



KasPEr

Wirkung von Phosphor- Recyclingprodukten aus der Kaskadennutzung von Klärschlamm in Mittelhessen

Abschlussbericht

Prof. Diedrich Steffens, Prof. Harald Weigand, Dr. Felix Brück, Maximilian Adami, Ann-Kathrin Nimführ

06.10.2023



Europäischer Landwirtschaftsfonds für
die Entwicklung des ländlichen Raums:
Hier investiert Europa
in die ländlichen Gebiete.



Hessen nimmt an der
Europäischen Innovations-
partnerschaft (EIP) teil.



Impressum

Hauptverantwortlicher der OG

Institut für Pflanzenernährung / Justus-Liebig-Universität Gießen
Ansprechpartner: Professor Dr. Diedrich Steffens
Heinrich-Buff-Ring 26
35392 Gießen
Tel.: 0641-9939165
E-Mail: Diedrich.Steffens@ernaehrung.uni-giessen.de

Für die Förderung zuständige ELER-Verwaltungsbehörde:

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- ELER-Verwaltungsbehörde -
Referat VII 6
Mainzer Straße 80
65189 Wiesbaden
E-Mail: eler@umwelt.hessen.de
Internet: www.eler.hessen.de

Inhalt

1	Vorhabenplanung.....	1
1.1	Erläuterung der Situation zu Vorhabenbeginn.....	1
1.2	Aufgabenstellung und Zielformulierung des Vorhabens.....	1
1.3	Arbeitsplan	1
2	Verlauf des Vorhabens	2
2.1	Vorhabensbeschreibung THM.....	2
2.2	Vorhabenbeschreibung JLU Gießen	8
3	Ergebnisse und Zielerreichung	22
3.1	Haupt- und Nebenergebnisse des Vorhabens.....	22
3.1.1	Identifikation des Phosphor-Bedarfs in der Modellregion Mittelhessen.....	22
3.1.9	Ergebnisse Charakterisierung der Düngemittel und Aschen.....	39
3.1.10	Ergebnisse Containerversuche	41
3.1.11	Ergebnisse Feldversuche	52
3.2	Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen.....	68
3.3	Erreichung der Ziele des Vorhabens.....	68
4	Ergebnisverwertung, Kommunikation und Verstetigung.....	70
4.1	Nutzen der Ergebnisse für die Praxis.....	70
4.2	(Geplante) Verwertung/Verbreitung und Nutzung der Ergebnisse	70
4.3	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	71
5	Zusammenarbeit in der Operationellen Gruppe (OG)	72
5.1	Gestaltung der Zusammenarbeit.....	72
5.2	Mehrwert des Formats einer OG	72
5.3	Weitere Zusammenarbeit	72
6	Verwendung der Zuwendung.....	73
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	74
8	Literaturverzeichnis.....	75

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen:

Abbildung 1: Veranschaulichung der Szenarien A-C als Fließdiagramm.....	3
Abbildung 2: Generierung von drei möglichen Zahlenwerten einer Variablen im Rahmen einer Monte-Carlo Simulation. Gleichverteilte und daher gleich wahrscheinliche Zufallszahlen (links) werden auf die (kumulierte) Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Variable projiziert (rechts). Aufgrund des Krümmungsverlaufs und der Steilheit der Wahrscheinlichkeitsverteilung werden häufiger Treffer im niedrigen Wertebereich der Variable erzielt. Die entsprechenden Zahlenwerte gehen somit häufiger in nachfolgende Berechnungen ein und prägen das Gesamtergebnis stärker als die selteneren Treffer im hohen Wertebereich	4
Abbildung 3: Prozess- und Simulationsschema für die Szenariogruppen P1-P3. Erläuterungen zu den Abkürzungen finden siehe Fließtext.....	7
Abbildung 4: Anlage des Feldversuches in Villmar im Herbst 2019	9
Abbildung 5: Gefäßversuche für Agritechnica November 2019	9
Abbildung 6: Vermessung des Feldversuchs in Langgöns im April 2020	10
Abbildung 7: Bonitierung der Pflanzen im Containerversuch Mai 2020	10
Abbildung 8: Aufbereiten der Bodenproben mithilfe eines Mörsers und einer Kugelmühle	11
Abbildung 9: Ernte des Feldversuches in Villmar per Hand 2020.....	11
Abbildung 10: Ernte des Feldversuches in Stangenrod 2020	12
Abbildung 11: Wildschaden auf dem Feldversuch Münchholzhausen 2020.....	12
Abbildung 12: Containerversuch im Dezember 2020.....	13
Abbildung 13: Ackerkratzdistelbefall am Standort Münchholzhausen 2021	14
Abbildung 14: Lagergetreide (Sommergerste) auf dem Standort Dauborn 2021	14
Abbildung 15: Ernte des Feldversuchs in Stangenrod 2021	15
Abbildung 16: Ernte des Containerversuches 2021.....	16
Abbildung 17: Feldversuch Münchholzhausen 2022	17
Abbildung 18: Containerversuch 2022 Sommergerste.....	17
Abbildung 19: Präsentation des Projekts auf den Ökofeldtagen in Villmar 2022	18
Abbildung 20: Scheitern Feldversuch Münchholzhausen 2022	18

Abbildung 21:	Ernte Containerversuch 2023	19
Abbildung 22:	Ernte des Feldversuchs in Münchholzhausen 2022	19
Abbildung 23:	Wildschaden auf dem Versuchsstandort Villmar	20
Abbildung 24:	Entnahme der Bodenproben mithilfe eines Traktors und einem Entnahmegesetz ...	20
Abbildung 25:	P2O5-Bedarf landwirtschaftlicher Kulturen bei mittlerem Ertragsniveau auf Basis von Daten aus (LLH, 2021). Die grüne Linie markiert den anteilsgewichteten Mittelwert der P2O5-Entzüge bei mittlerem Ertragsniveau unter Berücksichtigung der Anteile der aufgeführten Kulturarten nach Tabelle T3. Die gestrichelten roten Linien markieren den entsprechenden anteilsgewichteten Mittelwert bei hohem bzw. niedrigem Ertragsniveau. Das rote Dreieck zeigt in der MC-Simulation berücksichtigte Wahrscheinlichkeitsverteilung.	24
Abbildung 26:	Nährstoffentzüge bei Dauergrünland je nach Wachstumsbedingungen und Weideanteil nach Lütke et al. (2011). Die grüne, orange und graue Linie markiert jeweils den Mittelwert der P2O5-Entzüge bei mittleren, niedrigen und guten Wachstumsbedingungen bzw. Weideanteilen. Das rote Dreieck zeigt die für die MC-Simulation angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Nährstoffentzüge	25
Abbildung 27:	Häufigkeitsverteilung der modellierten P2O5 Entzüge in der Modellregion für das Jahr 2020 auf Basis von 10.000 Simulationsläufen. Median: 20.658 t P2O5/a. Die innenliegende Abbildung zeigt das Sensibilitäts-diagramm.	26
Abbildung 28:	Schematische Darstellung des Bilanzmodells für die Umlage P2O5-behafteter Stoffströme auf die Modellregion	26
Abbildung 29:	Verteilungsfunktionen für Trockenmasse und P2O5-Gehalt verschiedener Wirtschaftsdünger nach (LWK Nordrhein-Westfalen, 2014; LTZ Außenstelle Rheinstetten-Forchheim. 2007/21; LFL Bayern, 2012/2021; LWK Niedersachsen, 2021; IGZ, 2017; LLH Hessen, 2021; Paulsen et al., 2011; LFL Thüringen 2012; Möller et al., 2009; DLG, 2017	28
Abbildung 30:	Häufigkeitsverteilungen und Sensibilitätsdiagramme der modellierten P2O5-Frachten in Verbindung mit der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern in der Modellregion für das Jahr 2016 und 2020 auf Basis von 10.000 Simulationsläufen.	31
Abbildung 31:	Zeitliche Entwicklung der bundesweiten Ausgaben für phosphorhaltige Düngemittel sowie des P2O5-Absatzes in Hessen (BMEL, 2021; DeStatis, 2022).	32
Abbildung 32:	Häufigkeitsverteilung der modellierten P2O5 Fracht in Verbindung mit der Ausbringung von Mineraldüngern in der Modellregion auf Basis von 10.000 Simulationsläufen.	33
Abbildung 33:	Klärschlammaufkommen und Verwertungsanteile für Hessen und den Bund. Quelle: HSL, 2021	34
Abbildung 34:	Häufigkeitsverteilung der modellierten P2O5 Fracht resultierend aus der Ausbringung von Klärschlämmen in der Modellregion für das Jahr 2020 auf Basis von 10.000 Simulationsläufen..	35

Abbildung 35: Gegenüberstellung der P2O₅-Frachten assoziiert mit den Ausbringungen an Mineraldünger (MD), Wirtschaftsdünger (WD) und Klärschlamm (KS) mit den P2O₅-Entzügen über die landwirtschaftlichen Flächen in der Modellregion..... 36

Abbildung 36: Häufigkeitsverteilungen des klärschlambürtigen Anteils am P2O₅-Gesamtaufkommen in der Modellregion für das Jahr 2016 und 2020 auf Basis von 10.000 Simulationsläufen. 37

Abbildung 37: Häufigkeitsverteilungen des P2O₅-Gehaltes der Klärschlammasche für die Simulationen aus Szenario-gruppe P2 und P3 mit und ohne externe Klärschlämme..... 38

Abbildung 38. Häufigkeitsverteilungen des P2O₅-Gehaltes der Klärschlammasche für die Simulationen aus Szenariogruppe P3 mit und ohne Logistik. 39

Abbildung 39: Luftbild der Versuchsanlage in Dauborn im Frühjahr 2020. 53

Tabellen:

Tabelle 1: Kenndaten der Region: Fläche und Bevölkerung (2015 und 2020) aus HGS (2016, 2021) 5

Tabelle 2: Landwirtschaftlich genutzte Fläche Hessens, der Landkreise (LK) und der Modellregion (MR) aus (StatBer, 2022; AgrarSEr, 2017). 23

Tabelle 3.: Anteile und P₂O₅-Bedarf landwirtschaftlicher Kulturarten bei verschiedenen Ertragsniveaus. 24

Tabelle 4: Ausgebrachte Mengen im Jahr 2015 und 2020 nach Wirtschaftsdüngerarten für Hessen nach (Quelle: Landwirtschaftszählung 2016/2020). 27

Tabelle 5: Anteil der in Deutschland vorhanden der Haltungsplätze für Rinder nach Haltungsverfahren und überwiegend anfallende Art des Wirtschaftsdüngers (WD) aus BMEL, 2019. Aufgrund von Rundungsfehlern können von 100 % abweichende Gesamtsummen resultieren..... 29

Tabelle 6: Haltungsplätze für Schweine nach Haltungsverfahren und überwiegend anfallenden Art des Wirtschaftsdüngers (WD) aus BMEL, 2019. Aufgrund von Rundungsfehlern können von 100 % abweichende Gesamtsummen resultieren. 29

Tabelle 7: Tierbestände in Hessen, ausgewählten Landkreisen und der Modellregion aus AgrarSEr (2017) und StatBer (2022)..... 30

Tabelle 8: Ausbaugrößen der Kläranlagen, Klärschlammaufkommen sowie Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung in den Landkreisen und der Modellregion (RegioStat, 2021). 33

Tabelle 9: Zusammenfassung der Medianwerte und Spannbreiten aus den Häufigkeitsverteilungen des P₂O₅-Bedarfs und der P₂O₅-Frachten für die Jahre 2015 und 2020..... 35

Tabelle 10: Charakterisierung der in den Versuchen genutzten Düngemittel 40

Tabelle 11: Prüfberichte der durch das hessische Landeslabor untersuchten Düngemittel 40

Tabelle 12:	Charakterisierung des im Containerversuch genutzten Bodens Kleinlinden 2019	41
Tabelle 13:	Varianten Anlage Containerversuch.....	41
Tabelle 14:	Einfluss einer P-Düngung auf den Trockenmasseertrag von Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in g pro Container	42
Tabelle 15:	Einfluss einer P-Düngung auf den TM-Kornertrag in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in g pro Container	43
Tabelle 16:	Einfluss einer P-Düngung auf die P-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021,2022 in mg pro kg Trockenmasse.....	43
Tabelle 17:	Einfluss einer P-Düngung auf die P-Konzentration im Korn in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021,2022 in mg pro kg Trockenmasse.....	44
Tabelle 18:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die P-Aufnahme der Gesamtpflanze in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg P pro Container	45
Tabelle 19:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Cr-Konzentration im Kornmaterial in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Cr pro kg Pflanzenmaterial.....	45
Tabelle 20:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Cr-Konzentration im Strohmaterial in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Cr pro kg Pflanzenmaterial.....	46
Tabelle 21:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Nickel-Konzentration im Kornmaterial in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Nickel pro kg Pflanzenmaterial. .	46
Tabelle 22:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Nickel-Konzentration im Strohmaterial in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Nickel pro kg Pflanzenmaterial. .	47
Tabelle 23:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Kupfer-Konzentration im Korn in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Kupfer pro kg Pflanzenmaterial.	47
Tabelle 24:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Kupfer-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Kupfer pro kg Pflanzenmaterial.	48
Tabelle 25:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Zink-Konzentration im Korn in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Zink pro kg Pflanzenmaterial.....	48
Tabelle 26:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Zink-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Zink pro kg Pflanzenmaterial.....	49
Tabelle 27:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Arsen-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Arsen pro kg Pflanzenmaterial.	49
Tabelle 28:	Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Cadmium-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Cadmium pro kg Pflanzenmaterial.	

Tabelle 29: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Blei-Konzentration im Korn in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Blei pro kg Pflanzenmaterial.	50
Tabelle 30: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Blei-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Blei pro kg Pflanzenmaterial.	51
Tabelle 31: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Uran-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch aus dem Jahr 2020 in mg Uran pro kg Pflanzenmaterial.	51
Tabelle 32: Charakterisierung der Feldversuchsstandorte	53
Tabelle 33: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf das CAL extrahierbare P im Boden (0-30cm) in mg P pro 100g Boden in einem Feldversuch auf dem Standort Dauborn in den Frühjahren 2020,2021 und 2022.....	54
Tabelle 34: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf den TM-Kornertrag von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	54
Tabelle 35: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die P-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	54
Tabelle 36: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf den TM-Kornertrag von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	55
Tabelle 37: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die P-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	55
Tabelle 38: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf das CAL extrahierbare P im Boden (0-30cm) in mg P pro 100g Boden in einem Feldversuch auf dem Standort Stangenrod in den Frühjahren 2020,2021 und 2022.	55
Tabelle 39: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf den TM-Kornertrag von Winterweizen und Silomais in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020 und 2021.	56
Tabelle 40: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die P-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silomais und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020, 2021 und 2022.....	56
Tabelle 41: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf das CAL extrahierbare P im Boden (0-30cm) in mg P pro 100g Boden in einem Feldversuch auf dem Standort Villmar in den Frühjahren 2020,2021 und 2022.	56

Tabelle 42: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf den TM-Kornertrag von Winterweizen und Körnermais in einem Feldversuch am Standort Langgöns in den Jahren 2020, 2021 und 2022.....	57
Tabelle 43: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die P-Konzentration im Korn von Winterweizen und Körnermais in einem Feldversuch am Standort Langgöns in den Jahren 2020, 2021 und 2022.....	57
Tabelle 44: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf das CAL extrahierbare P im Boden (0-30cm) in mg P pro 100g Boden in einem Feldversuch auf dem Standort Langgöns in den Frühjahren 2020,2021 und 2022.....	58
Tabelle 45: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf den TM-Kornertrag von Winterweizen und Winterraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2021 und 2022.	58
Tabelle 46: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die P-Konzentration im Korn von Körnermais, Winterweizen und Winterraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	58
Tabelle 47: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf das CAL extrahierbare P im Boden (0-30cm) in mg P pro 100g Boden in einem Feldversuch auf dem Standort Münchholzhausen in den Frühjahren 2020,2021 und 2022.	59
Tabelle 48: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Chrom-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	60
Tabelle 49: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Chrom-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	60
Tabelle 50: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Chrom-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silomais und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020, 2021 und 2022.....	60
Tabelle 51: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Chrom-Konzentration im Korn von Winterweizen in einem Feldversuch am Standort Langgöns im Jahr 2022.....	60
Tabelle 52: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Chrom-Konzentration im Korn von Körnermais, Winterweizen und Winterraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	60
Tabelle 53: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Nickel-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	61

Tabelle 54: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Nickel-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	61
Tabelle 55: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Nickel-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silomais und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020, 2021 und 2022.....	61
Tabelle 56: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Ni-Konzentration im Korn von Winterweizen und Körnermais in einem Feldversuch am Standort Langgöns in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	62
Tabelle 57: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Nickel-Konzentration im Korn von Körnermais, Winterweizen und Winterrraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	62
Tabelle 58: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Kupfer-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	63
Tabelle 59: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Kupfer-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	63
Tabelle 60: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Kupfer-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silomais und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020, 2021 und 2022.....	63
Tabelle 61: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Kupfer-Konzentration im Korn von Winterweizen und Körnermais in einem Feldversuch am Standort Langgöns in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	63
Tabelle 62: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Kupfer-Konzentration im Korn von Körnermais, Winterweizen und Winterrraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	63
Tabelle 63: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Zink-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	64
Tabelle 64: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Zink-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	64
Tabelle 65: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Zink-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silomais und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020, 2021 und 2022.....	64

Tabelle 66: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Zink-Konzentration im Korn von Winterweizen und Körnermais in einem Feldversuch am Standort Langgöns in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	65
Tabelle 67: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Zink-Konzentration im Korn von Körnermais, Winterweizen und Winterraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2020, 2021 und 2022.	65
Tabelle 68: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Arsen-Konzentration im Korn von Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in dem Jahr 2021.	66
Tabelle 69: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Arsen-Konzentration von Silomais in einem Feldversuch am Standort Villmar im Jahr 2021.	66
Tabelle 70: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Blei-Konzentration im Korn von Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in dem Jahr 2021.	66
Tabelle 71: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Blei-Konzentration von Silomais in einem Feldversuch am Standort Villmar im Jahr 2021.	66
Tabelle 72: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Thallium-Konzentration von Silomais in einem Feldversuch am Standort Villmar im Jahr 2021. ..	67
Tabelle 73: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Thallium-Konzentration im Korn von Winterraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen im Jahr 2022.....	67
Tabelle 74: Übersicht der Verwendungen der Zuwendungen	73

Zusammenfassung / Abstract

Bedingt durch die Novellierung der Abfall-Klärschlammverordnung muss der in den Klärschlämmen gebundene Phosphor recycelt werden, um effizienter mit Phosphor (P) zu haushalten. Dabei muss Phosphor in großen Kläranlagen (> 55.000 Einwohner) aus dem Klärschlamm durch verschiedene Technologien zurückgewonnen werden. In unserem Projekt wurden gering mit Schwermetallen kontaminierte Aschen aus einer Klärschlammmonoverbrennung mittels Phosphorsäure zu einem Doppelsuperphosphat (Recphos, 15,4 % P) für das vorliegende Projekt hergestellt. Ein weiteres P-Rezyklat (Euphore, 5,9 % P) wurde mittels Drehrohrtechnik bei ca. 900°C und unter Zugabe von $MgCl_2$ und HCl hergestellt. Ein Ziel unseres Projektes war es die Ertragswirksamkeit dieser beiden P-Rezyklate im Vergleich zu Rohphosphat (Hyperphosphat) und Tripelsuperphosphat (TSP) in 3-jährigen Container- und Feldversuchen zu untersuchen. Ein weiteres Ziel des Projektes war es zu untersuchen, wie sich ein P-Recycling aus Klärschlamm auf die P_2O_5 -Flüsse in Mittelhessen auswirken könnte

In dem 3-jährigen Containerversuch wurden die Düngemittel Hyperphosphat, TSP, Recphos, Euphore und eine ungedüngte Kontrolle in zwei Düngegraden (20kg P/ha, 40kg P/ha) getestet. In diesen drei Jahren wurden die Kulturen Mais, Winterweizen und Sommergerste angebaut. In diesen Versuchen wurden sowohl das Kornmaterial sowie das Strohmaterial untersucht. Hierbei wurden die Trockenmasseerträge, die P-Konzentrationen und Aufnahmen als auch die Schwermetallkonzentrationen erfasst. Im ersten Jahr der Containerversuche konnten signifikante Düngeeffekte aller getesteten Düngemittel auf den Ertrag von Korn und Stroh beobachtet werden. Dieser Effekt blieb in den kommenden beiden Versuchsjahren aus. Zusätzlich wurde die P-Aufnahme berechnet, diese kombiniert TM-Ertrag und P-Konzentration miteinander. Es konnte ein signifikanter Einfluss der Düngung von TSP und Recphos auf die P-Aufnahme der Pflanzen gegenüber der Kontrolle gezeigt werden. Hier konnte auch ein Einfluss der Düngegraden der beiden Düngemittel ermittelt werden. Ein signifikanter Unterschied der beiden Düngemittel TSP und Recphos zueinander konnte allerdings nicht festgestellt werden, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die beiden Düngemittel unter diesen Versuchsbedingungen einen ähnlichen Düngeeffekt hatten.

Die Feldversuche wurden im Herbst 2019 und Frühjahr 2020 auf fünf Standorten in der Versuchsregion Mittelhessen angelegt. Als Versuchsdesign wurde eine teilrandomisierte Blockanlage mit einer Parzellengröße von 10x10m gewählt. Die Feldversuche durchliefen ähnlich den Containerversuchen eine individuelle auf diesem Betrieb übliche Fruchtfolge. So wurden im Rahmen der Feldversuche Winterweizen, Winterroggen, Silomais, Körnermais, Wintererbsen und Sommergerste angebaut. Leider musste an jeweils einem Standort im ersten und letzten Versuchsjahr ein Ausfall in Form eines Wildschadens verzeichnet werden, weswegen für diese beiden Versuche keine Ertragsaufnahme stattfinden konnte. In diesen Versuchen wurden die Trockenmasseerträge für das Kornmaterial erfasst, das Stroh verblieb auf den Feldern und wurde daher nicht untersucht. In diesen Kornproben wurden analog zu den Containerversuchen die P-Konzentrationen und die Schwermetallkonzentrationen erfasst. Neben den Pflanzenproben wurden auch Bodenproben erfasst, um auf die P-Versorgung der Standorte zu schließen. In den Feldversuchen konnte gezeigt werden, dass auf einem der Standorte die P-Düngung einen Einfluss auf den TM-Kornertrag hatte. Die P-Konzentration im Korn wurde auf allen Standorten durch die P-Düngung mit dem Recycling-Phosphat beeinflusst. Zwischen den Düngemitteln TSP und Recphos konnte allerdings kein signifikanter Unterschied beobachtet werden. Die von uns durchgeführten Schwermetallanalysen ergaben bis auf eine Ausnahme keinen statistisch gesicherten Einfluss der gedüngten P-Düngemittel auf die Schwermetallkonzentrationen in den Stroh- und Kornproben. Die Ausnahme stellte die Ni-Konzentrationen in den Mais-Kornproben im ersten Versuchsjahr im Containerversuch dar. Hier spiegelten sich die Ni-Konzentrationen der P-Düngemittel in den Ni-Konzentrationen der Maiskornproben wider. In den darauffolgenden Jahren war dieser Einfluss in dem Containerversuch bei Winterweizen und Sommergerste nicht mehr zu erkennen. Aus diesem Grunde sollte dem Element Nickel beim Phosphorrecycling aus Klärschlämmen in Mittelhessen besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Kernziel dieses Arbeitspaketes war es, die P_2O_5 -Flüsse in der Modellregion Mittelhessen qualitativ und quantitativ in drei Szenarien abzubilden und die Auswirkungen der novellierten Klärschlammverordnung zu untersuchen. Dabei wurden (i) die Schwankungen in der Zusammensetzung des kommunalen Klärschlammes, (ii)

die Klärschlammbehandlung inkl. der Phosphorrückgewinnung und (iii) logistische Aspekte in einem Monte-Carlo-Simulationsmodell berücksichtigt. Bei einer kompletten Rückführung der klärschlambürtigen P₂O₅-Fracht in die Landwirtschaft, machen diese etwa 12 % des P₂O₅-Gesamtaufkommens aus. Durch gem. novellierter Klärschlammverordnung restriktivere bodenbezogene Verwertung verringert sich dieser Anteil auf 3 %. Die Simulation der gesamten Prozesskette der thermischen Klärschlammbehandlung und P-Rückgewinnung zeigt, wie sich durch ein geeignetes Stoffstrommanagement die Bandbreite der Produkteigenschaften (z.B. P₂O₅- / Spurenmetallgehalte) reduzieren lässt.

1 Vorhabenplanung

1.1 Erläuterung der Situation zu Vorhabenbeginn

Betrachtete man das Stoffstrommanagement von Klärschlamm in Deutschland vor Projektbeginn, so fiel auf, dass ein großer Teil der kommunalen Klärschlämme kaum noch in der Landwirtschaft verwertet wurden. Die Hauptursache für diese Entwicklung ist in der Belastung der Klärschlämme mit organischen Schadstoffen sowie mit Arzneimittelrückständen und Mikroplastik begründet. Ferner verpflichtet die Novellierung der Klärschlammverordnung Kommunen mit mehr als 55.000 Einwohner ab 2029 zum Phosphorrecycling. Die Bundesregierung hat seit 2005 Projekte zum Phosphorrecycling aus Klärschlamm gefördert, damit die entsprechenden Technologien auch im großtechnischen Maßstab verfügbar sein werden. Diese Situation war Gegenstand vom „Phosphor-Dialog“, der in verschiedenen Regionen Hessens veranstaltet wurde, um die Akteure um die Abwasseraufbereitung und das Phosphorrecycling aus Klärschlamm zu einander zu bringen. Diese geschilderte Situation bewegte uns, das Projekt Wirkung von Phosphor-Recyclingprodukten aus der Kaskadennutzung von Klärschlamm in Mittelhessen durchzuführen.

1.2 Aufgabenstellung und Zielformulierung des Vorhabens

Das Ziel des Projektes war es, die Mengen an Klärschlamm in der Region Mittelhessen (RP-Gießen) zu erfassen, um dann ein Stoffstrommanagement für ein nasschemisches Phosphor-Recyclingverfahren bei Berücksichtigung einer Stoffstrombilanz in Mittelhessen zu implementieren. Dazu wurden Klärschlämme aus der Region beim Partner Infracore monoverbrannt, um dann diese Asche mit Phosphorsäure zu einem P-Recyclingdünger aufzuschließen. In dreijährigen Feldversuchen, angelegt auf vier konventionell bewirtschafteten Standorten und einem ökologisch bewirtschafteten Standort sowie einem dreijährigen Containerversuch, wurde die Ertragswirksamkeit dieses P-Recyclingdünger und der mögliche Schadstofftransfer in die Nahrungskette untersucht. Im Containerversuch wurde zusätzlich noch ein P-Rezyklat aus Klärschlamm nach dem Euphore-Verfahren auf Ertragswirksamkeit und Schadstofftransfer geprüft.

1.3 Arbeitsplan

In dem Projekt wurden die nachstehenden Arbeitspakete bearbeitet:

Arbeitspaket 1: Laufende Zusammenarbeit der OG/Koordination (Ann-Kathrin Nimführ, D. Steffens, JLU-Gießen)

Arbeitspaket 2: Erfassung und Bewertung der Klärschlammströme (F. Brück, H. Weigand), THM

Arbeitspaket 3: Klärschlammmonoverbrennung und Charakterisierung der Aschen (B. Krix, Infracore, M. Adami, JLU-Gießen)

Arbeitspaket 4: Umsetzung der Asche zum P-Recyclingdüngemittel (B. Krix, Infracore)

Arbeitspaket 5: Wirkung der Phosphorrecyclingprodukte auf Ertrag und Qualität der Ernteprodukte unter Feld und Containerbedingungen (M. Adami, Ann-Kathrin Nimführ, D. Steffens, JLU-Gießen sowie die Landwirte M. Luh, A. Eckert, F. Schulz, S. Schwarz, H. Schäfer)

Arbeitspaket 6: Auswirkungen der Anwendung des P-Recyclingdüngers auf die Nährstoffflüsse in der Region (F. Brück, H. Weigand, THM)

2 Verlauf des Vorhabens

2.1 Vorhabensbeschreibung THM

Phosphor ist ein Pflanzennährstoff. Aus diesem Grunde werden Kulturpflanzen mit Phosphor gedüngt und die Düngung erfolgt mit organischen und anorganischen Düngemitteln, um ein gutes Pflanzenwachstum und hohe Erträge zu gewährleisten. Da der P-Bedarf der Pflanzen nicht in vollem Umfang mit vor Ort anfallenden organischen Düngemitteln deckt werden kann, werden mineralischen P-Düngemittel verwendet, so dass ein Import von Phosphor in eine Region besteht. Dieser Import von Phosphor erfolgt hauptsächlich durch mineralische P-Düngemittel. Diese P-Importe sind erforderlich, weil Deutschland über keinerlei eigene Phosphorlagerstätten verfügt und daher im Wesentlichen auf Phosphor aus dem Nordafrikanischen Phosphatgürtel zurückgreift. Werden die landwirtschaftlichen Erzeugnisse nicht exportiert, sondern in der Region konsumiert, endet überschüssiges Phosphat über die Ausscheidungsprodukte im Klärschlamm. Die Kaskadennutzung der regionalen Klärschlämme inkl. Rückgewinnung von P aus der Klärschlammasche und Einsatz des Recyclingdüngers in der Region wird die aktuellen Nährstoffflüsse quantitativ und qualitativ verändern. Diese Veränderungen zu quantifizieren, war Kernziel des Arbeitspaketes 2 die Erfassung der Klärschlammströme in Mittelhessen. Dabei wurden drei Szenarien voneinander abgegrenzt.

In Szenario A wurden die P-Flüsse gemäß dem Zustand vor Inkrafttreten der Klärschlammverordnung abgebildet. Hier galt, dass der überwiegende Teil der regionalen Klärschlamme landwirtschaftlich verwertet wurde. Dies führte die abwasserassoziierte P-Fracht zurück auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen, wobei die P-Düngewirksamkeit des Klärschlammes (aus Kläranlagen mit chemischer P-Elimination) umstritten ist und mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Zudüngung mit Import-P erforderlich macht.

Szenario B entspricht dem Zustand nach Inkrafttreten der Klärschlammverordnung und berücksichtigt somit die Restriktionen, die für die bodenbezogene Verwertung zum Tragen kommen. Da in diesem Szenario die P-Rückgewinnung unberücksichtigt bleibt, müssen die Entzüge in Gänze durch Importflüsse in die Region ausgeglichen werden; deren entsprechender ökologischer Rucksack (Transporte, Herstellung des Erzkonzentrates mittels Flotation, Produktion des Düngemittels) geht zulasten der landwirtschaftlichen Erzeugnisse.

Szenario C berücksichtigt die im Vorhaben anvisierte Kaskadennutzung der regionalen Klärschlämme und die Rückführung der assoziierten P-Frachten in die Herkunftsfläche. Dies entlastet die Importabhängigkeit und deren ökologischen Rucksack. Laut DWA würde die konsequente Nutzung des klärschlambürtigen P zu einer Einsparung von rd. 50 % der Importe führen. Diese Einschätzung ist aufgrund der regionalspezifischen und kulturartspezifischen P-Bedarfe jedoch nicht auf Mittelhessen übertragbar, sondern muss im AP 6 ermittelt werden. Dies beinhaltet auch die Qualität der Ernteprodukte (P-Gehalte im Entegut, Schwermetallgehalte in Abgrenzung zu konventioneller Düngung).

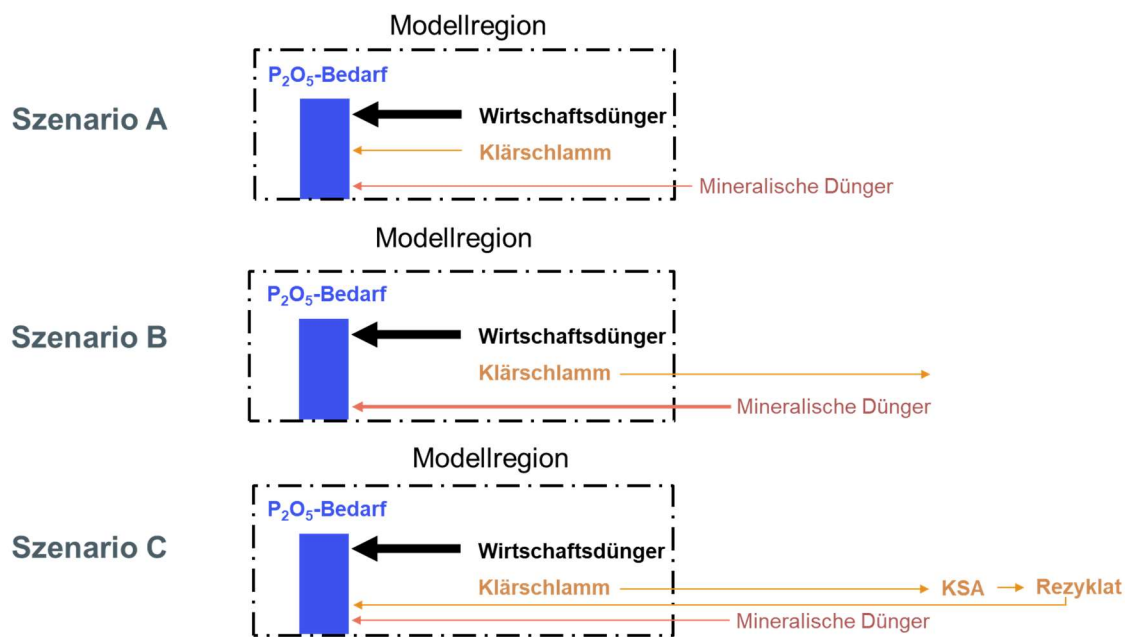


Abbildung 1: Veranschaulichung der Szenarien A-C als Fließdiagramm.

Zur Ermittlung und Abbildung der P-Flüsse in den jeweiligen Szenarien bedurfte es der Integration eines Sets von Teilschritten:

Zunächst war die Datenunsicherheit und die zeitliche Variabilität (Querbezug zu AP 2) der Klärschlämme und Klärschlammaschen zu berücksichtigen. Dazu wurden die Daten zu den KS-Qualitäten im Sinne der Häufigkeitsverteilungen der P-Gehalte deskriptiv ausgewertet. Statistischen Detailanalysen wurden auf Basis von Datenkollektiven durchgeführt, die das 25er und 75er Perzentil der einzubeziehenden Klärschlämme umfassten. Für diese wurden die entsprechenden anorganischen Schadstoffbelastungen der (virtuellen) Klärschlammaschen und die Heizwerte als Verteilungsinformationen auf Ebene der sub-Kollektive für die Modellierung vorgehalten.

Auf dieser Basis erfolgte die Bestimmung der erforderlichen Phosphorsäuremenge für den Aufschluss und die Bereitstellung eines P-Düngemittels in Triple-Superphosphatqualität. Dabei wurde vereinfachend zunächst unterstellt, dass dessen Herstellung auf Basis des regionalen Klärschlamm-Mix erfolgt. Die so erhaltene Rezeptur und der sich daraus rechnerisch ergebende Dünger bildete die Basislinie für die Rückführung des P-Recyclingdüngers in die Region.

Es wurde berücksichtigt, dass (i) an der Behandlungsanlage Klärschlämme unterschiedlicher Zusammensetzung und (ii) mit unterschiedlichen Massenströmen angeliefert werden: Somit fluktuieren auch die P- und Schadstoffgehalte der Klärschlammaschen als Input in die Düngemittelproduktion beim Partner InfraserV mit entsprechenden Rückwirkungen auf die Rezeptur. Insofern war im AP darzustellen, wie die Klärschlammqualitäten die Basislinie "einhüllen".

Die Qualität der regionalen Klärschlämme unterliegt einer räumlichen und zeitlichen Variabilität, die sich in Form von statistischen Unsicherheiten in der Datenbasis niederschlägt. Um diese zu berücksichtigen, wurden die Ergebnisse aus AP 2 mittels Monte-Carlo Simulation ausgewertet und in die Darstellung der P-Flüsse gem. der Szenarien A, B und C eingespeist. Im Ergebnis wurden Ganglinien der P-Flüsse mit einer quantifizierten statistischen Unsicherheit erhalten.

Die mit dem Klärschlamm assoziierten P-Flüsse abzüglich des für die Düngemittelproduktion erforderlichen Phosphorsäure-P bilden in der Bilanz gem. Szenario C die P-Rückflüsse in die landwirtschaftlichen Flächen der Region. Die Quantifizierung der modifizierten P-Flüsse und die Abgrenzung zu den Szenarien A und B erfordern die Kenntnis der P-Bedarfe. Diese wurden auf Basis von Flächendaten ermittelt und ebenfalls inklusive ihrer statistischen Unsicherheit in die Bilanzierung einbezogen.

2.1.1 Methodik der Monte-Carlo Simulation

Ist die Variabilität spezifischer Stoffdaten des Klärschlammes bekannt, bieten sich alternativ zur klassischen Berücksichtigung gemittelter Daten sog. Monte-Carlo-Simulationen an. Da viele Umweltdaten eine asymmetrische Streuung aufweisen (z.B. log-normal verteilt sind) ist der Mittelwert in vielen Fällen kein geeigneter Schätzer. Dieses Problem wird bei der Monte-Carlo Simulation umgangen, indem die Verteilungsinformation für den entsprechenden Parameter (z.B. P-Gehalt des Klärschlammes, organischer Anteil) in einem stochastischen Simulationsprozess berücksichtigt wird. Kern des Ansatzes ist die Verrechnung ‚simulierter‘ Stichproben. Diese werden so gewonnen, dass die Verteilungsinformation erhalten bleibt. Stochastische Simulationen liefern dementsprechend nicht Absolutwerte von Klärschlammereigenschaften, sondern wiederum Verteilungen. Deren Wertebereichen (hier (z.B. P-Gehalt in der Asche)) können Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Dies erklärt die verbreitete Anwendung von Monte-Carlo(MC)-Simulationen beispielsweise in der Risikoanalyse. Im Vorhaben wurde die MC-Simulation für die Optimierung der Klärschlammlogistik sowie zur Abbildung der regionalen P-Bedarfe und düngemittelassozierten P-Flüsse eingesetzt. Die Vorgehensweise bei der zufallsbasierten Generierung von Zahlenwerten einer variablen (weil mit Unsicherheiten behafteten) Größe zeigt Abbildung A2.

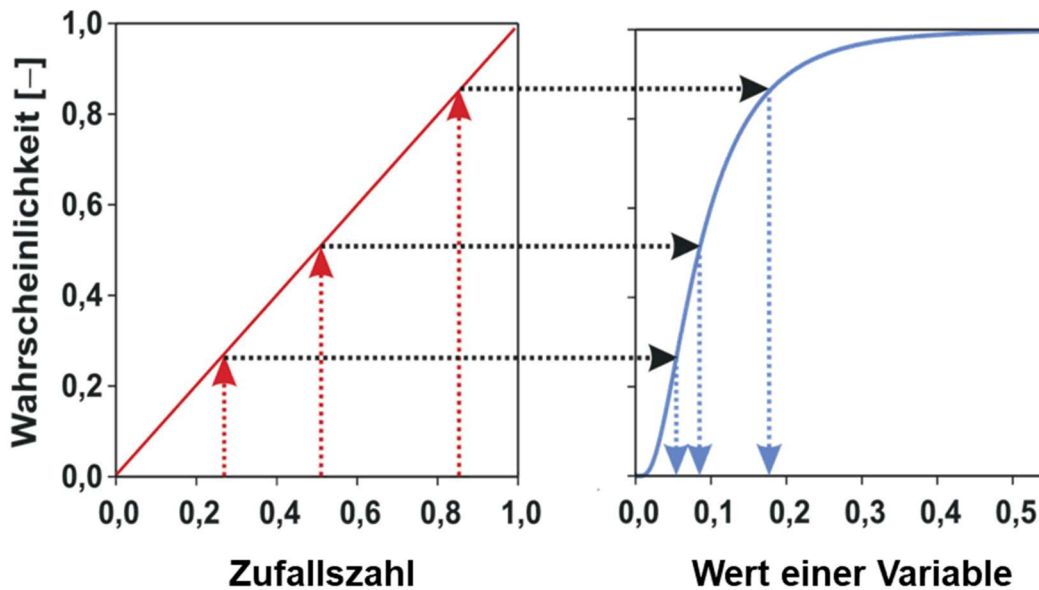


Abbildung 2: Generierung von drei möglichen Zahlenwerten einer Variablen im Rahmen einer Monte-Carlo Simulation. Gleichverteilte und daher gleich wahrscheinliche Zufallszahlen (links) werden auf die (kumulierte) Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Variable projiziert (rechts). Aufgrund des Krümmungsverlaufs und der Steilheit der Wahrscheinlichkeitsverteilung werden häufiger Treffer im niedrigen Wertebereich der Variable erzielt. Die entsprechenden Zahlenwerte gehen somit häufiger in nachfolgende Berechnungen ein und prägen das Gesamtergebnis stärker als die selteneren Treffer im hohen Wertebereich

2.1.2 Die Modellregion Mittelhessen

Die Modellregion umfasst den Regierungsbezirk Gießen (Stadt und Landkreis Gießen sowie die Landkreise Marburg-Biedenkopf, Vogelsbergkreis, Lahn-Dill, Limburg-Weilburg) und die angrenzenden Landkreise Wetterau und Fulda. Die Modellregion ist weitgehend definiert durch einen Radius von ca. 50 km um die Stadt Gießen mit einigen etwas weiter entfernten KA Betreibern. Das Untersuchungsgebiet ist durch eine kleinräumige Verzahnung von ländlichen und städtischen Gebieten mit kleineren Industrieclustern gekennzeichnet. Tabelle 1 gibt wichtige Kenndaten der Region wieder.

Tabelle 1: Kenndaten der Region: Fläche und Bevölkerung (2015 und 2020) aus HGS (2016, 2021)

Landkreis	Fläche ha	Bevölkerung (2015)	Bevölkerung (2020)
Hessen	21.116	6.213.088	6.293.154
Gießen	855	265.699	271.667
Lahn-Dill	1.066	254.253	253.373
Limburg-Weilburg	738	172.120	172.291
Marburg-Biedenkopf	1.262	245.013	245.903
Vogelsberg	1.459	106.737	105.506
Fulda	1.380	221.170	223.023
Wetterau	1.101	303.914	310.353
Modellregion	7.862*¹	1.568.906*²	1.582.116*²

*1: 37 % der hess. Gesamtfläche; *2: 25 % der hess. Gesamtbevölkerung

2.1.3 Modellierungsansatz für die Kaskadennutzung der regionalen Klärschlämme

Für die Untersuchung der Auswirkungen der novellierten AbfklärV auf die regionalen P-Flüsse wurden ebenfalls Monte-Carlo Simulationen durchgeführt. Da das Erfordernis, einzelne KS-Pakete codiert zu verfolgen, entfiel, war die Programmstruktur deutlich einfacher und es konnte auf eine kommerziell verfügbare Software zurückgegriffen werden (Crystal Ball™, Oracle Inc). Berücksichtigt wurden die Unsicherheiten des P-Flusses (i) zur Deckung des regionalen P-Bedarf anhand des kulturartspezifischen P-Entzugs, (ii) die Unsicherheit der mit dem Klärschlamm assoziierten P-Fracht, (iii) die Unsicherheit der mit dem Wirtschaftsdünger assoziierten P-Fracht und (iv) die Unsicherheit der mit dem Mineraldünger assoziierten P-Fracht. Damit gelang es, in drei verschiedenen Szenarien, die Auswirkungen der novellierten AbfklärV für die P-Versorgung der Region quantitativ zu fassen

Für die MC-Simulation der KS-Kaskadennutzung wurde eine Klärschlammverbrennungsanlage mit einem Durchsatz von 25 t/h zur Verarbeitung einer Jahresmenge von ca. 200.000 t mechanisch entwässerten Klärschlamm (≥ 20 Gew.-% TS) dimensioniert. Die Auslegung der Prozessschritte erfolgte in Abstimmung mit dem assoziierten Projektpartner Infracore. Der zu implementierende Behandlungsprozess umfasste die i) Lagerung, ii) Zwischenlagerung (KSAG), iii) Verbrennung in der Wirbelschicht (WS), iv) Aschelagerung und v) P-Rückgewinnung) und ist szenariospezifisch in Abbildung 3 dargestellt. Das KSAG-Lager hat eine Kapazität von 1.000 kg.

Der beschriebene Behandlungs- und Verwertungsprozess wurde in ein MC-Simulationsmodell mit MathWorks MATLAB® umgesetzt. Als statistische Grundgesamtheit wurde die jährliche regionale Menge an Klärschlamm betrachtet, die durch die abgeleiteten Verteilungsdaten beschrieben wird. Für jede Kläranlage wurde die jährliche Klärschlammmenge in Klärschlamm*pakete* (KSP) zu je 100 kg aufgeteilt und damit die statistische Grundgesamtheit aufgefüllt. Die Eigenschaften der Pakete wurden zufallsgeneriert aus den spezifischen

Dreiecksverteilungen der einzelnen Kläranlagen ausgewählt. Bei der Simulation des Verbrennungsprozesses wurden die KSP unter Berücksichtigung von Trockensubstanzgehalt (TS) und Glühverlust (GV) in Klärschlammstapel (KSAP) umgerechnet (Gleichung 1). Die stofflichen Eigenschaften jedes KSP und korrespondierenden KSAP wurde als Matrix hinterlegt, in der weitere KS-Parameter (z.B. P_2O_5 -Gehalt oder Metall-Gehalte) berücksichtigt werden. Die Konzentration der Komponenten in den KSAP wurde als Verhältnis der Komponentenmasse (m_i) in dem entsprechenden KSAP und dessen Masse (m_{KSAP} , Gleichungen 1 und 2) unter Berücksichtigung von TS und GV berechnet.

$$m_{KSAP} = m_{KSP} \cdot TS [\%] (1 - GV [\%]) \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$C_i = m_i / m_{KSAP} \quad (\text{Gleichung 2})$$

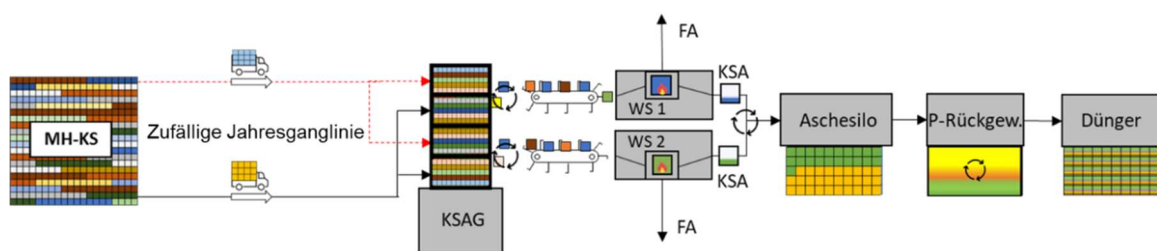
Aus der Gesamtheit der KSAP wurde eine der Batchgröße des P-Rückgewinnungsprozesses entsprechende Anzahl von KSAP entnommen und homogenisiert. Für jeden Batchansatz wurde der Mittelwert aus den einzelnen KSAP ermittelt. Die Ergebnisse der MC-Simulation repräsentieren eine Betriebsdauer der Anlage von etwa 3 Betriebsjahren. Es wurden folgende Szenariogruppen betrachtet, die insgesamt 11 Einzelszenarien beinhalteten. Der Einfachheit halber werden im Folgenden die 3 Gruppen dargestellt:

Szenario P1 bildet den Anlagenbetrieb ohne jegliches Lagermanagement ab. Die resultierende Verteilung der Klärschlammstapel-Eigenschaften wird somit stark durch die Heterogenität der Eingangsdaten geprägt.

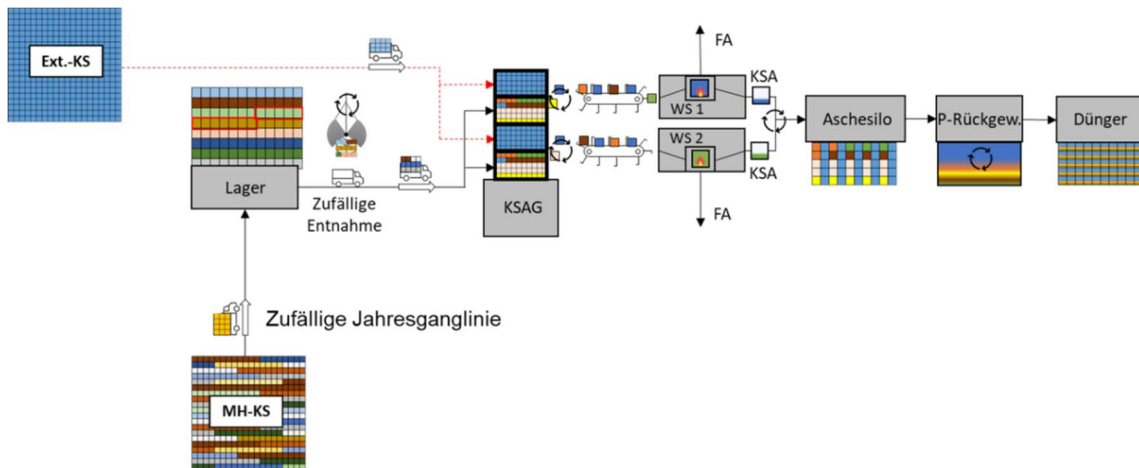
Szenario P2 integriert einen 2-straßigen Anlagenbetrieb mit und ohne Betrieb eines Zwischenlagers (KSAG) sowie der optionalen Einbindung eines externen Klärschlamm-Kollektives (Ext. KS), welches durch den Betreiber akquiriert wird, um die Anlage wirtschaftlich betreiben zu können. Weiterhin wurde der Einfluss von drei verschiedenen Reaktor(batch-)größen des P_2O_5 -Rückgewinnungsschrittes (saurer Aufschluss in einem Rührreaktor) geprüft.

Szenario P3 beinhaltet ein zusätzliches Logistikmanagement. Damit erfolgte eine Clusterung der Klärschlämme entsprechend zweier Klassen der P_2O_5 -Gehalte (z.B. der KS-Berichte). Diese Cluster würden im praktischen Kontext zwei separaten Bereichen im Vorratslager der Verbrennungsanlage zugeordnet und entsprechend ihrer Anteile am Gesamt-Massenstrom des Klärschlammes dem Input zugeführt (Abbildung 3).

Szenario P1: Verarbeitung der regionalen KS ohne Lagermanagement



Szenario P2: Verarbeitung regionaler sowie ext. KS auf 2 Linien (mit und ohne Lagermanagement)



Szenario P3: Verarbeitung regionaler KS auf 2 Linien mit zusätzlichem Logistikkonzept

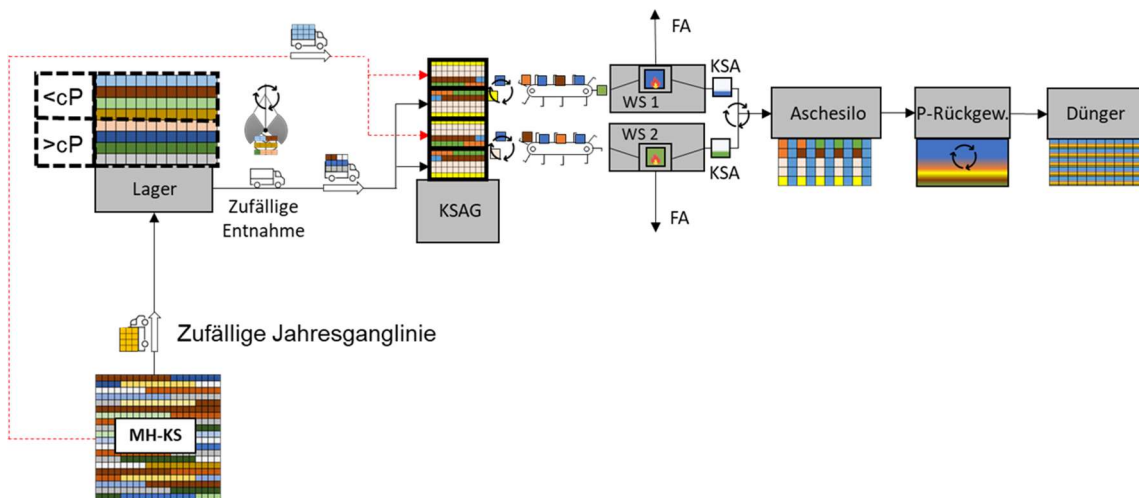


Abbildung 3: Prozess- und Simulationsschema für die Szenariogruppen P1-P3. Erläuterungen zu den Abkürzungen finden siehe Fließtext.

Die Mitglieder der OG Prof. Dr. Ing. Theilen (Arbeitsgruppe Siedlungswasserwirtschaft und anaerobe Verfahrenstechnik) und Prof. Dr. Harald Weigand (Arbeitsgruppe Abfallwirtschaft und Recyclingtechnik, Projektbeschäftigte Dr. Felix Brück, B. Sc. Florian Lapp, M. Sc. Svenja Vogt) brachten sich in die Arbeitspakete AP 2, AP 3, AP 4 und AP 6 ein. Schwerpunkte mit weitestgehend THM-seitiger Bearbeitung lagen in den AP 2 und AP 6.

In AP2 wurden für die Modellregion Mittelhessen die Mengen und Eigenschaften des Klärschlammes zusammengestellt und damit eine umfangreiche Klärschlamm Datenbank fortgeschrieben. Dabei wurden – soweit vorhanden – die Stoffdaten mehrerer Jahre berücksichtigt. Dies erfolgte, um die Variabilität der Inputströme bei der Verbrennung des regionalen Klärschlammes und der nachgelagerten Herstellung eines mineralischen P-Düngemittels berücksichtigen zu können. Die Klärschlamm Daten bildeten zudem eine wichtige Grundlage für die Bewertung unterschiedlicher Szenarien zur Entwicklung der regionalen P-Flüsse und deren Veränderung durch die Novelle der AbfklärV (insbes. Einschränkung der direkten bodenbezogenen KS-Verwertung, Pflicht zur P-Rückgewinnung für große KA).

In AP 6 wurden die Auswirkungen der Anwendung des P-Recyclingdüngers auf die Nährstoffflüsse in der Region bezüglich des Parameters Phosphor untersucht. Dabei wurde im Querbezug zu AP 2 berücksichtigt, dass die Qualität der regionalen Klärschlämme einer räumlichen und zeitlichen Variabilität unterliegt, die sich in Form von statistischen Unsicherheiten in der Datenbasis niederschlägt. Diese betrifft direkt die Zusammensetzung des

Brennstoffs Klärschlamm aus der Region, der zusammen mit weiteren Klärschlämmen künftig beim Partner InfraserV verbrannt und zu einem Düngemittel umgesetzt wird. Indirekt betrifft sie – über die resultierende Unsicherheit in der stofflichen Zusammensetzung des Düngemittels auch die zu prognostizierenden regionalen Nährstoffflüsse.

Um die statistischen Unsicherheiten bzw. die aus dem Klärschlamm-Mix resultierende Variabilität zu berücksichtigen, wurden sog. Monte-Carlo Simulationen durchgeführt. Auf der Ebene der Verbrennung/P-Düngerproduktion wurde damit die Grundlage einer optimierten Logistik (Taktung der Anlieferung der KS bei InfraserV, Lagerhaltung am Standort) geschaffen. Für die Monte-Carlo Simulationen wurde in diesem Fall eigens ein Quellcode in MATLAB programmiert, mit dem einzelne herkunftscodierte (und damit bez. ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften bekannte) Klärschlamm Pakete auf ihrem Weg durch den Schlamm-Bunker, die Verbrennung, die nachgelagerte Asche-Lagerung bis zum Aufschlussreaktor verfolgt werden können. In den einzelnen Prozessstufen wurden die Durchmischungsprozesse hinterlegt. Auf diese Weise war es möglich, die Schlamm-Logistik im Hinblick auf eine möglichst niedrige Variabilität der P-Gehalte im Düngemittel zu optimieren.

Die Mitglieder der OG-KasPer Prof. Dr. Diedrich Steffen, Maximilian Adami und Ann-Kathrin Nimführ des Instituts für Pflanzenernährung der JLU Gießen bearbeiteten maßgeblich das Arbeitspaket 5 in dem durch mehrjährige Container- und Feldversuche die Düngewirkung und Umweltverträglichkeit des im Rahmen des Projekts hergestellten Düngemittels Recphos untersucht werden sollte.

2.2 Vorhabenbeschreibung JLU Gießen

Der Beginn des Vorhabens war der 01.06.2019. In den ersten beiden Monaten fand eine Einarbeitung in das Thema und das Projekt seitens der JLU statt. In der Zwischenzeit wurde von InfraserV Höchst das Düngemittel hergestellt. Hierzu wurden im Vorhinein die jeweiligen Aschen analysiert.

Darauf folgte im August und September die Auswahl der Standorte für die Feldversuche bei den Landwirten vor Ort. Zudem wurde am 27.08.2019 das Kick-Off Meeting für das Projekt in den Räumen der JLU abgehalten. Vor der Anlage der Feldversuche wurden die Düngemittel analysiert, um ihren P-Gehalt zu ermitteln.

Ende September 2019 fand in Berlin die Tagung der Deutschen Gesellschaft für Pflanzenernährung statt, an der Maximilian Adami im Rahmen seiner Promotion teilnahm.

Die Feldversuche wurden im Oktober 2019 angelegt. Hierbei wurden zudem die ersten Bodenproben entnommen.

Die Beprobung erfolgte per Hand auf einer Tiefe von 0 bis 90 cm, unterteilt in drei Segmente: 0-30cm, 30-60cm und 60-90cm. Die Beprobung gestaltete sich äußerst mühsam und nahm deutlich mehr Zeit in Anspruch als zunächst geplant.



Abbildung 4: Anlage des Feldversuches in Villmar im Herbst 2019

Ein Feldversuch musste aufgrund von schlechter Witterung Ende Oktober auf das Frühjahr 2020 verlegt werden, was sich später allerdings als vorteilhaft herausstellen sollte. Das Projekt Kasper wurde auf der Agritechnica in Hannover auf dem Stand der JLU präsentiert. Dazu wurden Maispflanzen in einem phosphorarmen Boden in Mitscherlichgefäßen angezogen (Abbildung 5). Der Boden wurde mit den verschiedenen im Feldversuch getesteten Düngemitteln (Recyclingprodukt aus Klärschlammasche, Rohphosphat und Tripelsuperphosphat) gedüngt, um den Besuchern die Wirksamkeit dieser Produkte auf das Maiswachstum zu zeigen. Ferner wurde ein Poster zum EIP Projekt für den Stand zur Verfügung gestellt.

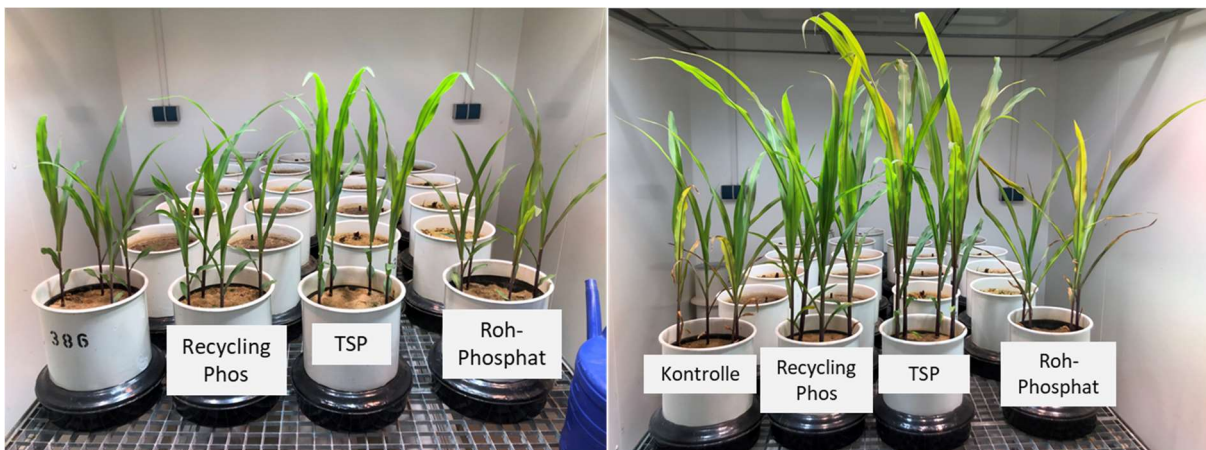


Abbildung 5: Gefäßversuche für Agritechnica November 2019

Ende des Jahres 2019 hat eine Cyberattacke die Arbeiten am Projekt dann deutlich verzögert, dennoch konnten einige kleinere Analysen durchgeführt werden. Zu Beginn des Versuchsjahres 2020 wurde der Containerversuch vorbereitet.

Durch die Coronapandemie waren Arbeiten im Frühjahr 2020 vor Ort nicht möglich, wodurch eine weitere deutliche Verzögerung im Projektablauf zu verzeichnen war. Digitales Arbeiten war in diesem Zeitraum nur

eingeschränkt durch die Auswirkungen der Cyberattacke im Dezember möglich. Trotz der Pandemie konnten die Feldversuche und der Containerversuch planmäßig betreut und durchgeführt werden. So wurden die Feldversuche im Frühjahr erneut vermessen und Bodenproben (0-30cm) entnommen (Abbildung 6 und 7).



Abbildung 6: Vermessung des Feldversuchs in Langgöns im April 2020

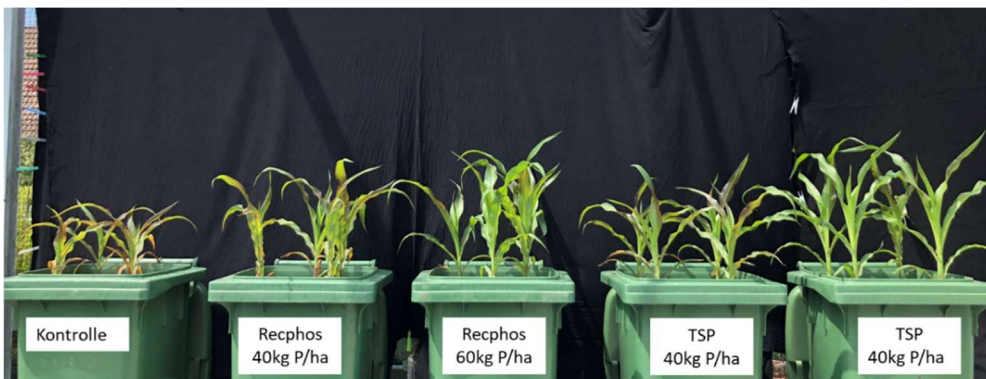


Abbildung 7: Bonitierung der Pflanzen im Containerversuch Mai 2020

Parallel zu der Betreuung der Feld- und Containerversuche wurde weiter an der Aufbereitung und Analyse der Bodenproben gearbeitet. Neben den anderen Arbeiten fand die Aufbereitung der 300 Bodenproben aus den Feldversuchen aus dem Herbst 2019 statt. Diese wurden getrocknet und gemörsert und anschließend mit einer Kugelmühle feinst vermahlen (Abbildung 8).



Abbildung 8: Aufbereiten der Bodenproben mithilfe eines Mörsers und einer Kugelmühle

Anschließend wurden Probeaufschlüsse der Bodenproben mit Königswasser unternommen, allerdings mit nicht zufriedenstellenden Ergebnissen. Der Weidelgrasversuch V05/19 wurde im Laufe des Frühjahrs weiterbearbeitet. Der Pflanzenversuch wurde im Juni 2020 nach 10 Schnitten beendet. Später erfolgte dann die Analyse der Pflanzenproben.

Die Feldversuche, auf denen Winterweizen gewachsen ist, wurden Ende Juli und Anfang August geerntet. Hierbei erfolgte die Ernte auf zwei der Standorte per Hand (Abbildung 9). Die anderen beiden Feldversuche wurden mithilfe eines Versuchsmähdreschers geerntet (Abbildung 10).



Abbildung 9: Ernte des Feldversuches in Villmar per Hand 2020



Abbildung 10: Ernte des Feldversuches in Stangenrod 2020

Kurz nach der Ernte wurde bereits der Feldversuch in Langgöns für das Versuchsjahr 2021 vorbereitet. Hier sollte im kommenden Jahr Winterraps wachsen, allerdings wurde aufgrund der schlechten Witterung im Winter der Winterraps im Frühjahr 2021 umgebrochen und als alternative Kultur Körnermais angebaut. Der Containerversuch und der Standort in Münchholzhausen wurden im Herbst 2020 geerntet, wobei es durch einen Wildschaden auf dem Feldversuch in Münchholzhausen nicht möglich war, den Ertrag zu ermitteln (Abbildung 11). Da im Jahr 2021 in Münchholzhausen Winterweizen angebaut werden sollte, wurde im November 2020 noch der Versuch dort angelegt und daraufhin Winterweizen ausgesät.



Abbildung 11: Wildschaden auf dem Feldversuch Münchholzhausen 2020

Im November wurde auch der Containerversuch erneut gedüngt und Winterweizen dort ausgesät (Abbildung 12)



Abbildung 12: Containerversuch im Dezember 2020

Über die Wintermonate wurden die Pflanzenproben getrocknet und gemahlen, um sie für die Analysen vorzubereiten. Die ersten probeweisen Mikrowellen-Druckaufschlüsse wurden auch im Winter 2020 durchgeführt, diese mussten allerdings aus Gründen der Implementierung der Methoden mehrfach wiederholt werden. Die im Herbst 2019 und Frühjahr 2020 entnommenen Bodenproben aus Feld und Containerversuch wurden verarbeitet und analysiert.

Im Januar 2021 wurde das zweite OG-Treffen geplant und in den Räumen der JLU durchgeführt.

Im Februar wurden weitere Mikrowellendruckaufschlüsse durchgeführt.

Die Feldversuche in Dauborn und Stangenrod wurden im März 2021 angelegt, auf beiden Standorten wurde in diesem Jahr Sommergerste angebaut. Die folgenden Monate wurden maßgeblich zur Pflege und Anlage der Feldversuche genutzt, zudem wurde der Containerversuch betreut. Im Juni wurden dann die Bodenproben auf allen Feldversuchsstandorten gezogen, um auf den aktuellen Zustand der Standorte schließen zu können. Bei dieser Entnahme der Bodenproben fiel am Standort Münchholzhausen auf, dass es durch eine Wirkungslücke des Herbizids zu einem massiven Aufkommen von Ackerkratzdisteln kam (Abbildung 13).



Abbildung 13: Ackerkratzdistelbefall am Standort Münchholzhausen 2021

Um einem weiteren Ernteausfall entgegenzuwirken, wurden die Disteln per Hand entfernt, allerdings war der Befall so stark, dass lediglich in der Mitte der Parzellen ein Streifen bereinigt wurde, sodass die Ernte nicht betroffen war. Die Sommergerste auf dem Standort Dauborn erlitt leider zum Ende der Vegetation einen Sturmschaden (Abbildung 14), wobei es zu Lagerbildung kam. Glücklicherweise erschwerte das die Ernte der Parzellen nur geringfügig und beeinträchtigte die Ergebnisse nicht.



Abbildung 14: Lagergetreide (Sommergerste) auf dem Standort Dauborn 2021

Anschließend wurde das nächste OG-Treffen geplant. Dieses fand im Juli auf der Gefäßversuchsstation statt. Hier konnten der Containerversuch, aber auch zwei der Feldversuche vor Ort besichtigt werden.

Im August erfolgte die Ernte der Feldversuche auf den Standorten Dauborn, Stangenrod und Münchholzhausen (Abbildung 15), außerdem wurde in diesem Zeitraum auch der Containerversuch geerntet (Abbildung 16). Die anschließenden Wochen wurden dazu genutzt, die Proben zu verarbeiten.



Abbildung 15: Ernte des Feldversuchs in Stangenrod 2021



Abbildung 16: Ernte des Containerversuches 2021

Im September 2021 erfolgte auf dem Versuchsstandort in Münchholzhausen bereits die erste Versuchsanlage für das Versuchsjahr 2022. Hierzu wurde der Versuch erneut eingemessen und anschließend gedüngt. Auf diesem Standort sollte im Jahr 2022 Winterraps angebaut werden. Zudem wurden die Container für das Versuchsjahr 2022 vorbereitet. Hierzu wurde eine Bodenbearbeitung durchgeführt und die Container über Winter abgedeckt, damit im Versuchsjahr 2022 dort Sommergerste wachsen konnte.

Im Oktober wurden die letzten beiden Feldversuche in Villmar und Langgöns geerntet. Beide Versuche wurden per Hand geerntet. Im Anschluss wurden die Proben getrocknet, gedroschen und gemahlen, um für die Analysen vorbereitet zu werden. Parallel dazu wurden im Oktober und November die Feldversuche für das Versuchsjahr 2022 angelegt.

Über die Wintermonate wurden die Pflanzen- und Bodenanalysen weiter vorangetrieben. Ein weiterer Versuch, die Bodenproben mit Königswasser aufzuschließen, wurde unternommen.

Im März 2022 wurde Sommergerste in den Containern ausgesät. Vorher wurde der Boden gedüngt und erneut eine Bodenbearbeitung durchgeführt. Währenddessen wurden die letzten Pflanzenproben aufgeschlossen und für die Analyse vorbereitet.

Im April erfolgte ein letztes Mal das Einmessen der Feldversuche und die Anlage der Umrandungen. Anschließend wurden die Pflanzenbestände bonitiert (Abbildungen 17 und 16).



Abbildung 17: Feldversuch Münchholzhausen 2022



Abbildung 18: Containerversuch 2022 Sommergerste

In der Zwischenzeit wurden die Daten aus den Pflanzenaufschlüssen ausgewertet. Hierbei wurde festgestellt, dass das für diese Analyse gewählte Messgerät (ICP-OES) für die von uns gewählten Elemente (P, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Tl, Pb, U) nicht sensitiv genug ist und daher mit dieser Methode nicht gemessen werden konnte. Somit musste in den kommenden Monaten eine geeignete Methode zur Messung der Schwermetalle gefunden werden.

Im Juni 2022 wurde das Projekt im Rahmen der Öko-Feldtage präsentiert (Abbildung 19). Hierzu wurde ein Poster erstellt und erneut Demopflanzen angezogen. Das Projekt erregte einige Aufmerksamkeit und es ergaben sich einige anregende Diskussionen.



Abbildung 19: Präsentation des Projekts auf den Ökofelddagen in Villmar 2022

Da auf dem Feldversuch in Münchholzhausen in diesem Jahr Winterraps angebaut wurde, musste der Versuch gescheitert werden. Das bedeutet, dass die Parzellen mit einem speziellen Gerät voneinander getrennt werden müssen, damit der Versuch geerntet werden kann (Abbildung 20).



Abbildung 20: Scheitern Feldversuch Münchholzhausen 2022

Im Juli 2022 wurde der Containerversuch geerntet (Abbildung 21) und das Material wie in den Jahren zuvor aufbereitet.



Abbildung 21: Ernte Containerversuch 2023

Anschließend wurde der Feldversuch in Münchholzhausen (Winterraps) geerntet (Abbildung 22).



Abbildung 22: Ernte des Feldversuchs in Münchholzhausen 2022

Später wurden die beiden Feldversuche in Dauborn (Winterweizen) und Stangenrod (Winterweizen) geerntet. Die letzten beiden Feldversuche wurden Anfang August geerntet. Aufgrund eines erheblichen Wildschadens auf dem Standort Villmar (Winterroggen) konnte für diesen Standort kein Ertrag ermittelt werden (Abbildung 23). Trotzdem wurden Proben von diesem Standort entnommen, um später die P- und Schwermetallkonzentration ermitteln zu können. Als letzter Standort wurde Langgöns (Winterweizen) geerntet.



Abbildung 23: Wildschaden auf dem Versuchsstandort Villmar

Als letzte Maßnahme im Rahmen der Feldversuche wurden wie zu Anfangs Bodenproben auf allen Feldversuchsstandorten in einer Tiefe von 0-90 cm entnommen. Hierzu wurde ein spezieller Traktor mit Probenehmer und einem geeigneten Transportfahrzeug gemietet (Abbildung 24).



Abbildung 24: Entnahme der Bodenproben mithilfe eines Traktors und einem Entnahmegerät

In den darauffolgenden Monaten wurden sämtliche Pflanzen- und Bodenproben aus den Feld- und Containerversuchen aufbereitet und auf die Analysen vorbereitet.

Im Oktober fand die Tagung der Deutschen Gesellschaft für Pflanzenernährung in Burghausen statt, an der Maximilian Adami teilnahm.

Im November und Dezember 2022 wurden die ausstehenden CAL-P Bodenproben gemessen und ausgewertet. Zudem wurde nach einer Alternative für die Messung der Schwermetalle gesucht. Letztlich konnte mithilfe von Prof. Jakob Santner ein Kontakt zur Universität für Bodenkultur in Wien hergestellt werden. Dort konnte uns

zugesichert werden, dass unsere Proben mit der nötigen Sensitivität gemessen werden können, allerdings konnten dazu nicht unsere schon hergestellten Aufschlüsse des Pflanzenmaterials genutzt werden. Daher wurde im Februar 2023 eine adäquate Methode zum Aufschluss der Proben nach Vorlage der BOKU implementiert und ein Test-Set an Aufschlüssen nach Österreich gesendet. Nach der Auswertung dieses Test-Sets wurden sämtliche Pflanzenproben aus den Feld- und Containerversuchen erneut nach der Methode der BOKU aufgeschlossen und anschließend nach Österreich gesendet. Diese Arbeiten erstreckten sich bis in den Mai 2023. Anschließend wurden die Messergebnisse der insgesamt 628 Proben ausgewertet. Hierbei fiel ein möglicher Messfehler einige Blindwerte auf. Daher werden sämtliche Blindwerte neu gemessen und die Daten nachgereicht.

3 Ergebnisse und Zielerreichung

3.1 Haupt- und Nebenergebnisse des Vorhabens

3.1.1 Identifikation des Phosphor-Bedarfs in der Modellregion Mittelhessen

Kernziel dieses Arbeitspaketes war es, die landwirtschaftlich bedingten P_2O_5 -Flüsse qualitativ und quantitativ in drei Szenarien abzubilden und die Auswirkungen der novellierten Klärschlammverordnung zu untersuchen. Im Vordergrund standen dabei die Restriktionen der direkten bodenbezogenen Klärschlammverwertung für große Kläranlagen KA sowie die für diese ab 2029 verpflichtende Phosphorrückgewinnung. Dazu wurden folgende P_2O_5 -Flüsse unter Einbeziehung der jeweiligen Unsicherheiten (Schwankungsbreite MIN-MAX) betrachtet:

1. Ernteassoziierte Entzüge auf Acker- und Grünlandflächen (= P_2O_5 -Bedarf)
2. Klärschlammaufkommen und dessen Aufteilung entlang unterschiedlicher Verwertungswege (stofflich, thermisch) inkl. Exporte aus der Modellregion
3. Wirtschaftsdünger (WD, flüssig und fest) aus der Tierhaltung und Biogaserzeugung inkl. Importe von WD
4. Mineralische Düngemittelimporte

In **Szenario A** wurden die P-Flüsse gemäß dem Zustand vor Inkrafttreten der Klärschlammverordnung für das Jahr 2015 abgebildet. Hier galt, dass der überwiegende Teil (ca. 70 % der regionalen Klärschlamm) landwirtschaftlich verwertet wurde. Dies führte einen Großteil der abwasserassoziierten P-Fracht zurück auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Szenario B entspricht dem Zustand nach Inkrafttreten der Klärschlammverordnung und berücksichtigt somit die Restriktionen, die für die bodenbezogene Verwertung zum Tragen kommen (Bezugsjahr 2020). Da in diesem Szenario die P-Rückgewinnung unberücksichtigt blieb, müsste eine etwaige Deckungslücke gegenüber dem Bedarf bzw. gegenüber Szenario A durch Importflüsse in die Region ausgeglichen werden. Deren entsprechender ökologischer Rucksack (Transporte, Herstellung des Erzkonzentrates mittels Flotation, Produktion des Düngemittels) geht zulasten der landwirtschaftlichen Erzeugnisse.

Szenario C basiert auf den in Szenario B abgebildeten P-Flüssen, berücksichtigt jedoch die im Vorhaben anvisierte Kaskadennutzung (therm. Verwertung und P-Rückgewinnung) der regionalen Klärschlämme aller KA der Größenklasse (GK) >3 und die Rückführung der assoziierten P-Frachten in die Herkunftsfläche. Dies entlastet die Importabhängigkeit und den mit dieser Abhängigkeit assoziierten ökologischen Rucksack.

3.1.2 Ermittlung des P_2O_5 -Bedarfs in der Modellregion

Phosphat ist im Boden im Gegensatz zu Stickstoff und Schwefel nur wenig verlagerbar und muss aktiv von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden. Sickerwasserassoziierte Verluste an P_2O_5 -(-Düngern) aus dem Boden sind landwirtschaftlich belanglos (Finck, 1992). Die P_2O_5 -Düngermenge (Aufwandmenge) richtet sich primär nach dem Versorgungszustand des Bodens und dem spezifischen Bedarf der jeweiligen Kulturart. Die Ermittlung des P_2O_5 -Bedarfs für die Modellregion erfolgte anhand der in der Literatur beschriebenen ernteassoziierten P_2O_5 -Entzüge ohne Berücksichtigung der konkreten Versorgungstufen. Berücksichtigt wurde, dass gem. DüV eine mittlere Versorgungstufe/Gehaltsklasse anzustreben ist und möglichst gehalten werden soll. Dazu ist eine Düngung in Höhe der Nährstoffentzüge mit dem Erntegut im Allgemeinen ausreichend. Umfangreiche Untersuchungen hessischer Oberböden über einen Zeitraum von 3 Jahren ergaben, dass ein Großteil (ca. 75 %)

der untersuchten Bodenproben innerhalb der Versorgungsstufen C und D liegen (Pecoroni und Friedrich, 2013). Auch in anderen Bundesländern zeichnet sich schon seit längerem ein ähnlicher Trend ab (Baumgärtel, 2004).

Für die Modellierung war es zunächst erforderlich, die landwirtschaftliche Nutzfläche der Modellregion nach der Bewirtschaftungsform zu differenzieren. Tabelle 2 fasst die landwirtschaftlich genutzten Flächen Hessens, der hessischen Landkreise und der Modellregion zusammen. Ausgewiesen sind für das Jahr 2015 140.556 ha Dauergrünland und 179.886 ha Ackerfläche (AgrarSEr, 2016). Der Anteil der Grünlandflächen in den Landkreisen an der hessischen Gesamtgrünlandfläche liegt zwischen 4% und 12 % und beträgt in Summe 48 %. Die Anteile der Ackerflächen liegen zwischen 2% und 8 % und summieren sich für die Modellregion auf 39 %. Zwischen den Jahren 2016 und 2020 sind nur geringe Veränderungen festzustellen. Die Ertragsfähigkeit der Böden ist inhomogen, sodass der P_2O_5 -Entzug der landwirtschaftlichen Kulturen variiert. Für Ackerflächen kann unter Berücksichtigung der P_2O_5 -Rücklieferung über die Ernterückstände ein durchschnittlicher P_2O_5 -Entzug in Abhängigkeit des Ertragsniveaus berechnet werden. Angaben hierzu macht der Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH, 2021). Der Anteil der Kulturarten wurde gem. Angaben des statistischen Bundesamtes (DeStatis, 2022) auf die Modellregion und den Betrachtungszeitraum übertragen. Abbildung A2 zeigt den P_2O_5 Bedarf landwirtschaftlicher Kulturen sowie die anteilsgewichteten Mittelwerte für alle Ertragsniveaus. Weiterhin ist in Abbildung A2 die auf Basis der in der Literatur angegebenen P_2O_5 -Entzüge erstellte Dreiecksverteilung dargestellt. Für diese wurde der anteilsgewichtete Mittelwert der P_2O_5 -Entzüge für alle Kulturen bei mittlerem Ertragsniveau als wahrscheinlichster Wert (Zentralwert der Dreiecksverteilung) angesetzt. Für das Minimum (55 kg P_2O_5 /ha) und Maximum (93 kg P_2O_5 /ha) der Dreiecksverteilung wurde jeweils der anteilsgewichtete Mittelwert für alle Kulturen bei niedrigem und hohem Ertragsniveau gewählt.

Die Werte bewegen sich somit mit hoher Wahrscheinlichkeit im Wertebereich eines mittleren Ertragsniveaus, welches nach Angabe des BMEL (2091) für die meisten Kulturarten in Hessen in den Jahren 2014 – 2020 mit Ausnahme von 2018 (extreme Trockenheit) zutreffend war.

Tabelle 2: Landwirtschaftlich genutzte Fläche Hessens, der Landkreise (LK) und der Modellregion (MR) aus (StatBer, 2022; AgrarSEr, 2017).

Region	Jahr	Dauergrünland ha	%-Hess. %	%-MR %	Ackerland ha	%-Hess. %	%-MR %
Hessen	16	294.157	100	-	466.823	100	-
	20	294.288			464.437		
Gießen, LK	16	12.037	4,1	8,6	22.790	4,9	16,2
	20	12.038	4,1	8,6	22.631	4,9	16,2
Lahn-Dill-Kreis	16	17.112	5,8	12,0	8.674	1,9	6,2
	20	10.612	5,8	12,2	8.261	1,8	5,9
Limburg-Weilburg	16	10.544	3,6	7,5	21.444	4,6	15,3
	20	14.540	3,6	7,5	21.464	4,6	15,3
Marburg-Biedenkopf	16	19.443	6,6	13,8	29.734	6,4	21,2
	20	19.311	6,6	13,7	29.664	6,4	21,1
Vogelsbergkreis	16	33.439	11,4	23,8	31.530	6,8	22,2
	20	33.019	11,2	23,5	31.195	6,7	22,2
Fulda	16	34.916	11,9	24,8	26.788	5,7	19,1
	20	34.505	11,7	24,5	26.975	5,8	19,2
Wetteraukreis	16	13.250	4,5	9,4	38.926	8,3	27,7
	20	13.741	4,7	9,8	38.668	8,3	27,5
Modellregion (MR)	16	140.556	49,0	-	179.886	32,0	-
	20	140.336	46,7		178.858	30,0	

Für das Dauergrünland werden von Lütke-Entrup et al. (2011) Nährstoffentzüge je nach Wachstumsbedingung und Weideanteil angegeben. Es wurden mittlere Wachstumsbedingungen bei jährlich zwei Schnitten mit Nachweide angenommen und zur Konstruktion der Verteilungsfunktion verwendet (siehe Abbildung 25).

Während das Ertragsniveau bei den Ackerflächen mit statistischen Daten rückblickend verglichen werden konnte und auch die Anteile der jeweiligen Kulturen Berücksichtigung fanden (Übertragung von Deutschlanddaten auf Hessen), ist die Informationslage bezüglich der Grünlandbewirtschaftung deutlich schlechter. Die im Rahmen einer Biotopkartierung ermittelten Grünlandbiotope machten zusammen ca. 27.000 ha (9 % der hess. Grünlandfläche) aus. Bei der restlichen (überwiegenden) Fläche handelt es sich nach Mahn (2018) um mäßig intensiv bis intensiv genutztes Grünland. Letzteres stützt die getroffene Annahme bezüglich der Nährstoffentzüge des Grünlandes.

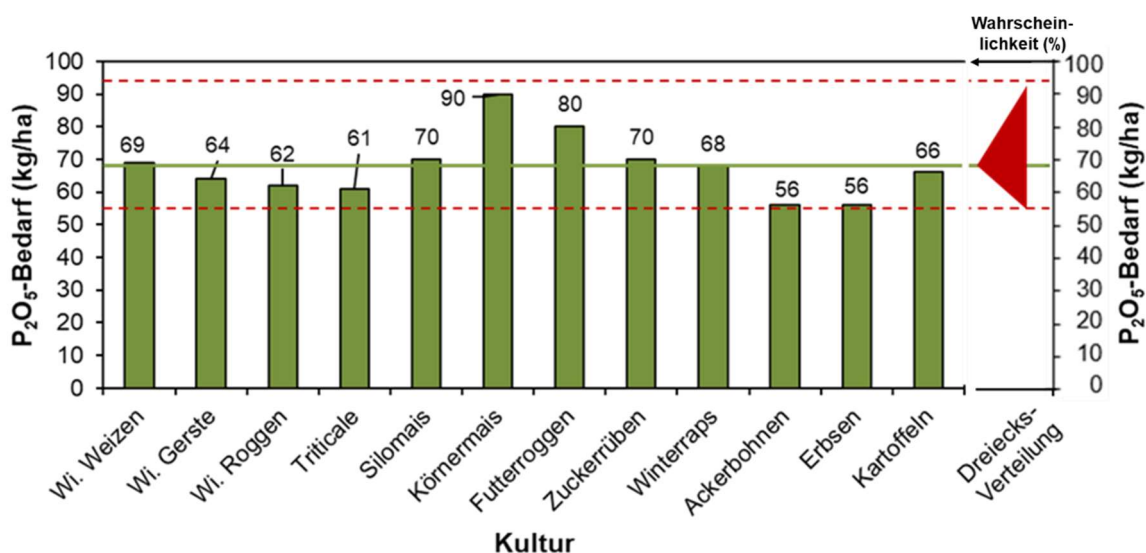


Abbildung 25: P₂O₅-Bedarf landwirtschaftlicher Kulturen bei mittlerem Ertragsniveau auf Basis von Daten aus (LLH, 2021). Die grüne Linie markiert den anteilsgewichteten Mittelwert der P₂O₅-Entzüge bei mittlerem Ertragsniveau unter Berücksichtigung der Anteile der aufgeführten Kulturarten nach Tabelle T3. Die gestrichelten roten Linien markieren den entsprechenden anteilsgewichteten Mittelwert bei hohem bzw. niedrigem Ertragsniveau. Das rote Dreieck zeigt in der MC-Simulation berücksichtigte Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Abbildung 27 zeigt die Häufigkeitsverteilung der P₂O₅-Entzüge der Modellregion für das Jahr 2020 auf Basis von 10.000 Simulationsläufen. Die Ergebnisse der Monte-Carlo Simulation für das Jahr 2016 waren aufgrund der nur geringen Änderungen der Flächen (siehe Tab. 3) nahezu identisch und werden daher nicht gezeigt. Während einer Simulation stuft das Softwarepaket Crystal Ball™ die Annahmen gemäß ihrer Wichtigkeit für jede Prognosezelle ein. Diese Rangfolgen werden in Sensibilitätsdiagrammen als Balken dargestellt und verdeutlichen, wie stark sich die Unsicherheit (Variabilität) einzelner Eingangsgrößen auf die Schwankungsbreite der prognostizierten Größe (hier P₂O₅-Entzug) auswirkt. Für die ernteassoziierten P₂O₅ Entzüge erwies sich insbesondere die Unsicherheit des Anteils an Ackerflächen als eine sensible Größe (s. Balkendiagramm in Abb. 27).

Tabelle 3: Anteile und P₂O₅-Bedarf landwirtschaftlicher Kulturarten bei verschiedenen Ertragsniveaus.

Kulturart	Anteil*3 (%)	P ₂ O ₅ -Entzüge bei Ertragsniveau		
		niedrig (kg/ha)	mittel (kg/ha)	hoch (kg/ha)
Weizen	25,3	55	69	92
Silomais	18,9	70	70	120
Gerste	13,3	47	64	76
Raps	8,6	53	68	92
Roggen	5,4	46	62	76
Körnermais	3,7	66	90	116

Zuckerrüben	3,4	54	70	94
Rest* ¹	21,4	55	64	81
Mittelwert gesamt*²	-	55	68	93

*1 Arithmetischer Mittelwert: Triticale, Futterroggen, Ackerbohne, Erbsen, Kartoffeln

*2 Anteilsgewichteter Mittelwert

*3 Nach Angaben für Deutschland in (Statistisches Bundesamt, 2022)

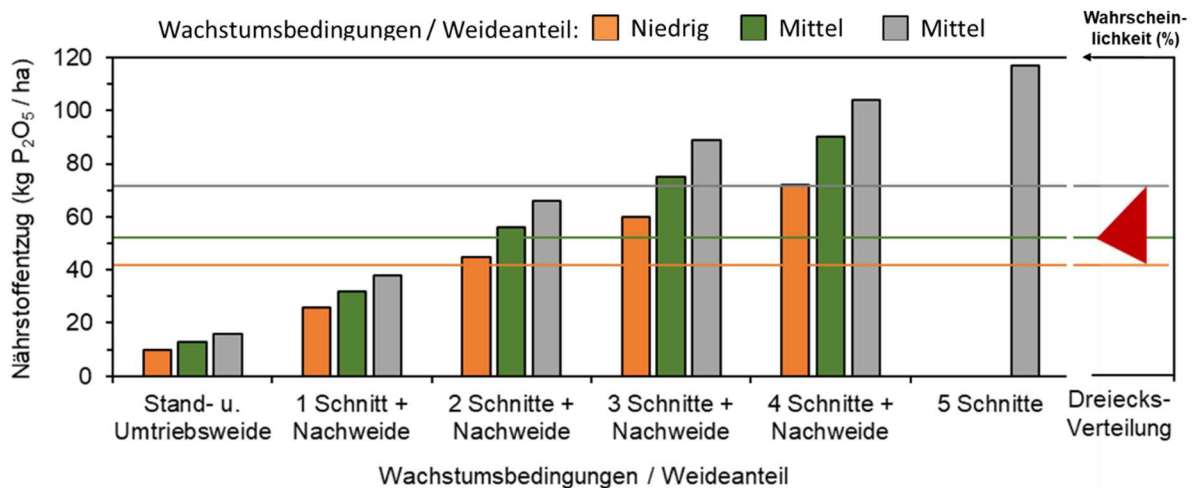


Abbildung 26: Nährstoffentzüge bei Dauergrünland je nach Wachstumsbedingungen und Weideanteil nach Lütke et al. (2011). Die grüne, orange und graue Linie markiert jeweils den Mittelwert der P₂O₅-Entzüge bei mittleren, niedrigen und guten Wachstumsbedingungen bzw. Weideanteilen. Das rote Dreieck zeigt die für die MC-Simulation angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Nährstoffentzüge

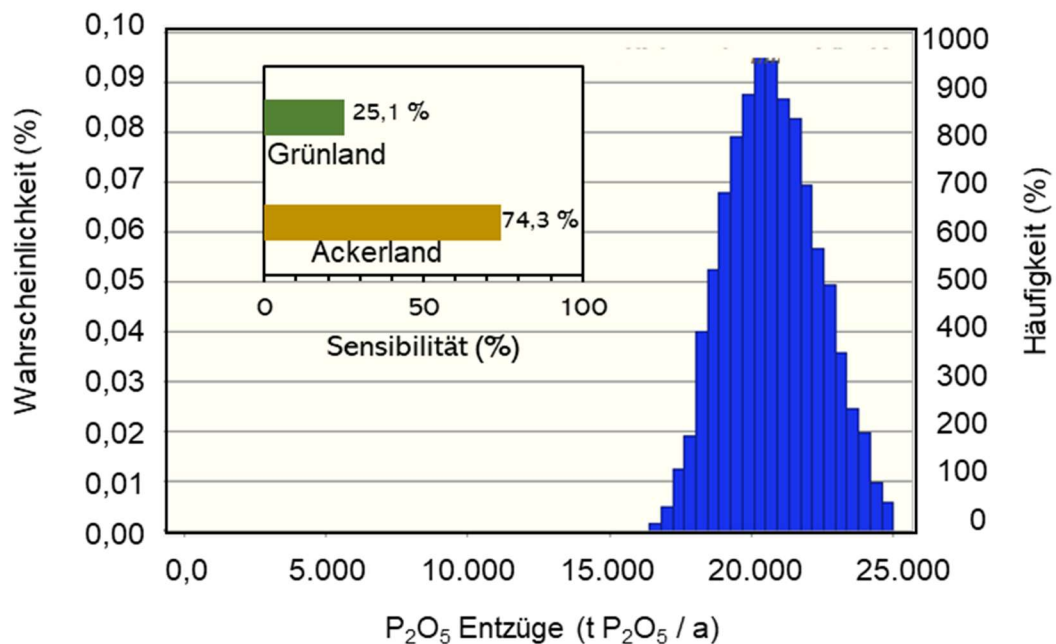


Abbildung 27: Häufigkeitsverteilung der modellierten P2O5 Entzüge in der Modellregion für das Jahr 2020 auf Basis von 10.000 Simulationsläufen. Median: 20.658 t P2O5/a. Die innenliegende Abbildung zeigt das Sensibilitäts-diagramm.

3.1.3 Ermittlung der mit Wirtschaftsdünger assoziierten P₂O₅-Flüsse in der Modellregion

Die in den organischen Wirtschaftsdüngern (WD) enthaltenen Phosphat - und Kalimengen sind in ihrer Wirkung langfristig und denen mineralischer Dünger gleichwertig. Daher sind sie bei der Düngebedarfsermittlung zu 100 % anzusetzen. Besonders aufgrund der aktuell stark steigenden Mineraldüngerpreise stellen WD für Ackerbaubetriebe eine geeignete Alternative dar (LLH, 2022).

Die WD umfassen eine große und uneinheitliche Gruppe von Stoffen mit sehr unterschiedlicher Zusammensetzung, die in landwirtschaftlichen Betrieben anfallen (Finck, 1979). Um die mit den WD assoziierten P₂O₅-Flüsse zu bilanzieren, wurde in diesem Vorhaben folgender Ansatz verfolgt: Zunächst wurden für die Referenzjahre 2015 und 2020 die behördlich erfassten Mengen an ausgebrachten WD herangezogen (siehe Tabelle 4). In der Landwirtschaftszählung 2020 wurden die ausgebrachten flüssigen WD (5.278.200 m³) differenziert in: 2.840.000 m³ Rindergülle, 671.100 m³ Schweinegülle, 121.600 m³ sonstige Gülle und Jauche. Die ausgebrachte Menge fester WD setzt sich zusammen aus 1.185.808 t Festmist (nicht differenziert nach Tierart), 29.400 t Geflügeltrockenkot und 57.900 t festem Biogas-Gärrest. Die in Hessen ausgebrachten und dokumentierten Mengen an WD wurden anhand von Umlageschlüsseln (siehe Abbildung A5) anteilmäßig auf die Modellregion übertragen.

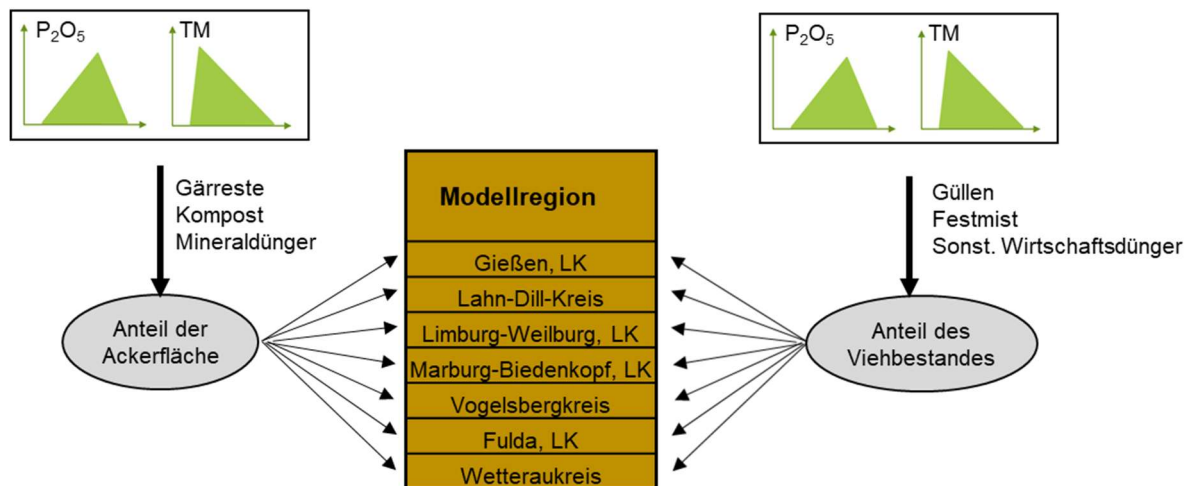


Abbildung 28: Schematische Darstellung des Bilanzmodells für die Umlage P₂O₅-behafteter Stoffströme auf die Modellregion

Um die Unsicherheit der Daten zu berücksichtigen, wurden die behördlich angegebenen relativen Standardfehler ausgewertet und für den Aufbau der Dreiecksverteilungen für die MC-Simulation verwendet.

Die Festmistmenge wurde aufgeteilt in Rinder- und Schweinefestmist sowie einen fixen Anteil von 10 % sonstigem Festmist (Geflügel-, Ziegen-, Schaf-, Pferdemit). Die Ermittlung des Anteils an Rinder- und Schweinefestmist erfolgte gem. folgender Gleichung:

$$\text{Festmist Schweine} = \frac{\text{Anzahl Schweine}_{FM}}{\text{Anzahl Rinder}_{FM}} \cdot \frac{FMP_{Schweine}}{FMP_{Rinder}} \cdot \text{Festmist}_{ges} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Schweine/Rinder _{FM}	Anzahl von Schweinen bzw. Rindern, bei denen gem. Haltungsform überwiegend Festmist als WD anfällt. Daten aus Tabelle T5, T6 und T7.
FMP _{Schweine/Rinder}	Spezifische Wirtschaftsdüngerproduktion in m ³ /(Tier Jahr) gemittelt auf Basis von Angaben in Statistisches Bundesamt, Veröffentlichung "Stallhaltung, Weidehaltung 2020"; BMEL (2019). Schweine: 1,2 m ³ /(Tier Jahr); Rinder: 8,7 m ³ /(Tier Jahr)
Festmist _{ges}	Gesamter Festmist gem. Tabelle T4 abzüglich 10 % sonstiger Festmist.

Tabelle 4: Ausgebrachte Mengen im Jahr 2015 und 2020 nach Wirtschaftsdüngerarten für Hessen nach (Quelle: Landwirtschaftszählung 2016/2020).

Ausgebrachte Wirtschaftsdüngerarten	Menge		Einheit
	2015	2020	
Flüssige Wirtschaftsdünger	5.657,4	5.278,2	× 10³ m³
Rindergülle	3.246,4	2.840,4	× 10 ³ m ³
Schweinegülle	706,3	671,1	× 10 ³ m ³
Sonstige Gülle u. Jauche* ¹	171,3	121,6	× 10 ³ m ³
Flüssiger Biogas-Gärrest	1.533,3	1.625,1	× 10 ³ m ³
Feste Wirtschaftsdünger	1.290,9	1.268,2	× 10³ t
Festmist	1234,4	1.180,9	× 10 ³ t
Geflügeltrockenkot	28,9	29,4	× 10 ³ t
Fester Biogas-Gärrest	27,6	57,9	× 10 ³ t

Die Menge des Festmistes aus der Rinderhaltung ergibt sich dementsprechend aus der Differenz: Festmist – Festmist Schweine – sonstiger Festmist (10 %).

Um den mit den WD assoziierten P₂O₅-Fluss zu ermitteln, wurden die als Verteilung hinterlegten WD-Mengen mit dem jeweiligen Trockenmassegehalt (TM) und dem P₂O₅-Gehalt multipliziert. Beide Parameter wurden für die jeweiligen WD im Rahmen einer Literaturrecherche ermittelt und als Verteilung in der MC-Simulation hinterlegt. Abbildung A6 zeigt die berücksichtigten Verteilungen.

Neben den im Rahmen der Landwirtschaftszählungen erfassten WD wurden Komposte aus der biologischen Abfallbehandlung berücksichtigt. Hierzu wurde die in Hessen im Bereich Forst- und Landwirtschaft (inkl. Gartenbau, Dauerkulturen, Weinbau, Hopfenanbau usw.) verwertete Kompostmenge für 2015 und 2020 herangezogen AgrarSEr (2017). Eine genauere Differenzierung zwischen Landwirtschaft (Acker- und Grünland), Forstwirtschaft und sonstigen Anwendungen geht aus den Daten nicht hervor. Es wurde die Annahme getroffen, dass der überwiegende Kompostanteil (80 %) auf Acker- und Grünlandflächen ausgebracht wird und in der P₂O₅-Bilanz wirksam ist.

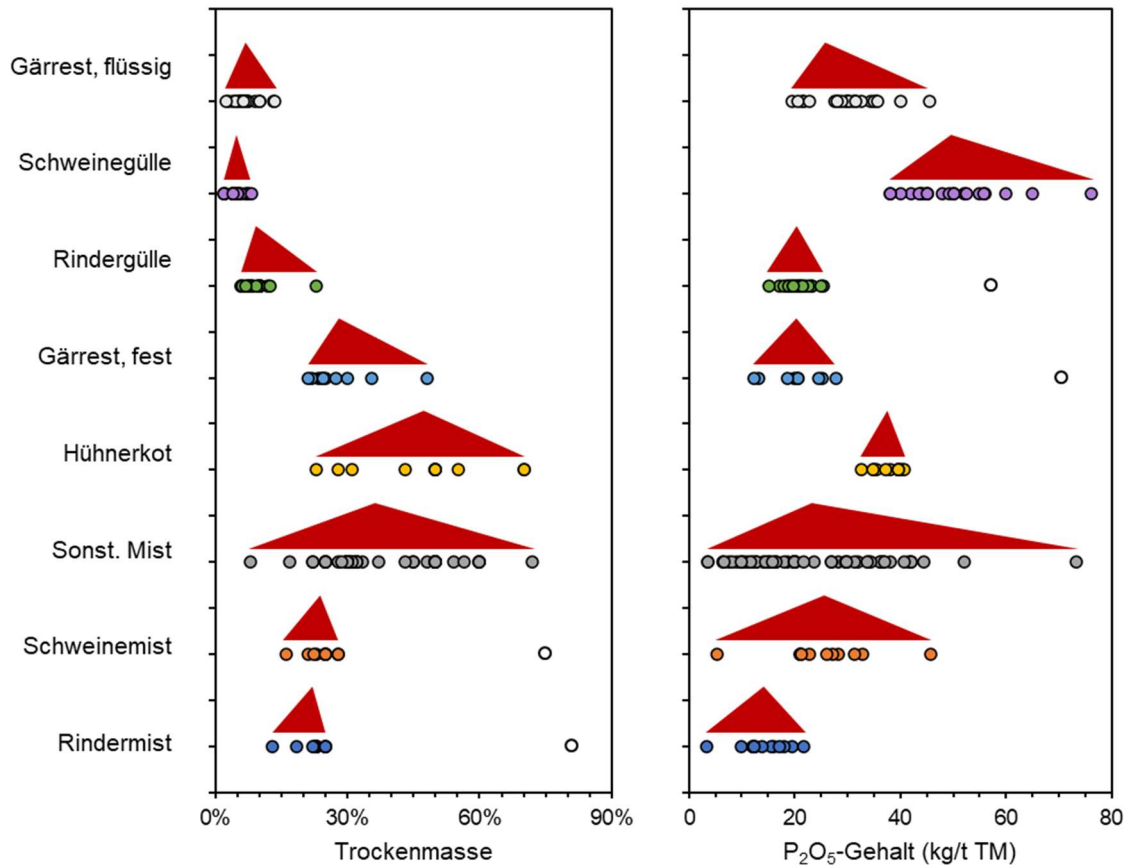


Abbildung 29: Verteilungsfunktionen für Trockenmasse und P₂O₅-Gehalt verschiedener Wirtschaftsdünger nach (LWK Nordrhein-Westfalen, 2014; LTZ Außenstelle Rheinstetten-Forchheim, 2007/21; LFL Bayern, 2012/2021; LWK Niedersachsen, 2021; IGZ, 2017; LLH Hessen, 2021; Paulsen et al., 2011; LFL Thüringen 2012; Möller et al., 2009; DLG, 2017)

Umfangreiche Datensätze bezüglich der in Hessen gehaltenen Tiere (Rinder und Schweine) liegen landkreisspezifisch vor AgrarSEr (2017). Diese differenzieren Rindermast- und -milchvieh sowie Schweinemast und -zucht. Bedeutend für die Zuordnung der diversen WD-Arten sind Kenntnisse bezüglich der verwendeten Aufstallungssysteme und weiterer haltungsspezifischer Merkmale (z.B. Weidegang). Hierzu wurden Bundesdaten des BMEL basierend auf Viehbestandserhebungen ausgewertet und auf Hessen bzw. die Modellregion übertragen (siehe Tabelle T5 und T6). Für Schweine wurde die Art des WD in BMEL (2019) nicht explizit ausgewiesen. Daher wurde in der vorliegenden Arbeit basierend auf der Haltungsspezifikation in KTBL (2019) angenommen, dass bei Vollspalt- und Teilsplattböden überwiegend Gülle anfällt und bei allen anderen Haltungssystemen überwiegend Festmist entsteht.

Tabelle 5: Anteil der in Deutschland vorhandenen der Haltungsplätze für Rinder nach Haltungsverfahren und überwiegend anfallende Art des Wirtschaftsdüngers (WD) aus BMEL, 2019. Aufgrund von Rundungsfehlern können von 100 % abweichende Gesamtsummen resultieren.

Gliederung	Rindermast* ¹ %	Milchkühe %	Überwiegende Art des WD
Rinder			
Haltungsplätze im			
Anbindestall	12,4	18,2	Gülle
	9,0	9,2	Festmist
Laufstall	49,9	62,3	Gülle
	24,4	9,7	Festmist
anderen Haltungsverf.	4,2	0,7	Festmist
Rinder gesamt	62,3	80,5	Gülle
	37,6	19,6	Festmist

*1: Zusätzlich enthalten sind Zuchttiere, Kälber und männliche Rinder.

Tabelle 6: Haltungsplätze für Schweine nach Haltungsverfahren und überwiegend anfallenden Art des Wirtschaftsdüngers (WD) aus BMEL, 2019. Aufgrund von Rundungsfehlern können von 100 % abweichende Gesamtsummen resultieren.

Gliederung	Schweinemast %	Zuchtschweine %	Überwiegende Art des WD* ¹
Schweine			
Haltungsplätze mit			
Vollspaltenboden	81,2	51,5	Gülle
Teilspaltenboden	15,0	41,0	
planbefestigtem Boden mit			
Einstreu	0,9	5,2	Festmist
Tiefstreu	1,8	1,7	
anderen Stallhaltungsverf.	1,8	0,7	
Schweine gesamt	96,2	92,5	Gülle
	4,5	7,6	Festmist

*1 Anhand Angaben in KTBL, 2019

Tabelle 7: Tierbestände in Hessen, ausgewählten Landkreisen und der Modellregion aus AgrarSEr (2017) und StatBer (2022)

Region	Jahr	Rinder	% von Hess.	% der MR..	davon Milchkühe	Schweine	% von Hess.	% der MR..	davon Zucht
	-	Anzahl	%	%	Anzahl / (%)	Anzahl	%	%	Anzahl / (%)
Hessen	2016*1	438.852			134.695 / (31)	613.507			41.969 / (7)
	2020	406.304	100	-	124.705 / (31)	543.934	100	-	29.905 / (6)
Gießen, LK	2016	13.025	3,0	6,5	3.627 / (28)	15.234	2,5	7,8	1.441 / (10)
	2020	11.995	3,0	6,3	3.340 / (28)	10.521	1,9	6,4	744 / (7)
Lahn-Dill-Kreis	2016	11.447	2,6	5,8	2.290 / (20)	2.344	0,4	1,2	74 / (3)
	2020	10.612	2,6	5,6	2.123 / (20)	1.234	0,2	0,8	11 / (1)
Limburg-Weilburg, LK	2016	14.283	3,3	7,2	4.141 / (29)	15.477	2,5	7,9	1.709 / (11)
	2020	14.540	3,6	7,6	4.216 / (29)	15.062	2,8	9,2	1.528 / (10)
Marburg-Biedenkopf, LK	2016	27.831	6,3	14,0	8.114 (29)	29.825	4,9	15,2	1.306 / (4)
	2020	25.652	6,3	13,5	7.479 / (29)	23.085	4,2	14,1	430 / (2)
Vogelsbergkreis	2016	52.875	12,0	26,6	16.778 / (32)	62.306	10,2	31,7	5.489 / (9)
	2020	49.620	12,2	26,0	15.745 / (32)	53.318	9,8	32,6	4.370 / (8)
Fulda, LK	2016	60.191	13,7	30,3	18.591 / (31)	51.627	8,4	26,3	3.598 / (7)
	2020	60.324	14,8	31,6	18.632 / (31)	46.208	8,5	28,3	2.952 / (6)
Wetteraukreis	2016	19.243	4,4	9,7	5.106 / (27)	19.613	3,2	10,0	1312 / (7)
	2020	17.977	4,4	9,4	4.770 / (27)	13.985	2,6	8,6	601 / (4)
Modellregion (MR)	2016	198.895	49,0		58.647 / (30)	196.426	32,0		14.929 / (8)
	2020	190.720	46,7	-	56.305 / (30)	163.409	30,0	-	10.636 / (7)

Abbildung 30 zeigt die aus der Wirtschaftsdüngerabfuhr resultierenden P_2O_5 -Frachten in der Modellregion für das Jahr 2015 und 2020 als Häufigkeitsverteilung auf Basis von 10.000 MC-Simulationsläufen. Für die betrachteten Jahre ist die P_2O_5 -Fracht im Jahr 2015 um ca. 2.000 t höher als 2020, was vor allem durch das höhere WD-Aufkommen in diesem Jahr begründet ist (vgl. Tabelle T 4). Die Variabilität wird in beiden Jahren sehr stark durch die Eigenschaften der Rindergülle geprägt, welche die mengenmäßig bedeutsamste Art an WD darstellt. Es zeigt sich, dass 50 % des P_2O_5 -Bedarfes (Abb. A4) mit dem WD-assoziierten P_2O_5 in der Modellregion gedeckt werden.

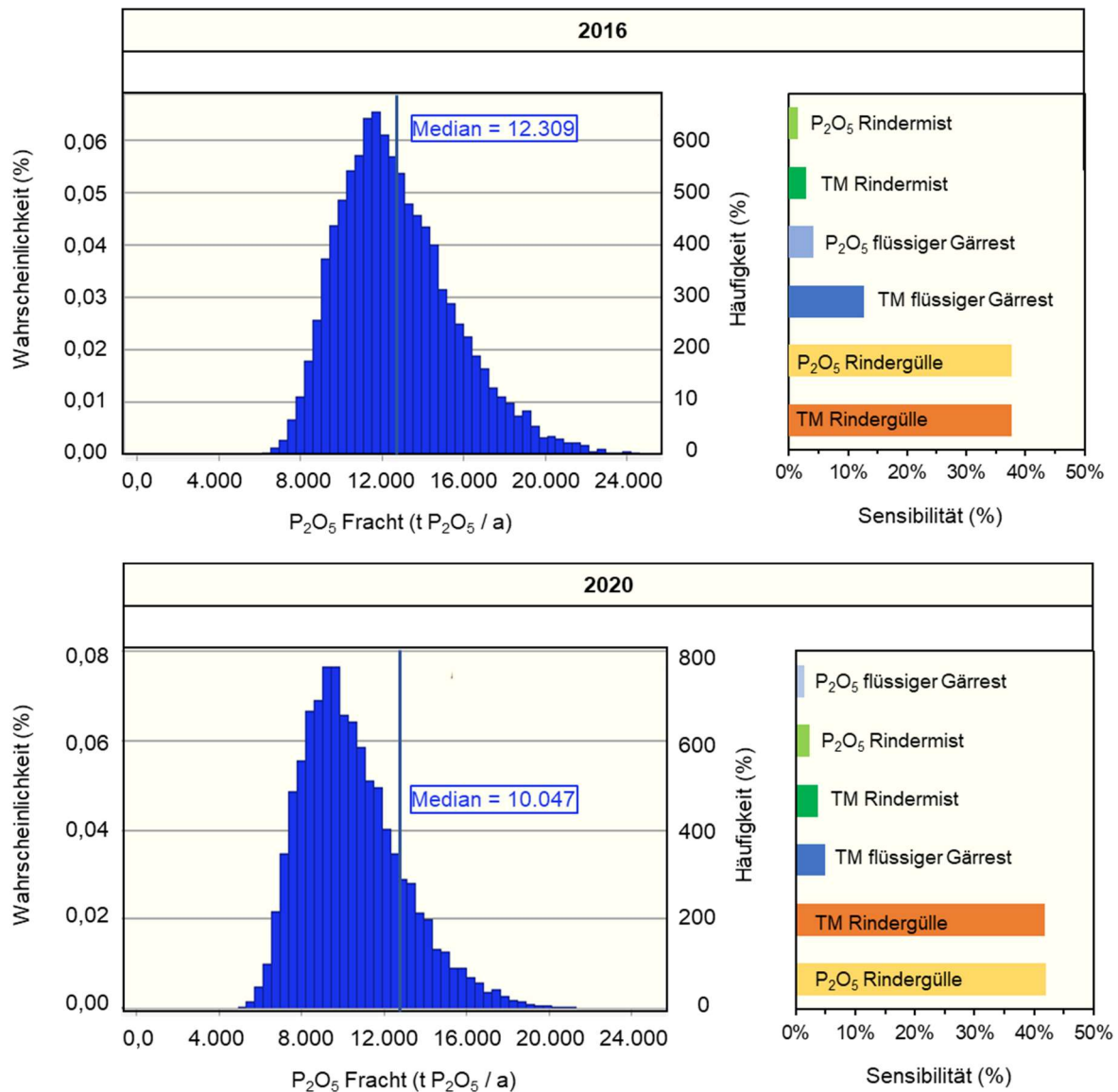


Abbildung 30: Häufigkeitsverteilungen und Sensibilitätsdiagramme der modellierten P_2O_5 -Frachten in Verbindung mit der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern in der Modellregion für das Jahr 2016 und 2020 auf Basis von 10.000 Simulationsläufen.

3.1.4 Ermittlung der P_2O_5 -Mineraldüngerimporte

Der Inlandabsatz an phosphathaltigen Düngemitteln wird jährlich erfasst und veröffentlicht (Destatis, 2022). Im Wirtschaftsjahr 2019/2020 betrug der Absatz in Hessen 3.228 t P_2O_5 , 2020/2021 stieg der Absatz auf fast das Doppelte (6.207 t P_2O_5). Die Angaben in Destatis (2021) beziehen sich auf ein Wirtschaftsjahr, das am 1. Juli

beginnt und am 30. Juni des folgenden Jahres endet. Eine retrospektive Betrachtung des Absatzes von phosphathaltigen Handelsdüngern der Landwirtschaft und der damit verbundenen Ausgaben von 2014 bis 2020 zeigt eine ausgeprägte Schwankung (siehe Abbildung 31). Ein Grund hierfür können Preisschwankungen und damit korrelierendes Einkaufsverhalten der Landwirte sein. Weiterhin ist es gängige Praxis, für wenig mobile Nährstoffe wie P_2O_5 anstelle einer jährlichen Düngung die Nährstoffe nur alle 2-3 Jahre zu verabreichen. Die Nährstoffmenge wird dann periodisch um die 2- bzw. 3-fache Menge des Jahresbedarfs erhöht.

Aufgrund der starken Schwankung erschien es nicht sinnvoll, den mineraldüngerassoziierten P_2O_5 -Fluss im Rahmen der MC-Simulation auf Basis einer Dreiecksverteilung (Mittelwert \pm Minimal und Maximalwert) zu parametrisieren. Zur Abbildung der schwankungsbehafteten P_2O_5 -Importe wurde daher eine Gleichverteilung hinterlegt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit aller Werte zwischen Minimum (ca. 3.000 t P_2O_5) und Maximum (6.000 t P_2O_5) wurde damit als gleich hoch angenommen. Eine Übertragung des innerhessischen P_2O_5 -Absatzes auf die Modellregion erfolgte anhand der Ackerflächenanteile (vgl. Abb. 26). Die daraus resultierende Häufigkeitsverteilung aus 10.000 Simulationsschritten zeigt Abbildung A9.

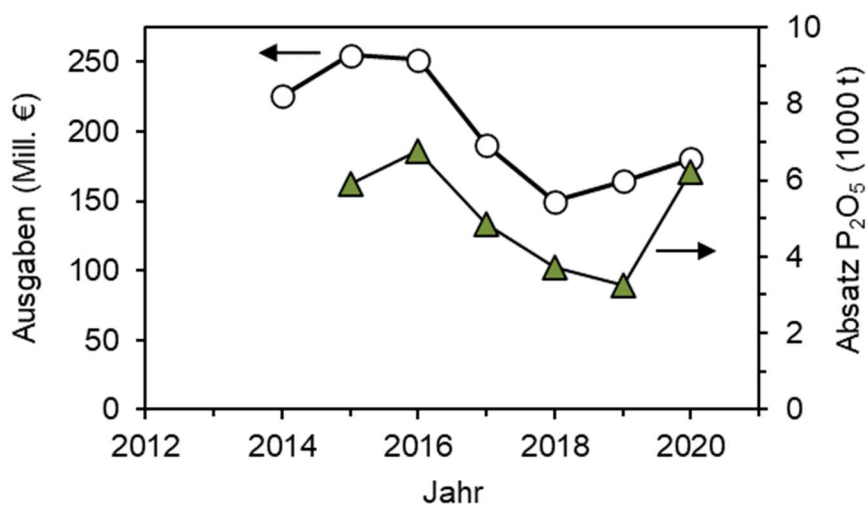


Abbildung 31: Zeitliche Entwicklung der bundesweiten Ausgaben für phosphorhaltige Düngemittel sowie des P_2O_5 -Absatzes in Hessen (BMEL, 2021; DeStatis, 2022).

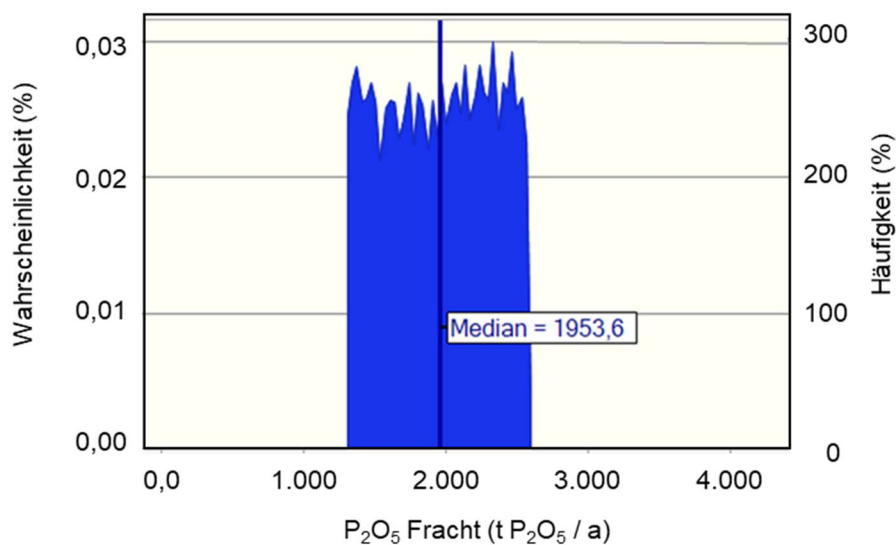


Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung der modellierten P₂O₅ Fracht in Verbindung mit der Ausbringung von Mineraldüngern in der Modellregion auf Basis von 10.000 Simulationsläufen.

3.1.5 Ermittlung des klärschlambürtigen P₂O₅-Aufkommens in der Modellregion

Zur Abbildung des klärschlammassoziierten P₂O₅-Flusses in der Region wurde zunächst das KS-Aufkommen sowie dessen Entsorgungswege für den Zeitraum der letzten 10 Jahre recherchiert (RegioStat, 2021). Es zeigt sich, dass in der Modellregion etwa 24 % des hessischen Klärschlammes anfallen und dass dieser bis 2016 vorwiegend landwirtschaftlich verwertet wurde (Tabelle T8). Weiterhin spiegelt sich der auf Bundes- sowie Landesebene bereits länger abzeichnende Trend einer Verschiebung von der landwirtschaftlichen hin zu einer thermischen Verwertung auch in der Modellregion ab (vgl. Abbildung 33). Dennoch ist der Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung im Jahr 2020 in der Region gegenüber Hessen noch etwa doppelt so hoch, was ein Hinweis auf die ländliche Prägung (hohes Flächenangebot) der Modellregion ist. Verdeutlicht wird dies auch durch die Tatsache, dass in der Modellregion 25 % der hess. Gesamtbevölkerung leben, sich jedoch 30 % der hess. Ackerflächen und etwa 50 % der hess. Grünlandflächen befinden (vgl. Tabelle T1/T2). Das KS-Aufkommen wurde auf Basis der landkreisspezifischen Daten als Dreiecksverteilung in die MC-Simulation eingebunden und dabei der behördlich angegebene Standardfehler von 1 % als Schwankungsbreite berücksichtigt.

Grundlage für die Hinterlegung der Klärschlammereigenschaften bildete ein Datenkollektiv von insgesamt 57 Kläranlagen. Darunter befinden sich sowohl Anlagen in Gemeinden mit direktem Anschluss an landwirtschaftliche Flächen als auch Großkläranlagen in städtischen Gebieten. Datensätze zu den Eigenschaften der einzelnen Klärschlämme wurden zusammengestellt aus i) den Antworten auf einen Fragebogen, der an die Kläranlagenbetreiber verschickt wurde, ii) der offiziellen Klärschlamm-Datensammlung und iii) umfangreicheren Stoffdatensätzen, die durch die Kläranlagenbetreiber zur Verfügung gestellt wurden. Insgesamt wurden 532 Datensätze des regionalen Klärschlammes zusammengestellt, die Informationen zu P₂O₅-Gehalt, Trockensubstanz (TS), Glühverlust (GV), Spurenmetallen und anderen Parametern über den Zeitraum der letzten Jahre enthalten. Datenlücken wurden durch Mittelwertsubstitution (Kang 2013) kompensiert, um einen vollständigen Satz von Eingangsverteilungen zu erzeugen. Die Kläranlagen wurden gruppiert und parameterspezifische Verteilungen für Anlagen mit ≥ 5 Datensätzen berechnet. Tests für die Anpassungsgüte (Chi-Quadrat und Anderson-Darling) wurden für verschiedene Verteilungen durchgeführt. Bevorzugt wurden Dreiecksverteilungen, die in beiden Tests eine zufriedenstellende Anpassung lieferten und einfach zu handhaben sind. Die Spannweite der abgeleiteten Dreiecksverteilungen wurde verwendet, um entsprechende Verteilungen für Kläranlagen zu erzeugen, für die weniger Daten verfügbar waren. In diesen Fällen dienten die verfügbaren Mittelwerte oder Einzelwerte als Modalwert der Dreiecksverteilungen, während die Minimal- und Maximalwerte der Verteilungen aus den Spannweiten der Kläranlagen mit ≥ 5 Datensätzen übernommen wurden.

Tabelle 8: Ausbaugrößen der Kläranlagen, Klärschlammaufkommen sowie Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung in den Landkreisen und der Modellregion (RegioStat, 2021).

Region / Landkreis	Ausbaugröße Kläranlagen	Klärschlammaufkommen		Landw. Verwertung	
		2016	2020	2016	2020
		EW	t/a	%	%
Hessen		156.544	150.166	33,6	20,0
Gießen	505.865	5.821	6.740	90,5	25,1
Lahn-Dill	351.645	4.772	4.390	23,0	8,2
Limburg-Weilburg	313.450	4.901	5.739	74,9	54,4
Marburg-Biedenkopf	480.284	5.690	5.628	46,8	33,4
Vogelsberg	202.087	1.895	2.165	60,1	50,3

Fulda	369.210	4.826	4.408	93,8	71,7
Wetterau	487.822	7.376	6.762	87,8	59,1
Modellregion	2.710.363	35.281 ^{*1}	35.832 ^{*1}	70,4 ^{*2}	42,7 ^{*2}

*1: 23 bzw. 24 % des hess. Gesamtklärschlammaufkommens

*2: Massengewichteter Durchschnitt.

Basierend auf diesen Daten wurde eine Verteilung für den Klärschlamm der gesamten Modellregion sowie jeweils eine Verteilung für die Untergruppen der Klärschlämme von Kläranlagen der Größenklassen I – III sowie IV – V hinterlegt.

Abbildung 32 zeigt die resultierende Häufigkeitsverteilung der mit dem Klärschlammaufkommen assoziierten P₂O₅-Fracht in der Modellregion für das Jahr 2020 aus 10.000 Simulationsschritten. Sowohl die resultierende Verteilungsform wie auch der Median für das Jahr 2015 waren nahezu identisch zu den Werten von 2020, so dass auf eine Darstellung für 2015 verzichtet wird.

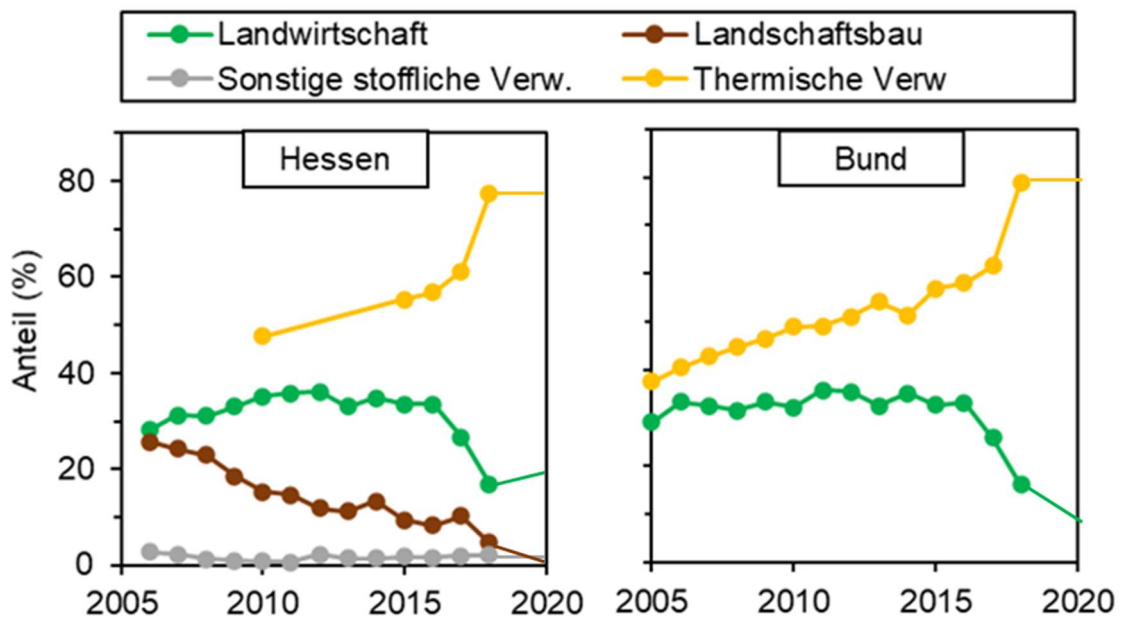


Abbildung 33: Klärschlammaufkommen und Verwertungsanteile für Hessen und den Bund. Quelle: HSL, 2021

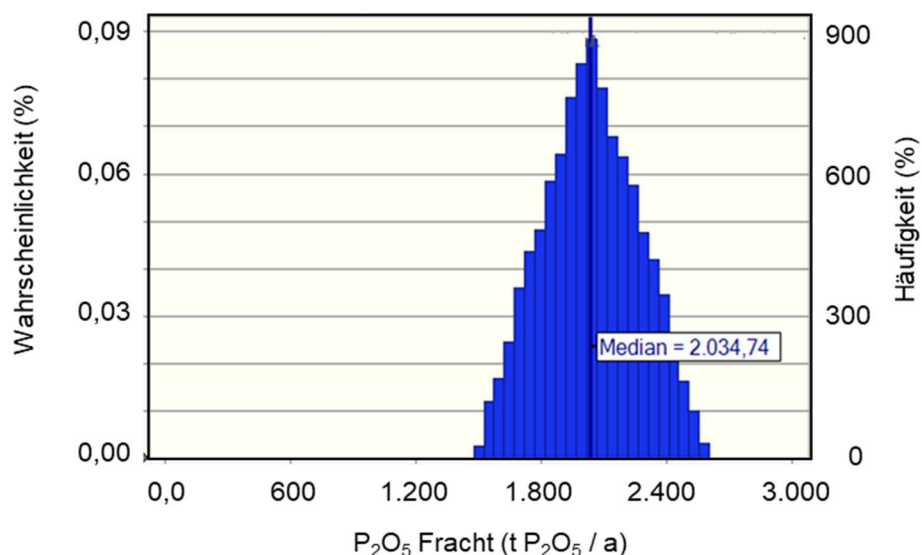


Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung der modellierten P₂O₅ Fracht resultierend aus der Ausbringung von Klärschlämmen in der Modellregion für das Jahr 2020 auf Basis von 10.000 Simulationsläufen

3.1.6 Ergebnisse: Gegenüberstellung der P₂O₅-Aufkommen in der Modellregion

Nachdem die wesentlichen P₂O₅-Frachten für die Modellregion ermittelt wurden, kann nun eine Gegenüberstellung der Zu- und Abflüsse bezüglich P₂O₅ erstellt werden. In Abbildung AXY sind die resultierenden Häufigkeitsverteilungen der einzelnen P₂O₅-Frachten nochmal vergleichend dargestellt. Tabelle T9 fasst die Medianwerte sowie die Spannweiten der mittels MC-Simulation erhaltenen Häufigkeitsverteilungen zusammen. Es wird deutlich, dass die Summe der P₂O₅-Frachten (Median-basiert) nicht ausreicht, um den P₂O₅-Bedarf der Ernteentzüge vollständig zu decken. Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten zeigt sich, dass vereinzelt Simulationen resultierten, bei denen das P₂O₅-Aufkommen den Bedarf abdeckt bzw. sogar übersteigt. Dennoch gilt es als wahrscheinlich, dass aktuelle die P₂O₅-Entzüge deutlich überwiegen.

In der Vergangenheit wurde in Deutschland mehr Phosphor (P) in die Böden eingebracht als abgeführt. Die mineralische Düngung erreichte in den 1970er und 1980er Jahren ihren Höchstwert von etwa 30 kg P pro Hektar pro Jahr im Durchschnitt (Scheffer-Schachtschabel, 2020). Hinzu kamen etwa 20 kg P pro Hektar pro Jahr aus importierten Futtermitteln für die Tierproduktion, insbesondere in Betrieben mit vielen Tieren. Es ist davon auszugehen, dass aktuelle noch auf vielen Flächen ein in den letzten Jahrzehnten akkumulierter P₂O₅ Überschuss zumindest teilweise für die Pflanzenversorgung zur Verfügung steht und somit das hier bilanziell ermittelte Defizit ausgleicht.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Medianwerte und Spannbreiten aus den Häufigkeitsverteilungen des P₂O₅-Bedarfs und der P₂O₅-Frachten für die Jahre 2015 und 2020.

Stoffströme	Median		Spannbreiten		Einheit
	2015	2020	2015	2020	
P ₂ O ₅ -Bedarf	20,76	20,75	16,5 – 26,3	16,3 – 26,2	10 ³ t/a
Σ P ₂ O ₅ -Frachten* ¹	16,26	14,03	8,6 – 31,7	7,8 – 27,2	10 ³ t/a
Wirtschaftsdünger	12,31	10,05	5,8 – 26,5	5,0 – 22,0	10 ³ t/a
Mineraldünger	1,95		1,3 – 2,6		10 ³ t/a
Klärschlamm	2,00	2,03	1,5 – 2,6	1,5 – 2,6	10 ³ t/a

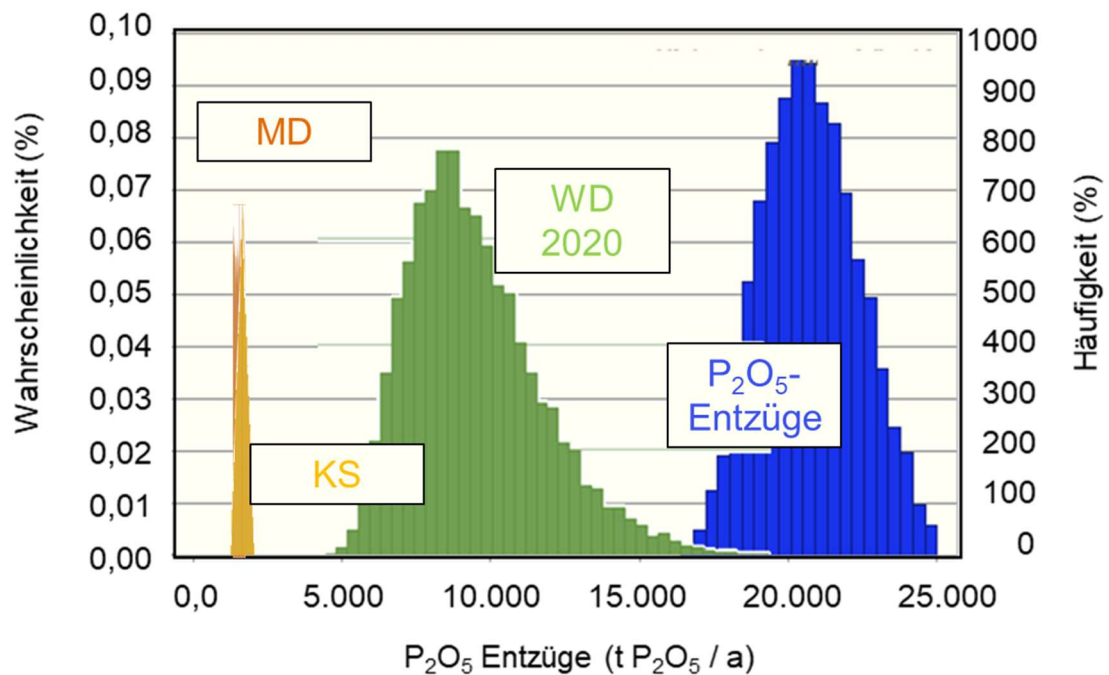


Abbildung 35: Gegenüberstellung der P₂O₅-Frachten assoziiert mit den Ausbringungen an Mineraldünger (MD), Wirtschaftsdünger (WD) und Klärschlamm (KS) mit den P₂O₅-Entzügen über die landwirtschaftlichen Flächen in der Modellregion.

3.1.7 Ergebnisse: Gegenüberstellung der Szenarien

Basierend auf den vorausgegangenen Bilanzierungen des P₂O₅-Bedarfs (Ernteentzüge) und der mit der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern, Mineraldüngern und Klärschlämmen assoziierten P₂O₅-Frachten erfolgte die szenariospezifische Betrachtung der P₂O₅-Flüsse in der Modellregion.

Im Fokus der Szenarien A - C stand besonders die Rolle des Klärschlammes und dessen Potenzial zur P₂O₅-Bedarfsdeckung in der Modellregion. In **Szenario A** galt es, den P₂O₅-Fluss gemäß dem Zustand vor Inkrafttreten der Klärschlammverordnung für das Jahr 2015 abzubilden. Dies führte einen Großteil (70 %, Tabelle T8) der abwasserassoziierten P₂O₅-Fracht zurück auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Abbildung A35 zeigt den Anteil der klärschlammbürtigen P₂O₅-Fracht am P₂O₅-Gesamtaufkommen in der Region. Berücksichtigt man den Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung, ergibt sich ein Beitrag von 8,6 % am P₂O₅-Gesamtaufkommen. Etwa 4 % des P₂O₅-Gesamtaufkommens verließen die Region entlang nichtlandwirtschaftlicher Entsorgungswege.

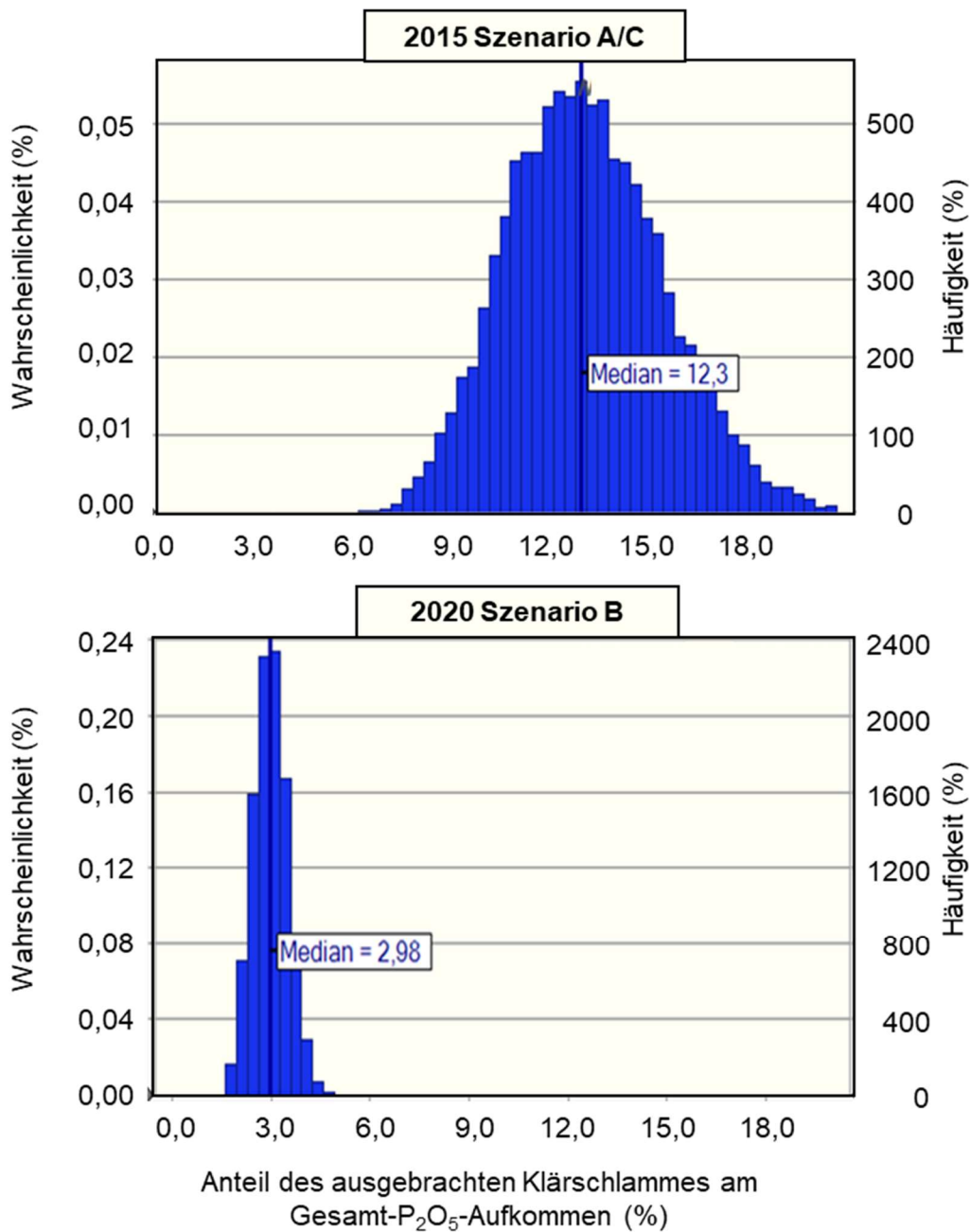


Abbildung 36: Häufigkeitsverteilungen des klärschlammbürtigen Anteils am P₂O₅-Gesamtaufkommen in der Modellregion für das Jahr 2016 und 2020 auf Basis von 10.000 Simulationsläufen.

Berücksichtigt man die Restriktionen für die bodenbezogene Verwertung durch Inkrafttreten der Klärschlammverordnung (nur Kläranlagen der Größenklasse I-III) reduziert sich der Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung in der Modellregion auf 20 %. Die dadurch resultierenden Verschiebungen bezüglich der P₂O₅-Flüsse in der Modellregion abzubilden war Aufgabe von **Szenario B**. Die Restriktionen bezüglich der landwirtschaftlichen Verwertung betreffen 80 % der Klärschlämme aus der Region. Durch deren Ausschleusung reduziert sich der Anteil der klärschlammbürtigen P₂O₅-Fracht am P₂O₅-Gesamtaufkommen auf 3 % (siehe Abbildung A12, Szenario B). Da in diesem Szenario angenommen wurde, dass die P₂O₅-Rückgewinnung außerhalb der Region erfolgt und kein Rückfluss der erzeugten Rezyklate stattfindet, muss die Deckungslücke

von 9 % (ca. 1.500 t P_2O_5) im Vergleich zu Szenario A durch Importflüsse (WD oder Mineraldünger) in die Region ausgeglichen werden.

Szenario C basiert auf den in Szenario A und B abgebildeten P_2O_5 -Flüssen, berücksichtigt jedoch die im Vorhaben anvisierte Kaskadennutzung (therm. Verwertung und P_2O_5 -Rückgewinnung) der regionalen Klärschlämme aller KA der Größenklasse (GK) >3 und die Rückführung der assoziierten P_2O_5 -Frachten in die Herkunftsfläche. Unklar ist derzeit noch, mit welchem Wirkungsgrad beim assoziierten Projektpartner die P-Rückgewinnung aus der Asche erfolgen wird, bzw. wie sich die Asche auf die Teilströme Bett-, Flugasche und Filterstaub aufteilen wird und wie die mit diesen Teilströmen verbundenen P-Frachten aussehen. Weiterhin ist noch offen, welche Phosphorsäuredosierung im Aufschluss angewendet wird. Vereinfachend wurde daher davon ausgegangen, dass das P-Recycling den mit Abb. 34 oben dargestellten Zustand wiederherstellt, mit dem Unterschied, dass die Deckung nicht durch die direkte bodenbezogene Klärschlammverwertung erfolgt, sondern durch das aschebasierte Rezyklat.

3.1.8 Ergebnisse: Prozesssimulation der P-Rückgewinnung

Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse des Modells für den Betrieb der Klärschlammverwertungsanlage mit den Klärschlämmen aus der Modellregion für die Szenarien P1 (ohne Lagermanagement) und P2 (mit Lagermanagement). Die Verteilung der P_2O_5 -Mengen/Frachten/Flüsse in Szenario P1 ist sehr breit und multimodal. Dies spiegelt die sehr heterogene Zusammensetzung der Klärschlämme aus der Region wider. Die mittlere P_2O_5 -Konzentration liegt bei 14,56 %. Infolge des Lagermanagements kommt es zu einer Homogenisierung des Inputs in Richtung des Mittelwerts. Dabei liefert Szenario P2 eine deutlich schmalere P_2O_5 -Verteilung als Szenario P1.

Eine weitere Einflussgröße bezüglich der resultierenden Verteilungsbreite bildet die Batchgröße des P_2O_5 -Rückgewinnungsschrittes beim Aufschluss der KS-Asche (siehe Abbildung 37). Durch die Erhöhung der Batchgröße wird die intrinsische Heterogenität der einzelnen KSAP kompensiert.

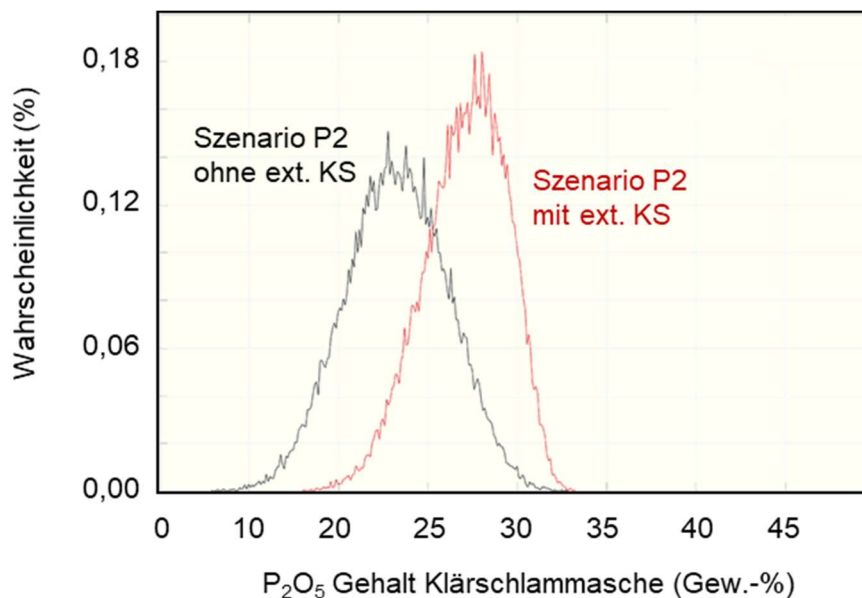


Abbildung 37: Häufigkeitsverteilungen des P_2O_5 -Gehaltes der Klärschlammmasche für die Simulationen aus Szenario-gruppe P2 und P3 mit und ohne externe Klärschlämme.

Abbildung 38 zeigt den Einfluss eines Logistikkonzeptes (Szenario P3) auf die P_2O_5 -Häufigkeitsverteilung der Klärschlammmasche im Vergleich zu Szenario P2. Durch die zusätzliche Auftrennung eines Teilkollektives nach der

P₂O₅-Konzentration resultiert in einer Verschmälerung der Häufigkeitsverteilung. Letztere ist vergleichbar mit der durch eine Verdopplung der Batchgröße erzielten. Somit wurden zwei Möglichkeiten dargelegt, um die Heterogenität des Rezyklates zu verringern und somit zur Vermarktungsfähigkeit des erzeugten Recyclingproduktes beizutragen.

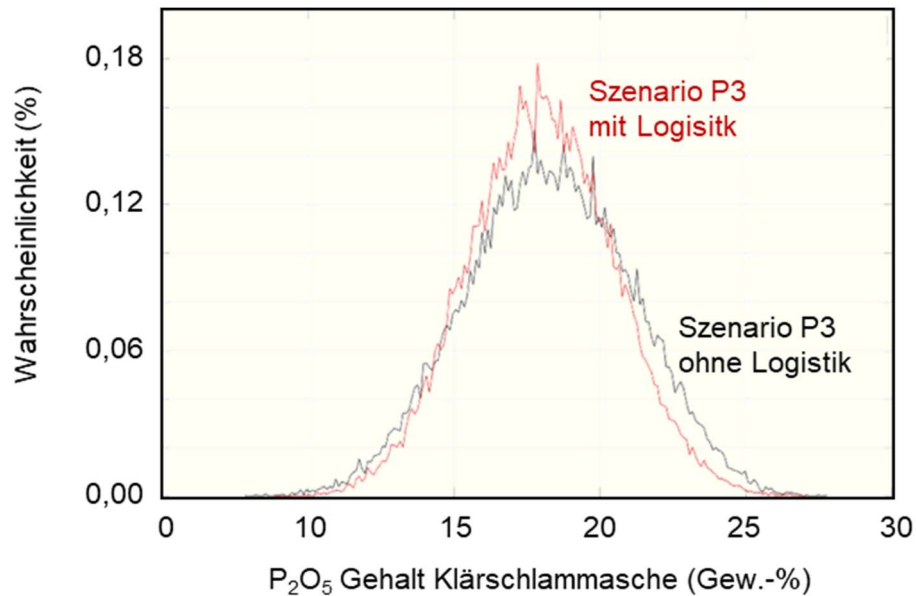


Abbildung 38. Häufigkeitsverteilungen des P₂O₅-Gehaltes der Klärschlammasche für die Simulationen aus Szenariogruppe P3 mit und ohne Logistik.

3.1.9 Ergebnisse Charakterisierung der Düngemittel und Aschen

Charakterisierung der Düngemittel

Vor der Anlage der Versuche wurden die in den Versuchen genutzten Düngemittel zunächst charakterisiert. Hierzu wurde zunächst ihre Herkunft und Verarbeitungsform erfasst und anschließend die P-Konzentration der Düngemittel ermittelt (Tabelle 10). Die Düngemittel waren zum einen mineralischen Ursprungs, zum anderen wurden sie aus Klärschlammasche hergestellt. Triple-Superphosphat (TSP) ist in der landwirtschaftlichen Praxis weit verbreitet und wurde deshalb in den Versuchen als praxisübliche Kontrolle eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein mit Phosphorsäure aufgeschlossenes Rohphosphat mit einer hohen Wasserlöslichkeit. Als praxisübliches Düngemittel auf dem ökologisch dynamisch bewirtschaftetem Versuchsstandort wurde Hyperphosphat gewählt, bei dem es sich um ein fein vermahlene Rohphosphat handelt. Bei Recphos handelt es sich um ein Recyclingdüngemittel, welches aus Klärschlammasche hergestellt wird. Die Aschen wurden hierbei ähnlich dem TSP mit Phosphorsäure aufgeschlossen. Euphore ist ein thermisch behandeltes Recyclingdüngemittel aus Klärschlammasche mit der geringsten P-Konzentration der in den Versuchen genutzten Düngemittel, s. Tab. 10.

Tabelle 10: Charakterisierung der in den Versuchen genutzten Düngemittel

Düngemittel	Soll % P	Eigenschaften
Hyperphos	13,70%	Weicherdiges Rohphosphat feinvermahlen
TSP	18,80%	Mit Phosphorsäure aufgeschlossenes Rohphosphat
Recphos	15,40%	Mit Phosphorsäure aufgeschlossenes Recycling-Phosphat aus Klärschlammasche
Euphore	5,86%	Thermo-chemisch behandeltes Recycling-Phosphat aus Klärschlammasche

Zusätzlich zu den intern durchgeführten Analysen wurden die Düngemittel auch durch das hessische Landeslabor untersucht, um die Schwermetallkonzentrationen der Düngemittel zu erfassen. Hierbei fiel auf, dass die mineralischen Düngemittel TSP und Hyperphos gegenüber den Recyclingdüngemitteln eine höhere Konzentration an Cadmium, Thallium und Uran aufweisen. Wohingegen die Recyclingdüngemittel eine erhöhte Konzentration von Zink, Kupfer aufweisen. Zudem weist Recphos eine höhere Konzentration von Arsen und Blei auf. Bei Euphore hingegen kann eine erhöhte Konzentration an Chrom und Nickel beobachtet werden (Tabelle 11).

Im Zuge dieser Analyse wurden auch die Aschen analysiert, aus denen das Recyclingphosphat Recphos hergestellt wurde. Besonders auffällig ist dort, dass die Asche 2 eine hohe Konzentration an Nickel, Thallium Chrom und Blei aufweist.

Tabelle 11: Prüfberichte der durch das hessische Landeslabor untersuchten Düngemittel und Aschen, aus denen Recphos hergestellt wurde

Prüfberichte Düngemittel und Aschen Hessisches Landeslabor						
Parameter	Hyperphosphat	TSP	Recphos	Euphore	Asche 1	Asche 2
Phosphor %	13,700	18,800	15,400	5,860	10,900	6,930
Mangan mg/kg	15,000	33,600	599,000	690,000	880,000	1290,000
Zinn mg/kg	0,250	2,190	70,800	1,130	104,000	164,000
Zink mg/kg	399,000	558,000	1570,000	904,000	2670,000	2790,000
Kupfer mg/kg	17,800	34,100	673,000	618,000	1370,000	654,000
Arsen mg/kg	6,210	5,140	21,400	2,430	15,700	28,200
Blei mg/kg	3,640	8,550	68,200	1,780	86,200	151,000
Chrom mg/kg	152,000	121,000	69,000	170,000	82,400	184,000
Cadmium mg/kg	16,600	24,100	1,510	0,025	2,010	3,630
Quecksilber (Hg) mg/kg	0,031	0,017	0,137	0,010	0,040	0,721
Nickel (Ni) mg/kg	15,900	38,500	55,300	93,200	55,200	153,000
Thallium mg/kg	0,806	0,574	0,278	0,025	0,301	0,852
Uran mg/kg	105,000	170,000	6,340	4,860	12,500	7,650

3.1.10 Ergebnisse Containerversuche

Für den Containerversuch wurden Container mit einer Oberfläche von 0,16m² und einer Tiefe von 0,8m verwendet. Diese Container wurden zu Versuchsbeginn mit einer Mischung aus 50% P-armen Unterboden (Tabelle 12) und 50% Quarzsand befüllt. Bei dem Boden handelt es sich um einen stark sandigen Lehmboden mit einer geringen CAL extrahierbaren P-Konzentration von 1,02 mg P/100g Boden.

Tabelle 12: Charakterisierung des im Containerversuch genutzten Bodens Kleinlinden 2019

Versuchsboden Kleinlinden 2019	
Textur	stark sandiger Lehm
Sand	52,90%
Schluff	28,20%
Ton	18,90%
pH-Wert	5,55
CAL-P	1,02 mg/100g Boden

Im Versuch wurden vier verschiedene Düngemittel gegenüber einer P₀ Kontrolle getestet. Durch eine 4-fache biologische Wiederholung ergab sich daraus eine Gesamtheit von 36 Containern (Tabelle 13).

Tabelle 13: Varianten Anlage Containerversuch

	Variante	Gefäßnr.
1	Kontrolle 0kg P/ha	189-192
2	Hyperphos 20kg P/ha	193-196
3	Hyperphos 40kg P/ha	197-200
4	Recphos 20kg P/ha	201-204
5	Recphos 40kg P/ha	205-208
6	TSP 20kg P/ha	209-212
7	TSP 40kg P/ha	213-216
8	Euphore 20kg P/ha	217-220
9	Euphore 40kg P/ha	221-224

Diese 36 Container wurden vor jeder Aussaat nach dem Versuchsplan mit P gedüngt. Darüber hinaus wurden alle anderen Nährstoffe in ausreichender Form gedüngt. Nach der Düngung wurden alle Düngemittel in den Oberboden eingearbeitet und anschließend wurden die entsprechenden Pflanzen ausgesät.

Die Ernte der Versuchspflanzen im Containerversuch wurde per Hand durchgeführt. Hierbei wurden Korn und Stroh getrennt geerntet. Die Proben wurden anschließend gewogen und bei 105°C getrocknet, um die Frisch- und Trockenmasse zu erfassen. Anschließend wurden die Proben gemahlen. Das gemahlene Pflanzenmaterial wurde anschließend per Mikrowellendruckaufschluß aufgeschlossen. In diesen Aufschlüssen erfolgte die Bestimmung der Elementkonzentrationen mit Hilfe der ICP-MS Analysetechnik.

Tabelle 14: Einfluss einer P-Düngung auf den Trockenmasseertrag von Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020, 2021 und 2022 in g pro Container

Trockenmasseertrag Stroh Containerversuch g*Container ⁻¹ ±Standardfehler						
	2020		2021		2022	
	Silomais		Winterweizen		Sommergerste	
Kontrolle P0	135,9	±1,38 ^a	115,4	±4,36 ^a	131,7	±3,40 ^a
Hyperphos 20kgP	150,1	±8,02 ^{ab}	123,2	±2,1 ^a	132,3	±5,06 ^a
Hyperphos 40kgP	169,4	±6,90 ^b	126,9	±1,67 ^a	141,0	±1,75 ^a
Recphos 20kgP	204,8	±3,21 ^c	123,4	±2,18 ^a	134,1	±3,23 ^a
Recphos 40kgP	280,7	±8,82 ^e	125,2	±0,91 ^a	138,3	±1,25 ^a
TSP 20kgP	230,7	±4,50 ^d	125,1	±0,56 ^a	133,9	±0,94 ^a
TSP 40kgP	332,5	±11,06 ^f	120,9	±1,10 ^a	142,8	±1,83 ^a
Euphore 20kgP	166,0	±5,75 ^b	127,8	±1,43 ^a	132,7	±2,15 ^a
Euphore 40kgP	221,4	±3,87 ^d	124,0	±1,57 ^a	138,7	±4,28 ^a

In den Tabellen 14 und 15 sind der Stroh- und der Korn-Trockenmasseertrag aus den Containerversuchen abgebildet. Es ist zu erkennen, dass alle Düngemittel im ersten Jahr einen signifikanten Einfluss auf den Trockenmasseertrag im Stroh hatten. Dasselbe ist auch bei dem Korn-Trockenmasseertrag zu beobachten, wobei hier Euphore und Hyperphosphat in der niedrigeren Düngestufe keinen Einfluss hatten. Auch die Düngeufen hatten einen signifikanten Einfluss auf den Strohertrag. Der Kornertrag wurde durch die höhere Düngeufe allerdings nicht gesteigert. Diese Effekte konnten in den folgenden Jahren nicht beobachtet werden. Ein Grund dafür könnte sein, dass im ersten Jahr wegen eines massiven Nährstoffmangel unter anderem auch P in allen Varianten nachgedüngt worden ist. Diese Düngung erfolgte in den Varianten mit den entsprechenden Düngemitteln. Auch die Kontrolle wurde mit Calciumhydrogenphosphat gedüngt. So konnte der akute Nährstoffmangel behoben werden. Dennoch hat dies dazu geführt, dass Restmengen aus der P-Nachdüngung von 2020 auch in den beiden Folgejahren von den nachfolgenden Kulturen genutzt werden. Das gilt besonders für die beiden langsamer wirkenden Düngemittel Hyperphos und Euphore. Zudem benötigt Mais im Jugendstadium eine hohe P-Konzentration in Wurzelnähe, weswegen gut lösliche P-Düngemittel hier einen deutlich höheren Einfluss auf den Ertrag haben als die anderen. Ein weiterer Grund dafür, dass keine Ertragsunterschiede in den Folgejahren beobachtet werden konnten, könnte die deutlich bessere P-Aneignung von Winterweizen und Sommergerste sein. So können sich diese beiden Kulturen auch schwerer verfügbare Phosphate aneignen. Die Kombination dieser beiden Faktoren könnte dazu geführt haben, dass in den letzten beiden Versuchsjahren keine Unterschiede sowohl in den Korn- als auch in den Stroherträgen beobachtet werden konnten.

Tabelle 15: Einfluss einer P-Düngung auf den TM-Kornertrag in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in g pro Container

Trockenmasseertrag Korn Containerversuch g*Container ⁻¹ ±Standardfehler						
	2020		2021		2022	
	Silomais		Winterweizen		Sommergerste	
Kontrolle P0	179,8	±9,12 ^a	93,7	±1,78 ^a	108,4	±3,12 ^a
Hyperphos 20kgP	180,2	±15,86 ^{ab}	100,7	±0,50 ^a	110,3	±4,1 ^a
Hyperphos 40kgP	243,2	±15,82 ^{bc}	101,9	±0,29 ^a	117,1	±1,30 ^a
Recphos 20kgP	262,2	±14,13 ^c	100,9	±0,52 ^a	112,0	±3,08 ^a
Recphos 40kgP	307,6	±21,79 ^{cd}	104,3	±2,86 ^a	115,9	±0,95 ^a
TSP 20kgP	288,3	±19,17 ^{cd}	104,1	±0,63 ^a	111,5	±0,70 ^a
TSP 40kgP	348,2	±12,69 ^d	102,3	±1,15 ^a	118,5	±1,05 ^a
Euphore 20kgP	224,9	±15,08 ^{abc}	104,7	±2,03 ^a	109,8	±1,64 ^a
Euphore 40kgP	250,9	±12,92 ^{bc}	100,1	±1,40 ^a	114,9	±3,54 ^a

Die folgenden Tabellen 16 und 17 zeigen den Einfluss der P-Düngung auf die P-Konzentration in Stroh und Korn. Gegensätzlich zu den Stroh- und Kornerträgen konnte hier im ersten Versuchsjahr kein Effekt der Düngung auf die P-Konzentration beobachtet werden. Im zweiten Versuchsjahr hatte die Düngung mit 40kg P/ha TSP einen signifikanten Einfluss auf die P-Konzentration im Korn gegenüber der Kontrolle und den anderen Düngemitteln abgesehen von Recphos.

Im dritten Versuchsjahr konnte lediglich ein Effekt auf die P-Konzentration im Stroh beobachtet werden. Sowohl Recphos als auch TSP hatten einen signifikanten Einfluss auf die P-Konzentration gegenüber der Kontrolle in Bezug auf die P-Konzentration im Stroh. Sie unterschieden sich allerdings nicht signifikant voneinander.

Tabelle 16: Einfluss einer P-Düngung auf die P-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021,2022 in mg pro kg Trockenmasse.

P-Konzentration Stroh Containerversuch mg*kg ⁻¹ ±Standardfehler						
	2020		2021		2022	
	Silomais		Winterweizen		Sommergerste	
Kontrolle P0	510,7	±47,4 ^a	279,5	±13,4 ^{ab}	400,4	±10,0 ^a
Hyperphos 20kgP	608,4	±37,6 ^a	303,0	±17,0 ^{ab}	465,8	±32,0 ^{abc}
Hyperphos 40kgP	535,1	±59,4 ^a	317,4	±10,2 ^b	358,1	±23,6 ^a
Recphos 20kgP	533,9	±35,5 ^a	327,2	±17,2 ^b	530,4	±17,9 ^{bc}
Recphos 40kgP	499,3	±62,9 ^a	303,2	±19,1 ^{ab}	544,2	±28,3 ^{bc}
TSP 20kgP	378,7	±19,2 ^a	227,6	±5,7 ^a	447,3	±8,7 ^{ab}
TSP 40kgP	418,9	±27,4 ^a	298,4	±14,4 ^{ab}	567,9	±16,6 ^c
Euphore 20kgP	440,3	±31,2 ^a	262,1	±13,4 ^{ab}	404,7	±22,7 ^{ab}
Euphore 40kgP	422,2	±31,3 ^a	281,1	±5,4 ^{ab}	455,6	±26,0 ^{abc}

Tabelle 17: Einfluss einer P-Düngung auf die P-Konzentration im Korn in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021,2022 in mg pro g Trockenmasse.

P-Konzentration Korn Containerversuch mg*g-1 ±Standardfehler						
	2020		2021		2022	
	Silomais		Winterweizen		Sommergerste	
Kontrolle P0	2,13	±0,03 ^a	2,66	±0,08 ^{abc}	2,78	±0,14 ^a
Hyperphos 20kgP	2,06	±0,04 ^a	2,68	±0,02 ^a	2,93	±0,08 ^a
Hyperphos 40kgP	2,22	±0,08 ^a	2,66	±0,06 ^{ab}	2,75	±0,06 ^a
Recphos 20kgP	2,14	±0,06 ^a	2,85	±0,08 ^{abcd}	2,99	±0,06 ^a
Recphos 40kgP	2,10	±0,04 ^a	2,91	±0,02 ^{bcd}	3,42	±0,16 ^a
TSP 20kgP	2,08	±0,05 ^a	2,93	±0,02 ^{cd}	2,91	±0,04 ^a
TSP 40kgP	2,05	±0,03 ^a	3,07	±0,07 ^d	3,30	±0,02 ^a
Euphore 20kgP	2,13	±0,02 ^a	2,62	±0,04 ^a	2,87	±0,06 ^a
Euphore 40kgP	1,96	±0,10 ^a	2,88	±0,05 ^{abcd}	3,15	±0,08 ^a

Die P-Aufnahme errechnet sich aus dem Ertrag und der P-Konzentration. In Tabelle 18 wird die gesamte P-Aufnahme dargestellt. Hierzu wurden die P-Aufnahmen von Stroh und Korn zusammengefasst. Für das Versuchsjahr 2020 ist ersichtlich, dass alle Düngemittel einen signifikanten Einfluss auf die P-Aufnahme des in diesem Jahr angebauten Mais hatten, auch wenn dieser Effekt bei den Düngemitteln Euphore und Hyperphos erst in der höheren Düngestufe zu beobachten war. Die höchsten P-Aufnahmen konnten in der höheren Düngestufe bei den Düngemitteln TSP und Recphos beobachtet werden. Die Düngewirkung dieser beiden Düngemittel unterschied sich allerdings in keiner der beiden Düngestufen voneinander, was bedeutet, dass Recphos und TSP eine ähnlich gute Düngewirkung haben. Im Versuchsjahr 2021 konnte lediglich für die Düngemittel TSP und Recphos ein Effekt auf die P-Aufnahme beobachtet werden. Diese beiden Düngemittel unterschieden sich nicht signifikant voneinander und auch die Düngestufe hatte keinen signifikanten Einfluss auf die P-Aufnahme von Winterweizen.

Im Versuchsjahr 2022 wurden ähnliche Beobachtungen gemacht. Recphos und TSP hatten einen signifikanten Einfluss auf die P-Aufnahme von Sommergerste gegenüber der Kontrolle. Hyperphos und Euphore hatten dagegen keinen signifikanten Einfluss auf die P-Aufnahme.

Tabelle 18: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die P-Aufnahme der Gesamtpflanzen in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg P pro Container

P-Aufnahme Containerversuch mg*Container ⁻¹ ±Standardfehler						
	2020 Silomais		2021 Winterweizen		2022 Sommergerste	
Kontrolle P0	453,78	±27,43 ^a	281,66	±12,99 ^a	354,54	±22,55 ^{ab}
Hyperphos 20kgP	463,99	±37,50 ^{ab}	307,67	±3,81 ^a	383,93	±14,28 ^a
Hyperphos 40kgP	606,75	±17,67 ^{cd}	311,68	±5,91 ^{ab}	372,11	±6,46 ^{ab}
Recphos 20kgP	669,05	±17,76 ^d	327,46	±8,72 ^{ab}	404,99	±8,80 ^{bc}
Recphos 40kgP	783,86	±35,31 ^{ef}	341,23	±6,14 ^b	471,41	±22,04 ^{cd}
TSP 20kgP	668,00	±27,85 ^{cde}	333,16	±2,57 ^b	384,59	±5,28 ^{ab}
TSP 40kgP	851,98	±30,85 ^f	350,63	±11,40 ^b	472,18	±7,93 ^d
Euphore 20kgP	552,21	±32,73 ^{abc}	307,65	±6,59 ^a	368,47	±4,33 ^a
Euphore 40kgP	586,58	±39,30 ^{bcd}	322,90	±5,37 ^{ab}	425,38	±16,00 ^{bcd}

Zusammenfassend kann bezüglich der Containerversuche berichtet werden, dass zwar nur im ersten Jahr signifikante Düngeneffekte aller getesteten Düngemittel auf den Ertrag von Korn und Stroh beobachtet werden konnten, jedoch in den anderen beiden Jahren Effekte auf die P-Konzentration von Stroh und Korn besonders für die Düngemittel TSP und Recphos zu verzeichnen sind. Die P-Aufnahme kombiniert die Effekte von Ertrag und P-Konzentration und hat so eindrücklich einen signifikanten Einfluss der Düngung von TSP und Recphos auf die P-Aufnahme der Pflanzen gegenüber der Kontrolle gezeigt. Hier konnte auch ein Einfluss der Düngestufe der beiden Düngemittel zumindest im ersten Versuchsjahr gezeigt werden. Ein signifikanter Unterschied der beiden Düngemittel TSP und Recphos zueinander konnte allerdings nicht festgestellt werden, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass die beiden Düngemittel unter diesen Versuchsbedingungen einen ähnlichen Düngeneffekt hatten.

Schwermetallanalyse

Chrom:

Tabelle 19. Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Cr-Konzentration im Kornmaterial in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Cr pro kg Pflanzenmaterial.

Cr-Konzentration Korn Containerversuch mg*kg ⁻¹ ±Standardfehler						
	2020 Silomais		2021 Winterweizen		2022 Sommergerste	
Kontrolle P0	0,23	±0,027 ^a	0,26	±0,024 ^{ab}	0,02	±0,003 ^a
Hyperphos 20kgP	0,40	±0,084 ^a	0,25	±0,015 ^{ab}	0,03	±0,001 ^a
Hyperphos 40kgP	0,32	±0,057 ^a	0,24	±0,017 ^{ab}	0,02	±0,002 ^a
Recphos 20kgP	0,22	±0,005 ^a	0,19	±0,004 ^a	0,02	±0,001 ^a
Recphos 40kgP	0,32	±0,040 ^a	0,24	±0,026 ^{ab}	0,03	±0,003 ^a
TSP 20kgP	0,26	±0,033 ^a	0,20	±0,030 ^{ab}	0,02	±0,003 ^a
TSP 40kgP	0,21	±0,018 ^a	0,22	±0,005 ^{ab}	0,02	±0,001 ^a
Euphore 20kgP	0,19	±0,030 ^a	0,18	±0,026 ^{ab}	0,02	±0,003 ^a
Euphore 40kgP	0,19	±0,016 ^a	0,29	±0,017 ^b	0,03	±0,002 ^a

Tabelle 20 Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Cr-Konzentration im Strohmaterial in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Cr pro kg Pflanzenmaterial.

Cr-Konzentration Stroh Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler						
	2020 Silomais		2021 Winterweizen		2022 Sommergerste	
Kontrolle P0	4,70	±0,62 ^a	5,01	±0,28 ^a	2,11	±0,14 ^c
Hyperphos 20kgP	5,14	±0,59 ^a	6,20	±0,28 ^a	1,50	±0,17 ^{abc}
Hyperphos 40kgP	5,15	±0,57 ^a	4,97	±0,22 ^a	1,55	±0,03 ^{ab}
Recphos 20kgP	5,08	±0,39 ^a	5,41	±0,16 ^a	1,33	±0,04 ^{ab}
Recphos 40kgP	4,96	±0,59 ^a	5,54	±0,08 ^a	1,67	±0,13 ^{bc}
TSP 20kgP	4,72	±0,17 ^a	5,38	±0,26 ^a	1,68	±0,13 ^{bc}
TSP 40kgP	5,53	±0,83 ^a	5,77	±0,16 ^a	1,31	±0,08 ^{ab}
Euphore 20kgP	6,39	±0,50 ^a	6,03	±0,19 ^a	0,96	±0,09 ^a
Euphore 40kgP	6,28	±0,58 ^a	6,01	±0,21 ^a	1,58	±0,32 ^{abc}

Die gemessenen Chromkonzentrationen zeigten in zwei der drei Versuchsjahren keine signifikanten Unterschiede. Weder zwischen der Kontrolle und den Behandlungen, noch zwischen den Düngevarianten oder Stufen. Im Versuchsjahr 2021 konnte lediglich ein signifikanter Unterschied zwischen der Recphos 20 kg - und der Euphore 40 kg-Variante beobachtet werden. In den Jahren 2020 und 2021 dokumentierte sich die relativ hohe Cr-Konzentration in dem Euphore-Produkt auch in den höheren Cr-Konzentrationen im Stroh; diese erhöhten Konzentrationen waren aber statistisch nicht signifikant, s. Tab. 20.

Nickel:

Tabelle 21: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Nickel-Konzentration im Kornmaterial in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Nickel pro kg Pflanzenmaterial.

Ni-Konzentration Korn Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler						
	2020 Silomais		2021 Winterweizen		2022 Sommergerste	
Kontrolle P0	0,02	±0,02 ^a	0,61	±0,05 ^a	1,43	±0,19 ^a
Hyperphos 20kgP	0,09	±0,02 ^a	0,66	±0,17 ^a	0,87	±0,03 ^a
Hyperphos 40kgP	0,05	±0,02 ^a	0,49	±0,04 ^a	0,94	±0,06 ^a
Recphos 20kgP	0,04	±0,03 ^a	0,74	±0,14 ^a	1,07	±0,03 ^a
Recphos 40kgP	0,11	±0,03 ^a	0,67	±0,06 ^a	1,28	±0,04 ^a
TSP 20kgP	1,18	±0,22 ^b	0,59	±0,01 ^a	0,97	±0,06 ^a
TSP 40kgP	0,74	±0,11 ^b	0,77	±0,08 ^a	1,47	±0,22 ^a
Euphore 20kgP	1,11	±0,20 ^b	0,71	±0,09 ^a	1,42	±0,08 ^a
Euphore 40kgP	1,23	±0,38 ^b	0,70	±0,10 ^a	1,22	±0,12 ^a

Tabelle 22: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Nickel-Konzentration im Strohmaterial in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Nickel pro kg Pflanzenmaterial.

Ni-Konzentration Stroh Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler						
	2020	Silomais	2021 Winterweizen	2022 Sommergerste		
Kontrolle P0	3,12	±0,46 ^a	3,15	±0,17 ^a	1,58	±0,14 ^{ab}
Hyperphos 20kgP	3,52	±0,33 ^a	3,54	±0,14 ^a	1,14	±0,18 ^{ab}
Hyperphos 40kgP	3,38	±0,29 ^a	3,20	±0,13 ^a	1,08	±0,12 ^{ab}
Recphos 20kgP	3,49	±0,30 ^a	3,13	±0,12 ^a	1,00	±0,07 ^a
Recphos 40kgP	4,30	±0,34 ^a	3,37	±0,22 ^a	1,03	±0,07 ^{ab}
TSP 20kgP	3,89	±0,43 ^a	3,35	±0,19 ^a	0,85	±0,03 ^a
TSP 40kgP	3,38	±0,34 ^a	3,67	±0,11 ^a	0,88	±0,23 ^{ab}
Euphore 20kgP	4,01	±0,64 ^a	3,82	±0,04 ^a	1,55	±0,14 ^b
Euphore 40kgP	4,37	±0,45 ^a	3,46	±0,14 ^a	0,67	±0,16 ^{ab}

Die in Tabelle 21 aufgeführten Nickel-Konzentrationen im Korn der angebauten Versuchspflanzen zeigen lediglich im ersten Versuchsjahr einen signifikanten Unterschied. Hierbei ist allerdings auffällig, dass die erhöhten Werte für TSP und Euphore um den Faktor 10 höher sind als die anderen Werte. Da diese beiden Varianten nicht mit den anderen Proben zusammen aufgeschlossen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um einen Messfehler handelt. Dieses wäre eine Erklärung, um die erzielten Ergebnisse zu begründen. Eine andere Erklärung ist in der relativ hohen Ni-Konzentration in dem Euphore-Produkt begründet, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass in Folge der relativ hohen Ni-Fracht durch Euphore-Produkt Düngung auch höhere Ni-Konzentrationen im pflanzlichen Gewebe zu erwarten sind. Allerdings waren diese Effekte in den darauffolgenden Jahren nicht eindeutig zu beobachten. In Tabelle 22 werden die Nickel-Konzentrationen im Strohmaterial abgebildet. Hier konnte lediglich im letzten Versuchsjahr signifikante Unterschiede beobachtet werden. Hierbei unterscheiden sich die beiden Varianten TSP 20 kg und Recphos 20 kg von der 20 kg Euphore voneinander. Alle anderen Varianten unterscheiden sich nicht signifikant.

Kupfer:

Tabelle 23: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Kupfer-Konzentration im Korn in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Kupfer pro kg Pflanzenmaterial.

Cu-Konzentration Korn Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler						
	2020	Silomais	2021 Winterweizen	2022 Sommergerste		
Kontrolle P0	2,17	±0,10 ^a	3,80	±0,35 ^a	5,87	±0,29 ^a
Hyperphos 20kgP	1,68	±0,11 ^a	3,02	±0,07 ^a	5,81	±0,15 ^a
Hyperphos 40kgP	1,99	±0,18	3,22	±0,14 ^a	5,48	±0,15 ^a
Recphos 20kgP	2,58	±0,27 ^a	3,26	±0,24 ^a	5,88	±0,30 ^a
Recphos 40kgP	1,57	±0,10 ^a	3,10	±0,06 ^a	5,97	±0,26 ^a
TSP 20kgP	1,66	±0,15 ^a	3,19	±0,02 ^a	5,59	±0,10 ^a
TSP 40kgP	1,73	±0,27 ^a	3,45	±0,01 ^a	6,44	±0,63 ^a
Euphore 20kgP	1,32	±0,06 ^a	3,27	±0,20 ^a	5,62	±0,08 ^a
Euphore 40kgP	1,50	±0,15 ^a	3,17	±0,07 ^a	5,64	±0,20 ^a

Tabelle 24: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Kupfer-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Kupfer pro kg Pflanzenmaterial.

Cu-Konzentration Stroh Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler						
	2020	Silomais	2021 Winterweizen	2022 Sommergerste		
Kontrolle P0	4,54	±0,19 ^a	1,66	±0,05 ^a	3,64	±0,30 ^a
Hyperphos 20kgP	4,73	±0,68 ^a	1,63	±0,04 ^a	3,19	±0,06 ^a
Hyperphos 40kgP	6,25	±0,76 ^a	1,58	±0,06 ^a	2,78	±0,07 ^a
Recphos 20kgP	4,22	±0,12 ^a	1,64	±0,05 ^a	3,24	±0,04 ^a
Recphos 40kgP	3,88	±0,36 ^a	1,53	±0,02 ^a	3,15	±0,09 ^a
TSP 20kgP	4,00	±0,46 ^a	1,74	±0,15 ^a	2,88	±0,09 ^a
TSP 40kgP	3,15	±0,13 ^a	1,61	±0,03 ^a	3,29	±0,37 ^a
Euphore 20kgP	4,22	±0,22 ^a	1,64	±0,10 ^a	2,63	±0,09 ^a
Euphore 40kgP	3,52	±0,37 ^a	1,67	±0,05 ^a	2,85	±0,16 ^a

Die Kupferkonzentrationen werden in den Tabellen 23 und 24 dargestellt. Weder im Kornmaterial (Tab. 23) noch im Strohmaterial konnte in den drei Versuchsjahren ein signifikanter Einfluss der P-Düngung auf die Cu-Konzentrationen in den untersuchten Pflanzenproben beobachtet werden.

Zink:

Tabelle 25: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Zink-Konzentration im Korn in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Zink pro kg Pflanzenmaterial.

Zn-Konzentration Korn Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler						
	2020	Silomais	2021 Winterweizen	2022 Sommergerste		
Kontrolle P0	14,40	±0,63 ^a	30,49	±0,68 ^{bc}	54,05	±3,24 ^a
Hyperphos 20kgP	13,75	±0,39 ^a	26,19	±0,36 ^a	56,87	±1,62 ^a
Hyperphos 40kgP	14,24	±0,58 ^a	26,98	±0,43 ^a	51,92	±1,70 ^a
Recphos 20kgP	14,79	±0,06 ^a	29,21	±1,10 ^{abc}	53,56	±0,61 ^a
Recphos 40kgP	14,80	±0,48 ^a	28,33	±0,34 ^{ab}	58,34	±3,01 ^a
TSP 20kgP	15,25	±0,28 ^a	30,43	±0,35 ^{bc}	53,93	±0,40 ^a
TSP 40kgP	14,77	±0,31 ^a	31,87	±0,75 ^c	52,09	±0,57 ^a
Euphore 20kgP	14,35	±0,24 ^a	27,75	±0,82 ^{ab}	52,86	±1,09 ^a
Euphore 40kgP	14,88	±0,53 ^a	28,54	±0,61 ^{abc}	54,05	±2,36 ^a

Tabelle 26: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Zink-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Zink pro kg Pflanzenmaterial.

Zn-Konzentration Stroh Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler						
	2020 Silomais		2021 Winterweizen		2022 Sommergerste	
Kontrolle P0	46,40	±2,10 ^a	28,86	±1,37 ^a	89,26	±3,04 ^a
Hyperphos 20kgP	50,85	±2,03 ^a	26,35	±0,63 ^a	101,40	±4,14 ^a
Hyperphos 40kgP	54,79	±4,23 ^a	27,09	±0,48 ^a	83,44	±5,84 ^a
Recphos 20kgP	45,74	±0,83 ^a	29,07	±0,54 ^a	92,18	±4,28 ^a
Recphos 40kgP	40,12	±1,99 ^a	28,34	±0,24 ^a	87,50	±3,38 ^a
TSP 20kgP	40,83	±3,10 ^a	28,41	±0,36 ^a	92,29	±1,33 ^a
TSP 40kgP	40,43	±2,22 ^a	28,89	±0,58 ^a	86,28	±4,63 ^a
Euphore 20kgP	44,16	±2,34 ^a	28,99	±0,82 ^a	99,38	±5,22 ^a
Euphore 40kgP	42,87	±2,03 ^a	29,19	±0,66 ^a	86,00	±5,09 ^a

In Tabelle 26 ist die Zink-Konzentration im Strohmaterial aufgeführt. Hier konnte in keinem der Versuchsjahre ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten beobachtet werden. Für die Zink-Konzentration im Kornmaterial (Tabelle 25) konnte im zweiten Versuchsjahr signifikante Unterschiede beobachtet werden. Hier war die Konzentration der beiden Hyperphos-Varianten signifikant niedriger als die der beiden TSP-Varianten. Allerdings unterschieden sich nur die Hyperphos-Varianten von der Kontrolle, welche eine höhere Konzentration an Zink aufwies. Dieser Befund zeigt, dass die P-Düngung in Form der applizierten Produkte kaum die Zn-Konzentrationen im Gewebe beeinflusst haben dürfte.

Arsen:

Tabelle 27: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Arsen-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Arsen pro kg Pflanzenmaterial.

As-Konzentration Stroh Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler						
	2020 Silomais		2021 Winterweizen		2022 Sommergerste	
Kontrolle P0	0,094	±0,017 ^a	0,038	±0,002 ^a	0,069	±0,003 ^a
Hyperphos 20kgP	0,118	±0,008 ^a	0,054	±0,002 ^c	0,062	±0,006 ^a
Hyperphos 40kgP	0,107	±0,011 ^a	0,045	±0,002 ^b	0,074	±0,006 ^a
Recphos 20kgP	0,103	±0,012 ^a	0,055	±0,001 ^c	0,070	±0,002 ^a
Recphos 40kgP	0,103	±0,014 ^a	0,048	±0,001 ^{bc}	0,074	±0,003 ^a
TSP 20kgP	0,097	±0,008 ^a	0,067	±0,007 ^{cd}	0,076	±0,007 ^a
TSP 40kgP	0,123	±0,020 ^a	0,063	±0,004 ^{cd}	0,101	±0,012 ^a
Euphore 20kgP	0,121	±0,018 ^a	0,072	0,005 ^d	0,062	±0,005 ^a
Euphore 40kgP	0,113	±0,021 ^a	0,079	±0,008 ^d	0,067	±0,006 ^a

Für die Arsenkonzentration konnten lediglich messbare Ergebnisse für das Strohmaterial erfasst werden (Tabelle 27). Die Werte für die Konzentration im Korn lagen unterhalb der Nachweisgrenze und sind daher nicht aussagekräftig. Der laut der EU Verordnung 2023/915 erhobene Grenzwert von 0,15 mg Arsen pro kg Kornmaterial wurde dabei allerdings nicht überschritten. Das gilt auch für die Konzentrationen im Stroh, für das

es laut der EG kein Grenzwert definiert wurde. Die Arsen Konzentrationen im Strohmaterial unterschieden sich lediglich im Versuchsjahr 2021 signifikant voneinander. Hier unterschieden sich alle Behandlungen von der Kontrolle. Auch die Behandlungen unterschieden sich voneinander, wobei die beiden Euphore-Varianten die höchste Arsen-Konzentration zeigten.

Cadmium:

Tabelle 28: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Cadmium-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Cadmium pro kg Pflanzenmaterial.

Cd-Konzentration Stroh Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler						
	2020 Silomais		2021 Winterweizen		2022 Sommergerste	
Kontrolle P0	0,047	±0,003 ^{ab}	0,028	±0,002 ^a	0,021	±0,002 ^a
Hyperphos 20kgP	0,045	±0,005 ^{ab}	0,032	±0,002 ^a	0,038	±0,012 ^a
Hyperphos 40kgP	0,052	±0,002 ^a	0,037	±0,007 ^a	0,035	±0,007 ^a
Recphos 20kgP	0,040	±0,001 ^{ab}	0,030	±0,002 ^a	0,029	±0,009 ^a
Recphos 40kgP	0,045	±0,007 ^{ab}	0,027	±0,001 ^a	0,021	±0,001 ^a
TSP 20kgP	0,044	±0,002 ^{ab}	0,032	±0,001 ^a	0,023	±0,001 ^a
TSP 40kgP	0,035	±0,002 ^b	0,036	±0,001 ^a	0,035	±0,006 ^a
Euphore 20kgP	0,043	±0,002 ^{ab}	0,036	±0,008 ^a	0,024	±0,006 ^a
Euphore 40kgP	0,033	±0,001 ^b	0,029	±0,002 ^a	0,017	±0,002 ^a

Auch die Cadmium-Konzentrationen im Kornmaterial lagen unterhalb der Nachweisgrenze, weswegen sie hier nicht aufgeführt werden können. Für Cadmium gilt der Grenzwert von 0,1 mg Cadmium pro kg Kornmaterial. Diese Konzentration wurde weder im Kornmaterial noch im Strohmaterial annähernd erreicht. Für die Cd-Konzentration im Strohmaterial konnte im ersten Versuchsjahr ein signifikanter Unterschied zwischen der 40 kg Hyperphos-Variante und den beiden 40 kg Varianten TSP und Euphore beobachtet werden, s. Tab. 28.

Blei:

Tabelle 29: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Blei-Konzentration im Korn in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Blei pro kg Pflanzenmaterial.

Pb-Konzentration Korn Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler						
	2020 Silomais		2021 Winterweizen		2022 Sommergerste	
Kontrolle P0	0,082	±0,029 ^a	0,041	±0,012 ^a	0,076	±0,013 ^a
Hyperphos 20kgP	0,020	±0,021 ^a	0,020	±0,016 ^a	0,060	±0,004 ^a
Hyperphos 40kgP	0,065	±0,022 ^a	0,031	±0,013 ^a	0,068	±0,003 ^a
Recphos 20kgP	0,085	±0,029 ^a	0,013	±0,005 ^a	0,100	±0,024 ^a
Recphos 40kgP	0,011	±0,013 ^a	0,039	±0,009 ^a	0,069	±0,006 ^a
TSP 20kgP	0,079	±0,006 ^a	0,012	±0,005 ^a	0,061	±0,009 ^a
TSP 40kgP	0,013	±0,016 ^a	0,033	±0,011 ^a	0,141	±0,038 ^a
Euphore 20kgP	-0,021	±0,014 ^a	0,022	±0,007 ^a	0,096	±0,024 ^a
Euphore 40kgP	-0,014	±0,014 ^a	0,023	±0,008 ^a	0,057	±0,007 ^a

Tabelle 30: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Blei-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch in den Jahren 2020,2021 und 2022 in mg Blei pro kg Pflanzenmaterial.

Pb-Konzentration Stroh Containerversuch mg*kg-1 ±Standardfehler					
	2020	Silomais	2021 Winterweizen	2022 Sommergerste	
Kontrolle P0	1,230	±0,089 ^{ab}	0,468 ±0,033 ^a	0,372	±0,064 ^a
Hyperphos 20kgP	1,460	±0,025 ^b	0,524 ±0,063 ^a	0,311	±0,053 ^a
Hyperphos 40kgP	1,236	±0,120 ^{ab}	0,572 ±0,088 ^a	0,228	±0,024 ^a
Recphos 20kgP	1,146	±0,048 ^a	0,799 ±0,150 ^a	0,539	±0,099 ^a
Recphos 40kgP	1,004	±0,055 ^a	0,452 ±0,046 ^a	0,373	±0,102 ^a
TSP 20kgP	1,066	±0,099 ^{ab}	0,562 ±0,039 ^a	0,329	±0,020 ^a
TSP 40kgP	1,159	±0,122 ^{ab}	0,573 ±0,080 ^a	0,568	±0,090 ^a
Euphore 20kgP	1,278	±0,161 ^{ab}	0,664 ±0,074 ^a	0,381	±0,050 ^a
Euphore 40kgP	1,305	±0,144 ^{ab}	0,931 ±0,123 ^a	0,261	±0,046 ^a

Tabelle 29 zeigt die Blei-Konzentration im Korn. Hier konnte in keinem der Versuchsjahre ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten beobachtet werden. Der von der EU Verordnung 2023/915 festgelegte Grenzwert von 0,2 mg Pb pro kg Kornmaterial wurde hier zu keiner Zeit überschritten. Die in Tabelle 30 aufgeführten Blei-Konzentrationen im Korn liegen deutlich über den Konzentrationen im Korn, allerdings ist für Strohmaterial kein Grenzwert festgelegt. Im Strohmaterial konnte nur im ersten Versuchsjahr ein signifikanter Unterschied beobachtet werden. Die Konzentration lag in der 20 kg Hyperphos-Variante signifikant höher als in den Recphos-Varianten, s. Tab. 30.

Uran und Thallium:

Tabelle 31: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung auf die Uran-Konzentration im Stroh in einem Containerversuch aus dem Jahr 2020 in mg Uran pro kg Pflanzenmaterial.

U-Konzentration Stroh Containerversuch mg*kg-1		
	2020	Silomais
Kontrolle P0	0,0081	±0,0021 ^a
Hyperphos 20kgP	0,0096	±0,0014 ^a
Hyperphos 40kgP	0,0074	±0,0011 ^a
Recphos 20kgP	0,0061	±0,0014 ^a
Recphos 40kgP	0,0083	±0,0013 ^a
TSP 20kgP	0,0062	±0,0005 ^a
TSP 40kgP	0,0131	±0,0034 ^a
Euphore 20kgP	0,0108	±0,0015 ^a
Euphore 40kgP	0,0131	±0,0027 ^a

Für die Uran-Konzentration konnten lediglich für das Versuchsjahr 2020 im Strohmaterial Werte gemessen werden. Alle anderen Uran-Konzentrationen lagen unterhalb der Nachweisgrenze. Die gemessenen Uran-Konzentrationen unterschieden sich nicht signifikant voneinander, s. Tab. 31.

Für Thallium konnten keine Konzentrationen ermittelt werden, da alle Messwerte weit unterhalb der Nachweisgrenze der hier angewandten ICP-MS Technik lagen.

3.1.11 Ergebnisse Feldversuche

Vor Beginn der Feldversuche wurden zunächst die Standorte untersucht und charakterisiert. Bei allen Standorten handelt es sich um Parabraunerden, welche sich allerdings in ihrer Textur und der Konzentration an CAL-extrahierbarem Phosphat (CAL-P) stark unterscheiden (Tabelle 32).

Der Standort Dauborn liegt in der Nähe von Limburg an der Lahn und zeichnet sich durch seine gute P-Versorgung und die Textur als stark toniger Schluff aus. Der Standort in Stangenrod liegt in der Nähe von Grünberg. Dieser Standort ist ein mittel toniger Schluff und ist ähnlich gut mit P versorgt wie der Standort in Dauborn. Der dritte Versuchsstandort ist Villmar. Hierbei handelt es sich um einen ökologisch dynamisch bewirtschafteten Standort, der zwischen Gießen und Limburg an der Lahn gelegen ist. Der Standort ist ein schluffiger Ton und zeichnet sich durch seinen geringen Anteil an Sand und seine geringe P-Versorgung aus. Standort vier ist Langgöns. Dieser Standort ist der am besten mit P-versorgte Standort von allen Feldversuchen. Seine Textur ist ein stark toniger Schluff, ähnlich wie Dauborn. Der letzte Standort ist Münchholzhausen und ist in der Nähe von Wetzlar gelegen. Der Boden dieses Standorts ist ein stark toniger Schluff. Dieser Standort zeichnet sich allerdings durch die niedrigste P-Versorgung von allen Feldversuchen aus.

Die Feldversuche wurden in Zusammenarbeit mit den Landwirten geplant und die Standorte ausgewählt. Bei dem Versuchsdesign handelte es sich um eine teilrandomisierte Blockanlage (Abb. 39). Auch in den Feldversuchen gab es zwei verschiedene Düngestufen (20 kg P/ha und 40 kg P/ha) analog zu dem Containerversuch. Jedoch wurden auf den Feldversuchen lediglich zwei verschiedene Düngemittel getestet. Für die konventionell bewirtschafteten Standorte waren das TSP und Recphos zusammen mit einer 0 kg P/ha Kontrolle. Auf dem ökologisch bewirtschafteten Standort Villmar wurde statt TSP Hyperphos (Rohphosphat) verwendet. Somit wurden auf allen Feldversuchen fünf Varianten getestet mit einer 4-fachen biologischen Wiederholung. Somit wurden auf jedem Standort 20 Parzellen angelegt. Die Versuchsparzellen hatten eine Größe von 10 x 10m.

Vor jeder Aussaat wurden die Parzellen entsprechend den Varianten mit den entsprechenden P-Düngemitteln gedüngt. Die Landwirte sollten dafür Sorge tragen, dass außer den in den Parzellen applizierten P-Düngern keine weiteren P-Dünger auf der Fläche ausgebracht wurden. Zudem wurden alle anderen Nährstoffe betriebsüblich gedüngt. Nach der Düngung wurden die Düngemittel in den Boden eingearbeitet und anschließend auf den Standorten die jeweilige Kultur ausgesät. Jeder Standort hat im Verlaufe der drei Versuchsjahre eine eigene betriebsübliche Fruchtfolge durchlaufen. Die Ernte der Versuchspflanzen erfolgt je nach Kultur unterschiedlich. Eine Ernte per Hand war beispielsweise nötig, wenn auf den Standorten Mais angebaut wurde. Im ersten Jahr musste das Getreide in zwei Feldversuchen per Hand mit Hilfe von Quadratmeter-Schnitten geerntet werden. In den folgenden Jahren wurden die Versuchspflanzen mit einem Parzellenmähdrescher geerntet. Im Unterschied zu den Containerversuchen wurden bei den Feldversuchen lediglich die Körner geerntet. Das Stroh verblieb auf den Flächen. Nach der Ernte wurde mit den Proben analog zum Containerversuch verfahren. Die Erträge wurden erfasst und die Proben gereinigt und bei 105°C getrocknet. Anschließend wurden die Proben gemahlen und mithilfe eines Mikrowellendruckaufschlusses aufgeschlossen. Diese Aufschlüsse wurden anschließend an der ICP-MS an der BOKU in Wien analysiert. Zu Beginn und am Ende der Feldversuche wurden Bodenproben in einer Tiefe von 0-90cm in drei Stufen (0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm) entnommen. Zudem wurden in jedem Frühjahr weitere Bodenproben aus dem Oberboden (0 – 30 cm) für die CAL-P Analyse entnommen.



Abbildung 39: Luftbild der Versuchsanlage in Dauborn im Frühjahr 2020.

Tabelle 32: Charakterisierung der Feldversuchsstandorte

	Dauborn	Stangenrod	Villmar	Langgöns	Münchholzhausen
Textur	stark toniger Schluff	mittel toniger Schluff	schluffiger Ton	stark toniger Schluff	stark toniger Schluff
Sand	6,2%	5,4%	1,6%	5,2%	10,2%
Schluff	72,0%	78,1%	71,9%	72,8%	71,4%
Ton	21,8%	16,5%	26,5%	22,0%	18,4%
pH-wert	6,10	5,70	5,90	7,10	5,30
CAL-P mg/100g Boden	7,14	9,04	3,75	17,04	3,16

Dauborn

Die Tabellen 34 und 35 zeigen den Einfluss der zweistufigen P-Düngung auf den Kornertrag und die P-Konzentration im Korn auf dem Standort Dauborn. Aus den Tabellen ist ersichtlich, dass es keinerlei signifikante Effekte auf den Ertrag und die P-Konzentration gab. Dies könnte an der durchgehend guten Versorgung des Bodens mit P liegen (Tab. 33).

Tabelle 33: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf das CAL extrahierbare P im Boden (0-30cm) in mg P pro 100 g Boden in einem Feldversuch auf dem Standort Dauborn in den Frühjahren 2020,2021 und 2022.

Feldversuche Dauborn	CAL extrahierbares P im Boden (0-30cm) in mg P*100g Boden ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	4,6 ±0,5	10,3 ±2,6	6,6 ±1,8	7,4 ±2,3	10,7 ±2,8
Sommergerste 2021	5,7 ±1,5	8,7 ±1,8	7,7 ±2,1	7,7 ±1,7	8,0 ±2,5
Winterweizen 2022	4,5 ±1,1	8,0 ±1,6	7,0 ±1,7	8,3 ±1,2	7,7 ±2,4

Tabelle 34: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf den TM-Kornertrag von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Dauborn	Kornertrag TM to.*ha ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	9,2 ±0,45 ^a	9,4 ±0,62 ^a	11,0 ±1,03 ^a	9,6 ±0,71 ^a	9,7 ±0,54 ^a
Sommergerste 2021	5,6 ±0,20 ^a	5,7 ±0,18 ^a	6,0 ±0,27 ^a	5,9 ±0,13 ^a	5,6 ±0,20 ^a
Winterweizen 2022	7,3 ±0,63 ^a	8,2 ±0,27 ^a	8,0 ±0,78 ^a	7,9 ±0,56 ^a	8,2 ±0,54 ^a

Tabelle 35: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die P-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Dauborn	P-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	2,8 ±0,12 ^a	3,1 ±0,21 ^a	2,8 ±0,13 ^a	3,2 ±0,20 ^a	2,8 ±0,10 ^a
Sommergerste 2021	3,6 ±0,14 ^a	3,7 ±0,09 ^a	3,6 ±0,02 ^a	3,7 ±0,04 ^a	3,6 ±0,04 ^a
Winterweizen 2022	2,8 ±0,08 ^a	3,0 ±0,05 ^a	3,0 ±0,06 ^a	3,1 ±0,06 ^a	2,9 ±0,11 ^a

Stangenrod

Der Einfluss der zweistufigen P-Düngung auf den Kornertrag am Standort Stangenrod wird in Tabelle 36 dargestellt. Analog zu den Ergebnissen vom Standort Dauborn sind ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Allerdings hat die Düngung sehr wohl einen Effekt auf die P-Konzentration im Korn. In Tabelle 37 ist im Versuchsjahr 2022 ein eindeutiger Effekt in der Düngevariante Recphos im Vergleich zur Kontrolle zu beobachten. Auch ein Effekt der Düngestufe ist in diesem Jahr für das Düngemittel Recphos zu beobachten. Die Düngewirkung auf die P-Konzentration unterscheidet sich allerdings nur in der 40 kg P/ha Variante von der Düngewirkung von TSP.

Die in der Tabelle 38 gezeigten CAL-P Konzentrationen zeigen, dass die P-Düngung auch einen Effekt auf die P-Versorgung im Boden hat. Die Konzentrationen in den 40 kg P/ha Varianten sind im Verlauf der Versuche leicht gestiegen. Die Konzentrationen der 20 kg P/ha Varianten sind in etwa gleichgeblieben und die P-Konzentration in der Kontrollvariante ist gesunken. Was darauf hinweist, dass die P-Düngung einen Einfluss auf das pflanzenverfügbare P gegenüber der Kontrolle hat.

Tabelle 36: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf den TM-Kornertrag von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Stangenrod	Kornertrag TM to. *ha ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	8,4 ±0,18 ^a	8,2 ±0,26 ^a	7,8 ±0,12 ^a	8,2 ±0,22 ^a	8,2 ±0,20 ^a
Sommergerste 2021	4,9 ±0,19 ^a	5,1 ±0,20 ^a	5,2 ±0,17 ^a	4,9 ±0,17 ^a	5,0 ±0,21 ^a
Winterweizen 2022	4,8 ±0,15 ^a	4,7 ±0,21 ^a	4,4 ±0,21 ^a	5,0 ±0,18 ^a	4,5 ±0,13 ^a

Tabelle 37: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die P-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Stangenrod	P-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	3,0 ±0,07 ^a	2,9 ±0,08 ^a	3,1 ±0,01 ^a	3,1 ±0,07 ^a	3,0 ±0,03 ^a
Sommergerste 2021	3,9 ±0,06 ^a	3,9 ±0,07 ^a	4,0 ±0,04 ^a	3,9 ±0,02 ^a	4,0 ±0,04 ^a
Winterweizen 2022	3,1 ±0,03 ^a	3,1 ±0,08 ^{ab}	3,3 ±0,01 ^b	3,2 ±0,04 ^{ab}	3,4 ±0,03 ^c

Tabelle 38: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf das CAL extrahierbare P im Boden (0-30cm) in mg P pro 100 g Boden in einem Feldversuch auf dem Standort Stangenrod in den Frühjahren 2020,2021 und 2022.

Feldversuche Stangenrod	CAL extrahierbares P im Boden (0-30cm) in mg P*100g Boden ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	9,1 ±0,9	9,9 ±0,4 [±]	8,8 ±0,8	8,6 ±1,0	8,9 ±0,7
Sommergerste 2021	9,2 ±0,5	10,0 ±0,2	9,5 ±0,3	10,5 ±0,7	11,2 ±0,7
Winterweizen 2022	8,3 ±0,4	9,0 ±0,4	9,0 ±0,3	10,2 ±0,6	10,3 ±0,2

Villmar

Die Tabelle 39 zeigt den Einfluss der P-Düngung auf den Kornertrag auf dem Standort Villmar. Aus der Tabelle geht hervor, dass nur Informationen über zwei der drei Versuchsjahre vorliegen. Die Erträge aus dem letzten Versuchsjahr konnten aufgrund eines Wildschadens kurz vor der Ernte nicht erfasst werden. Aus den beiden ersten Versuchsjahren gehen, ähnlich wie beim Versuchsstandort Dauborn, keine signifikanten Effekte der P-Düngung hervor.

Tabelle 39: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf den TM-Kornertrag von Winterweizen und Silomais in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020 und 2021.

Feldversuche Villmar	Kornertrag TM to.*ha ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	Hyperphos 20kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Hyperphos 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	5,9 ±0,57 ^a	5,5 ±0,41 ^a	6,1 ±0,22 ^a	5,9 ±0,35 ^a	5,7 ±0,23 ^a
Silomais 2021	17,8 ±0,64 ^a	17,9 ±0,49 ^a	17,8 ±0,45 ^a	17,3 ±0,53 ^a	17,0 ±0,82 ^a

In Tabelle 40 ist der Einfluss der P-Düngung auf die P-Konzentration des Kornmaterials am Standort Villmar dargestellt. In den ersten beiden Versuchsjahren konnte eine signifikant höhere P-Konzentration, in der mit Recphos gedüngten Varianten gegenüber der Kontrolle und der 20 kg Hyperphos Variante festgestellt werden. Ähnliche Beobachtungen konnten auch im zweiten Versuchsjahr gemacht werden. Doch hatte hier auch die 40 kg P/ha Hyperphos Variante einen signifikanten Einfluss auf die P-Konzentration. Trotz des Wildschadens im Jahr 2022 konnten Proben auf dem Standort Villmar entnommen werden, sodass zumindest die P-Konzentration im Kornmaterial ermittelt werden konnte. Doch konnten in diesem Jahr keinerlei Effekte der P-Düngung auf die P-Konzentration im Kornmaterial festgestellt werden.

Tabelle 40: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die P-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silomais und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Villmar	P-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	Hyperphos 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	Hyperphos 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	3,6 ±0,03 ^a	3,7 ±0,03 ^a	3,8 ±0,06 ^b	3,6 ±0,09 ^{ab}	3,8 ±0,03 ^b
Silomais 2021	2,7 ±0,06 ^a	2,6 ±0,06 ^a	3,1 ±0,04 ^b	3,2 ±0,09 ^b	3,1 ±0,08 ^b
Winterroggen 2022	3,8 ±0,08 ^a	3,6 ±0,03 ^a	3,6 ±0,16 ^a	3,4 ±0,12 ^a	3,8 ±0,08 ^a

Eine weitere Beobachtung, die auf dem Standort Villmar über die Versuchsjahre hinweg gemacht werden konnte, war eine zunehmende Ausdifferenzierung der CAL-P Werte im Verlaufe der Versuche (Tabelle 41). Zunächst sinken die Konzentrationen an pflanzenverfügbarem P in allen Varianten. Im letzten Jahr jedoch verändern sich die Konzentrationen in den gedüngten Varianten kaum, wohingegen die Konzentration in der Kontrolle abnimmt. Daraus lässt sich schließen, dass die P-Düngung zur Erhaltung des Ernährungszustandes des Bodens beigetragen hat.

Tabelle 41: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf das CAL extrahierbare P im Boden (0-30cm) in mg P pro 100 g Boden in einem Feldversuch auf dem Standort Villmar in den Frühjahren 2020,2021 und 2022.

Feldversuche Villmar	CAL extrahierbares P im Boden (0-30cm) in mg P*100g Boden ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	Hyperphos 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	Hyperphos 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	3,5 ±0,1	3,2 ±0,2	3,3 ±0,1	3,9 ±0,4	5,5 ±0,6
Silomais 2021	2,5 ±0,2	2,4 ±0,1	2,6 ±0,1	2,5 ±0,1	3,0 ±0,2
Winterroggen 2022	1,9 ±0,1	2,4 ±0,2	2,3 ±0,2	2,6 ±0,1	2,9 ±0,2

Langgöns

Tabelle 42 und 43 zeigen den Einfluss der P-Düngung auf den Kornertrag und die P-Konzentration im Korn auf dem Standort Langgöns. In keinem der drei Versuchsjahre konnte ein Effekt der Düngung auf den Kornertrag festgestellt werden. Dasselbe gilt für die P-Konzentration im ersten und letzten Versuchsjahr. Im Versuchsjahr 2021 konnte allerdings ein Düngeeffekt von TSP in der 20 kg P/ha Variante beobachtet werden; allerdings widererwartend ist die Konzentration niedriger als in der Kontrolle. Die anderen Varianten unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Daher kann davon ausgegangen werden, dass es sich um einen zufälligen Effekt handelt. Zudem ist es auf diesem Standort nicht überraschend, keinen Düngeeffekt zu finden, da dieser Standort sehr gut mit P versorgt ist, s. Tab. 44.

Tabelle 42: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf den TM-Kornertrag von Winterweizen und Körnermais in einem Feldversuch am Standort Langgöns in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Langgöns	Kornertrag TM to.*ha ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	11,4 ±0,26 ^a	11,3 ±0,21 ^a	11,4 ±0,28 ^a	11,5 ±0,27 ^a	11,0 ±0,27 ^a
Körnermais 2021	11,5 ±0,20 ^a	10,8 ±0,39 ^a	12,8 ±0,70 ^a	11,4 ±0,35 ^a	12,9 ±0,55 ^a
Winterweizen 2022	8,3 ±0,15 ^a	8,5 ±0,14 ^a	8,2 ±0,15 ^a	8,3 ±0,04 ^a	8,5 ±0,04 ^a

Tabelle 43: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die P-Konzentration im Korn von Winterweizen und Körnermais in einem Feldversuch am Standort Langgöns in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Langgöns	P-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	3,3 ±0,12 ^a	3,4 ±0,10 ^a	3,2 ±0,25 ^a	3,2 ±0,05 ^a	3,6 ±0,13 ^a
Körnermais 2021	3,3 ±0,06 ^{bc}	2,9 ±0,06 ^a	3,2 ±0,20 ^{ab}	3,5 ±0,10 ^c	3,0 ±0,13 ^{ab}
Winterweizen 2022	3,6 ±0,06 ^a	3,7 ±0,03 ^a	3,6 ±0,05 ^a	3,5 ±0,05 ^a	3,6 ±0,06 ^a

Tabelle 44 zeigt den Einfluss der P-Düngung auf das pflanzenverfügbare P im Boden (0-30cm). Im Verlaufe der Versuchsjahre ist zu beobachten, dass das P-Niveau vom ersten Jahr zum letzten Jahr hin absinkt. Außerdem ist zu erkennen, dass eine Ausdifferenzierung zwischen der Kontrolle und den gedüngten Varianten stattfindet. Daraus lässt sich schließen, dass auch auf diesem Standort die P-Düngung zur Erhaltung des pflanzenverfügbaren Phosphors beigetragen hat.

Tabelle 44: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf das CAL extrahierbare P im Boden (0-30 cm) in mg P pro 100 g Boden in einem Feldversuch auf dem Standort Langgöns in den Frühjahren 2020,2021 und 2022.

Feldversuche Langgöns	CAL extrahierbares P im Boden (0-30cm) in mg P*100g Boden ⁻¹				
	±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2020	16,5 ±1,6	18,8 ±2,7	17,0 ±1,3	15,6 ±1,9	17,3 ±1,3
Körnermais 2021	8,8 ±0,8	11,8 ±1,5	10,6 ±1,6	11,0 ±1,1	11,6 ±1,0
Winterweizen 2022	7,6 ±0,7	12,4 ±1,3	13,2 ±3,2	9,6 ±1,0	10,5 ±0,8

Münchholzhausen

Der Einfluss der P-Düngung auf den Kornertrag auf dem Versuchsstandort Münchholzhausen ist in der Tabelle 45 abgebildet. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass der Standort in Münchholzhausen der einzige Feldversuchsstandort war, bei dem ein signifikanter Mehrertrag durch die P-Düngung zu beobachten war. Die Erträge aus dem ersten Versuchsjahr konnten leider wegen eines Wildschadens kurz vor der Ernte nicht erfasst werden. Im zweiten Versuchsjahr ist die Düngewirkung bereits in den 20 kg P/ha Varianten zu sehen. Die beiden Düngemittel TSP und Recphos hatten einen vergleichbaren Effekt auf den Ertrag. Ein Effekt der Düngestufe ist allerdings nicht zu beobachten. Die 40 kg P - und die 20 kg P Varianten unterschieden sich nicht voneinander.

Tabelle 45: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf den TM-Kornertrag von Winterweizen und Winterraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2021 und 2022.

Feldversuche Münchholzhausen	Kornertrag TM to.*ha ⁻¹ ±Standardfehler				
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha
Winterweizen 2021	4,6 ±0,23 ^a	5,7 ±0,22 ^b	6,5 ±0,07 ^b	6,0 ±0,17 ^b	6,1 ±0,18 ^b
Winterraps 2022	2,7 ±0,35 ^a	3,9 ±0,26 ^a	3,9 ±0,08 ^a	4,3 ±0,22 ^a	4,3 ±0,23 ^a

Tabelle 46 zeigt den Effekt der P-Düngung auf die P-Konzentration im Kornmaterial auf dem Standort Münchholzhausen. Im ersten Versuchsjahr konnte kein Effekt der Düngung auf die P-Konzentration beobachtet werden. Im zweiten Jahr hatte schon eine Düngung von 20 kg P/ha einen positiven Effekt auf die P-Konzentration im Korn. Die beiden Düngemittel TSP und Recphos hatten in dieser Stufe einen vergleichbaren Düngeeffekt. Ein Effekt der Düngestufe konnte allerdings nur in der 40 kg P TSP Variante beobachtet werden. Die Düngewirkung von Recphos unterschied sich in dieser Variante nicht von der 20 kg P Variante. Im letzten Versuchsjahr konnte lediglich in der 40 kg P/ha TSP-Variante ein Effekt auf die P-Konzentration gegenüber der Kontrolle beobachtet werden. In der 40 kg P/ha Recphos-Variante konnte auch ein Anstieg der P-Konzentration beobachtet werden; allerdings unterschied sich dieser statistisch weder von der Kontrolle noch von der TSP-Variante.

Tabelle 46: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die P-Konzentration im Korn von Körnermais, Winterweizen und Winterraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Münchholzhausen	P-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler					
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha	
Körnermais 2020	1,6 ±0,04 ^a	1,3 ±0,35 ^a	1,9 ±0,19 ^a	1,7 ±0,11a	1,6 ±0,10 ^a	
Winterweizen 2021	2,6 ±0,07 ^a	3,0 ±0,03 ^b	3,0 ±0,09 ^b	3,8 ±0,09 ^c	3,1 ±0,12 ^b	
Winterraps 2022	4,7 ±0,22 ^a	4,6 0,15 ^a	4,6 ±0,34 ^a	5,7 ±0,12 ^b	5,2 ±0,16 ^{ab}	

Tabelle 47 zeigt den Einfluss der P-Düngung auf das pflanzenverfügbare P im Boden auf dem Standort Münchholzhausen. Vergleicht man die Konzentrationen zu Beginn mit den Konzentrationen aus dem letzten Versuchsjahr, fällt auf, dass die P-Versorgung über alle Varianten hinweg gesunken ist. Außerdem ist eine klare Ausdifferenzierung zwischen der Kontrolle und den beiden Düngestufen zu erkennen.

Tabelle 47: Einfluss einer zweistufigen P-Düngung mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf das CAL extrahierbare P im Boden (0-30cm) in mg P pro 100 g Boden in einem Feldversuch auf dem Standort Münchholzhausen in den Frühjahren 2020,2021 und 2022.

Feldversuche Münchholzhausen	CAL extrahierbares P im Boden (0-30cm) in mg P*100g Boden ⁻¹ ±Standardfehler					
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha	
Körnermais 2020	3,85 ±0,2	2,70 ±0,1	3,33 ±0,1	3,16 ±0,5	2,78 ±0,2	
Winterweizen 2021	0,97 ±0,1	1,22 ±0,1	1,16 ±0,1	1,40 ±0,2	1,57 ±0,3	
Winterraps 2022	0,75 ±0,1	1,25 ±0,2	1,14 ±0,2	1,72 ±0,3	1,61 ±0,4	

Zusammenfassend kann über die Feldversuche berichtet werden, dass die P-Düngung nur auf dem Standort Münchholzhausen einen Effekt auf den Kornertrag hatte. Dies ist durch die niedrige P-Versorgung auf diesem Standort zu erklären. Dort haben Recphos und TSP eine vergleichbare Düngewirkung erzielt. Ein Düngeeffekt auf die P-Konzentration im Erntegut konnte auf allen Feldversuchsstandorten außer in Dauborn festgestellt werden. Auch hier schnitten TSP und Recphos vergleichbar gut ab, auch wenn der Effekt von TSP in einigen Fällen etwas stärker gegenüber der Kontrolle war als der von Recphos. Ein Effekt auf das pflanzenverfügbare Phosphat konnte auf allen Standorten beobachtet werden. In der Kontrolle konnte eine Abnahme der CAL-P Konzentrationen auf allen Standorten beobachtet werden, wohingegen die gedüngten Varianten stabiler blieben. Ein Unterschied zwischen den Düngemitteln und Varianten konnte hier allerdings nicht beobachtet werden. Daher kann davon ausgegangen werden, dass sowohl die Düngung mit Recphos als auch die mit TSP zur Erhaltung der P-Versorgung der Böden auf allen Versuchsstandorten beigetragen hat. Als generelles Fazit ist zu ziehen, dass Recphos ein wirksames P-Düngemittel ist und eine mit TSP vergleichbare Düngewirkung hat.

Schwermetallmessungen

Chrom:

Tabelle 48: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Chrom-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Dauborn	Cr-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	0,05	±0,02 ^a	0,05	±0,04 ^a	0,21	±0,07 ^a	0,14	±0,05 ^a	0,16	±0,06 ^a
Sommergerste 2021	1,14	±0,16 ^a	1,25	±0,12 ^a	0,92	±0,15 ^a	0,96	±0,14 ^a	0,84	±0,12 ^a
Winterweizen 2022	0,22	±0,01 ^a	0,24	±0,01 ^a	0,25	±0,01 ^a	0,24	±0,01 ^a	0,26	±0,01 ^a

Tabelle 49: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Chrom-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Stangenrod	Cr-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	0,05	±0,02 ^a	0,03	±0,01 ^a	0,04	±0,02 ^a	0,04	±0,02 ^a	0,04	±0,01 ^a
Sommergerste 2021	0,43	±0,03 ^a	0,43	±0,04 ^a	0,40	±0,02 ^a	0,46	±0,05 ^a	0,44	±0,03 ^a
Winterweizen 2022	0,20	±0,01 ^a	0,19	±0,01 ^a	0,20	±0,01 ^a	0,22	±0,01 ^a	0,20	±0,01 ^a

Tabelle 50: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Chrom-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silomais und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Villmar	Cr-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		Hyperphos 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		Hyperphos 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	0,09	±0,02 ^a	0,03	±0,01 ^a	0,07	±0,02 ^a	0,09	±0,03 ^a	0,04	±0,01 ^a
Silomais 2021	3,13	±0,10 ^a	3,68	±0,12 ^a	3,38	±0,25 ^a	3,79	±0,64 ^a	3,85	±0,20 ^a
Winterroggen 2022	0,05	±0,01 ^a	0,06	±0,01 ^a	0,05	±0,01 ^a	0,08	±0,02 ^a	0,05	±0,01 ^a

Tabelle 51: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Chrom-Konzentration im Korn von Winterweizen in einem Feldversuch am Standort Langgöns im Jahr 2022.

Feldversuche Langgöns	Cr-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2022	0,04	±0,01 ^a	0,07	±0,01 ^a	0,05	±0,01 ^a	0,05	±0,01 ^a	0,03	±0,01 ^a

Tabelle 52: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Chrom-Konzentration im Korn von Körnermais, Winterweizen und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Münchholzhausen	Cr-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler					
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha	Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2021	0,29 ±0,04 ^{ab}	0,25 ±0,01 ^a	0,30 ±0,02 ^{ab}	0,32 ±0,01 ^b	0,27 ±0,02 ^{ab}	
Winterraps 2022	1,55 ±0,03 ^a	1,53 ±0,04 ^a	1,86 ±0,14 ^a	1,69 ±0,14 ^a	1,87 ±0,13 ^a	

Die Chrom-Konzentrationen sind in den Tabellen 48-52 abgebildet. Für die Standorte Langgöns und Münchholzhausen konnten nur Daten für die Versuchsjahre 2021 und 2022 gemessen werden, da die restlichen Messwerte unterhalb der Nachweißgrenze lagen. Auf den Standorten Dauborn, Stangenrod, Villmar und Langgöns konnten in keinem der Versuchsjahre ein signifikanter Unterschied in der Chrom-Konzentration zwischen den Varianten festgestellt werden. Im Versuchsjahr 2021 konnte allerdings auf dem Standort Münchholzhausen ein signifikanter Anstieg der Chrom-Konzentration von der 20 kg P/ha TSP Variante zu der 40 kg P/ha TSP beobachtet werden. Dieser Effekt konnte allerdings auf keinem anderen Standort, auf dem Winterweizen gewachsen ist, beobachtet werden.

Nickel:

Tabelle 53: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Nickel-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Dauborn	Ni-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler					
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha	Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	0,16 ±0,10 ^a	0,64 ±0,38 ^a	0,13 ±0,06 ^a	0,68 ±0,31 ^a	0,70 ±0,19 ^a	
Sommergerste 2021	0,83 ±0,13 ^a	1,16 ±0,18 ^a	0,63 ±0,17 ^a	0,72 ±0,08 ^a	0,72 ±0,10 ^a	
Winterweizen 2022	0,27 ±0,11 ^a	0,05 ±0,07 ^a	-0,01 ±0,05 ^a	0,09 ±0,10 ^a	0,43 ±0,22 ^a	

Tabelle 54: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Nickel-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Stangenrod	Ni-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler					
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha	Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	0,21 ±0,04 ^a	0,65 ±0,34 ^a	0,18 ±0,10 ^a	0,55 ±0,24 ^a	0,29 ±0,15 ^a	
Sommergerste 2021	0,49 ±0,11 ^a	0,45 ±0,03 ^a	0,58 ±0,08 ^a	0,52 ±0,07 ^a	0,53 ±0,16 ^a	
Winterweizen 2022	0,87 ±0,24 ^a	0,77 ±0,24 ^a	0,50 ±0,17 ^a	0,90 ±0,44 ^a	0,88 ±0,41 ^a	

Tabelle 55: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Nickel-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silomais und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Villmar	Ni-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		Hyperphos 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		Hyperphos 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	0,61	±0,22 ^a	0,85	±0,25 ^a	0,55	±0,17 ^a	0,22	±0,03 ^a	0,46	±0,10 ^a
Silomais 2021	2,30	±0,08 ^a	2,61	±0,11 ^a	2,60	±0,23 ^a	2,71	±0,46 ^a	2,81	±0,13 ^a
Winterroggen 2022	0,68	±0,13 ^a	0,51	±0,09 ^a	0,24	±0,03 ^a	0,56	±0,11 ^a	0,30	±0,08 ^a

Tabelle 56: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Ni-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silo und Körnermais in einem Feldversuch am Standort Langgöns in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Langgöns	Ni-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	0,61	±0,22 ^a	0,85	±0,25 ^a	0,55	±0,17 ^a	0,22	±0,03 ^a	0,46	±0,10 ^a
Körnermais 2021	0,37	±0,05 ^a	0,33	±0,02 ^a	0,42	±0,04 ^a	0,32	±0,02 ^a	0,45	±0,11 ^a
Winterweizen 2022	0,54	±0,13 ^a	0,68	±0,21 ^a	0,50	±0,21 ^a	0,67	±0,22 ^a	0,64	±0,26 ^a

Tabelle 57: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Nickel-Konzentration im Korn von Körnermais, Winterweizen und Winterraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Münchholzhausen	Ni-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Körnermais 2020	1,23	±0,14 ^a	1,25	±0,57 ^a	1,50	±0,21 ^a	1,06	±0,12 ^a	1,37	±0,25 ^a
Winterweizen 2021	1,15	±0,13 ^a	0,94	±0,17 ^a	1,06	±0,20 ^a	1,08	±0,16 ^a	0,98	±0,23 ^a
Winterraps 2022	1,99	±0,19 ^a	1,56	±0,12 ^a	1,63	±0,19 ^a	1,20	±0,18 ^a	1,63	±0,11 ^a

Die Nickel-Konzentrationen im Erntegut werden in den Tabellen 53-57 abgebildet. In allen drei Versuchsjahren konnte auf keinem der Standorte bei keiner Kultur ein signifikanter Effekt der P-Düngung in Form von TSP, Hyperphos oder Recphos auf die Nickel-Konzentration im Erntegut beobachtet werden.

Kupfer:

Tabelle 58: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Kupfer-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Dauborn	Cu-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler								
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		Recphos 40kg P/ha			
Winterweizen 2020	4,60 ±0,26 ^a	4,41	±0,28 ^a	4,45	±0,21 ^a	4,46	±0,14 ^a	4,37	±0,21 ^a
Sommergerste 2021	6,16 ±0,47 ^a	5,96	±0,17 ^a	5,74	±0,32 ^a	5,44	±0,38 ^a	5,52	±0,39 ^a
Winterweizen 2022	3,62 ±0,23 ^a	3,34	±0,26 ^a	3,31	±0,24 ^a	3,07	±0,25 ^a	3,10	±0,24 ^a

Tabelle 59: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Kupfer-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Stangenrod	Cu-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler								
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		Recphos 40kg P/ha			
Winterweizen 2020	3,40 ±0,10 ^a	3,08	±0,07 ^a	3,43	±0,18 ^a	3,37	±0,22 ^a	3,44	±0,08 ^a
Sommergerste 2021	3,87 ±0,10 ^a	3,89	±0,19 ^a	3,65	±0,05 ^a	3,47	±0,13 ^a	3,75	±0,12 ^a
Winterweizen 2022	3,24 ±0,03 ^b	2,87	±0,12 ^a	3,15	±0,09 ^{ab}	2,78	±0,09 ^a	3,05	±0,04 ^{ab}

Tabelle 60: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Kupfer-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silomais und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Villmar	Cu-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler								
	Kontrolle 0kg P/ha	Hyperphos 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		Hyperphos 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	3,51 ±0,05 ^a	3,67	±0,10 ^a	3,57	±0,10 ^a	3,64	±0,03 ^a	3,82	±0,10 ^a
Silomais 2021	2,64 ±0,07 ^a	3,07	±0,31 ^a	2,74	±0,08 ^a	2,98	±0,18 ^a	3,47	±0,31 ^a
Winterroggen 2022	3,64 ±0,12 ^a	3,52	±0,06 ^a	3,44	±0,21 ^a	3,44	±0,04 ^a	3,65	±0,18 ^a

Tabelle 61: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Kupfer-Konzentration im Korn von Winterweizen und Körnermais in einem Feldversuch am Standort Langgöns in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Langgöns	Cu-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler								
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		Recphos 40kg P/ha			
Winterweizen 2020	3,61 ±0,18 ^a	3,69	±0,15 ^a	3,46	±0,23 ^a	3,49	±0,10 ^a	3,76	±0,15 ^a
Körnermais 2021	3,39 ±0,14 ^a	3,26	±0,17 ^a	3,24	±0,13 ^a	3,32	±0,14 ^a	2,95	±0,13 ^a
Winterweizen 2022	3,64 ±0,04 ^a	3,62	±0,06 ^a	3,69	±0,10 ^a	3,46	±0,04 ^a	3,57	±0,05 ^a

Tabelle 62: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Kupfer-Konzentration im Korn von Körnermais, Winterweizen und Wintertraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Münchholzhausen	Cu-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Körnermais 2020	2,61	±0,39 ^a	1,73	±0,53 ^a	2,59	±0,11 ^a	2,31	±0,14 ^a	2,16	±0,08 ^a
Winterweizen 2021	4,82	±0,08 ^b	4,27	±0,09 ^a	4,69	±0,25 ^{ab}	4,53	±0,10 ^{ab}	4,04	±0,10 ^a
Winterraps 2022	3,62	±0,12 ^c	3,25	±0,06 ^b	3,30	±0,07 ^{ab}	3,04	±0,18 ^a	3,46	±0,12 ^{ab}

Tabelle 59 zeigt die Kupfer-Konzentration im Kornmaterial auf dem Standort Stangenrod. Hier konnte im Versuchsjahr 2022 ein signifikanter Unterschied beobachtet werden. Die Kupfer-Konzentration war in der Kontrolle signifikant höher als in beiden TSP-Varianten. Auch auf dem Standort in Münchholzhausen (Tabelle 62) konnten ähnliche Beobachtungen in den Versuchsjahren 2021 und 2022 gemacht werden, wobei im Versuchsjahr 2021 auch Recphos eine niedrigere Konzentration aufwies. Diese Beobachtungen konnten allerdings bei den anderen Versuchen nicht beobachtet werden.

Zink:

Tabelle 63: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Zink-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Dauborn	Zn-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	24,27	±0,34 ^a	27,44	±0,42 ^b	26,45	±1,63 ^{ab}	25,69	±1,09 ^{ab}	27,15	±0,63 ^b
Sommergerste 2021	24,58	±0,68 ^a	25,84	±0,26 ^a	24,62	±0,70 ^a	23,82	±0,73 ^a	24,22	±0,44 ^a
Winterweizen 2022	18,80	±0,89 ^a	20,03	±0,63 ^a	18,59	±1,09 ^a	17,40	±0,91 ^a	17,95	±0,30 ^a

Tabelle 64: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Zink-Konzentration im Korn von Winterweizen und Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Stangenrod in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Stangenrod	Zn-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	15,59	±0,60 ^a	13,90	±0,34 ^a	14,79	±0,96 ^a	14,63	±1,06 ^a	15,55	±0,60 ^a
Sommergerste 2021	19,54	±0,35 ^a	19,38	±1,01 ^a	18,30	±0,52 ^a	17,84	±0,63 ^a	19,16	±0,26 ^a
Winterweizen 2022	15,70	±0,35 ^a	14,52	±0,96 ^a	15,70	±0,81 ^a	15,65	±0,61 ^a	17,05	±0,35 ^a

Tabelle 65: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Zink-Konzentration im Korn von Winterweizen, Silomais und Winterroggen in einem Feldversuch am Standort Villmar in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Villmar	Zn-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		Hyperphos 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		Hyperphos 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	23,58	±0,41 ^a	24,23	±0,52 ^a	24,47	±0,73 ^a	23,41	±0,28 ^a	24,26	±0,62 ^a
Silomais 2021	22,88	±0,49 ^a	21,90	±0,43 ^a	21,41	±0,65 ^a	21,93	±0,25 ^a	23,17	±0,71 ^a
Winterroggen 2022	26,25	±1,26 ^a	26,59	±1,07 ^a	25,74	±0,63 ^a	23,39	±1,66 ^a	24,63	±1,08 ^a

Tabelle 66: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Zink-Konzentration im Korn von Winterweizen und Körnermais in einem Feldversuch am Standort Langgöns in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Langgöns	Zn-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterweizen 2020	21,53	±0,95 ^a	20,84	±0,94 ^a	19,64	±1,24 ^a	19,43	±0,65 ^a	20,70	±0,75 ^a
Körnermais 2021	20,99	±0,81 ^a	19,18	±0,82 ^a	19,55	±1,34 ^a	20,05	±1,32 ^a	18,03	±1,11 ^a
Winterweizen 2022	21,09	±0,77 ^{ab}	21,54	±0,35 ^b	20,56	±0,20 ^{ab}	18,94	±0,45 ^a	20,42	±0,37 ^{ab}

Tabelle 67: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Zink-Konzentration im Korn von Körnermais, Winterweizen und Winterraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen in den Jahren 2020, 2021 und 2022.

Feldversuche Münchholzhausen	Zn-Konzentration mg *kg ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Körnermais 2020	18,13	±0,96 ^a	16,78	±0,71 ^a	17,82	±0,11 ^a	17,19	±0,77 ^a	16,30	±0,57 ^a
Winterweizen 2021	28,95	±0,28 ^a	31,52	±1,67 ^a	30,38	±1,33 ^a	29,76	±0,51 ^a	28,44	±1,14 ^a
Winterraps 2022	36,05	±0,87 ^a	36,97	±0,73 ^a	37,72	±1,09 ^a	35,23	±0,79 ^a	37,53	±0,81 ^a

Die Tabellen 63-67 zeigen die Zink-Konzentration im Kornmaterial der Feldversuche in den Jahren 2020-2022. Auf dem Standort Dauborn (Tabelle 63) konnte im ersten Versuchsjahr ein signifikanter Anstieg der Zink-Konzentration der 20 kg P/ha TSP und der 40 kg P/ha Recphos-Variante gegenüber der Kontrolle beobachtet werden.

Eine solche Beobachtung konnte allerdings bei keinem der anderen Versuche gemacht werden auf denen Winterweizen angebaut wurde. Doch konnte auf dem Standort Langgöns im letzten Versuchsjahr ein Düngestufeneffekt beobachtet werden. Die beiden TSP Varianten unterscheiden sich signifikant voneinander, jedoch ist von der 20 kg P/ha - auf die 40 kg P/ha-Variante kein Anstieg zu beobachten, sondern ein Abfall. Diese Beobachtung deckt sich mit keinem der anderen Versuchsjahre auf dem Standort und auch mit keinem der anderen Standorte. Daher ist die Aussagekraft fraglich.

Arsen:

Tabelle 68: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Arsen-Konzentration im Korn von Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in dem Jahr 2021.

Feldversuche Dauborn	As-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler					
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha	
Sommergerste 2021	0,017 ±0,007 ^a	0,016 ±0,004 ^a	0,022 ±0,004 ^a	0,021 ±0,004 ^a	0,012 ±0,004 ^a	

Tabelle 69: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Arsen-Konzentration von Silomais in einem Feldversuch am Standort Villmar im Jahr 2021.

Feldversuche Villmar	As-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler					
	Kontrolle 0kg P/ha	Hyperphos 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	Hyperphos 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha	
Silomais 2021	0,042 ±0,003 ^a	0,041 ±0,006 ^a	0,043 ±0,006 ^a	0,038 ±0,004 ^a	0,042 ±0,004 ^a	

Für die Arsen-Konzentration konnten lediglich auf zwei Standorten zu jeweils einem Jahr verwertbare Ergebnisse erzielt werden. Alle anderen Messwerte lagen unterhalb der Nachweisgrenze und können daher nicht ausgewertet werden. Die Tabellen 68 und 69 zeigen diese Arsen-Konzentrationen. Hier konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten beobachtet werden. Die erfassten Messwerte liegen sowohl für das Kornmaterial von Sommergerste als auch für den Silomais weit unter dem Grenzwert der EU Verordnung 2023/915 von 0,15 mg/kg Kornmaterial (Reis).

Cadmium:

Alle Cadmium-Messwerte im Erntegut lagen unterhalb der Nachweisgrenze; daher entfällt hier eine Auswertung.

Blei:

Tabelle 70: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Blei-Konzentration im Korn von Sommergerste in einem Feldversuch am Standort Dauborn in dem Jahr 2021.

Feldversuche Dauborn	Pb-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler					
	Kontrolle 0kg P/ha	TSP 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	TSP 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha	
Sommergerste 2021	0,100 ±0,013 ^a	0,063 ±0,007 ^a	0,064 ±0,009 ^a	0,074 ±0,001 ^a	0,049 ±0,009 ^a	

Tabelle 71: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Blei-Konzentration von Silomais in einem Feldversuch am Standort Villmar im Jahr 2021.

Feldversuche Villmar	Pb-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler					
	Kontrolle 0kg P/ha	Hyperphos 20kg P/ha	Recphos 20kg P/ha	Hyperphos 40kg P/ha	Recphos 40kg P/ha	
Silomais 2021	0,081 ±0,018 ^a	0,067 ±0,008 ^a	0,074 ±0,011 ^a	0,082 ±0,014 ^a	0,096 ±0,013 ^a	

Ähnlich wie beim Arsen konnte für die Blei-Konzentration lediglich für das Jahr 2021 auf den Standorten Dauborn und Villmar Messwerte ausgewertet werden, da die restlichen Werte unterhalb der Nachweisgrenze lagen. Auch

hier konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Der Grenzwert der EU Verordnung 2023/918 von 0,2 mg Pb pro kg Kornmaterial wird bei keinem der Messwerte überschritten.

Thallium und Uran:

Tabelle 72: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Thallium-Konzentration von Silomais in einem Feldversuch am Standort Villmar im Jahr 2021.

Feldversuche Villmar	TI-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		Hyperphos 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		Hyperphos 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Silomais 2021	0,006	±0,003 ^a	0,004	±0,002 ^a	0,002	±0,001 ^a	0,001	±0,000 ^a	0,002	±0,000 ^a

Tabelle 73: Einfluss einer P-Düngung in zwei Stufen mit einem P-Recyclingdüngemittel und TSP auf die Thallium-Konzentration im Korn von Winterraps in einem Feldversuch am Standort Münchholzhausen im Jahr 2022.

Feldversuche Münchholzhausen	TI-Konzentration mg *g ⁻¹ ±Standardfehler									
	Kontrolle 0kg P/ha		TSP 20kg P/ha		Recphos 20kg P/ha		TSP 40kg P/ha		Recphos 40kg P/ha	
Winterraps 2022	0,137	±0,008 ^b	0,122	±0,006 ^a	0,127	±0,009 ^b	0,110	±0,002 ^a	0,106	±0,002 ^a

Für Thallium konnten Für das Versuchsjahr 2021 auf dem Standort Villmar und für das Versuchsjahr 2022 auf dem Standort in Münchholzhausen Messungen gemacht werden. Die restlichen Messungen lagen unterhalb der Nachweisgrenze. Auf dem Standort in Münchholzhausen konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der Kontrolle und der Recphos 20 kg P/ha Variante und den restlichen Varianten festgestellt werden. Die Thallium-Konzentration lag bei diesen beiden Varianten höher als bei den restlichen Varianten.

Für die Uran-Konzentration konnten keine Werte gemessen werden, da alle Messungen deutlich unterhalb der Nachweisgrenze lagen. Daher entfällt für Uran eine Auswertung.

3.2 Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen

Aus Anlage 7: Beitrag zu den Zielen der EIP „Landwirtschaftliche Produktivität und Nachhaltigkeit“

1. Förderung eines ressourceneffizienten, wirtschaftlich lebensfähigen, produktiven, wettbewerbsfähigen, emissionsarmen, klimafreundlichen und -resistenten Agrar- und Forstsektors mit einem Hinarbeiten auf agrarökologische Produktionssysteme, der in Harmonie mit den wesentlichen natürlichen Ressourcen funktioniert, von denen die Land- und Forstwirtschaft abhängt.

Durch Recycling der kommunalen Klärschlämme, sowie der Nutzung der Recyclingprodukte als P-Düngemittel in der Landwirtschaft entsteht ein geschlossener Kreislauf, welcher den Import von P-Düngemitteln reduziert. Durch die Regionalität und die geringeren P-Importe werden Transportwege verkürzt und so nachhaltiger gewirtschaftet.

2. Beitrag zu einer sicheren, stetigen und nachhaltigen Versorgung mit Lebensmitteln, Futtermitteln und Biomaterialien, was sowohl bestehende als auch neue Produkte betrifft.

Recycelte P-Düngemittel wie Recphos mit geringeren Cd- und Urankonzentrationen tragen zu einem geringeren Schadstoffeintrag in den Boden bei. Diese haben geringe Einträge in das Grundwasser zufolge. Zudem tragen sie durch ihre gute P-Düngewirkung zu einer nachhaltigen Produktion von Futter- und Lebensmitteln bei.

3. Verbesserung der Prozesse zur Bewahrung der Umwelt, zur Eindämmung des Klimawandels und zur Anpassung an seine Auswirkungen.

Der Einsatz von P-Recyclingdüngern reduziert den CO₂-Ausstoß durch den geringeren Import von Rohphosphaten aus Regionen wie Nordafrika. Zudem werden durch den geringeren Import auch der Abbau von Phosphaterzen und die dadurch anfallenden CO₂-Emissionen reduziert.

4. Brückenschlag zwischen Spitzenformung und -technologie sowie den Landwirten, Waldbewirtschaftern, ländlichen Gemeinden, Unternehmen, Nicht-Regierungs-Organisationen (NRO) und Beratungsdiensten.

Der Brückenschlag besteht aus dem Einsatz von neuen Techniken zum P-Recycling aus regionalen Klärschlämmen. Dadurch werden den Landwirten neue, gut wirksame und schadstoffarme Düngemittel bereitgestellt und der Kerngedanke der Kreislaufwirtschaft gewahrt.

3.3 Erreichung der Ziele des Vorhabens

Die materielle Innovation dieses Projektes stellt die Herstellung eines innovativen P-Recyclingdüngers dar, dessen Wirksamkeit und Umweltverträglichkeit durch die erzielten Ergebnisse bestätigt werden. Dennoch ging es in diesem Projekt vor allem darum, für die Modellregion Mittelhessen ein System zu entwickeln, das die bodenbezogene Verwertung von kommunalen Klärschlämmen nach dem Jahr 2029 ersetzen kann. Dabei werden die Vorgaben gemäß des P-Recyclings eingehalten und den Landwirten die Möglichkeit geboten, im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu düngen. Darüber hinaus konnte eine Akzeptanz seitens der im Projekt tätigen Landwirte für Recyclingdüngemittel generiert werden.

Eine Abweichung zwischen dem Projektplan und dem Verlauf war der Start des Projekts. Der geplante Start des Projekts seitens des Projektplans sollte der 01.01.2019 sein. Der tatsächliche Projektstart war der 01.06.2019. Dennoch wurde seitens InfraserV planmäßig die Monoverbrennung der Klärschlämme vorgenommen und auch

die Charakterisierung der Asche durchgeführt, sodass zu Beginn der Feldversuche im September 2019 bereits das fertige Düngemittel zur Verfügung stand.

Zudem kam es wegen Fehlern in der Planung zu einem finanziellen Engpass, der zur Folge hatte, dass die geplanten Schwermetallanalysen der Böden nicht durchgeführt wurden. Eine weitere Verzögerung ergab sich aus der neuen Implementierung der Aufschluss- und Analysemethoden. Diese waren durch die ICP-MS-Messungen bei der BOKU in Wien erforderlich.

4 Ergebnisverwertung, Kommunikation und Verstetigung

4.1 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis.

Die in dem vorliegenden Projekt erzielten Ergebnisse sind auf der einen Seite wichtig für einen Betreiber einer P-Recyclinganlage aus Klärschlämmen (Betriebsmanagement) und auf der anderen Seite für den landwirtschaftlichen Handel (Produktqualität) sowie für die landwirtschaftliche Praxis (Ertragswirksamkeit).

Die Ergebnisse belegen einen deutlichen Einfluss sowohl der Liefertaktung des Klärschlamm zur Verbrennungs- und P-Rückgewinnungsanlage als auch des innerbetrieblichen Lagermanagements auf die Qualität des Düngemittels. Da dessen Eigenschaften innerhalb der Spezifikation nur in einem sehr engen Korridor schwanken dürfen, ist eine entsprechende modellgestützte Vorgehensweise von hoher wirtschaftlicher Relevanz. Mit dem im Vorhaben erstellten Matlab-Quellcode werden sich vergleichsweise komfortabel die im Anlagenbetrieb tatsächlich anfallenden Klärschlammqualitäten und -quantitäten abbilden lassen. Somit steht ein wirkungsvolles Werkzeug für den praktischen Betrieb der künftigen Anlage bereit.

Die Ergebnisse der in den Container- und Feldversuchen durchgeführten Phosphor-Düngungsversuche zeigen, dass das im Rahmen des Projektes hergestellte Phosphor-Düngemittel eine sehr gute Pflanzenverfügbarkeit des gedüngten Phosphats aufweist. Seine Düngewirkung ist mit der eines Tripelsuperphosphates vergleichbar. Die Schwermetallanalysen konnten für keinen der gemessenen Schwermetalle einen wiederholbaren Einfluss der Düngung feststellen. Daher kann die Verwendung eines P-Recyclingdüngemittels wie Recphos uneingeschränkt empfohlen werden.

4.2 (Geplante) Verwertung/Verbreitung und Nutzung der Ergebnisse

Vorträge und Posterbeiträge:

Adami, M. (2019): Projektvorstellung auf der DLG-Ausstellung „Agritechnica“, Hannover, Poster.

Adami, M. (2021): Vortrag über die Wirksamkeit der P-Rezyklate im Feld und Container. DPP-Forum, Frankfurt 2021, Vortrag.

Adami, M. (2022): Projektvorstellung auf den Ökofeldtagen. Poster, Villmar, Gladbacherhof, Poster.

Steffens, D. (2022): Phosphor – Eine knappe Ressource. Strategien für Recycling und bessere Nutzungseffizienz. Oberhessische Gesellschaft für Natur- und Heilkunde e.V. Gießen, IFZ, 08.12.2022, Vortrag.

Steffens, D. (2023): Phosphor – Eine knappe Ressource. Strategien für Recycling und bessere Nutzungseffizienz. Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät der Christian-Albrecht-Universität Kiel. Januar 2023, Vortrag.

Steffens, D. (2023): Phosphorrecycling aus Klärschlämmen. Derzeitiger Stand und Perspektiven. Der Pflanzenarzt: 6-7, 16-19, Artikel.

Die Ergebnisse zu AP 6 wurden im Jahr 2021 und 2023 auf der International Conference on Environmental Science and Technology vorgestellt und unter Berücksichtigung der Publizitätsvorschrift im Tagungsband veröffentlicht.

Svenja Vogt, Felix Brück, Kevin Schnabel und Harald Weigand. Improving the homogeneity of a sewage sludge-based phosphorus fertilizer by Monte Carlo simulation of the production. Konferenz: 18th International Conference on Environmental Science and Technology. Athen, Griechenland, September 2023 DOI: 10.30955/gnc2023.00284.

Svenja Vogt, Felix Brück, Kevin Schnabel und Harald Weigand. P-recovery from sewage sludge ash: Processing effects on ash variability as assessed by Monte Carlo Simulation. Konferenz: 17th International Conference on Environmental Science & Technology. Athen, Griechenland, September 2021.

4.3 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit: Es zeichnet sich ab, dass es (mit Ausnahme der großen Kläranlagen) nicht wirtschaftlich sein wird, P-Rückgewinnungsanlagen dezentral zu realisieren, dort den Klärschlamm bis zum einsatzbereiten Dünger zu verarbeiten. Derartige Anlagen sind mit einem erheblichen technischen Aufwand verbunden, der vom täglichen Geschäft der Reinigung kommunalen Abwassers methodisch sehr weit entfernt ist. Daraus folgt, dass wie beim assoziierten Partner InfraserV der Klärschlamm unterschiedlicher Anlagen und daher mit variablen Quantitäten und Qualitäten akquiriert werden muss. Vor diesem Hintergrund bietet die im Vorhaben entwickelte Matlab-Routine interessante Möglichkeiten für die beratende Tätigkeit im Auftrag der entsprechenden Betreiber. Diese Einschätzung schließt aber nicht aus, dass auch vor Ort kleinere P-Recyclinganlagen, wie z.B. von den Stadtwerken Schlitz oder im Odenwald (upho) geplant, betrieben werden können. Von den Stadtwerken Schlitz und upho wird eine Drehrohrtechnik für das P-Recycling aus Klärschlämmen implementiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch die thermo-chemisch hergestellten P-Rezyklate, wie auch in diesem Projekt gezeigt wurde, eine gute Pflanzenverfügbarkeit aufweisen.

Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit: Die Methode der Monte Carlo-Simulation lässt sich im Prinzip auf beliebige (umwelt)technische Prozesse, deren Output einer aus Prozess-Unsicherheiten und/oder Input-Variabilitäten nicht genau vorhersagbar ist. Beispielhaft ist hier die aktuelle verfolgte Integration der Monte Carlo Simulation in die Ökobilanzierung eines zahnmedizinischen Prozesses zu nennen. Im Kontext dieses Projekts dient die Monte Carlo Simulation v.a. zur Ermittlung sensitiver Einflussgrößen, also solcher Parameter, deren Variabilität die Unsicherheit der ökobilanziellen Bewertung besonders stark prägen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die im Projekt zur Verfügung stehenden P-Rezyklate eine deutliche Ertragswirksamkeit im Container- und auch in den Feldversuchen zeigten. Problematisch ist die für die mittelhessische Region spezifische hohe Nickelkonzentration in den Klärschlämmen und demzufolge in den daraus hergestellten Ascheprodukten. Ziel von nachfolgenden Projekten dürfte die Reduzierung von Nickel in dem Klärschlamm Pfad oder aber die Dekontamination von Nickel und auch anderen Schwermetallen während der P-Rückgewinnung zu etablieren bzw. weiter zu entwickeln, um P-Rezyklate zu gewinnen, die deutlich unter den Schwermetall-Grenzwerten der Düngemittelverordnung liegen.

5 Zusammenarbeit in der Operationellen Gruppe (OG)

5.1 Gestaltung der Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit in der OG gestaltete sich unter den verschiedenen Partnern produktiv und unkompliziert. Durch die klare Abgrenzung der Arbeitspakete im Aktionsplan waren die Zuständigkeiten innerhalb des Projektes klar verteilt. Da diese Arbeitspakete nur wenig innerhalb der Partner verbunden waren, war der direkte Austausch zwischen den Partnern während der Arbeitsphasen eher sporadisch. Somit agierten die verschiedenen Partner (JLU+Landwirte, THM und Infraserv) innerhalb ihrer Arbeitspakete weitgehend selbstständig. Durch die regelmäßigen OG-Treffen konnte dennoch ein gewisser Austausch zwischen den Arbeitsgruppen stattfinden.

5.2 Mehrwert des Formats einer OG

Durch die klare Abgrenzung der Aufgabengebiete der verschiedenen Projektpartner und die nur bedingte direkte Zusammenarbeit der Partner war kein direkter Mehrwert durch die Formierung einer OG gegenüber der gewohnten Kooperation in Forschungsprojekten zu verzeichnen. Dennoch bildeten die Treffen eine Möglichkeit, um sich auszutauschen und gemeinsam anregende Diskussionen zu führen.

5.3 Weitere Zusammenarbeit

In unseren Untersuchungen fiel immer wieder eine recht hohe Nickel-Konzentration in den Klärschlämmen aus Mittelhessen auf. Diese Beobachtung deckt sich mit bereits zuvor gemachten Untersuchungen. Die recht hohe Nickel-Konzentration ist geogenen Ursprungs, da der Vogelsberg und die Rhön aus basaltischem Gestein entstanden sind und somit eine geogene hohe Nickelkonzentration aufweisen. Demzufolge weisen dann auch die in diesen Regionen wachsenden Pflanzen sowie die Vorfluter hohe Nickel-Konzentrationen. Letztendlich kommt es zu einer Akkumulation von Nickel in den Klärschlämmen in Mittelhessen, die, wenn keine geeigneten Dekontaminationsmethoden implementiert werden, ein P-Recycling aus Klärschlamm erschweren, da die Endprodukte möglicherweise nicht den Vorgaben der Düngemittelverordnung entsprechen werden. Diese Thematik könnte in einem weiteren Projekt bearbeitet werden bzw. fließt in die Beratungen zur Implementierung der P-Recyclinganlagen der Stadtwerke Schlitz und im Odenwaldkreis (upho) ein.

6 Verwendung der Zuwendung

Tabelle 74: Übersicht der Verwendungen der Zuwendungen

	AP 1	AP 2	AP 3	AP 4	AP 5	AP 6
Personalkosten	32.128,50 €	25.418,46 €			188.762,30 €	127.249,75 €
allgemeine Geschäftsausgaben	4.535,12 €					
Analysen/Laborbedarf			1.212,59 €		13.708,70 €	
Erstattung Landwirte					10.000,00 €	
Reisekosten					626,85 €	
				Gesamtausgaben		403.642,27 €

Die Gesamtzuwendung im Projekt betrug 400.000 €, die genaue Aufteilung der Verwendung der Mittel in den Arbeitspaketen ist der Finanzierungsplanung zu entnehmen (Tabelle 35).

Arbeitspaket 1 beinhaltet die Personalkosten von Frau Nimführ (32.128,50 €), sowie die allgemeinen Geschäftsausgaben in Höhe von 4.535,12 € (15 % Pauschale). Die Personalkosten von Herrn Adami verteilen sich auf die Arbeitspakete 2 und 5. Die Personalkosten des OG-Mitglieds THM wurden in Arbeitspaket 6 geltend gemacht (127.249,75 €).

Die Kosten für Analysen, sowie allgemeinen Laborbedarf teilen sich auf die AP's 3 und 5 auf; wobei die Gesamtausgaben 14.921,29 € betragen. Außerdem erfolgte die Erstattung der Landwirte für die Bereitstellung der Versuchsflächen über AP 5 (10.000 €). Die Reisekosten im Projekt wurden in AP 5 verwendet, um zu die Feldversuche betreuen zu können.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine wesentliche Schlussfolgerung des Projektes ist es, dass ein Phosphor-Recycling aus Klärschlämmen in der Untersuchungsregion möglich ist, in dem über den Pfad der Klärschlammmonoverbrennung und anschließender Aschebehandlung ein schadstoffarmer und pflanzenverfügbare Phosphordünger produziert wird. Das aus den Klärschlämmen zurückgewonnene Phosphat ist gemäß der vorliegenden Phosphorströme in der Modelregion einsetzbar, da das in diesem Projekt geprüfte P-Rezyklat (Recphos, 38% P_2O_5) in den Container- und Feldversuchen die gleiche Ertragswirksamkeit wie das Tripelsuperphosphat aufwies.

Andere Verfahren des P-Recyclings aus Klärschlämmen sind ebenfalls denkbar, wobei aber eine hohe Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor und eine geringe Schwermetall-Kontamination in den entsprechenden Rezyklaten gegeben sein muss, wobei dem Element Nickel in der Region Mittelhessen eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte.

8 Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis :

- AgrarSER (2017): Statistische Berichte. Agrarstrukturerhebung 2015 im Mai 2016. Hessisches Statistisches Landesamt (Hrsg.), Wiesbaden:
https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/CIV9_4j16_1b.pdf.
- Baumgärtel, G. (2004): Entwicklung von Phosphat- und Kalibilanzen in Ackerbaubetrieben und Konsequenzen für die Düngung. Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e.V. (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD) am 27. und 28. April 2004 in Würzburg.
- BMEL (2019): "Stallhaltung, Weidehaltung 2020"; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) Statistisches Bundesamt, Veröffentlichung (723).
- DeStatis (2022): Was wächst auf Deutschlands Feldern? Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. Quelle: Statistisches Bundesamt. Link: <https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/wie-arbeiten-foerster-und-pflanzenbauer/was-waechst-auf-deutschlands-feldern>.
- DLG (2017): DLG-Merkblatt 397 – Gärreste im Ackerbau effizient nutzen. DLG e.V. Fachzentrum für Landwirtschaft (Hrsg.):
https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_397.pdf. Abgerufen am 10.05.2022
- Finck, A. (1979) Dünger und Düngung, Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen. 2., neubearbeitete Aufl.; VCH, Weinheim
- HGS (2021): Hessische Gemeindestatistik. Ausgewählte Strukturdaten aus Bevölkerung und Wirtschaft 2020. Hessisches Statistisches Landesamt, Wiesbaden
 Link: <https://statistik.hessen.de/zahlen-fakten/bevoelkerung-gebiet-haushalte-familien/bevoelkerung/tabellen>
- HGS (2016): Hessische Gemeindestatistik. Ausgewählte Strukturdaten aus Bevölkerung und Wirtschaft 2015. Hessisches Statistisches Landesamt, Wiesbaden Link:
https://statistik.hessen.de/sites/statistik.hessen.de/files/HGSt_j16.pdf
- HSL (2021): Klärschlammverbleib der öffentlichen Abwasserentsorgung in Hessen 2009 bis 2020. Hessisches Statistisches Landesamt, Wiesbaden.
- IGZ (2017): Nährstoffgehalte und N-Mineralisierung organischer Düngemittel. Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e.V. Großbeeren (Hrsg.):
https://www.igzev.de/publikationen/IGZ_Organische_Duenger_Naehrstoffgehalte_N-Mineralisierung.pdf. Abgerufen am 03.05.2022
- Kang H. (2013): The prevention and handling of the missing data. Korean journal of anesthesiology 64: 402–406. doi:10.4097/kjae.2013.64.5.402.
- KTBL (2019): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 15. Auflage. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) Darmstadt (Hrsg.):
https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Allgemeines/Download/MiniFZ-Landwirtschaft.pdf. Abgerufen am 19.07.2019
- LfL Bayern (2021): Basisdaten Düngung und Nährstoffflüsse. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/basisdaten22_tabelle_5a_20211210.pdf. Abgerufen am 03.05.2022

- LTZ Außenstelle Rheinstetten-Forchheim (2021): Stammdatensammlung: Düngung BW. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), Außenstelle Rheinstetten-Forchheim (Hrsg.): https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Arbeitsfelder/Pflanzenbau/Düngung/Stammdaten/Stammdatensammlung_DuengungBW.pdf/. Abgerufen am 03.05.2022
- LWK Niedersachsen (2021): Nährstoffgehalte in organischen Wirtschaftsdüngern und mineralischen Düngemitteln. Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Hrsg.): https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/32460_Nährstoffgehalte_in_organischen_Wirtschaftsdüngern_und_mineralischen_Düngemitteln/. Abgerufen am 03.05.2022
- LWK Nordrhein-Westfalen (2014): Mittlere Nährstoffgehalte organischer Dünger. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/naehrstoffgehalte-organischer-duenger.pdf/>. Abgerufen am 03.05.2022
- LLH (2021): Nährstoffgehalte organischer Dünger. Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (Hrsg.): <https://llh.hessen.de/pflanze/boden-und-duengung/wirtschaftsduenger/naehrstoffgehalte-organischer-duenger/>. Abgerufen am 03.05.2022
- LLH (2022): Link: <https://llh.hessen.de/unternehmen/technik-energie-und-bauen/verfahrenstechnik-und-energie/fluessige-wirtschaftsduenger-ausbringungstechniken-kosten-und-wirtschaftlichkeit/>
- LfL Thüringen (2012): Inhaltsstoffe von Biogassubstraten und Gärresten (Datenblätter). Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00026324/Fbwx31012.pdf/. Abgerufen am 10.05.2022
- LfL Bayern (2012): Biogasgärreste – Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (Hrsg.): https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/leitfaden_2012-03_biogasforum.pdf/. Abgerufen am 10.05.2022
- LTZ Außenstelle Rheinstetten-Forchheim (2007): Gärreste aus Biogasanlagen – Nähr- und Schadstoffe, Einsatzmöglichkeiten im Ackerbau. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), Außenstelle Rheinstetten-Forchheim (Hrsg.): https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/site/pbs-bw-mlr/get/documents_E1041687374/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Arbeitsfelder/Pflanzenbau/Düngung/Versuche%20und%20Empfehlungen/GärresteAusBiogasanlagen_DL/Gärreste%20aus%20Biogasanlagen%20-%20Nähr-%20und%20Schadstoffe%20-%20Einsatzmöglichkeiten%20im%20Ackerbau.pdf/. Abgerufen am 10.05.2022
- Lütke-Entrup, N. und Schäfer, B. C. (2011): Lehrbuch des Pflanzenbaus. Band 2: Kulturpflanzen. Dritte Auflage. AgroConcept Verlag Bonn.
- Mahn D. (2018) Zustand und Entwicklung von hessischen Grünlandlebensräumen – ein Überblick. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie – Jahresbericht 2018.
- Möller, K., Schulz, R. und Müller, T. (2009): Mit Gärresten richtig Düngen – Aktuelle Informationen für Berater. Universität Hohenheim, Institut für Pflanzenernährung (Hrsg.): https://www.plantnutrition.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/plantnutrition/Duengung_mit_Bodenchemie/Leitfaden-Berater09092009.pdf/. Abgerufen am 10.05.2022
- Paulsen, H. M., Kratz, S. und Schnug, E. (2011): Nährstoffgehalte ökologischer Wirtschaftsdünger. In: Leithold, G., Becker, K., Brock, C., Fischinger, S., Spiegel, A.-K., Spory, K., Wilbois, K.-P. und Williges, U. (Hrsg.) (2011): Es geht ums Ganze: Forschen im Dialog von Wissenschaft und Praxis. Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Justus-Liebig-Universität Gießen, 15.-18. März 2011

Pecoroni, D. und Friedrich K. (2013): Phosphat- und Phosphorgehalte in hessischen Oberböden – Grundlage zur Abschätzung des P-Austrags durch Bodenerosion. Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der DBG, Kommission VI. 7.-12. September, Rostock.

RegioStat (2022): Trockenmasse des direkt entsorgten Klärschlammes - Jahressumme - regionale Tiefe: Kreise und kreisfreie Städte. Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Deutschland.

Scheffer, Fritz; Schachtschabel, Paul; Blume, Hans-Peter; Kandeler, Ellen; Stahr, Karl (2018): Lehrbuch der Bodenkunde. 17. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

StatBer (2022) Landwirtschaftlich genutzte Fläche mit Viehhaltung und Haltungsplätze 2021. Statistische Berichte Kennziffer: CI11-j/21. Hessisches Statistisches Landesamt, Wiesbaden.

Verordnung (EU) (2023): /915 der Kommission vom 25. April 2023 über Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006.