

Nitratrichtlinie und kostenminimale Wirtschaftsdüngerallokation in Abhängigkeit von der Lagerkapazität – Fallstudie für ein Düngjahr mit gemischt-ganzzahliger Linearer Programmierung

Nitrate Directive and minimum-cost allocation of slurry as a function of storage capacity – a case study for a fertilisation year with mixed-integer linear programming

Jan-Hendrik Buhk^{1*}, Hans-Hennig Sundermeier² und Uwe Latacz-Lohmann¹

¹Institut für Agrarökonomie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland

²Landwirtschaftlicher Buchführungsverband Kiel, Deutschland

*Correspondence to: jhbuhk@ae.uni-kiel.de

Received: 30 Oktober 2019 – Revised: 15 April 2020 – Accepted: 22 April 2020 – Published: 21 Dezember 2020

Zusammenfassung

Die EU-Nitratrichtlinie reguliert über ihre Implementierung in nationales Recht insbesondere die Wirtschaftsdüngung. Investitionen in Lagerkapazität können die situationsspezifische Wirtschaftsdüngerallokation erheblich verbessern und somit Düngungskosten einsparen. Ein simultaner MILP-basierter Planungsansatz zur Optimierung der Düngemittelallokation bei Einhaltung von Düngeverordnung (DüV) [bzw. Nitrat-Aktionsprogramm-Verordnung (NAPV)] kann Anpassungsentscheidungen für viehstarke Betriebe bei Veränderungen der Lagerkapazität einzelbetrieblich evaluieren. Exemplarische Ergebnisse für einen Milchvieh-Ackerbaubetrieb in Norddeutschland zeigen: Die Ausweitung der Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger und Gärreste auf das gesetzliche Minimum ist betriebswirtschaftlich sinnvoll. Eine Erweiterung der Lagerkapazität darüber hinaus kann die Gesamtdüngungskosten jedoch nur unwesentlich senken, da kostengünstiger Handelsdüngestickstoff die niedrigen Stickstoffwirkungsäquivalente im Herbst unter Einhaltung der Düngeverordnung sehr einfach kompensieren kann. Betriebswirtschaftlich besteht für den untersuchten Betrieb kein Anreiz zur Schaffung von Lagerkapazität jenseits des gesetzlichen Minimums.

Schlagerworte: Lagerkapazität, Wirtschaftsdüngerallokation, MILP, Düngungsplanung, Nitratrichtlinie

Summary

The EU Nitrate Directive regulates the use of fertilizers through its translation into national legislation. Investment in storage capacity can improve the situation-specific allocation of animal manure. A simultaneous MILP-based planning approach for the optimization of fertilizer allocation in compliance with German Fertilizers Ordinance (DüV) can determine optimal adaptation decisions in livestock farms under consideration of changes in storage capacity. Model results for a mixed dairy arable farm in northern Germany show: expansion of storage capacity for manure and fermentation residues to legal minimum is profitable. An expansion of storage capacity beyond legal minimum can only marginally reduce total fertilization costs because low-cost nitrogen from commercial fertilizers can easily compensate low nitrogen utilization rates of animal manure in autumn.

Keywords: storage capacities, allocation of slurry, MILP, fertilisation planning, nitrates directive

1 Einleitung

Der Rat der Europäischen Gemeinschaft fordert mit der Nitratrichtlinie (Richtlinie 91/676/EWG) zur Vorbeugung vor und zur Reduktion einer Grundwasserverunreinigung mit Nitrat die Ausweisung sogenannter „gefährdeter Gebiete“ mit anschließender Erstellung von Aktionsprogrammen für diese und die Aufstellung von „Regeln der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft“ (RAT, 1991). Die deutsche Düngeverordnung (DüV) (BMEL, 2017) und die österreichische Nitrat-Aktionsprogramm-Verordnung (NAPV) (BMLFUW, 2018) setzten diese Richtlinie im jeweiligen Mitgliedsstaat in nationales Recht um. Beide Verordnungen regulieren insbesondere die Verwendung innerbetrieblich anfallender Wirtschaftsdünger durch Verkürzungen der Ausbringungszeiträume, besondere Anforderungen an die technischen Ausbringungsverfahren, Spezifikation (fruchtartabhängiger) Mengenbeschränkungen und Mindestlagerkapazitätsanforderungen für Wirtschaftsdünger aus der Tierproduktion und Gärückstände aus dem Betrieb von Biogasanlagen. Die Einhaltung dieser Verordnungen mündet in einem erhöhten Planungsaufwand der einzelnen Düngungsmaßnahmen über das gesamte Düngjahr. Eine MILP-basierte Entscheidungshilfe zur Allokationsplanung der Einzelmaßnahmen stellten Buhk und Sundermeier (2019a; b) bereits vor.

Die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern und Gärückständen im Frühjahr ist anzustreben, da die Verwertung ihrer Nährstoffe durch den hohen Bedarf der Pflanzen zu Vegetationsbeginn besonders effizient ist. In den Herbstmonaten können die gerade aufgelaufenen Winterungen die Nährstoffe häufig nicht vollständig aufnehmen (Schliephake und Müller, 2014). Folglich wird ein Teil der Nährstoffmenge im Boden gespeichert oder insbesondere bei großen Niederschlagsmengen in den Wintermonaten in tiefere Bodenschichten und teilweise bis ins Grundwasser verlagert. Gerade das vom Boden nur schlecht fixierbare Nitrat wäscht auf diese Weise aus. Zusätzliche Lagerkapazitäten für Wirtschaftsdünger und Gärückstände erweitern die Nährstofftransfermöglichkeiten aus dem Spätsommer und Herbst über den Ausbringungsverbotszeitraum in das Frühjahr hinein und schaffen damit die notwendige Voraussetzung für eine bessere Nährstoffverwertung. Effiziente Wirtschaftsdüngerverwertung verringert die Bedarfslücke für Handelsdünger und senkt damit die Kosten für Handelsdüngerzukauf und -ausbringung. Zusätzlich schafft Lagerkapazität Flexibilität bei der Wahl des Ausbringungstermins gerade im witterungsunbeständigen Frühjahr (Schliephake und Müller, 2014). Eine Volumenausweitung der Lager für Wirtschaftsdünger und Gärückstände kann somit betriebswirtschaftliche Vorteile erzielen.

In Österreich und in Deutschland beträgt die gesetzlich vorgeschriebene Mindestlagerkapazität derzeit sechs Monate des über DüV bzw. NAPV ermittelten monatlichen Wirtschaftsdünger- und Gärückstandsarfs zuzüglich Sickersaft und Niederschlagswasser. Bereits 2013 empfahlen die Wissenschaftlichen Beiräte für Agrarpolitik und Düngungsfragen beim BMEL die Verkürzung der Ausbringungszeiträume für Wirtschaftsdünger und Gärückstände und die

Ausweitung der Mindestlagerkapazitäten für flächenknappe Betriebe und Biogasanlagen auf neun Monate mit einer Übergangsfrist (Taube et al., 2013). Die 2017 novellierte deutsche DüV setzte diese Empfehlung um. Im Zuge der aktuellen Nachbesserungsdiskussion der deutschen DüV könnte daher die ab 2020 für einige deutsche Betriebe gültige neunmonatige Mindestlagerkapazität auf weitere Betriebe ausgedehnt werden. Die einzelbetriebliche und situationsspezifische Bewertung von Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger und Gärückstände gewinnt somit weiter an Bedeutung. Zudem bildet der Abschluss von Wirtschaftsdünger- bzw. Gärückstandsabgabeverträgen eine Alternative zum Zubau von Lagerkapazität.

Zusammengefasst sollen in diesem Beitrag folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

1. Kann eine bestehende MILP-basierte Entscheidungshilfe für die Düngungsplanung (Buhk und Sundermeier, 2019a; b) zur situationsspezifischen, betriebswirtschaftlichen Bewertung von Lagerkapazitätsentscheidungen herangezogen werden?
2. Welche Ergebnisse sind für einen Beispielbetrieb hinsichtlich Ersparnispotential und sinnvoller Volumenerweiterung zu erzielen?

Der Beitrag verdeutlicht in Abschnitt 2 das Thema Wirtschaftsdüngung für die Betriebswirtschaft. Abschnitt 3 erläutert den Modellierungsansatz in seinen Grundzügen und das Vorgehen, bevor in Abschnitt 4 erste Anwendungsergebnisse für einen Beispielbetrieb dargelegt werden. Abschnitt 5 diskutiert Methode und Ergebnisse.

2 Wirtschaftsdüngung vor betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten

2.1 Besonderheiten der Wirtschaftsdüngerallokation

„Düngen heißt Zuführen von Mineralstoffen zur Ernährung von Pflanzen oder zur Verbesserung von Bodeneigenschaften“ (Knittel et al., 2012). Die am Bedarf ausgerichtete Nährstoffversorgung der Pflanzen und des Bodens über Düngemittel, wie es diese Definition vorsieht, hinterfragt die betriebswirtschaftlich optimale Allokation der Düngemittel auf die Schläge nicht. Verwendet man Mehrnährstoffdünger, wie bspw. Wirtschaftsdünger, so steigt durch das feste Inhaltsstoffverhältnis die Tendenz, die Nährstoffbedarfswerte der einzelnen Schläge für einzelne Nährstoffe über zu erfüllen oder unter zu versorgen. Somit entstehen über die Zeit Nährstoffüberschüsse, welche im Boden gespeichert oder ins Grundwasser verlagert werden können und zusätzlich die Gesamtdüngungskosten erhöhen. In viehhaltenden Betrieben fallen jedoch ganzjährig unterschiedliche Wirtschaftsdünger in variierender Menge, bedingt durch z.B. Sommerweidegang, an, die entweder auf die Schläge ausgebracht, ins Wirtschaftsdüngerlager verbracht oder an andere Betriebe abgegeben werden müssen. Die Inhaltsstoffe dieser kön-

nen bei einer Ausbringung auf betriebseigenen Schlägen zu einer Reduktion des Handelsdüngereinsatzes führen. Ob ein Wirtschaftsdünger zu einem gewissen Zeitpunkt auf einem gewissen Schlag ausgebracht werden sollte, hängt ab von

- a) dessen Verwertung in Abhängigkeit von der Kultur (Einige Kulturen können Wirtschaftsdünger besser verwerten als andere),
- b) dessen Verwertung in Abhängigkeit vom Ausbringungstermin (Die Ausbringungsverluste sind im Frühjahr geringer als im Herbst),
- c) der Höhe der Ausbringungskosten und von
- d) physischen, technisch bedingten Mengenbegrenzungen der Ausbringmenge nach unten und nach oben (Bsp.: Um einer Futtermittelverschmutzung im Grünland vorzubeugen, sollte die Ausbringmenge nach oben begrenzt werden).

Alternativen sind immer die Ausbringung desgleichen auf einem anderen Schlag (und damit eventuell zu einer anderen Kultur) oder eine Wirtschaftsdüngerabgabe in Verbindung mit einem Handelsdüngerkauf zu aktuellen Konditionen und dessen schlagspezifischen Ausbringungskosten.

Wirtschaftsdüngerkooperationen mit Biogasanlagen und anderen Betrieben führen zu immer komplexeren Geflech-ten bei der Wirtschaftsdüngung. Eine einzelne Allokationsentscheidung beeinflusst den Wirtschaftsdüngungskomplex „lagern, ausbringen oder abgeben“ durch ihre Irreversibilität damit fundamental. Die Auswirkung einer Einzelentscheidung auf weitere Allokationen, auf die Einhaltung von Verträgen und auf die Nutzung des Lagers in der Zukunft kann über heuristische Voranschläge nicht umfassend und ziel-sicher beurteilt werden. Gerade die Knappheit der vorhan-denen Lagerkapazität in den Teilperioden des Düngejahres ist methodisch schwer zu beurteilen. Allokationsentscheidungs-hilfen müssen daher sämtliche pflanzenbaulich und wirtschaftlich relevanten Handlungsoptionen des Praktikers bei der Düngung berücksichtigen und gleichzeitig den recht-lichen Rahmen einhalten.

2.2 Lagerkapazität

Investitionsentscheidungen in Lagerkapazität für Wirt-schaftsdünger und Gärrückstände sind von vielen Fakto-ren abhängig. Mindestkapazitäten sind über die DüV bzw. NAPV klar definiert. Entfernungen vom Lager zu den Schlä-ge-n, die damit in Verbindung stehenden Ausbringungskos-ten, betriebsindividuelle Schlagkraft, Befahrbarkeit in der Hauptausbringungszeit und das Fruchtartenverhältnis im Düngejahr beeinflussen die optimale betriebliche Lagerka-pazität. Liegen die Schläge bspw. weit entfernt vom Lager, steigen die Ausbringungskosten des Wirtschaftsdüngers. Damit können die Opportunitäten „Wirtschaftsdünger abge-ben und Handelsdünger zukaufen“ und „auf einem anderen Schlag ausbringen“ interessanter werden. Falls eine Abgabe betriebswirtschaftlich vorzuziehen ist, kann die vorhandene Lagerkapazität anderweitig genutzt werden bzw. auf einen

Zubau verzichtet werden. Maisbetonte Fruchtfolgen be-nötigen mehr als die gesetzlich vorgegebene Mindestlager-kapazität, da eine pflanzenbaulich sinnvolle Ausbringung von Wirtschaftsdüngern und Gärrückständen nur über einen sehr kurzen Zeitraum im Frühjahr erfolgen kann (Fenz und Schwaiger, 2006). Lagerkapazitätsreserven über das gesetz-liche Mindestvolumen hinaus erfordern ebenfalls durch feuchte Witterung oder nasse Böden schwer zu befahrene Standorte aufgrund eines erhöhten Flexibilitätsbedarfs bei der Wahl des Ausbringungstermins sowie Betriebe mit gerin-ger Schlagkraft bei der Ausbringung. Zusätzlich beeinflusst die Fristigkeit der Entscheidung die Investitionsbereitschaft. In Regionen mit kleineren Betriebsgrößen mit zum Teil un-gesicherter Hofnachfolge, wie beispielsweise Österreichs Bergregionen, ist die Investitionsbereitschaft für Lagerka-pazitätsausweitungen besonders gering (Fenz und Schwaiger, 2006). Somit kann ggfs. eine Reduktion des Tierbestandes dem Ausbau von Lagerkapazität vorgezogen werden - al-lerdings mit weitreichenden wirtschaftlichen Folgen. Die einzelbetriebliche Bewertung von Lagerkapazität kann in solchen Situationen helfen, die richtigen Entscheidungen zu treffen.

Die situationspezifisch als sinnvoll erachtete Nutzung der verfügbaren Lagerkapazität kann aktuell in der Praxis häufig nur durch Voranschlagsrechnungen erfolgen. Meist resultieren Allokationsentscheidungen, die nur auf eine si-echere Überbrückung der Ausbringungsverbotszeiträume abzielen. Betriebswirtschaftlich konsequente Allokations-entscheidungshilfen zur Düngung sollten daher simultan die optimale Nutzung der Lagerkapazität über die Winter-monate unter Berücksichtigung aller Verwendungs- und Verwertungsalternativen auf allen Schlägen über das gesamte Düngejahr ermitteln.

2.3 Wirtschaftsdüngerwert

Die Ermittlung des Wirtschaftsdüngerwertes erfolgt in der Officialberatung häufig basierend auf den Inhaltsstoffen des jeweiligen Wirtschaftsdüngers. Diese werden unter Berück-sichtigung durchschnittlicher Wirkungsäquivalente anhand von Nährstoffpreisen ähnlich wirkender Mineraldünger be-wertet (LKSH, 2019). Andere Ansätze erweitern das Be-wertungsproblem zusätzlich um die zu berücksichtigenden Ausbringungskosten. Unserer Auffassung nach muss die Be-wertungsfrage um schlagspezifische, das heißt kultur- und bodenartabhängige Nährstoffbedarfswerte, im Jahresverlauf schwankende Stickstoffnutzungskoeffizienten und um die im Betrieb vorhandene Lagerkapazität erweitert werden. Die nicht vollständige Nutzung eines Wirtschaftsdüngerlagers über die Wintermonate kann zu einer erhöhten Zahlungsbe-reitschaft bei abgebenden Betrieben führen, wenn diese sich der Lagerungsproblematik über die Wintermonate entziehen können. Die als wertlos erachtete Lagerkapazität erlangt so einen betriebswirtschaftlichen Wert. Im anderen Fall kann knappe Lagerkapazität zu einer schlechteren Verwertung des aufgenommenen Wirtschaftsdüngers führen - bedingt durch erhöhte Wirtschaftsdüngerabgabe im Herbst einherge-

hend mit schlechteren Stickstoffwirkungsäquivalenten - und somit den Wert dieses deutlich senken. Die Werte der in den Lagern vorhandenen Wirtschaftsdünger (und damit auch die Werte der Lager) erreichen ihre Maxima erst bei allokatons-optimaler Ausbringung bei simultaner Berücksichtigung der inneren Verkehrslage der Betriebsflächen und weiterer vertraglicher Verflechtungen mit anderen Betrieben.

3 Herangehensweise

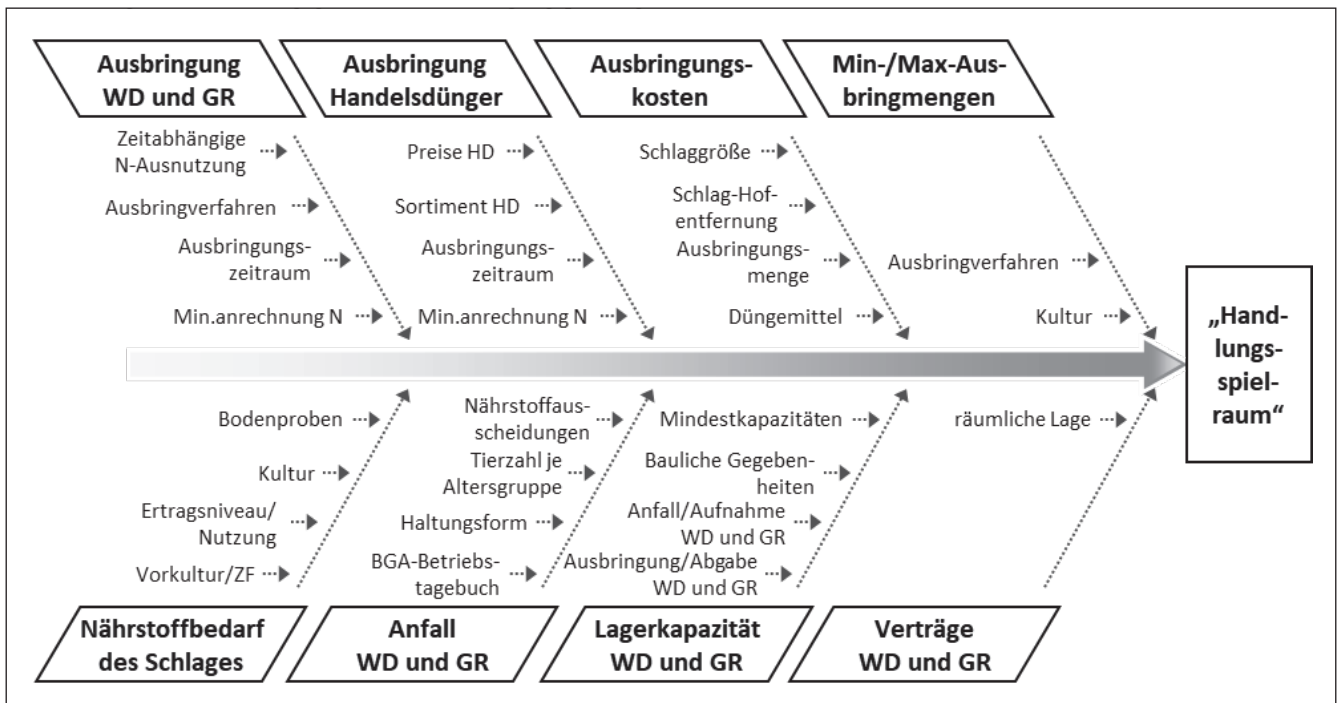
Zur Allokationsoptimierung von Düngemitteln entwickelten Buhk und Sundermeier (2019a; b) basierend auf dem Beitrag von Riebe und Sundermeier (1981) einen praxisorientierten, situationsspezifischen Optimierungsansatz zur Einhaltung der deutschen DüV, welcher bereits bei der Düngungsplanung alle Nährstoffbilanzierungspflichten und -obergrenzen sowie verordnungskonforme Stickstoffwirkungsäquivalente berücksichtigt. Der Methodenübergang zur gemischt-ganz-zahligen Programmierung (MILP) ermöglicht die von Riebe und Sundermeier (1981) selbst angedeuteten Verbesserungsvorschläge: Der Ansatz vermeidet Kleinst- und Splittermengen und bildet degressive Ausbringungskosten approximativ ab. Der steigende Detailgrad in der Modellierung erhöht die Akzeptanz in der Planungspraxis. Lagerkapazitätsentscheidungen hängen stark von der einzelbetrieblichen Situation

ab (vgl. Abschnitt 2.2), sodass die Feinkörnigkeit in der Modellierung vorteilhaft erscheint.

Zielfunktion ist die Minimierung der Gesamtdüngungskosten, welche sich aus Ausgaben für Handelsdüngemittel, schlag-hofentfernungs- und schlaggrößenabhängigen degressiven Ausbringungskosten für alle Handels-, Wirtschaftsdünger und Gärückstände, Kosten und Vergütungen aus Wirtschaftsdünger- bzw. Gärückstandsaufnahme- und -abgabeverträgen und diversen Strafkostenansätzen bei Nichteinhaltung gewisser Restriktionen (z.B. der schlagspezifischen Kalkbilanz) zusammensetzen. In den Nebenbedingungen werden neben der termin- und schlagspezifischen Deckung der Nährstoffbedarfswerte, neben der Düngeverordnung und neben Anforderungen an Mindest- und Höchstausräumungen für alle Düngemittel auch der zeitlich differenzierte Anfall und Verbleib der Wirtschaftsdünger und die Einhaltung der maximalen Lagerkapazität über das gesamte Düngungsjahr sichergestellt. Für den Landwirt entstehen praxistaugliche Ergebnisberichte, die wirtschaftlich optimale, terminspezifische Allokationsempfehlungen für jeden Schlag enthalten und durch Lagerübersichten ergänzt werden.

Abbildung 1 fasst die wichtigsten Einflussgrößen zur Ableitung des Handlungsspielraums des Landwirts bei der Düngung als Basis zur Erzeugung einer MILP-Matrix zusammen. Damit bildet dieser Ansatz sämtliche Reaktionsmöglichkeiten auf knappe Lagerkapazitäten ab.

Abbildung 1: Entscheidungsgrößen bei der Düngungsplanung und ihre Einflussfaktoren.



Quelle: Buhk und Sundermeier, 2019a.

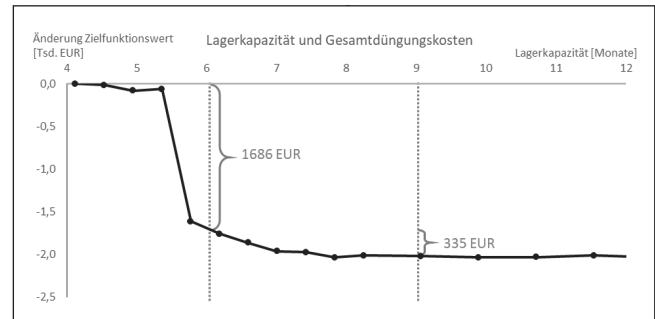
Mithilfe der gemischt-ganzzahligen Linearen Programmierung (MILP) konnten zur Erörterung der Forschungsfragen für unterschiedliche Lagerkapazitäten einzelbetrieblich optimale Allokationsempfehlungen numerisch ermittelt werden. Dabei wurde die Lagerkapazität zunächst ausgehend von der Ist-Situation im Beispielbetrieb in 5%-Schritten vergrößert und verkleinert. Mithilfe der DüV wurden zwei Szenarien zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage genauer betrachtet. Szenario 1 sah den Übergang des Beispielbetriebes von aktuell nicht verordnungskonformen vier Monaten Lagerkapazität zu verordnungskonformen sechs Monaten vor. Zur Umrechnung der physischen Lagerkapazität in eine zeitliche Dimension wurden Richtwerte zum Wirtschaftsdüngeranfall in der Tierhaltung nach DüV herangezogen (Sickersaft und Niederschlagswasser sind unberücksichtigt). Szenario 2 betrachtete die zusätzliche Ausweitung auf neun Monate zur Überprüfung, ob einzelbetrieblich betriebswirtschaftlich Anreiz besteht, die Lagerkapazität über das gesetzliche Minimum hinweg auszudehnen.

4 Ergebnisse

Für einen real existierenden norddeutschen Beispielbetrieb mit 130 Kühen, deren kompletter Nachzucht, Mast der eigenen Bullenkälber und einer vertraglichen Verflechtung mit einer Biogasanlage entstanden jeweils Allokationsoptima für die 30 Schläge auf insgesamt 180 ha. Der Betriebsleiter konnte im Rahmen der vertraglichen Verflechtung mit der Biogasanlage zwischen einem Wirtschaftsdüngertauschvertrag (Güllelieferung an eine Biogasanlage, Rücklieferung von Gärrückstand) und einem Wirtschaftsdüngerabgabevertrag (reine Gülleabgabe an die Biogasanlage) jährlich neu wählen. Der Vertragswechsel ging mit einer Änderung der Konditionen einher: Ein Kubikmeter Wirtschaftsdüngerabgabe mit Gärrückstandsrücklieferung erlöste im Beispielbetrieb 2 EUR/m³, während die reine Gülleabgabe 3 EUR/m³ erzielte. Schlag-Hofentfernungen bis zu 15 km und unterschiedliche Schlaggrößen bis zu 20 ha erhöhten die Komplexität bei der Allokationsoptimierung der in drei Lagern gelagerten Wirtschaftsdünger mit unterschiedlichen Inhaltsstoffkombinationen auf die Schläge zusätzlich.

Abbildung 2 zeigt den Einfluss veränderter Lagerkapazitäten auf die Gesamtdüngungskosten. Diese sinken bei einer Ausweitung der betrieblichen Lagerkapazität von nicht verordnungskonformen 4 Monaten (Basis) auf 6 Monate zur Einhaltung der DüV in diesem Betrieb im betrachteten Jahr um knapp 1.700 EUR vor Investitionskosten. Eine Erweiterung um ca. 1.200 m³ Lagerkapazität zur Einhaltung der DüV ist für 1.700 EUR jährlich je nach Bauweise des Wirtschaftsdüngerlagers betriebswirtschaftlich zu befürworten. Ein Anreiz für eine Ausweitung der Lagerkapazität über das gesetzliche Minimum hinaus auf 9 Monate, besteht dagegen nicht, da der Zubau von ca. 1.700 m³ Lagerkapazität (benötigt zum Übergang von 6 Monaten auf 9 Monate) nicht durch eine Verminderung der Düngungskosten um lediglich 335 EUR finanzierbar ist.

Abbildung 2: Änderung des Zielfunktionswertes in der Optimallösung bei unterschiedlicher Lagerkapazität im Betrieb (Fixkosten der Investition sind in der Zielfunktion unberücksichtigt).



Quelle: Eigene Darstellung.

Ursachen für die unterschiedlichen Auswirkungen der Lagerkapazitätsausweitung auf die Gesamtdüngungskosten fasst Tabelle 1 zusammen. Die enorme Absenkung des Zielfunktionswertes beim Übergang auf 6 Monate Lagerkapazität ist neben den Allokationsänderungen und gleichzeitiger Einstellung einer Wirtschaftsdüngung nach dem letzten Grünschnitt im Vertragswechsel begründet. Durch den Übergang vom Abgabevertrag zu einem Tauschvertrag werden zusätzlich, den Zielfunktionswert mindernde, 3.000 EUR Erlöst (3.000 m³ Abgabe jährlich × 1 EUR/m³ zusätzlich). Allerdings kompensieren die im Verhältnis höheren Ausbringungskosten der Wirtschaftsdünger und Gärrückstände einen Teil der zusätzlichen Erlöse, da durch den Wirtschaftsdüngertausch insgesamt mehr Wirtschaftsdünger und Gärrückstand ausgebracht werden muss, sodass der Zielfunktionswert (die Gesamtdüngungskosten) lediglich um 1.686 EUR sinkt. Jegliche Kosteneinsparung durch Lagerkapazitätsausweitungen über das gesetzliche Minimum (6 Monate) hinaus kann allein auf veränderte Allokationsempfehlungen auf die Schläge, d.h. zu anderen Terminen, auf anderen Schlägen und in anderen Mengen, zurückgeführt werden.

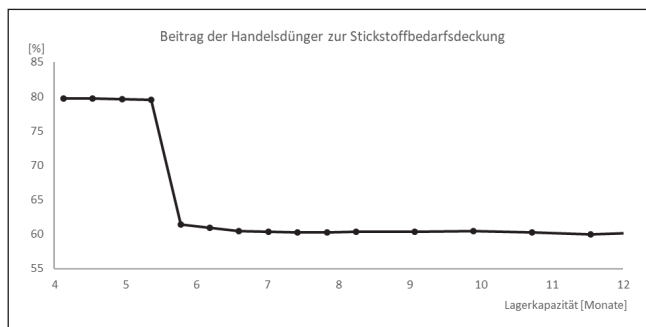
Der Beitrag der Handelsdünger zur Stickstoffbedarfsdeckung auf einem durchschnittlichen Hektar Betriebsfläche ändert sich analog zu den Gesamtdüngungskosten bei einer Ausweitung der Lagerkapazität (siehe Abbildung 3). Bei geringer Lagerkapazität tragen Handelsdünger im Durchschnitt ca. 80% zur Stickstoffbedarfsdeckung bei, da über den Abgabevertrag Wirtschaftsdüngerstickstoff an andere Betriebe abgegeben wird und somit nicht zur Bedarfsdeckung beitragen kann. In der Folge müssen mehr Handelsdünger zugekauft werden und die Gesamtdüngungskosten steigen. Mit einer Umstellung des Vertrages auf den Wirtschaftsdüngertauschvertrag und durch die Schaffung von Lagerkapazität für 5,8 Monate muss weniger Handelsdüngerstickstoff zugekauft werden. Insgesamt wird 23% weniger Handelsdüngerstickstoff zur Bedarfsdeckung benötigt.

Tabelle 1: Reaktion des Beispielbetriebes auf die Ausweitung von Lagerkapazität in den Optimallösungen.

Lagerkapazität [m³]	Änderung [Monate]	Änderung [%]	Vertragswahl Biogasanlage	weitere Gülle- abgabe	Gülleausbringung Spätherbst	Allokations- änderungen
2.375	4,1	0	Abgabevertrag	nein	ja	ja
2.613	4,5	+ 5	Abgabevertrag	nein	ja	ja
2.850	4,9	+ 10	Abgabevertrag	nein	nein	ja
3.088	5,4	+ 15	Abgabevertrag	nein	nein	ja
3.325	5,8	+ 20	Tauschvertrag	nein	ja	ja
3.563	6,2	+ 25	Tauschvertrag	nein	nein	ja
3.800	6,6	+ 30	Tauschvertrag	nein	nein	ja
4.038	7,0	+ 35	Tauschvertrag	nein	nein	ja
4.275	7,4	+ 40	Tauschvertrag	nein	nein	ja
4.513	7,8	+ 45	Tauschvertrag	nein	nein	ja
4.750	8,2	+ 50	Tauschvertrag	nein	nein	ja
5.225	9,1	+ 60	Tauschvertrag	nein	nein	ja
5.700	9,9	+ 70	Tauschvertrag	nein	nein	ja
6.175	10,7	+ 80	Tauschvertrag	nein	nein	ja
6.650	11,5	+ 90	Tauschvertrag	nein	nein	ja
7.125	12,4	+ 100	Tauschvertrag	nein	nein	ja

Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 3: Anteilige Stickstofflieferung der Handelsdünger am Gesamtbedarf eines durchschnittlichen Hektars Betriebsfläche.

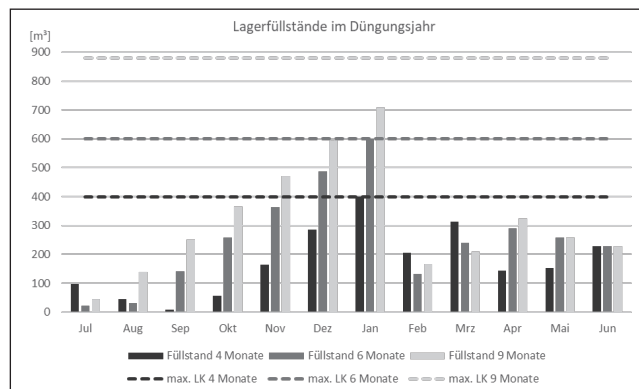


Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4 stellt zur Erklärung der Allokationsänderungen die Lagerfüllstände eines der Güllelager zu Monatsende für jeden Monat des Düngungsjahres dar. Bei einer Ausweitung der Lagerkapazität von 4 auf 6 Monate wird die maximale Lagerkapazität Ende Januar weiterhin vollständig ausgeschöpft. Die Erweiterung auf 9 Monate Lagerkapazität wird zum gleichen Zeitpunkt nicht vollständig ausgeschöpft. Diese Ausweitung der Lagerkapazität führt lediglich zu einem zusätzlichen Wirtschaftsdüngertransfer aus dem Herbst in das Frühjahr von gut 100 m³. Darüber hinaus gehende Lagerkapazität wird nicht genutzt – sie ist also wirtschaftlich wertlos.

Die über alle Wirtschaftsdünger aufaddierten Ausbringungsmengen im jeweiligen Monat stellt Abbildung 5 für unterschiedliche maximale Lagerkapazitäten dar.

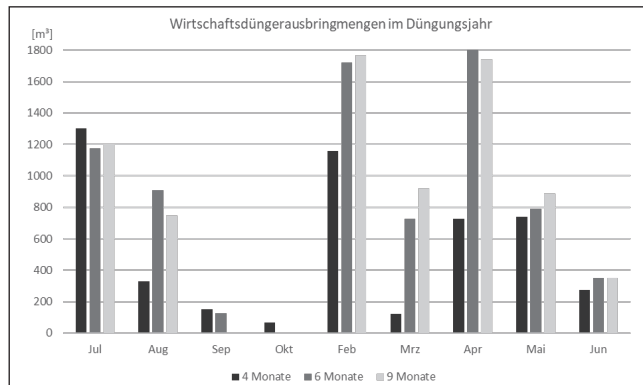
Abbildung 4: Lagerfüllstände eines Güllelagers im Betrieb am Monatsende in der Optimallösung bei unterschiedlicher maximaler Lagerkapazität (max. LK; 4, 6 und 9 Monate).



Quelle: Eigene Darstellung.

Eine Ausweitung der Lagerkapazität auf 6 Monate kann die Wirtschaftsdüngerausbringung nach dem letzten Grünlandschnitt im Spätherbst vollständig verhindern. Die Wirtschaftsdüngung im September kann durch eine weitere Ausdehnung auf 9 Monate eingestellt werden. Im Frühjahr empfiehlt das Modell erhöhte Ausbringungsmengen in den Szenarien mit höherer Lagerkapazität. Bei 4 Monaten maximaler Lagerkapazität ist, bedingt durch die Abgabe von Wirtschaftsdünger an die Biogasanlage ohne Rücklieferung, insgesamt deutlich weniger Wirtschaftsdünger zur Ausbringung vorhanden.

Abbildung 5: Monatliche Wirtschaftsdüngerbringmengen über das Düngungsjahr (DüV-Sperrfrist über die Wintermonate ausgenommen) in der Optimallösung bei unterschiedlicher maximaler Lagerkapazität (4, 6 und 9 Monate).



Quelle: Eigene Darstellung.

Für diesen Betrieb generalisierbare Zusammenhänge zwischen einer Ausweitung der Lagerkapazität und der kulturspezifischen Ausbringmenge sowie der Schlag-Hof-Entfernung konnten in diesem Jahr nicht beobachtet werden. Die Ausbringungsempfehlungen sahen über alle Szenarien hinweg den gleichen Wirtschaftsdünger vorzugsweise für die gleiche Kultur vor, jedoch nicht zwangsläufig zum gleichen Termin in der gleichen Menge auf den gleichen Schlägen.

Die optimale Lagerkapazität für das dargestellte Wirtschaftsdüngerlager (siehe Abbildung 4) lässt sich im betrachteten Düngjahr auf 7 Monate beziffern, da ab diesem Punkt der Zielfunktionswert ein „Plateau“ erreicht (siehe Abbildung 2) und das Lager vollständig ausgeschöpft werden würde (siehe Abbildung 4). Letzten Endes entscheiden die Baukosten darüber, ob die im Vergleich zur Basis (4 Monate Lagerkapazität) zusätzlich erlösten 2.000 EUR einen Neubau rechtfertigen. Bei einer derartigen Entscheidung sind auch die Füllstände der anderen Wirtschaftsdüngerlager zu beachten.

5 Diskussion

Der Planungsansatz von Buhk und Sundermeier (2019a; b) eignet sich zur Unterstützung von Lagerkapazitätsentscheidungen besonders durch die Berücksichtigung sämtlicher operativer Handlungsoptionen bei der Düngung. Die simultane Berücksichtigung der Allokationsmöglichkeiten der Düngemittel sowohl zeitlich über das Düngjahr als auch räumlich auf die Schläge führt zur bestmöglichen Verwertung der Wirtschaftsdünger. Gerade diese Simultaneität im Optimierungsprozess können praxisübliche heuristische Voranschlagsrechnungen nicht leisten, da sequentiell über die Zeit und schlagweise nacheinander Düngungsvorschläge erarbeitet werden. Wirtschaftsdünger verfügbarkeit und Ausnutzung der Lagerkapazität beruhen zumeist auf Erfahrungswerten. Damit kann der Handelsdüngereinsatz über

Voranschläge meist nur etwas vermindert und nicht durch die bestmögliche, nährstoffeffizienteste Nutzung der Wirtschaftsdünger, wie es der Planungsansatz von Buhk und Sundermeier (2019a; b) umsetzt, methodisch minimiert werden.

Die feinkörnige Abbildung des Betriebsgefüges mit sämtlichen Lagerstätten und Schlägen ermöglicht eine Umsetzung der Ergebnisse auf landwirtschaftlichen Betrieben und damit den Einsatz in der Planungspraxis. Die Allokationsempfehlungen unterscheiden sich von Schlag zu Schlag, sodass eine Aggregation mehrerer Schläge (z. B. über Kulturen hinweg) mit Informationsverlusten und der Übererfüllung einzelner Nährstoffbedarfswerte einhergeht. Bei Lagerkapazitätsentscheidungen führt eine Aggregation zu einer Fehleinschätzung der benötigten Lagervolumina. Dies kann zu Akzeptanzproblemen in der Planungspraxis führen.

Ein anderer Modellierungsansatz, spezialisiert auf eine gesamtbetriebliche Evaluierung der novellierten Düngerverordnung, erweitert mit gemischt ganzzahliger Programmierung (MIP) den Handlungsspielraum des Landwirtes um Investitionsmöglichkeiten in Ausbringtechnik und Wirtschaftsdüngerlager, In- bzw. Extensivierung der Pflanzenproduktion und Anpassung der Tierhaltung und der Intensität, vernachlässigt jedoch die innerbetriebliche Struktur der Schläge (Kuhn et. al, 2019). Mit diesem Ansatz können lediglich die Anbauverhältnisse der Kulturen im Betrieb optimiert werden. Eine Umsetzung dieser Anbauverhältnisse in der Planungspraxis auf den Schlägen kann durch unterschiedliche Schlaggrößen und Bodenarten nicht immer gewährleistet werden. Zudem vernachlässigt dieser Ansatz die einfachste Form der Reaktion auf knappe Lagerkapazitäten: Veränderte Allokationen auf die Schläge. Tabelle 1 verdeutlicht die Rolle der Allokationsänderungen: Wird die Lagerkapazität weiter verknappt, können allein diese weiteren Lösungen ermöglichen (Beispiel: Hält der Beispielbetrieb anstatt 5,8 Monaten Lagerkapazität nur 5,4 Monate Lagerkapazität vor, kann er diesen Lagerkapazitätsverlust vollständig durch Allokationsänderungen kompensieren). Unser Planungsansatz kann somit einzelbetrieblich das Potential der optimalen Allokationen bei unterschiedlichen Lagerkapazitäten numerisch ermitteln. Auch Voranschlagsrechnungen garantieren keine bestmögliche Verwertung der Wirtschaftsdünger bei gegebener Lagerkapazität, da sie kein simultanes Optimierungsverfahren zugrunde legen, und schöpfen damit das Potential der Allokationsoptimierung nicht vollständig aus.

Eine Wirtschaftsdüngerabgabe an andere Betriebe kommt für diesen Beispielbetrieb mit diesem Modellierungsansatz erst bei knappen Lagerkapazitäten zum Zuge. Wirtschaftsdünger erlangt durch die Einsparung von Handelsdüngern seinen Wert. Eine effiziente Nutzung der Wirtschaftsdünger erhöht ihren Wert damit weiter (vgl. Abschnitt 2.3). Auch für reine Ackerbaubetriebe lohnt somit die Wirtschaftsdüngeraufnahme zum Nulltarif.

Mit einer Lagerkapazität von 8,2 Monaten befindet sich der Beispielbetrieb bereits über dem gesetzlichen Minimum. Betriebswirtschaftlich besteht derzeit kein weiterer Ausweitanreiz. Die von der DüV vorgegebene Mindestlager-

kapazität kann für den betrachteten Betrieb im Planjahr als sinnvoll bestätigt werden. Allerdings sind Niederschlagswasser und Sickersaft im Wirtschaftsdüngeranfall nicht berücksichtigt, sodass hierfür zusätzlich Lagerkapazität vorgehalten werden muss.

6 Schlussfolgerungen

Die betriebswirtschaftliche Bewertung des Ersparnispotentials bei einer Lagerkapazitätsausweitung ist komplex, da Faktoren, wie z.B. Ausbringungskosten für Wirtschaftsdünger (abhängig von Schlaggröße und Schlag-Hofentfernung) Mindestausbringungsmengen, usw., den Wirtschaftsdüngereinsatz beeinflussen. Der in diesem Beitrag dargestellte MILP-basierte Düngeallokationsansatz kann Lagerkapazitätsveränderungen einzelbetrieblich auch vor betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten erproben und gleichzeitig die Düngemittelallokation auf die Schläge optimieren. Die Ausweitung von Lagerkapazität für Wirtschaftsdünger und Gärückstände auf das gesetzliche Minimum kann einzelbetrieblich auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein. Für den Betrieb der Fallstudie lohnt sich die Erweiterung der Lagerkapazität über das gesetzliche Minimum hinaus auf 9 Monate nicht.

Literatur

- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2017) Düngeverordnung - DüV. Deutschland.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) (2018) Nitrat-Aktionsprogramm-Verordnung - NAPV. Österreich.
- Buhk, J.-H. und Sundermeier, H.-H. (2019a) Düngungsoptimum digital: Entscheidungs-„Navi“ gemäß Düngeverordnung in Sicht. Schriftenreihe der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel, 2019, 126, 29-36. URL: <https://www.hochschultagung.ae.uni-kiel.de/de/beitraege/langfassung-2019> (01.10.2019).
- Buhk, J.-H. und Sundermeier, H.-H. (2019b) Düngungsplanung mit gemischt-ganzzahliger Linearer Programmierung: bedarfsgerecht, betriebsspezifisch, kostenminimal und verordnungskonform. In: Meyer-Aurich, A., Gandorfer, M., Barta, N., Gronauer, A., Kantelhardt, J., Floto, H. (Hrsg.) Digitalisierung für landwirtschaftliche Betriebe in kleinstrukturierten Regionen – ein Widerspruch in sich?. Lecture Notes in Informatics 287, Referate der 39. GIL-Jahrestagung. Bonn.: Köllen Druck+Verlag GmbH, 31-36.
- Fenz, R. und Schwaiger, K. (2006) Spannungsfeld Gewässerschutz – Landwirtschaft. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 58, 9-10, 117-120. <https://doi.org/10.1007/BF03164490>
- Knittel, H., Albert, E. und Ebertseder, T. (2012) Praxishandbuch Dünger und Düngung. Clenze: Agrimedia Verlag, 16.
- Kuhn, T., Grauer, Z. und Holm-Müller, K. (2019) Einzelbetriebliche Modellierung der Auswirkung von novellierter Düngegesetzgebung und agrarpolitischer Entwicklung auf landwirtschaftliche Betriebe in NRW. Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Forschungsbericht Nr. 192, 11-16.
- LKSH (Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein) (2019) Wertermittlungsprogramm Wirtschaftsdünger. URL: <https://www.lksh.de/landwirtschaft/duengung/naehrstoffvergleich-bilanzierung/direkt-zum-wertermittlungsprogramm-wirtschaftsduenger/> (04.10.2019).
- RAT (Rat der Europäischen Gemeinschaften) (1991) Richtlinie des Rates zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen. Brüssel.
- Riebe, K. und Sundermeier, H.-H. (1981) Computergestützte Minimierung der Düngungskosten als Entscheidungshilfe in der pflanzlichen Produktion. German Journal of Agricultural Economics/Agrarwirtschaft, 30, 5, 148-154. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.300115>
- Schliephake, W. und Müller, P. (2014) Strategien zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz im Hinblick auf die EU-Wasserrahmenrichtlinie, den Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel. Schriftenreihe des Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen, 24, 16.
- Taube, F., Ballmann, A., Bauhus, J., Birner, R., Bockelmann, W., Christen, O., Gauly, M., Grethe, H., Holm-Müller, K., Horst, W., Knierim, U., Latacz-Lohmann, U., Nieberg, H., Qaim, M., Spiller, A., Täuber, S., Weingarten, P. und Wiesler, F. (2013) Novellierung der Düngeverordnung: Nährstoffüberschüsse wirksam begrenzen. Berichte über die Landwirtschaft, 2013, Sonderheft 2019, 7.