



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 104 / Ausgabe 02

Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis

Forschungsinfrastrukturen auf verschiedenen Skalenebenen nutzen und verbinden

- am Beispiel von Daten zur Phosphordüngung im Ackerbau Norddeutschlands

Anika Hartmann, Paul Winklhofer, Sabine Andert, Silke Hüttel, Bettina Eichler-Löbermann, Bärbel Gerowitt

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	1
1 EINLEITUNG	2
1.1 FORSCHUNGSINFRASTRUKTUREN	2
1.2 PHOSPHORDÜNGUNG IN DER LANDWIRTSCHAFT	3
1.3 ZIELE	3
2 REGIONALE BETRIEBSNETZE	5
2.1 RAUM UND ZEIT	5
2.2 PHOSPHOREINSATZ	6
2.2.1 ERFASSUNG	6
2.2.2 ZUFUHR VON PHOSPHOR	8
2.2.3 ZEITLICHE ENTWICKLUNGEN	10
2.3 ZWISCHENFAZIT REGIONALE BETRIEBSNETZE	12
3 BEISPIELBETRIEB	13
3.1 RAUM UND ZEIT	13
3.2 PHOSPHOREINSATZ	13
3.2.1 ERFASSUNG	13
3.2.2 ZUFUHR VON PHOSPHOR	13
3.2.3 ZEITLICHE ENTWICKLUNGEN	14
3.3 ERTRÄGE	15
3.4 BUDGETIERUNG UND BEMESSUNG	16
3.5 ZWISCHENFAZIT BEISPIELBETRIEB	19
4 LANGZEITFELDVERSUCH	20
4.1 RAUM UND ZEIT	20
4.2 PHOSPHOREINSATZ	20
4.2.1 ERFASSUNG	20
4.2.2 ZUFUHR VON PHOSPHOR	20
4.3 ERTRÄGE	22
4.4. BUDGETIERUNG UND BEMESSUNG	24
4.5 ZWISCHENFAZIT LANGZEITVERSUCH	25
5. SCHLUSSFOLGERUNGEN	25
5.1 BEISPIEL P-DÜNGUNG	26
5.2 FORSCHUNGSINFRASTRUKTUREN	27

ZUSAMMENFASSUNG	28
SUMMARY	29
LITERATURVERZEICHNIS	29
DANK	31
ANSCHRIFT DER AUTOREN	32

1 Einleitung

Forschung benötigt Infrastrukturen, um Ergebnisse und Erkenntnisse zu generieren. Klassisch gehören dazu in der Agrarforschung bauliche Infrastrukturen wie Tierställe, Gewächshäuser oder Feldversuchsstationen und räumliche Strukturen wie Versuchs- und Erhebungsflächen. Seit ca. 10 Jahren wird der Begriff „Forschungsinfrastrukturen“ zunehmend und teils gezielt auf die Beteiligung landwirtschaftlicher Stakeholder und die Nutzung von realen Daten ausgerichtet. Ausgehend von der EU-Forschungsförderung haben Schlüsselworte wie „on-farm research“, Reallabore oder Landschaftsexperimente inzwischen den Weg in die nationalen Programme gefunden. Die Motivation hierfür ist die Anwendungstauglichkeit und Skalierung von Ergebnissen für das „wirkliche Leben“. Forschungsinfrastrukturen sind aber nicht zwangsläufig neu – im Gegenteil, Forschung hat sie immer und auch auf verschiedenen Skalen genutzt.

1.1 Forschungsinfrastrukturen

In der ackerbaulichen Feldforschung sind Feldversuche mit Laufzeiten länger als drei Jahre eine bewährte und tragfähige Basis, weil die Ergebnisse auch langfristige Auswirkungen erfassen. Das gilt für alle Anbaumethoden - für Düngungsversuche ist die zeitliche Komponente besonders wichtig.

Die Hochskalierung von Erkenntnissen aus Feldversuchen auf betriebliche Ebene stellt eine zentrale Herausforderung dar. Hierbei spielen Beispielbetriebe eine entscheidende Rolle. Diese Betriebe setzen wissenschaftlich fundierte Düngestrategien um und liefern praxisnahe Daten zu ihrer Wirksamkeit. Durch kontinuierliches Monitoring können diese Betriebe als Schnittstelle zwischen Wissenschaft und landwirtschaftlicher Praxis fungieren (SCHRÖDER ET AL., 2020).

Forschungsergebnisse von Einzelbetrieben auf größere Regionen zu übertragen, erfordert den Abgleich mit Daten von mehreren Betrieben in spezifischen Regionen. Diese können als Betriebsnetze zusammengefaßt werden (Roßberg et al. 2018). Regionale Betriebsnetze dienen als Plattformen für systematische Datenerhebungen, Kooperationen zwischen Landwirten und Forschern sowie der Umsetzung innovativer Verfahren und Strategien. Betriebsdaten - regional in Netzen zusammengefaßt - helfen große räumliche Skalen abzudecken und liefern wertvolle Langzeitdaten zur Variabilität der Produktion in unterschiedlichen Landschaftsräumen. Als „Farmers-based“ experimentelle Strukturen werden sie im Farming System Research bereits seit den 1980er Jahren genutzt (Norman et al. 1994). Abstufungen ergeben sich aus der Aufgabenverteilung zwischen Wissenschaftlern und Landwirten. Unbeeinflusste Betriebsdaten gehören der Kategorie „Farmer managed and farmer implemented“ an. Sie geben eine Annäherung an die regionale Realität der agrarischen Produktionsmethoden. Durch die

Nutzung digitaler Plattformen zur Erfassung und Analyse betrieblicher Daten können regionale Betriebsnetze zu Wissensspeichern und Analyseplattformen werden.

1.2 Phosphordüngung in der Landwirtschaft

Phosphor (P) ist ein wichtiger Makronährstoff in der Pflanzenernährung und wird in der Landwirtschaft durch mineralische und organische Düngemittel bereitgestellt. Mineralischer P ist eine begrenzte Ressource und macht ca. 23 % des weltweiten Düngemiteleinsatzes aus (SMIT ET AL., 2009). Während durch Dünger oder atmosphärische Einträge jährlich nur etwa 3,9 kg P pro Hektar auf landwirtschaftlich genutzten Flächen angereichert werden, gehen etwa 56,3 kg P/ha verloren (ALEWELL ET AL., 2020). Diese P-Verluste tragen zur Eutrophierung von Gewässern bei, was die Wasserqualität beeinträchtigt (YUAN ET AL., 2018).

Kulturpflanzen benötigen P für essenzielle Funktionen, darunter den Energiehaushalt, die Zellteilung sowie das Wachstum von Wurzeln und Früchten. Ziel der P-Düngung ist es, den Bedarf der Pflanzen optimal zu decken und gleichzeitig die langfristige Erhaltung eines P-Vorrats im Boden in der Gehaltsklasse C zu gewährleisten, die als optimal gilt (SMIL, 2000; KOTSCHI, 2015). Auf der anderen Seite verfügen Pflanzen und Mikroorganismen über verschiedene Mechanismen zur P-Mobilisierung, die selbst bei suboptimalen P-Gehalten im Boden die Bioverfügbarkeit von P sicherstellen (HU ET AL., 2023, RICHARDSON ET AL., 2011). In dem Zusammenhang besteht die Tendenz, die Grenzwerte für die P-Gehaltsklassen im Boden abzusenken (TAUBE ET AL., 2015).

1.3 Ziele

Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, inwiefern vorhandene unterschiedlich skalierte Forschungsinfrastrukturen innerhalb eines spezifischen Forschungskontextes übergreifende Erkenntnisgewinne ermöglichen. Am Beispiel der P-Düngung nutzen wir Daten auf drei verschiedenen Skalen, die sich von regionalen Betriebsdaten über einen Beispielbetrieb bis zu einem Langzeitversuch erstrecken (Tab. 1).

Für die regionalen Betriebsdaten wurden in fünf Regionen Norddeutschlands Schlagkarteien landwirtschaftlicher Betriebe und die darin verzeichneten P-Düngungsquellen im Zeitraum von 2010 bis 2018 herangezogen. Nach Roßberg et al (2018) sind dies regionale Betriebsnetze, in denen allerdings die Daten nicht kontinuierlich, jährlich sondern retrospektiv am Ende des Zeitraums erfaßt wurden. Methodisch ermöglichen diese Daten eine umfassende und regions- sowie betriebsübergreifende Analyse der P-Zufuhr durch den Düngereinsatz (Kap. 2).

Ein weiterer Analyseschritt basiert auf Daten eines landwirtschaftlichen Betriebs mit vollständigen Aufzeichnungen zur P-Düngung aus den Jahren 2001 bis 2014. Dieser Beispielbetrieb plant und erfasst relevante Kennzahlen der P-Düngung nach guter fachlicher Praxis (GFP), einschließlich P-Zufuhr, Erntemengen und daraus abgeleiteter P-Abfuhr (vgl. Kap. 3).

Im dritten Analyseschritt ziehen wir Daten eines Langzeitversuchs zur P-Düngung von 1998 bis 2014 heran. In dem Betrachtungszeitraum waren mehrere Düngungsvarianten etabliert, in denen alle Zu- und Abfuhrgrößen wissenschaftlich detailliert erfasst wurden. Langzeit-Feldversuche (Long-Term Field

Experiments, LTFE) bilden eine zentrale Grundlage für die Erforschung der P-Dynamik in Agrarböden, da sie die langfristigen Wirkungen unterschiedlicher Düngestrategien und das Verhalten von Phosphor in Boden-Pflanzen-Systemen unter praktischen Bewirtschaftungsbedingungen abbilden (LEINWEBER ET AL., 2018). Diese Versuche bieten eine hohe wissenschaftliche Aussagekraft. Ein Beispiel hierfür sind experimentelle Parzellen, die über Jahrzehnte hinweg mit verschiedenen P-Düngern oder differenzierten Applikationsraten behandelt werden. Durch kontinuierliche Bodenanalysen und Ertragsmessungen können die Langzeiteffekte von Düngestrategien auf die Bodenfruchtbarkeit, Ertragsstabilität und Nährstoffverluste erfasst werden und damit grundlegende Erkenntnisse zu P-Dynamiken gewonnen werden (MUNTWYLER ET AL., 2023). Aufgrund dieser Datengrundlage sind präzise Bilanzierungen über den gesamten Betrachtungszeitraum möglich (Kap. 4).

Alle Standorte befinden sich in Norddeutschland. Regionale Betriebsnetze, Beispielbetrieb und Langzeitversuch repräsentieren Skalenebenen von Forschungsinfrastrukturen. In der genannten Reihenfolge wird die Skala räumlich kleiner, während die Menge der nutzbaren Information, um die P-Düngung zu beschreiben, detaillierter wird (Tab. 1)

Wir beschreiben die Zufuhr auf allen Skalen durch zwei Indikatoren: die Anteile der Felder mit P-Düngung (Frequenz, „wie oft wurde gedüngt?“) und die P-Menge auf den gedüngten Feldern (Menge, „wenn gedüngt, wie viel?“) (Tab. 2). Im regionalen Betriebsnetz und Beispielbetrieb werden hierfür auch Zeitreihen dargestellt. Im Beispielbetrieb und im Langzeitversuch stehen Daten zum Ertrag und damit zur P-Abfuhr und zur Entwicklung der Bodenvorräte zur Verfügung. Die Ausführungen zu jeder Forschungsinfrastruktur enden mit einem Zwischenfazit. Die Schlussfolgerungen (Kap. 5) betreffen das Beispiel der P-Düngung (5.1) und die Nutzung von Forschungsinfrastrukturen, um Skalengrenzen bei den Erkenntnissen zu überwinden (5.2).

Tab. 1: Skalen und Kenngrößen der genutzten Forschungsinfrastrukturen

	Einheit	Regionales Betriebsnetz	Beispielbetrieb	Langzeitversuch
Räumliche Skala	~ km ²	40	0,1	< 0,01
Zeitliche Skala	Jahre mit Daten	2010-2018	2001-2014	1998-2014
P-Zufuhr	kg/ha * a	erhoben	erhoben	fest
Anteil Flächen mit Zufuhr	%	berechnet	berechnet	fest
Erntemenge	dt/ha * a	n. e.	gemessen	gemessen
P-Abfuhr	kg/ha * a	n. e.	geschätzt mit Standards	gemessen
Boden P-Vorrat		n. e.	Gehaltsklasse Bodenuntersuchung	berechnet
Zufuhrplanung	kg /ha * a	n. e.	nach GFP	fest

GFP = Gute Fachliche Praxis, n. e. = nicht erhoben

2 Regionale Betriebsnetze

2.1 Raum und Zeit

In fünf Regionen Norddeutschlands wurden von je 10 Betrieben pro Region Schlagkarteidaten für die Analysen zur Verfügung gestellt (Abb. 1).

Die regionalen Betriebsnetze sind in vorhergehenden Forschungsarbeiten, die sich mit dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln beschäftigen, aufgebaut worden (ANDERT ET AL. 2015; ANDERT ET AL. 2018). Die Kontakte zu den Betrieben wurden über die regionalen Landwirtschaftsbehörden initiiert. Weitere Betriebe wurden über öffentlich zugängliche Betriebsverzeichnisse in den Regionen gewonnen. Alle einbezogenen Betriebe wurden im Zeitraum von 2010 bis 2018 mindestens einmal persönlich besucht, um Daten auf Betriebs- und Schlagebene zu erheben. Der Kontakt zu den Betrieben erfolgte direkt per Telefon und E-Mail; falls erforderlich, wurden zusätzliche Vor-Ort-Termine durchgeführt.

Die untersuchten Regionen unterscheiden sich klimatisch und strukturell voneinander (Tab. 2):



Abb. 1: Geografische Lage der fünf Gebiete mit regionalen Betriebsnetzken (10 Betriebe/Region) (dunkelgrau), des Beispielbetriebs (x) und des Langzeitfeldversuchs (+).

Diepholz und Uelzen liegen im Nordwesten Deutschlands. Im Durchschnitt haben die Betriebe in Diepholz eine Größe von 228 ha. Tierhaltung ist ein Schwerpunkt in der Region, der Viehbesatz war mit 1,57 deutlich höher als in allen anderen Regionen. In Uelzen ist die Betriebsgröße im Schnitt 144 ha. Mit Bewässerung und einer Infrastruktur von Verarbeitungsbetrieben werden hier Kartoffeln und Zuckerrüben angebaut. Rostock, Fläming und Oder-Spree vereint die Lage in Ostdeutschland. In der Region Rostock waren die Betriebe im Schnitt 857 ha groß und 51 % betreiben Tierhaltung. Die Betriebe in Fläming und Oder-Spree sind mit 2069 ha und 1879 ha noch größer und weisen ein geringeres Ertragspotenzial auf (Tab. 2). Der Viehbesatz war hier höher als in Uelzen und Rostock.

Tab. 2: Strukturelle und klimatische (1981-2010) Eigenschaften der Untersuchungsregionen Diepholz, Uelzen, Rostock, Fläming und Oder-Spree.

Eigenschaften	Diepholz	Uelzen	Rostock	Fläming	Oder-Spree
Mittlere Betriebsgröße (ha)	228	144	857	2069	1879
Mittlere Ackerzahl (0-120)	45	31	42	34	36
Anteil Betriebe mit Tierhaltung (%)	53	26	51	39	28
Mittlerer Viehbesatz (GV ha ⁻¹)	1,57	0,25	0,24	0,53	0,46
Mittlerer Jahresniederschlag (mm)	699	733	618	554	571
Mittlere Jahrestemperatur (°C)	9,8	9,2	9,2	9,8	9,6
Maximalertrag Winterweizen (t ha ⁻¹)	8,2	8,1	8,5	6,5	5,0

Angepasst nach (ANDERT ET AL., 2018; SPELLMANN ET AL., 2017; TRIMPLER ET AL., 2017)

2.2 Phosphoreinsatz

2.2.1 Erfassung

Aus den Feldern in den Schlagkarteien wurde pro Jahr ein Datensatz angelegt; insgesamt waren es 20.258 Datensätze (Abb. 2).

Zunächst wurde die P-Düngung auf Feldebene errechnet. Dabei wurden alle mineralischen und organischen Düngemittel erfasst. Die P-Gehalten der Handelsdünger wurden ermittelt. Für die Wirtschaftsdünger wurden die P-Gehalte der Schlagkarteien genutzt, wenn sie vorhanden waren. Tabelle 3 gibt einen Überblick zu den wichtigsten organischen Düngemitteln und deren von den Betrieben angesetzten P-Gehalte. In den Betriebsnetzen wurde der gesamte angegebene P-Gehalt berücksichtigt; es wurde kein Abschlag für die Verfügbarkeit des P im Boden angesetzt.

Die eingesetzte P-Menge wurde auf Betriebsebene berechnet. Für die P-Menge des Betriebs in einem Jahr wurde die Feldfläche im Verhältnis zur behandelten Betriebsfläche gewichtet. Alle Berechnungen wurden jeweils einmal für organische, mineralische und zusammen für die totale P-Düngung durchgeführt. Mehr Details zu den Berechnungen finden sich bei Winklhofer et al. (2021). Alle Werte sind stets in P angegeben; die regelmäßig auch verwendete Angabe von P₂O₅ wurde immer umgerechnet (Faktor 0,4364).

Tab. 3: Kennziffern zum P-Gehalt der wichtigsten Wirtschaftsdünger und der zusammengefassten mineralischen Düngemittel die in den Betrieben eingesetzt wurden (n = Anzahl Felder auf denen Düngemittel eingesetzt wurde)

Düngemittelgruppe	Einheit	n	Spanne Trockensubstanz- gehalt (%)	Spanne P Gehalt (g) pro Einheit
Biogasgärreste fest	kg	304	16,3–82,0	1,1–5,6
Biogasgärreste flüssig	m ³	3456	1,7–13,0	143,1–1309,2
Gülle Schwein	m ³	1859	1,0–16,0	244,4–1745,6
Gülle Rinder	m ³	3432	1,7–13,0	148,4–1213,2
Trockenkot/Mist Geflügel	kg	1085	25,9–63,3	2,5–13,1
Mist verschiedener Tierarten	kg	1684	16,3–54,6	0,4–4,2
Klärschlamm	kg	177	21,0–35,3	1,0–7,6
Kompost	kg	148	22,2–69,0	1,0–5,0
Mineralischer Dünger fest	kg	7813		0,9–226,9
Mineralischer Dünger flüssig	l	3197		20,6–261,8

Angepasst nach (WINKLHOFFER ET AL., 2021)

Alle 20.258 Datensätze wurden unabhängig von den angebauten Feldfrüchten danach eingeteilt, ob P gedüngt wurde oder nicht (Abb. 2). Für die gedüngten Felder wurde die ausgebrachte P-Menge errechnet, getrennt nach mineralischen und organischen Düngern.

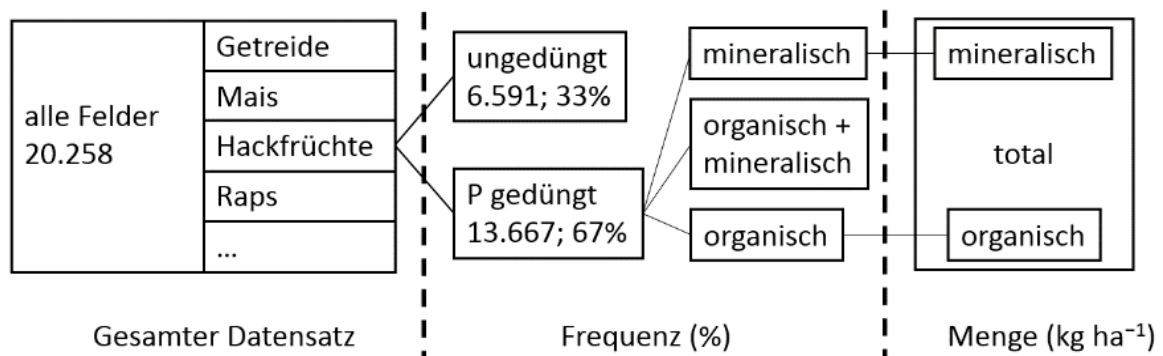


Abb. 2: Datenstruktur und Begriffserklärung der P-Düngerdaten des Betriebsdatensatzes (nach WINKLHOFFER ET AL., 2021).

Aus allen Datensätzen eines Betriebs wurde pro Jahr ein mit den Flächengrößen gewichteter Datensatz erstellt. Pro Betrieb lagen dann neun Werte für den gesamten Untersuchungszeitraum von 2010 bis 2018 vor. Für fünf Regionen, 10 Betriebe und neun Untersuchungsjahre entstanden daraus 450 Datensätze, die nicht von der Betriebsgröße oder Flächenteilungen verzerrt waren.

2.2.2 Zufuhr von Phosphor

Die Frequenz der Düngung wird als Anteil gedüngter Felder an der gesamten Fläche eines Betriebs ermittelt (Abb. 3 A). Die Menge beschreibt die ausgebrachte P-Menge pro Hektar auf den gedüngten Flächen (Abb. 3 B).

Die Betriebsdatensätze zeigen, dass ~75 % der gesamten Ackerfläche in den Untersuchungsregionen mit P gedüngt wurden (Abb. 3). Die Anteile P-gedüngter Flächen variierten signifikant zwischen den untersuchten Regionen und folgten einem ausgeprägten West-Ost-Gradienten. In Diepholz wurden 93,1 % der Flächen mit P gedüngt, während in den Regionen Rostock und Uelzen sowie Fläming und Oder-Spree deutlich geringere Anteile von 60,2 % bzw. 55,9 % verzeichnet wurden.

Wird P-total aufgeteilt in organische und mineralische Düngerquellen (Abb. 3-A2 und 3-A3), sortieren sich die Regionen anders. Organische P-Dünger wurden in den Betrieben der Region Diepholz mit gleicher Frequenz eingesetzt wie P-total. Mit deutlichem Abstand folgten dann die Betriebe in Fläming und Oder-Spree, die weniger als die Hälfte ihrer Flächen mit organischen P-Quellen düngen, am geringsten war die Düngfrequenz mit organischen Düngemitteln in Uelzen und Rostock. In diesen beiden Regionen war demgegenüber die Frequenz von P-mineralisch mit 71,1 % und 62 % am höchsten (Abb. 3-A3). In Diepholz wurde fast die Hälfte, in Fläming und Oder-Spree knapp über 20 % der Fläche mineralisch mit P gedüngt.

Auf der gedüngten Fläche wurden zwischen 41,6 und 25 kg ha⁻¹ P ausgebracht (Abb. 3-B1). Wenn gedüngt wurde, waren die Düngermengen auf den Betrieben in Diepholz und Uelzen am höchsten. In den östlichen Regionen wurden statistisch signifikant weniger P total eingesetzt. Organisch wurden P in den höheren Mengen in Diepholz (27,4 kg ha⁻¹) und Uelzen (27,7 kg ha⁻¹), als in den Regionen Rostock, Oder-Spree und Fläming (24,8; 23,1 und 23,74 kg ha⁻¹) gedüngt (Abb. 3-B2). Die in Form von mineralischen Düngern eingesetzte Menge unterschied sich stark zwischen den Regionen: Während sie in Uelzen bei 35,6 kg ha⁻¹ lag, wurden in Oder-Spree nur 12,3 kg ha⁻¹ ausgebracht (Abb. 3-B3). Die Betriebe in Fläming und Oder-Spree setzten P-Dünger in einer geringeren Frequenz auf den Flächen und zusätzlich mit einer im Mittel geringeren Menge ein als in den anderen Regionen.

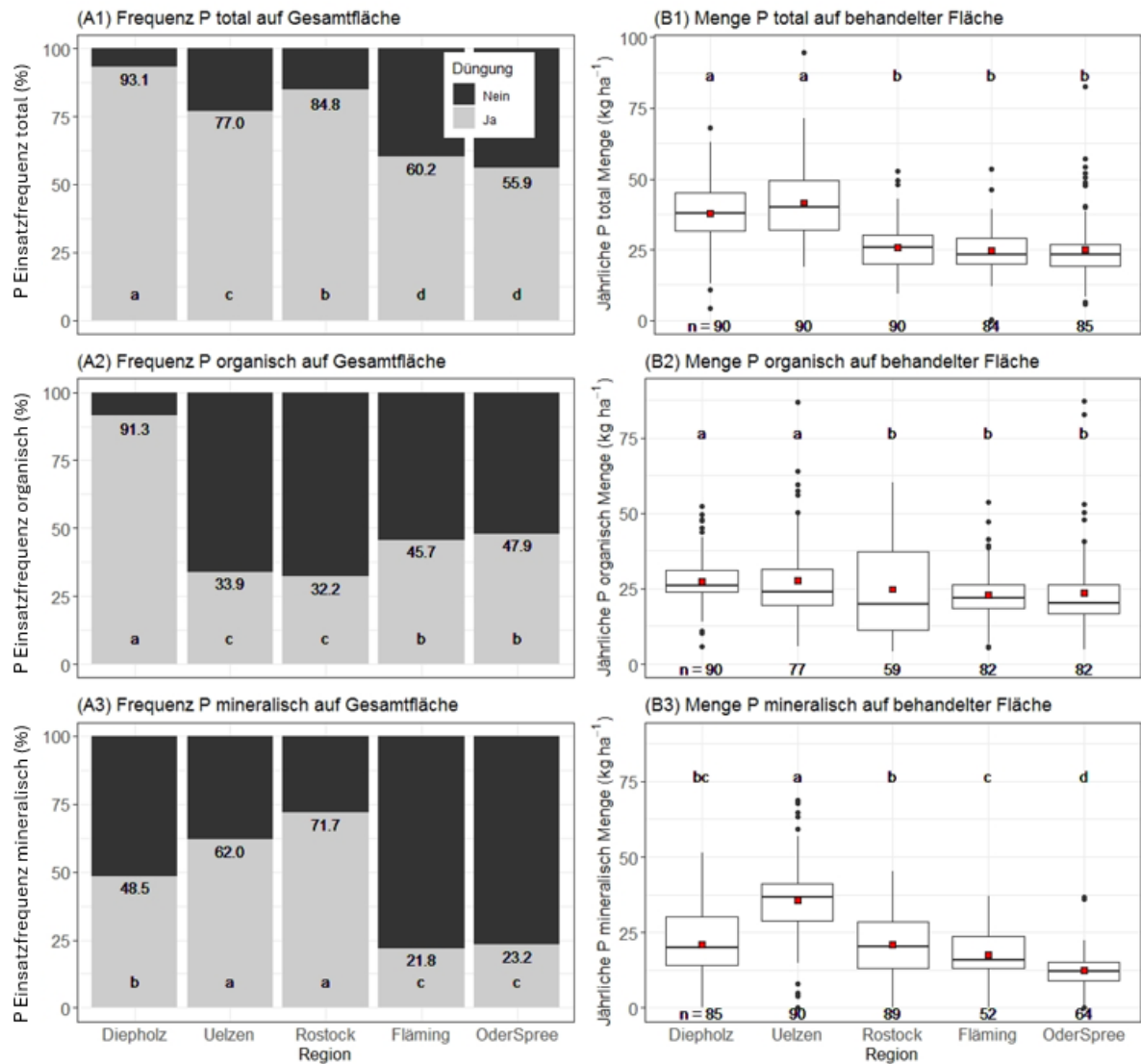


Abb. 3 (A) Frequenz (%) des P-Düngereinsatzes auf der gesamten Fläche für P total (A1), P organisch (A2) und P mineralisch (A3). (B) Menge an eingesetztem P auf der behandelten Fläche, P total (B1), P organisch (B2) und P mineralisch (B3). N < 90 zeigt an, dass einige Betriebe in einigen Jahren keinen P applizierten. Das rote Quadrat kennzeichnet den arithmetischen Mittelwert. Unterschiedliche Buchstaben zeigen einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Regionen an (Kruskal-Wallis $p < 0,05$). (nach Winkhofer et al., 2021).

Um die Werte für die Regionen einzuordnen, nutzen wir DÖHLER ET AL. 2024. Dort werden die P-Zufuhren mithilfe regionalstatistischer Daten berechnet. Diese Methode erlaubt es nicht, die P-Zufuhr mithilfe der Indikatoren „Frequenz“ und „Menge“ einzuordnen. Um unsere Werte trotzdem mit Döhler et al. (2024) vergleichen zu können, werden diese als mittlere P-Zufuhr auf der landwirtschaftlichen Fläche berechnet (anhand von Abbildung 3-A1 und 3-B1). Über alle Regionen ergibt sich dabei eine mittlere Zufuhr von rund 22,8 kg ha⁻¹ LF. Dieser Wert liegt unterhalb des bundesweiten Mittelwerts von 27,1 kg ha⁻¹ LF, den Döhler et al. 2024 ausweisen. Regional zeichnen sich große Unterschiede ab. Während die Werte für Diepholz (35 kg ha⁻¹ LF) und Uelzen (31 kg ha⁻¹ LF) oberhalb des bundesweiten

Mittels liegen, weisen die östlichen Regionen zum Teil deutlich geringere Zufuhren auf (23 kg ha⁻¹ LF in Rostock, 15 kg ha⁻¹ LF in Fläming und 13 kg ha⁻¹ LF in Oder-Spree).

2.2.3 Zeitliche Entwicklungen

Die beiden Kennwerte P-Frequenz und P-Menge wurden über den Untersuchungszeitraum 2010 bis 2018 jahresweise differenziert dargestellt (Abb. 4). Die Zusammensetzung des Düngemiteleinsatzes schwankte zwischen den Jahren, das Niveau wies aber in der jeweiligen Region über den untersuchten Zeitraum keinen deutlichen Ab- oder Aufwärtstrend auf. Während in Diepholz, Uelzen und Oder-Spree die Frequenz an unbehandelten Feldern stagnierte, nahm sie in Rostock eher ab und in Fläming zu.

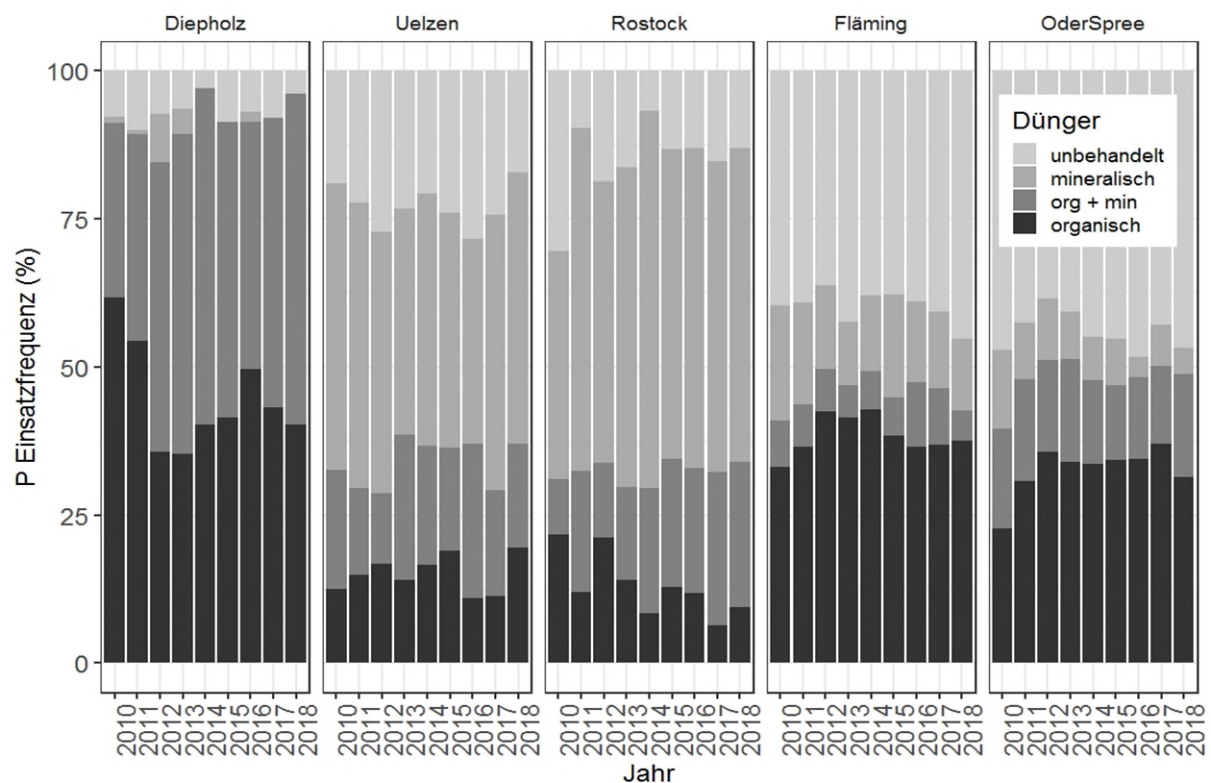


Abb. 4: Frequenz (%) der Flächen, auf denen P-Düngemittel eingesetzt wurden, unbehandelt, nur mineralisch, nur organisch, organisch und mineralisch (nach Winklhofer et al., 2021).

Wenn gedüngt wurde, ist auch für die eingesetzte P-Menge im Untersuchungszeitraum kein deutlicher Trend festzustellen (Abb. 4). Die P-Mengen aus organischer und mineralischer Düngung streuten stark zwischen den Jahren. In den Regionen Rostock und Fläming lässt sich bei den ausgebrachten Mengen an mineralischem P ein leicht rückläufiger Trend über den Beobachtungszeitraum erkennen. DÖHLER ET AL. (2024) stellten auf der Basis von Statistikdaten für denselben Zeitraum ebenfalls keine deutlichen Trends bei der P-Zufuhr fest.

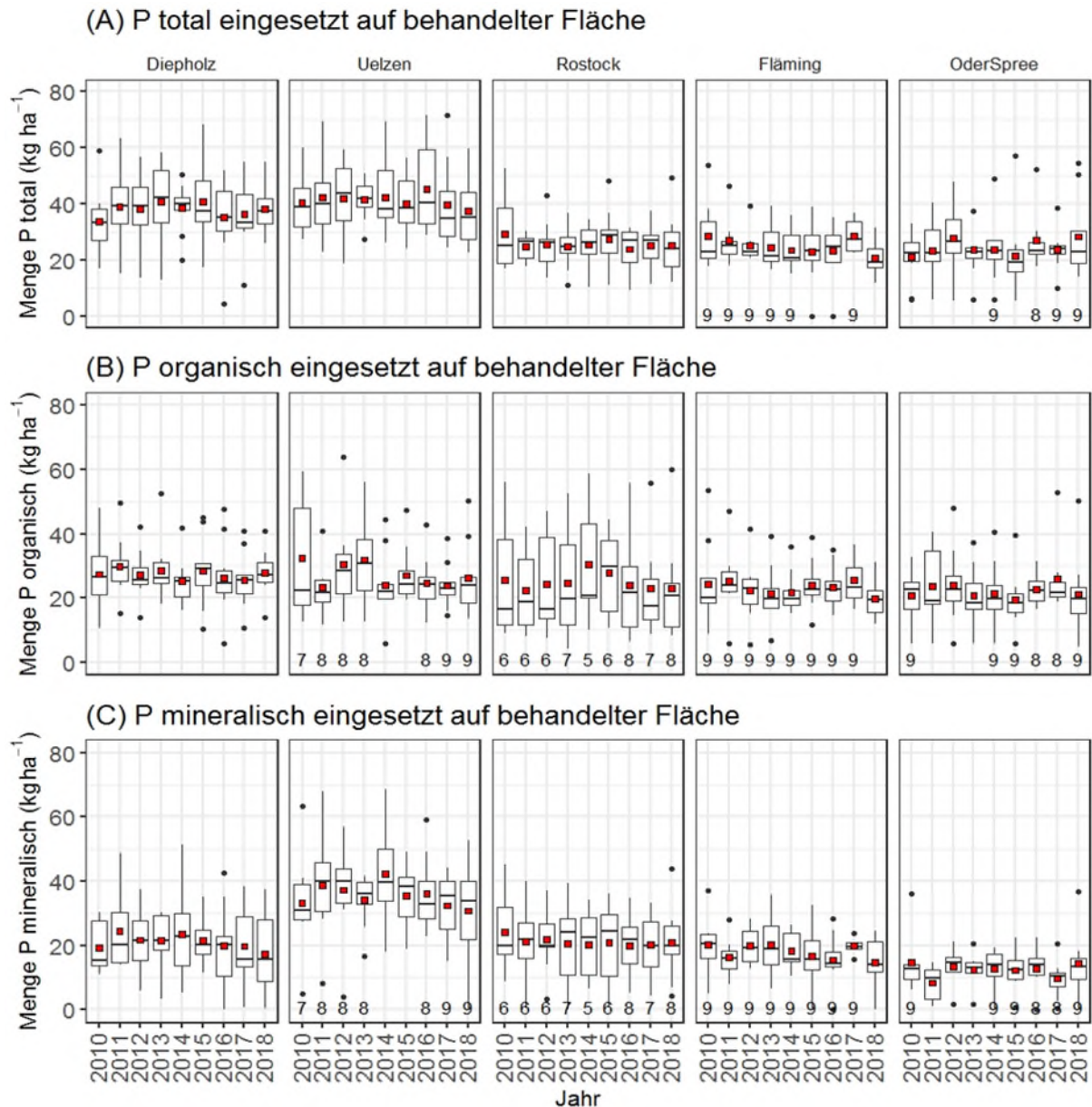


Abb. 5: Eingesetzte P-Menge auf gedüngten Feldern von 2010 bis 2018, Diepholz, Uelzen, Rostock, Fläming und Oder-Spree. (A) P total, (B) P organisch und (C) P mineralisch. N wird angezeigt, wenn <10 ist; dies bedeutet, dass einige Betriebe in einzelnen Jahren keine Phosphor-Düngung durchgeführt haben. Das rote Quadrat kennzeichnet den arithmetischen Mittelwert (nach Winklhofer et al. 2021).

2.3 Zwischenfazit regionale Betriebsnetze

Diese Forschungsinfrastruktur nutzt vorhandene Aufzeichnungen von mehreren Betrieben einer Region. Betriebe auf freiwilliger Basis zu rekrutieren, vorhandene Betriebsdaten mit der Erlaubnis zu erheben und diese aggregiert auszuwerten, ist wertvoll für die Forschung, um Überblicke zu bekommen, regionale Lagen einzuschätzen und Trends zu ermitteln. Derartige Betriebsnetze sind in statistischen Berichten und in betriebswirtschaftlichen Auswertungen ein übliches Format (z.B. Testbetriebsnetz BMLEH). Auf den ersten Blick stellen sie eine Forschungsinfrastruktur dar, die bereits vorhanden ist und deren Nutzung in betriebswirtschaftlichen Kennzahlen mit der einheitlichen Metrik „Euro“ eingespielten Wegen folgt. Für Anwendungen auf naturale Metriken für z. B. Produktionsmittel wie P-Dünger gibt es viel weniger Beispiele.

Eine Dokumentation der P-Zufuhr ist für jede mögliche Steuerung des Düngemiteleinsatzes entscheidend - unabhängig davon, ob sie freiwillig oder verpflichtend erfolgt. Die Arbeiten, um die genaue Zufuhr von P-Düngemitteln aus den Schlagkarteidaten zu ermitteln, waren überraschend aufwändig. Unabhängig von der Art der Dokumentation, die von vollständig digitalisierten bis hin zu vollständig handschriftlichen Feldaufzeichnungen reicht, stellten Unklarheiten und Lücken in den aufgezeichneten Informationen eine Herausforderung für die Datenanalyse dar. Unerwartet waren die Schwierigkeiten, den Düngemitteltyp und den Nährstoffgehalt der dokumentierten Düngemittel, die in einem Neunjahreszeitraum verwendet wurden, eindeutig zu identifizieren. Die Bandbreite des P-Gehalts der verwendeten Düngemittel ist groß. Der Umgang mit diesen Problemen war zeitaufwändig. Die gesammelten und nachberechneten Betriebsdaten zum P-Düngereinsatz zeigen die jahres- und feldspezifischen Einsatzmuster, die ein Betriebsmittelwert nicht wiedergibt. Durch die zahlreichen Ereignisse „keine P-Zufuhr“ erlauben Betriebsmittelwerte wenig Einblicke in die Muster der P-Zufuhr. Die angewendeten Indikatoren Menge und Frequenz ermöglichen es, Unterschiede zu erkennen, die ein Betriebsmittelwert (kg P/ha) nicht zeigt.

In den untersuchten Betrieben wurde für den Untersuchungszeitraum von 2010 bis 2018 die P-Zufuhr nicht kontinuierlich reduziert, was aufgrund der zu diesem Zeitpunkt geltenden gesetzlichen Vorgaben zu erwarten war. Die Gesetzgebung zur Reduzierung des Nährstoffeinsatzes, konkret die Novellierung der Düngeverordnung (DüV) im Jahr 2017, trat erst am Ende des untersuchten Zeitraums in Kraft. Ihre Wirkung konnte daher frühestens in den Folgejahren sichtbar werden.

Die Auswertung von Schlagkarteidaten ergab, ob und wie viel P die Betriebe in den fünf Regionen auf ihren Bewirtschaftungseinheiten zugeführt haben. Dabei bleibt offen, warum sie dies getan haben und wie sie die Zufuhr bemessen haben. Unterschiedliche betriebliche Strategien wurden hier nicht erfasst. Auch zu den erzielten Erträgen lagen nicht durchgehend Daten vor oder es wurde über alle Schläge und verschiedene Jahre eine einheitliche Ertragshöhe ausgewiesen. Das legt die Annahme nahe, dass es sich eher um eine mittlere Ertragserwartung handelt. Angaben zu P im Boden waren in dem Zeitraum nicht verpflichtend und sind entsprechend lückenhaft.

3 Beispielbetrieb

3.1 Raum und Zeit

Der Beispielbetrieb liegt im nördlichen Sachsen-Anhalt und damit geographisch zwischen den regionalen Betriebsnetzen (Abb. 1). Der Standort hat eine Jahresmitteltemperatur von 9,2 °C (DWD, 2021b) und durchschnittliche jährliche Niederschläge von 552 mm (DWD, 2021a). Der Boden ist überwiegend anlehmiger Sand. Grundsätzlich ist die Fruchtfolge auf den Betriebsschlägen vierfeldrig, bestehend aus Winterraps, Winterweizen/Winterroggen, Mais/Zuckerrüben und Wintergerste/Winterroggen. Bis 2010 wurde gelegentlich Wintertriticale angebaut. Ackergras wurde in einigen Jahren vor Mais angebaut. Der durchschnittliche Viehbesatz des Betriebs lag zwischen 2000 und 2014 bei 0,35 GV ha⁻¹ landwirtschaftlicher Nutzfläche.

Es wurden alle Ackerflächen des Betriebs berücksichtigt, die im Zeitraum 2001 bis 2014 mindestens sechs Jahre in Bewirtschaftung waren. Die Anzahl der Felder änderte sich im Laufe der Jahre, da Flächen in einzelnen Jahren bis zu dreifach unterteilt wurden, um auf den Teilflächen unterschiedliche Teilfrüchte anzubauen. Diese Teilflächen wurden im jeweiligen Jahr wie eigenständige Felder behandelt.

3.2 Phosphoreinsatz

3.2.1 Erfassung

Daten zur P-Düngung wurden der Schlagkartei des Betriebs entnommen. Der Betrieb dokumentiert die P-Düngung in der Schlagkartei als P₂O₅ – alle Werte wurden auf P umgerechnet (Faktor 0,4364). An mineralischen Düngemitteln wurden P-Dünger (0,1746 kg P/kg), PK-Zweinährstoffdünger (0,1091 kg P/kg) und NPK-Mehrnährstoffdünger mit verschiedenen P-Gehalten (0,0305 – 0,0873 kg P/kg) sowie Diammonphosphat (0,2007 kg P/kg) und Monoammonphosphat (0,2269 kg P/kg) eingesetzt. Zu den mineralischen Düngemitteln gehörte auch Carbokalk, der nach Beweidung von Ackergras eingesetzt wurde, dessen P-Gehalt bei 0,5 kg P/t lag. Als organische Düngemittel wurden Rinderdung, Rindergülle und Schweinegülle eingesetzt. In drei Jahren wurde Ackergras mit Milchkühen beweidet, die Weidezeiten (1-4 Stunden pro Tag) wurden feldspezifisch berücksichtigt. Für die mineralischen Düngemittel wurden die angegebenen P-Gehalte der Hersteller übernommen. Für die organischen Düngemittel wurden P-Gehalte mit Standardwerten geschätzt (LWK Niedersachsen, 2021).

3.2.2 Zufuhr von Phosphor

Aus allen eingesetzten Düngern wurde die Variable P-Zufuhr (kg P/ha und Jahr) berechnet. Diese durch die Düngung zugeführte P-Menge war auf allen Feldern unterschiedlich hoch und setzte sich aus verschiedenen Komponenten zusammen.

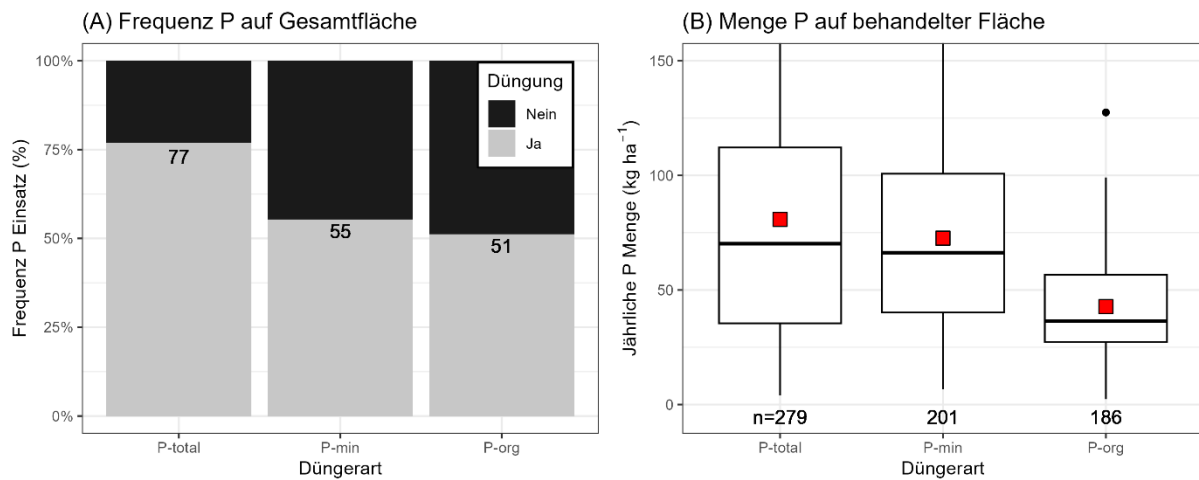


Abb. 6: P-Zufuhr: (A) Frequenz (%) des P-Düngereinsatzes auf der gesamten Fläche für P total, organisch und mineralisch. (B) Menge an eingesetztem P auf der behandelten Fläche, P total, organisch und mineralisch. Das rote Quadrat kennzeichnet den arithmetischen Mittelwert.

In Abbildung 6 ist die (A) Frequenz der Düngung als Anteil gedüngter Felder an der gesamten Fläche des Betriebs sowie (B) die ausgebrachte P-Menge pro Hektar auf den gedüngten Flächen dargestellt. Auf 79 % der Flächen wurde P gedüngt (Abb. 6-A). P wurde in Form mineralischer bzw. organischer Düngerquellen auf 48 % bzw. 52 % der untersuchten Flächen ausgebracht. Bei der Düngefrequenz lag der Beispielbetrieb somit zwischen den Werten der untersuchten Regionen (vgl. Abb. 2-A). Die Frequenz für P-total war ähnlich hoch wie in Rostock und Uelzen. Die Frequenz für organische P-Dünger war ähnlich hoch wie in den Regionen Fläming und Oder-Spree, höher als in Uelzen und Rostock und sehr deutlich niedriger als in Diepholz. Die Frequenz für den Einsatz mineralischer P-Düngemittel war mit 52 % ähnlich wie in Diepholz, niedriger als in den Ackerbauregionen Uelzen und Rostock und höher als in den östlichen Regionen Fläming und Oder-Spree (vgl. Abb. 3-A).

Auf den gedüngten Flächen wurden mit Werten zwischen 45 und 54 kg ha⁻¹ P im Vergleich zu den untersuchten Regionen hohe Düngermengen (total, organisch, mineralisch) ausgebracht (Abb. 6-B). Wenn gedüngt wurde, setzte der Betrieb also mehr P ein als im Mittel der Betriebe in den regionalen Betriebsnetzen. Die Streuung der jährlich gedüngten P-Menge für P-total und P-organisch umfasst in allen Regionen die Messwerte des Aufzeichnungsbetriebs. Für P-mineralisch gilt dies nur für die Region Uelzen (vgl. Abb. 3-B).

Der Beispielbetrieb düngte P weniger häufig in Kombination aus organischen und mineralischen Quellen als in den intensiven Gebieten Uelzen und Rostock. Wenn gedüngt wurde, waren die eingesetzten Mengen höher als in den regionalen Betriebsnetzen.

3.2.3 Zeitliche Entwicklungen

Die Darstellung der Indikatoren „P-Düngungsfrequenz“ und „P-Düngungsmenge“ im Zeitraum 2001 bis 2014 (Abb. 7-A + B) zeigt einen Rückgang des Anteils ausschließlich organisch gedüngter Flächen und einen Anstieg des Anteils mit kombinierter, also zusätzlicher, mineralischer Düngung (Abb. 7-A). Der Anteil unbehandelter Flächen nahm zunächst bis 2004 zu, sank jedoch in den Folgejahren und blieb

seither auf einem mittleren Niveau. Bei den P-Düngungsmengen ist ein leichter Anstieg der mineralisch ausgebrachten P-Mengen über die Jahre erkennbar, während die organisch ausgebrachte P-Menge relativ konstant blieb (Abb. 7-B). Die Gesamt-P-Menge zeigt ebenfalls eine tendenzielle Zunahme.

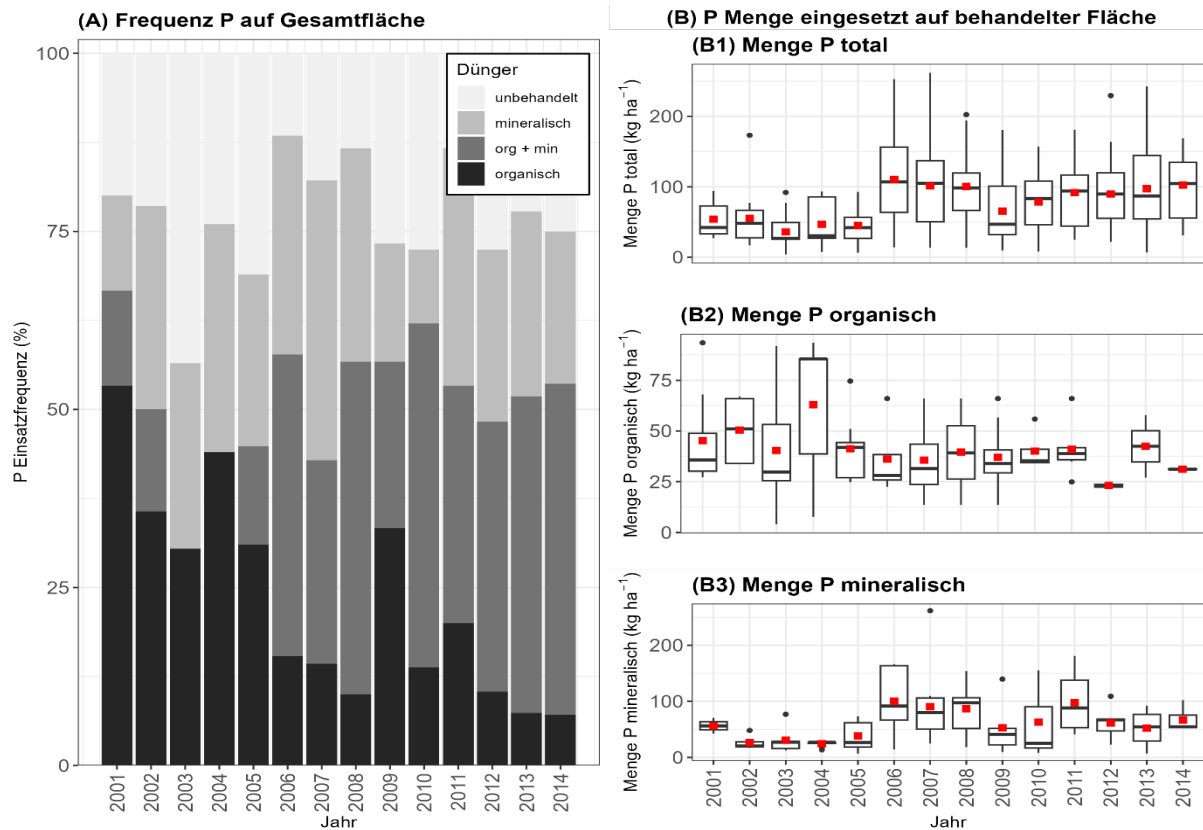


Abb. 7: A) Frequenz (%) der Flächen auf denen P Düngemittel eingesetzt wurden, unbehandelt, nur mineralisch, nur organisch, organisch und mineralisch. B) Eingesetzte P Mengen auf den gedüngten Feldern von 2001 bis 2014 (B1) P total, (B2) P organisch und (B3) P mineralisch. Das rote Quadrat kennzeichnet den arithmetischen Mittelwert. Die Skalierung der Y-Skalen ist unterschiedlich.

3.3 Erträge

Die Schlagkartei des Betriebs beinhaltet Ertragsaufzeichnungen. Die vermarktete Druschfrüchte wurden beim Verkauf und die innerbetrieblich verwertete Getreidemengen beim Eintritt in die Schrotmühle automatisch gewogen. Für Zuckerrüben standen die Ablieferungsmengen zur Verfügung. Bei der Grundfutterernte (Gras- und Maissilage) wurde die Anzahl gefüllter Ladewagen notiert. Im Silo wurden bei Entleerung des Futterstocks an drei Zeitpunkten Proben gezogen und auf Trockensubstanz- und Nährstoffgehalt (inkl. P) bestimmt.

In Tabelle 4 sind die mittleren Erträge der Feldfrüchte Erbse, Silomais, Wintergerste, Winterroggen, Winterraps, Wintertriticale, Winterweizen und Zuckerrübe dargestellt. Die Erträge bewegen sich insgesamt auf einem mittleren Ertragsniveau. Im Vergleich zu denen vom Statistischen Landesamt Sachsen-Anhalt veröffentlichten jährlichen regionalen Erträgen im Zeitraum von 2015 bis 2018

ergeben sich keine auffälligen Abweichungen. Mit Ausnahme von Wintergerste, Winterweizen und Zuckerrübe, deren Erträge unterhalb des regionalen Durchschnitts liegen, weisen alle übrigen Feldfrüchte höhere Erträge als der regionale Mittelwert auf.

Tab. 4: Erträge der angebauten Feldfrüchte ($\bar{x} \pm s$) des Beispielbetriebs (2001-2014, n = Anzahl der mit der Feldfrucht bestellten Felder) und mittlere Ertragsdaten Sachsen-Anhalts (2015-2018)

Feldfrucht	n	Beispielbetrieb [dt ha^{-1}]	Sachsen-Anhalt [dt ha^{-1}]
Erbse	2	$34,8 \pm 10,8$	$30,8 \pm 3,0$
Silomais	42	$359,5 \pm 20,1$	$350,73 \pm 42,4$
Wintergerste	19	$45,3 \pm 2,7$	$69,15 \pm 4,4$
Winterroggen	49	$58,1 \pm 2,3$	$43,78 \pm 4,2$
Winterraps	51	$35,6 \pm 1,4$	$33,65 \pm 2,4$
Wintertriticale	32	$50,5 \pm 2,3$	$47,73 \pm 3,1$
Winterweizen	44	$58,2 \pm 2,0$	$73,23 \pm 4,5$
Zuckerrübe	15	$517,1 \pm 26,8$	$639,53 \pm 65,0$

Quelle: Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt, Halle (Saale), 2025

3.4 Budgetierung und Bemessung

Die Bemessung der P-Zufuhr im Betrieb basiert auf zentralen Kenngrößen des Flussdiagramms zur P-Dynamik im Boden und in den Feldfrüchten (Abb. 8).

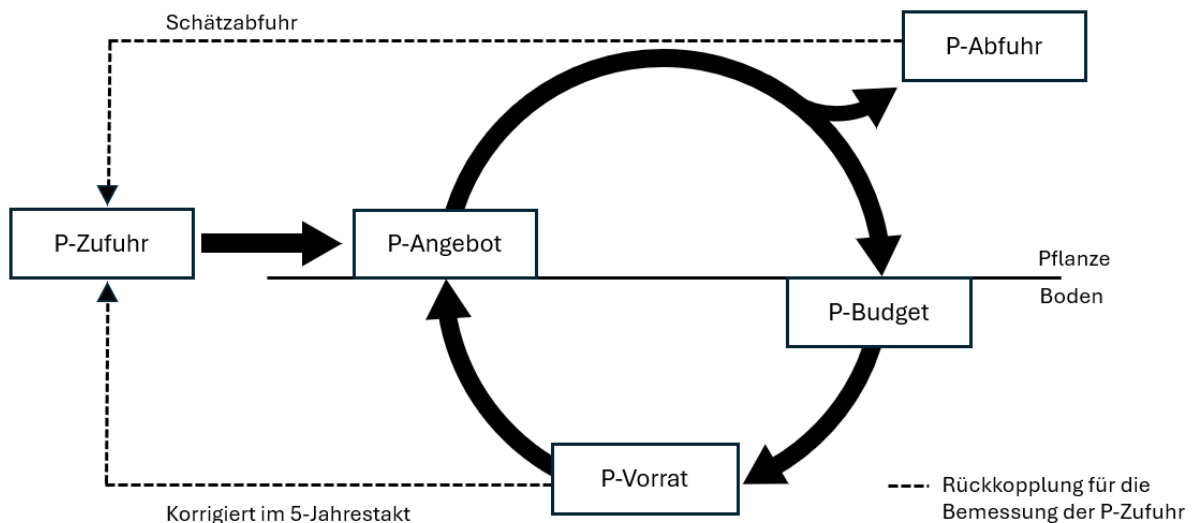


Abb. 8: Flussdiagramm der P-Dynamik bei der Düngung: Durchgezogene Pfeile zeigen die P-Flüsse auf dem Feld, gestrichelte Pfeile stellen die Rückkopplungen für die Düngplanung dar: Die P-Abfuhr wird jährlich erfasst, der P-Vorrat alle 5 Jahre durch eine neue Bodenuntersuchung angepasst.

Wichtige Bezugsgrößen sind das P-Angebot, die tatsächliche P-Abfuhr sowie das daraus berechnete P-Budget. Der pflanzenverfügbare P-Vorrat im Boden wird alle fünf Jahre durch eine Bodenuntersuchung ermittelt und dient zur Korrektur der Düngestrategie.

Nach der Ernte einer Kultur ergibt sich das spezifische P-Budget einer Parzelle als Differenz zwischen dem P-Angebot und dem tatsächlich entzogenen P der angebauten Kultur:

$$\text{P-Budget}_N = \text{P-Angebot}_N - \text{P-Abfuhr}^{Ist}_{N;f}$$

für $N \in \{1,2,3,4,5\}$ mit $N \rightarrow \infty$, $f \in \{a,b,...,m\}$ (1)

N = Jahr, f = Feldfrucht

Die Zufuhrmenge an P im jeweiligen Jahr ergibt sich dabei aus der Differenz zwischen der erwarteten P-Abfuhr der Frucht und dem P-Budget des Vorjahres:

$$\text{P-Zufuhr}_{i;N} = \text{P-Abfuhr}^{Soll}_{N;f} - \text{P-Budget}_{i;N-1}$$

N = Jahr, i = Parzelle (2)

Diese Berechnungsweise stellt eine Besonderheit dar, da sie nicht auf pauschalen Düngeempfehlungen basiert, sondern durch eine rechenbasierte Rückkopplung zwischen erwarteter P-Abfuhr und dem fortgeschriebenen P-Budget eine betriebsindividuelle Steuerung der P-Zufuhr ermöglicht. Dabei wird das P-Budget als zentrale Schnittstelle genutzt, um durch jährlich fortgeschriebene Bilanzierung eine dynamische Anpassung der P-Zufuhr vorzunehmen. Diese Vorgehensweise ermöglicht die geforderte flächen- und ertragsspezifische Bemessung der Düngung.

Die Bemessung der P-Zufuhr erfolgt zu Beginn der Vegetationsperiode, basierend auf der erwarteten P-Abfuhr der nachfolgenden Fruchtart. Diese Schätzabfuhr ist im Diagramm als gestrichelte Rückkopplung von „P-Abfuhr“ zur „P-Zufuhr“ dargestellt. Grundlage für die Schätzung von P-Abfuhr sind die durchschnittlichen Erträge der jeweiligen Fruchtart sowie deren P-Gehalt in der Trockensubstanz. Organische Dünger werden nach Holz (1999) bei der Berechnung des P-Angebots mit einem Mineraldüngeräquivalent von 60 % im Ausbringungsjahr und 40 % im Folgejahr berücksichtigt. Damit fließt die gesamte P-Zufuhr aus organischen Düngern innerhalb von zwei Jahren vollständig in die Bilanz ein.

Alle fünf Jahre erfolgt eine weitere Rückkopplung auf Basis der Ergebnisse der Bodenuntersuchung. Der pflanzenverfügbare P-Vorrat wird in Gehaltsklassen (A bis E) eingestuft. Abhängig von der Gehaltsklasse wird die Düngeplanung angepasst: In den Gehaltsklassen A und B wird die Zufuhr erhöht, in Klasse C bleibt sie unverändert, in D oder E wird sie reduziert oder ausgesetzt. Im Jahr der Bodenuntersuchung ersetzt ein Bilanzwert nach Holz (1999) das regulär berechnete P-Budget und dient als Grundlage der P-Zufuhr.

Ziel des Betriebs ist es, den pflanzenverfügbaren P-Vorrat im Boden in der Gehaltsklasse C zu halten oder diese zu erreichen. Die Berücksichtigung des P-Budgets in der Zufuhrformel stellt dabei das zentrale Steuerungselement dar, um den P-Vorrat langfristig systematisch an die Zielgehaltsklasse (C) anzunähern. In den Jahren zwischen den Bodenuntersuchungen erfolgt die Bemessung der Düngung ausschließlich auf Basis des fortgeschriebenen P-Budgets und der Schätzabfuhr.

Tab. 5: P-Zufuhr, P-Angebot und P-Budget [kg P ha⁻¹] (x-quer ± s), n = Anzahl der Felder 2001 bis 2014

Jahr	n	P-Zufuhr	P-Angebot	P-Abfuhr	P-Budget
2001	15	43,2±7,9	43,2±7,9	54,5±2,3	-11,3±8,7
2002	14	43,4±11,7	40,4±10,5	50,1±4,7	-9,7±11,5
2003	23	20,3±5,4	15,8±6,6	35,7±2,7	-19,9±6,4
2004	25	35,5±6,5	20,3±9,3	59,9±3,1	-39,6±9,4
2005	29	31,1±5,3	-5,1±5,3	50,0±4,1	-55,2±7,0
2006	26	97,6±13,5	42,8±16,9	59,6±4,1	-16,8±16,9
2007	28	83,4±12,9	65,0±16,5	51,2±5,2	13,8±17,7
2008	30	87,1±10,5	96,2±19,4	62,8±5,1	33,5±20,2
2009	30	48,0±9,0	75,0±19,8	71,2±6,0	3,8±20,6
2010	29	56,8±9,1	67,6±22,3	66,1±5,0	1,4±23,2
2011	30	79,4±9,5	76,0±19,3	55,8±4,9	20,3±21,5
2012	29	64,9±11,1	82,0±23,4	68,0±6,2	14,0±24,4
2013	27	75,6±12,7	89,4±28,4	58,5±3,4	30,9±29,1
2014	28	76,8±11,0	99,2±25,7	67,1±4,9	32,1±26,3

Quelle: Schlagkartei Beispielsbetrieb, eigene Berechnungen

Tabelle 5 zeigt die mittleren Jahreswerte der P-Zufuhr, des P-Angebots, der P-Abfuhr sowie des daraus resultierenden P-Budgets für die Jahre 2001 bis 2014. Die Durchschnittswerte verdeutlichen eine tendenzielle Anpassung der P-Zufuhr an das jeweils fortgeschriebene P-Budget: Negative Budgets im Vorjahr führen im Mittel zu einer erhöhten Zufuhr im Folgejahr, während positive Budgets mit reduzierter Zufuhr einhergehen. Dieses Regelungsverhalten unterstreicht die zentrale Steuerfunktion des P-Budgets, mit dem über die Zufuhr langfristig ein Gleichgewicht zwischen Angebot und Abfuhr angestrebt wird, um den P-Vorrat in der anzustrebenden Gehaltsklasse C zu stabilisieren. Über alle Felder hinweg zeigte die grobe Einschätzung zunächst mehr Felder unterhalb der Gehaltsklasse C,

während im Verlauf der Betrachtungszeit zunehmend mehr Felder oberhalb der Gehaltsklasse C lagen. Abweichungen innerhalb einzelner Jahre lassen sich durch Unterschiede in der Fruchtfolge und der damit verbundenen P-Abfuhr erklären; darüber hinaus können auch betriebliche Entscheidungen oder äußere Einflüsse wie Witterung und Ertragsschwankungen eine Rolle spielen.

Die Daten zeigen zudem, dass über den gesamten Zeitraum sowohl die P-Zufuhr als auch das P-Angebot tendenziell ansteigen, während die P-Abfuhr relativ konstant bleibt. Dies hat zur Folge, dass mehr P in den Boden eingebracht wird, als über die P-Abfuhr entzogen wird, was zu einer schrittweisen Anreicherung des Bodenvorrats mit P führt.

3.5 Zwischenfazit Beispielbetrieb

Vom Beispielbetrieb liegen - im Unterschied zu den 50 Betrieben der regionalen Betriebsnetze - detaillierte Aufzeichnungen sowohl zu den Erträgen als auch zur Bemessung der jährlichen P-Zufuhr vor. Die Daten des Beispielbetriebs stellen eine Forschungsinfrastruktur dar, mit der wir beleuchten, wie Entscheidungen zur P-Düngung in der Praxis zustande kommen. Es wird eine praktische Vorgehensweise auf der Skalenebene eines Betriebes beschrieben, mit der betrieblich vorliegenden Daten genutzt werden, um rationale Entscheidungen zur P-Zufuhr zu treffen und düngerechtliche Vorgaben umzusetzen. Dabei setzt das beschriebene Vorgehen zunächst Disziplin bei der Dokumentation der auf dem Betrieb zu erhebenden Daten voraus. Darüber hinaus sind auch die Berechnungsschritte anspruchsvoll in der Methodik. Mit der Einbindung diverser Gewichtungsfaktoren (z.B. feldfruchtspezifische P-Gehalte in der Trockensubstanz, Ertragserwartungen je Kultur und Schlag, Bodengruppe, Gehaltsklasse oder organische Düngungsmaßnahmen der Vorjahre) entsteht ein durchaus komplexes Rechenwerk. Die periodische Einbindung von Bodenuntersuchungen zum P-Vorrat ist inzwischen für alle Betriebe verbindlich, damit gehören die 5-jährigen P-Vorratsdaten zu den „sowieso“ vorhandenen betrieblichen Daten. Die P-Vorratsdaten in definierte Gehaltsklassen für regionale Bodenarten einzustufen, ist pragmatisch für die Betriebe.

Die Auswertungen des Beispielbetriebs zeigen, wie die parallelen Ziele, Pflanzen zu versorgen und Boden nicht verarmen zu lassen und wirtschaftlich zu arbeiten, sich in der Bemessung der P-Zufuhr auswirken. Die Höhe und zeitliche Entwicklung von P-Zufuhr und -Abfuhr zeigen, dass die Umsetzung der Bemessungsmethode nach guter fachlicher Praxis zu einer Düngung führt, die über eine bedarfsgerechte Düngung hinausgeht. Dies führt zugleich zu vermeidbaren wirtschaftlichen Einbußen, da der übermäßige Düngereinsatz mit zusätzlichen Kosten verbunden ist.

Düngeplanungs- und Schlagkarteiaufzeichnungen eines realen Betriebes, auch wenn sie sehr akribisch und nach guter fachlicher Praxis geführt werden, reichen nicht aus, um die tatsächlichen Effekte der P-Düngung auf Pflanze und Boden vollständig zu erfassen. Insbesondere lassen sich daraus weder die Ertragswirkung der P-Düngung noch das Fortschreiben der P-Vorräte im Boden quantifizieren. Langzeitversuche liefern die notwendigen Daten, um diese Effekte systematisch zu analysieren.

4 Langzeitfeldversuch

4.1 Raum und Zeit

Die kleinste Skaleneinheit in dieser Untersuchung besteht aus Daten, die im Rahmen eines Langzeitversuchs der Universität Rostock (54°3'41.47"N; 12°5'5.59"E) generiert wurden. Der Standort weist eine durchschnittliche Jahresmitteltemperatur von 9,2 °C (DWD, 2021b) sowie mittlere Niederschlagsmengen von 646 mm (DWD, 2021a) auf. Die Bodentextur ist lehmiger Sand mit 1,1% C_{Org}. Die erhobenen Daten beziehen sich auf den Zeitraum von 1998 bis 2014 (Tab. 1), in dem jährlich wechselnd Feldfrüchte angebaut wurden. Seit Beginn des Versuchs im Jahr 1998 wurden Sommerraps, Sommergerste, Sommerweizen, Winterweizen, Wintergerste, Winterraps, Mais, Sorghum und Sonnenblumen angebaut. Die Fruchtfolge war zunächst geprägt durch Getreidekulturen und Raps, in späteren Jahren durch Reihenkulturen wie z. B. Mais.

4.2 Phosphoreinsatz

4.2.1 Erfassung

Ziel des Feldversuchs war es, die langfristigen Effekte der P-Düngung auf den Ertrag und die P-Dynamik im Boden zu untersuchen (ZICKER ET AL., 2018). Die Düngevarianten waren im Rahmen der Versuchsplanung festgelegt; sowohl die spezifischen Zeitpunkte als auch die gedüngten P-Mengen. Für die Datenauswertung wurden vier Düngungsvarianten genutzt. Im Gegensatz zu den Betriebsdaten ist die Erfassung der tatsächlichen P-Düngung klar, da sie im Versuchsdesign fixiert ist (Tab. 1).

4.2.2 Zufuhr von Phosphor

Eine Variante *Kontrolle* wurde während des gesamten Versuchszeitraums nicht mit P gedüngt, eine Variante *Mineralisch* wurde jährlich mit Triple-Superphosphat gedüngt. In einer Variante *Organisch* wurde alle drei Jahre organischer Rinderdung ausgebracht. Eine Variante *Mix* kombiniert die P-Düngung der Varianten *Mineralisch* und *Organisch*.

Kontrolle – keine P-Düngung

Mineralisch - P-Düngung mit 21,8 kg ha⁻¹ P als Triple-Super-Phosphat jedes Jahr

Organisch – P-Düngung zwischen 36 und 111 kg ha⁻¹ P aus Rinderdung alle 3 Jahre

Mix - P-Düngung wie Organisch + P-Düngung wie Mineralisch

Die tatsächlich durch die Düngung zugeführte Menge P der einzelnen Varianten war also unterschiedlich hoch, unterschiedlich über die Jahre verteilt und setzte sich aus verschiedenen Komponenten zusammen.

Abb. 9 zeigt die Komponenten analog zu der Darstellung der Daten der regionalen Betriebsnetze (vgl. Abb. 3), (A) Anteil gedüngter Parzellen über den gesamten Versuchszeitraum und (B) ausgebrachte P Menge pro Hektar und Jahr auf den gedüngten Parzellen. Die niemals gedüngte *Kontrolle* weist Frequenzen und Mengen von 0 % auf (vgl. Abb. 9-A und B-1 – 3). In den Varianten *Mineralisch* und *Mix* erfolgte die Düngung in mineralischer Form jedes Jahr, weshalb hier die Frequenz 100 % beträgt (vgl. Abb. 9-A2). Im Vergleich dazu lag die organische Düngung sowohl in *Mix* als auch in *Organisch* nur bei 38 %, was einer Düngung alle 3 Jahre entspricht (vgl. Abb. 9-A3).

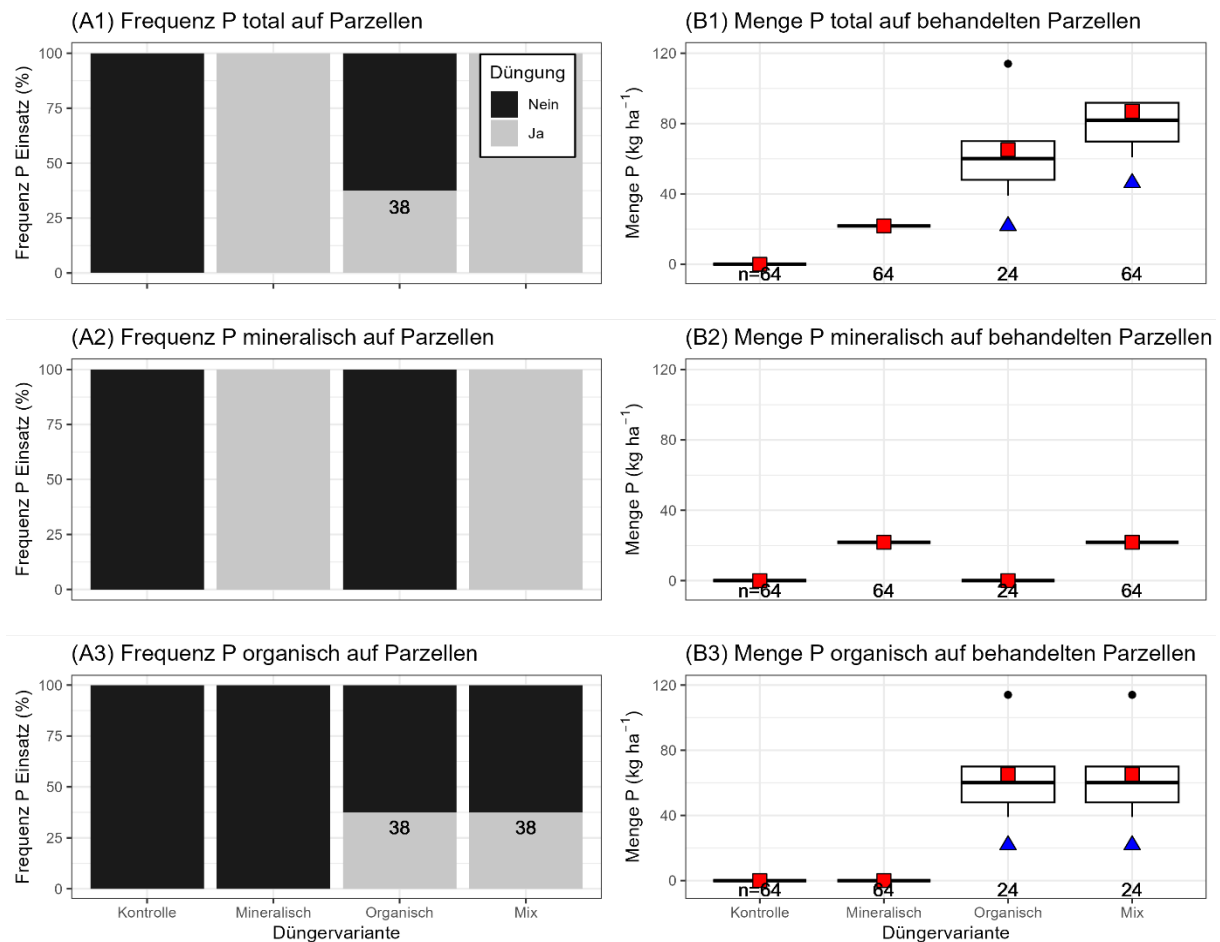


Abb. 9: (A) Frequenz des P Düngereinsatzes im Langzeitversuch, P total (A1), P mineralisch (A2) und P organisch (A3). (B) Ausgebrachte P Menge in den gedüngten Parzellen, P total (B1), P mineralisch (B2) und P organisch (B3). Das rote Quadrat kennzeichnet den arithmetischen Mittelwert. Das blaue Dreieck kennzeichnet die im Mittel jährlich ausgebrachte P Menge für Organisch bzw. Mix, wenn auch die nicht gedüngten Jahre berücksichtigt sind.

Bei der ausgebrachten Menge ist zu erkennen, dass die den Varianten Mineralisch und Mix konstant 21,8 kg P ha⁻¹ a⁻¹ mineralisch gedüngt wurden (vgl. Abb. 9-B2). Bei der organischen Düngung hingegen variierte die ausgebrachte Menge zwischen den Jahren (vgl. Abb. 9-B3). Dabei waren die organischen Düngergaben so bemessen, dass im arithmetischen Mittel aller Parzellen (incl. Anteil ungedüngter) in beiden Varianten 21,8 kg P ha⁻¹ a⁻¹ zur Verfügung standen (für Details ZICKER ET AL., 2018). In der

Variante Mix, in der sowohl organisch als auch mineralisch gedüngt wurde, waren es im arithmetischen Mittel über alle Parzellen 43,6 P ha⁻¹ a⁻¹ (vgl. Abb. 9-B1). Dieser Wert liegt im oberen Bereich der regionalen Betriebsnetze und verdeutlicht somit die erhöhte P-Zufuhr in dieser Variante.

Für die Versuchsdaten erübrigen sich Zeitreihen, da die P-Düngungsvarianten im Versuch statisch über die Zeit angelegt waren.

4.3 Erträge

Die Parzellen wurden im Langzeitversuch in allen Jahren geerntet, dabei wurden alle Erntemengen und auch die P-Abfuhr mit der Ernte gemessen. Für die Methodik bei der Ernte und Aufbereitung sei auf Zickler et al. (2018) verwiesen.

Hier wird die abhängige Variable „Ertrag“ als relative Abweichung des Parzellenertrags vom Jahresmittel aufbereitet:

$$\text{rel. Ertrag}_{i;N} = \frac{\text{Ertrag}_{i;N} - \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \text{Ertrag}_{i;N}}{\frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} \text{Ertrag}_{i;N}}$$

N = Jahr, i = Parzelle.

(3)

Auf diesem Wege werden die mengenmäßigen Niveauunterschiede zwischen den Feldfrüchten ausgeblendet, so dass sie über alle Feldfrüchte gleich dargestellt werden können.

Die Erträge wichen sowohl in der Variante Kontrolle (Abb. 10-A1) als auch in Mineralisch (Abb. 10-A2) öfter nach unten vom Jahresmittel ab als in den Varianten Organisch (Abb. 10-A3) und Mix (Abb. 10-A4). In den Varianten Kontrolle und Mineralisch waren die Abweichungen in den einzelnen Jahren dabei fast immer gleichgerichtet; leicht unterschiedlich war die Anzahl der Jahre, in denen die Abweichungen negativ waren (14 in Kontrolle (Abb. 10-A1): 12 in Mineralisch (Abb. 10-A2)).

In Organisch und Mix lagen die relativen Ertragsabweichungen häufiger im positiven Bereich, allerdings ohne einen eindeutigen Trend. In Mix streuten die Werte weniger als in allen anderen Versuchsvarianten.

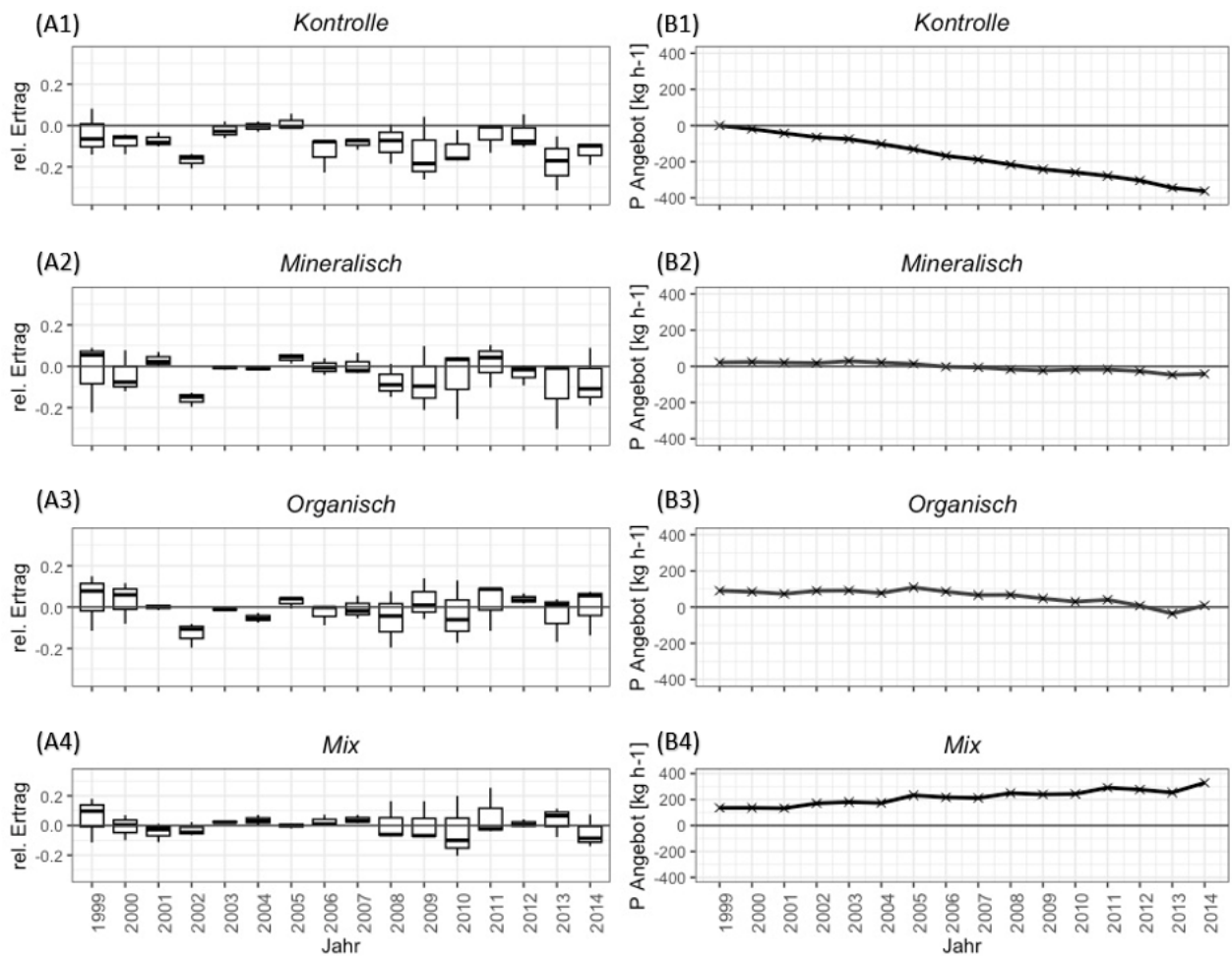


Abb. 10: (A) Relative Erträge im Langzeitversuch von 2001 - 2014, Kontrolle (A1), P-Mineralisch (A2), P-Organisch (A3) und P-Mix (A4). (B) P-Angebot der verschiedenen Behandlungen von 2001 - 2014, Kontrolle (B1), P-Mineralisch (B2), P-Organisch (B3) und P-Mix (B4).

4.4. Budgetierung und Bemessung

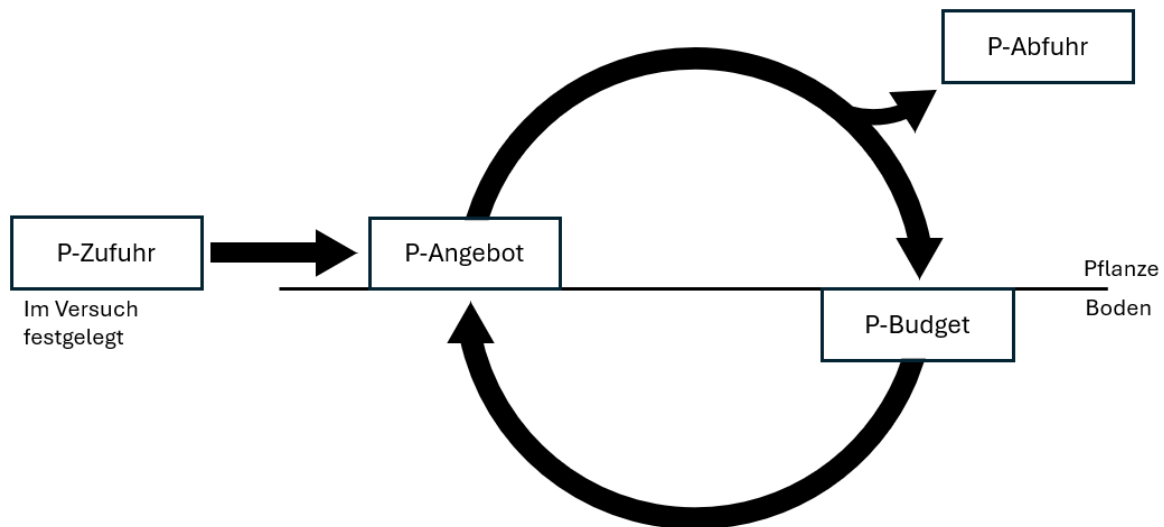


Abb. 11: Flussdiagramm der P-Dynamik im Langzeitversuch: Durchgezogene Pfeile zeigen die P-Flüsse auf dem Feld. Die P-Zufuhr ist durch das Versuchsdesign festgelegt.

Um die P-Zufuhr vorausschauend zu bemessen – im Beispielbetrieb zwingend erforderlich – wird im Versuch keine Budgetierung des P-Angebots benötigt, da die gedüngte Menge im Versuchsprotokoll fixiert ist. Mit den beiden Variablen P-Zufuhr (durch Düngung) und P-Abfuhr (mit Ernte) kann aber das jeweilige P-Angebot durch den ganzen Versuchszeitraum pro Parzelle budgetiert werden. Dafür werden Über- bzw. Überschüsse des Vorjahres einbezogen und die P-Menge berechnet, die den Pflanzen theoretisch zur Verfügung steht (P-Angebot).

$$P\text{-Angebot}_{i,N} = P\text{-Zufuhr}_{i,N} + (P\text{-Abfuhr}_{i,N-1} - P\text{-Angebot}_{i,N-1})$$

N = Jahr, i = Parzelle.

(4)

Dabei steht N für das entsprechende Jahr und i für die entsprechende Parzelle.

Die Entwicklung des budgetierten P-Angebots über den Versuchszeitraum zeigt Abb. 10-B.

In der *Kontrolle* (Abb. 10-B1) startete das P-Angebot bei null und sank über die Jahre nahezu linear. In allen gedüngten Varianten begann die Budgetierung mit der ersten Düngung, weshalb die Startwerte über Null lagen. Ein über die Zeit zunächst konstantes und dann sinkendes P-Angebot wurde für *Mineralisch* budgetiert (Abb. 10-B2). Das Budget der Variante *Organisch* zeigte einen ähnlichen Verlauf auf einem insgesamt höheren Niveau (Abb. 10-B3). In der Variante *Mix* lag das P-Angebot im Vergleich zu den Variablen *Mineralisch* und *Organisch* durchgängig im Überschuss und stieg im Laufe der Jahre bis auf 350 kg ha⁻¹ im letzten Jahr an (Abb. 10-B4). Gleichzeitig wiesen die relativen Erträge in dieser Variante (Abb. 10-A4) die geringste Streuung auf.

4.5 Zwischenfazit Langzeitversuch

Langzeitversuche sind eine bewährte Infrastruktur in der agrarwissenschaftlichen Forschung - sowohl in Form statischer als auch systemischer Versuche. Wir nutzen einen Feldversuch mit einer bereits langen Laufzeit und werten statisch angelegte Prüfglieder zur P-Düngung aus. Während sich die angebauten Feldfrüchte im Verlauf der Jahre änderten und die Produktionstechnik entsprechend angepasst wurde, blieb die P-Zufuhr konstant.

In statisch angelegten Versuchen entfällt die Notwendigkeit, jährlich über die P-Zufuhr zu entscheiden; ihr Wert liegt in der kontinuierlichen Fortführung der Prüfglieder. Die Anzahl an Prüfgliedern ist jedoch durch die Kosten und das Design immer begrenzt, weshalb Prüfglieder sorgsam gewählt werden müssen. In Kombination mit der jährlichen, parzellenscharfen Erhebung von Daten lassen sich die Auswirkungen verschiedener P-Düngungsvarianten auf Feldfrüchte und Boden bewerten.

Der Langzeitversuch verdeutlicht die eher träge P-Dynamik: Obwohl das P-Angebot in der *Kontrolle* über den Versuchszeitraum kontinuierlich abnahm, fielen die Erträge weit weniger stark ab, als angesichts des sinkenden Angebots zu erwarten wäre. Die vorhandenen Bodenvorräte wirkten offenbar als mittelfristige Puffer. Langfristig bleibt jedoch ohne Nachlieferung eine Verarmung des Bodens wahrscheinlich.

Organisch zeigte insgesamt eine vergleichbare mittlere Ertragswirkung wie *Mineralisch*, jedoch mit geringerer Streuung der Erträge. Dies führen wir auf zusätzliche Nährstoff- und Humuseffekte der organischen Düngung zurück.

In der Variante *Mix* überstieg das P-Angebot deutlich den Bedarf der Pflanzen. Gleichzeitig wiesen die Erträge in den Versuchsjahren die geringste Streuung auf. Diese Überversorgung führte jedoch grundsätzlich nicht zu höheren Erträgen. Die entstehenden Phosphorüberschüsse resultierten in erhöhten P-Gehalten im Boden, die auch in tieferen Bodenschichten nachweisbar sind (HU ET AL., 2022). Dies birgt das Risiko von P-Verlusten und damit verbundenen Umweltbelastungen. Eine organische Düngung, wie sie im Rahmen der „Guten fachlichen Praxis“ zur Humusbilanzierung empfohlen wird, wäre ausreichend, um die Erträge zu sichern und zugleich den P-Vorrat im Boden langfristig zu stabilisieren (ZICKER ET AL., 2018).

5. Schlussfolgerungen

Dieser Beitrag befasst sich methodisch mit den Herausforderungen und Potenzialen bei der Verknüpfung von Forschungsinfrastrukturen auf unterschiedlichen Skalenebenen der Agrarforschung. Die verwendeten Daten stammen aus unterschiedlichen Quellen - betriebliche Aufzeichnungen und Ergebnisse eines Langzeitversuchs. Alle Daten bilden lange Zeiträume ab, die bereits vor mehr als einem Jahrzehnt begonnen haben (vgl. Tab. 1).

Im Vordergrund steht die Frage, ob und wie sich Daten aus regionalen Betriebsnetzen, Beispielbetrieben und Langzeitversuchen durch geeignete Auswertungen miteinander in Beziehung setzen lassen; die P-Düngung diene dabei als Anwendungsbeispiel. Wir schlussfolgern entsprechend

in zwei Schritten: zunächst für das Beispiel P-Düngung (5.1) und abschließend für die methodischen Fragen zu Forschungsinfrastrukturen (5.2).

5.1 Beispiel P-Düngung

Für die P-Düngung konnten mit den Indikatoren Frequenz und Menge der P-Zufuhr geeignete Kenngrößen identifiziert werden, die auf allen betrachteten Skalenebenen einsetzbar sind (Tab 6).

Tab. 6: Übersicht der ermittelten Kenngrößen zu Phosphor in regionalem Betriebsnetzen, Beispielbetrieb und Langzeitversuch (X = vorhanden, – = nicht vorhanden)

		Regionale Betriebsnetze	Beispielbetrieb	Langzeitversuch
P-Zufuhr	Frequenz, Menge	X	X	X
	Zeitl. Entwicklung	X	X	X
P-Abfuhr	Menge	-	X	X
	Zeitl. Entwicklung	-	X	X
P-Vorrat	Menge	-	(X)	X
	Zeitl. Entwicklung	-	(X)	X

Mithilfe der drei genutzten Skalenebenen (vgl. Tab. 2) schlussfolgern wir:

- Das Niveau der P-Zufuhr in den landwirtschaftlichen Betrieben (Regionale Netze und Beispielbetrieb) war im untersuchten Zeitraum insgesamt moderat, regional aber auch hoch, im Langzeitversuch wurde ein ähnliches Niveau nur in der kombinierten Düngungsvariante (*Mix*) erreicht.
- Die Bemessung der P-Zufuhr nach Guter Fachlicher Praxis im Beispielbetrieb führte dazu, dass P neben der organischen Düngung in erheblichem Maße auch mineralisch zugeführt wurde.
- Die organische Düngung, wie sie im Ackerbau erforderlich ist, stellte im Langzeitversuch mittelfristig allein genügend P für stabile Erträge und Bodenvorräte zur Verfügung.

Darüber hinaus traten bei der Nutzung von betrieblichen Daten zur P-Düngung unerwartete Herausforderungen auf, insbesondere bei der Dokumentation der P-Gehalte mineralischer und organischer Düngemittel. Eine belastbare Datengrundlage auf betrieblicher Ebene setzt zunächst eine

verlässliche Dokumentation des Düngemittleinsatzes voraus. Digitale Aufzeichnungen bieten Potenzial, ersetzen jedoch nicht die Notwendigkeit, qualitativ hochwertige Daten zu sammeln.

Darüber hinaus muss die P-Zufuhr realistisch berechnet werden, hierzu sollten landwirtschaftliche Betriebe bei der Datenerfassung besser unterstützt werden. Für mineralische P-Dünger würde eine einheitliche Produktbezeichnung mit verbindlichen Nährstoffangaben die Dokumentation deutlich erleichtern und den Betrieben einen besseren Überblick über verfügbare Produkte verschaffen. Eine bundesweite Düngemitteldatenbank mit einheitlichen Produktbezeichnungen und eindeutigen Nährstoffangaben könnte zudem die Transparenz erhöhen, die Dokumentation erleichtern und den Betrieben Zeit sparen.

Organische Dünger variieren stark im Nährstoffgehalt (Tab. 3). Seit Inkrafttretens der Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305)) sind Nährstoffanalysen für gehandelte organische Dünger verpflichtend. Diese Verpflichtung berücksichtigt jedoch keine innerbetrieblich genutzten Dünger. Wie in Dänemark, Schweden, Finnland und den Niederlanden bereits erfolgreich umgesetzt (AMERY UND SCHOUMANS 2014), sollten Standardwerte für organische P-Dünger in einer nationalen Datenbank bereitgestellt werden.

Künftig wird eine standardisierte und digital verfügbare Düngemitteldokumentation entscheidend sein, um zuverlässige, wirtschaftliche und nachhaltige digitale Entscheidungsunterstützung sowie autonome Düngeentscheidungen in KI-gestützten Maschinen und Apps zu ermöglichen.

5.2 Forschungsinfrastrukturen

Betriebsdatensammlungen, Dokumentationen betrieblicher Entscheidungsabläufe und Dauerversuche stellen Forschungsinfrastrukturen dar - auch wenn dieser Begriff vor einer Dekade wohl noch nicht dafür verwendet worden wäre. Wir verwenden ihn, um die Bedeutung vorhandener Daten für die Aufstellungen in der Agrarforschung zu untermauern.

Eine grundlegende Voraussetzung dafür ist, dass entsprechende Daten in Forschungsinfrastrukturen vorliegen und genutzt werden können.

Daten von landwirtschaftlichen Betrieben liegen immer vor, ihre Erfassung und Verarbeitung ist jedoch aufwändig. Die daraus resultierende Ressourcenbindung ist Forschungsförderern oft nicht unmittelbar einsichtig. Es ist aber für Formate wie Reallabore und Landschaftsexperimente unabdingbar, um einen effizienten Einstieg zu gewährleisten. Für jede Akquise und Zusammenarbeit ist es entscheidend, ein genaues Verständnis dafür zu haben, welche Maßnahmen Betriebe umsetzen und wo sie bei ihren betrieblichen Entscheidungen stehen. Jeder analysierte Betrieb stellt eine Punktbetrachtung dar, weshalb für quantitative Daten viele Betriebe erforderlich sind. Gleichzeitig hilft das exemplarische Nachvollziehen von Entscheidungsabläufen in wenigen Betrieben dabei, die Dimension und Komplexität dieser Abläufe besser zu verstehen.

Eine verlässliche Dokumentation ist für jede belastbare Datengrundlage auf betrieblicher Ebene unerlässlich – was für den P-Düngereinsatz (5.1) gilt, betrifft wahrscheinlich auch andere

Faktoreinsätze. Je einfacher dies für Betriebe ist, desto verlässlicher sind die Daten – sowohl für betriebliche Entscheidungen also auch für Forschungszwecke.

Langzeitversuche unterscheiden sich deutlich von Betriebsdaten. Damit sie belastbare, langfristige Erkenntnisse für die Praxis liefern können, müssen sie an relevanten Standorten vorhanden sein – hierfür bedarf es eine koordinierte wissenschaftliche Strategie und ausreichend Ressourcen. Da sich die landwirtschaftliche Praxis im Laufe der Zeit verändert, müssen auch Langzeitversuche regelmäßig angepasst werden. Statische Versuchsanordnungen sind zwar für die Analyse zeitlicher Entwicklungen in den Prüfgliedern sehr aussagekräftig, entfernen sich im Laufe der Zeit aber zunehmend von aktuellen Produktionsbedingungen. Ungeachtet dessen bleiben Langzeitversuche für alle Detailfragen der Pflanzenproduktion von großem Wert. Die Daten von Langzeitversuchen langfristig open access FAIR (findable, accessible, interoperable, reusable) nutzbar zu machen, ist als wichtiger Schritt für die Forschungsgemeinschaft erkannt.

Da Langzeitversuche die Vielfalt von Situationen in Betrieben nur begrenzt abbilden können, braucht es einfache Kenngrößen, um die Daten inhaltlich einzuordnen. Einfache Indikatoren eignen sich um Daten skalenübergreifend zu interpretieren. Auch für Fragestellungen aus anderen Bereichen der Pflanzenproduktion bieten übergreifende Indikatoren auf Managementebene Potenzial, um verschiedene Forschungsinfrastrukturen miteinander zu verknüpfen.

Die Zusammenführung vorhandener, unterschiedlich skaliert und bislang nur isoliert betrachteter Forschungsinfrastrukturen mithilfe einfacher Indikatoren gewährleistet:

- den Überblick über bestehende Datenpools und aktuelle Entwicklungen im Themengebiet,
- die Vermeidung von Redundanzen, indem neue Forschung gezielt an vorhandenes Wissen anknüpft,
- die Integration unterschiedlicher Datenpools in konsistenten, praxisrelevanten Entscheidungsgrundlagen für Beratung und Management.

Zusammenfassung

Forschung benötigt Infrastrukturen, um Ergebnisse und Erkenntnisse zu generieren. Während Begriffe wie „on-farm research“, Reallabore oder Landschaftsexperimente über die EU-Forschungsförderung aktuell Einzug in nationale Programme gefunden haben, sind Forschungsinfrastrukturen in der Agrarforschung keineswegs neu. Forschung hat sich stets auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen bewegt und dabei unterschiedliche Datengrundlagen genutzt.

Am Beispiel der Phosphordüngung (P) im norddeutschen Ackerbau werden bestehende Forschungsinfrastrukturen – regionale Betriebsnetze, Beispielbetrieb und Langzeitversuch – genutzt und Ergebnisse vergleichend eingeordnet. Hierzu wurden die Indikatoren Frequenz (wie häufig wurde gedüngt?) und Menge der P-Zufuhr (wenn gedüngt wurde, wie viel wurde gedüngt?) definiert. Die Indikatoren weisen die P-Zufuhr in den regionalen Betriebsnetzen mit Schwankungen, jedoch insgesamt als moderat bis hoch aus. Zu einem hohen P-Düngungsniveau führte die vorausschauende Planung der P-Düngung nach guter fachlicher Praxis im Beispielbetrieb. Im Langzeitversuch, der belastbare Ertragsdaten für langjährige Düngungsvarianten liefert, wurde nur eine Variante mit

mineralischer und organischer P-Zufuhr ähnlich hoch gedüngt. Eine Variante mit geringerer organischer Düngung sicherte bereits stabile Erträge und ausgeglichene Bodenvorräte. Die Verwendung gleicher Indikatoren ermöglicht skalenübergreifende Schlussfolgerungen aus den unterschiedlichen Daten.

Die Zusammenführung unterschiedlich skaliertter Forschungsinfrastrukturen mithilfe nachvollziehbarer Indikatoren ermöglicht einen Überblick über vorhandene Daten, vermeidet Redundanzen in der Forschung und trägt zu konsistenten, praxisrelevanten Entscheidungsgrundlagen in Politik, Beratung und Management bei.

Summary

Research requires infrastructure in order to generate results and findings. Concepts such as “on-farm research”, living lab or landscape experiment have entered national research programs through EU funding initiatives. However, research infrastructures in agricultural science are not a new phenomenon. Agriculture research has always operated across different spatial or temporal scales and has relied on diverse data sources.

Using phosphorus (P) fertilization in arable farming in northern Germany as an example, this study shows how results of existing infrastructure – regional farm networks, model farm and long-term field experiments – were utilized and linked. For this purpose, the indicators frequency (how often fertilization occurred) and amount of P input (how much P was applied) were defined. These indicators classify P inputs in the farm networks as generally moderate to high, with regional variations. A high level of P fertilization resulted from the forward planning of P fertilization according to Good Agricultural Practice in the model farm. In the long-term field experiment, which provides reliable yield data for long-term fertilization treatments, only one treatment combining mineral and organic P inputs reached a comparable level of fertilization. A treatment with lower, exclusively organic fertilization already ensured stable yields and balanced P reserves. The use of consistent indicators enables cross-scale conclusions to be drawn from the different data sources.

Linking research infrastructure at different scales through consistent indicators helps to improve the overview of existing data and information, reduce redundancy in research, and create consistent, policy- and practice-oriented foundations for informed decision-making.

Literaturverzeichnis

Alewell, C; Ringeval, B.; Ballabio, C.; Robinson, D.A.; Panagos, P.; Borrelli, P. (2020): Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nature Communications*, 11(1), 4546. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>.

Amery, F.; Schoumans, O. (2014): Agricultural phosphorus legislation in Europe. Verfügbar unter: <https://pureportal.ilvo.be/nl/publications/agricultural-phosphorus-legislation-in-europe>.

Andert, S.; Bürger, J.; Gerowitt, B. (2015): On-farm pesticide use in four Northern German regions as influenced by farm and production conditions. *Crop Protection*, 75, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.05.002>.

Andert, S.; Bürger, J.; Mutz, J.-E.; Gerowitt, B. (2018): Patterns of pre-crop glyphosate use and in-crop selective herbicide intensities in Northern Germany. *European Journal of Agronomy*, 97, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.009>.

Döhler, H.; Döhler, S.; Häussermann, U. (2024): *Berechnung von Phosphor-Überschüssen der deutschen Landwirtschaft auf der Basis von regionalisierten P-Flächenbilanzen (TEXTE 106/2024)*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/106_2024_texte_berechnung_phosphor_ueberschuesse.pdf.

Düngeverordnung (DüV) (2017): Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 14. März 2024 (BGBl. I Nr. 93).

Holz, F. (1999): *Grundlagen der Düngebedarfsermittlung für eine gute fachliche Praxis beim Düngen*. Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Sachsen-Anhalt, 61 S.

Hu, Y.; Jarosch, K. A.; Kavka, M.; Eichler-Löbermann, B. (2022). Fate of P from organic and inorganic fertilizers assessed by complementary approaches. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 124(2), 189–209.

Hu, Y.; Dehmer, K. J.; Willner, E.; Eichler-Löbermann, B. (2023). Specific and intraspecific P efficiency of small-grain legumes as affected by long-term P management. *Agronomy*, 13(3), 900.

Kotschi, J. (2015): *Bodenlos: Negative Auswirkungen von Mineraldüngern in der tropischen Landwirtschaft*. Hrsg. von Heinrich Böll Stiftung & WWF Deutschland. https://www.boell.de/sites/default/files/2015_wwf_mineralduenger_de_web.pdf.

Leinweber, P.; Bathmann, U.; Buczko, U.; Eichler-Löbermann, B.; Frossard, E.; Fuss, R. (2018): Handling the phosphorus paradox in agriculture and natural ecosystems: Scarcity, necessity, and burden of P. *Ambio*, 47(Suppl. 1), S3–S19. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0968-9>.

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2021): Nährstoffgehalte organischer Dünger – Richtwerte für die Düngeplanung. Oldenburg. Verfügbar unter: <https://www.lwk-niedersachsen.de>.

Muntwyler, A.; Bechmann, M.; Pellerin, S.; Sharples, A.; Withers, P. J. A. (2023): Modelling phosphorus dynamics in four European long-term fertilization experiments. *Science of the Total Environment*, 858, 160000. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160000>.

Norman, D.W.; Frankenberger, T.R.; Hildebrand, P.E. (1994): Agricultural Research in Developed Countries: Past, Present, and Future of Farming Systems Research and Extension. *Journal of Production Agriculture*, 7; 124-131. <https://doi.org/10.2134/jpa1994.0124>.

Richardson, A. E.; Lynch, J. P.; Ryan, P. R.; Delhaize, E.; Smith, F. A.; Smith, S. E.; Harvey, P. R.; Ryan, M. H.; Veneklaas, E. J.; Lambers, H.; Oberson, A.; Culvenor, R. A.; Simpson, R. J. (2011). Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and Soil*, 349(1–2), 121–156. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0950-4>.

Roßberg, D.; Dachbrodt-Saaydeh, S.; Helbig, J.; Paap, M.; Kehlenbeck, H. (2018): NEPTUN, PAPA, Vergleichs- und Demonstrationsbetriebe oder Wer hat da noch den Durchblick? *Gesunde Pflanzen* 70, 139–146. <https://doi.org/10.1007/s10343-018-0421-4>.

Schröder, J.J.; Smit, A.L.; Cordell, D.; Rosemarin, A. (2020): Improved phosphorus use efficiency in agriculture: A key requirement for its sustainable use. *Chemosphere*, 238, 124724.

Smil, V. (2000): Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 53–88.
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.53>.

Smit, A.L.; Bindraban, P.S.; Schröder, J.J.; Conijn, J.G.; Van Der Meer, H.G. (2009): *Phosphorus in agriculture: Global resources, trends and developments*. Wageningen. <http://edepot.wur.nl/12571>.

Spellmann, H.; Ahrends, B.; Albert, M.; Andert, S.; Barkmann, T.; Böcher, M. (2017): *Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland*. Göttingen: Göttingen University Press.
<https://www.nalama-nt.de>.

Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt (2025): Ernteberichterstattung Sachsen-Anhalt: Durchschnittliche Hektarerträge ausgewählter Feldfrüchte. Halle (Saale). Verfügbar unter: <https://statistik.sachsen-anhalt.de>.

Taube, F.; Appel, T.; Ebertseder, T.; Müller, T.; Olfs, H. W.; Nätscher, L.; Schweitzer, K.; Steffens, D.; Wiesler, F.; Zorn, W. (2015). Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung Anpassung der Richtwerte für die Gehaltsklassen ist geboten und notwendig. Positionspapier Des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs-Und Forschungsanstalten eV (VDLUFA), Available Online: http://www.vdlufa.de/Joomla/Dokumente/Positionspapiere/2015_Phosphord%C3%BCngung-Nach-Bodenuntersuchung.

Trimpler, K.; Stockfisch, N.; Märländer, B. (2017): Efficiency in sugar beet cultivation related to field history. In: *Eur. J. Agron.* 91, S. 1–9. doi: 10.1016/j.eja.2017.08.007.

Winklhofer, P.; Andert, S.; Hüttel, S.; Gerowitt, B. (2021): Measuring on-farm phosphorus fertiliser use — Lessons learned from surveying data of five regions in Northern Germany. *Agronomy*, 11(11), 2123. <https://doi.org/10.3390/agronomy1111212>.

Yuan, Z.; Jiang, S.; Sheng, H.; Liu, X.; Hua, H.; Liu, X.; Zhang, Y. (2018): Human perturbation of the global phosphorus cycle: Changes and consequences. *Environmental Science & Technology*, 52(5), 2438–2450. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03910>.

Zicker, T.; Von Tucher, S.; Kavka, M.; Eichler-Löbermann, B. (2018): Soil test phosphorus as affected by phosphorus budgets in two long-term field experiments in Germany, *European Journal of Agronomy*, 97, pp. 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.07.002>.

Dank

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten wurden im Rahmen des Projektes InnoSoilPhos, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (FKZ: 031B0509) erhoben; SA, SH, BEL und BG waren in dem Verbund beteiligte Wissenschaftler, PW war darin Projektmitarbeiter.

Die Daten wurden in Zusammenarbeit der Universität Rostock mit dem Julius-Kühn-Institut erweitert und bearbeitet. AH erhält ein Stipendium der Universität Rostock „Unsere Besten promovieren in Rostock“ und war parallel befristet am JKI beschäftigt.

Unser Dank gilt allen beteiligten landwirtschaftlichen Betrieben für ihr Vertrauen und die Bereitstellung ihrer Daten.

Anschrift der Autoren

M. Sc. Anika Hartmann^{1,2} (anika.hartmann@uni-rostock.de)

¹Universität Rostock, Fakultät für Agrar, Bau und Umwelt, Professur Phytomedizin, Satower Straße 48, 18059 Rostock

²Julius-Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz im Ackerbau und Grünland, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig

M. Sc. Paul Winklhofer¹ (paul.winklhofer@uni-rostock.de)

¹Universität Rostock, Fakultät für Agrar, Bau und Umwelt, Professur Phytomedizin, Satower Straße 48, 18059 Rostock

Dr. Sabine Andert² (sabine.andert@julius-kuehn.de)

²Julius-Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz im Ackerbau und Grünland, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig

Prof. Dr. Silke Hüttel³ (silke.huettel@uni-goettingen.de)

³Georg-August Universität Göttingen, Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung, Management der Agrar- und Ernährungswirtschaft, Platz der Göttinger Sieben 5, 37073 Göttingen

Prof. Dr. habil. Bettina Eichler-Löbermann⁴ (bettina.eichler@uni-rostock.de)

⁴Universität Rostock, Fakultät für Agrar, Bau und Umwelt, Professur Pflanzenbau, Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock

Prof. Dr. Bärbel Gerowitt¹ (baerbel.gerowitt@uni-rostock.de)

¹Universität Rostock, Fakultät für Agrar, Bau und Umwelt, Professur Phytomedizin, Satower Straße 48, 18059 Rostock