

GUTACHTEN

Titel: **Rahmenbedingungen für den nachhaltigen Einsatz von Kompost unter den Vorgaben der geplanten Novellierung der Düngeverordnung**

Datum: 27.11.2015

Auftraggeber: VHE Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e. V.
Auftrag vom: März 2015
Ansprechpartner: Herr Dipl.-Ing. agr. Michael Schneider

Auftragnehmer: ahu AG Wasser · Boden · Geomatik, Aachen
Projektbearbeitung: Herr Dr. agr. Michael Kastler (Projektleitung)
Frau Dipl.-Geogr. Charlotte Molt (Projektbearbeitung)
Herr Dipl.-Geol. Frank Müller (Qualitätssicherung)

Aktenzeichen: KOMPDV / 15045
Ausfertigung Nr.: 1

An der Durchführung des Projekts waren weiterhin beteiligt:

Lisa Lechtenböcker (Textkorrektur, -layout)

INHALT

1	EINLEITUNG	3
2	GRUNDLAGEN	5
2.1	Rechtliche Grundlagen	5
2.1.1	Derzeitige Düngeverordnung (DüV-2007)	5
2.1.2	Novellierung der Düngeverordnung (DüV-VE-2014)	7
2.2	Fachliche Grundlagen	8
2.2.1	Grundlagen des Stickstoffkreislaufs	8
2.2.2	Kompost – Definition, Inhaltsstoffe, Eigenschaften und Wirkung	12
3	STICKSTOFFWIRKUNG, STICKSTOFFDYNAMIK UND AUSWASCHUNG BEI KOMPOSTANWENDUNG	17
3.1	Wege des kompostbürtigen Stickstoffs	17
3.2	Stickstoffnachlieferungspotenzial aus Kompost	20
3.2.1	Einflussfaktoren Boden	20
3.2.2	Einflussfaktoren Kompost	22
3.2.3	Einflussfaktoren Kompostausbringung	24
3.2.4	Einflussfaktoren N-Mineralisierungsraten von Kompost-Stickstoff	24
3.3	Wirksystem Boden – Grundwasser	28
3.3.1	Ursachen für Nitratauswaschung aus dem Boden	29
3.3.2	N-Auswaschung aus Böden mit Kompostanwendung	31
4	N-BILANZIERUNG	34
4.1	Bilanzgrößen	34
4.2	Berechnung N-Bilanzen	35
4.2.1	Ergebnis N-Bilanzen	37
4.2.2	Humusaufbau durch Kompost und erlaubter N-Bilanzüberschuss nach DüV-VE-2014	37
4.3	Diskussion N-Bilanzen	38
5	ERGEBNIS AUS LITERATURSTUDIE UND N-BILANZIERUNG	41
6	SCHLUSSFOLGERUNG FÜR DIE PRAXIS	43
6.1	Rahmenbedingungen für die Vermeidung von Stickstoffaustrag	43
6.2	Empfehlungen für DüV	45
7	HUMUSAUFBAU AUF STANDORTEN MIT HOHER PHOSPHORVERSORGUNG	48

8	FAZIT UND AUSBLICK	50
9	LITERATUR	51

ABBILDUNGEN:

Abbildung 1:	Stickstoff-Kreislauf	10
Abbildung 2:	Wege des kompostbürtigen Stickstoffs	18
Abbildung 3:	Stickstoffgehalte unterschiedlicher Düngemittel	23
Abbildung 4:	N-Bilanzierung und Bilanzgrößen (Flächenbilanz)	34

TABELLEN:

Tabelle 1:	Eigenschaften von Nitrat und Ammonium im Boden	9
Tabelle 2:	Eigenschaften und Inhaltsstoffe von Kompost	14
Tabelle 3:	Durchschnittliche Ausnutzung von Bioabfallkompost-N	24
Tabelle 4:	Literaturzusammenstellung: Düngewirksamer Stickstoff aus Kompost in % der Gesamt-Stickstoffzufuhr (N-Mineralisierungsraten)	26
Tabelle 5:	Einflussgrößen der Nitratverlagerung	29
Tabelle 6:	Einflussgrößen der Nitratverlagerung	30
Tabelle 7:	Stickstoffentzug aus der Ernte einer dreijährigen Fruchtfolge aus Winterweizen / Wintergerste / Winterraps	35
Tabelle 8:	Nährstoffzufuhr aus Bioabfallkompost und Mineraldünger	36
Tabelle 9:	N-Bilanzierung	36
Tabelle 10:	Ermittlung der humusreproduktionswirksamen N und C bei Anreicherung von Humus im Oberboden	38
Tabelle 11:	Anrechenbare Anteile an Stickstoff in bestimmten Düngemitteln zur Humusreproduktion	39

1 EINLEITUNG

In Deutschland fallen pro Einwohner und Jahr ca. 177 kg Gartenabfälle und 81 kg Küchenabfälle an (Krause et al. 2014). Das Kreislaufwirtschaftsgesetz sieht vor, dass diese z. B. durch Kompostierung und Nutzung als Sekundärrohstoff zu verwerten sind.

Nach Angaben der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. wurden in 2014 3,35 Mio. t RAL-gütegesicherte Kompostprodukte hergestellt. 60 % der RAL-gütegesicherten Kompostprodukte und nahezu 100 % der RAL-gütegesicherten Gärprodukte wurden in der Landwirtschaft verwertet.

Aufgrund der Erhebungen des Statistischen Bundesamtes und der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. kann davon ausgegangen werden, dass in Deutschland jährlich rund 2,5 Mio. t FS Kompost zu landwirtschaftlichen Düngungszwecken eingesetzt werden. Unter Zugrundelegung der durchschnittlichen Nährstoffgehalte in RAL-gütegesicherten Kompost werden somit jährlich rund 21.000 t Stickstoff (Gesamt), 10.000 t Phosphat (P_2O_5) und 17.750 t Kalium (K_2O) sowie 580.000 t Humus (in TM) zu landwirtschaftlichen Düngungszwecken zur Verfügung gestellt. Kompost ist somit ein bedeutender Nährstoff- und Humuslieferant für die Landwirtschaft, der einen wertvollen und nachhaltigen Beitrag zur Bodenverbesserung und zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit leistet. Aufgrund seiner positiven Eigenschaften ist Kompost in der Landwirtschaft ein geschätzter Langzeitdünger und Bodenverbesserer. Für die Kompostdüngung sind einige Rechtsgrundlagen insbesondere nach der Bioabfallverordnung und der Düngeverordnung (DüV) zu beachten.

Um die allgemein hohe Nitratbelastung der Böden und des Grundwassers zu reduzieren und u. a. die EG-Nitratrichtlinie (Richtlinie 91/676/EWG) (zulässige Nitratkonzentration im Grundwasser < 50 mg/l) in deutsches Recht umzusetzen, sieht die Novelle der DüV einige Änderungen vor.

Ein wesentlicher Eckpunkt der geplanten Verordnung ist der Vorschlag, die für Stickstoff aus Wirtschaftsdüngern tierischen Ursprungs geltende Ausbringungs-Obergrenze von 170 kg N/ha * a künftig auf alle organischen Düngemittel anzuwenden. Infolge dieser Änderungen soll der Gesamtstickstoff aus Kompost nunmehr zu 100 % mit in die Ausbringungs-Obergrenze für Stickstoff einfließen.

Organische Düngemittel weisen bezüglich des Stickstoffs in ihrer Wirksamkeit sehr große Unterschiede auf. Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft (die derzeit der 170 kg N/ha * a-Grenze unterliegen) sind durch einen hohen Anteil an löslichem Stickstoff gekennzeichnet. Diese Anteile sind im Anwendungsjahr schnell pflanzenverfügbar, deshalb aber auch potenziell verlagerungsfähig und können entsprechend bei fehlendem Entzug durch die Pflanze in tiefere Bodenschichten bzw. ins Grundwasser verlagert werden.

Kompost ist dagegen ein vergleichsweise abbaustabiler organischer Dünger. Stickstoff liegt im Kompost zu über 90 % in einer Vielzahl organischer Verbindungen vor, wobei der Anteil an stabilem, humusproduktionswirksamem Stickstoff überwiegt. Organisch gebundener Stickstoff wird erst durch die Tätigkeit von Mikroorganismen in mineralischer Form für die Pflanze verfügbar (Rubbert 2012). Bei ungünstigen Witterungs- und Bodenverhältnissen und ohne den N-Entzug

durch Pflanzen besteht jedoch auch für diesen sehr geringen Anteil an mineralischen Stickstoff die Gefahr einer Auswaschung.

Vor dem Hintergrund der geplanten Novellierung der DüV und auf der Suche nach einem praxisgerechten Konsens werden die Anforderungen an die landwirtschaftliche Verwendung von Kompost unter besonderer Betrachtung der kurz- und langfristigen Stickstoffwirkung in Kompostdüngesystemen im vorliegenden Bericht diskutiert.

Hierfür wird der Einfluss der Kompostdüngung auf den Stickstoff-Haushalt im Boden, d. h. auf organische Bindung, Auswaschungsrisiko und N-Aufnahme durch Kulturpflanzen erläutert.

Ziel ist die zusammenfassende Beschreibung der Auswirkung einer regelmäßigen Kompostaufbringung auf das System Boden – Gewässer im Hinblick auf die Aspekte N-Wirkungsdynamik, N-Mineralisierung und N-Verlagerung sowie die Betrachtung eines N-Auswaschungsrisikos aus Komposten in das Grundwasser.

Es werden folgende Schlüsselfragen beantwortet:

- 1) Welche Rolle spielt der Kompost bei der Ausgestaltung der guten fachlichen Praxis i. S. „Erhalt eines standorttypischen Humusgehalts“ (§ 17 BBodSchG Abs. 2 Satz 7)?
- 2) Wie ist das N-Auswaschungspotenzial bei der Anwendung von Kompost zu beurteilen?
- 3) Wie ist die Einsetzbarkeit von Kompost mit dem Ziel des Humusaufbaus, auf Standorten mit hoher P-Versorgung, in Zusammenhang mit der P-Dynamik im Boden und dem Einfluss der P-Düngung einzuschätzen?

2 GRUNDLAGEN

2.1 Rechtliche Grundlagen

Seit Inkrafttreten des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes im Jahr 1996 gilt für Abfälle das Verwertungsgebot. Die Kompostierung von getrennt erfassten, organischen Abfällen aus Haushalten wurde als besonders geeignetes Verfahren zur Rückführung von Nährstoffen und organischer Substanz in den natürlichen Stoffkreislauf erkannt. Durch eine fachgerechte und überwachte Rotte kann die organische Fraktion des Hausmülls in Form von Kompost in den natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Damit wird der stofflichen Verwertung der Vorrang gegenüber der thermischen Entsorgung gegeben. Organische Substanz und Nährstoffe werden vor der Vernichtung bewahrt, kostengünstiger behandelt und wiederverwendet (Rubbert 2012).

Gemeinsam mit der Bioabfallverordnung bilden die düngerechtlichen Vorschriften im Rahmen der Düngerverordnung (DüV) und der Düngemittelverordnung (DüMV) das rechtliche Fundament einer Kompostanwendung in den Verwendungsbereichen Landwirtschaft, Erwerbsgartenbau und Forstwirtschaft.

2.1.1 Derzeitige Düngerverordnung (DüV-2007¹)

Im Düngegesetz vom 09.01.2009 ist die Ermächtigung verankert, die Grundsätze der „guten fachlichen Praxis“ sowie die flächenbezogenen Obergrenzen für das Aufbringen von Nährstoffen aus Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft näher zu bestimmen. Das erfolgt mit der Düngerverordnung (DüV) von 1996, die seit Inkrafttreten mehrfach novelliert wurde. Ziel der DüV-2007 ist es, durch einen schonenden Einsatz von Düngemitteln und eine Verminderung von Nährstoffverlusten langfristig die Nährstoffeinträge in die Gewässer und in andere Ökosysteme zu verringern. Die DüV-2007 dient auch der Umsetzung der EU-Nitratrichtlinie (Zorn et al. 2007).

Ein zentrale Stellung in der Düngerverordnung nimmt die Düngedarfsermittlung ein: § 3 (1) bestimmt, dass vor Ausbringung wesentlicher Nährstoffmengen² der Düngedarf der Kulturen zu ermitteln ist. Für die Berechnung einer maximalen Ausbringungsmenge sind dabei die im Kompost enthaltenen pflanzenverfügbaren Nährstoffe zu berücksichtigen.

¹ **DüV-2007:** Aktuell rechtsgültige Düngerverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27.02.2007 (Inkrafttreten der letzten Änderung am 1. Juni 2012).

² **Wesentliche Nährstoffmengen:** Wird pro Hektar jährlich mehr als 50 kg Stickstoff (Gesamt-N) oder mehr als 30 kg Phosphat (P₂O₅) ausgebracht, wird entsprechend der DüV-2012 (§ 2 DüV) von „wesentlichen Nährstoffmengen“ ausgegangen, welche eine Düngedarfsermittlung erfordern.

Wesentliche Nährstoffgehalte: Mehr als 1,5 % Stickstoff (Gesamt-N) oder 0,5 % Phosphat (P₂O₅) in der Trockenmasse.

Wesentliche Gehalte an verfügbarem Stickstoff: Der zu mehr als 10 % in einer Calciumchloridlösung lösliche Anteil am Gesamtstickstoff, soweit dieser zu mehr als 1,5 % in der Trockenmasse enthalten ist.

Die Düngebedarfsermittlung hat im Wesentlichen die Zielsetzungen, den Pflanzen bzw. dem Boden nur so viel Nährstoffe zuzuführen, wie zur Erreichung der angestrebten Erträge und Qualitäten sowie für die Erhaltung der standortbezogenen Bodenfruchtbarkeit notwendig ist.

Die Ermittlung des Stickstoffbedarfs erfolgt auf der Basis der N_{\min} -Methode nach dem Rechenansatz:

$$\text{N-Düngebedarf} = \text{„N-Sollwert“} - \text{„}N_{\min}\text{-Gehalt im Boden“}$$

Der N-Sollwert steht für diejenige Stickstoffmenge, die den Pflanzen während der Vegetationsperiode insgesamt für ein optimales Wachstum zur Verfügung stehen sollte. Er setzt sich zusammen aus N_{\min} -Vorrat³ im Boden, der N-Nachlieferung während der Vegetationszeit und der N-Düngung.

Bei dem nach DüV erforderlichen Nährstoffvergleich müssen dagegen die Gesamtnährstoffgehalte, die über Kompost der Fläche im Anwendungsjahr zugeführt werden, angerechnet werden (Zapf et al. 2013).

Nach § 5 der DüV-2007 sind alle Betriebe zur Erstellung von Nährstoffvergleichen (Bilanzierung) auf Betriebsebene verpflichtet, die mehr als 10 ha bewirtschaften. Beim Anbau von Sonderkulturen wie Gemüse, Erdbeeren, Tabak, Hopfen, Reben und Gehölzen gilt eine Grenze von in Summe 1 ha, ab der Nährstoffbilanzen zu erstellen sind. Die Nährstoffvergleiche sind für Stickstoff und Phosphat jährlich zu erstellen. Beim Nährstoffvergleich werden Nährstoffzufuhr und -abfuhr auf der Betriebsebene einander gegenübergestellt. Zur Erfassung der Nährstoffzufuhr auf der Betriebsebene ist die Nährstoffzufuhr über Wirtschaftsdünger, Sekundärrohstoff, Handelsdünger sowie Stickstofffixierung über Leguminosen aufzuführen. Zur Erfassung der Nährstoffabfuhr auf der Betriebsebene ist die Nährstoffabfuhr mit den Haupternteerzeugnissen bzw. des Grünlandes einschließlich der Beweidung, verkaufte oder verfütterte Ernterückstände und Zwischenfrüchte sowie Abgabe von Wirtschaftsdünger aufzuführen. Die N-Bilanzüberschüsse dürfen 60 kg N pro ha und Jahr im dreijährigen Betriebsmittel nicht überschreiten (§ 6 Abs. 2 Nr. d DüV). Insbesondere bei Stickstoff kann eine Kompostdüngung zu höheren N-Bilanzüberschüssen führen, da über die Kompostgaben zwar hohe Gesamtstickstoffmengen zugeführt werden, allerdings im Anwendungsjahr nur ein geringer Teil des Stickstoffs pflanzenverfügbar und anrechenbar ist. Um Besonderheiten bei der Anwendung bestimmter Düngemittel wie z. B. Komposten Rechnung zu tragen, dürfen nach § 5 Abs. 3 DüV-2007 in Abstimmung mit der nach Landesrecht zuständigen Stelle unvermeidliche Stickstoffüberschüsse berücksichtigt werden. In einigen wenigen Bundesländern wird deshalb eine N-Überhangbewertung durchgeführt, in deren Berechnung dann nur der tatsächlich pflanzenverfügbare Stickstoff bei der Kompostdüngung berücksichtigt wird (Beispiel Land Nordrhein-Westfalen).

Um die Wirkung der Kompostanwendung auf die Nährstoffvergleiche gemäß DüV-2007 aufzuzeigen, sind in Kapitel 4 beispielhafte Stickstoff-Bilanzierungen für unterschiedliche Fruchtfolgen dargestellt.

³ Unter N_{\min} versteht man den Gehalt eines Bodens an verfügbarem mineralisiertem Stickstoff (Ammonium-N und Nitrat-N).

2.1.2 Novellierung der Düngeverordnung (DüV-VE-2014⁴)

Nach aktueller DüV-2007 dürfen über Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft nicht mehr als 170 kg/ha N im Jahr ausgebracht werden. Diese Ausbringungsobergrenze soll im Rahmen der Novelle der DüV (DüV-VE vom 18.12.2014) auf alle organischen Düngemittel angewendet werden, insbesondere auch auf Gärreste pflanzlicher Herkunft. Mit diesem Vorschlag soll der in Deutschland wachsenden Bedeutung von flüssigen Gärresten Rechnung getragen werden, die sich hinsichtlich der Düngewirkung nur unwesentlich von Gülle unterscheiden. Dabei spielt die Herkunft des organischen Stickstoffs (pflanzlich oder tierisch) keine Rolle. Es wird davon ausgegangen, dass der verstärkte Aufbau des organischen N-Pools im Boden das Risiko von Auswaschungen erhöht.

Soweit die 170 kg-N-Grenze auf alle organischen Düngemittel ausgeweitet werden sollten, wären auch Komposte betroffen.

Die Regelung zum Nährstoffvergleich für Stickstoff nach § 5 DüV-2012 wird mit der Novelle der Verordnung im Grundsatz beibehalten. Einträge und Austräge an Stickstoff werden in Bezug auf die Fläche bilanziert und der resultierende Überschuss wird begrenzt. Nach der geltenden DüV-2012 ist je Hektar und Jahr ein Überschuss von maximal 60 kg N-gesamt im Betriebsdurchschnitt zulässig (3-Jahres-Mittelwert). Dieser N-Überschuss soll nach DüV-VE-2014 ab dem Jahr 2018 nicht mehr als 50 kg/ha betragen. Beim Nährstoffvergleich werden die N-Gesamtgehalte zugrunde gelegt. Die mit Kompost verbundenen unvermeidbaren Überschüsse an Gesamt-N können nach § 5 Abs. 3 Satz 1 in Verbindung mit Anlage 6 Zeile 15 DüV-2012 beim Nährstoffvergleich zwar berücksichtigt werden. Ein entsprechender Hinweis, dass und wie dabei verfahren werden kann, fehlt allerdings, so dass es in der Praxis zu sehr unterschiedlichen Auslegungen kommt (Kehres 2014). Denn während für Wirtschaftsdünger Zahlen für die Wirksamkeit des enthaltenen Stickstoffs genannt werden, fehlen solche Vorgaben für Kompost und Gärprodukte.

Neben N-Obergrenzen und Nährstoffvergleich sind folgende weitere wesentliche Aspekte der DüV-VE-2014 zu nennen:

Sperrfristen für die Ausbringung:

Die Sperrfristen für die Ausbringung von Düngemitteln gelten bislang nur für Düngemittel mit wesentlichen Gehalten an verfügbarem Stickstoff (N), d. h. für solche mit einem Gehalt von mehr als 1,5 % N-gesamt in der Trockenmasse und mehr als 10 % verfügbarem Stickstoff.

Künftig sollen die Sperrfristen für Düngemittel mit einem Gesamtgehalt von mehr als 1,5 % TM gelten. Davon ist besonders Kompost-Dünger betroffen, da viele Komposte mehr als 1,5 % N-gesamt, i. d. R. aber deutlich weniger als 10 % an verfügbarem Stickstoff enthalten.

⁴ **DüV-VE von 2014: Novellierung der Düngeverordnung**

Für diesen Entwurf vom 18.12.2014 wurde das regierungsinterne Abstimmungsverfahren eingeleitet. Der Gesetzentwurf wurde von der Bundesregierung noch nicht beschlossen. Daher können sich noch Änderungen, auch wesentlicher Art, ergeben, bevor die Novelle der Düngeverordnung erlassen wird.

Die Sperrfristen für Festmist, Kompost und feste Gärprodukte sind für den Zeitraum vom 15. November bis 31. Januar vorgesehen.

Aufbringen auf gefrorenem Boden:

Bislang dürfen Düngemittel mit wesentlichen Gehalten an Stickstoff (> 1,5 % TM) nicht auf gefrorenen Boden aufgebracht werden. Dieses Verbot soll künftig schon dann gelten, wenn im Düngemittel überhaupt Stickstoff enthalten ist. Relativiert wird dieses Verbot durch § 5 Abs. 1 Satz 2 DüV-VE-2014, nach dem unter bestimmten Bedingungen Festmist von Huf- und Klauentieren, feste Gärückstände und Kompost mit nicht mehr als 60 kg Gesamtstickstoff pro Hektar aufgebracht werden dürfen. 60 kg Gesamtstickstoff sind jedoch bei einer Kompostdüngung bereits mit einer Aufwandmenge von ca. 4,5 t TM Kompost (bei 1,33 % N-Gesamt in der TM) erreicht.

2.2 Fachliche Grundlagen

2.2.1 Grundlagen des Stickstoffkreislaufs

„Stickstoff und seine Verbindungen verhalten sich in der Umwelt sehr unterschiedlich: Während Luftstickstoff praktisch inert ist, sind die oxidierten (z. B. Stickstoffoxide und Lachgas), reduzierenden (z. B. Ammoniak) sowie organischen Verbindungen (N_{org}) reaktiv. Je nach Verbindung und Konzentration können diese lebenswichtige Nährstoffe oder auch gefährliche Schadstoffe sein – daher spricht man auch von reaktivem Stickstoff“ (UBA 2014).

In den natürlichen Stickstoffkreislauf hat der Mensch in den letzten 100 Jahren massiv eingegriffen. In Deutschland gelangen jährlich 4,2 Mio. t reaktiver Stickstoff in den Stickstoffkreislauf. Dies entspricht ca. 50 kg pro Person, von denen nur etwa 6 kg pro Person und Jahr in Form von Lebensmitteln konsumiert werden (UBA 2014). Gut 60 % der deutschen Stickstoffemissionen stammen aus der Landwirtschaft. Hierbei wird Stickstoff in anorganischer Form (Mineraldünger) und in organischer Form (Stallmist, Jauche, Gülle, Klärschlamm, Kompost, Gärprodukte der Biogasanlagen) als Nährstoff dem Boden und somit den Pflanzen zugeführt (DVGW 2015).

Die übermäßige Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt führt zu Problemen, wie beispielsweise dem Verlust von aquatischer und terrestrischer Biodiversität, erhöhter Freisetzung von Klimagasen sowie der erschwerten Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser (UBA 2014).

Stickstoff ist der von Pflanzen am meisten benötigte Nährstoff. Pflanzen nehmen Stickstoff vor allem als Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+) sowie bei Luftstickstofffixierern über Mikroorganismen (z. B. Knöllchenbakterien bei Leguminosen) als N_2 aus der Luft auf.

Tab. 1 zeigt die unterschiedlichen Eigenschaften von Nitrat und Ammonium im Boden.

Tab. 1: Eigenschaften von Nitrat und Ammonium im Boden
(nach Lazar et al. 2012; modifiziert)

Nitrat (NO ₃ ⁻) in Böden	Ammonium (NH ₄ ⁺) in Böden
negativ geladene Teilchen (Anionen)	positiv geladene Teilchen (Kationen)
<p>werden nicht gut vom Boden adsorbiert</p> <ul style="list-style-type: none"> • mobil in Bodenlösung (im Vergleich zu NH₄⁺) • kann in stark verwitterten Böden an Anionen-Austauschern sorbieren • kann bei nicht vorhandenem Pflanzenbedarf, in Abhängigkeit von den Standort- und Klimaverhältnissen aus dem Boden ins Grundwasser ausgewaschen werden 	<p>werden gut vom Boden adsorbiert</p> <ul style="list-style-type: none"> • gebunden an Ionen-Austauschern → bioverfügbar • fixiert in Ton (adsorptiv und reversibel) → schwer bioverfügbar • stabilisiert in organischer Substanz → schwer bioverfügbar (erst nach Abbau der org. Sub.)
<p>direkte Aufnahme durch Pflanze schnelle Immobilisierung durch Mikroorganismen</p>	<p>direkte Aufnahme durch Pflanzen schnelle Immobilisierung durch Mikroorganismen</p>
<p>wird durch Denitrifikation zu NO_x, N₂O und N₂ reduziert</p>	<p>umgewandelt zu Ammoniak (NH₃) → Übergang in Atmosphäre möglich durch Bakterien zu Nitrat (NO₃⁻) oxidiert</p>

Betrachtet man das terrestrische Ökosystem, stellt der organisch gebundene Stickstoff in der organischen Substanz bzw. Humus den bei weitem größten Pool dar, welcher ungefähr 95 % beträgt. Somit ist der organisch gebundene Stickstoff gegenüber dem anorganisch gebundenen Rest absolut dominant. Der Abbau und die Freisetzung von organischem Stickstoff aus diesem Pool bestimmt, wieviel Stickstoff überhaupt in einem System für Pflanzen, Mikroben etc. verfügbar ist.

Die natürliche N-Anlieferung (N-Mineralisation des Bodens) reicht bei Kulturpflanzen im Allgemeinen nur für niedrige Erträge, sodass in der Landwirtschaft N-haltige Düngemittel und pflanzenbauliche Kulturtechnik (Anbau von Zwischenfrüchten und Leguminosen etc.) eingesetzt werden (Amlinger 2003). Da pflanzenverfügbare N-Verbindungen (Nitrat) im Boden nicht zwischengespeichert werden, müssen N-Zufuhr und N-Bedarf möglichst exakt nach Menge, Form und zeitlicher Abfolge aufeinander abgestimmt werden. Eine N-Zufuhr unterhalb des Pflanzenbedarfs führt relativ schnell zu Ertrags- und Qualitätsverlusten bei den Produkten. Eine N-Zufuhr oberhalb des Bedarfs kann schnell zur Nitratauswaschung und Grundwasserbelastung sowie zu Qualitäts- und Ertragsverlusten in Folge der überhöhten N-Versorgung (z. B. Zuckerrüben) oder erhöhter Anfälligkeit gegenüber parasitären Schaderregern führen (Amlinger 2003). Die wesentlichen N-Umsetzungsprozesse und Teilprozesse des Stickstoffkreislaufs wie Ammonifikation, Nitrifikation, Denitrifikation, N-Fixierung und N-Immobilisierung werden im Folgenden kurz erläutert und anhand von Abb. 1 dargestellt.

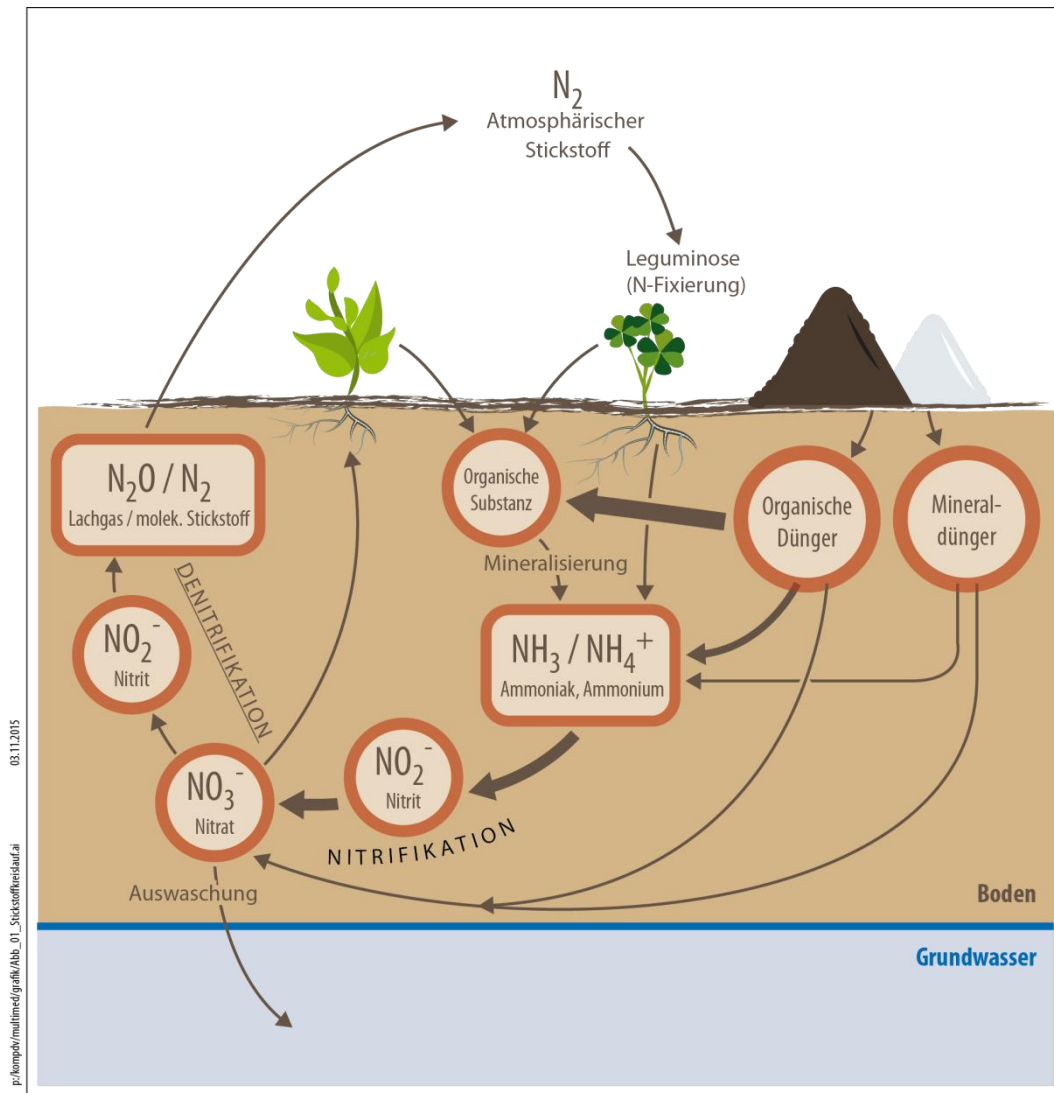


Abb. 1: Stickstoff-Kreislauf (eigene Abbildung, ahu AG 2015)

1) Der mikrobielle Abbau in Form von Mineralisierung von organischen N-Verbindungen zu NH_4^+ (NH_3) wird als Ammonifikation bezeichnet. In dieser Form kann die N-Aufnahme durch Pflanzen erfolgen. Eine Ammonifikation tritt immer auf, wenn Mikroorganismen Proteine als Energie- und Kohlenstoff-Quellen nutzen. Die jährliche N-Nachlieferung aus dem Bodenpool hängt von der Humusqualität bzw. dem C/N-Verhältnis ab und beträgt etwa 1 bis 2 % vom N-Vorrat des Bodens. Dadurch können jährlich ca. 30 bis über 100 kg/ha organisch gebundener Stickstoff mit Hilfe von Bodenmikroorganismen zu mineralischem Stickstoff, d. h. zu Ammonium und – über den Prozess der Nitrifikation (s. u.) – letztlich in Nitrat überführt werden.

Andererseits fixieren Mikroorganismen auch mineralischen Stickstoff, indem sie ihn in ihre organische Substanz einbauen (N-Immobilisierung). Weiterhin kann das Ammonium-Kation durch Sorption an Tonpartikel des Bodens zeitweise festgelegt werden (Haberer et al. 1996).

2) Durch die **Nitrifikation** wird Stickstoff mobilisiert, indem er von Ammonium zu Nitrat umgewandelt wird. Als Nitrifikation wird im Allgemeinen die bakterielle Oxidation von Ammoniak (NH_3) bzw. Ammonium-Ionen (NH_4^+) über Nitrit zu Nitrat (NO_3^-) bezeichnet. Nitrat kann von den Pflanzen als Nährstoff aufgenommen werden. Nitrat, das nicht aufgenommen wird, unterliegt der Auswaschungsgefahr. Der Austrag erfolgt zum einen über das Bodensickerwasser mit dem Zwischenabfluss in oberirdische Gewässer, zum anderen über den Dränabfluss und über den Weg des Grundwasserabflusses mit mehr oder weniger großer Zeitverzögerung ebenfalls ins oberirdische Gewässer (DVGW 2015).

3) Unter **Denitrifikation** versteht man die Reduzierung des im Nitrat (NO_3^-) gebundenen Stickstoffs zu Distickstoffmonoxid (Lachgas, N_2O) und molekularem Stickstoff (N_2). Einige Bodenbakterien sind unter anaeroben Bedingungen in der Lage, Nitrat als Sauerstoffquelle zu nutzen. Die Denitrifikation findet daher hauptsächlich in stark durchnässten Böden und bei hohen Nitratgehalten im Boden statt. Der im Nitrat gebundene Stickstoff wird so in eine Form überführt, die weitgehend inert ist und von den meisten Lebewesen nicht als Nährstoff genutzt werden kann. Der entstandene molekulare Stickstoff (N_2) entweicht größtenteils in die Atmosphäre.

4) Bei der **Stickstoff-Fixierung** wird Stickstoff aus der Luft von seiner elementaren, molekularen Form (N_2) in reduzierte Verbindungen umgewandelt. Die so entstehenden Ammonium-Ionen und Ammoniak-Ionen können von Pflanzen und Tieren zum Aufbau von organischer Substanz verwendet werden. In der Natur erfolgt die Fixierung durch Mikroorganismen, die entweder frei oder in symbiotischer Verbindung mit Pflanzen leben (z. B. Leguminosen). Aufgrund der hohen Stabilität der Stickstoffmoleküle benötigen die Mikroorganismen bei der Umwandlung eine hohe Menge an Energie.

5) Der Boden stellt mit Stickstoffgehalten von 0,05 bis 0,5 % N in Kulturböden den größten und stabilsten N-Pool dar. Auf den Hektar umgerechnet bedeutet dies bei einer Bodenmenge von 3 Mio. kg/ha (Krumenboden) eine Menge von 1.500 bis 15.000 kg an organisch gebundenem Stickstoff im Humus (Schmalfuß 1958). Dieser Humus, in Jahrtausenden gebildet, unterliegt einem stetigen Abbau durch Mikroorganismen, wodurch kontinuierlich Ammoniak abgespalten wird. Er erfährt aber ebenso einen ständigen Zuwachs. Neben dem Leguminosen-Stickstoff und der Nachlieferung aus dem Bodenpool wird der Hauptstickstoffbedarf der Pflanze über Mineraldünger gedeckt. Daneben sind Wirtschaftsdünger eine wichtige, vorrangig organische N-Quelle. Sie enthalten den Stickstoff sowohl in organisch gebundener Form als auch in Form von Ammonium. Kompost enthält den Stickstoff großteils organisch gebunden und teilweise in Form von Ammonium. Während der leichtlösliche, pflanzenverfügbare Ammoniumanteil relativ rasch im Anwendungsjahr düngewirksam wird, geht der organische Stickstoffanteil vorerst in den N-Pool des Bodens und wird nur langsam in den Folgejahren nachgeliefert (vgl. Abschn. 3.1, Wege des kompostbürtigen Stickstoffs).

2.2.2 Kompost – Definition, Inhaltsstoffe, Eigenschaften und Wirkung

Begriffsdefinition

Im vorliegenden Bericht wird unter Kompost Folgendes verstanden:

„Kompost ist ein humus- und nährstoffreicher Dünger, der als Endprodukt bei der Kompostierung von organischen Abfällen entsteht. Er weist stets eine feste Konsistenz auf. Im Gegensatz zur Vergärung finden die biologischen Prozesse bei der Kompostierung unter Einwirkung von Luftsauerstoff statt.“⁵

Wie Kompost im Boden wirkt und welche Eigenschaften ihn auszeichnen, hängt sowohl von den Ausgangsstoffen als auch von den Zersetzungsprozessen (Rotteprozess) ab.

Inhaltsstoffe und Eigenschaften von Kompost

Das Ausgangsmaterial für die Kompostierung setzt sich überwiegend aus zwei Materialströmen zusammen:

- Grüngut (Grünabfälle) aus dem Hobby-Gartenbau, Parkanlagen und Landschaftsbau
→ Ausgangsstoffe für Grüngutkomposte
- Biogut (Inhalte der Biotonne): sowohl Grünabfälle als auch Küchenabfälle aus dem häuslichen Bereich (z. B. Speisereste, Kaffeersatz, Eierschalen etc.)
→ Ausgangsstoffe für Biogutkomposte

Die professionelle Kompostierung ist ein technisch gesteuerter Vorgang, der optimale Rottebedingungen schafft. Hierbei setzen Pilze und Bakterien unter Luftsauerstoff die organischen Materialien zu Humus um. Ein Teil der Materialien wird dabei zu Kohlendioxid und Wasser veratmet und mineralisiert. Das Rotteprodukt ist ein hygienisierter und stabilisierter Kompost. Während der Kompostierung werden Ab- und Umbau des Materials immer weiter verlangsamt, sind jedoch auch im fertigen Kompost noch nicht abgeschlossen, sodass auch nach Fertigstellung und Aufbringung auf den Acker Umsetzungsprozesse stattfinden und gebundene Nährstoffe freigesetzt werden.

Je nach Zusammensetzung und Intensität der Rotte werden im Rahmen der RAL-Gütesicherung Kompost verschiedene Kompostprodukte unterschieden. Unterscheidungskriterien sind u. a. Humusgehalt, Körnung, Rottegrad sowie Nährstoffgehalt. Für die Landwirtschaft haben die nachfolgend genannten Komposte Bedeutung:

⁵ <http://www.vhe.de/kompost/kompostprodukte/kompost/>

Frischkompost ist ein hygienisierter, aber noch nicht vollständig ausgereifter Kompost (Rottegrad II oder III). Die Dauer der Kompostierung beträgt zwei bis sechs Wochen. Frischkompost enthält noch Anteile leicht zersetzbarer organischer Substanz (Nährhumus) und fördert dadurch die mikrobielle Aktivität des Bodens. Bei einer Zersetzung von Frischkompost im Boden werden weitere Nährstoffe freigesetzt. Eine kurzfristige Festlegung von Bodennitrogen ist insbesondere bei stickstoffarmen Frischkomposten möglich. Frischkomposte werden überwiegend zur Bodenverbesserung und Düngung auf Ackerland eingesetzt⁶.

Fertigkompost ist hygienisierter, biologisch stabiler und ausgereifter Kompost (Rottegrad IV oder V). Die Rottedauer beträgt je nach Verfahren rund fünf bis zwölf Wochen. Fertigkompost enthält höhere Anteile an stabilen Humusstoffen, die als Dauerhumus zur Bodenverbesserung beitragen. Darüber hinaus enthält Fertigkompost alle für die Pflanzenernährung wichtigen Haupt- und Spurennährstoffe. Fertigkomposte finden sowohl im Hausgarten sowie Garten- und Landschaftsbau als auch in der Landwirtschaft Verwendung⁷.

Allgemein bestehen Komposte in der Trockensubstanz zu etwa 30 bis 50 % aus organischer Substanz, die insbesondere bei ausgereiften Komposten weitgehend humifiziert und stabilisiert ist, da die leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen während der Kompostierung weitgehend mineralisiert wurden (Lazar & Höke 2011). Schwerer abbaubare Bestandteile werden zudem überwiegend in stabile Huminstoffe überführt. Der mineralische Rest setzt sich aus den stabilen mineralischen Bodenpartikeln Ton, Schluff und Sand zusammen (ca. 50 %), daneben aus mineralischen Nährstoffen und basisch wirksamen Bestandteilen wie Karbonat (ca. 10 %) (Zapf et al. 2013).

Tab. 2 zeigt die wertgebenden Inhaltsstoffe und Eigenschaften von Komposten mit üblichen Schwankungsbereichen.

Der pH-Wert von Kompost liegt aufgrund der mehr oder weniger großen Menge an basisch wirksamen Stoffen generell im schwach alkalischen Bereich. Aufgrund der hohen Gehalte an basisch wirksamen Substanzen und insbesondere organischer Substanz werden Komposte als Bodenverbesserungsmittel eingesetzt (Gutser et al. 2002).

⁶ <http://www.vhe.de/kompost/kompostprodukte/kompost/>

⁷ <http://www.vhe.de/kompost/kompostprodukte/kompost/>

Tab. 2: Eigenschaften und Inhaltsstoffe von Kompost
(Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. 2014)

Parameter	Medianwerte: gütegesicherte Komposte deutschlandweit im Jahr 2014 (N = 3.039)
Nährstoffe gesamt:	
Stickstoff gesamt (N) [% TM]	1,36
Phosphat gesamt (P ₂ O ₅) [% TM]	0,65
Kalium gesamt (K ₂ O ₅) [% TM]	1,15
Magnesium gesamt (MgO) [% TM]	0,71
Nährstoffe löslich:	
Stickstoff CaCl ₂ -löslich (N) [mg/l FM]	239
Ammonium (NH ₄ -N) [mg/l FM]	150
Nitrat (NO ₃ -N) [mg/l FM]	15
Phosphat CAL-löslich (P ₂ O ₅) [mg/l FM]	1.100
Kalium CAL-löslich (K ₂ O) [mg/l FM]	3.479
Physikalische Parameter:	
Rohdichte [g/l FM]	660
Trockenmasse [%]	61,7
Fremdstoffe > 2 mm [% TM]	0,05
Steine > 10 mm [% TM]	0,01
Biologische Parameter:	
Pflanzenverträglichkeit (25 % rel.) [%]	109
Pflanzenverträglichkeit (50 % rel.) [%]	101
Chemische Parameter	
Salzgehalt [g/l FM]*	3,8
pH-Wert	8,4
C/N-Verhältnis	15,8
Bodenverbesserung	
Glühverlust [%]	37,6
Basisch wirksame Stoffe (CaO) [% TM]	4,3
Vorsorgender Bodenschutz	
Blei (Pb) [mg/kg TM]	29
Cadmium (Cd) [mg/kg TM]	0,37
Chrom (Cr) [mg/kg TM]	20,2
Kupfer (Cu) [mg/kg TM]	37,0
Nickel(Ni) [mg/kg TM]	12,6
Zink (Zn) [mg/kg TM]	158
Quecksilber (Hg) [mg/kg TM]	0,09

Wie Tabelle 2 zeigt, enthalten Komposte aber auch eine bedeutende Menge an Nährstoffen, die einen gezielten Einsatz als Düngemittel rechtfertigen. Neben den Gesamt-Gehalten ist dabei die Löslichkeit von besonderer Bedeutung, die einen Anhaltspunkt für die unmittelbare Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe darstellt. Aufgrund unterschiedlicher Bindungsformen und chemischer Reaktionsweisen unterscheiden sich die Nährstoffe sehr stark in ihrer Löslichkeit. Insbesondere Stickstoff ist organisch gebunden sehr stabil und weist nur sehr geringe lösliche Anteile auf. Im Mittel liegt der Kompost-N zu weniger als 5 % in unmittelbar pflanzenverfügbarer Form als Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-) vor. Phosphor ist dagegen zu etwa 35 % und Kalium nahezu vollständig (i. d. R. ≥ 35 %) löslich (im CAL-Extrakt) (Gutser et al. 2002) und (H&K 2006).

In Abhängigkeit der verwendeten organischen Inputmaterialien, der Rottebedingungen und der Stabilität der organischen Substanz (Reife-, Humifizierungsgrad) weisen Komposte eine für sie typische langsame Stickstoff-Mineralisierungsdynamik auf (Amlinger 2003) und (Kluge 2000) (vgl. Abschn. 3.2.4).

Wirkung und Eigenschaften von Kompost

Kompost besitzt sowohl eine Humus- als auch eine Nährstoffwirkung. Daher ist beim Einsatz von Kompost grundsätzlich zwischen einer direkten Wirkung der enthaltenen Nährstoffe und einer indirekten, insbesondere von der organischen Substanz ausgehenden Wirkung auf den Boden und das Pflanzenwachstum zu unterscheiden.

1) Humusproduktion

Aufgrund der hohen Abbaustabilität der mit dem Kompost zugeführten organischen Substanz weisen Komposte die höchsten Humusproduktionsleistungen aller organischen Dünger auf. Ausschlaggebend hierfür ist der stabile Dauerhumusanteil, d. h. die bereits humifizierte organische Substanz. Dieser Anteil liegt bei Fertigungskomposten höher als bei Frischkomposten und deutlich höher als beispielsweise bei Gründüngung.

Komposte bewirken daher in Abhängigkeit von ihrer Ausbringungsmenge eine vergleichsweise starke nachhaltige Humusversorgung bzw. je nach Standort auch eine Humusanreicherung im Boden. Daraus resultiert eine messbare Verbesserung wichtiger bodenbiologischer, -chemischer und -physikalischer Funktionen.

Biologische Bodenparameter:

- nachhaltige Aktivierung des Bodenlebens;
- Verbesserung der „Widerstandsfähigkeit gegen Schadorganismen und physikalische Bodenbelastung;
- verbesserte Bodenfruchtbarkeit.

Physikalische Bodenparameter:

- Lagerungsdichte;
- Porenvolumen;
- Wasserspeichervermögen;
- Wasserdurchlässigkeit;
- Aggregatstabilität.

Chemische Bodenparameter:

- Sorptionskapazität;
- Kationenaustauschkapazität;
- basische Wirkung (hoher Kalkgehalt);
- Nährstoffgehalte und -verfügbarkeit;
- Schadstoffgehalte und -verfügbarkeit.

Nährstoffwirkung

Bei der Beurteilung der Wirkung der im Kompost enthaltenen Nährstoffe muss zwischen einer kurzfristigen Wirkung im Jahr der Kompostanwendung und einer langfristigen, über mehrere Jahre anhaltenden Wirkung unterschieden werden. Wie langjährige Praxisversuche bestätigen, können die Nährstoffe Phosphat (P_2O_5), Kalium (K_2O) und Magnesium (MgO) aus einer Kompostdüngung bei der Düngeplanung vollständig angerechnet werden (Zapf et al. 2013). Stickstoff (N) und Schwefel (S) sind in Kompost überwiegend organisch gebunden und werden erst durch Mineralisierung pflanzenverfügbar. Der pflanzenverfügbare S-Anteil beträgt ca. 8 % des Gesamtschwefelgehalts im Kompost. Der Kompost-N liegt zu ca. 95 % in organisch gebundener Form vor und zeigt eine ausgeprägte Langzeitwirkung.

Im folgenden Kapitel werden der Umsatz und die Dynamik des mit dem Kompost in den Boden eingebrachten Stickstoffs ausführlich dargestellt.

3 STICKSTOFFWIRKUNG, STICKSTOFFDYNAMIK UND AUSWASCHUNG BEI KOMPOSTANWENDUNG

Die Düngewirkung von Kompost ist in Bezug auf Stickstoff häufig mit Unsicherheiten behaftet. Grund hierfür ist der überwiegende Anteil an organisch gebundenem Stickstoff (90 bis 97 %) und dessen Dynamik und Verfügbarkeit im Boden. Bisher dominierten meist bei der mikrobiellen Forschung im Bereich des Stickstoffkreislaufs die anorganischen Prozesse – sodass man über den Abbau von organischem Stickstoff erst relativ wenig weiß“ (Wanek 2015).

Ursache ist die Komplexität der Dynamik des organischen Stickstoffs. Da die organischen Stickstoffverbindungen in relativ großen Molekülen vorliegen, die nicht direkt verfügbar oder löslich sind, müssen diese erst zerkleinert werden und sind demnach sehr stark an mikrobielle Umsetzungen gebunden (Wanek 2015).

Vor dem Hintergrund der im Rahmen der DüV-VE-2014 einhergehenden Änderungen bezogen auf die Kompostdüngung stellt sich die Frage nach den Bindungsverhältnissen und der Mineralisierungsdynamik des mit Kompost in den Boden eingebrachten Stickstoffs.

Nachfolgend werden deshalb die Bindungsverhältnisse und die Mineralisierungsdynamik des mit dem Kompost in den Boden eingebrachten Stickstoffs sowie das N-Auswaschungsrisiko in das Grundwasser dargestellt und erläutert.

3.1 Wege des kompostbürtigen Stickstoffs

Wie in Abb. 2 gezeigt wird, liegt der mit dem Kompost eingebrachte Stickstoff zu 90 bis 97 % in organisch gebundener Form vor und geht mit dem Aufbringen in und auf den Boden in dessen organischen N-Pool (Stickstoffvorrat des Bodens) über. Der übrige mineralische Anteil von ca. 3 bis 10 % aus dem Kompost kann ähnlich wie bei Mineraldünger relativ rasch ohne nennenswerte Verluste von den Pflanzen aufgenommen werden.

Wenn das Umsetzungsverhalten von organischem Kohlenstoff und des darin enthaltenen Stickstoffs bewertet werden soll, sind unterschiedliche Pools organischer Substanz im Kompost zu berücksichtigen (Reinhold 2014). Engels et al. (2010) sowie Körschens et al. (1997) haben diese Pools organischer Substanz in organischen Düngemitteln wie folgt differenziert:

Die organische Primärschubstanz (OPS), die in Form von Kompost in den Boden eingebracht wird, unterteilt sich in die humusreproduktionswirksame OPS und die aktive, leicht abbaubare OPS.

Die aktive, leicht abbaubare OPS wird im Boden überwiegend schnell von den Mikroorganismen mineralisiert und der darin enthaltene Stickstoff für die Pflanzen nachgeliefert. Da die aktive, leicht abbaubare OPS schon während der Kompostierung weitgehend mineralisiert wird, zeichnet sich Kompost durch einen geringen Anteil an leicht abbaubarer OPS (ca. 27 %) aus (Gutser et al. 2002).

Somit bildet die humusreproduktionswirksame OPS mit ca. 73 % den größten Anteil an der Gesamt-OPS im Kompost (BGK 2004).

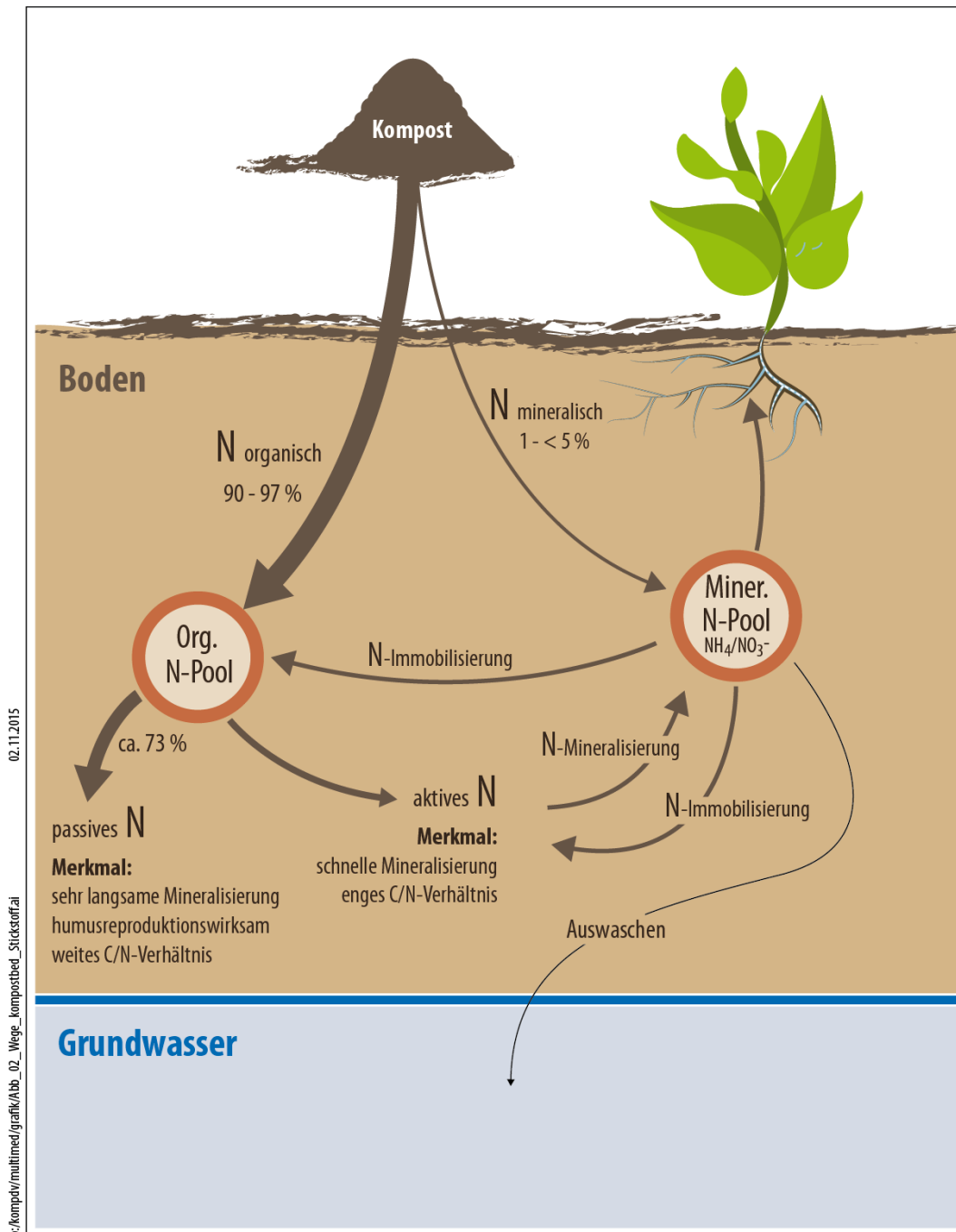


Abb. 2: Wege des kompostbürtigen Stickstoffs
 (eigene Abbildung, ahu AG 2015)

Es werden etwa 73 % des mit dem Kompost aufgebrauchten Stickstoffs bei der Humusreproduktion eingebaut. Der Stickstoff in der humusreproduktionswirksamen OPS ist, wie langjährige Versuche zeigen, im Hinblick auf N-Verlagerungen und Auswaschungen von untergeordneter Bedeutung. Dieser umsatztrage Stickstoff verbleibt über einen langen Zeitraum im Boden, ohne wesentlich in den pflanzenverfügbaren Stickstoffvorrat des Bodens einbezogen zu werden, und

bedingt dadurch die geringe Stickstoffdüngewirkung der Stickstofffrachten aus Kompostmaterial.

Erst nach der Zersetzung der Humusbestandteile kann der darin gebundene Stickstoff freigesetzt werden. Viele Humusmoleküle sind jedoch sehr stabil und können der Zersetzung sogar über Jahrhunderte widerstehen. Erst in den Folgejahren nach der Düngung wird ein Teil des in der organischen Bodensubstanz aufgenommenen Stickstoffs mineralisiert und kann damit ertragswirksam werden. Somit stellt Kompost den Pflanzen über lange Zeiträume kontinuierlich Stickstoff zum Wachstum zur Verfügung.

Gemäß Düngeverordnung muss in den Folgejahren die Stickstoffnachlieferung aus dem Boden angemessen berücksichtigt werden.

Interessant ist, dass der Stickstoff aus dem Kompost eine ähnliche Dynamik wie der Stickstoff aus dem Boden aufweist. Genauso wie aus dem großen Stickstoffpool des Bodens nur geringe Mengen wasserlöslich vorliegen, so beträgt auch der Anteil der löslichen Stickstoffverbindungen am Gesamtstickstoff im Kompost im Mittel nur 5 %. Der übrige Teil des Stickstoffs im Kompost liegt in organisch gebundener Form vor.

Wie sich die humusreproduktionswirksamen Anteile unterschiedlicher organischer Materialien in das Umsetzverhalten der Böden einordnen, wird vor allem durch die Abbaustabilität und das C/N-Verhältnis der organischen Düngemittel bestimmt (Reinhold 2014).

Allgemein gilt: Wenn das Verhältnis Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N) größer als 10 : 1 ist, wird die Immobilisierung (Fixierung) begünstigt und mineralischer Stickstoff in stabile organische Verbindungen umgewandelt. Dabei wird praktisch kein Stickstoff mehr freigesetzt. Erst bei Verhältnissen unter 10 : 1 beginnt die Mineralisierung und somit die Nutzbarwerdung für die Pflanze.

Durch die Aktivität von Mikroorganismen wird demnach Stickstoff aus dem organischen N-Pool nicht nur durch *Mineralisierung* nachgeliefert, sondern umgekehrt wird mineralischer N (NH_4 , NO_3) wiederum durch Mikroorganismen inkorporiert, somit immobilisiert und in den organischen Pool zurückgeführt.

Die unmittelbare N-Wirkung im Jahr der Kompostanwendung ist sehr gering, wie zahlreiche Feldversuche mit verschiedensten Kulturen und auf unterschiedlichsten Standorten bestätigen. Sie beträgt zumeist weniger als 5 % des zugeführten Kompost-Stickstoffs und variiert in Abhängigkeit standort- und kulturspezifischer Einflüsse (Vegetationszeit, Bodenbearbeitung u. a.) in gewissen Grenzen (Gutser et al. 2002 und Kluge 2001).

Da die Pflanzen sich aus dem mineralischen N-Pool (Bodenlösung) ernähren, besteht die Schwierigkeit für den Landwirt darin, die N-Zufuhr nach Menge und Zeitpunkt so zu steuern, dass für die Pflanzenernährung genügend N im mineralischen Pool vorliegt, ohne dass Überschuss verlagert wird und letztlich sogar in das Grundwasser gelangt. Eine zentrale Frage hierbei ist die N-Nachlieferung (Mineralisierung) aus dem organischen N-Pool. Dieser kann auch zu Zeiten der Vegetationsruhe mineralisiert und unterliegt dann potenziell erhöhten Auswaschungsgefahren (s. Abschn. 3.3).

Die geringe N-Wirkung im Anwendungsjahr hat zur Folge, dass mehr als 90 % des Kompoststickstoffs im Boden verbleiben und somit zu einem Anstieg des N-Gehalts im Boden führen (langfristige N-Wirkung). Eine N-Nachlieferung erfolgt langfristig durch die N-Mineralisierung aus der organischen Substanz.

Eine Stickstoffwirkung von Kompost wird somit besonders bei einer Daueranwendung deutlich. Bei einer regelmäßigen und mehrjährigen Anwendung ergibt sich ein Anwachsen des N-Vorrats im Boden mit entsprechend steigenden Mineralisierungsraten. Dieser Vorgang dauert so lange an, bis ein Gleichgewicht zwischen Eintrag durch Kompostdüngung und Austrag durch N-Mineralisierung erreicht ist. Der N-Vorrat im Boden steigt dann nicht weiter an (Zapf – aid heft et al. 2013).

3.2 Stickstoffnachlieferungspotenzial aus Kompost

Durch die überwiegend organische Bindung des Stickstoffs (> 90 bis 97 %) in verschiedenen Fraktionen der organischen Substanz spielt die direkte Stickstoff(dünge)wirkung bei Kompost eine untergeordnete Rolle. In Abhängigkeit der verwendeten Rohstoffe, der Rottebedingungen und der Stabilität der organischen Substanz (Reife-, Humifizierungsgrad) weisen Komposte eine für sie typische langsame Stickstoff-Mineralisierungsdynamik auf (Amlinger 2003).

Die Intensität der Mineralisierung ist von der Temperatur, Durchlüftung, Wasserführung, organischen Substanz, Kompostart und -eigenschaften (u. a. C/N-Verhältnis) sowie Aufbringungstechnik, Bodenbearbeitung und Witterung abhängig (Lazar et al. 2012). Desweiteren kann die Fruchtfolge durch Zwischenfrucht oder Folgekulturen so gestaltet werden, dass die Gefahr der N-Auswaschung minimiert wird (Zapf – aid heft et al. 2013).

Die Faktoren, die einen Einfluss auf die Mineralisierung und damit Freisetzung von pflanzenverfügbarem N haben, werden im Folgenden dargestellt.

3.2.1 Einflussfaktoren Boden

Organisch gebundener Stickstoff wird erst pflanzenverfügbar, nachdem er durch im Boden lebende Mikroorganismen umgesetzt wurde. Dabei werden Eiweiß und Aminosäuren aus der organischen Substanz zunächst in Ammonium (NH_4^+) umgewandelt. Dieses wird durch Bakterien zu Nitrat (NO_3^-) oxidiert (Riedel et al. 2007). Optimale Bedingungen für die Mineralisation herrschen:

- in gut belüfteten Böden (z. B. nach Bodenbearbeitung),
- bei Bodentemperaturen um 25 bis 30 °C,
- bei pH-Werten zwischen 6 bis 8,
- bei ausreichender Feuchtigkeit,
- bei der Bodenart „Sand“,

- bei Vorhandensein von organischer Substanz,
- bei einem C/N-Verhältnis von < 10.

Die mikrobielle Aktivität wird durch die Belüftung des Bodens über den O₂- und CO₂-Gehalt unmittelbar beeinflusst. Entsprechend dem O₂- und CO₂-Gehalt von Böden bilden sich aerobe bzw. anaerobe Prozesse im Boden aus. Die Reaktionsgleichungen der Nitrifikation zeigen die Abhängigkeit von der Durchlüftung des Bodens bezüglich des damit verbundenen O₂-Gehalts an.

Die **Bodentemperatur** hat entscheidenden Einfluss auf alle chemischen und biochemischen Prozesse im Boden (z. B. Mineralisierung), da alle Lebensvorgänge durch die Zufuhr von Wärmeenergie beschleunigt werden. Die Abhängigkeit der physiologischen Prozesse von der (Boden-)Temperatur folgt dabei einer Optimumkurve mit Temperaturminimum (= untere Grenze für das Einsetzen der Prozesse, ca. 0 bis 5 °C), Temperaturoptimum (= optimale Intensität, ca. 20 bis 30 °C) und Temperaturmaximum (= obere Grenze für die Aufrechterhaltung der Prozesse, 40 bis 50 °C).⁸ Der größte Teil der Mikroorganismen hat sein Temperaturoptimum bei 10 bis 35 °C. Bodenatmung und Nitrifikation erreichen ihren Optimalwert bei etwa 26 °C.

Die Nitrifikation wird bei Temperaturen unter 12 °C verlangsamt, bei Temperaturen unter 5 °C findet keine Nitrifikation mehr statt (Scheffer & Schachtschabel 2003).

Der **pH-Wert** bestimmt die Milieubedingungen für Mikroorganismen und ist damit bestimmend für die Aktivität der Mikroorganismen. Grundsätzlich werden Bakterien durch ein neutrales bis leicht alkalisches Milieu gefördert. Pilze bevorzugen hingegen neutrale bis saure Bereiche. Nach Domsch (1992) nimmt die mikrobielle Biomasse von einem leicht alkalischen Milieu zu einem sauren Milieu ab. Die mikrobielle Umwandlung von Ammonium in Nitrat fand bei Paul & Clark (1996) im Labor in Testböden bei pH-Werten < 6 nicht statt, während bei Freilandversuchen in sauren Waldböden eine mikrobielle Aktivität noch bei einem pH-Wert von 4 zu beobachten war.

Generell geht man in der Literatur von einer Hemmung der Nitrifikation bei pH-Werten kleiner 4 aus. In einem pH-Bereich von 6 bis 9 gleichen viele Bakterien kleinere pH-Schwankungen durch ihr zelleigenes Puffersystem aus. Das Maximum der Nitrifikationsrate wird bei einem pH-Wert zwischen 6 und 8 angegeben (Scheffer & Schachtschabel 2003).

Die **Feuchtebedingungen** gelten neben pH-Wert, Temperatur und Belüftung als eine der wichtigsten abiotischen Steuergrößen für biochemische Stoffumsätze in Böden. Prinzipiell weisen Wassergehalt und Mikroorganismen-Aktivität im Boden einen stark positiven Zusammenhang auf. Als optimaler Feuchtebereich für Mikroorganismen und somit für bakterielle Bodenatmung und Nitrifikation wird der Bereich der Feldkapazität (FK) angegeben. Bei Wassergehalten über Feldkapazität sinkt die Aktivität mit steigendem Wassergehalt aufgrund limitierter O₂-Verfügbarkeit. Um ihre Aktivität aufrechtzuerhalten, sind die Bodenmikroorganismen auf einen minimalen Wassergehalt angewiesen. Trockenstress im Sommer

⁸ <http://hypersoil.uni-muenster.de/0/05/05.htm>

führt zu einer Reduktion der mikrobiellen Aktivität und damit zu stark erniedrigten Raten der N-Mineralisation. Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungszyklen resultieren in einer Stimulation von C- und N-Mineralisation und damit einer kurzfristigen erhöhten Stoffdynamik (Fürst 2007).

Durch das hohe Porenvolumen kommt es in Sandböden zu größeren Mineralisationsraten und der Abbau organischer Substanz verläuft schneller. In Ton- und Schluffböden wird hingegen die organische Substanz durch Einlagerung und Bindung an Tonminerale und Sesquioxide sowie durch häufiger auftretende anaerobe Zustände im Abbau gehemmt.

Mikroorganismen benötigen für ihr Wachstum **organische Substanz** als Substrat- und Energiequelle. Nach Domsch (1992) liegt der optimale Bereich des mikrobiellen Abbaus bei einem Gehalt von 1,5 bis 3,5 % organischer Substanz. Die Ursache für den geringen Abbau bei Gehalten unter 1,5 % Anteil an organischer Bodensubstanz liegt vor allem in der geringen Biomasse, die für den Abbau zur Verfügung steht.

Neben der Menge an organischer Substanz spielt das C/N-Verhältnis eine entscheidende Rolle für die mikrobielle Aktivität.

Die Umsetzung von Kohlenstoff ist eng mit der Umsetzung des Stickstoffs verbunden. Das C/N-Verhältnis im Boden kennzeichnet das Stickstoffnachlieferungsvermögen aus der organischen Substanz. Das C/N-Verhältnis bestimmt die Richtung des Transformationsprozesses. Bei einem C/N-Verhältnis < 10 überwiegt die Mineralisierung des organisch gebundenen Stickstoffs, bei einem C/N-Verhältnis > 10 überwiegt die Immobilisierung. Grundsätzlich ist die Mineralisierung umso größer, je enger das C/N-Verhältnis ist (Amlinger 2003).

Insgesamt wirken sich die hier beschriebenen Einzelfaktoren nicht nur allein auf die mikrobielle Aktivität von Böden und somit auf deren Mineralisierungsrate aus, sondern insbesondere die Beziehungen der Einzelfaktoren untereinander.

3.2.2 Einflussfaktoren Kompost

Kompost-Qualitätsparameter wie Rottegrade

Die Verrottung ist ein natürlicher Zersetzungsprozess, der bei organischen Materialien unter günstigen Bedingungen spontan einsetzt. Die professionelle Kompostierung ist ein technisch gesteuerter Vorgang, der unter Sauerstoff vor allem durch Bakterien und Pilze die organischen Materialien zu Humus umbaut. Je länger der Kompostierungsprozess fortschreitet, desto höher ist der Rottegrad und desto höher ist der Anteil an stabilen Humusstoffen.

Stickstoff (-Fraktionen) im Kompost

Im Mittel aller untersuchten RAL-gütesicherten Kompostprodukte deutschlandweit liegt der Gesamtstickstoffgehalt bei 1,36 % in der Trockenmasse und 0,84 % bezogen auf die Frischsubstanz (FS). Bezogen auf das Volumen bedeutet das, dass ein Kubikmeter Kompost 5,5 kg Stickstoff enthält (BKG 2014).

In organischen Düngern liegt Stickstoff in löslicher Form, in leicht abbaubarer organisch gebundener und in schwer abbaubarer organisch gebundener Form vor (vgl. Abb. 3). Der lösliche Anteil an Stickstoff kann direkt von den Pflanzen aufgenommen werden. Komposte weisen die geringsten Anteile an löslichem Stickstoff auf, Gärprodukte die höchsten.

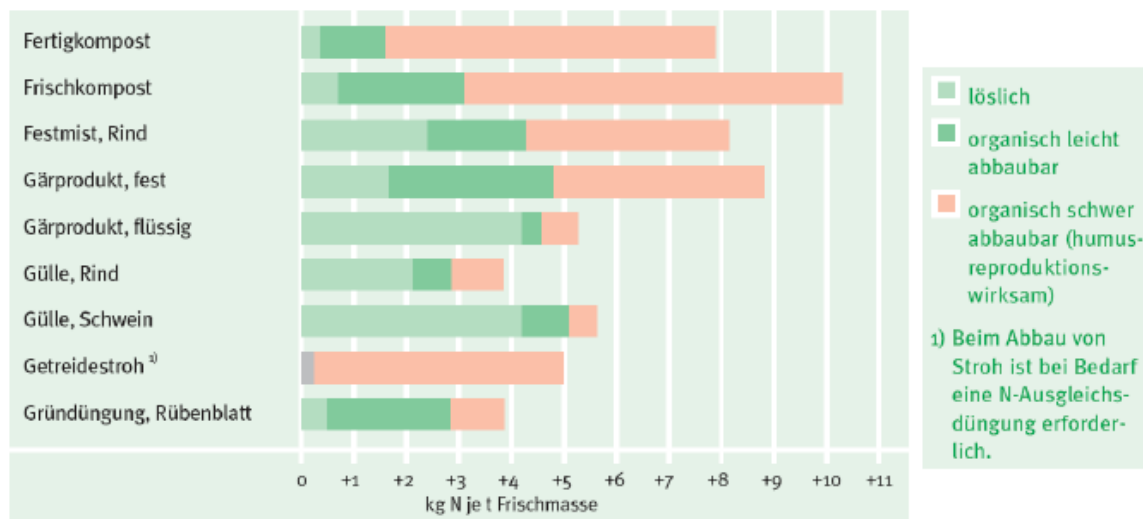


Abb. 3: Stickstoffgehalte unterschiedlicher Düngemittel (BGK 2006)

C/N-Verhältnis im Kompost

Einen für alle Komposte unabhängig vom Rottegrad gut geeigneten Parameter stellt der C/N-Quotient dar. Neben einer Unterscheidung von N-liefernden und N-immobilisierenden Komposten erlaubt er auch die Abschätzung der im Anwendungsjahr zu erwartenden N-Verfügbarkeit.

Wird dem Boden organisches Material mit relativ geringen Stickstoffgehalten zugeführt, entziehen die im Boden lebenden Bakterien den anorganischen Stickstoff aus der Bodenlösung und verwenden diesen zum Aufbau körpereigener organischer Substanz. In diesem Fall spricht man von einer „N-Fixierung“, da den Pflanzen aufgrund der intensiven Zersetzungsprozesse vorübergehend kein pflanzenverfügbarer Stickstoff zur Verfügung steht. In Frischkomposten können Pflanzenreste, die nur teilweise oder gar nicht kompostiert sind, eventuell zu einer vorübergehenden Festlegung des verfügbaren Stickstoffs im Boden führen. In stickstoffreichen Materialien ist diese Stickstofffixierung zu vernachlässigen (Zapf – aid heft et al. 2013). Bei einem C/N-Verhältnis < 10 überwiegt die Mineralisierung des organisch gebundenen Stickstoffs, bei einem C/N-Verhältnis > 10 überwiegt die Immobilisierung.

Das C/N-Verhältnis von Kompost variiert zwischen 14 bis 18 und somit im mittleren Bereich verglichen mit Böden (ca. 10) (UBA 2012). Entsprechend der Auswertung der gütegesicherten Kompostauswertung 2014 liegt der Mittelwert bei 15,8 (BGK 2014).

Biogutkomposte weisen, von wenigen Ausnahmen mit hohen Holzanteilen abgesehen, bereits zu Beginn der Rotte C/N-Quotienten kleiner 20 und im ausgereiften Zustand (Fertigkompost) kleiner 15 auf. Dagegen streuen C/N-Quotienten

frischer Grüngutkomposte wesentlich stärker bis hin zu Werten von 30 und darüber (Gutser et al. 2002). Wie die Auswertung der gütegesicherten Komposte der BGK im Jahr 2014 zeigen, ist auch im ausgereiften Zustand das C/N-Verhältnis von Grüngutkomposten zumeist deutlich höher (17,7) als von Biogutkomposten (14,9).

3.2.3 Einflussfaktoren Kompostausbringung

Mikroorganismen und Pflanzenwurzeln konkurrieren im Boden um Stickstoff, der in der Regel den begrenzenden Wachstumsfaktor darstellt. Grundsätzlich empfiehlt sich eine flache Einarbeitung (maximal 5 bis 10 Zentimeter) mit mischenden Bodenbearbeitungsgeräten, um die zügige Umsetzung zu fördern. Strategien, mit denen der Kompost möglichst nahe an die Wurzeln platziert wird, bringen daher Vorteile bezüglich einer etwas höheren N-Ausnutzung.

Durch die oberflächige Ausbringung ohne weitere Einarbeitung kommt es aufgrund des geringen Bodenkontakts zu einer geringeren Immobilisation und damit zu einer höheren Ausnutzungsrate (s. Tab. 3).

Tab. 3: Durchschnittliche Ausnutzung von Bioabfallkompost-N (Gutser et al. 2002)

Boden: Lu / Kultur: Mais		
Applikationstermin	Einarbeitung	N-Ausnutzung (%)
Herbst	Pflug (bis 25 cm)	0,6
Frühjahr, zur Saat	mit Saatbeetbereitung	5,2
Frühjahr, nach Saat	ohne Einarbeitung (Mulch)	9,0

Die N-Ausnutzung ist hierbei im Frühjahr nach der Saat am höchsten. Praxisgerecht ist die Ausbringung von Komposten nach der Maissaat jedoch nicht. Entscheidend für den Ausbringungszeitpunkt sollte auch immer die Befahrbarkeit der Böden sein. Im Sinne des Bodenschutzes sollte der Boden nur im trockenen oder gefrorenen Zustand befahren werden.

3.2.4 Einflussfaktoren N-Mineralisierungsraten von Kompost-Stickstoff

Die Mineralisierungsrate von Stickstoff ist stark variabel und durch vielfältige komplexe Prozesse beeinflusst. Neben den bereits genannten Bedingungen wie z. B. C/N-Verhältnis, Rottegrad und Bodenbearbeitung zählen auch Faktoren wie die Witterung und ihre Auswirkungen auf Bodentemperatur und Wassersättigung des Bodens.

Für die Beurteilung der Stickstoff-Freisetzung bei Kompostdüngung ist eine standortgemäße dynamische Betrachtungsweise notwendig. Für jeden Standort stellt sich abhängig von der Bewirtschaftungsintensität ein ihm eigener Humusgehalt und standorttypisches C/N-Verhältnis ein.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts wurde eine Literaturrecherche zur N-Nachlieferung durch Mineralisierungsprozesse durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Zusammenfassend werden nachfolgend die düngewirksamen N-Anteilen der N-Gesamtzufuhr differenziert nach einer kurzfristigen und einer langfristigen N-Verfügbarkeit dargestellt:

Kurzfristige N-Verfügbarkeit

Nur 0 bis 5 % des Stickstoffgesamtgehalts der ersten Kompostgabe sind im Mittel kurzfristig düngewirksam (d. h. nach erstmaliger Kompostgabe und für Zeiträume von ein bis drei Jahren) anrechenbar (Zapf – aid heft et al. 2013).

Mittelfristige N-Verfügbarkeit

Bei regelmäßigen Kompostgaben ab dem 4. bis 12. Jahr (ab 2 Fruchtfolgerotationen) sind höhere N-Ausnutzungsraten von jährlich 5 bis 8 % der jeweils letzten Gabe düngewirksam anrechenbar. Maximale N-Verfügbarkeiten liegen bei etwa 15 bis 20 % der letzten Gabe. Diese werden unter günstigen Voraussetzungen, z. B. bei entzugsstarken Fruchtarten (Gemüse, Silomais o. ä.), umsatzstarken Standorten sowie Komposten mit guter N-Verfügbarkeit (z. B. durchgerotteter Biogutkomposte) erreicht (Zapf – aid heft et al. 2013). In Fällen geringer N-Mineralisierung, also bei Grüngut- und Frischkomposten, sind jedoch nicht mehr als 5 % der N-Zufuhr anzurechnen, um eine unzureichende N-Versorgung der Pflanze infolge einer möglichen N-Immobilisierung und dadurch bedingte Ertragseinbußen zu vermeiden (Zapf – aid heft et al. 2013).

Um das Ausmaß der N-Mineralisierung verabreichter Kompostgaben – neben den in Tab. 4 genannten Ausnutzungsraten – in der Größenordnung abschätzen zu können, eignen sich nach Timmermann et al. (2003) der N_{\min} -Gehalt des Bodens und die lösliche N-Fracht des Komposts. Der N_{\min} -Gehalt liefert allerdings nur eine Momentaufnahme der löslichen N-Fracht. Die lösliche N-Fracht kann mit Hilfe der N_{\min} -Gehalte beispielsweise auf leichten Böden mit starker Auswaschungstendenz nicht im ganzen Ausmaß erfasst werden (Amlinger et al. 2003). Dagegen ist die lösliche N-Fracht des Komposts in % der N_{tot} -Fracht, die die gleiche Größenordnung aufweist wie die mittelfristige N-Ausnutzung, als grober Indikator geeignet.

Bei der jahresweisen Bilanzierung muss bei dem Prozess der Mineralisierung organischer Bodenbestandteile eine Nettomineralisierung betrachtet werden. Große Teile des mineralisierten Stickstoffs werden unter Umständen direkt wieder durch Mikroorganismen über den Weg der Immobilisierung in den organischen Stickstoffpool transferiert.

Tab. 4: Literaturzusammenstellung: Düngewirksamer Stickstoff aus Kompost in % der Gesamt-Stickstoffzufuhr (N-Mineralisierungsraten)

Mineralisierungsrate des Gesamtstickstoffs im <u>Anwendungsjahr</u>	Mineralisierungsrate des Gesamtstickstoffs im <u>2. Jahr</u>	Mineralisierungsrate des Gesamtstickstoffs im <u>3. Jahr</u>	Mineralisierungsrate des Gesamtstickstoffs <u>weitere Jahre</u>	Bemerkung	Autor
15 %	8 %	3,5 %		Nach ca. 30 bis 50 Jahren ist bei kontinuierlicher Kompostaufbringung die jährliche N-Mineralisierung eines Kompostdüngesystems ($100 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) einem mineralischen Düngesystem gleichzusetzen.	Gutser 1999
5 bis 15 %	2 bis 8 %				Amlinger et al. 1999
5 bis 8 %					Zapf – aid heft et al. 2013
5 bis 15 %				In Abhängigkeit vom Mineralisierungsgrad des Komposts (C/N-Verhältnis) kann es auch zur N-Immobilisierung oder höheren unmittelbaren N-Ausnutzung kommen.	Gutser 1998
50 %	2 bis 4 %			In einem Feldversuch wurde ein Wirkungsgrad von bis zu 50 % festgestellt. Voraussetzung hierfür war jedoch ein Standort mit hohen Bodenbonitäten und sehr günstige klimatische Voraussetzungen bei optimierter Fruchtfolgegestaltung und Bodenbewirtschaftung. In den Folgejahren sinkt die N-Ausnutzung im Mittel auf 2 bis 4 % des im Boden verbliebenen Kompost-N.	Gutser 1998
5 bis 10 %					Scherer et al. 2008
10 %					Schaaf 1994
5 % N_{min} und 5 % N_{org}				Anrechenbarer Stickstoff zum Zeitpunkt der Anwendung wird berechnet aus dem Anteil des löslichen Stickstoffs zzgl. 5 % vom organisch gebundenen Stickstoff. Ausweisung des anrechenbaren Stickstoffs in den Prüfdokumenten der RAL-Gütesicherung Kompost.	BGK 2004

Mineralisierungsrate des Gesamtstickstoffs im <u>Anwendungsjahr</u>	Mineralisierungsrate des Gesamtstickstoffs im <u>2. Jahr</u>	Mineralisierungsrate des Gesamtstickstoffs im <u>3. Jahr</u>	Mineralisierungsrate des Gesamtstickstoffs <u>weitere Jahre</u>	Bemerkung	Autor
2,6 % (Mittel der Minimalwerte) und 10,7 % (Mittel der Maximalwerte)				in Mischungen mit leichten, sandigen Böden höhere Mineralisierungsraten als bei Verwendung tonhaltiger Böden	Amlinger et al. 2003
10 %	5 %	3 %		bezieht sich auf schnell mineralisierbare organische Substanzen	Döhler et al. 1996
10 %	2 bis 3 %	2 bis 3 %	2 bis 3 %		Peretzki 1994
Zeitspannen					
Insgesamt 12 bis 20 % nach etwa 8 Jahren.					Berner 1999
Insgesamt 12 bis 20 % nach etwa 8 Jahren.					Aichberger & Wimmer 1999
0,3 bis 14 % im Durchschnitt von 6 Jahren bei jährlicher Kompostanwendung (Gesamtmittel: 7 %)					Dreher et al. 2011
Kurzfristig bei erstmaliger Kompostgabe, bis zum 3. Jahr maximal 5 %; im Mittel 3 %; mittelfristig bei regelmäßiger Kompostgabe werden bei einem Dreijahresturnus etwa 20 bis 35 % der N-Zufuhr einer Kompostgabe düngewirksam.					Kluge et al. 2008
Die N-Zufuhr mit den Kompostgaben wird anfangs nur in ganz geringem Maße, mit steigender Anwendungsdauer aber zunehmend besser düngewirksam. Kurzfristig, d. h. nach einer Kompostanwendung von ein bis drei Jahren, ist der anrechenbare Stickstoff-Anteil mit maximal 5 % noch vernachlässigbar gering. Mittelfristig sollte die N-Ergänzungsdüngung aus Vorsorge jedoch im Mittel um 10 %, bei Einbeziehung der leicht erhöhten löslichen Nitratanteile im Boden um etwa 15 % reduziert werden. Dabei sind in Abhängigkeit von der Kompostart bis zu 25 % (N-reiche Biokomposte) möglich.					Kluge 2000

3.3 Wirksystem Boden – Grundwasser

Der Boden besitzt mit seinen überwiegend negativ geladenen Bodenteilchen (Humus, Tonminerale) eine gute Adsorptionsfähigkeit für positiv geladene Teilchen (Kationen). Für Stoffe mit negativer Ladung (Anionen) – zu denen auch Nitrat gehört – existiert hingegen nur eine sehr beschränkte Neigungen zur Anlagerung. Nitrat wird als Anion nicht an feste Bodenbestandteile gebunden, sondern nur durch den Einbau in die Körpersubstanz von Pflanzen, Pilzen, Bakterien und Tieren aus der Bodenlösung entnommen. Da der Boden über keine Depotmöglichkeit für Nitrat verfügt, führt ein N-Überschuss in jedem Fall zu einer Grundwasserbelastung mit Nitrat (Haberer et al 1996).

Durch den Austrag von Stickstoff in Grund- und Oberflächengewässer kann es dort zu einer unerwünschten Eutrophierung kommen. Diese kann zu Schäden an der Flora des betroffenen Ökosystems führen und dadurch wirtschaftliche Schäden verursachen (Lazar et al. 2012).

In Wassergewinnungsanlagen wird beobachtet, dass der Nitratgehalt des Wassers insbesondere in den letzten beiden Jahrzehnten zugenommen hat (regional jährlich um 1 bis 1,5 mg (NO₃/l) und teilweise den zulässigen Grenzwert von 50 mg NO₃/l bereits überschreitet. Die Nitratgehalte im Grundwasser hängen auf den meisten Standorten mit der aus den Böden ausgewaschenen Stickstoffmenge zusammen. Die Auswaschung von N erfolgt in der Regel als Nitrat, nur in besonders sorptionsschwachen Böden kann die Auswaschung von Ammonium Bedeutung erlangen (Amlinger et al. 2006).

Da Nitrat als sehr schwach sorbierende Verbindung der Wasserbewegung im Boden folgt, sind die Verlagerung und Auswaschung von Boden-N im Wesentlichen das Produkt der Faktoren

- Sickerwasserbildung und
- Nitratkonzentration der Bodenlösung,

wobei die Nitratauswaschung sehr stark vom zeitlichen Zusammenwirken beider Faktoren abhängt (Amlinger et al. 2006).

Als Ergebnis dieser Prozesse enthalten Böden im Frühjahr sehr unterschiedliche Mengen an Nitratstickstoff. Der zu Vegetationsbeginn in der von den Wurzeln erreichbaren Bodenschicht vorhandene Mineralstickstoff (N_{min}) wird im Regelfall von den Pflanzen aufgenommen und unterliegt damit unter normalen Witterungsbedingungen bei Böden mit guter Wasserspeicherfähigkeit nicht der Auswaschung. Dies gilt ebenfalls für mineralischen Stickstoffdünger, sofern die Düngermenge dem N-Bedarf der Pflanze und dem N-Angebot des Bodens angepasst wird (LWK NI 2006).

Unter besonderen Rahmenbedingungen besteht jedoch auch im Frühjahr die Gefahr, dass ein Teil des im Frühjahr vorhandenen N_{min}-Vorrats ausgewaschen wird – insbesondere bei Pflanzenarten, die Stickstoff erst sehr spät aufnehmen (z. B. Mais, Zuckerrüben, Möhren) und die auf Böden mit geringer Wasserspeicherfähigkeit wachsen. Bei einer bedarfsgerechten Düngung enthält der Boden normalerweise zum Ende der Vegetationsperiode im Herbst keine nennenswerten Nitratmengen mehr.

3.3.1 Ursachen für Nitratauswaschung aus dem Boden

Nitratmenge zu Beginn der Auswaschungsperiode

Die folgende Tabelle 5 listet mögliche Ursachen des Auftretens von beträchtlichen Mengen an besonders auswaschunggefährdetem Nitrat im Boden zu Winteranfang auf.

Tab. 5: Einflussgrößen der Nitratverlagerung (Parameter N-Menge)
(modifiziert nach LWK NI 2006 und Amlinger et al. 2006)

Einflussgröße	Merkmal / Bemerkung	hohe Nitratverlagerung durch:
Düngung	zu hohe oder nicht zeitgerechte mineralische bzw. organische N-Düngung	<ul style="list-style-type: none"> • sehr späte Düngung • hohe Einzelgaben
	je nach Pflanzenart werden dem Boden mit den Ernterückständen bis zu 180 kg N/ha zugeführt – oft in einer rasch mineralisierbaren Form (enges C/N-Verhältnis)	<ul style="list-style-type: none"> • großer Mengen stickstoffreicher Ernterückstände (rasche Mineralisierung)
Bewirtschaftungsmaßnahmen	Intensität	<ul style="list-style-type: none"> • häufiges Pflügen, intensive Lockerung
Pflanze	Beeinträchtigung der Stickstoffaufnahme der Pflanze z. B. durch Trockenheit, Krankheiten oder Schädlingsbefall	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Pflanzenbedeckung und -Vitalität
	Anbau von Pflanzen, die einen hohen N_{\min} -Rest zum Erntetermin im Boden hinterlassen, z. B. bei Gemüse, das in der Hauptwachstumsphase geerntet wird. Wegen des bis kurz vor dem Erntetermin hohen täglichen Stickstoffbedarfs wird ein optimaler Ertrag nur erreicht, wenn bis zum Schluss genügend Nitrat im Wurzelbereich vorhanden ist.	<ul style="list-style-type: none"> • Gemüseanbau
	Anbau schwach zehrender Pflanzenarten (kurze Vegetationszeit + geringe N-Ausnutzung)	<ul style="list-style-type: none"> • z. B. Stiefmütterchen, Feldsalat und manche Obstgehölze • Diese langsam wachsenden Pflanzenarten nutzen wegen ihres geringen N-Bedarfs oft nicht einmal die aus der Mineralisierung laufend freigesetzten N-Mengen
	Anbau flach wurzelnder Kulturen	<ul style="list-style-type: none"> • Bsp.: Kopfsalat und Erbsen = 30 cm • Nitrat, das zu Kulturbeginn in tiefere Bodenschichten verlagert ist, kann von flach wurzelnden Kulturen nicht erreicht werden
	Anbau von Pflanzen, durch deren Ernterückstände relativ hohe N-Mengen vor der Winterperiode auf dem Feld verbleiben	<ul style="list-style-type: none"> • Bestandsschluss relativ spät im Frühjahr • erhöhte Versickerung

Nitratverteilung zu Beginn der Auswaschungsperiode

Die Nitratverteilung im Bodenprofil beeinflusst die Auswaschung, da bei hohen Nitratgehalten im Unterboden bereits geringe Sickerwassermengen zu Nitratverlusten führen. Versuche der Landwirtschaftskammer Niedersachsen zeigen, dass in speicherfähigen Böden unter sonst gleichen Bedingungen das im Oberboden enthaltene Nitrat im Laufe des Winters nur in tiefere Bodenschichten verlagert wird, jedoch pflanzenverfügbar bleibt. Das im Unterboden bereits vorhandene Nitrat wird dagegen während der Vegetationsruhe im Winter aus der nutzbaren Schicht weitgehend ausgewaschen. Welche Parameter die Nitratverteilung beeinflussen, ist im Folgenden zusammengefasst.

Tab. 6: Einflussgrößen der Nitratverlagerung (Parameter N-Verteilung und N-Mobilität) (modifiziert nach LWK NI 2006 und Amlinger et al. 2006)

Einflussgröße	Erläuterung	hohe Nitratverlagerung durch:	weitere Einflussgrößen
Niederschläge	Höhe und Verteilung der Niederschläge einschließlich der Beregnung	hohe Sickerwasserraten	geringes Wasserspeichervermögen <ul style="list-style-type: none"> • Bodenart • Humusgehalt
Evapotranspiration ⁹	Schwerpunkt der Sickerwassermenge liegt im Winterhalbjahr, weil im Sommer die Wasserverbrauch und die Verdunstung über Pflanzen überwiegt	geringe Evapotranspiration	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Luftfeuchte • Pflanzenart • Blattoberfläche • Bodenart • Oberflächenrauigkeit
Boden	Eine Nitratverlagerung um 30 cm erfordert: - bei Lößböden (33 % FK) = 100 mm Niederschlag, - bei lehmigen Sanden (20 % FK) = 60 mm Niederschlag, - bei Sandböden (10 % FK) = 30 mm Niederschlag. (LWK NI 2006)	geringe Wasserspeicherefähigkeit des Bodens	<ul style="list-style-type: none"> • Bodenart • Lagerungsdichte • Humusgehalt • Gefügegehalt • Profiltiefe • Oberflächenrauigkeit • Porenvolumen • wenige Makroporen
Grundwasserflurabstand	bei geringem Grundwasserflurabstand kann es durch kapillaren Aufstieg zu Aufstieg des Nitrats kommen	geringer Grundwasserflurabstand	

⁹ Differenz zwischen Niederschlag und Sickerwasser

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass Standorte mit flachgründigen, sandigen und grundwasserfernen Böden, hohen Niederschlägen und geringer Evapotranspiration besonders problematisch hinsichtlich der Höhe und zeitlichen Verteilung der Sickerwasserbildungen sind. Darüber hinaus spielen das zeitliche Zusammenspiel mit klimatischen Faktoren und Vegetationsphase bzw. die pflanzenbaulichen Maßnahmen eine wichtige Rolle (LWK NI 2012). So kann auf einem stark sandigen Standort vor allem in Gegenden mit mittleren und höheren Niederschlägen (> 600 mm) davon ausgegangen werden, dass das im Zeitraum von August bis November in den Boden gelangende oder vorhandene Nitrat vollständig über die Winterperiode ausgewaschen wird. Die Wirkung von Zwischenfrüchten ist positiv anzusehen, dagegen sind Sonderkulturen einschließlich Feldgemüse auf Sandböden als besonders problematisch einzustufen (Amlinger et al. 2006).

3.3.2 N-Auswaschung aus Böden mit Kompostanwendung

Grundsätzlich verlieren alle Böden, auch solche unter natürlicher Vegetation, geringe Nitratmengen in das Grundwasser. Es herrscht also auch bei nichtgedüngten Böden ein standortspezifischer Grundaustrag vor. Für Sandböden liegt dieser Grundaustrag beispielsweise bei 30 kg N ha/a Nitratauswaschung (bei 200 mm Grundwasserneubildung) entsprechend einer Konzentration von ca. 15 mg Nitrat pro l. Ähnlich geringe Werte wurden auch auf hoch gedüngten Flächen unter Berücksichtigung geeigneter Anbaustrategien (z. B. Zwischenfruchtanbau) erreicht (Amlinger 2006).

Ackerstandorte sind generell stärker von N-Auswaschung betroffen als andere Standorte (z. B. Grünland, Böden unter Wald). Begründet ist dies durch die hohen Nitratbestände nach der Ernte und die besonders hohe N-Mineralisierung aus Boden-N oder N-reichen Ernterückständen infolge intensiver Bodenbearbeitung.

Durch die Zufuhr von Kompost in den Boden sind Erhöhungen der Konzentration der organischen Substanz und des darin enthaltenen Stickstoffs zu erwarten. Daher ergibt sich die Frage nach kurz- und mittelfristig auftretenden Auswirkungen von praxisüblichen Anwendungsmengen auf den Boden sowie möglichen Nitrateinträgen in das Grundwasser.

Durch die überwiegend organische Bindung des Stickstoffs in verschiedenen Fraktionen der organischen Substanz des Komposts spielt die direkte Stickstoffdüngung durch Kompost nur eine untergeordnete Rolle. Der organische Stickstoffanteil, der im Kompost mit ca. 95 bis 97 % überwiegt, geht vorerst in den N-Pool des Bodens und wird nur langsam in den Folgejahren nachgeliefert. Im Unterschied dazu sind z. B. Mineraldünger, aber auch Jauche und Gülle schnell wirksame Dünger, d. h. der enthaltene Stickstoff ist entweder unmittelbar oder durch rasche Mineralisierung zu einem höheren Anteil in kurzer Zeit pflanzenverfügbar und damit auch auswaschungsgefährdet.

Daher ist die Frage der potenziellen Stickstoffauswaschung anders als bei schnell wirksamen N-Düngern zu bewerten. Komposte weisen im Vergleich zu Mineraldüngern oder auch Jauche und Gülle eine andere bzw. deutlich langsamere Zeit-Wirkungsdynamik von Stickstoff auf.

Lazar et al. 2012 ist zu entnehmen, dass die Transformation des organischen Stickstoffs zu Nitrat zwar erst durch die Tätigkeit von Mikroorganismen stattfindet, ohne den N-Entzug durch Pflanzen oder bei ungünstigen Witterungsverhältnissen besteht jedoch auch hier die Gefahr von Verlusten durch Auswaschung des mineralisierten Stickstoffs und damit der Eintrag in Gewässer. Überhöhte Gehalte an organischer Bodensubstanz, insbesondere mit einem engen C/N-Verhältnis können somit zu einer potenziellen Grundwassergefährdung durch Nitratfreisetzung beitragen.

Durch Abbau- und Umwandlungsprozesse wird das C/N-Verhältnis immer enger. Wessolek et al. 2006 ist zu entnehmen, dass ab einem C/N-Quotienten von < 20 bei der Umsetzung der organischen Substanz mehr Stickstoff freigesetzt wird, als die Mikroorganismen für ihren Baustoffwechsel benötigen, sodass es zur Auswaschung von Nitrat in das Grundwasser kommen kann. Oberhalb dieses Wertes nehmen die Mikroorganismen in der Regel den Stickstoff aus der Bodenlösung auf, der dann nicht mehr ausgewaschen werden kann (N-Immobilisierung).

Die N-Nachlieferung ist vorwiegend bestimmt über C_{tot} - und N_{tot} -Gehalt, C/N-Verhältnis, Bodenart, Durchlüftung und Wasserhaushalt. Die Reife des Komposts ist von untergeordneter Bedeutung, wobei Frischkomposte eine verzögerte Mineralisierungsdynamik und eher eine N-Immobilisierung bewirken. Auf sandigen Böden müssen präventiv hohe N-Aufnahmen der Pflanzen, erreichbar durch eine entsprechende Fruchtfolge bzw. geringere Kompostaufbringungsmengen, einer möglichen Auswaschung vorbeugen. Auf schluffigen und lehmigen Böden konnten in der Regel keine Gefährdungen des Grundwassers durch Nitratauswaschungen aus Komposten nachgewiesen werden (Amlinger et al. 2003).

Umfangreiche Untersuchungen während der 9- bzw. 12-jährigen Versuchsdauer eines Forschungsprojektes des Ministeriums Ländlicher Raum Baden-Württemberg belegen, dass die N-Mineralisierung der mit Kompostgaben in den Boden eingebrachten organischen Substanz langsam und damit kontrollierbar verläuft. Der lösliche N-Pool des Bodens wird deshalb nur ganz allmählich angehoben. Unter der Bedingung einer ergänzenden N-Düngung ist mit einer kompostbedingten Erhöhung der N_{min} -Gehalte von im Mittel 5 bis 15 kg/ha zu rechnen. Die feste N-Bindung in der organischen Substanz gewährleistet, dass es nicht zu plötzlichen und erheblichen Freisetzungen löslicher Nitratanteile und ihrer Einwaschung in das Grundwasser kommt. Ein Risiko besteht deshalb praktisch nicht, wenn die ergänzende N-Düngung um den Betrag der N-Ausnutzungsquote der Kompostgaben um die mittlere Anhebung der N_{min} -Gehalte, d. h. im Mittel um etwa 10 bis 15 % der pflanzenbaulichen N-Düngegaben, vermindert wird (Kluge 2002).

Auch andere Daueruntersuchungen kommen überwiegend zum Ergebnis, dass der Austrag von Nitrat eher unwahrscheinlich ist, wenn bei der regelmäßigen Kompostgabe die Regeln der guten fachlichen Praxis eingehalten werden.

So kommen Amlinger et al. (2006) entsprechend vorliegender Lysimeterversuche zu dem Ergebnis, dass trotz N-Bilanzüberschüssen durch die Kompostanwendung kein erhöhter N-Austrag in das Grundwasser erfolgt. Anhand von Feldversuchen konnte hierbei gezeigt werden, dass im Vergleich zu Kontrollparzellen die N_{min} -Gehalte bei Kompostdüngung im Gesamthorizont (0 – 90 bzw. 150 cm) gar nicht bzw. nur geringfügig erhöht sind.

Der lösliche N-Pool des Bodens wird nach Timmermann et al. (2003) durch ausschließliche Kompostgaben nur ganz allmählich, entsprechend der langsam einsetzenden Mineralisierung der organischen Substanz angehoben. Auch sehr hohe, pflanzenbaulich nicht übliche Kompostgaben verursachen nachweislich keine plötzlichen und ökologisch bedenklichen Erhöhungen der N_{\min} -Gehalte.

Die Boden- und Klimabedingungen am Standort haben einen erheblichen Einfluss auf die Höhe und Verteilung der löslichen N-Anteile im Jahresverlauf (Amlinger et al. 2003), sodass eine erhöhte Auswaschungsgefahr sich lediglich bei Versuchen mit extrem ungünstigen Randbedingungen (nasskaltes Klima nach Herbstausbringung, geringer Pflanzenentzug) zeigt. Zudem führt eine hohe N-Ergänzungsdüngung durch mineralische Düngung bzw. Gölledüngung zu einer unerwünschten Steigerung des löslichen N-Pools und zu einer erhöhten Auswaschung.

Die Auswertung von Feldversuchen an vier Ackerstandorten von Ruppert 2012 ergab, dass die Nitratstickstoffgehalte der Bodenprofile auf allen Standorten in erster Linie durch die klimatischen Verhältnisse und Bodenbearbeitungsmaßnahmen beeinflusst werden. Auf den Sandstandorten traten dabei überwiegend niedrige Gehalte um $20 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1} 90 \text{ cm}^{-1}$ auf. Gehalte zwischen 60 und $90 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1} 90 \text{ cm}^{-1}$ sind als hoch anzusprechen und kamen nach klimatischen Extremsituationen wie der Wiederbefeuchtung nach lang anhaltender Trockenheit, intensiver Bodenbearbeitung und nach einer trockenen Kälteperiode vor. Gleiches gilt für lehmige Standorte, auf denen die Nitrat-N-Gehalte aufgrund der höheren Feldkapazität und besseren Standorteigenschaften des Bodens generell höher liegen.

Zusammenfassend kann nach Timmermann et al. 2003 gesagt werden, dass auch nach den mehrjährigen Versuchsergebnissen durch regelmäßige Kompostgaben in der Regel keine Gefahr für das Grundwasser durch zu hohe N_{\min} -Anreicherungen im Auswaschungshorizont gegeben ist. Auswaschungsverluste sind im Grundsatz nur dann zu erwarten, wenn durch langjährige Kompostdüngung ein sehr großer organischer N-Pool entsteht, da letzterer hinsichtlich des zeitlichen Zusammenwirkens zwischen Pflanzenbedarf und N-Freisetzung pflanzenbaulich nur schwer zu kontrollieren ist.

Zusammenfassend kann somit davon ausgegangen werden, dass die Nitratauswaschung aus Komposten unter der Einhaltung der Regelungen der guten fachlichen Praxis und einer regelmäßigen Überprüfung des N-Düngebedarfs als äußerst gering eingestuft werden kann (Lazar et al. 2006).

4 N-BILANZIERUNG

Für die Bilanzierung gemäß § 5 (Nährstoffvergleich) DüV-2012 ist der Stickstoffanteil des Komposts zu 100 % anzurechnen. Der im betrieblichen Nährstoffvergleich auszuweisende dreijährige Mittelwert der errechneten Bilanzüberschüsse darf maximal 60 kg N pro Hektar/Jahr nicht überschreiten (§ 6 Abs. 2 DüV-2012). Dieser Wert soll laut DüV-VE-2014 ab 2018 auf 50 kg N/ha/a reduziert werden. Werden die Stickstoffsalden nicht überschritten, so gilt die Vermutung, dass die Anforderung an die gute fachliche Praxis der Düngebedarfsermittlung und der Düngemittelanwendung eingehalten wurden.

4.1 Bilanzgrößen

In Abb. 4 ist die Vorgehensweise bei der N-Bilanzierung mit allen relevanten Bilanzgrößen dargestellt.

Auf die Flächen gelangt Stickstoff in Form von Mineraldünger, organischem Dünger (Gülle, Mist, Klärschlamm, Kompost) sowie der N-Bindung durch Leguminosen. Den Zufuhren stehen die N-Abfuhr mit dem Ernteentzug entgegen, die von der Fläche abgefahren werden. Die Differenz bzw. das Saldo zwischen N-Zufuhr und N-Abfuhr von der Fläche bildet schließlich den N-Flächenbilanzüberschuss.

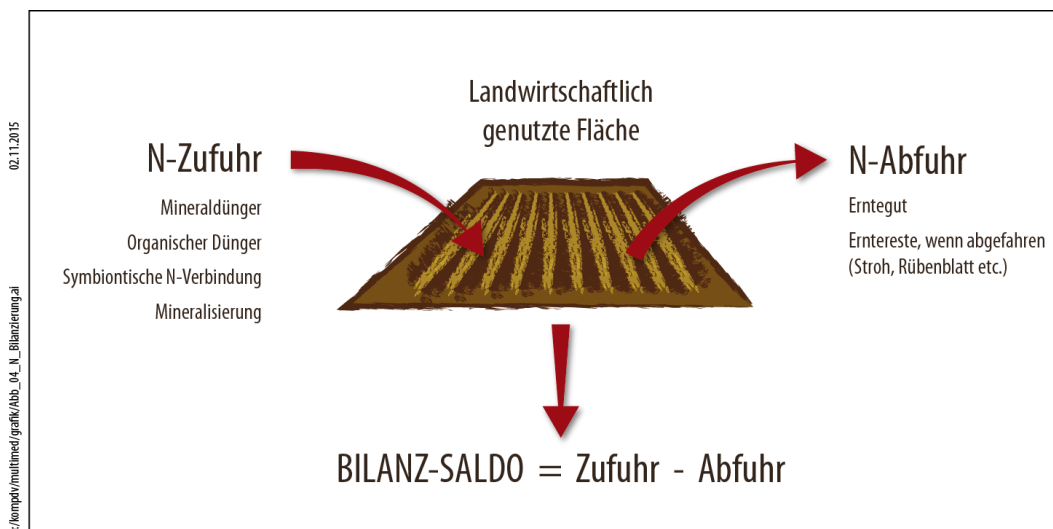


Abb. 4: N-Bilanzierung und Bilanzgrößen (Flächenbilanz)
(eigene Abbildung, ahu AG 2015)

Von der Nährstoffzufuhr ist der Nährstoffentzug durch Ernteprodukte und Nebenprodukte inklusive Beweidung abzuziehen und der betriebliche Saldo zu bilden, aus dem dann der durchschnittliche Überschuss pro Hektar bewirtschafteter Fläche zu ermitteln ist.

Um die mit den Ernte- und Nebenprodukten abgeführten Nährstoffmengen zu erfassen, sind die in Anlage 1, Tabelle 1 und 2 der DüV-2012 aufgeführten Stickstoffgehalte der Acker- und Gemüsekulturen heranzuziehen. Aus der Bewertung der betrieblichen Nährstoffsalden anhand der Mittelwerte aus den 3-jährigen be-

trieblichen Salden für Stickstoff ist abzuleiten, ob die gute fachliche Praxis der Düngung eingehalten und die Düngemaßnahmen sowie der Aufbringungszeitpunkt und die Aufbringungsmenge so gewählt wurden, dass verfügbare oder verfügbar werdende Nährstoffe den Pflanzen weitestmöglich zeitgerecht in einer dem Nährstoffbedarf der Pflanzen entsprechenden Menge zur Verfügung standen. Die Ergebnisse des Nährstoffvergleichs dienen der Kontrolle des Düngemiteinsatzes und der Überprüfung der durchgeführten Düngebedarfsermittlung.

4.2 Berechnung N-Bilanzen

Die N-Bilanzierung nach den Vorgaben der DüV-2012 und DüV-VE-2014 wird im Folgenden beispielhaft anhand von einer Fruchtfolge dargestellt.

Ein viehloser, konventionell wirtschaftender Marktfruchtbetrieb baut auf einer Fläche von 100 ha folgende dreijährige Fruchtfolge an:

Winterraps / Wintergerste / Winterweizen

Weizen- und Gerstenstroh werden abgefahren. Im ersten Jahr wird Stroh der Vorfrucht (Winterraps) in den Boden eingearbeitet und ist deshalb in der Nährstoffbilanz zu berücksichtigen.

Mit dieser Fruchtfolge werden in Summe der drei Jahre 485 kg Stickstoff pro Hektar mit der Ernte entzogen (s. Tab. 7).

Tab. 7: Stickstoffentzug aus der Ernte einer dreijährigen Fruchtfolge aus Winterraps (WRa) / Winterweizen (WW) / Wintergerste (WG). (HNv: Hauptfrucht-Nebenfrucht-Verhältnis)

Düngeplanung				
	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	gesamt
Fruchtfolge	WRa	WW	WG	
Stroh	auf Feld	abgefahren	abgefahren	
N-Bedarf in kg/ha	162	201	150	513
Rest aus Vorfrucht (kg/ha)	0	28	0	28
N-Bedarf in kg/ha	162	173	150	485
aus Biogutkompost 30 t TM	450 kg N gesamt			
davon wirksam in %	6%			
Biogutkompost davon wirksam in kg/ha	27			27
mineralischer Dünger in kg/ha				458

Als Nährstoffausgleich wird der Boden gedüngt. Hierbei erfolgt eine einmalige Kompostaufbringung (Biogutkompost) von 30 t TM für 3 Jahre im Voraus. Diese orientiert sich an der gemäß Bioabfallverordnung (BioAbfV 2012) maximal zulässigen Ausbringungsmenge von 20 bzw. 30 t Kompost-TM pro Hektar innerhalb von drei Jahren.

Für die N-Bilanzierung wird eine N-Anrechnung von 6 % gerechnet (3 % im ersten, 2 % im zweiten und 1 % im dritten Jahr).

Der restliche N-Bedarf wird durch mineralischen Dünger gedeckt.

In Tab. 8 ist die Nährstoffbilanz mit Gegenüberstellung der Anrechnung von N aus Kompost zu 100 % und zu 6 % dargestellt.

Tab. 8: Nährstoffzufuhr aus Biogutkompost und Mineraldünger

N-Bilanz	Nährstoffzufuhr in kg N/ha	Nährstoffzufuhr in kg N/ha
aus Mineraldüngung	458	458
aus Biogutkompost	450 ^{*1)}	27 ^{*2)}
Summe:	908 ^{*1)}	485 ^{*2)}

Das Ergebnis der N-Bilanzierung ist unter Tab. 9 dargestellt.

Tab. 9: N-Bilanzierung

	Nährstoffabfuhr in kg/ha in 3 Jahre	Nährstoffabfuhr in kg/ha*a
Ernteprodukte	485	162
Bilanz ^{*)}	423	141
Bilanz ^{*)}	0	0

*1) bei Anrechnung von N_{ges} zu 100 %

*2) bei Anrechnung von N_{ges} zu 6 %

4.2.1 Ergebnis N-Bilanzen

Die Tab. 8 und Tab. 9 zeigen den Einfluss der Anrechnung von Stickstoff auf die Nährstoffbilanz.

Über die Fruchtfolge werden insgesamt 485 kg N pro Hektar über 3 Jahre entzogen.

Der langjährige betriebliche Nährstoffvergleich (Mittelwert aus Bilanzen) liegt mit +141 kg N pro Hektar über dem Grenzwert der DüV-VE-2014 von 50 kg N/ha*a, obwohl der Düngebedarf der Fruchtfolge genau gedeckt wäre.

Wie die Bilanzierung zeigt, müsste eine vollständige Deckung des Stickstoffbedarfs der Pflanzen gerade bei Komposten durch eine große Aufbringungsmenge kompensiert werden, welche jedoch wiederum hohe Gesamt-N-Gehalte mit sich führen würde, die eine deutliche Überschreitung der Grenzwerte nach DüV nach sich ziehen würde (Ergebnisdiskussion s. Abschn. 4.3).

4.2.2 Humusaufbau durch Kompost und erlaubter N-Bilanzüberschuss nach DüV-VE-2014

Aufgrund seiner Eigenschaften ist Kompost sehr gut für eine nachhaltige Humuswirtschaft und Humusaufbau geeignet. Nachfolgend wird deshalb geprüft, inwieweit unter den Bedingungen der DüV-VE-2014 Humusaufbau möglich ist, ohne die Grenzen für erlaubte N-Bilanzüberschüsse zu übertreten, da der Kompost in der DüV-VE-2014 nur als Nährstofflieferant betrachtet wird.

Ausgangspunkt ist die maximal zulässige Aufbringungsmenge von 30 t TM Kompost pro Hektar innerhalb von drei Jahren (BioAbfV § 6). Im Beispiel wird eine einmalige Gabe von 30 t TM pro Hektar und Jahr appliziert. Der Humus-C-Gehalt errechnet sich aus der organischen Substanz des Komposts und dem darin enthaltenen C-Gesamt-Gehalt. Hieraus kann der Humus-C und demnach der Humusgehalt abgeleitet werden.

Danach ergibt sich eine Humus-C-Zufuhr von 3.271 kg/ha, was einer Humus-Zufuhr von 5.626 kg/ha entspricht.

Die zugehörigen Parameter bezüglich N-Gehalt und mineralisierbaren Stickstoffanteilen ist Tab. 10 zu entnehmen.

Mit der Kompostzufuhr geht eine Zufuhr von humuswirksamem N in Höhe von 383 kg/ha innerhalb von 3 Jahren einher. Aufgrund der geringen Pflanzenverfügbarkeit des Kompost-N würde in einem Betrieb der N-Entzug der Frucht über Mineraldünger bzw. organische Dünger mit leicht mineralisierbarem N gedeckt. Im Szenario des Humusaufbaus durch Kompost besteht deshalb stets die Gefahr, dass es zu rein rechnerischen N-Bilanzüberschüssen kommt, welche die Vorgaben der DüV-2007 (60 kg N/ha a im Dreijahresmittel) und DüV-VE-2014 (50 kg N/ha a im Dreijahresmittel) überschreiten.

Tab. 10: Ermittlung der humusreproduktionswirksamen N- und C-Gehalte bei Anreicherung von Humus im Oberboden

	Ausbringungsmenge Kompost	
	1 t TM/ha *a	30 t TM/ha *3 a
	[kg TM/ha * a]	[kg TM/ha * a]
organische Masse (OM) Glühverlust (BGK 2014)	376	11.280
C_{ges} (= OM x 0,58)	218	6.542
Humus-C (= C _{ges} x 0,5)	109	3.271
Humus (= Humus-C x 1,72)	187,5	5.626
N-Gehalt (gesamt) TM (BGK 2014)	13,6	408
mineralisierbarer N (6 % von N-gesamt)	0,8	24,5
humusreproduktionswirksamer N (Humus-N) (94 % von N-gesamt)	12,8	383,5

4.3 Diskussion N-Bilanzen

Die Differenzierung der Ergebnisse in N-Gesamt und N-Jahreswirksam machen deutlich, dass eine Deckung des N-Bedarfs für die Pflanze ausschließlich über Komposte nicht möglich ist, da wesentliche N-Anteile in die Bedarfsposition der Humusversorgung im Boden eingehen, welche hohe Gesamt-N-Gehalte mit sich führen und zu einer deutlichen Überschreitung der Vorgaben nach DüV-VE-2014 führen.

Da in der Bilanz stets die Gesamtgehalte der Nährstoffe anzusetzen sind, stellt sich bei Stickstoff die Frage, wie die in organischen Düngern gebundenen und für die Düngung nicht anrechenbaren Anteile an Stickstoff gehandhabt werden sollen.

Wie die Erläuterungen in diesem Bericht zeigen, ist bei der Kompostanwendung nur mit mäßigen Beiträgen der relativ hohen Stickstoff-Gesamtzufuhr zur N-Düngebilanz zu rechnen. Das liegt an der relativ festen Bindung von Stickstoff in der organischen Substanz, die sich auch in den relativ geringen löslichen N-Anteilen von im Mittel 3 bis 5 % der N-Gesamtgehalte von Komposten widerspiegeln.

Der Entwurf der DüV-VE-2014 sieht vor, dass organische und organisch-mineralische Düngemittel (einschließlich Wirtschaftsdünger) nur so aufgebracht werden dürfen, dass die aufgebrachte Menge an Gesamtstickstoff im Durchschnitt der landwirtschaftlich genutzten Flächen des Betriebs 170 Kilogramm Gesamtstickstoff je Hektar und Jahr nicht überschreiten.

Kompost unterscheidet sich jedoch hinsichtlich seiner Humus- und Stickstoffwirkung ganz wesentlich von flüssigen Wirtschaftsdüngern.

Die **Stickstoffmobilität** von Komposten und festen Gärprodukten aus Bioabfall muss wegen ihrer hohen Abbaustabilität und ihrer weiten C/N-Verhältnisse aus ökologischer und ertragswirksamer Sicht anders bewertet werden als landwirtschaftliche Wirtschaftsdünger, insbesondere flüssige organische Dünger.

Alle bisher bekannten Regelungen zu N-Frachten und N-Nährstoffvergleichen sind dagegen vorwiegend aus dem Kenntnisstand zu flüssigen organischen Düngern abgeleitet.

Für die praktische Kompostanwendung ist es jedoch wichtig, möglichst exakt zu wissen, welche düngewirksamen N-Anteile der N-Gesamtzufuhr der Kompostgaben N in der N-Düngebilanz anzurechnen sind. Für Komposte, die einer Gütesicherung unterliegen, sind diese Informationen zu anrechenbaren N-Anteilen bei der Kompostdüngung aus den entsprechenden RAL-Prüfzeugnissen zu entnehmen.

Aus der überwiegend organischen Bindung des Stickstoffs in Düngemitteln wie Kompost ergibt sich, dass der Einsatz solcher bestimmten Düngemittel bei der Stickstoffbilanzierung notwendigerweise mit Überschüssen an Stickstoff verbunden ist. Diese Überschüsse sind beim Nährstoffvergleich nach der Düngeverordnung zu bewerten. Bei der Bewertung ist dabei folgender Gesichtspunkt zu berücksichtigen: Ein Bedarf an Stickstoff im Sinne der guten fachlichen Praxis der Düngung ist nicht nur für die Pflanzenernährung gegeben, sondern auch bei der Humusreproduktion des Bodens, die als eigenständige Stickstoff-Bedarfsposition angesehen werden muss.

Grundlage des in die Humusreproduktion eingehenden Anteils an Stickstoff ist die im VDLUFA Standpunkt „Humusbilanzierung“ ausgewiesene Humusreproduktionsleistung organischer Dünger. Diese berücksichtigt neben der in den Düngern enthaltenen Menge an organisch gebundenem Kohlenstoff (TOC – total organic carbon) auch dessen Abbaustabilität im Boden. Da beim Einbau von Dünger-TOC in den Bodenumus von einer Angleichung an das C/N-Verhältnis des Bodens von 10 : 1 ausgegangen werden kann, ist der Bedarf an Stickstoff für den Humusaufbau bzw. die Humusreproduktion ableitbar.

Tab. 11: Anrechenbare Anteile an Stickstoff in bestimmten Düngemitteln zur Humusreproduktion (Quelle: H&K 2006)

Düngemittel	Organische Substanz [% TM]	C-org [% TM]	Anteil Humus-C am C _{org} * [%]	Anteil Humus-N [% TM]
Fertigkompost	36	21	51	80
Frischkompost	44	25	43	70

* Anteil an wirksamen Humus-C am organisch gebundenen Kohlenstoff (C_{org}) nach Reinhold, VDLUFA Schriftenreihe, Band 61, Bonn, 2005.

Wird der in organischen Düngern enthaltene Stickstoff in vollem Umfang als Pflanzennährstoff gewertet, würde rechnerisch eine Düngung vorgetäuscht, die im Sinne der Pflanzenernährung nicht gegeben ist. Eine bedarfsgerechte mineralische Ergänzungsdüngung würde gleichzeitig unterbunden, weil sich daraus Überschüsse an Gesamt-N ergeben, die nach § 6 Absatz 2 der Düngeverordnung unzulässig sind. In der Praxis der landwirtschaftlichen Kompostdüngung ist die geringe N-Effizienz beim Komposteinsatz hinreichend bekannt und wird bei der Düngebedarfsermittlung entsprechend berücksichtigt.

Gleichzeitig wird eine sachgerechte organische Düngung, die u. a. auf eine Humusproduktion bzw. Humusanreicherung des Bodens ausgerichtet ist, erschwert oder verhindert. Eine sachgerechte Bewertung von Bilanzüberschüssen aufgrund der Anwendung der unterschiedlichen organischen Dünger ist daher erforderlich und geboten (H&K 2006 und H&K aktuell 07/2015).

5 ERGEBNIS AUS LITERATURSTUDIE UND N-BILANZIERUNG

Anhand der Literaturstudie und der N-Bilanzierung werden folgende Schlüssel-
fragen beantwortet:

1) Welche Rolle spielt der Kompost bei der Ausgestaltung der guten fachli- chen Praxis i. S. des „Erhalts eines standorttypischen Humusgehalts“ (§ 17 BBodSchG Abs. 2 Satz 7)?

Eine wichtige Komponente der Düngung mit Kompost ist neben der Nährstoffver-
sorgung die Wirkung der organischen Substanz auf den Humushaushalt des Bo-
dens.

Stickstoff liegt im Kompost zu über 90 % in einer Vielzahl organischer Verbind-
ungen vor, wobei die Anteile an stabilem, humusproduktionswirksamem orga-
nisch gebundenem Stickstoff überwiegen. Diese stabile organische Substanz ist
bei der Humusreproduktion besonders wirksam und hochwertig. Kompost besitzt
daher eine hohe Humusreproduktionsleistung. Ein großer Teil der eingebrachten
organischen Substanz erhöht die Menge der stabilen organischen Substanz des
Bodens (Rubbert 2012).

Der Boden stellt die wichtigste Produktionsgrundlage des Landwirts dar. Für die
Bodenfruchtbarkeit ist es unverzichtbar, einen ausreichend hohen Gehalt an or-
ganischer Substanz als Grundlage zu haben. Entsprechend § 12 Abs. 2
BBodSchG gehört es zu den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis, dass „...
der standorttypische Humusgehalt des Bodens, insbesondere durch eine ausrei-
chende Zufuhr an organischer Substanz... erhalten wird.“

Die Wirkung der organischen Substanz auf den Boden beruht auf der kurzfristig
stattfindenden Umsetzung der leicht abbaubaren Bestandteile (Nährhumus) und
dem langfristigen Effekt der schwer bis nicht abbaubaren organischen Substanz
(Dauerhumus).

Im Rahmen der Literaturstudie wurde deutlich, dass Humus und Stickstoff un-
trennbar miteinander verbunden sind. Kein anderer Nährstoff nimmt bei der Bil-
dung von Humusmolekülen eine so herausragende Bedeutung wie der Stickstoff
ein. Eine Anhebung der Humusgehalte im Boden ist daher immer mit einem An-
stieg des Gesamtstickstoffpools im Boden verbunden. Umgekehrt ist jedoch zu
berücksichtigen, dass bei einem Abbau der Humusreserven im Boden auch be-
deutende Mengen an mineralischem Stickstoff freigesetzt werden können.

„Die verschiedenen Humusformen im Boden weisen Stickstoffgehalte von 0,7 bis
4 % auf. Daraus lässt sich ableiten, dass auch zum Aufbau der Humusgehalte im
Boden zwangsläufig beachtliche Mengen an Stickstoff erforderlich sind.“ (Fröhlich
et al. 2012)

Eine verbesserte Kenntnis der C- und N-Umsetzung ist der Schlüssel zu einer
gezielten Steuerung des Systems. Vor allem ist die Kenntnis der Transferdynamik
zwischen den N-Pools des Bodens von Bedeutung.

Die analytische Bewertung der Mineralisierungsdynamik des aktiven Humuspools
in mit Kompost gedüngten Böden stellt einen wesentlichen Entwicklungsschritt
für eine nachhaltige Stickstoff- und Humuswirtschaft dar.

2) Wie ist das N-Auswaschungspotenzial bei der Anwendung von Kompost zu beurteilen?

Die Gefahr einer N-Verlagerung in tiefere Bodenschichten und damit der Auswaschung in das Grundwasser kann auf Basis der vorliegenden Auswertungen als äußerst gering eingestuft werden.

Die Einflussfaktoren Niederschlagsverteilung, Bodenart, Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Ergänzungsdüngung führen jedoch zu einer großen Streubreite dieser Dynamik und damit zur Notwendigkeit, die Entwicklung des organischen N-Pools im Boden regelmäßig zu beobachten.

Damit sowohl eine effiziente N-Düngung als auch eine Berücksichtigung des N-Bedarfs für die Humusversorgung der Böden gewährleistet werden können, sollten sowohl bei Düngebedarfsermittlung als auch beim erforderlichen Nährstoffvergleich nur die mit der Kompostdüngung pflanzenverfügbaren und während der Fruchtfolge mineralisierbaren N-Anteile anrechenbar und in die jährlichen N-Bilanzierung von Komposten in der N-Düngebilanz zu veranschlagen sein.

Um eine effiziente N-Düngung als auch eine ausreichend Humusversorgung der Böden mit Kompostdüngung zu gewährleisten, muss eine entsprechende Korrektur im Nährstoffvergleich bei der novellierten DüV-2014 Berücksichtigung finden.

6 SCHLUSSFOLGERUNG FÜR DIE PRAXIS

Auf Grundlage der oben beschriebenen Auswertungen werden Schlussfolgerungen und Perspektiven für die Praxis formuliert. Diese enthalten zum einen die Rahmenbedingungen, unter deren Einhaltung ein Stickstoffaustrag infolge Kompostdüngung in das Grundwasser nicht zu erwarten ist.

Zum anderen werden Empfehlungen für die geplante Neufassung der DüV bezüglich der Handlungsfelder Ausbringungsobergrenze, Nährstoffvergleich, Aufbringungssperre und Aufbringung auf gefrorenem Boden formuliert (vgl. Abschn. 6.2).

6.1 Rahmenbedingungen für die Vermeidung von Stickstoffaustrag

Die Verringerung einer potenziellen Nitratauswaschung aus dem Boden bei Kompostanwendung und damit auch der Nitratkonzentration im Sickerwasser geht mit folgenden Zielen einher:

- niedrige Nitratgehalte im Boden zur Erntezeit, insbesondere im Herbst,
- niedrige Stickstoffmineralisierung in der vegetationsfreien Zeit,
- niedrige Nitratbevorratung des Bodens (durch bedarfsgerechte Stickstoffdüngung, zweckmäßige Auswahl der angebauten Kulturen, Gestaltung der Fruchtfolge und Behandlung der Ernterückstände).

Zielführend werden im Folgenden genaue Handlungsempfehlungen für die Praxis abgeleitet, die geeignet sind, eine Nitratauswaschung zu verringern.

Die Kompostgaben sollten sich sinnvoll in die Betriebsabläufe und Fruchtfolgen einfügen. Dabei sind Technik, Ökonomie und Pflanzenbau als wichtige Faktoren zu berücksichtigen.

Eine Ausbringung im Herbst ist besonders zu Zwischenfrüchten und Wintergetreide sinnvoll. Komposte mit einem weiten C/N-Verhältnis können eingesetzt werden, um kurzfristig einen Teil des Reststickstoffs (überwiegend im Herbst) zu binden (Zapf – aid heft et al. 2013).

Berücksichtigung von Bodenschutzaspekten bei der Ausbringung

Auch wenn durch die Kompostanwendung die Bodenstruktur verbessert wird, muss bei der Ausbringung von Komposten auf die Vermeidung von Bodenschadverdichtung sowie eventuelles Abschwemmen von Boden und Kompost geachtet werden.

Daher sollten zum Zeitpunkt der Ausbringung entsprechend günstige Witterungsbedingungen herrschen. Im Sinne des Bodenschutzes sollten Böden möglichst nur im trockenen Zustand und mit angepassten Fahrzeugen befahren werden (bodenschonende Bereifung: Reifeninnendruck ≤ 2 bar, Begrenzung der maximalen Radlast). Insbesondere auf gefrorenem Boden wird die Gefahr einer Bodenverdichtung durch Befahrung minimiert (Zapf – aid heft et al. 2013).

Bei der Zwischenlagerung von Kompost am Feldrand muss der Austritt von Sickerwasser, das in Grund- und Oberflächengewässer gelangen kann, vermieden werden. Diese Gefahr ist bei Komposten mit niedrigem Wassergehalt allerdings gering (Zapf – aid heft et al. 2013).

Einarbeitung von Kompost

Um die Abschwemmungsgefahr bei Starkregenereignissen zu mindern, wird neben den vorgesehenen Abstandsregelungen auch entsprechend der DüV-VE-2014 generell für alle N- und P-haltigen Düngemittel und Bodenhilfsstoffe eine Einarbeitung auf stark geneigten und unbestellten Flächen vorgegeben. Dies trifft für Komposte zu, wenn sie mehr als 1,5 % N-Gesamt und 0,5 % Phosphat in der TM enthalten. Auf ebenen Flächen ist die oberflächliche Ausstreuerung von Kompost ausreichend.

Bewirtschaftung

Die Stickstoffauswaschung wird generell durch die Art der angebauten Pflanzen und Fruchtfolgen sowie Standortverhältnisse und deren Fähigkeit zur Aufnahme und Speicherung von Wasser und Nitratstickstoff beeinflusst. Eine ganzjährige Vegetationsdecke (Grünland) verringert beispielsweise die Nitratauswaschung.

Mit der Kompostgabe kann Einfluss auf die besonders verlustgefährdeten N-Mengen im Herbst genommen werden. So kann die Gabe von Kompost mit weitem C/N-Verhältnis (z. B. strukturreiches, holziges Material oder allgemein geringem Rottegrad, d. h. Frischkompost) zu einer N-Fixierung führen. Mit dem Kompost steht zusätzlicher Speicherraum für Niederschlagswasser zur Verfügung, wodurch es zu einer Verringerung des Sickerwasseranteils kommen kann.

Auswahl und Kriterien für die Eignung und Anwendung von Kompost

Es sollte ausschließlich Kompost zum Einsatz kommen, welcher der RAL-Gütesicherung der Bundesgütegemeinschaft Kompost unterliegt. Insbesondere bei Stickstoff ist auf folgende Punkte zu achten.

Ziel:

- Düngebedarfsermittlung und Düngebilanzierung auf Grundlage der Warendeklaration der Gütesicherung;
- Anrechenbarkeit von Stickstoff wird in der Warendeklaration ausgewiesen (N-löslich zzgl. 5 % von N-organisch);
- Bei regelmäßigen Anwendungen (ab zweite Fruchtfolgerotation) Anrechnung von 15 bis 35 % der N-Zufuhr einer Kompostgabe in drei Jahren.

Kompostanwendung bietet sich besonders bei Betrieben an, die zu einem großen Anteil Marktfrüchte mit wenigen Ernterückständen produzieren. Der durch Mineralisation verursachte Humusabbau sowie die Nährstoff- und Kalkverluste können dort durch die Rückführung von Kompost auf die Ackerfläche ausgeglichen wer-

den. Betriebe mit hohem Veredlungsanteil verfügen in der Regel über genügend betriebseigene organische Dünger.

Günstige Faktoren für den landwirtschaftlichen Einsatz von Kompost sind:

1. Betriebe:

- hoher Marktfruchtanteil,
- Anbau humuszehrender Kulturen (Silomais, Kartoffeln, Rüben, Gemüse...),
- Strohabfuhr bzw. Ganzpflanzennutzung bei Getreide,
- geringer bzw. wenig Anfall wirtschaftseigener Dünger,
- Ausbringung sinnvoll in Betriebsabläufe und Fruchtfolge integrierbar.

2. Boden:

- Negative Humusbilanz oder geringe Bodenhumusgehalte (< 2 bis 3 % bei mittleren und schweren Böden bzw. < 1,5 bis 2 % bei leichten Böden),
- Erhaltungsdüngung für Phosphor auf C-Standorten,
- Erhaltungskalkung bei vorhandenen günstigen pH-Bedingungen.

6.2 Empfehlungen für DüV

Werden die oben genannten Änderungen der DüV-VE (s. Abschn. 2.1.2) umgesetzt, ist dies ein wichtiger Schritt zur Erreichung der umweltpolitischen Ziele zum Gewässer- und Klimaschutz sowie zur Erhaltung der Biodiversität.

Allerdings müsste die novellierte DüV-VE für eine praxisorientierte Anwendung dringend um eine besondere Betrachtung der effektiven kurz- und langfristigen Stickstoffwirkung in Kompostdüngesystemen ergänzt werden.

Desweiteren wurde bisher die Tatsache, dass es bezüglich Stickstoff im Boden nicht nur den Bedarfsträger „Pflanze“, sondern auch „Boden“ gibt, unberücksichtigt. Denn auch für die Humusreproduktion und Humusversorgung des Bodens wird Stickstoff benötigt. Dieser Stickstoff stammt überwiegend aus festen organischen Düngern wie Stroh, Stallmist und Kompost und ist, wie langjährige Versuche zeigen, im Hinblick auf N-Verlagerungen und Auswaschungen von untergeordneter Bedeutung (Kehres 2014).

N-Obergrenzen und Nährstoffvergleich

Ausbringungsobergrenze 170 kg Gesamtstickstoff je Hektar und Jahr

Durch die in Kapitel 3 erläuterten Prozesse und Eigenschaften und in Kapitel 4 durchgeführte Bilanzierung konnte dargestellt werden, dass selbst bei hohen Kompostgaben keine plötzlichen und ökologisch bedenklichen Erhöhungen der N_{\min} -Gehalte im Boden auftreten, sondern der Kompost-Stickstoff zum größten Anteil in organisch stabilen Bindungen vorliegt.

Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, dass Stickstoff aus Kompost in erster Linie zum Humusaufbau und nicht zur N-Pflanzenernährung beiträgt, was wiederum eine Einbeziehung der Gesamtstickstoffmenge in die Aufbringungs-obergrenze nicht rechtfertigt. Durch die Einbeziehung von Komposten in die Ausbringungsobergrenzen für Stickstoff würde folglich ein standortgerechter Humusaufbau mit Kompost unterbunden werden. Dies wird aus bodenschutzrechtlicher Sicht und auch vor dem Hintergrund der hohen CO_2 -Speicherfähigkeit des Bodens im Kontext des Klimawandels als nicht zielführend eingeschätzt.

Absenkung der Obergrenze für Bilanzüberschüsse

Die Düngeverordnung unterscheidet u. a. Dünger mit und ohne wesentliche Gehalte an Pflanzennährstoffen sowie mit und ohne wesentliche Gehalte an verfügbarem Stickstoff. Komposte weisen häufig wesentliche Gehalte an Pflanzennährstoffen aus (d. h. > 1,5 % Gesamtphosphat i. d. Trockenmasse), jedoch keine wesentlichen Gehalte an verfügbarem Stickstoff (d. h. weniger als 10 % vom Gesamtstickstoff).

Grundsätzlich ist zum Schutz vor Stickstoffauswaschungen eine Bemessung nach der aufgetragenen Stickstoffgesamtmenge für alle organischen Düngemittel gleichrangig bezogen auf N-Gesamtgehalte nicht zielführend. Vielmehr sollte die Begrenzung der Aufbringungsmenge anhand der zum Zeitpunkt der Aufbringung im Düngemittel tatsächlich verfügbaren bzw. löslichen Stickstoffmenge erfolgen. Ebenso steht dieser Anrechnung von Stickstoffgesamtmenge im Kompost entsprechend Nährstoffvergleich die geringe Mindestanrechnung (nur pflanzenverfügbare N-Anteil) nach Düngeplanung entgegen.

Sperrfristen für die Ausbringung

Der Gesetzeswortlaut der DüV-VE-2014 besagt, dass nach

§ 6 Abs. 7: Düngemittel mit wesentlichen Gehalten an Stickstoff nicht zu den nachfolgend genannten Zeiten aufgebracht werden dürfen:

1. auf Acker nach der Ernte der letzten Hauptfrucht bis zum 31. Januar,
2. auf Grünland und auf Flächen mit mehrjährigem Feldfutteranbau bei einer Aussaat bis zum 15. Mai in der Zeit vom 1. November bis zum 31. Januar;
3. Komposte dürfen in der Zeit vom 15. November bis zum 31. Januar nicht aufgebracht werden.

Eine Einführung der Sperrfrist für Kompost vom 15. November bis zum 31. Januar wird vor dem Hintergrund der besonderen Eigenschaften von Kompost im Sinne des Gewässerschutzes als nicht zielführend eingestuft.

Da der Stickstoff im Kompost sehr viel fester gebunden ist und deutlich weniger löslich und pflanzenverfügbar ist, besteht auch eine weitaus geringere Gefahr der Auswaschung in Grund- und Oberflächengewässer.

Teilweise ist sogar das Gegenteil der Fall, da durch Kompost der im Boden frei verfügbare Stickstoff (insbesondere zum Herbst) gebunden und dessen Auswaschung vermieden werden kann.

Auf eine Sperrfrist für Kompost sollte daher verzichtet werden. Sinnvoll wäre eine Handlungsempfehlung, welche Rahmenbedingungen es für die Vermeidung von Stickstoffaustrag gibt (z. B. standortangepasste Wirtschaftsweise, Bodeneigenschaften beachten etc.) (s. Abschn. 6.1).

Darüber hinaus wird durch die geplante Sperrfrist eine bodenschonende Bearbeitung (Ausbringung) deutlich erschwert.

Aufbringen auf gefrorenem Boden

Gerade in den Wintermonaten und auf gefrorenem Boden lässt sich die Kompostdüngung unter Bodenschutzaspekten und zur Reduzierung von Stickstoffemissionen oft am besten umsetzen.

Eine Untersagung der Kompostdüngung in den Wintermonaten und auf gefrorenem Boden ist daher unter Bodenschutzaspekten nicht zielführend.

Aufgrund der niedrigen Temperaturen tritt ein nennenswerter Austrag von Stickstoff im Winter nicht auf.

Eine Verlagerung der Kompostausbringung in das meist nasse Frühjahr wird von Landwirten zur Vermeidung von Bodenverdichtung oft nicht mehr geduldet und widerspricht der guten fachlichen Praxis. Aufgrund der geplanten Aufbringungsverbote wäre eine landwirtschaftliche Kompostdüngung nur noch in Ausnahmefällen möglich.

7 HUMUSAUFBAU AUF STANDORTEN MIT HOHER PHOSPHORVERSORGUNG

Mit der Novelle der Düngeverordnung dürfen phosphathaltige Düngemittel auf hoch und sehr hoch versorgten Standorten (D- und E-Standorte) „höchstens bis in Höhe der voraussichtlichen Phosphatabfuhr aufgebracht werden“ (E-DüV 2015). Aus Sicht der guten fachlichen Praxis und dem ressourcenschonenden Umgang mit dem Rohstoff Phosphor wäre eine verminderte P-Gabe mit dem Ziel der Verringerung des P-Vorrats bis auf Gehalte der Versorgungsklasse C (VDLUFA 1997 CAL) anzustreben.

Kompost enthält durchschnittlich ca. 0,5 % P_2O_5 in der Frischmasse bzw. 0,8 % in der Trockenmasse (BGK 2014). Die P-Gehalte sind gegenüber Mineraldüngern also vergleichsweise niedrig. Untersuchungen vom Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg (2008) zeigten jedoch, dass mit Kompost die P-Grunddüngung ersetzt werden kann und die mit Kompost zugeführte Kalkmenge der Erhaltungskalkung entspricht. Kompostdüngung nimmt also auch Einfluss auf den pH-Wert der Böden.

Die Frage nach der Einsetzbarkeit von Kompost auf Standorten mit dem Ziel des Humusaufbaus mit hoher P-Versorgung ist in Zusammenhang mit der P-Dynamik im Boden unter dem Einfluss der P-Düngung zu beantworten.

Besonders relevant sind dabei die vorliegenden P-Verbindungen, der Boden-pH und die daran gekoppelte P-Verfügbarkeit:

Phosphor liegt im Boden in organischen und anorganischen Formen vor. Organische P-Verbindungen stammen aus dem Abbau der organischen Substanz und können an Tonminerale sowie an weitere organische Moleküle im Boden in schwer mineralisierbarer Form gebunden sein. Anorganische P-Verbindungen fallen aus der Verwitterung der Böden an oder entstammen Düngerphosphaten. Ihre Löslichkeit ist stark pH-abhängig. Die Konzentration von P in der Bodenlösung ist aufgrund der geringen Löslichkeit der P-Verbindungen sehr gering (0,05 bis 3 mg/l P) (Schilling 2000).

Die geringen Lösungskonzentrationen und die schnelle Sorption von Phosphaten an mineralische Oberflächen bzw. Ausfällung, z. B. als Ca-Phosphate führen dazu, dass es kaum zur P-Auswaschung und endgültigen Verlusten im Boden kommt.

Auf überversorgten Standorten besteht jedoch nach Römer (1997, in Schilling 2000) die Möglichkeit, dass die Sorptions- und Fällungseffekte nicht zum Tragen kommen. Stattdessen kann Phosphat in kolloidaler Form oder in organische Form verlagert werden, da diese einer geringeren Sorption unterliegen. Daneben kann es zu P-Austrägen kommen, wenn gelöste Phosphate oder P-tragende Bodenpartikel in weiten Poren und auf bevorzugten Sickerwasser-Fließwegen so schnell transportiert werden, dass die Zeit für eine Sorption nicht ausreicht. Ergebnisse mit Düngern aus der Tierhaltung zeigten, dass das Phosphat in 55 cm Tiefe zu 77 % aus gelösten organischen P-Verbindungen besteht (Schilling 2000).

Phosphor liegt im Kompost zu etwa 35 % in CAL-löslicher Form vor. Vom Gesamt-Phosphor sind ca. 20 % organisch gebunden (Gutser et al. 2003). Zudem besitzt Kompost eine Kalkwirkung. Es ist daher davon auszugehen, dass die Ver-

fügbare Phosphaten und damit die Austragsgefahr mit der Bodenlösung in Komposten gering sind. Weiher (2000) fanden für P_2O_5 aus Kompost eine ähnliche Mineralisierungsrate wie aus mineralischem P-Dünger.

Um den P_2O_5 -Gehalt in einem 30 cm mächtigen Oberboden um 1 mg/100 g Boden zu erhöhen, sind pro Hektar 100 bis 150 kg P_2O_5 nötig (Holsten 2014). Legt man eine übliche Ausbringungsmenge von 20 bis 30 t TM /ha Kompost mit einem P_2O_5 -Gehalt von 0,5 % der Trockenmasse zugrunde, werden damit zwischen 160 und 240 kg P_2O_5 ausgebracht. Davon liegen rein rechnerisch 56 bis 84 kg löslich vor (35 %). Das entspricht etwa dem jährlichen P-Bedarf von Winterweizen bei Erhaltungsdüngung (C-Standort; nach Schilling 2000). Große Unsicherheiten bestehen jedoch in der realen Pflanzenverfügbarkeit des mit dem Kompost applizierten Phosphors aufgrund der o. g. komplexen Abhängigkeiten der Löslichkeit im Boden-Milieu. Das verbleibende nicht lösliche P_2O_5 könnte daher in relevanter Menge zur Erhöhung des P-Vorrats beitragen.

Schlussfolgerung

Kompost ist ein wertvolles organisches Düngemittel (Humusdünger), insbesondere für Betriebe, die auf eine nachhaltige Humuswirtschaft setzen.

Die Kompostanwendung ist insbesondere auf den Böden, die einen schlechten Humuszustand aufweisen, eine sinnvolle und wirksame Maßnahme. Beispielsweise kann Kompost auf erosions- oder verdichtungsanfälligen Standorten als Bestandteil der guten fachlichen Praxis im Sinne des § 15 BBodSchG zu einer Verbesserung und Stabilisierung des Bodengefüges und der Bodenfruchtbarkeit beitragen.

Oben ausgeführte Überlegungen und erste Ergebnisse aus der Sicht einschlägiger Literatur deuten darauf hin, dass eine weitere Zufuhr von Phosphor und organischer Substanz auf Böden mit hohen P-Gehalten (> 20 mg P_2O_5 /100 g Boden, CAL-Methode) zum P-Austrag führen kann. Die Kompostanwendung auf Standorten mit hohem P-Versorgungsstatus wäre damit also auch dort, wo sie im Blick auf den Humushaushalt und die Bodenverbesserung als sinnvoll erscheint, nur noch eingeschränkt möglich. Hierzu werden weiterführende Untersuchungen als notwendig erachtet.

8 FAZIT UND AUSBLICK

Kompost stellt einen hochwertigen, organischen Dünger dar, der neben der Lieferung von Pflanzennährstoffen auch zur Verbesserung der biologischen und physiologischen Eigenschaften des Bodens beiträgt. Im Vergleich zu anderen organischen Düngern liefert Kompost allerdings die höchste Menge an humusproduktionswirksamem Kohlenstoff, der für eine gute und nachhaltige Humusversorgung des Bodens essentiell ist.

Das Potenzial an Nitratfreisetzung aus Komposten kann unter der Einhaltung der Regelungen der guten fachlichen Praxis und einer regelmäßigen Überprüfung des N-Düngebedarfs (N_{\min} -Gehalt des Bodens) als äußerst gering eingestuft werden.

Die Absenkung der Obergrenze für Bilanzüberschüsse entsprechend DüV-VE-2014 erschwert eine praxisübliche Kompostanwendung erheblich. Es bedarf einer entsprechenden Berücksichtigung von Kompostdüngern, die durch einen hohen Anteil an stabilem Humus-C als auch organisch gebundenem N mit sehr geringen N-Mineralisationsraten gekennzeichnet sind.

Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, dass Stickstoff aus Kompost in erster Linie zum Humusaufbau und nicht zur N-Pflanzenernährung beiträgt, was wiederum eine Einbeziehung der Gesamtstickstoffmenge in die Aufbringungsobergrenze von 170 kg N/ha im Betriebsdurchschnitt nicht rechtfertigt. Durch die Einbeziehung von Komposten in die Ausbringungsobergrenzen für Stickstoff würde folglich ein standortgerechter Humusaufbau mit Kompost unterbunden werden.

9 LITERATUR

- Amlinger, F., Peyr, S. u. P. Dreher (2003): Kenntnisstand zur Frage des Stickstoffaustrags in Kompost-Düngesysteme. Hrsg.: Lebensministerium. Wien.
- Bauer, Frank (2015): Wirkungen veränderter Rechtsvorgaben auf die Verwertung von Bioabfallkomposten“. IZES gGmbH – Institut für ZukunftsEnergie-Systeme. Saarbrücken.
- Baumecker, M. (2009): Was ist Humus? Die wichtigsten 30 cm im Boden. In: Magazine Innovation, 3/2009. Berlin.
Abrufbar unter:
<https://www.magazin-innovation.de/export/sites/magazin-innovation.de/extras/dokumente/innovation/was-ist-humus-3-09.pdf>
- Baumgärtel, Dr. G. u. Prof. Dr. H.-W. Olf (o.J.): Nitratauswaschung – Ursachen und Maßnahmen zur Minimierung. Hrsg.: aid infodienst – Wissen in Bestform. Gefördert durch: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Bonn.
- Bund-Länder-Arbeitsgruppe zur Evaluierung der Düngeverordnung- BLAG (2012): Evaluierung der Düngeverordnung – Ergebnisse und Optionen zur Weiterentwicklung. Abschlussbericht. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Braunschweig.
- Bundesgütergemeinschaft Kompost e.V. (Hrsg.) (o.J.): Bestimmung des Nutzwertes organischer Sekundärrohstoffdünger und Bodenverbesserungsmittel. Ein Konzept zur einheitlichen Bewertung organischer Sekundärrohstoffdünger und Bodenverbesserungsmittel als Boden- und Pflanzendünger. Köln.
- Bundesgütergemeinschaft Kompost e.V. (2006): Organische Düngung. Grundlagen der guten fachlichen Praxis. Aus der Reihe „Kompost für die Landwirtschaft“. Fachliche Bearbeitung: Dr. Jutta Rogasik (FAL), Dr. Jürgen Reinhold (BGK), Köln.
- Döhler, H. (1996): Landbauliche Verwertung stickstoffreicher Abfallstoffe, Komposte und Wirtschaftsdünger. In: Wasser & Boden, 48/11, 1996, S. 7-16.
- DVGW-Information (2015): Stickstoffumsatz in Grundwasser. In: DVGW-Information Wasser Nr. 85. Bonn.
- Engels, C., Reinhold, J., Ebertseder, T. u. J. Heyn (2010): Humusbilanzierung landwirtschaftlicher Böden – Einflussfaktoren und deren Auswirkungen, BLE-Forschungsprojekt (AZ.: 514-06.01-2808HS016), VDLUFA Speyer.
- Fröhlich, J., Hartung, M., Kremp, C., Leifert, Dr. I., Pabsch, E., Pollvogt, H. u. M. Schmees (2012): Wissenswertes über Nährstoffe - Stickstoff. In: HuMuss, Nr. 26. Hrsg.: Verband der Humus- und Erdwissenschaft e.V., Aachen.

- Fuest, Stefan (2000): Regionale Grundwassergefährdung durch Nitrat – Vergleich von räumlich differenzierten Überwachungsdaten und Modellrechnungen. Dissertation am Institut für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück.
- Gutser, R. u. Ebertseder, T. (2002): Grundlagen zur Nährstoff- und Sonderwirkung sowie zu optimalen Einsatzstrategien von Komposten im Freiland. In: Handbuch Kompost im Gartenbau, Hrsg. Zentralverband Gartenbau e.V., Bonn, S. 47-72.
- Gutser, R. (1998): Grundlagenversuche zum Nährstoffumsatz von Biomassekomposten. Ableitung von umweltverträglichen Einsatzstrategien in Landwirtschaft und Gartenbau. In: Runder Tisch Kompost. Kompost-N: Bindungsdynamik und Düngewert. Technische Universität München, Lehrstuhl für Pflanzenernährung.
- Haberer, K. u. U. Böttcher (1996): Das Verhalten von Umweltchemikalien in Boden und Grundwasser. In: Schriftenreihe der Schutzkommission beim Bundesministerium des Inneren. Hrsg.: Bundesamt für Zivildschutz, Band 23. Bonn.
- H&K (2006): Neue Düngeverordnung DüV in Kraft.
Abrufbar unter:
[http://www.kompost.de/index.php?id=452&tx_ttnews\[tt_news\]=264&cHash=aa01a5835b](http://www.kompost.de/index.php?id=452&tx_ttnews[tt_news]=264&cHash=aa01a5835b)
- Herms, U. (o.J.): Anwendbarkeit von Komposten in der Landwirtschaft – Zwischenbericht aus einem laufenden Projekt.
- Holsten, B. (2014): Zum nachhaltigen Umgang mit Phosphor. Bauernblatt. S. 33-35. 4. Oktober 2014.
Abrufbar unter:
http://www.lksh.de/fileadmin/dokumente/Bauernblatt/PDF_Toepper_2014/B_B_40_04.10/33-35_Holsten.pdf
- Kehres, Dr. B. (2014): Novelle der Düngeverordnung (DüV) voraussichtlich in diesem Jahr. In: H&K aktuell 05/2014 BGK e.V.
Abrufbar unter:
http://www.kompost.de/uploads/media/Novelle_der_Duengeverordnung_DueV_vorraussichtlich_in_diesem_Jahr_HUK_05_2014.pdf
- Klem, M., Taube, F., Hüwing, H., Kemper, N., u. H. Neumann (2007): Landwirtschaftliche Produktionssysteme in Schleswig-Holstein: Leistungen und Ökologische Effekte. Ergebnisse des Projektes Compass. Hrsg.: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel: Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung und Institut für Phytopathologie. Kiel.
- Kluge, Dr. R. (o.J.): Risiken der Kompostanwendung im Pflanzenbau – was ist dran?
- Kluge, Dr. R. (2000): Forschungsreport: Nachhaltige Kompostverwendung in der Landwirtschaft. Ergebnisse eines DBU-Verbundforschungsprojektes in Baden-Württemberg. LUFA Augustenberg.

Abrufbar unter:

<https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/,Lde/644683>

- Körner, I. (2008): Stickstoffhaushalt bei der Kompostierung: Bilanzen, Gehalte, Umsetzungs- und Austragsprozesse. Habilitationsschrift. Technische Universität Hamburg-Harburg. Hamburg.
- Körschens, M., Schulz, E., Klimanek, E.-M. u. U. Franko (1997): Die organische Bodensubstanz – Bedeutung, Definition, Bestimmung. Mitteilung der Deutschen Archiv Acker-, Pflanzenbau und Bodenkunde, Bd. 41, S. 427-433
- Krause, P., Oetjen-Dehne, R., Dehne, I., Dehne, D. u. H. Erchinger (2014): Verpflichtende Umsetzung der Getrenntsammlung von Bioabfällen. Hrsg.: Umweltbundesamt. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Forschungskennzahl 371233 328. Dessau-Roßlau.
- Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg – LTZ – (2008): Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe, des Ministeriums für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (Hrsg.).
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen – LWK NI (Hrsg.) (o.J.): Unterrichtsmaterial zur Düngeverordnung für den Berufs- und Fachschulunterricht. Oldenburg.
- Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen Lippe (Hrsg.) (2011): Humusversorgung sichern. Organische Dünger auf die Stoppel? Folge 28, 2011 – Sonderdruck. Abrufbar unter:
http://www.vhe.de/fileadmin/vhe/pdfs/Publikationen/Sonderdrucke/LWB_SD_Humus_digital.pdf
- LWK NI - Landwirtschaftskammer Niedersachsen – LWK NI (Hrsg.) (2006): Gewässerschonende Landwirtschaft vor dem Hintergrund der Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie. Informationsbroschüre anlässlich der Wasserschutztage in Liebenau & Hohenzethen für Auszubildende und Fachschüler im Rahmen des Projektes WAgriCo. Hannover.
- Lazar, S. & Höke, S. (2011): Frachtenberechnungen für die Kompostanwendung. Gutachten. VHE – Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e.V. (Hrsg.).
- Lazar, S., Höke, S., Knappe, F. u. R. Vogt (2012): Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl: 370933340, Hrsg.: Umweltbundesamt.
- Morky, M., Kluge, R., Bolduan, R. u. F. Timmermann (2004): Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft – Ergebnisse eines DBU-Projektes aus Baden-Württemberg. In: VDLUFA-Schriftenreihe, Band 60 – Kongressband.
- Rettenberger, G., Urban-Kiss, S., Schneider, R., Müsken u. G. Kruse (2012): Handbuch Bioabfallbehandlung. Erfassung des Anlagenbestands Bioab-

fallbehandlung. Kurzfassung. Hrsg.: Umweltbundesamt. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungskennzahl 3709 33 343 UBA-FB 001671/Kurz. Dessau-Roßlau.

- Reinhold, J. (2014): Mobilität von Stickstoff aus organischen Düngemitteln im Boden und deren Humusreproduktionsleistung. Förderverband Humus e.V., Hannover.
- Reinicke, F. u. D. Wurbs (2012): Nitratausträge landwirtschaftlich genutzter Flächen. Erfassung und Auswertung langjähriger Messreihen von Dauermonitoringflächen. In: Schriftenreihe des LfULG, Heft 40/2012, Hrsg: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Freistaat Sachsen, Dresden.
- Riedel, Dr. M., Fröhling, J. u. W. Schies (2007): Stickstoffversorgung optimieren – Nitratdynamik in Rebböden beachten. In: Der Badische Winzer. Freiburg. Abrufbar unter:
http://www.wbibw.de/pb/site/lel/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/wbi/03%20Fachartikel/34%20FA%20Refrat%2013%20Bodenkunde/340_09%20FA%202009%20und%20%C3%A4lter_Votr%C3%A4ge%20Brosch%C3%BCren%20Faltbl%C3%A4tter/Stickstoffversorgung%20optimieren%20-Nitratdynamik%20in%20Rebb%C3%B6den%20beachten.pdf
- Rubbert, M. (2012): Bodenbiologische Untersuchungen zur Auswirkung der Kompostanwendung auf die Stickstoffumsetzungen in Böden des Hamburger Umlandes. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. Hamburg.
- Scheffer, F. u. P. Schachtschabel (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Schmalfuß, K. (1958): Die geochemische Bedeutung des Stickstoffs unter besonderer Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Produktion und der Dünger. In: Handbuch der Pflanzenphysiologie / Encyclopedia of Plant Physiology Volume 8, 1958, pp 1128 – 1146, Heidelberg.
- Umweltbundesamt (2014) (Hrsg.): Reaktiver Stickstoff in Deutschland. Ursachen, Wirkung, Maßnahmen. Dessau-Roßlau.
- Unterfrauner, H. (o.J.): Teilbereich bodenkundliche Begleitung. Im Auftrag des Vereins Ökoregion Kaindorf. Wien.
- Wanek, W. (2015): Auf der Spur der Stickstoffprozesse. Gastbeitrag der Fakultät für Lebenswissenschaften der Universität Wien. Im Rahmen des FWFG-Projektes: Kontrolle organischer Stickstoff-Umsetzungen im Boden. Wien. Abrufbar unter:
<http://medienportal.univie.ac.at/uniview/forschung/detailansicht/artikel/auf-der-spur-der-stickstoffprozesse/>

Weiber, U. (2000): Phosphat aus Kompost wird ähnlich schnell mineralisiert wie aus mineralischer Düngung, bei Kalium ist die Mineralisation langsamer. LWK Niedersachsen, LVG Hannover-Ahlem.

Abrufbar unter:

<http://www.hortigate.de/bericht?nr=40457>

Zapf, R., Schultheiß, U., Hofmann, M., Döhler, H., Fröba, N., Schneider, M., Schmidt, R., Klages, S. u. M. Schwab (2013): Kompost in der Landwirtschaft. Hrsg.: aid infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz e.V. aus dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Nr. 1476/2013, Bonn.

Zorn, W., Heß, H., Dr. Albert, E., Kolbe, H., Kerschberger, M. u. Dr. G. Franke (2007): Düngen in Thüringen 2007 nach „Guter fachlicher Praxis“. In: Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen, Heft 7/2007. Hrsg.: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena.