B. sollte die Lagerkapazität für eine Milchkuh (1,2 GV) je nach Leistung und Fütterung bzw. TS-Gehalt ( $\pm$  Wasserzusatz) zwischen 10 und 15 (20) m<sup>3</sup> betragen). Vor allem bei höheren Tierdichten (z. B. > 1 GV ha<sup>-1</sup>) wird die Bereitstellung einer Lagerkapazität in Höhe von 50 % des jährlichen Gülleanfalls eine unverzichtbare Voraussetzung für eine gute Verwertungsstrategie.

### 2.3 Nährstoffwirkung und -verluste der auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebrachten Wirtschaftsdünger

Wie im Stall und Lager ist der Nährstoff-N auch nach der Ausbringung auf das Feld kurzfristig (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, z.T. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) oder langfristig (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N<sub>2</sub>O) verlustgefährdet in Größenordnungen von 5–25 % (Basis Gesamt-N) bzw. 10–50 % (Basis NH<sub>4</sub>-N) der ausgebrachten N-Menge (Abb. 1 und 3). Eine unsachgemäße (z. B. Düngung auf gefrorenem Boden) oder durch ungünstige Folgewitterung (stärkerer Niederschlag) begleiteter Einsatz von Gülle kann nach Applikation ohne Einarbeitung (Grünland) auch kurzfristig zu höheren P-Verlusten (über 0,5 kg P ha<sup>-1</sup>) durch Erosion oder Zwischenabfluss (Makroporenfluss) führen. Diese Verluste wirken sich zwar nicht auf die P-Effizienz (quantitativ niedriger P-Austrag), aber beachtlich auf die Belastung der Gewässer aus.

Tab. 1: Verwertung des Güllestickstoffs (NH<sub>4</sub>-N als <sup>15</sup>N) in Abhängigkeit vom Ausbringungszeitpunkt in % der Düngermenge (Rindergülle: 100 kg NH<sub>4</sub>-N, Mineraldünger: 120 kg N ha<sup>-1</sup>) (VILSMEIER und GUTSER 1989)

Dünger	Auswaschung		N-Entnahme	
	August/28/September 1986	September 1986	Abgraben	Abgraben
Gülle/Abgraben für Zwischenfrucht	10	15	15	15
Gülle/November	10	15	15	15
Gülle/Ende März	10	15	15	15
Kalkammoniumsulfat	10	15	15	15

Während man für das gedüngte Phosphat langfristig von einer nahezu 100 %igen P-Verwertung über die Pflanzen ausgeht, wird Stickstoff längerfristig nur zu etwa 60–75 % ausgenutzt (Abb. 3).

Die kurzfristige N-Verwertung im Anwendungsjahr schwankt zwischen 5–30 %, die Verluste entsprechend zwischen 10–30 %. Über den organischen N-Pool des Bodens folgt langfristig eine weitere Verwertung von 40–65 % (in jährlichen Raten von 5–3 % des im Boden verbliebenen N-Restes); die N-Verluste liegen zwischen 10–20 %, in erster Linie als Nitratstickstoff und in geringen, aber umweltrelevanten Mengen als Lachgas.

Das kurz- und längerfristige Verwertungspotenzial lässt sich mittels N-, C- und P-Parameter für die verschiedenen Wirtschaftsdünger prognostizieren (Tab. 2). Die Größenordnungen dieser Parameter sind allerdings auch starken Schwankungen (u. a. Fütterung,

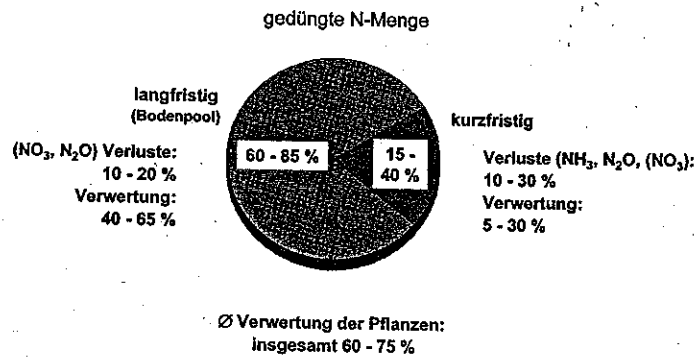


Abb. 3: N-Wirkung organischer Dünger im System Boden/Pflanze

Strohanteil,  $\text{NH}_3$ -Verluste in Stall und Lager) unterworfen.

Der Anteil des  $\text{NH}_4$ -Stickstoffs am Gesamt-N (5–90 %) bestimmt sehr wesentlich das Ausmaß der kurzfristigen N-Wirkung (Verwertung + Verluste). Aus den C/N-Quotienten der enthaltenen organischen Substanz lässt sich nur eine schwache kurzfristige Verfügbarkeit dieser Fraktion ableiten. Dies trifft besonders für Stallmist zu. Aus den C/N-Quotienten und der über die Dünger gelieferten C-Menge kann die Humus reproduzierende Wirkung der Wirtschaftsdünger abgeschätzt werden. Die besten Voraussetzungen hierfür besitzt Stallmist mit einem Humusreproduktionskoeffizienten von etwa 0,35 (reproduzierter Humus-C je Einheit zugeführtem C) gegenüber Gülle mit etwa 0,28. In Kombination mit dem auf dem Feld verbliebenen Stroh-C ergeben sich für Güllesysteme allerdings ähnliche Reproduktionsleistungen wie für Stallmist. Mit ergänzender mineralischer N-Düngung reicht eine Tierdichte von etwa 1 GV  $\text{ha}^{-1}$  aus, um den Humusabbau in landwirtschaftlich genutzten Böden zu kompensieren (ASMUS 1992).

Phosphor liegt in Wirtschaftsdüngern überwiegend als anorganisches Phosphat vor (Tab. 2). Höhere Anteile an Phytin-P bewirken die etwas schwächere P-Verfügbarkeit aus den Exkrementen von Schwein und Geflügel im Jahr der Anwendung. Die N/P-Quotienten der Wirtschaftsdünger lassen im Vergleich mit den N/P-Quotienten der abgefahrenen Erntegüter (etwa 4–5) den Nährstoff

erkennen, der eine entzugsorientierte Düngung begrenzt.

## 2.4 Beeinflussung der kurzfristigen N-Wirkung durch Aufbereitung und Applikationstechniken der Wirtschaftsdünger

Die nachfolgend angeführten Beispiele belegen die häufig enge Wechselbeziehung zwischen N-Wirkung und Aufbereitung bzw. Applikationstechniken der Wirtschaftsdünger (siehe auch SOMMER und HUTCHINGS 2001). So nimmt die kurzfristige N-Wirkung von Stallmist in erster Linie als Folge des verminderten  $\text{NH}_4$ -Anteils am Gesamt-N des Düngers mit steigendem Strohzusatz (N-Immobilisation), mit der Dauer der Rotte oder einer gezielten Kompostierung ( $\text{NH}_3$ -Verluste, N-Immobilisation) bekanntlich ab.

Separierte oder insbesondere fermentierte Gülle (wegen des niedrigen TS-Gehaltes auch als Dünngülle bezeichnet) weisen höhere  $\text{NH}_4$ -Anteile und niedrigere C/N-Quotienten auf und wirken somit im Anwendungsjahr besser als unbehandelte Gülle (Abb. 4). Infolge geringer Gehalte und Abbaubarkeit des Kohlenstoff ist die Immobilisation des  $\text{NH}_4$ -Stickstoffs separierter oder fermentierter Gülle im Boden gleichzeitig vermindert. Dünngülle lassen sich deshalb gezielter verwerten, sofern deren höheres Potenzial für  $\text{NH}_3$ -Verluste in geeigneten Ausbringtechniken Berücksichtigung findet.

Tab. 2: Parameter zur Bewertung der N- und P-Wirkung von Wirtschaftsdüngern

Dünger	NH <sub>4</sub> -N	TS	C/N	N/P	Beleg
Gülle	50	12	20	bis 10	
Stallmist	25	25	30	bis 10	
Erntegüter	20	10	40	min. 4 bis 5	
Milchproduktion					
Erntegüter					

	unbehandelte Rindergülle	Dünnseparat	„Biogas“-Gülle
Anteil $\text{NH}_4\text{-N}$ am Gesamt-N (%)	50	55	60
C/N	8	5	4
C (% i. Fri.S.)	4,4	2,0	
Immobilisation (% v. $\text{NH}_4\text{-N}$ )	44	34	

Abb. 4: Auswirkungen verschiedener Aufbereitung auf die kurzfristige Wirkung der Gülle (GUTSER 1990, GUTSER und DOSCH 1996)

Ausbringetechniken beinhalten bekanntlich ein beachtliches Reduktionspotenzial für  $\text{NH}_3$ -Verluste. Dieses beträgt im Vergleich zur Ausbringung der Gülle mit Breitverteiler (25–30 %  $\text{NH}_3$ -Verluste von der gesamten ausgebrachten N-Menge) für Rindergülle auf bewachsenen Flächen 30 bis 40 % (Schleppschlauch, Schleppschuh), im Falle der Gülle-Injektion gar 80 % (Abb. 5). Injizierende Verfahren bringen im Grünland

jedoch auch pflanzenbauliche Nachteile (Narbenverletzungen, „Verunkrautung“) mit sich und werden deshalb wenig angenommen.

Die Anwendungsstrategie der Gülle beeinflusst kurzfristig die Höhe der gasförmigen Verluste sowie die N-Immobilisation im Boden (Abb. 6). Dadurch verändert sich das für die Kulturpflanzen verwertbare  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Potenzial erheblich: Von zugeführten 80 kg

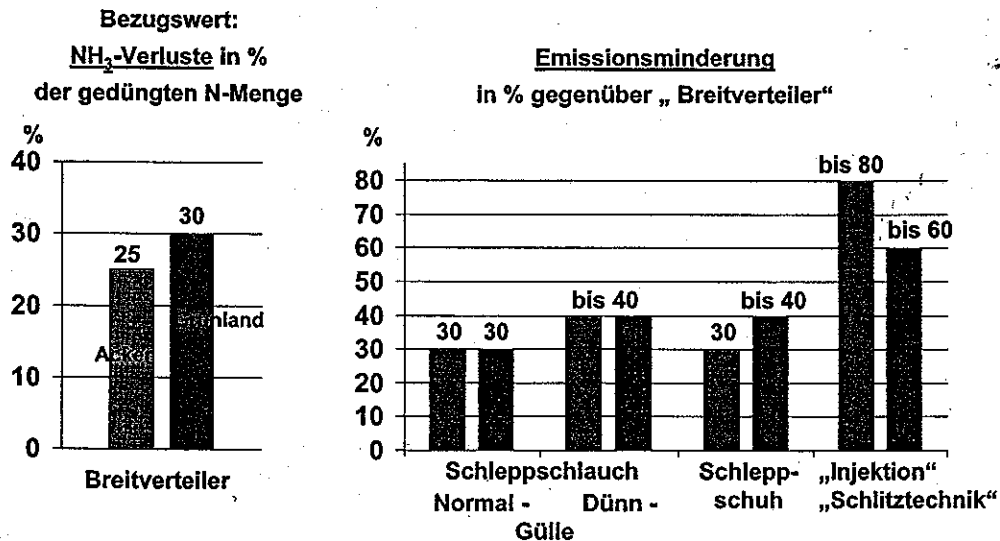


Abb. 5:  $\text{NH}_3$ -Verluste innerhalb 48 Stunden nach Düngung von Rindergülle mit unterschiedlichen Applikationstechniken (DÖHLER et al. 2002)

Düngung: 80 kg NH<sub>4</sub>-N ha<sup>-1</sup>

Kultur: Mais

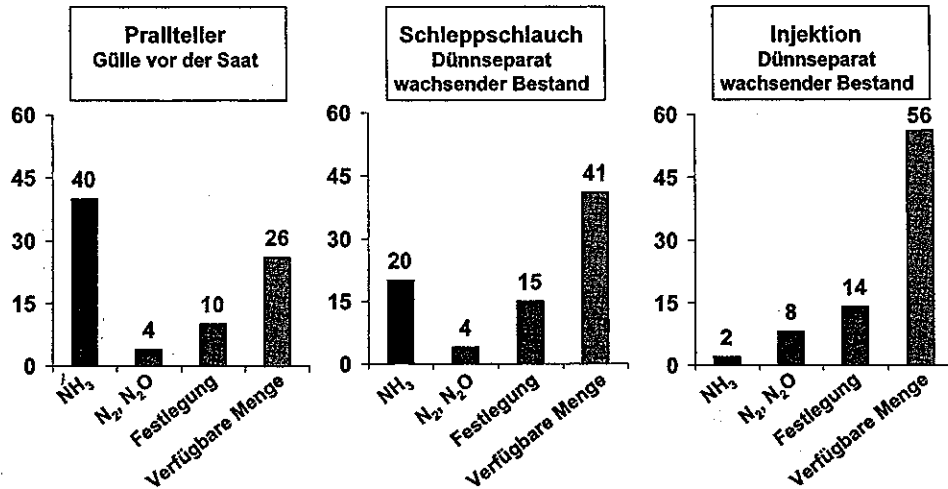


Abb. 6: Verbleib des Güllestickstoffs (NH<sub>4</sub>-N) nach unterschiedlichen Anwendungsstrategien – Verluste, Festlegung, Verwertungspotenzial (DOSCH und GUTSER 1996)

NH<sub>4</sub>-N stehen den Pflanzen zwischen 26 und 56 kg je ha zur Verfügung. Die Wechselwirkung zwischen NH<sub>3</sub>- und N<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>O-Verlusten (s. auch Abb. 9) sowie N-Immobilisation ist klar ersichtlich.

### 2.5 Vor- und Nachteile von Fest- und Flüssigmistsystemen

In einer früheren Arbeit (GUTSER 1990) wurden beide Entmistungssysteme bezüglich Wiederverwertbarkeit und Verlustgefährdung des ausgeschiedenen Stickstoffs weitgehend ähnlich beurteilt. Gülle weist Vorteile hinsichtlich der kurzfristigen N-Wirkung auf, bedarf allerdings eines gezielteren Einsatzes zur Minimierung von NH<sub>3</sub>- und NO<sub>3</sub>-Verlusten.

Stallmist wirkt dagegen verstärkt über den N-Pool des Bodens und eignet sich deshalb nicht für die kurzfristige Steuerung des Pflanzenwachstums. Die systembedingten N-Verluste (bezogen auf Verluste im Stall, bei der Lagerung und auf dem Feld) schwanken im ersten Jahr jeweils zwischen 25–45 %,

bezogen auf die N-Ausscheidung der Nutztiere.

Bei Flüssigmist überwiegen die Verluste vom Feld unmittelbar nach der Ausbringung. Setzt man eine gute NH<sub>3</sub>-konservierende Düngetechnik voraus, können sich insbesondere im Anwendungsjahr leichte Vorteile für das N-Recycling des Flüssigmist-Systems einstellen. Die NH<sub>3</sub>-Verluste lassen sich hier durch gute Technik besser kontrollieren. Mit steigenden Tierdichten schwinden die Vorteile des Güllesystems, da sich dann eine gezielte Düngung zur wachsenden Kultur nicht immer realisieren lässt (häufig wird dann die Gülle in zu hohen Aufwandmengen unter nicht immer optimalen Witterungs- und Bodenvoraussetzungen appliziert).

In keinem der beiden Systeme kann eine Überfrachtung der Böden mit Wirtschaftsdünger abgepuffert werden; der N-Pool des Bodens wird in ähnlicher Weise angereichert, so dass sich das Potenzial für N-Verluste bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes unabhängig von der Düngerform kontinuierlich erhöht.

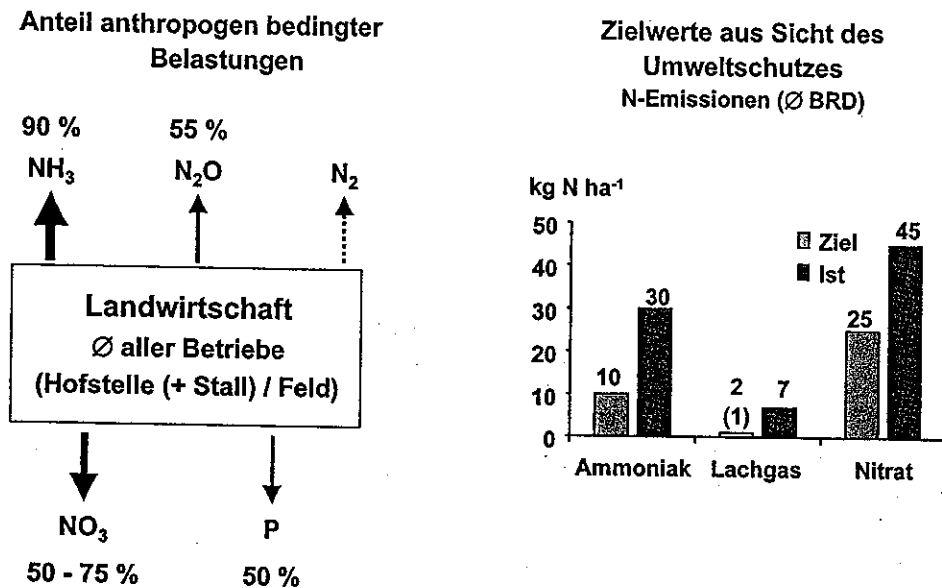


Abb. 7: Umweltbeeinträchtigung und Umweltqualitätsziele der Landwirtschaft (GUTSER und MATTHES 2001)

### 3 Umweltprobleme in tierhaltenden Betrieben – Konfliktnährstoff N

Landwirte beeinflussen durch ihre Produktionsweise die stoffliche Qualität unserer Umwelt. Neben der Pedosphäre und Biosphäre ist insbesondere auch die Hydrosphäre und Atmosphäre betroffen (Abb. 7). Aus Sicht des Umweltschutzes werden für den Nährstoff „Stickstoff“ von der derzeitigen Ist-Situation stark abweichende Zielwerte gefordert.

Zielwerte für gasförmige N-Emissionen ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) weichen demnach noch wesentlich stärker von der Ist-Situation ab als die Nitratausträge in die Gewässer. Die Menge an ausgetragenen Nitrat wird zudem noch in der gesättigten Bodenzone und im Grundwasserleiter infolge Denitrifikation weiter vermindert.

Betriebe mit Tierhaltung weisen allgemein höhere N-Verluste auf – eine positive Korrelation mit der Tierdichte (Tiere je Flächeneinheit) ist gegeben. Das Verlustpoten-

zial kann am Überschusssaldo von Hoftorbilanzen abgeschätzt werden. Dieser beträgt im Mittel aller Betriebe in der BRD etwa  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  (1980:  $160 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) und differenziert in Marktfrucht-, Futterbau- und Veredelungsbetrieben zwischen 19, 107 und  $166 \text{ kg N ha}^{-1}$  (AID 1999). Das höhere Verlustpotenzial ist z.T. systembedingt ( $\text{NH}_3$ -Verluste aus Exkrementen und Dünger, N-Anreicherung der Böden (vgl. Kap. 3.2)), z. T. allerdings die Folge einer Überfrachtung der Böden mit Stickstoff (Wirtschaftsdünger, mineralische Ergänzungsdüngung), welche die Aufnahmekapazität optimal wachsender Acker- und Grünlandbestände überfordert.

#### 3.1 Emissionen klimawirksamer Gase – Wechselwirkung mit $\text{NH}_3$ -konservierenden Maßnahmen

Während die Ausgasung von Methan im System Gülle/Boden nur eine zu vernachlässigende Rolle spielt, treten während der

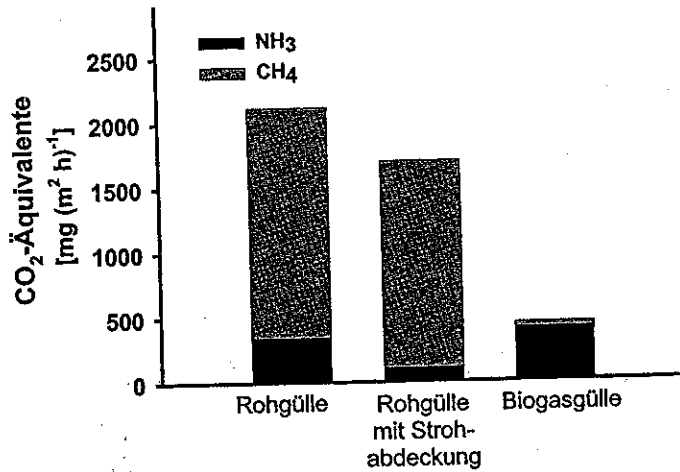


Abb. 8: Einfluss von Strohabdeckung und Güllefermentation auf Gas-Emissionen im Lager (CLEMENS et al. 2001)

zu durchwegs mit einer Zunahme an Lachgas-Emissionen verbunden (Abb. 9). Die Optimierung von Güllestrategien muss demnach stets das gesamte mögliche Verlustpotenzial berücksichtigen.

Interessant ist zudem der Befund (WULF et al. 2002), dass auf Ackerflächen NH<sub>3</sub>-konservierende Applikationsverfahren für Rindergülle zwar die NH<sub>3</sub>-Emissionen erheblich begrenzen können, ohne aber das klimawirk-

same „Schadgas“-Potenzial insgesamt infolge steigender N<sub>2</sub>O-Emissionen nennenswert zu verändern (Abb. 10). Auf Grünland können NH<sub>3</sub>-konservierende Systeme jedoch einen beachtlichen Rückgang des klimarelevanten Gaspotenzials bewirken, sieht man von der Gülleinjektion (sprunghafter Anstieg

Güllelagerung beachtliche CH<sub>4</sub>-Emissionen auf (Abb. 8). Durch anaerobe Behandlung (Fermentation) können diese allerdings erheblich reduziert werden (CLEMENS et al. 2001).

Maßnahmen zur Minimierung von NH<sub>3</sub>-Verlusten nach Gülleanwendung sind nahe-

Messperiode : bis 4 Wochen nach Düngung

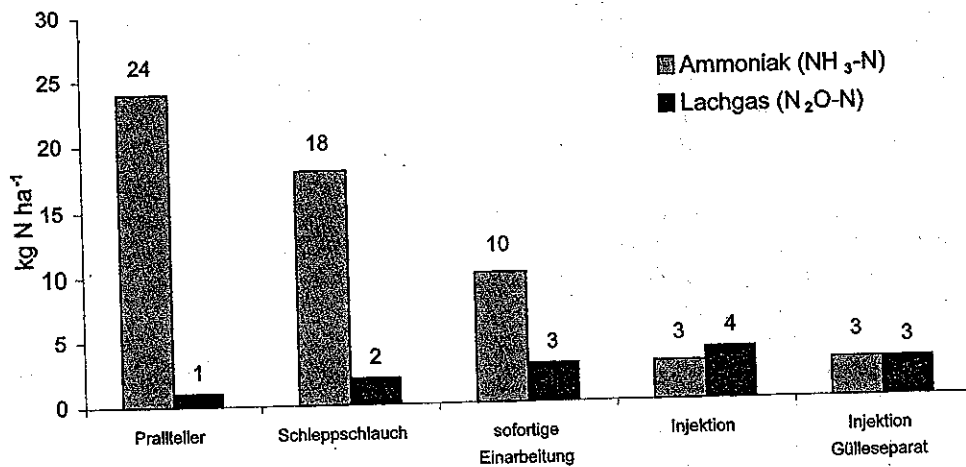


Abb. 9: Wechselwirkung zwischen NH<sub>3</sub>- und N<sub>2</sub>O-Verlusten nach unterschiedlichen Einsatzstrategien von Gülle zu Mais (DOSCH 1996)



der N<sub>2</sub>O-Emission) ab, die ohnehin für Grünland aus pflanzenbaulichen Erwägungen weniger geeignet ist (s. a. BRINK et al. 2001).

Letztlich darf aus diesen Modellergebnissen gefolgert werden, dass Güllestrategien das klimawirksame Gaspotenzial insgesamt nur wenig beeinflussen können, wohl aber die Höhe der NH<sub>3</sub>-Emissionen. Eine wesentliche Reduktion der klimawirksamen Gase und auch der NH<sub>3</sub>-Verluste ist demnach nur über eine Rücknahme der je Flächeneinheit zu verwertenden Güllemenge erreichbar.

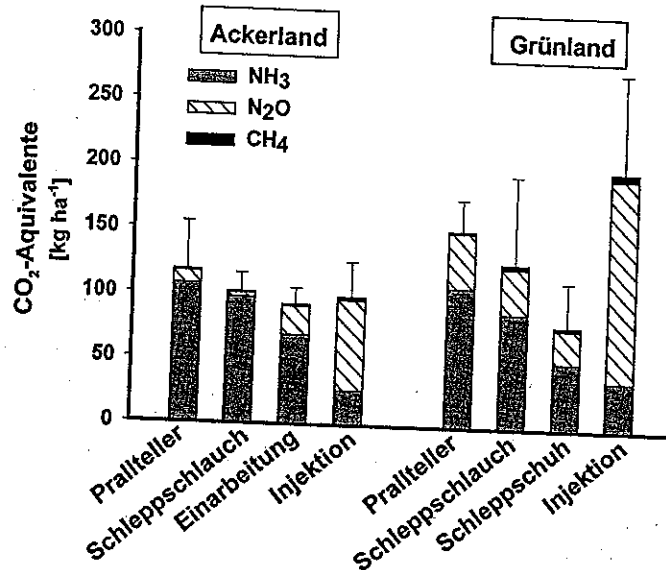


Abb. 10: Einfluss der Ausbringtechnik auf Gas-Emissionen nach Gülle-Applikation (WULF et al. 2002)

### 3.2 Verlustpotenzial nach langfristiger Anwendung von Wirtschaftsdüngern (N-Pool<sub>Boden</sub>)

Langjährige Zufuhr hoher Mengen an Wirtschaftsdüngern (z. B. in Veredelungsbetrieben) bewirkt eine C- und N-Anreicherung der Böden. Diese Steigerung der „Bodenfruchtbarkeit“ sichert zwar ein hohes Ertragsniveau, stellt allerdings auch ein hohes Potenzial für N-Verluste durch Auswaschung oder N<sub>2</sub>O-Emissionen dar (Abb. 11 und 12).

Die Höhe der C- und N-Anreicherung der Bö-

den korreliert mit der über Wirtschaftsdünger zugeführten C- und N-Fracht und dadurch mit dem Tierbesatz eines Betriebes.

In einem langjährigen Modellexperiment (1983–2000) im Weihenstephaner Lysimeter wurden Düngungsstrategien eines „Marktfuchtbetriebes“ (Ø 165 kg N Mineraldünger ha<sup>-1</sup>) und „Futterbaubetriebes“ (Ø 155 kg

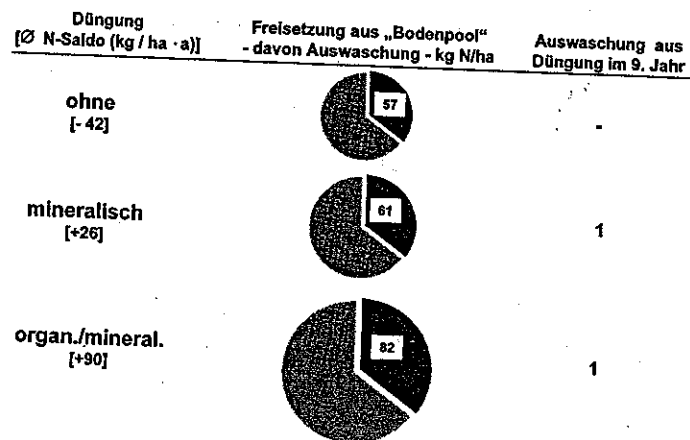


Abb. 11: N-Potenzial des Bodens und Nitratauswaschung – Langzeitversuch im 9. Jahr (Lysimeter) (GUTSER 1998)

1996: Silomais - einheitlich 60 kg N ha<sup>-1</sup> als KAS  
Messperiode April 1996 - März 1997

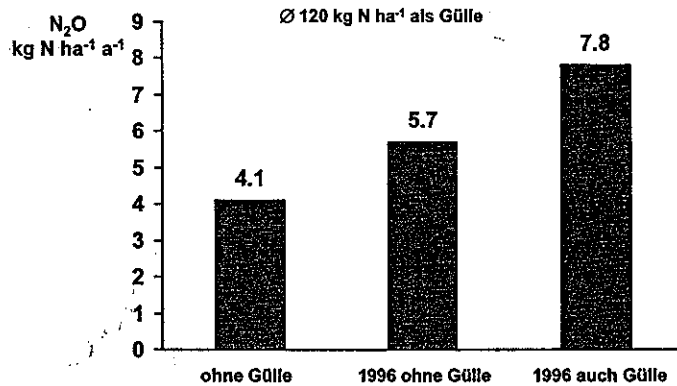


Abb. 12: N<sub>2</sub>O-Emissionen aus langjährig (seit 1988) mit Gülle gedüngten Flächen (KILIAN et al. 1998)

N-Ausscheidung ha<sup>-1</sup> bzw. 128 kg Gülle-N ha<sup>-1</sup> + 58 kg Mineraldünger-N ha<sup>-1</sup>) hinsichtlich N-Verwertung der Pflanzen, N-Auswaschung und N-Salden einer Flächenbilanz (Input<sub>Düngung</sub> abzüglich N-Abfuhr<sub>Erntegüter</sub>) sowie N-Anreicherung der Böden (Krume) verglichen (Abb. 13). Der Boden war bis Versuchbeginn langjährig nur mineralisch gedüngt worden.

Nach einer anfänglich schwächeren Ertragsleistung erreichte die Gülle/KAS-Kombi-

wertung der Pflanzen, nachdem N-konservierende Zwischenfrüchte das Risiko für Nitratverluste deutlich reduzierten. Nach 15-jähriger Versuchsdauer lagen die C- und N-Gehalte des güllegedüngten Bodens (Krume) gegenüber dem Vergleich (KAS) um 4.4 t C bzw. 525 kg N ha<sup>-1</sup> höher.

Dieses Experiment weist zum einen auf die mit langjähriger organischer Düngung verbundene C- und N-Anreicherung der Böden und das damit einhergehende ansteigende Ertrags- und Verlustpotenzial für N hin. Der bewirtschaftungsbedingte Steady-state-Zustand der Böden dürfte allerdings erst nach einem Zeitraum von etwa 20–30 Jahren erreicht sein (GUTSER und CLAASSEN 1994). Zum anderen darf daraus abgeleitet werden, dass mittlere jährliche Zufuhren von 128 kg N als Rindergülle, entsprechend einer N-Ausscheidung von 155 kg N je ha, durch die

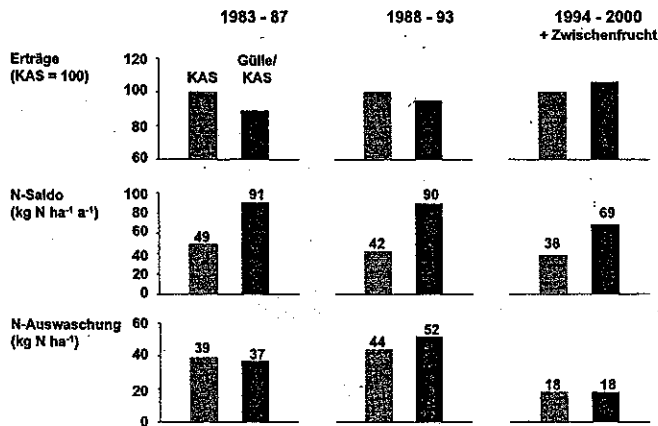


Abb. 13: Langzeitexperiment Marktfrucht-/Futterbau-Betriebe – Ertrag, N-Saldo, N-Auswaschung (schluffiger Lehm, Ø 800 mm Niederschlag/Jahr)

Kulturpflanzen noch optimal verwertet und die N-Verluste, zumindest was die Nitratauswaschung betrifft, noch in einem vertretbaren Niveau gehalten werden können. Bezieht man die angesetzten  $\text{NH}_3$ -Verluste im Stall und Güllelager mit ein, so errechnet sich für die letzte Versuchsphase nach 10–15-jähriger Laufzeit ein mittlerer jährlicher Überschussaldo (Flächen-Stall-Bilanz) von 38 (Marktfruchtbetrieb) bzw. 96  $\text{kg N ha}^{-1}$  (Futterbaubetrieb). Der hohe Überhang im Futterbaubetrieb dürfte erheblich mit auf die gewählte Fruchtfolge dieses Modellversuches (statt Silomais wurden Zuckerrüben – niedrigere N-Abfuhr – angebaut) zurückzuführen sein.

### 3.3 Unvermeidbare Verluste in verschiedenen Betriebssystemen

N-Verluste, die im landwirtschaftlichen Betrieb bei Zugrundelegung einer guten fachlichen Praxis auftreten, werden als unvermeidbar bezeichnet. Auf Betriebsebene enthalten diese Verluste sowohl die Emissionen im Stall und Düngelager als auch N-Austrä-

ge der bewirtschafteten Flächen in die Hydrosphäre und Atmosphäre. Das Verlustniveau sowie die Verlustpfade können in langjährigen systemgerechten Experimenten mit messtechnischer Begleitung der N-Emissionen erfasst werden (Abb. 14).

Die im Betrieb mit Tierhaltung (ca. 1,5  $\text{GV ha}^{-1}$ ) etwa um 50  $\text{kg N ha}^{-1}$  höheren Verluste als im Marktfruchtbetrieb (inklusive  $\text{N}_2$ -Verluste durch Denitrifikation!) sind durch das Bewirtschaftungssystem ( $\pm$  Tiere) bedingt und auf kurzfristige ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) und langfristige Wirkungen der organischen Düngung zurückzuführen (GUTSER 1998).

In einer Expertengruppe wurde zudem ein Schätzrahmen entwickelt (Gutser und EBERTSEDER 2001), mit dem die Höhe der unvermeidbaren N-Verluste in Abhängigkeit der Standortgüte und Betriebsform ermittelt werden kann (Abb. 15). Diese Verluste sind in erster Linie von der Tierdichte und damit der Höhe der N-Ausscheidung je Flächeneinheit abhängig.

Die aus landwirtschaftlicher Sicht als „tolerierbar“ bezeichneten Verluste sind bis zu einer verwertbaren N-Menge über Wirtschaftsdünger kalkuliert, die einer Ausscheidung von ca. 170  $\text{kg N ha}^{-1}$  entsprechen. Darüber hinaus ist ein optimales Recycling des in Wirtschaftsdüngern enthaltenen N, zumindest für Ackerflächen, nicht mehr gewährleistet.

In Konsequenz zu diesen standort- und betriebstypspezifischen unvermeidbaren N-Verlusten lässt sich daraus ein Bewertungssystem für die Düngepraxis landwirtschaftlicher Betriebe ableiten: Betriebe düngen richtig, wenn der Bruttosaldo einer Hoftorbilanz

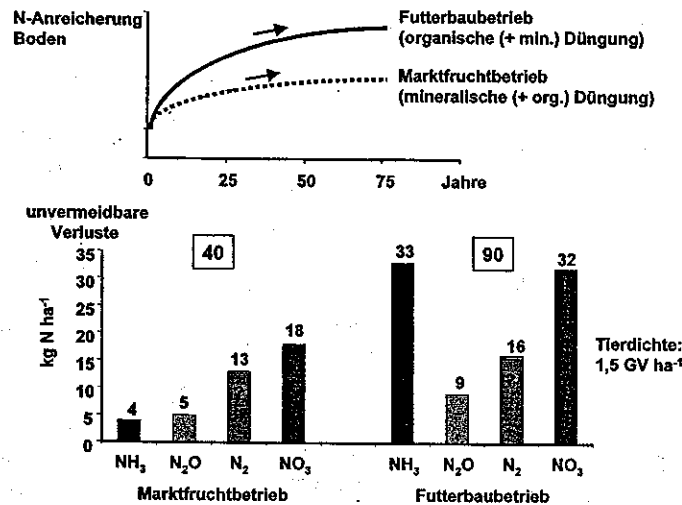


Abb. 14: Unvermeidbare Verluste an Stickstoff unter günstigen Standortbedingungen ( $\text{kg N ha}^{-1}$  AF) (GUTSER 1998)

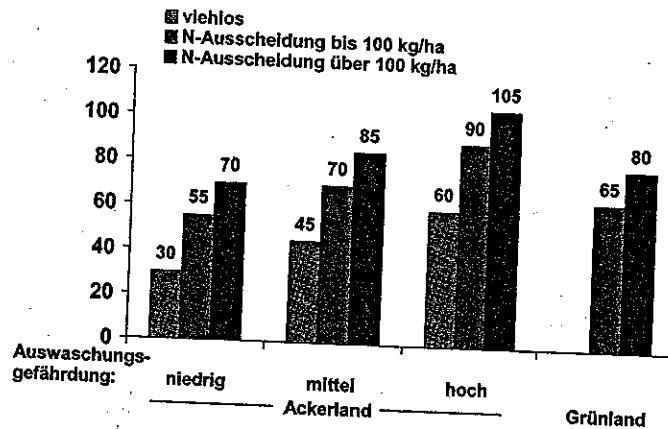


Abb. 15: Zielwerte für betriebstypabhängige unvermeidbare N-Verluste oder Bruttosalden eines N-Abgleiches (z. B. Hoftorbilanz)

in etwa der Größenordnung der unvermeidbaren N-Verluste (Abb. 15) entspricht.

Die derzeit vom Umweltbundesamt geforderten Schwellenwerte für N-Salden landwirtschaftlicher Betriebe liegen bei 50 kg N ha<sup>-1</sup>, im Falle auswaschungsgefährdeter Standorte bei 35 kg N ha<sup>-1</sup>. Diese Forderung kann nur von Marktfruchtbetrieben und Futterbaubetrieben mit einer tierischen Ausscheidung bis etwa 50 kg N ha<sup>-1</sup> erfüllt werden. Aus Sicht der Landwirtschaft (Abb. 15) und des Umweltschutzes wird demnach die optimale Düngung auf auswaschungsgefährdeten Standorten unterschiedlich bewertet (Ertragsicherung contra Umweltschutz: N-Auswaschung!).

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass für die Beurteilung der Qualität der Düngepaxis keine pauschalen, sondern nur betriebspezifische Zielwerte geeignet sind (GUTSER und MATTHES 2001).

#### 4 Konkretisierung der „guten fachlichen Praxis“

Zur Steigerung der Effizienz und Umweltverträglichkeit der Düngung sowie für die Konkretisierung der guten fachlichen Düngepaxis ist eine Nachbesserung der Düngever-

ordnung notwendig. Als wichtigen Indikator für die Effizienz und Umweltverträglichkeit der Düngepaxis eines Betriebes kommt dem Nährstoffsaldo einer Hoftorbilanz eine übergeordnete Bedeutung zu (GUTSER 2002). Dies gilt insbesondere für tierhaltende Betriebe (Futterbau-, Veredelungs- und Grünlandbetriebe), in denen die Abfahren über Futterfrüchte nur schwer abzuschätzen sind.

Die Nährstoffsalden bedürfen einer Bewertung – hierfür sind Zielwerte für eine gute Düngepaxis entsprechend den oben aufgeführten Überlegungen unumgänglich.

Eine Hoftorbilanz ist nicht nur für Stickstoff, sondern auch für Phosphor zu fordern. Mit der Begrenzung der P-Fracht für optimal versorgte Böden auf das Niveau der P-Abfuhr (ca. 30 kg P ha<sup>-1</sup> – unvermeidbare Verluste sind bei diesem Nährelement zu vernachlässigen) wäre die jährlich zulässige N-Fracht über Wirtschaftsdünger mit geregelt. In einer 30 kg P (70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) enthaltenen Ausscheidung sind ca. 170 kg N enthalten. Auf sehr hoch mit P versorgten Böden sollte das P-Recycling über Wirtschaftsdünger auf die Hälfte der P-Abfuhr über die Ernten begrenzt werden. Längerfristig ist das P-Recycling entsprechend den üblichen, auf Bodenuntersuchung aufbauenden Düngestrategien anzupassen.

Abgestimmt auf diese Forderung ist ein effizientes und weitgehend umweltschonendes Recycling von Stickstoff über Wirtschaftsdünger nur bis zu einer Ausscheidungsmenge der Tiere von 170 kg N ha<sup>-1</sup> (in Grünlandbetrieben bestenfalls noch bis ca. 200 kg N ha<sup>-1</sup>) gegeben. Ausgehend von

NH<sub>3</sub>-Verlusten in Stall und Düngerlager von etwa 15–25 % entspricht dieses Ausscheidungs-niveau einer für die Ausbringung noch verfügbaren N-Menge von 125–155 kg ha<sup>-1</sup>. Somit besteht noch ein ausreichender Puffer für eine wachstums- und qualitätssteuernde mineralische Ergänzungsdüngung. Bisher war die jährliche Höchstmenge über Wirtschaftsdünger begrenzt auf 170 kg N ha<sup>-1</sup> ausgebrachte N-Menge nach Abzug von bis zu 45 % sogenannter „unvermeidbarer Verluste“. Durch die vorgeschlagene Begrenzung dieser Höchstmengen auf Basis der Ausscheidung der Tiere bestünde für die Landwirte im Vergleich mit der geltenden Regelung nach Düngeverordnung ein größerer Anreiz, zum einen über eine optimale Fütterung möglichst niedrige N-Ausscheidungen je Tier und somit höhere tolerierbare Tierdichten zu erreichen und zum anderen über eine verlustarme Lagerung und Ausbringung der Wirtschaftsdünger die für ein optimales Pflanzenwachstum notwendigen Aufwendungen an mineralischer Ergänzungsdüngung möglichst gering zu halten.

Verfehlt ein Betrieb im mehrjährigen Durchschnitt die als Zielwerte des Nährstoffabgleichs für N und P vorgegebenen Salden, so könnten über eine gesetzlich vorgeschriebene Beratungspflicht Ursachenanalysen betrieben und zukünftig notwendige Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden. Häufige Ursache für nicht mehr tolerierbare N-Salden sind hohe Tierdichten. Ein Export von Wirtschaftsdüngern mindert die P- und N-

Überfrachtung der betriebseigenen Flächen, trägt allerdings nicht zu einer Minimierung der NH<sub>3</sub>-Emissionen auf regionaler Ebene bei.

Durch eine bundesweit konsequente Realisierung bester Düngepraxis mit weitgehender Einhaltung betriebsspezifischer Zielwerte für N-Salden einer Hoftorbilanz ließe sich zukünftig je nach Entwicklung der Tierdichte der Überschussaldo auf etwa 70–65 kg N ha<sup>-1</sup> reduzieren (GUTSER und MATTHES 2001). Durch diese Zielsetzung wäre die Flächenproduktivität nicht nennenswert gefährdet, die Umwelt nicht unnötig belastet und zugleich die Bodenfruchtbarkeit nachhaltig gesichert (Tab. 3). Die Vorgaben des UBA (Zielwert für den Überschussaldo: 50 kg N ha<sup>-1</sup>) sind allerdings nur dann annähernd zu erreichen, wenn über eine umfassende Anpassung der agrarpolitischen Rahmenbedingungen und mögliche Veränderungen der Ernährungsgewohnheiten der Bevölkerung (Einschränkung des Verzehrs von tierischem Protein) eine weitere Rücknahme der Tierdichte auch ökonomisch umsetzbar wird.

## 5 Schadstoffgehalte von Wirtschaftsdüngern

Die Eignung von Sekundärrohstoffen als Düngemittel hängt neben den Nährstoffgehalten sehr wesentlich von den enthaltenen Schadstoffen und damit den Nährstoff/Schadstoff-Quotienten ab. Abfallrechtlich sind tolerierbare Höchstgrenzen an Schwermetallen für zur Verwertung geeignete Klärschlämme und Bioabfallkomposte fixiert, die kontinuierlich an den sich verbessernden Qualitätsstandard dieser Reststoffe ange-

Tab. 3: N-Salden der Landwirtschaft – Ø Bruttosalden der Hoftorbilanz BRD (GUTSER und MATTHES 2001)

	1981	1991	Nachrichtl. Zielwert
Bruttosaldo (kg N/ha)	108	102	50
Nettosaldo (kg N/ha)	108	102	50
Realisationsrate (%)	100	100	100
Zielwert UBA (1991)			50

passt werden (sollten!) (vgl. AbklärV von 1992, BioabfallV von 1998).

Die Qualitätsstandards dieser Sekundärrohstoffdünger werden für die Beurteilung der Schadstoffsituation von Wirtschaftsdüngern herangezogen (Tab. 4). Es fällt auf, dass letztere auf Basis einer einheitlichen P-Fracht meist beträchtlich niedrigere Schadstoffmengen (dargestellt am Schadstoff Cadmium) aufweisen, Schweinegülle jedoch dem Klärschlamm vergleichbare Zn- und Cu-Mengen enthält. Wenn diese Schwermetalle auch essentielle Spurennährstoffe darstellen, sollten die Fütterungsempfehlungen dem physiologischen Bedürfnis, sofern Mindestanforderungen bestehen, weiter angepasst werden.

Derzeit wird die Unbedenklichkeit eines Recyclings von Wirtschaftsdüngern infolge festgestellter Rückstände an pharmakologisch wirksamen Substanzen, insbesondere Antibiotika aus der Wirkstoffgruppe der Tetracycline, diskutiert. Erste Untersuchungen in der Region Weser-Ems weisen von 180 Proben Schweinegülle 24 % Positivbefunde aus mit mittleren Konzentrationen von 11 g Tetracyclin und 4-Epitetracyclin je m<sup>3</sup> (WINCKLER und GRAFE 2000). Eine ökotoxikologische Bewertung dieses Befundes ist derzeit noch nicht möglich, insbesondere fehlen belastbare Erkenntnisse bezüglich der Abbaubarkeit dieser Stoffe im Boden.

## 6 Zusammenfassung

Die N-Effizienz der Landwirtschaft beträgt im Mittel der BRD etwa 30–35 %. Zwei Drittel des Eintrags in das betriebliche System gehen im Durchschnitt als N-Verluste verloren, davon ein wesentlicher Teil in der Tierproduktion. Die systembedingt höheren unvermeidbaren N-Verluste tierhaltender Betriebe fallen kurzfristig bereits im Stall, Lager und Feld sowie längerfristig durch die nicht kontrollierbare N-Freisetzung aus dem durch langjährige Zufuhr der Wirtschaftsdünger angereicherten N-Pool des Bodens an. Voraussetzung für ein effizientes N-Recycling von Gülle ist eine Lagerkapazität in Höhe von etwa der Hälfte der jährlich anfallenden Menge. Konservierende Applikationstechniken vermindern NH<sub>3</sub>-Verluste, kaum aber das insgesamt anfallende Potenzial an klimawirksamen Spurengasen. Eine deutlich stärkere Reduktion der gasförmigen Emissionen insgesamt bringt nur eine Rücknahme der Tierdichte.

Die aus einer Hoftorbilanz für den Nährstoff Stickstoff ermittelten Überschussalden eignen sich für die Bewertung der Effizienz und Umweltverträglichkeit der im Betrieb praktizierten Düngestrategie. Hierfür sind standortangepasste Zielwerte für spezifische Betriebsformen erforderlich, die sich an der Höhe der unvermeidbaren Verluste orientieren müssen.

Tab. 4: Schwermetalle in Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern – Mittlere Gehalte und Frachten (Basis: 30 kg P) (Quellen: KTBL 2000, DÖHLER et al. 2001, UBA 2001)

Dünger	Gehalte		Frachten		
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Dünger	0,2	0,2	10	10	10
Rindergülle	0,2	0,2	10	10	10
Schweinegülle	0,2	0,2	10	10	10
Geflügelkot	0,2	0,2	10	10	10
Klärschlamm	0,2	0,2	10	10	10
Bioabfallkompost	0,2	0,2	10	10	10

Als Begrenzung des Nährstoffrecyclings über Wirtschaftsdünger wird auf optimal versorgten Böden eine P-Fracht in Höhe der P-Abfuhr über das Erntegut (ca. 30 kg P ha<sup>-1</sup>) bzw. eine N-Fracht vorgeschlagen, die einer N-Ausscheidung von 170 kg N (für Grünland eventuell auch 200 kg N) je ha entspricht.

## 7 Literatur

- AID (1999): Nährstoffbilanzen der Landwirtschaft in Deutschland. Heft 1404, 30 S.
- ASMUS, F. 1992: Anwendung von Stallmist im Pflanzenbau. In: Umweltverträgliche Verwertung von Festmist. KTBL Arbeitspapier 182. KTBL, Darmstadt: 32-44.
- BRINK, C.; KROEZE, C.; KLIMONT, Z. (2001): Ammonia abatement and its impact on emissions of nitrous oxide and methane – Part 2: application for Europe. *Atmospheric Environment* 35: 6313-6325
- CLEMENS, J.; RIEGER, R.; WEILAND, P.; VANDRÉ, R.; SCHUMACHER, I.; WULF, S. (2001): Eigenschaften, Verwendung und Umgang mit Biogasgülle, 44-51. Tagung des Fachverbandes Biogas, Borken, Januar 2001
- DÖHLER, H.; SCHULTHEISS, U.; ECKEL, H.; ROTH, U. (2001): Schwermetallgehalte von Wirtschaftsdüngern in Deutschland und der EU, Vergleich mit anderen Düngemitteln und Minderungsansätze. In: KTBL (Hrsg.): BMU/BMVEL-wissenschaftliche Anhörung „Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes“ am 25/26. Oktober 2001 in Bonn: 25.
- DÖHLER, H.; DÄMMGEN, U.; EURICH-MENDEN, B.; OSTERBURG, B.; LÜTTICH, M.; BERG, W.; BERGSCHMIDT, A.; BRUNSCH, R. (2002): Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissionsermittlung an internationale Richtlinien sowie Erfassung und Prognose der Ammoniak-Emissionen der deutschen Landwirtschaft und Szenarien zu deren Minderung bis zum Jahre 2010. Abschlußbericht im Auftrag BMVEL und UBA, UBA-Texte Heft 05/02
- DOSCH, P. (1996): Optimierung der Verwertung von Güllestickstoff durch Separiertechnik und kulturartspezifische Applikationstechniken. Dissertation, TU-München
- DOSCH, P.; GUTSER, R. (1996): Reducing N losses (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>) and immobilization from slurry through optimized application techniques. *Fert. Res.* 43: 165-171
- GUTSER, R. (1990): Grundlagen zur Nährstoffwirkung von Gülle und Festmist. Tagungsband „Umweltschonende Verwertung von Fest- und Flüssigmist“, 27./28.06.1990, Landtechnik Weihenstephan: 88-100
- GUTSER, R. (1998): Zur Problematik von Stickstoffbilanzen. Die Düngeverordnung auf dem Prüfstand. DLG-Kolloquium Dezember 1997, Kassel, DLG c/98: 27-45
- GUTSER, R. (2002): Die gute fachliche Praxis aus Sicht der Ökonomie und Ökologie. *Landinfo (Baden-Württemberg) I*, 1-6.
- GUTSER, R.; CLAASSEN, N. (1994): Langzeitversuche zum N-Umsatz von Wirtschaftsdüngern und kommunalen Komposten. *Mitt. Deutsch. Bodenk. Ges.* 73: 47-50
- GUTSER, R.; DOSCH, P. (1996): Cattle-slurry – <sup>15</sup>N turnover in a long-term lysimeter trial. In: C. RODRIGUEZ-BARRUECO (ed) „Fertilizers and Environment“. Kluwer Academic Publishers Dordrecht/NL: 345-350
- GUTSER, R.; EBERTSEDER, T. (2001): Unvermeidbare Nährstoffverluste in der Landwirtschaft. In: Bundesarbeitskreis Düngung (Hrsg.): Düngung: Baustein nachhaltiger Landwirtschaft – Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e.V und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD), Würzburg, 24./25.04.2001: 95-114
- GUTSER, R.; MATTHES, U. (2001): Gute fachliche Praxis aus Sicht der Ökonomie und Ökologie. In: Gute fachliche Praxis. Welchem Beitrag leistet die Verfahrenstechnik? KTBL-Schrift 400. KTBL, Darmstadt: 91-101
- KILIAN, A.; GUTSER, R.; CLAASSEN, N. (1998): N<sub>2</sub>O-emissions following long-term organic fertilization at different levels. *Agribiol. Res.* 51: 27-36
- KTBL (Hrsg.) (2000): Datenbank organische/mineralische Abfälle und Wirtschaftsdünger. KTBL, Darmstadt

SOMMER, S.G.; HUTCHINGS, N.J. (2001): Ammonia emissions from field applied manure and its reduction – invited paper. *Europ. J. Agronomy* 15: 1–15

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (1999): Entwicklung von Parametern und Kriterien als Grundlage zur Bewertung ökologischer Leistungen und Lasten der Landwirtschaft – Indikatorensysteme. UBA Texte 24/99: 258 S.

UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2001): zitiert in Pressemitteilung zur BMU/BMVEL-wissenschaftlichen Anhörung „Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung des Umwelt- und Verbraucherschutzes“ am 25/26. Oktober, Bonn

VILSMEIER, K.; GUTSER, R. (1989): N-Ausnutzung nach Mineral- und Gölledüngung (15N) im Weihenstephaner Lysimeter. *VDLUFA-Schriftenreihe* 30: 175-180

WINCKLER, C.; GRAFE, A. (2000): Charakterisierung und Verwertung von Abfällen aus der Massentierhaltung unter Berücksichtigung verschiedener Böden. Umweltbundesamt (Hrsg.) Texte 44/00

WINDISCH, W., (2000): Beitrag der Tierernährung für eine nachhaltige Tierproduktion am Beispiel der Emissionen von Phosphor und Stickstoff. *Proc. 7. Int. Forum Animal Nutrition*, BASF AG, Ausgabe 38

WULF, S.; MAETING, M.; CLEMENS J. (2002): Effect of application technique on the emission of trace gases ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) after spreading co-fermented slurry on arable and grassland; Part II: Greenhouse gas emissions, *J. Environ. Qual.*, accepted