

Abschlussbericht zum Vorhaben

**Systemlösung zur umweltgerechten und bedarfsoptimierten
P-Düngung auf dem Ackerland**

TAB-12472/05.17

Gefördert durch die Thüringer Aufbaubank nach der Förderrichtlinie „Förderung der Zusammenarbeit in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft in Thüringen“ (LFE).

Verfasser des Berichtes
JenaBios GmbH

M. Sc. L. Sattler
M. Sc. Mireen Müller
Dr. rer. nat. M. Funke
Dr. agr. Th. Werner

U.A.S. GmbH

M. Sc. F. Reinsch
Dipl. Ing. agr. Britt Pagels
Dr. rer. nat. habil. J. Perner

Agrarprodukte Ranis-Ludwigshof e.G.
Amberg & Rothe Agrarhof
Agrar GmbH Töttelstedt
Agrar GmbH Ziegelheim

Dipl. Ing. agr. Ch. Peissker
Ing. (FH) Agrochem. u. Pflanzensch. J. Hofmeyer
Ing. (FH) Agrochem. u. Pflanzensch. B. Bärenklau
Landwirtsch.-Meister C. Sieler

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Abbildungsverzeichnis.....	2
Tabellenverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis.....	5
1 Einleitung	7
2 Vorgehensweise – Material und Methoden.....	11
2.1 Gesamtkonzept	11
2.2 Flächenauswahl	12
2.3 Bodenprobenprobenahme.....	12
2.4 Ableitung der Probenahmeflächen in der „Intelligenten Rasterung“ der Versuchsflächen.....	13
2.5 Untersuchungswesen	14
2.6 Kalkulationsgrundlage für P-Düngungsempfehlungen und teilflächenbezogene P-Applikation	16
2.7 Großparzellenversuche - On-Farm-Research.....	17
3 Ergebnisse	25
3.1 Bodenprobenraster.....	25
3.2 Bodenuntersuchungsergebnisse	32
3.2.1 CAL-P und P-Freisetzungsrate	32
3.2.2 P-Speicherkapazität und P-Sättigungsgrad.....	44
3.2.3 Sequenzierung des schwer löslichen Phosphors in die anorganische und organische Fraktion	45
3.2.4 Gesamt-Phosphor im Boden.....	47
3.3 Vorschlag für die Methodenwahl in Ergänzung der CAL-P-Untersuchung	48
3.4 Auswirkung der Untersuchungsergebnisse auf die Kalkulation von Düngungsempfehlungen und den resultierenden P-Aufwand	49
3.5 Ergebnisse der On-Farm-Versuche	52
4 Fazit.....	64
4.1 Probenahme-Raster	64
4.2 Untersuchungswesen	64
4.3 On-Farm-Experimente.....	65
4.4 Auswirkung der Untersuchungsergebnisse auf die Kalkulation von Düngungsempfehlungen und den resultierenden P-Aufwand	66
5 Verwertung der Ergebnisse der Projektarbeit	67
5.1 JenaBios GmbH	67
5.2 U.A.S. GmbH.....	67
5.3 EHW – Service GmbH.....	68
5.4 Landwirtschaftsbetriebe.....	68
6 Literatur.....	69
Anhang.....	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flussdiagramm zur Methodik der „Intelligenten Rasterung“	14
Abbildung 2: On-Farm-Research-Versuchsanlage vom Standort Ranis (Feldstück 116110, Wurzelhügel).....	19
Abbildung 3: OFR-Versuchsanlage vom Standort Töttelstädt (Feldstück 50, Salzkrippen).	19
Abbildung 4: OFR-Versuchsanlage vom Standort Ziegelheim (Feldstück 8210, Schwaben).....	20
Abbildung 5: OFR-Versuchsanlage vom Standort Alperstedt (Feldstück 228-01).....	20
Abbildung 6: Schematische Darstellung für die Beerntung der Transekte mit Parzellen-Mäh-drescher.....	22
Abbildung 7: Gehalte an CAL-P (mg P/100 g lufttrockener Boden) und korrespondierende P-Freisetzungsraten ($\mu\text{g P/kg Boden}\cdot\text{min}$) - alle verfügbaren Wertepaare CAL-P und P-Freisetzungsraten) sowie Veränderung der Einstufung in die Gehaltsklassen infolge der Neubewertung des CAL-P mit Hilfe der P-Freisetzungsraten.....	32
Abbildung 8: CAL-P und P-Gesamtgehalte geordnet nach geologischer Herkunft der Böden.....	34
Abbildung 9: CAL-P und P-Freisetzungsraten geordnet nach geologischer Herkunft der Böden.....	35
Abbildung 10: Einstufung der Bodenproben nach CAL-P und Neubewertung nach CAL-P+P-Freisetzungsraten.....	41
Abbildung 11: P-Sättigungsgrad und P-Speicherkapazität geordnet nach geologischer Herkunft des Bodens.....	45
Abbildung 12: P-Gesamt-Gehalte gegliedert nach geologischer Herkunft der Böden.....	47
Abbildung 13: Relative Kornerträge über alle Druschfrüchte und Versuchsjahre.....	54
Abbildung 14: Kornerträge der in 2020 mit Praxismähdrescher geernteten OFR-Anlage am Standort Ranis-Ludwigshof, Wintergerste.....	55
Abbildung 15: Kornerträge der in 2020 mit Praxismähdrescher geernteten OFR-Anlage am Standort Töttelstädt, Winterweizen.....	56
Abbildung 16: Kornerträge der in 2020 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Ranis-Ludwigshof, Wintergerste.....	57
Abbildung 17: Kornerträge der in 2020 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Ranis-Ludwigshof, Winterweizen.....	58
Abbildung 18: Kornerträge der in 2021 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Ranis-Ludwigshof, Winterraps.....	59
Abbildung 19: Kornerträge der in 2021 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Töttelstädt, Wintertriticale.....	60
Abbildung 20: Kornerträge der in 2020 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Ziegelheim, Winterraps.....	61
Abbildung 21: Kornerträge der in 2021 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Ziegelheim, Winterdurum.....	62
Abbildung 22: Kornerträge der in 2020 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Alperstedt, Winterdurum.....	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Variantenplan der OFR-Versuche	18
Tabelle 2: Übersicht zu den erfassten Erträgen durch den Praxisbetrieb sowie den aus NDVI-Werten über Regressionsanalysen abgeleiteten Erträgen	21
Tabelle 3: Übersicht zu den Ergebnissen der Regressionsanalysen.....	23
Tabelle 4: Übereinstimmungsgrad (% Flächenanteil) in der Bewertung der Bodenuntersuchungsergebnisse nach Gehaltsklassen zwischen 1-ha-Raster und 3-ha-Raster – Bodenuntersuchung in beiden Probenahme-Rastern nur nach CAL-P.....	26
Tabelle 5: Übereinstimmungsgrad (% Flächenanteil) in der Bewertung der Bodenuntersuchungsergebnisse nach Gehaltsklassen: Vergleich 3-ha-Raster mit 1-ha-Raster – Bodenuntersuchung in beiden Probenahme-Rastern nach CAL-P plus P-Freisetzungsrate	27
Tabelle 6: Übereinstimmungsgrad (% Flächenanteil) in der Bewertung der Bodenuntersuchungsergebnisse nach Gehaltsklassen zwischen 1-ha-Raster und IR – Bodenuntersuchung in beiden Probenahme-Rastern nur nach CAL-P	29
Tabelle 7: Übereinstimmungsgrad (% Flächenanteil) in der Bewertung der Bodenuntersuchungsergebnisse nach Gehaltsklassen: Vergleich IR mit 1 ha-Raster – Bodenuntersuchung in beiden Probenahme-Rastern nach CAL-P plus P-Freisetzungsrate	30
Tabelle 8: Mittlere CAL-P-Gehalte der untersuchten Feldstücke in Abhängigkeit von der Häufigkeit der in der Vergangenheit verwerteten organischen Düngung	33
Tabelle 9: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrate für die untersuchten Löss-Standorte	36
Tabelle 10: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrate für die untersuchten Muschelkalk- und Zechstein-Standorte	37
Tabelle 11: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrate für die untersuchten quartären Kiese	37
Tabelle 12: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrate für die untersuchten Schiefer-Verwitterungsstandorte.....	38
Tabelle 13: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrate für die untersuchten Buntsandstein-Verwitterungsstandorte.....	38
Tabelle 14: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrate für die untersuchten Keuper-Verwitterungsstandorte	39
Tabelle 15: Mittlere CAL-P-Gehalte und P-Freisetzungsraten der Probenahme im 1 ha-Raster gegliedert nach Landwirtschaftsbetrieben	42
Tabelle 16: Mittlere P-Freisetzungsraten der Probenahme im 1-ha-Raster in Abhängigkeit von der Frequenz der organischen Düngung gegliedert nach Landwirtschaftsbetrieben	42

Tabelle 17: Veränderung der Bewertung des CAL-P durch Einbeziehung der P-Freisetzungsrates (Ergebnisse der Probenahme im 1-ha-Raster)	43
Tabelle 18: Mittlere Gehalte an schwer löslichem anorganischen und organischen Phosphor gegliedert nach geologischer Herkunft der Böden	46
Tabelle 19: Anteil der Summe des schwer löslichen anorganischen und organischen Phosphors am Gesamt-Phosphor gegliedert nach geologischer Herkunft der Böden	46
Tabelle 20: Veränderung der durchschnittlichen P-Düngungsempfehlung je Schlag auf Grundlage der Probenahme im 1-ha-Raster infolge der Modifizierung der P-Gehaltsklasse des CAL-P durch Nutzung der P-Freisetzungsrates	49
Tabelle 21: Veränderung der durchschnittlichen P-Düngungsempfehlung je Schlag auf Grundlage der Probenahme im „Intelligenten Raster“ infolge der Modifizierung der P-Gehaltsklasse des CAL-P durch Nutzung der P-Freisetzungsrates	51
Tabelle 22: Vergleich der Trends in den kalkulierten P-Bedarfsermittlungen durch Modifizierung des CAL mit der PF – Vergleich von Schlägen, die für 1-ha-Raster und „Intelligentes Raster“ (IR) auswertbar sind	52
Tabelle 23: Zusammenfassung der Relativerträge in 2020 und 2021 an den vier OFR-Standorten	53

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
Al	Aluminium
BeSyD	Bilanzierungs- und Empfehlungssystem Düngung
BWZ	Bodenwertzahl
Ca	Calcium
CaCl ₂	Calciumchlorid
CAL	Calciumacetatlösung
DG	Düngung
DGM	Digitales Geländemodell
DL	Doppellactat
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
dt	Dezitonne
Fe	Eisen
GIS	Geoinformationssystem
GK	Gehaltsklasse
GPS	Global Positioning System (satellitengestütztes Navigationssystem)
GZ	Gehaltszahl
ha	Hektar
HPO ₄ ²⁻	Hydrogenphosphat
H ₂ PO ₄ ⁻	Dihydrogenphosphat
IR	Intelligente Rasterung
LWB	Landwirtschaftsbetrieb
Mn	Mangan
N	Stickstoff
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NH ₄ F	Ammoniumfluorid
OFR	On-Farm-Research
Org	Organisch
P	Phosphor
PF	P-Freisetzungsrate
PG	Prüfglied
PO ₄ ³⁻	Ortho-Phosphat
Rel.	relativ
RGB	Rot, Grün, Blau
TSP	Triple-Superphosphat
UBA	Umweltbundesamt
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
WDu	Winterdurum

WG	Wintergerste
WRa	Winterraps
WTr	Wintertriticale
WW	Winterweizen

1 Einleitung

Die weltweiten Vorräte an Rohphosphaten, die für die Herstellung mineralischer Phosphor-Düngemittel genutzt werden können, sind begrenzt. Die „strategische Reichweite“ der bekannten Rohphosphat-Vorkommen ist wahrscheinlich nicht größer als 130 Jahre (RÖMER, 2011, 2016; JASINSKI, 2017). Ein sparsamer und an den Bedarf der Kulturpflanzen bestmöglich angepasster Einsatz P-haltiger Dünger ist aus der Sicht der Endlichkeit der Rohstoff-Vorräte ebenso geboten, wie das Recyceln von Phosphor aus Abfällen/Abprodukten (ADAM, 2008; KRATZ und SCHNUG, 2009, STEINGROBE, 2015; RÖMER, 2019; SCHLEGEL et al., 2019) bzw. eine direkte Rückführung von „verbrauchtem“ Phosphor in den Phosphor-Kreislauf der Landwirtschaft, z.B. mit Fleischmehlen, aber auch mit Bioabfall- und Grünschnitt-Komposten (ANONYM, 2014; RÖMER, 2014).

Ein sehr aktueller und brisanter Grund, Phosphat-haltige Dünger so effizient wie irgend möglich einzusetzen, liegt in der seit dem letzten Quartal des Jahres 2021 inflationären Preisentwicklung von Mineraldüngern, die weiter anhält. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Berichtes lag der Phosphor-Preis im Standard-Düngemittel Triple-Superphosphat (TSP) bei 4,00 €/kg P.

Außerdem ist Phosphor umweltrelevanter Nährstoff. Der Bodenabtrag vom Ackerland durch Wassererosion gilt als wichtigster Eintragspfad von Phosphat in die Oberflächengewässer und führt dort gemeinsam mit Stickstoff zur Eutrophierung. Im Zeitraum 2012 bis 2018 wurden in Deutschland je Jahr 22.000 t P in die Gewässer eingetragen (UBA, 2022a). Dabei spielen flächenhafte („diffuse“) Einträge aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche eine herausragende Rolle. Der Landwirtschaft werden mindestens 50% des P-Eintrages in die Oberflächengewässer zugeschrieben. Die Orientierungswerte für Gesamtphosphat im Zusammenhang mit dem Erreichen eines „guten chemischen Zustands“ der Gewässer wurden 2015 in Deutschland an nur 40% der Messstellen eingehalten (UBA; 2022b). Auch dies gebietet, die Phosphor-Zufuhr zum Ackerland fachgerecht zu begrenzen, wobei der Nährstoff nicht zum ertrags- und qualitätslimitierenden Faktor werden darf.

Ungeachtet der Phosphor-Befruchtung der Oberflächen-Gewässer durch Wassererosion auf dem Ackerland weisen konzentriert auf Ostdeutschland erhebliche Anteile der Ackerfläche entsprechend der Untersuchungsergebnisse mit Standard-Methoden (CAL-Extraktion, DL-Extraktion) eine unzureichende Ausstattung mit pflanzenverfügbarem Phosphor auf. Allein in Thüringen rangieren 13% des Ackerlands im Bereich der sehr niedrigen P-Versorgung (Gehaltsklasse A) und weitere 25% im Bereich der niedrigen Versorgung (Gehaltsklasse B; ZORN et al., 2015). Die abnehmende Tendenz der P-Bodengehalte auf dem Acker- und Grünland dauert an. Werden die aktuellen Vorschläge des VDLUFA zur Neujustierung der P-Gehaltsklassen zugrunde gelegt (VDLUFA, 2017), verbleibt trotzdem ein erheblicher Anteil an P-Mangelflächen. Dies betrifft im Besonderen die Flächen mit einem sehr niedrigen P-Versorgungsstatus.

Eine wesentliche Schwierigkeit in der Düngepraxis besteht in dem Phänomen, dass der positive Zusammenhang zwischen P-Versorgung/-zufuhr und Ertragswirkung sehr viel lockerer ist als für Stickstoff. Während bei sehr geringem P-Versorgungszustand des Bodens (Gehaltsklasse A) mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Ertragszuwachs durch eine fachgerechte P-Düngung realisiert werden kann, sind Ertragswirksamkeit und Wirtschaftlichkeit einer P-Zufuhr bei niedriger P-Bodenversorgung (Gehaltsklasse B) häufig bereits unsicher. Teilweise führen P-Aushagerungen durch gezielt unterlassene P-Düngung erst nach vielen Jahren,

u.U. nach Jahrzehnten, zu Ertragsdepressionen, obwohl das Aushagern anhand der Bodenuntersuchungsergebnisse (CAL-P, DL-P) klar dokumentiert werden kann (HOLSTEN et al., 2016). Hierfür existieren zwei wesentliche Ursachen:

1. Die Methoden der Bodenuntersuchung beschreiben nur näherungsweise, welcher Teil des im Boden vorhandenen Phosphors tatsächlich von der Pflanze genutzt werden kann.

Dabei spielt eine entscheidende Rolle, dass im Boden unterschiedliche P-Fraktionen vorliegen, von denen nur der geringste Teil sehr leicht („unmittelbar“) pflanzenverfügbar ist. Die Fraktionen existieren jedoch nicht starr, sondern stehen in einem Fließgleichgewicht im Austausch untereinander. Dabei findet ein „Fließen“ in beide Richtungen, d.h. sowohl in Richtung „Pflanzenverfügbarkeit“ als auch hin zur „Immobilisierung“ statt (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL, 2017).

Im Mittel sind nur 0,5 – 1,0 kg P/ha im Boden gelöstes Ortho-Phosphat (PO_4^{3-}) und damit sehr leicht pflanzenverfügbar. Etwa 200-500 kg P/ha liegen in labiler gebundener Form vor. Außerdem sind 1500-3000 kg P/ha fest gebunden und nur sehr langsam löslich. Je nach Gehalt an organischer Substanz sind 25% bis 65% des gesamten P-Vorrates von Böden organisch gebunden (DLG, 2008).

Bewirtschaftung (Anbau, Bodenbearbeitung, mineralische und organische Düngung) und Witterung (Bodenfeuchte, Bodenluftgehalt, Temperatur) beeinflussen das Fließgleichgewicht. Sie fördern oder hemmen aber auch in Lösungsprozesse involvierte Mikroorganismen.

2. Es gibt zwischen den verschiedenen Kulturpflanzen-Arten (auch zwischen den Sorten einer Art) Unterschiede im Anspruch an die P-Versorgung, wie auch an das Vermögen, z.B. über Wurzelausscheidungen aktiv auf das P-Lösungsverhalten im Boden Einfluss zu nehmen (SCHUBERT, 2019).

Als Kulturpflanzen mit einem hohen Anspruch an die P-Versorgung gelten beispielsweise Silo- und Körnermais, Zuckerrüben, Kartoffeln und Sommergerste, während sich Winterweizen, Winterroggen und Winterraps gegenüber niedrigem P-Angebot „elastisch“ verhalten, d.h. die Ertragsbildung wird nur wenig beeinträchtigt.

Die beschriebenen Problemkreise implizieren, dass Ansätze für eine Optimierung der P-Versorgung landwirtschaftlicher Kulturen und / oder zur Minderung des P-Austragsrisikos aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche komplex angelegt sein müssen. Sie sollten die Anforderungen der Pflanzenernährung und Umweltaspekte gleichermaßen berücksichtigen.

Ziel des Kooperationsvorhabens

Das Ziel des Kooperationsvorhabens besteht unter Annahme des Schlusssatzes der Einleitung darin, ein Gesamtsystem zu entwickeln, in der landwirtschaftlichen Praxis zu erproben und großflächig einzuführen, dass:

- die teilflächenspezifische P-Düngung dahingehend optimiert, über den Bedarf der Kultur hinaus gehende nicht bedarfsgerechte - überhöhte - P-Düngungsmaßnahmen auszuschließen und andererseits P-Mangelflächen sicher zu erkennen. Hierfür sollen über die Standard-Bodenuntersuchung hinaus zusätzliche Bodenuntersuchungsmethoden selektiert, etabliert und eingeführt werden,

- die teilflächenbezogene Erosionsgefährdung und damit das Risiko zur P-Verfrachtung in Richtung Gewässer beim Ausweisen von Probenahmeflächen sowie beim Festsetzen der zu düngenden P-Mengen berücksichtigt,
- im Bedarfsfall für den Einzelschlag Maßnahmen des Erosionsschutzes vorschlägt und
- in teilflächenspezifischen P-Düngungsempfehlungen / praktischer teilflächenspezifischer P-Düngung resultiert, in dem Pflanzenernährung und Anforderungen des Gewässerschutzes in gleicher Weise und angemessen berücksichtigt werden.

Die teilnehmenden Landwirtschaftsbetriebe wollen auf diesem Weg nicht nur den Kenntnisstand zum umweltrelevanten Nährstoff Phosphor vertiefen, sondern auch gezielt dokumentieren, dass für den Berufsstand der Gewässerschutz und die Einführung von Verfahren und Techniken, die eine umweltgerechte und nachhaltige Landbewirtschaftung bewirken, zu den strategischen Betriebszielen zählt.

Das Projekt soll:

- eine Erweiterung der Wissensbasis im ländlichen Raum – konkret im Ackerbau – bewirken und
- der Weiterentwicklung einer standortangepassten und integrierten Landbewirtschaftung im Bereich der Düngung dienen.

Operationelle Gruppen

Das Projekt ist ein Kooperationsvorhaben zwischen praktizierender Landwirtschaft (vier Landwirtschaftsbetriebe), Umwelt- und produktionstechnischer Beratung mit Analytiklabor (JenaBios GmbH), Versuchsansteller und GIS-Spezialist (U.A.S. Umwelt- und Agrarstudien GmbH) und einem Dienstleister im Bereich der Bodenprobenahme in der praktischen Landwirtschaft (EHW – Service GmbH, Geschäftsstelle Frienstedt).

Zu den operationellen Gruppen gehören:

JenaBios GmbH
 Löbstedter Straße 80, 07749 Jena
 (Projekt-Koordinator)
www.jenabios.de

U.A.S. Umwelt- und Agrarstudien GmbH
 Ilmstraße 6, 07743 Jena
www.uas-jena.de

EHW – Service GmbH
 Dietendorfer Straße 23, 99092 Frienstedt
www.maschinenring.de

Agrarprodukte Ludwigshof e.G.
 Ludwigshof 14, 07389 Ranis
www.agrarprodukte-ludwigshof.de

Agrar GmbH Ziegelheim
August Bebel Straße 1c, 04618 Ziegelheim
www.ag-z.de

Agrar GmbH Töttelstädt
Erfurter Tor 3
99100 Erfurt OT Töttelstädt
www.agro-toettelstaedt.de

Amberg & Rothe Agrarhof GmbH u. Co KG
Großrudstedter Straße 2
99195 Alperstedt

2 Vorgehensweise – Material und Methoden

2.1 Gesamtkonzept

Die Projektarbeit fokussierte auf die Erweiterung des Wissensstandes zu zwei für die praktizierende Landwirtschaft essenziellen Fragen:

1. Ertragssicherung durch optimierte P-Düngung bezüglich P-Aufwand und räumlicher (teilflächenbezogener) P-Verteilung.
2. Nachhaltigkeit im betrieblichen Phosphor-Management mit dem Ziel der Reduzierung der Phosphor-Austragsgefährdung in Richtung Oberflächengewässer.

Im Verlauf der Projektarbeit wurde ein Gesamtkonzept mit folgenden Inhalten abgearbeitet:

- Algorithmus zum Einrichten von Probenahmeflächen in Abhängigkeit von ertragsbezogenen und für die Wassererosion (P-Austrag aus der Fläche) relevanten Parametern
- Erstellung einer standardisierten Vorgehensweise für eine „Intelligente Rasterung“ der Feldschläge in Probenahmeflächen zur Entnahme der Bodenproben für die P-Analytik.
- Daraus abgeleitete Vorgehensweise bei der Bodenprobenahme für Untersuchungen des pflanzenverfügbaren Phosphors
- Konkreter Nachweis der Verbesserung der Aussagekraft der Bodenuntersuchung nach „intelligenter“ Probenahme im Vergleich zur Einrichtung von starren Probenahme-Rastern
- Selektion und Einarbeitung von Zusatzmethoden der P-Bodenuntersuchung in Ergänzung zur allgemein in Thüringen gebräuchlichen Ermittlung des pflanzenverfügbaren P-Gehaltes mit der CAL-Methode
- Untersuchung einer möglichst hohen Probenzahl auf CAL-P sowie mit den Zusatzmethoden und Interpretation der erhaltenen Ergebnisse
- Erstellung eines Methodenbaumes, der für die Auswahl der Zusatzmethoden zum CAL-P in Abhängigkeit von der Bodengeologie, ggf. auch unter Zuhilfenahme anderer Boden-Parameter, Anwendung finden kann
- Erstellung eines Algorithmus zur routinemäßigen Erstellung adaptierter teilflächenspezifischer Düngungsempfehlungen
- Nachweis der P-Düngewirkung in On-Farm-Versuchen nach einer teilflächenspezifischen P-Düngung auf der Grundlage der Ergebnisse einer Bodenprobenahme nach „Intelligenter Rasterung“ („IR“) und unter Zuhilfenahme der Bodenuntersuchungsergebnisse mit ausgewählten Zusatzmethoden

Dazu wurden nachstehende Arbeitsinhalte umgesetzt.

2.2 Flächenauswahl

Die vier in das Projekt integrierten Landwirtschaftsbetriebe waren so ausgewählt, dass die in den Betriebsterritorien vorkommenden Böden (geologische Herkünfte) einen wesentlichen Teil der in Thüringen vorkommenden Böden repräsentieren. Es waren dies:

- Wenig degradierte Löss-Böden der Thüringer Ackerebene und deren Randlagen
- Degradierete Löss des Ostthüringer Lössgebietes
- Leichte und mittlere Buntsandsteinböden Ostthüringens
- Muschelkalk-Verwitterung in den Randlagen der Thüringer Ackerebene
- Keuper-Verwitterungsböden in Randlage und Zentrallage der Thüringer Ackerebene
- Zechstein-Kalke Ostthüringens
- Schiefer-Verwitterungsböden des Thüringer Schiefergebirges
- Anmoorige Standorte der Inneren Ackerebene (ehemalige „Ried-Standorte“).

Die Böden sollten sich außerdem in den P-Bindungsformen unterscheiden. Angestrebt wurde außerdem, dass innerhalb einer Gruppe von Böden regelmäßig organisch gedüngte und wenig/nicht organisch gedüngte Flächen vorhanden waren. Damit sollte geprüft werden, ob langjährige organische Düngung einen Einfluss auf den (potenziell) pflanzenverfügbaren Phosphor ausübt.

In die Untersuchungen waren insgesamt 62 Feldstücke einbezogen.

2.3 Bodenprobenprobenahme

Alle Bodenproben wurden maschinell gezogen (WINTEX 2000; Fa. Wintexagro; DK) und BOPROB; Fa. Nietfeld, D).

Beide Geräte sind als Probenahme-Geräte zertifiziert. WINTEX 2000 läuft als Anbaugerät auf einem Quad. Das Probenahme-Gerät von Nietfeld arbeitet als Aufbau auf einem PKW-Hänger.

Alle Bodenproben wurden in 0-20 cm Schichttiefe (mindestens 20 Einstiche/Probe) gezogen. Die Entnahme erfolgte bei starren Rastern (1-ha, 3-ha; rechteckige Probenahmeflächen) entlang einer der Diagonalen der Fläche. Bei unregelmäßigen Probenahmeflächen (intelligente Rasterung, IR) wurden die Proben entlang der längsten Strecke zwischen zwei Ecken der jeweiligen Probenahmefläche entnommen.

Vorgesehen war, jede Fläche dreimal zu beproben (1-ha, 3-ha und IR). Das 1-ha-Raster sollte für die Bewertung der Untersuchungsergebnisse des 3-ha-Rasters und des IR als Basisbasis dienen („Basisraster“). Aufgrund von zwischenzeitlich erfolgten Düngungsmaßnahmen und Ernteverzögerungen war dies jedoch nicht auf jedem der o.g. 62 Schläge möglich.

Im Verlauf des Projektes wurden 2401 Bodenproben analysiert.

2.4 Ableitung der Probenahme­flächen in der „Intelligenten Rasterung“ der Versuchs­flächen

Zur Bestimmung des P-Gehalts von Feldstücken wird die Beprobung üblicherweise im 3-ha-, selten auch im 1-ha-Raster durchgeführt. Diese starren Raster gewährleisten eine stringente und einfache Durchführung, orientieren sich aber nicht an natürlichen Bodengegebenheiten. Somit verlaufen die starren Grenzen der Probenahme­flächen nicht an den natürlichen Grenzen unterschiedlicher Bodenbereiche, die verschiedene pflanzenverfügbare P-Gehalte, aber auch unterschiedliches Ertragspotenzial und damit differierenden P-Düngungsbedarf aufweisen können.

Im Rahmen dieses Projektes sollte auch herausgefunden werden, ob eine Rasterung unter Berücksichtigung der natürlichen Bodengegebenheiten einen „Mehrwert“ bringt.

Dieser Mehrwert kann bestehen:

- in einer besseren Anpassung der zu düngenden P-Mengen an den P-Bedarf der Kulturen, der sich letztlich in einem Mehrertrag gegenüber anderen Düngungsvarianten (z.B. einheitlicher Düngung nach durchschnittlichem P-Gehalt des Feldstückes, teil­flächenspezifische Düngung nach den Bodenuntersuchungsergebnissen einer starren Rasterung) manifestiert und/oder
- zu einer Einsparung an gedüngtem Phosphor gegenüber anderen Düngungsregimes führt.

Letzteres ist sowohl aus der Sicht der Umwelt, des Ressourcenschutzes und auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht (Senkung Düngerkosten) erstrebenswert.

In die dafür entwickelte „intelligente Rasterung“ (IR) fließen Unterschiede im langjährigen Erosionsrisiko sowie die Qualität der unterschiedlichen Bodenbereiche in Form der Ackerzahl ein. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Ackerzahl mit der Ertragsfähigkeit („Ertragspotenzial“) der gebildeten Teilflächen korreliert.

Im ersten Schritt wurde dafür das langjährige Erosionsrisiko nach der „Allgemeinen Bodenabtrags-Gleichung“ (ABAG) abgeleitet. Die mit der ABAG berechneten Werte beschreiben ausdrücklich nicht den realen Bodenabtrag, sondern sind als Risikoprognose bzw. Risikoabschätzung des langjährigen mittleren Bodenabtrages durch Regen zu verstehen. Die ABAG beschreibt den mittleren jährlichen Bodenabtrag A in t/ha als Produkt folgender Faktoren:

- R (Regen- und Oberflächenabflussfaktor)
- K (Bodenerodierbarkeitsfaktor)
- L (Hanglängenfaktor)
- S (Hangneigungsfaktor)
- C (Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor)
- P (Erosionsschutzfaktor)

daher $A = R \times K \times L \times S \times C \times P$.

Für die Berechnung wurden die benötigten Geoinformationen gesammelt und aufgearbeitet. Die Kalkulationen erfolgten unter Verwendung der ArcGIS-Erweiterung *AVErosion*.

Die betriebs- und feldstückspezifischen Informationen C- und P-Faktor wurden nicht beachtet, um das Erosionsrisiko unabhängig von der aktuellen Bewirtschaftung abzuschätzen. In die Ermittlung des Erosionsrisikos fließt zur Berechnung von L (Hanglängenfaktor) und S (Hangneigungsfaktor) ein digitales Geländemodell (DGM) im 5 m x 5 m Raster ein. Der Bo-

denerodierbarkeitsfaktor (K-Faktor) sowie der Regen- und Oberflächenabflussfaktor (R-Faktor) gehen im 25 m x 25 m Raster ein.

Die so entstandenen Erosionsrisikoraster wurden unter Verwendung des ArcGIS Re-Klassifizierungswerkzeuges „Natürliche Unterbrechung“ in vier Klassen unterteilt. Das Ergebnis wurde mit dem „Majority-Filter“ geglättet, um sehr kleinräumige Unterschiede zu vermeiden und zusammenhängende Bereiche gleichen Erosionsrisikos zu erhalten.

Als weiterer Parameter wurde die Ackerzahl aus der Reichsbodenschätzung genutzt. Hierfür wurden die Ackerzahlen in zehn Klassen unterteilt und ebenfalls unter Nutzung eines „Majority-Filters“ im GIS geglättet. Die Raster mit dem langjährigen Erosionsrisiko und mit den Ackerzahlen wurde anschließend in Polygone umgewandelt und dann miteinander verschneiden (Intersect-Verschneidung). Dadurch entstanden neue Bereiche, mit gleichem Erosionsrisiko und Bodengüte.

Die entstandenen Probenahmeeflächen werden im Bericht als „Intelligente Rasterung“ (IR) darstellt. Die Abbildung 1 fasst die Methodik vereinfacht zusammen.

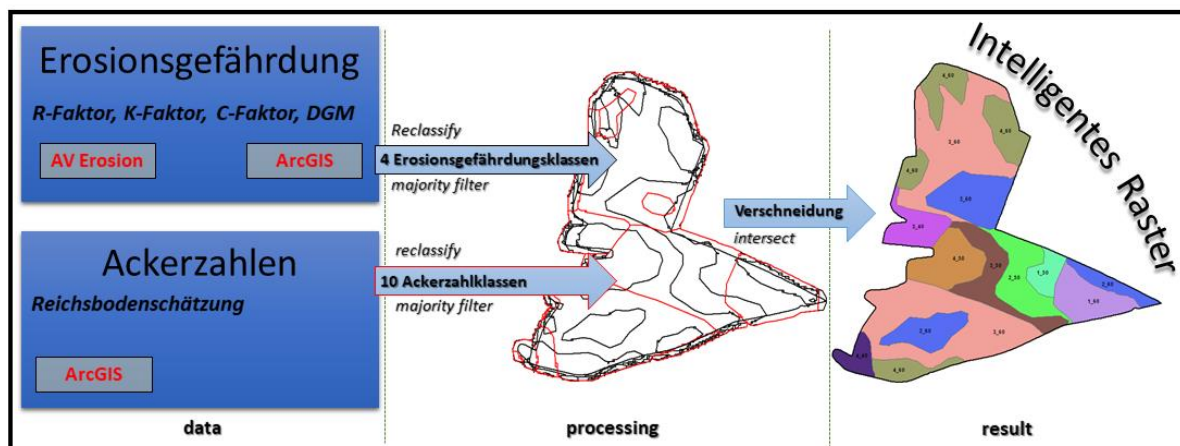


Abbildung 1: Flussdiagramm zur Methodik der „Intelligenten Rasterung“
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

2.5 Untersuchungswesen

Der P-Bodenvorrat kann nach MENGEL (2001) in die drei Fraktionen „lösliches P“, „labiles P“ und „stabiles P“ unterteilt werden:

Lediglich das den kleinsten Teil des P-Gesamtvorrats umfassende lösliche P (HPO_4^{2-} und H_2PO_4^-) liegt im Bodenwasser vor und ist unmittelbar pflanzenverfügbar. Landwirtschaftliche Nutzpflanzen nutzen für ihre P-Ernährung aber auch einen Teil des labilen P-Pools, der je nach Pflanzenart, Boden (vorliegende P-Bindungsformen) und Boden-„Historie“ (mineralische und organische P-Zufuhr in der Vergangenheit) aus unterschiedlichen Verbindungsgruppen stammt. Zwischen labilem und stabilem P gibt es ebenfalls einen Austausch. Labiles P wird in den stabilen Pool eingebaut und umgekehrt.

Der Vorrat an Gesamt-P im Boden lässt keine Rückschlüsse auf das verfügbare P-Angebot der Pflanzen zu. WERNER et al. (1991) geben 680 mg P/kg Feinboden als mittleren P-Gesamtgehalt in den Ackerböden Deutschlands an.

In den Methoden zur Untersuchung des pflanzenverfügbaren P-Gehalts landwirtschaftlich genutzter Böden wird mit verschiedenen Extraktionsmitteln versucht, näherungsweise den Anteil des P-Bodenvorrats zu bestimmen, der für die Kulturpflanzen verfügbar ist, von diesen aufgenommen sowie für Wachstum und Ertragsbildung verwertet werden kann.

In Deutschland wurden dafür die universell einsetzbaren CAL-/DL-Extraktionen als VDLUFA-Methoden etabliert (VDLUFA Methoden: CAL-Methode nach VDLUFA-Methoden Bd. I, A 6.2.1.1.; DL-Methode nach VDLUFA-Methode Bd. I A 6.2.1.2).

Daneben existiert eine Reihe weiterer Extraktionsmethoden, mit denen der pflanzenverfügbare Anteil des P-Pools im Boden charakterisiert, der P-Gesamtvorrat bestimmt oder eine Fraktionierung des P-Vorrats vorgenommen werden kann. Diese Methoden sind zumeist an spezielle Böden bzw. Bodeneigenschaften sehr gut adaptiert und lassen sich bei Kenntnis der das P-Sorptions- und P-Nachlieferungsvermögen der Böden determinierenden Bodeneigenschaften gezielt nutzen. Beispiele dafür sind:

Leicht verfügbares Phosphat (unmittelbar pflanzenverfügbar):

Wasserextraktion nach PAAUW

Extraktion mit CO₂-gesättigtem Wasser nach STÜNZI

Mittel- bis schwer verfügbares Phosphat:

NaOH-Extraktion nach MARKS („Reserve-P“ Fe-/Al-Oxyhydratreicher Böden)

NaHCO₃-Extraktion nach OLSEN (pflanzenverfügbares Phosphat in Ca-reichen Böden)

Ameisensäure- und NH₄F-Extraktion (MEHLICH 3-Methode)

Organisch gebundenes Phosphat

sequenzielle Extraktion nach HEADLEY

organisches P nach MARKS

Außerdem liegen Methoden zur Bestimmung des P-Gesamtgehalts (Aufschluss mit Königswasser) sowie zur P-Dynamik im Boden vor.

Letztere sind für die Beschreibung bzw. Quantifizierung der P-Nachlieferung aus dem labilen P-Vorrat des Bodens bzw. für die P-Fixierung/-Immobilisierung (z.B. nach erfolgter mineralischer P-Düngung) von besonderem Interesse.

Die Bestimmung der (mittelfristigen) P-Freisetzung in Abhängigkeit von der Zeit („P-Freisetzungsgeschwindigkeit“) - vorrangig aus dem labil gebundenen P-Vorrat des Bodens - kann nach RICHTER und FLOSSMANN (ZORN; 2015) bestimmt werden.

Das Vermögen von Böden, frisch gedüngtes Phosphat pflanzenverfügbar zu (er)halten bzw. zu immobilisieren wird indirekt mit der P-Speicherkapazität und dem P-Sättigungsgrad beschrieben (ECKHARD u. LEINWEBER, 1997a).

Die Untersuchungsergebnisse lassen gleichzeitig Prognosen zur P-Mobilität und P-Austragsgefährdung aus Böden mit dem Sickerwasser bzw. Drainabfluss zu (LOOKMANN et al., 1996; LEINWEBER et al., 1997; BOHNER et al., 2014b).

Nachstehenden Methoden wurden zur Untersuchung der Bodenproben herangezogen:

- **Gesamtphosphor**

Königswasseraufschluss: DIN EN 16174, 2012-11

Messung mittels ICP-OES: DIN EN ISO 11885 (E22) 2009-09
Königswasseraufschluss der getrockneten Probe
Messung mittels ICP-OES

- **Verfügbare Phosphor (CAL)**
VDLUFA Bd. I, A 6.2.1.1 (1991)
Extraktion der getrockneten Probe mit CaCl_2 -Lösung
Messung mittels ICP-OES
- **Phosphorfreisetzung**
Flossmann u. Richter, Arch. Acker- u. Pflanzenbau und Bodenkunde, Berlin (1982) 11, S. 703-709
Zweifache Extraktion der getrockneten Probe mit Wasser (1. 60 min; 2. 10 min)
Messung mittels Fließinjektion (FIA)
Berechnung der Phosphorfreisetzung unter Berücksichtigung des CAL-Phosphors
- **Phosphorsättigung/Speicherkapazität**
Eckhardt und Leinweber 1997, Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 85, 871-874
Extraktion der getrockneten Probe mit Oxalatlösung
Messung der Elemente P, Al, Fe, Mn mittels ICP-OES
Berechnung der Phosphorsättigung/Speicherkapazität unter Berücksichtigung von Mn!
- **Schwer verfügbarer Phosphor (MARKS)**
modifiziert nach Arch. Acker- und Pflanzenbau und Bodenk., Berlin 21 (1977) 6, 447-456
Abtrennung des leicht verfügbaren Phosphors: DL-Methode: VDLUFA Bd. I, A 6.2.1.1 (1991)
Extraktion des schwer verfügbaren Phosphors mit 0,5 N NaOH (Summe org. + anorg.)
Messung des org./anorg. Phosphors mittels ICP-OES: DIN EN ISO 11885 (E22) 2009-09
Ansäuern des Extraktes mit Schwefelsäure (Ausfällen des organischen Phosphors)
Messung des anorganischen Phosphors mittels Fließinjektion (FIA) (Phosphor „nach Marks“)
Berechnung des organischen schwer verfügbaren Phosphors (Differenz ICP-OES und FIA)

Die Untersuchungsergebnisse lassen sich im GIS (ARC-GIS) in Nährstoffkarten umsetzen und mit Daten zum Ertragspotenzial der dazugehörenden Teilflächen sowie dem teilflächen-spezifischen Erosionsrisiko verknüpfen.

2.6 Kalkulationsgrundlage für P-Düngungsempfehlungen und teilflächenbezogene P-Applikation

Auf Grundlage der Datenbasis des BeSyD (Rechenmodell zur N- und P-Bedarfsermittlung in den Bundesländern Thüringen und Sachsen) wurde eine Berechnungsroutine für die P-Bedarfsermittlung erzeugt. Diese ermöglicht u.a.:

- die Ermittlung des P-Bedarfs auf der Grundlage des CAL-P, des Anbaus und der ggf. vorgenommenen / geplanten organischen Düngung,
- die Modifizierung der CAL-P Untersuchungsergebnisse anhand der Ergebnisse der P-Freisetzungsrates (PF),
- die Kalkulation eines modifizierten P-Bedarfs auf der Grundlage der CAL-Ergebnisse und der „Schärfung“ der Untersuchungsergebnisse mittels PF.

Die Berechnungen können wahlweise für das mittlere CAL-P-Untersuchungsergebnis des Schläges oder für alle in den o.g. Rastern entnommenen Bodenproben vorgenommen werden.

Die kalkulierten P-Düngungsempfehlungen lassen sich über die Verknüpfung von teilflächenbezogenen P-Düngermengen mit den dazugehörigen Flächenkoordinaten in Applikationskarten für die On-Farm-Versuche bzw. die Düngung von Praxisschlägen umsetzen.

2.7 Großparzellenversuche - On-Farm-Research

In jedem der vier teilnehmenden Landwirtschaftsbetriebe wurde ein ortsfester, georeferenzierter On-Farm-Versuch angelegt und über den gesamten Versuchszeitraum geführt.

Die Versuche sollten der Beantwortung von drei Fragen hinsichtlich Ertrags- und Umweltwirkung dienen:

1. Ist in den Düngungsvarianten (vorzugsweise nach Düngung im „Intelligenten Raster“ - IR) grundsätzlich eine Ertragswirkung der sich ergebenden teilflächenspezifischen P-Düngung nachweisbar?
2. Ist diese Ertragswirkung bei Düngung nach IR stärker als in den anderen teilflächenspezifischen Varianten?
3. Kann in den konkreten Versuchsanstellungen die eingesetzte P-Menge mittels einer Düngung nach IR gegenüber einer durchschnittlichen P-Düngung bzw. starrer Rasterung reduziert werden?

Als Großparzellen wurden die Arbeitsbreiten (idealerweise das Doppelte/Dreifache) genutzt, die der Landwirtschaftsbetrieb für Düngungs- und Pflanzenschutzmaßnahmen ohnehin angelegt hat. Jede Großparzelle wurde mit einer Variante (Prüfglied) belegt. Die Varianten wurden in 4-facher Wiederholung geprüft.

Entsprechend der o.g. Fragestellungen bildete der in der Tabelle 1 dargestellte Variantenplan die Grundlage für die vier ortsfesten Versuchsanlagen.

Tabelle 1: Variantenplan der On-Farm-Research-Versuche

Prüf-glieder	Kurzbezeichnung	Erläuterungen zur P-Düngeplanung bzw. P-Düngung
1	Kontrolle	ohne P-Düngung
2	Starres (1-ha) Probenahme-Raster (I)	Düngung einheitlich auf Grundlage mittlerer P-Gehalte (nur CAL-P) der Fläche und starrem 1-ha-Probenahme-Raster; Bezug zu mittlerem Ertrag ohne Berücksichtigung von Ertragszonen
3	Komplexes ("intelligentes") Probenahme-Raster (I)	Düngung auf Grundlage der teilflächenspezifischen P-Gehalte (nur CAL-P) der Fläche nach komplexer ("intelligenter") Probenahme; Bezug zu mittlerem Ertrag ohne Berücksichtigung von Ertragszonen
4	Komplexes ("intelligentes") Probenahme-Raster (II)	Düngung auf Grundlage der teilflächenspezifischen P-Gehalte (nur CAL-P) der Fläche nach komplexer ("intelligenter") Probenahme; mit Berücksichtigung von Ertragszonen (3 Ertragszonen)
5	Komplexes ("intelligentes") Probenahme-Raster (III)	Düngung auf Grundlage der teilflächenspezifischen modifizierten P-Gehalte (CAL-P plus P-Freisetzung) der Fläche nach komplexer ("intelligenter") Probenahme und unter Berücksichtigung der P-Nachlieferung; mit Berücksichtigung von Ertragszonen (3 Ertragszonen)
6	Starres (1-ha) Probenahme-Raster (II)	Düngung auf Grundlage der teilflächenspezifischen modifizierten P-Gehalte (CAL-P plus P-Freisetzung) der Fläche nach starrem 1-ha-Probenahme-Raster und unter Berücksichtigung der P-Nachlieferung; mit Berücksichtigung von Ertragszonen (3 Ertragszonen)

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Ertragsermittlung in den OFR-Versuchen

Eine vollständige Beerntung der Großparzellen mit Parzellen-Mähdrescher war aufgrund der Fläche der Parzellen nicht möglich.

Daraus ergab sich die Frage nach einer geeigneten ganzflächigen Erfassung der Erträge der Großparzellen. Diese wurde wie folgt gelöst:

Quer zu den Großparzellen wurden in jeder Wiederholung zwei Transekte („Beerntungsstreifen“) gelegt, in denen mittels Mähdrusch die tatsächliche Ertragsermittlung erfolgte (Abbildungen 2-5). Dazu kann Praxistechnik oder ein Parzellen-Mähdrescher mit Online-Ertragserfassung genutzt werden. Eine zusätzliche Information zum Ertrag der jeweiligen Großparzelle lieferte die Beerntung der gesamten Fläche der Großparzellen mit der Ernte-technik des jeweiligen Landwirtschaftsbetriebes. Diese wurde exemplarisch 2020 in zwei Fällen (Wintergerste, APL Ranis-Ludwigshof e.G. und Winterweizen, Agrar GmbH Töttelstädt) durchgeführt (Tabelle 2).

Im Verlauf der Wachstumsperiode wurde durch Befliegung mit einer Mini-Drohne mit Multispektralsensor dreimal der NDVI erfasst. Dieser korreliert bei Druschfrüchten spätestens mit Einsetzen der Kornfüllung eng mit dem Ertrag.

Für die Transekte / Beerntungstrecken existieren demzufolge georeferenziert sowohl NDVI-Werte als auch tatsächliche Kornertträge. Aus den Wertepaaren lässt sich ableiten, welcher NDVI-Wert welchen konkreten Kornerttrag repräsentiert. Mit den sich aus den „Wertepaar-Wolken“ ergebenden für jeden einzelnen Versuch spezifischen Regressionen lässt sich der Ertrag für jede Großparzelle in der entsprechenden Versuchsanlage kalkulieren.



Abbildung 2: On-Farm-Research-Versuchsanlage vom Standort Ranis (Feldstück 116110, Wurzelhügel) mit Beerntungsstrecken (weiße Streifen)

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

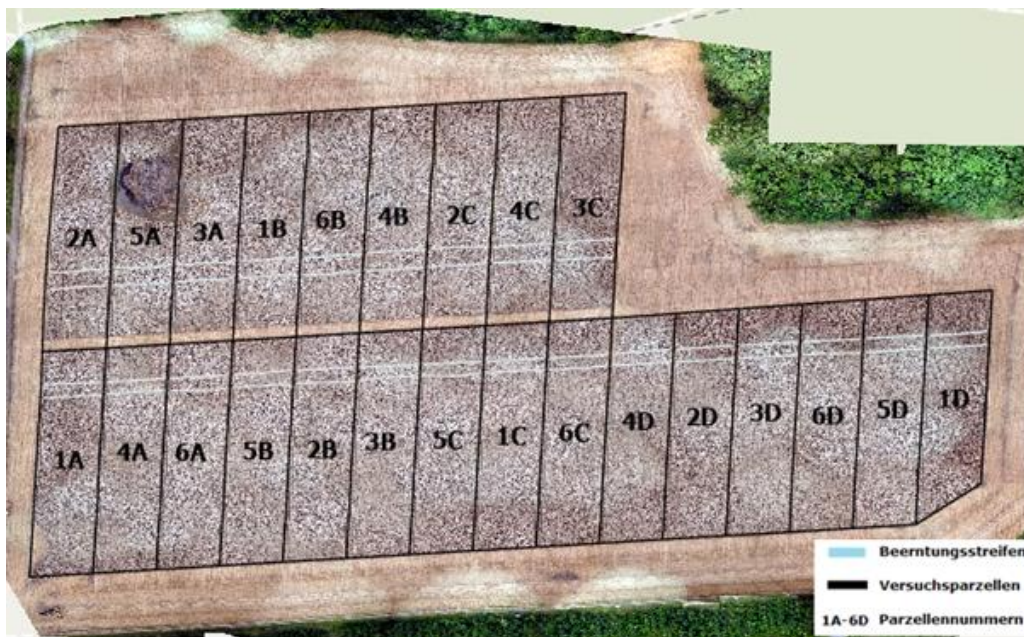


Abbildung 3: OFR-Versuchsanlage vom Standort Töteltstadt (Feldstück 50, Salzkrippen) mit Beerntungsstrecken (weiße Streifen)

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022



Abbildung 4: OFR-Versuchsanlage vom Standort Ziegelheim (Feldstück 8210, Schwaben) mit Beerntungsstrecken (weiße Streifen)
 Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

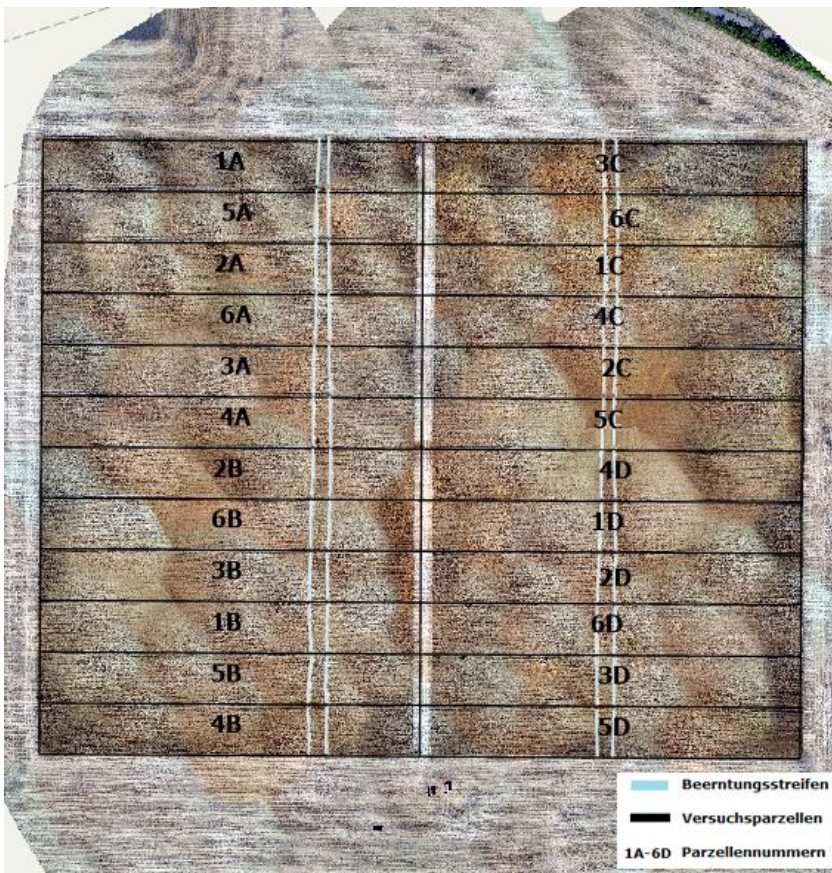


Abbildung 5: OFR-Versuchsanlage vom Standort Alperstedt (Feldstück 228-01) mit Beerntungsstrecken (weiße Streifen)
 Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle 2: Übersicht zu den erfassten Erträgen durch den Praxisbetrieb sowie den aus NDVI-Werten über Regressionsanalysen abgeleiteten Erträgen

Standort	2020			2021		
	Kultur	Erträge über NDVI kalkuliert	Erträge durch LWB ermittelt	Kultur	Erträge über NDVI kalkuliert	Erträge durch LWB ermittelt
Ranis	Wintergerste	X	X	Winterraps	X	-
Töttelstädt	Winterweizen	X	X	Wintertriticale	X	-
Ziegelheim	Winterraps	X	-	Winterdurum	X	-
Alperstedt	Winterdurum	X	-	Futterroggen*	-	-

* Versuch nicht beerntbar

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Je Standort und Jahr liegen drei NDVI-Karten und eine RGB-Karte vor. Die RGB-Aufnahmen wurden aus Aufnahmen einer Befliegung nach dem Drusch der Beerntungsstreifen abgeleitet. Die NDVI-Karten basieren auf Multispektralaufnahmen von 3 ausgewählten Befliegungszeitpunkten zu BBCH 49, BBCH 71 sowie BBCH 75 der jeweiligen Kultur.

Ableitung von Ertragsdaten aus NDVI-Werten

Vorarbeiten

Im ersten Schritt wurden alle vorliegenden Datensätze auf Konsistenz geprüft. Danach erfolgte die Validierung aller Ertragsdaten aus den Beerntungsstreifen zu den Parzellennummern, sowie die Separation von während der Ernte fehlerhaft erfassten Ertragsdaten.

Innerhalb eines GIS-Projekts mit allen RGB und NDVI-Befliegungsdaten des jeweiligen Standortes wurden die GIS-Layer passgenau georeferenziert, so dass alle Karten genau übereinander liegen. Anschließend wurden die Großparzellen-Shape-Files der Düngestufen und die während der Ernte erfassten GPS-Messpunkte importiert, auf Fehler überprüft und aus den Punkten Längenspolygone für die beernteten Flächen erstellt. Die Längenspolygone wurden im GIS-Projekt auf beiden Seiten 75 cm gepuffert um die reale Beerntungsbreite (Parzellen-Mähdrescher 1,5 m) korrekt abzubilden.

Da es einen Versatz zwischen den erfassten GPS-Punkten und den tatsächlichen Beerntungsflächen gab, war es nötig, alle erstellten Längenspolygone mit Hilfe der erstellten RGB-Karten passend zu den realen Beerntungsflächen zu verschieben, so dass Beerntungsflächen und Längenspolygone passgenau aufeinander liegen. Im letzten Schritt erfolgte innerhalb des GIS-Projekts mittels einer zonalen Statistik die Ausgabe der 3 NDVI-Mittelwerte der einzelnen Befliegungszeitpunkte je erstellten Längenspolygon in Excel.

Mit dieser Vorarbeit war es möglich die NDVI-Karten (3 Befliegungen pro Standort) mit den Ertragsdaten aus den Beerntungsstreifen abzugleichen und Modelle zu entwickeln, die auf Basis der ermittelten NDVI-Werte den Ertragswert auf der Restfläche des Schlages prognostizieren.

Erstellung des Modells

Um eine Korrelation zwischen Erträgen und NDVI-Werten (2-3 Befliegungszeitpunkte) zu überprüfen, wurde 2020 folgende Vorgehensweise gewählt: Die ermittelten Datensätze - bestehend jeweils aus einem Ertragswert und einem NDVI-Wert – sind zu 2/3 des gesamten Datenvolumens (Anzahl Wertepaare) für die Ableitung eines passenden Modells genutzt worden, 1/3 des Datenvolumens dienten der Überprüfung des Modells.

Um bei den einzelnen Datensätzen den geostatistischen Fehler gering zu halten, wurden die Datensätze möglichst räumlich gleichmäßig aufgeteilt.

Zwischen zwei Fahrspuren erfolgten drei Beerntungen. Wie oben beschrieben, wurden die Beerntungen 1 und 3 für die Berechnung des Modells genutzt, Beerntung 2 diente zur Überprüfung des Modells (siehe Abbildung 6).

Ins Modell sind somit je nach Standort 80-90 Wertepaare eingegangen. Das höchste Bestimmtheitsmaß (R^2) ergab eine quadratische Regression.

Unter Nutzung der Q95%- und Q5%-Quantile wurden mögliche Ausreißer eliminiert und nicht weiter im Modell berücksichtigt. Insgesamt entstanden auf diese Weise (entsprechend der Befliegungstermine) drei mögliche Regressionsmodelle zwischen NDVI- und Ertragswerten je Standort.

Die auf diese Weise entwickelten Modelle mit dem höchsten R^2 wurden anschließend mittels der "Bland-Altman Methode" validiert. Für diese Überprüfung des Modells wurden die o.g. zuvor nicht genutzten 1/3 der NDVI-Ertrags-Datenpaare verwendet.

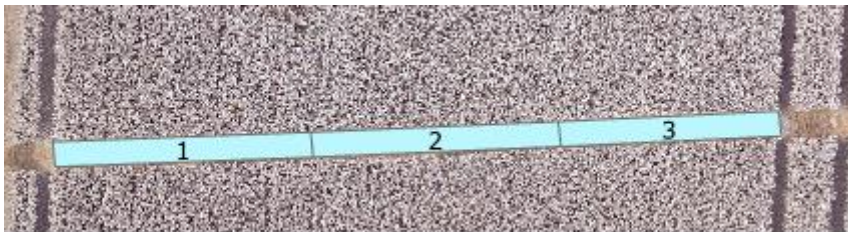


Abbildung 6: Schematische Darstellung für die Beerntung der Transektes mit Parzellen-Mähdrescher (Die Zahlen 1 bis 3 sind separate Messstrecken innerhalb des Transektes, in denen der Ertrag kontinuierlich georeferenziert erfasst wurde.)

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Im Versuchsjahr 2021 wurden alle Wertepaare für die Erstellung des bestmöglichen Regressionsmodells genutzt und auf die Überprüfung des Modells mittels der "Bland-Altman Methode" verzichtet.

Da auf diese Weise mehr Wertepaare für die Regressionsanalyse zur Verfügung standen, konnten im Vorhinein mehr Ausreißer-Werte unter Anwendung der Q75%- und Q25%-Quantile eliminiert werden.

Zusätzlich wurden die NDVI-Werte aus den beiden zeitlich unterschiedlichen Befliegungszeitpunkten gemittelt, die am besten mit den Ertragsdaten korrelierten (maximales R^2). Die Mittelung der NDVI-Daten aus zwei ertragsrelevanten Zeitpunkten und die daraus resultierenden Regressionsmodelle zwischen NDVI-Werten und Ertragsdaten führten bei den analysierten Datensätzen immer zu einem deutlich höheren Bestimmtheitsmaß (R^2).

Modellüberprüfung

Das Bland-Altman-Diagramm bietet eine optische Beurteilung, wie hoch die Schwankungsbreite der Abweichungen um den Mittelwert ist und ob eine Messmethode prinzipiell höhere oder niedrigere Werte "misst" (systematischer Messfehler). Weiterhin wird so überprüft, ob die Streuung der Abweichungen oder die Abweichung der Methoden von der Höhe der Werte abhängig ist.

Bei der Überprüfung aller vier Regressionsanalysen der Standorte Ranis, Töttelstädt, Alperstedt und Ziegelheim zeigten sich anhand der graphischen Beurteilung des Diagramms, dass die Korrelationen zwischen NDVI-Werten und Ertragsmessung belastbar sind und keine systematischen oder proportionalen Fehler im Modell vorliegen (Tabelle 3).

Auffällig ist lediglich das Modell für Ziegelheim im Jahr 2020. Hier ergab sich eine negative Korrelation zwischen Ertragsdaten und NDVI-Werten. Mögliche Ursache könnte hier die Nutzung der NDVI-Werte eines sehr späten Befliegungszeitpunktes (03.07.2020) sein. Es ist zu vermuten, dass der bereits weitgehend abgereifte Bestand in Kombination mit einem hohen Unkrautbesatz in einzelnen Bereichen der Beerntungsstreifen einerseits zu deutlich erhöhten NDVI-Werten führte, andererseits der in diesen Bereichen hohe Unkrautbesatz zu geringeren Erträgen bei der Kultur geführt hat.

Tabelle 3: Übersicht zu den Ergebnissen der Regressionsanalysen

Jahr	Standort	R ²	Regressionsformel
2020	Ranis	0,55	$11.11551600 * (\text{Exp}((2.56649347 * "2020_06_09_mspec_index_ndvi.tif")))$
	Töttelstädt	0,37	$49.48850109 * (\text{Exp}((1.08352811 * "2020_06_26_mspec_index_ndvi.tif")))$
	Alperstedt	0,77	$14.51840037 * (\text{Exp}((2.26206296 * "2020_06_26_mspec_index_ndvi.tif")))$
	Ziegelheim	0,38	$40.80527841 * (\text{Exp}((-0.51237688 * "2020_07_03_mspec_index_ndvi.tif")))$
2021	Ranis	0,57	$1.72428258 * (\text{Exp}((4.38435301 * "04_20_und_07_13_mspec_index_ndvi.tif")))$
	Töttelstädt	0,63	$16.83213406 * (\text{Exp}((2.04203558 * "06_02_und_07_05_mspec_index_ndvi.tif")))$
	Ziegelheim	0,54	$53.96900624 * (\text{Exp}((0.67826268 * "05_14_und_06_10_mspec_index_ndvi.tif")))$

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Ertragsauswertung in den Großparzellen

Für die Auswertung der Großparzellen wurden die NDVI Daten mittels des Tools "Raster Calculator" im GIS über die Regressionsformeln in Ertragsdaten transformiert. Anschließend erfolgte über eine zonale Statistik im GIS die Ausgabe der Ertragsmittelwerte je Großparzelle in Excel. Im Jahr 2020 lagen für Töttelstädt und Ranis ebenfalls Ertragsdaten von den Praxismähdreschern der Betriebe vor.

Diese Daten wurden interpoliert und ebenfalls über eine zonale Statistik in GIS der Ertragsmittelwerte je Großparzelle im Excel ausgegeben.

Mit Hilfe der beiden zusätzlichen Datensätze konnten die Ergebnisse aus den vorhergehenden Analysen überprüft werden.

Praktische Düngung der Großparzellen

Die technische Ausstattung für eine teilflächenspezifische Düngerapplikation ist in den teilnehmenden Landwirtschaftsbetrieben grundsätzlich vorhanden.

Mit dieser Technik wurden die teilflächenspezifischen Streukarten für die OFR-Versuche umgesetzt.

3 Ergebnisse

3.1 Bodenprobenraster

Kleinste noch praktikable Bodenprobenahme-Raster in Feldstücken, die in ihrer Fläche der Agrarstruktur Thüringens entsprechen - durchschnittliche Schlaggröße ist (nur) ca. 8 ha, aber Schläge bis ca. 150 ha sind vorhanden - ist das 1-ha-Raster. Ein solches Raster führt jedoch bereits zu einem für die landwirtschaftliche Praxis nicht mehr darstellbaren Probenahme- und Untersuchungsaufwand.

In der vorliegenden Projektarbeit wurde das 1-ha-Raster als Basisraster genutzt, da es der „absoluten Wahrheit“ bezüglich der räumlichen Verteilung der Nährstoffgehalte sicher sehr nahekommt.

Die Aussagekraft anderer Raster (in der vorliegenden Arbeit 3-ha-Raster und das aus den oben beschriebenen Parametern abgeleitete unregelmäßige „Intelligente Raster“ (IR)) kann anhand des Übereinstimmungsgrades in der Fläche mit einem 1-ha-Raster näherungsweise abgeschätzt werden.

Vergleiche des Übereinstimmungsgrades (Flächenanteil am jeweiligen Schlag in %) in der Zuordnung zur P-Gehaltsklasse zwischen dem 3-ha-Raster und dem 1-ha-Raster, Analytik: Nur CAL-P in beiden Rastern

Die 3-ha-Raster beinhalten in etwa jeweils drei 1-ha-Probenahmeflächen. Die Proben wurden „in einem Zug“ entnommen, so dass Einflüsse einer irrtümlich zwischenzeitlich applizierten Düngung oder Bodenbearbeitung nahezu auszuschließen sind.

Vor diesem Hintergrund überrascht es, dass zwischen dem 3-ha-Raster und dem 1-ha-Raster nur bei 55% der Fläche Übereinstimmung in der Bewertung des Untersuchungsergebnisses durch die Zuordnung in die P-Gehaltsklasse gefunden wird (Tabelle 4). Maximal stimmt die Gehaltsklasse bei beiden Probenahme-Strategien auf knapp zwei Dritteln der Fläche überein. Dies betrifft die homogenen Flächen mit Löss in Ostthüringen, die leichten und mittleren Flächen auf Buntsandstein sowie die untersuchten Zechstein-Kalke.

Auf den zum kleinräumigen „Verschiessen“ neigenden quartären Kiesen, den vergleichsweise steinreichen und im Wasserspeichervermögen / der Steinigkeit ebenfalls kleinräumig wechselnden Böden der Muschelkalk- und Keuper-Verwitterung sinken die Übereinstimmungsgrade (Keuper nur in Töttestädt) sogar unter 50%. Überraschend tritt ein derart geringer Übereinstimmungsgrad auch beim äußerlich homogenen Anmoor auf.

Bei etwa einem Fünftel der Fläche verschlechtert sich durch den „Sprung“ zum 3-ha-Raster gegenüber dem 1-ha-Raster die P-Gehaltsklasse. Besonders große „Wanderungen“ zu niedrigeren Gehaltsklassen finden sich auf Keuper (Standort Töttestädt, nicht jedoch Alperstedt) sowie auf den quartären Kiesen in Alperstedt. Auffallende Zunahmen des Flächenanteils, auf dem sich die P-Gehaltsklasse durch die Probenahme im 3-ha-Raster im Vergleich zum 1-ha-Raster erhöht, zeigen sich auf Anmoor, Keuper (nur Alperstedt) und Muschelkalk.

Es wird eingeschätzt, dass unter fachlichem Aspekt der Übergang vom 1-ha- zum 3-ha-Raster der Informationsverlust zur räumlichen Verteilung der CAL-P-Gehalte eigentlich bereits zu groß ist. Besonders kritisch zu bewerten ist in diesem Zusammenhang die Probenahme auf den Standorten, in denen der Übereinstimmungsgrad unter 50% der Fläche sinkt.

Tabelle 4: Übereinstimmungsgrad (% Flächenanteil) in der Bewertung der Bodenuntersuchungsergebnisse nach Gehaltsklassen zwischen 1-ha-Raster und 3-ha-Raster – Bodenuntersuchung in beiden Probenahme-Rastern nur nach CAL-P

				Analytik: nur CAL-P		
				Flächenanteil (%)		
Betrieb	Schlag-Nr.	Geolog. Herkunft	Schlag	GK P sinkt bei 3 ha-Raster im Vgl. zum 1 ha- Raster	gleich	GK P steigt bei 3 ha-Raster im Vgl. zum 1 ha-Raster
Alperstedt	207	Anmoor	207	18,5	55,6	25,9
	228-01	Anmoor	228-01	8,3	42,9	48,8
			arithm. Mittel	13,4	49,2	37,4
	126	Keuper	126	47,6	28,6	23,8
	301	Keuper	301	20,0	60,0	20,0
	310	Keuper	310	0,0	77,8	22,2
	110-01	Keuper	110-01	4,5	40,6	54,9
	303-00	Keuper	303-00	12,1	57,7	30,2
			arithm. Mittel	16,9	52,9	30,2
	216	quartärer Kies	216	29,2	41,7	29,2
	231	quartärer Kies	231	42,1	42,1	15,8
	425	quartärer Kies	425	25,5	56,9	17,6
	116-01	quartärer Kies	116-01	0,0	36,5	63,5
	205-01	quartärer Kies	205-01	35,5	40,3	24,2
232-01	quartärer Kies	232-01	20,5	53,8	25,6	
		arithm. Mittel	25,5	45,2	29,3	
Ranis	166100	Buntsandstein	Holzweg	10,0	60,0	30,0
	178110	Buntsandstein	Ronneberg	19,3	63,2	17,5
	180110	Buntsandstein	Sandweg	20,0	66,7	13,3
	183010	Buntsandstein	Hüttner Grund	25,0	52,8	22,2
	184110	Buntsandstein	Vogelherd	0,0	75,0	25,0
			arithm. Mittel	14,8	63,5	21,7
	105110	Schiefer	Oberfeld	8,3	75,0	16,7
	116110	Schiefer	Wurzelhügel	21,1	50,0	28,9
	120110	Schiefer	Schmordaer Kreuz	0,0	53,3	46,7
	125110	Schiefer	Heroldshof	19,7	65,5	14,8
	131100	Schiefer	Kalte Schenke Hofmann	13,3	46,7	40,0
			arithm. Mittel	12,5	58,1	29,4
	144100	Zechstein	Grätz	5,4	79,2	15,5
	150200	Zechstein	Dobianer Spitze 1	0,0	66,7	33,3
150201	Zechstein	Dobianer Spitze 2	33,3	33,3	33,3	
165200	Zechstein	Pfarrberg	13,3	73,3	13,3	
171101	Zechstein	Teichwand	33,3	66,7	0,0	
		arithm. Mittel	17,1	63,8	19,1	
Töttelstedt	109	Mittel- und Westthü	Pfeifersplan	16,6	47,6	35,8
	35-3	Mittel- und Westthü	Ermstedter Weg	33,3	66,7	0,0
	82-1	Mittel- und Westthü	Erfurter Str. rechts	22,3	55,4	22,3
			arithm. Mittel	24,1	56,6	19,3
	3	Keuper	Marbacher Str. links	24,9	54,1	20,9
	79-3	Keuper	Töttelstädter Weg	41,7	33,3	25,0
			arithm. Mittel	33,3	43,7	23,0
	6	Muschelkalk	Kalte Else	16,7	50,0	33,3
	50	Muschelkalk	Salzkrippen	0,0	59,7	40,3
	119	Muschelkalk	Warthberg/Hahn	11,1	44,4	44,4
132	Muschelkalk	132	17,0	32,9	50,1	
		arithm. Mittel	11,1	46,8	42,1	
Ziegelheim	1510	Löss, Ostthüringen	Schömbach links	50,0	50,0	0,0
	1520	Löss, Ostthüringen	Schömbach rechts	11,1	88,9	0,0
	2120	Löss, Ostthüringen	Tabakschuppen	21,8	48,2	29,9
	3110	Löss, Ostthüringen	Weber Neuhaus	20,8	50,0	29,2
	5310	Löss, Ostthüringen	Kulturhaus Eiche	11,1	38,9	50,0
	5410	Löss, Ostthüringen	Querweg rechts	23,8	61,9	14,3
	8210	Löss, Ostthüringen	Schwabener Holz	4,8	95,2	0,0
	8310	Löss, Ostthüringen	Göpfersdorf links	9,6	71,4	19,0
		arithm. Mittel	19,1	63,1	17,8	

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Vergleiche des Übereinstimmungsgrades (Flächenanteil am jeweiligen Schlag in %) in der Zuordnung zur P-Gehaltsklasse zwischen dem 3-ha-Raster und dem 1-ha-Raster, Analytik: CAL-P modifiziert mittels P-Freisetzungsrate in beiden Rastern

Im nächsten Schritt wurde erneut die Übereinstimmung der Untersuchungsergebnisse von im 3-ha-Raster entnommenen Proben im Vergleich zum 1-ha-Raster untersucht. Die P-Freisetzungsrate wurde in beiden Rastern zur Modifizierung der P-Gehaltsklasse genutzt. Im 3-ha-Raster wurde aus Kapazitätsgründen nicht in allen Proben die PF untersucht, so dass sich die Zahl der Schläge für die Auswertung auf 30 reduzierte (Tabelle 5).

Tabelle 5: Übereinstimmungsgrad (% Flächenanteil) in der Bewertung der Bodenuntersuchungsergebnisse nach Gehaltsklassen: Vergleich 3-ha-Raster mit 1-ha-Raster – Bodenuntersuchung in beiden Probenahme-Rastern nach CAL-P plus P-Freisetzungsrate

				Analytik: CAL-P+P-Freisetzungsrate		
				Flächenanteil (%)		
Betrieb	Betrieb	Geolog. Herkunft	Schlag	GK P sinkt bei 3 ha-Raster im Vgl. zum 1 ha-Raster	gleich	GK P steigt bei 3 ha-Raster im Vgl. zum 1 ha-Raster
Alperstedt	207	Anmoor	207	18,5	29,6	51,8
	228-01	Anmoor	228-01	19,7	42,9	37,4
			arithm. Mittel	19,1	36,3	44,6
	301	Keuper	301	40,0	30,0	30,0
	110-01	Keuper	110-01	63,1	23,4	13,5
	303-00	Keuper	303-00	81,8	6,1	12,1
			arithm. Mittel	61,6	19,8	18,6
	216	quartärer Kies	216	29,2	41,7	29,2
	116-01	quartärer Kies	116-01	92,9	7,1	0,0
	205-01	quartärer Kies	205-01	79,8	20,2	0,0
232-01	quartärer Kies	232-01	33,3	56,4	10,3	
		arithm. Mittel	58,5	31,6	9,9	
Ranis	178110	Buntsandstein	Ronneberg	95,6	2,2	2,2
	180110	Buntsandstein	Sandweg	40,0	53,3	6,7
			arithm. Mittel	67,8	27,8	4,4
	105110	Schiefer	Oberfeld	25,0	41,7	33,3
	120110	Schiefer	Schmordaer Kreuz	0,0	20,0	80,0
	131100	Schiefer	Kalte Schenke Hofmann	96,4	3,6	0,0
			arithm. Mittel	40,5	21,8	37,8
	144100	Zechstein	Grätz	40,1	49,5	10,4
	150200	Zechstein	Dobianer Spitze 1	50,0	33,3	16,7
	150201	Zechstein	Dobianer Spitze 2	44,4	33,3	22,2
		arithm. Mittel	44,8	38,7	16,4	
Töttelstädt	35-3	Löss, Mittel- und Westthüringen	Ermstedter Weg	11,1	66,7	22,2
				11,1	66,7	22,2
	3	Keuper	Marbacher Str. links	58,6	29,1	12,4
	79-3	Keuper	Töttelstädter Weg	50,0	41,7	8,3
			arithm. Mittel	54,3	35,4	10,3
	6	Muschelkalk	Kalte Else	20,8	50,0	29,2
	50	Muschelkalk	Salzkrippen	58,4	36,9	4,6
	119	Muschelkalk	Warthberg/Hahn	0,0	44,4	55,5
132	Muschelkalk	132	17,0	49,5	33,5	
		arithm. Mittel	24,0	45,3	30,7	
Ziegelheim	1510	Löss, Ostthüringen	Schömbach links	16,7	83,3	0,0
	1520	Löss, Ostthüringen	Schömbach rechts	33,3	66,7	0,0
	3110	Löss, Ostthüringen	Weber Neuhaus	83,3	16,7	0,0
	5310	Löss, Ostthüringen	Kulturhaus Eiche	11,1	38,9	50,0
	5410	Löss, Ostthüringen	Querweg rechts	23,8	57,1	19,1
	8310	Löss, Ostthüringen	Göpfersdorf links	96,9	3,1	0,0
			arithm. Mittel	44,2	44,3	11,5

Überraschend kommt es im Vergleich beider Raster nur durch die Neubewertung des CAL-P mithilfe der P-Freisetzungsrates in beiden Rastern zu einer sehr deutlichen Verschlechterung des Übereinstimmungsgrades. Für diese Beobachtung gibt es keine schlüssige Erklärung!

Mit Ausnahme des Lösses aus Mittelthüringen (Töttelstädt) sinkt der Übereinstimmungsgrad durchweg unter 50%. Wird davon ausgegangen, dass das 1-ha-Raster die höhere räumliche Präzision im Vergleich zum 3-ha-Raster aufweist, ergibt sich erneut die Schlussfolgerung, dass das 3-ha-Raster bereits zu „grob“ ist.

Auf der knappen Hälfte der untersuchten Fläche (44,6%) verschlechtert sich durch den Übergang vom 1-ha- zum 3-ha-Raster die P-Gehaltsklasse. Es fällt auf, dass sich in einigen Fällen durch den Wechsel zum großflächigen Raster die Gehaltsklasse nahezu ganzer Schläge verschlechtert. Auch hierfür existiert keine schlüssige Erklärung, wenn ein Vertauschen von Proben ausgeschlossen werden kann. Auf einem Fünftel der untersuchten Fläche fällt die Einstufung des pflanzenverfügbaren P durch den Wechsel zum 3-ha-Raster höher aus als im 1-ha-Raster.

Vergleiche des Übereinstimmungsgrades (Flächenanteil am jeweiligen Schlag in %) in der Zuordnung zur P-Gehaltsklasse zwischen dem Intelligenten Raster und dem 1-ha-Raster, Analytik: Nur CAL-P in beiden Rastern

Für den Vergleich standen die georeferenzierten Bodenuntersuchungsergebnisse von 39 Schlägen zur Verfügung (Tabelle 6).

Da das Intelligente Raster aufgrund der räumlichen Ausdehnung der einzelnen Probenahme-flächen die räumliche Variabilität der CAL-P-Gehalte in den einzelnen Schlägen anders beschreibt als ein starres 1-ha-Raster (mehrere neben- und/oder hintereinander liegende 1-ha-Flächen können eine Probenahme-fläche im IR bilden oder die Grenze einer IR-Fläche schneidet mehrere 1-ha-Raster), sind hohe Übereinstimmungsgrade nicht zwingend zu erwarten.

Trotzdem treten in diesem Vergleich gehäuft Übereinstimmungsgrade > 50% auf, d.h. in mehr als 50% der Fläche des Schlages/der Bodengeologie verändert sich im IR die P-Gehaltsklasse nach Probenahme im IR im Vergleich zum 1-ha-Raster nicht. Dabei reicht die Spannweite von nur 21,3% (ein Schlag Anmoor in Alperstedt) bis zu hohen 73,3% (Lösse in Ostthüringen). Übereinstimmungsgrade von > 50% finden sich neben den Ostthüringer Lössen für die Schläge auf Buntsandstein, Schiefer, Zechstein und die Mittel- / Westthüringer Lössen.

Auffallend geringe Übereinstimmungsgrade finden sich für die kleinräumig in der Bodenqualität wechselnden quartären Kiese sowie die Keuper- und Muschelkalk-Flächen in Töttelstädt.

Es fällt auf, dass es auf Einzelschlägen mit unterschiedlicher Bodengeologie durch die Be-probung nach dem IR zu sehr starken Verschiebungen der Flächenanteile in den Gehalts-
klassen kommt (

Tabelle 6). So verschlechtert sich auf fünf Schlägen (126 und 216 in Alperstedt; Pfarrberg in Ranis; Töttelstädter Weg und Flugplatz in Töttelstädt) im IR die P-Gehaltsklasse auf mindes-tens 40% der Fläche des jeweiligen Schlages im Vergleich zum 1 ha-Raster.

Im „Gegenzug“ wechseln auf zwei Flächen (228-1 und 231 in Alperstedt) durch die Proben-
ahme im IR hohe Anteile (> 40% der Gesamtfläche des jeweiligen Schlages) in eine höhere P-Gehaltsklasse.

Tabelle 6: Übereinstimmungsgrad (% Flächenanteil) in der Bewertung der Bodenuntersuchungsergebnisse nach Gehaltsklassen zwischen 1-ha-Raster und IR – Bodenuntersuchung in beiden Probenahme-Rastern nur nach CAL-P

		Analytik: nur CAL-P			
Betrieb	Geolog. Herkunft	Schlag	Flächenanteil (%)		
			GK P sinkt im intellig. Raster im Vgl. zum 1 ha-Raster	gleich	GK P steigt im Intellig. Raster im Vgl. zum 1 ha-Raster
Alperstedt	Anmoor	228-01	0,3	21,3	78,4
		arithm. Mittel	0,3	21,3	78,4
	Keuper	126	42,7	47,0	10,3
	Keuper	110-01	14,3	36,2	49,5
		arithm. Mittel	28,5	41,6	29,9
	quartärer Kies	216	55,9	34,9	9,2
	quartärer Kies	231	23,0	33,4	43,6
	quartärer Kies	425	29,8	49,8	20,4
	quartärer Kies	116-01	15,0	51,4	33,6
	quartärer Kies	205-01	15,0	52,6	32,4
	quartärer Kies	232-01	27,8	50,9	21,3
		arithm. Mittel	27,7	45,5	26,8
Ranis	Buntsandstein	Holzweg	10,0	64,6	25,5
	Buntsandstein	Ronneberg	28,9	59,2	11,9
	Buntsandstein	Sandweg	10,4	74,2	15,4
	Buntsandstein	Vogelherd	11,3	72,1	16,7
		arithm. Mittel	15,2	67,5	17,3
	Schiefer	Schmordaer Kreuz	10,7	71,0	18,3
	Schiefer	Heroldshof	13,9	48,6	37,5
	Schiefer	Kalte Schenke Hofmann	34,3	53,6	12,1
		arithm. Mittel	19,6	57,8	22,6
	Zechstein	Grätz	22,6	67,4	9,9
	Zechstein	Dobianer Spitze 1	27,4	50,2	22,4
	Zechstein	Dobianer Spitze 2	13,1	63,5	23,4
	Zechstein	Pfarrberg	39,9	36,0	24,1
Zechstein	Teichwand	21,2	51,3	27,6	
	arithm. Mittel	24,8	53,7	21,5	
Töttelstädt	Keuper	Marbacher Str. links	2,3	55,7	42,0
	Keuper	Töttelstädter Weg	93,8	6,2	0,0
		arithm. Mittel	48,0	31,0	21,0
	Löss, Mittel- und Westth	Pfeifersplan	28,2	41,6	30,2
	Löss, Mittel- und Westth	Ermstedter Weg	32,0	60,9	7,1
		arithm. Mittel	30,1	51,3	18,6
	Muschelkalk	Salzkrippen	22,7	45,6	31,6
	Muschelkalk	Flugplatz	56,9	19,7	23,5
	Muschelkalk	132	36,6	32,4	31,0
	Muschelkalk	Witterdaer Weg	25,2	52,7	22,0
	arithm. Mittel	35,4	37,6	27,0	
Ziegelheim	Löss, Ostthüringen	Adlerburg rechts	0,0	100,0	0,0
	Löss, Ostthüringen	Adlerburg links	0,0	100,0	0,0
	Löss, Ostthüringen	Schömbach links	30,0	66,8	3,2
	Löss, Ostthüringen	Schömbach rechts	2,4	62,8	34,8
	Löss, Ostthüringen	Tabakschuppen	18,5	43,2	38,3
	Löss, Ostthüringen	Oberarnsdorf	3,3	72,2	24,5
	Löss, Ostthüringen	Weber Neuhaus	18,7	68,5	12,8
	Löss, Ostthüringen	Querweg rechts	12,8	56,4	30,7
	Löss, Ostthüringen	Schwabener Holz	7,6	92,4	0,0
	Löss, Ostthüringen	Göpfersdorf links	19,9	70,5	9,5
	arithm. Mittel	11,3	73,3	15,4	

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Vergleiche des Übereinstimmungsgrades (Flächenanteil am jeweiligen Schlag in %) in der Zuordnung zur P-Gehaltsklasse zwischen dem Intelligenten Raster und dem 1-ha-Raster, Analytik: CAL-P plus P-Freisetzung in beiden Rastern

Ähnlich wie in der Gegenüberstellung des Übereinstimmungsgrades der im starren 3-ha-Raster in Relation zum 1-ha-Raster gefundenen räumlichen Veränderung der Anteile der in der P-Gehaltsklasse verbleibenden bzw. sich verschlechternden / verbessernden Flächenanteile nach CAL-P „solo“ und nach CAL-P plus P-Freisetzung kommt es durch die modifizierte Bewertung der pflanzenverfügbaren P-Gehalte unter Zuhilfenahme der PF zu einer Verschlechterung des Übereinstimmungsgrades (Tabelle 7).

Tabelle 7: Übereinstimmungsgrad (% Flächenanteil) in der Bewertung der Bodenuntersuchungsergebnisse nach Gehaltsklassen: Vergleich IR mit 1 ha-Raster – Bodenuntersuchung in beiden Probenahme-Rastern nach CAL-P plus P-Freisetzungsrage

		Analytik: CAL-P+P-Freisetzung			
		Flächenanteil (%)			
Betrieb	Geolog. Herkunft	Schlag	GK P sinkt im intellig. Raster im Vgl. zum 1 ha-Raster	gleich	GK P steigt im Intellig. Raster im Vgl. zum 1 ha-Raster
Alperstedt	Anmoor	228-01	13,6	24,7	61,7
	Keuper	110-01	28,7	35,2	36,1
	quartärer Kies	216	57,9	32,9	9,1
	quartärer Kies	116-01	48,7	26,2	25,0
	quartärer Kies	205-01	30,9	29	40,2
	quartärer Kies	232-01	17,3	37,9	44,8
		arithm. Mittel		38,7	31,5
Ranis	Schiefer	Schmordaer Kreuz	11,7	16,2	72,1
	Schiefer	Kalte Schenke Hofmann	21,2	56,6	22,3
			16,4	36,4	47,2
	Buntsandstein	Ronneberg	15,3	56,3	28,4
Töttelstädt	Keuper	Marbacher Str. links	38	36,3	25,7
	Keuper	Töttelstädter Weg	100	0	0
		arithm. Mittel	69,0	18,2	12,8
	Löss, Mittel- und Westthü	Pfeifersplan	31,0	40,8	28,2
	Löss, Mittel- und Westthü	Ermstedter Weg	17,9	73,1	9,0
		arithm. Mittel	24,4	57,0	18,6
	Muschelkalk	Salzkrippen	48,4	38,0	13,5
	Muschelkalk	132	22,1	33,7	44,2
	arithm. Mittel	35,2	35,9	28,9	
Ziegelheim	Löss, Ostthüringen	Schömbach links	25,5	74,5	0,0
	Löss, Ostthüringen	Schömbach rechts	40,0	41,1	18,9
	Löss, Ostthüringen	Tabakschuppen	18,5	43,2	38,3
	Löss, Ostthüringen	Weber Neuhaus	34,2	48,9	16,9
	Löss, Ostthüringen	Querweg rechts	12,8	51,7	35,5
	Löss, Ostthüringen	Schwabener Holz	39,5	59,1	1,4
	Löss, Ostthüringen	Göpfersdorf links	19,9	61,1	18,9
		arithm. Mittel	27,2	54,2	18,6

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

In 22 auswertbaren Datensätzen (Schlägen) wird im Mittel bei lediglich 41,1% der untersuchten Fläche die im 1-ha-Raster festgestellte P-Gehaltsklasse auch im intelligenten Raster wiedergefunden. Auf ca. einem Drittel der Fläche (32,3%) verschlechtert sich die Bewertung des P-Gehaltes durch die Anwendung des IR im Vergleich zum 1-ha-Raster. Auf einem reichlichen Viertel der Fläche verbessert sich die P-Gehaltsklasse nach Beprobung im IR im Vergleich zur Bewertung der Ergebnisse nach einer Probenahme im 1-ha-Raster. Übereinstimmungsgrade > 50% werden nur auf den ziemlich homogenen Lössböden sowie dem ebenfalls einheitlichen Buntsandstein-Standort erzielt.

Die insgesamt geringen Übereinstimmungsgrade (Flächenanteile mit gleicher P-Gehaltsklasse) in den Vergleichen des IR mit dem 1-ha-Raster sind zunächst nur ein Hinweis, dass ein an verschiedenen Bodenparametern abgeleitetes unregelmäßiges Probenahme-Raster zu ganz anderen Untersuchungsergebnissen führen kann als ein starres Raster.

Im Projekt wurde das 1-ha-Raster als „Basisraster“ angenommen. Letztlich kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse zu den sich in Abhängigkeit vom Proben-Raster ergebenden sehr unterschiedlichen Ergebnisse nicht entschieden werden, ob die Untersuchungsergebnisse nach IR besser die räumliche Verteilung des pflanzenverfügbaren P im Feld wiedergeben als das 1-ha-Raster oder umgekehrt.

Inwiefern die beobachteten Unterschiede in der Zuordnung von Flächenanteilen der beprobten Schläge in die Gehaltsklassen tatsächlich zu einer im Sinne der P-Ernährung der Kulturen optimaleren P-Verteilung bei einer teilflächenspezifischen Düngung führen, können letztlich nur die Ergebnisse der On-Farm-Versuche zeigen:

Nur wenn in den Feldversuchen die „Maximal-Variante“ (Düngung auf Grundlage der teilflächenspezifischen modifizierten P-Gehalte (CAL-P plus P-Freisetzung) nach komplexer ("Intelligenter") Probenahme, Berücksichtigung von 3 Ertragszonen) entweder

- im Ertrag von den anderen Varianten statistisch gesichert positiv abhebt oder
- bei einem Ertrag, der mit dem der anderen Düngungsvarianten identisch ist, einen geringeren P-Einsatz aufweist,

ist der mit dem IR zusammenhängende Aufwand (Datensammlung und -aufbereitung, Datenverschnitt, Ableiten der Probenahmeflächen, teilflächenspezifischen Probenahme) gerechtfertigt.

Klare Empfehlungen, auf welchem Standort / bei welcher Bodengeologie welche Rasterung zu präferieren ist, kann aus den vorliegenden Daten nicht klar abgeleitet werden.

Mit einer gewissen Vorsicht kann lediglich geschlussfolgert werden, dass die Wahl des Rasters auf vergleichsweise homogenen Standorten (Lösse, leichtere Buntsandsteinböden, eingeschränkt auch Schiefer-Verwitterungsböden) weniger Einfluss auf die gefundene räumliche Verteilung der P-Versorgung des Bodens ausübt als auf schweren Verwitterungsböden (Muschelkalk, Keuper, Zechstein-Kalke) und quartären Kiesen.

3.2 Bodenuntersuchungsergebnisse

3.2.1 CAL-P und P-Freisetzungsrate

Da Schläge aus insgesamt nur vier Unternehmen untersucht wurden, ist davon auszugehen, dass eine Gefahr zum „Überprägen“ des vorhandenen Einflusses der geologischen Herkunft des Bodens durch Betriebsspezifika besteht. Alle folgenden Aussagen und gefundenen Trends zu den Bodenuntersuchungsergebnissen sind unter diesem Vorbehalt zu sehen und zu interpretieren.

Bodengeologie und Betriebsspezifika (Viehbesatz und resultierendes Aufkommen an betriebseigenen Wirtschaftsdüngern, „Import“ von organischen Düngern) beeinflussen die Ausstattung der Schläge mit CAL-P.

Die Untersuchungsergebnisse des CAL-P (gesamter Datenpool) rangieren in der übergroßen Mehrzahl zwischen 1,5 und 8,0 mg P/100 g lufttrockener Boden (Abbildung 7). Im Mittel rangieren die CAL-P-Gehalte der untersuchten Proben im niedrigen bis mittleren (optimalen) Bereich (Tabelle 8). Die P-Freisetzungsrate konzentriert sich auf die Spanne von 50 bis 750 $\mu\text{g P/kg Boden}\cdot\text{min}$.

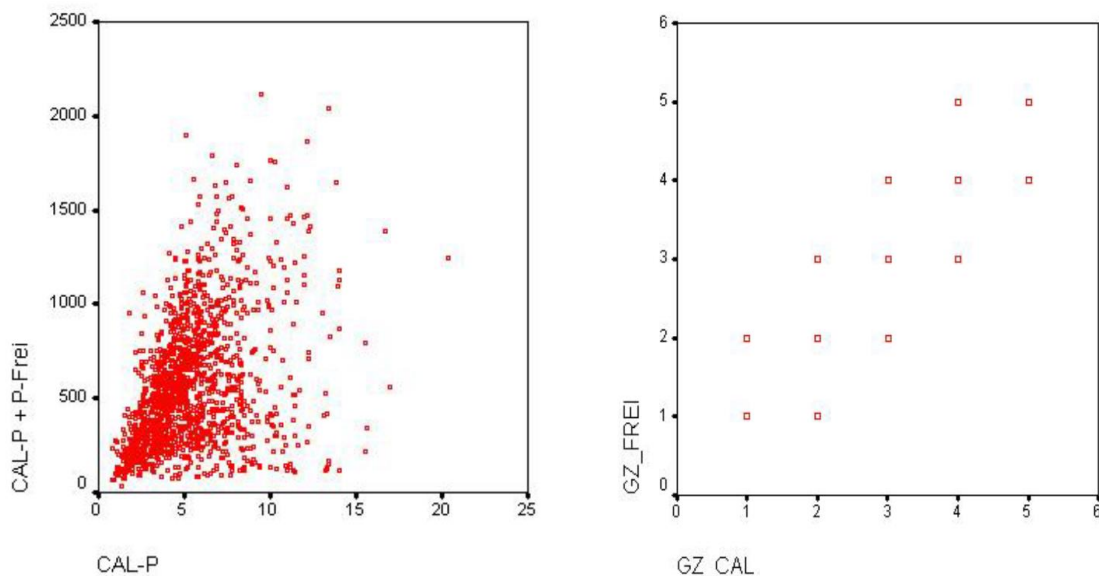


Abbildung 7: Gehalte an CAL-P (mg P/100 g lufttrockener Boden) und korrespondierende P-Freisetzungsraten ($\mu\text{g P/kg Boden}\cdot\text{min}$) - alle verfügbaren Wertepaare CAL-P und P-Freisetzungsrate) sowie Veränderung der Einstufung in die Gehaltsklassen infolge der Neubewertung des CAL-P mit Hilfe der P-Freisetzungsrate. Erläuterung: Gehaltsklassen (GK) wurden aus rechentechnischen Gründen in Gehalts-Zahlen transformiert (GK A = GZ 1, GK B = GZ 2 GK E = GZ 5).

Quelle: U.A.S GmbH, 2022

Mit Ausnahme der Gehaltsklasse A (sehr niedrige P-Versorgung) - hier kann es keine schlechtere Bewertung mehr geben - treten im Zuge der modifizierten Einstufung der CAL-P-Gehalte in die Gehaltsklassen mit Hilfe der P-Freisetzungsrate Verschiebungen zwischen

den Gehaltsklassen in Richtung der besseren, wie auch der niedrigeren Gehaltsklasse auf (Abbildung 7).

Es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den gepaarten Proben CAL-P vs. CAL-P plus P-Freisetzung (P-FREI). Die unter Einbeziehen der P-Freisetzungsrates generierten Gehaltsklassen liegen insbesondere im mittleren und oberen Wertebereich **gesichert über** den aus den CAL-P-Werten abgeleiteten Gehaltsklassen (Tabelle A-1 im Anhang).

Am höchsten ist der P-Versorgungszustand auf den untersuchten anmoorigen Feldstücken (Gehaltsklasse C), gefolgt von den untersuchten Muschelkalkverwitterungsböden. Letzteres ist für diese Bodengeologie nicht typisch und steht am Standort Töttestädt sowohl mit der P-Zufuhr durch organische Dünger (Gärrest Rind und Rindermist) und einer bedarfsgerechten mineralischen P-Düngung im Zusammenhang. Ebenfalls in der Gehaltsklasse C sind im Mittel die quartären Kiese sowie die wenig degradierten Löss in Mittel- / Westthüringen. Eine niedrige P-Versorgung weisen die Böden der geologischen Herkunft (degradierter) Ostthüringer Löss sowie Schiefer-, Buntsandstein- und Zechstein-Verwitterung auf.

Tabelle 8: Mittlere CAL-P-Gehalte der untersuchten Feldstücke in Abhängigkeit von der Häufigkeit der in der Vergangenheit verwerteten organischen Düngung

Geologische Herkunft des Bodens	CAL-P mg/100 g lt. Boden*		
	Frequenz der organischen Düngung		Gesamtergebnis u. Gehaltsklasse P
	wenig	regelmäßig	
Anmoor	nicht vorhanden	6,9	6,9 C
Buntsandstein	3,7	5,4	4,9...B
Keuper	5,0	5,7	5,1...C
Löss Ostthüringen	4,6	5,3	5,0 B
Muschelkalk	6,6	6,2	6,4 C
quartärer Kies	9,2	5,4	5,9 C
Schiefer	2,8	4,1	3,3 B
Zechstein	3,3	3,9	3,5 B
Löss Mittel-/Westthüringen	5,5	5,4	5,5 C
Gesamtergebnis	4,6	5,4	5,1 C

*lt Boden = lufttrockener Boden

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Im Regelfall sind die Gehalte von Flächen, die einer regelmäßigen organischen Düngung unterworfen sind, besser mit CAL-P ausgestattet als die Schläge mit eher sporadischer oder fehlender organischer P-Zufuhr. Dies ist für die Geologien Buntsandstein, Ostthüringer Löss und Schiefer deutlich sowie für Keuper und Zechstein in der Tendenz zu erkennen (Tabelle 8). Die Löss Mittel- und Westthüringens zeigten sich indifferent bei unterschiedlich häufiger organischer Düngung.

Ausnahmen von der Relation „CAL-P mit organischer Düngung > CAL-P ohne organische Düngung“ traten auf Muschelkalk-Verwitterung und quartären Kiesen auf. Hier kehrte sich die Relation der CAL-P-Gehalte zwischen beiden Gruppen um. Es handelt sich in den betreffenden Fällen sehr wahrscheinlich um Ausreißer, bei denen mineralische P-Gaben in den

trockenen Jahren 2018 bis 2020 unvollständig verwertet wurden oder Spuren der infolge Trockenheit nicht vollständig umgesetzten organischen Dünger in die Proben gelangten. Da die Proben teilweise aus dem Zeitraum der Mäusekalamität 2019/20 stammen, können auch Fehler durch unerkanntes Erfassen von Mäuseexkrementen bei der Probenahme zu den „Ausreißern“ beigetragen haben.

Werden die CAL-P-Gehalte in Relation zu den P-Gesamtgehalten gestellt, zeigt sich erwartungsgemäß, dass nur ein Bruchteil des gesamten P-Vorrates pflanzenverfügbar ist (Abbildung 8).

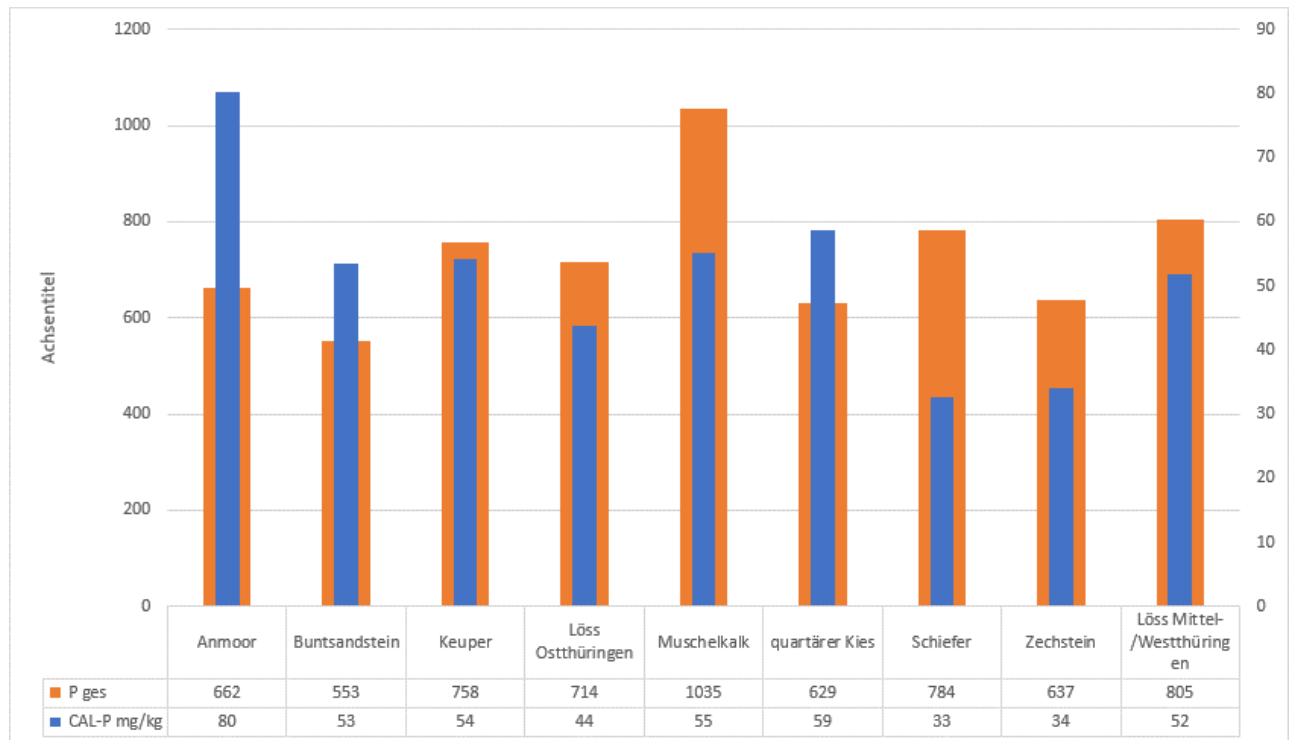


Abbildung 8: CAL-P und P-Gesamtgehalte geordnet nach geologischer Herkunft der Böden
Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Die Anteile des CAL-P am Gesamt-P variieren zwischen 4,2% (Schiefer-Verwitterung) und 12,1% (Anmoor). Das Gros der Anteile liegt zwischen 5,0 und 10,0%.

Die P-Freisetzungsrates beschreibt, wieviel Phosphor / Zeiteinheit aus dem labil gebundenen P-Pool des Bodens in einer bestimmten Zeiteinheit nachfließen kann. Dies ist in Perioden hoher P-Aufnahme durch die Kultur (meist Perioden mit hohem Biomasse-Zuwachs), aber auch in trockenen Abschnitten der Vegetation mit eingeschränkter P-Verfügbarkeit von Interesse.

Werden die CAL-P-Ergebnisse um die P-Freisetzungsrates ergänzt (ZORN et al., 2018), ist ein Muster in der Ausstattung mit pflanzenverfügbarem/potenziell pflanzenverfügbarem Phosphor in Abhängigkeit von der Bodengeologie zu erkennen:

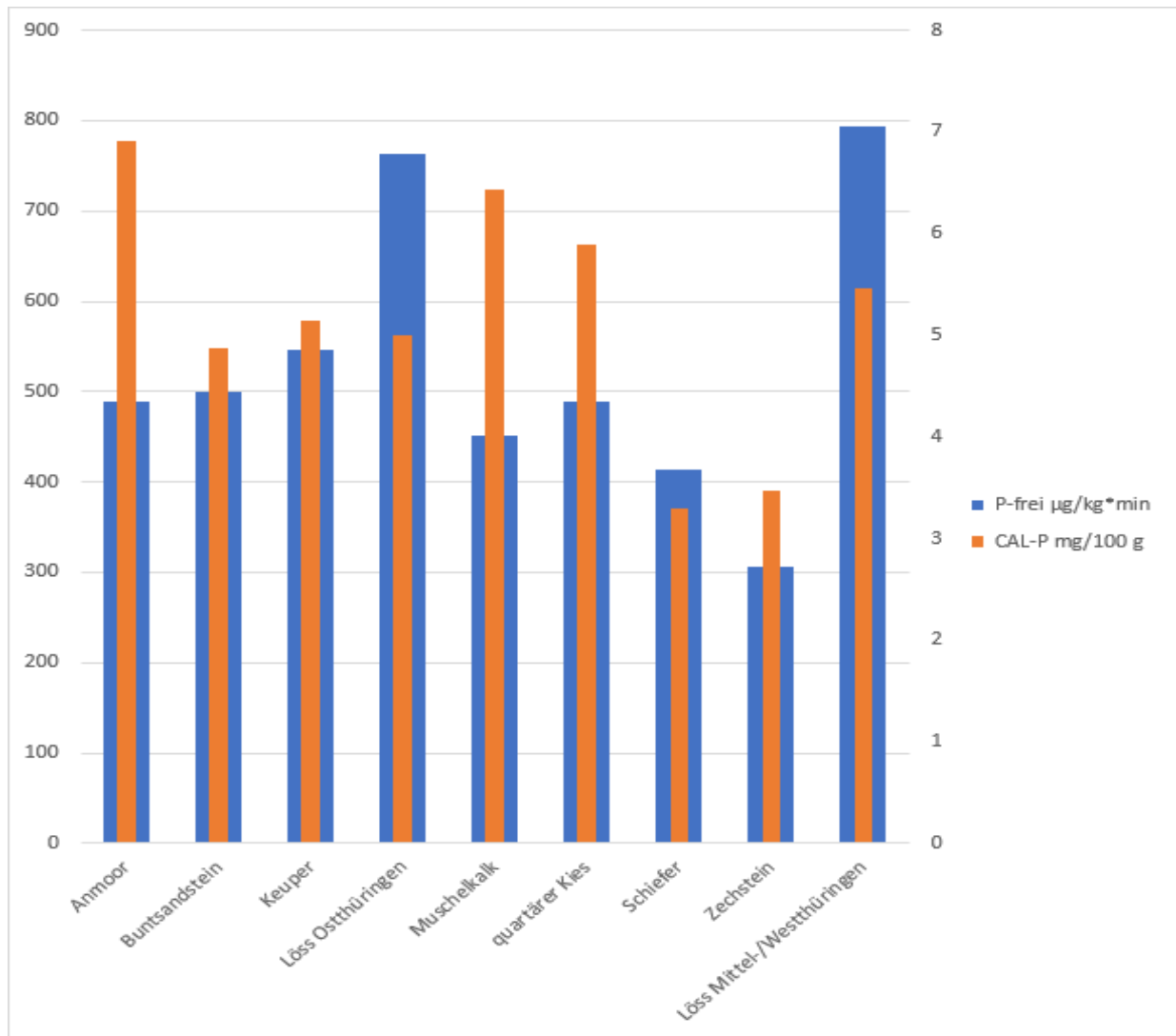


Abbildung 9: CAL-P und P-Freisetzungsraten geordnet nach geologischer Herkunft der Böden
Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Bei mittleren (Mittel- / Westthüringen) bzw. mittleren bis niedrigen (Ostthüringen) CAL-P-Gehalten weisen die untersuchten Löss-Standorte unabhängig von ihrer regionalen Zuordnung (degradierte Löss Ostthüringens, wenig degradierte Löss Mittel- und Westthüringens) hohe P-Freisetzungsraten auf. Im Regelfall verbessert sich die Einstufung nach Gehaltsklasse, wenn die PF als ergänzender Parameter einbezogen wird. Dies kann für die betreffenden Feldstücke dahingehend interpretiert werden, dass die P-Versorgung der landwirtschaftlichen Kulturen gesichert ist. Ein Ersatz der mit der Ernte realisierten P-Abfuhr wird ausreichend sein, um die P-Ernährung der angebauten Fruchtarten mittelfristig zu sichern. Ein kurzzeitiges Unterlassen der P-Düngung (z.B. in Perioden mit hohen Preisen für mineralische P-Dünger oder mangelnder Verfügbarkeit von organischen Düngern) bewirkt sehr wahrscheinlich keine durch P-Mangel bedingten Ertragsverluste.

Die in der Tabelle 9 zusammengefassten Daten verdeutlichen dies ebenfalls. Die Tabelle zeigt für Schläge auf Löss auf Schlagebene im 1-ha-Raster, auf welchem Anteil, der im einzelnen Schlag untersuchten Fläche sich nach Neubewertung des CAL-P durch die „Neujustierung“ mit Hilfe der P-Freisetzungsrates die Einstufung in die Gehaltsklasse verbessert oder verschlechtert. Da der Auswertung das 1-ha-Raster zugrunde liegt, ist der Flächenanteil in

etwa mit der Probenzahl identisch. Die Verbesserung der Einstufung tritt im Minimum auf zwei Dritteln der Fläche ein und ist im Maximum sogar für den gesamten Schlag nachweisbar.

Tabelle 9: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrate für die untersuchten Löss-Standorte

Schlag-Nr.	Geolog. Herkunft	Flächenanteil (%)		
		GK CAL+PF ist höher als GK nur CAL	GK bleibt gleich	GK CAL+PF ist niedriger als GK nur CAL
1510	Löss, Ostthüringen	66,7	33,3	0,0
1520	Löss, Ostthüringen	100,0	0,0	0,0
2120	Löss, Ostthüringen	100,0	0,0	0,0
3110	Löss, Ostthüringen	95,9	4,1	0,0
5310	Löss, Ostthüringen	88,9	11,1	0,0
5410	Löss, Ostthüringen	95,2	4,8	0,0
8210	Löss, Ostthüringen	95,2	4,8	0,0
8310	Löss, Ostthüringen	90,6	6,3	3,1
109	Löss, Mittel- und Westthüringen	95,0	0,0	5,0
35-3	Löss, Mittel- und Westthüringen	77,8	0,0	22,2
82-1	Löss, Mittel- und Westthüringen	89,0	5,5	5,5

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Vergleichsweise niedrige P-Freisetzungsraten ($< 400 \mu\text{g P/kg}\cdot\text{min}$) bei gleichzeitig geringer CAL-P-Ausstattung weisen die Feldstücke mit Zechstein-Kalk als Muttergestein auf. Die betreffenden Flächen sind in Bezug auf das P-Angebot für die angebauten Kulturen „leer“! Eine gezielte P-Zufuhr dürfte auf den betreffenden Flächen einen Ertragszuwachs bewirken.

Der Trend zur Verschlechterung der Einstufung in die P-Gehaltsklasse durch Hinzuziehen der P-Freisetzung zeigt sich auch (mit einer Ausnahme) für die Schläge auf Muschelkalk-Verwitterung (Tabelle 10), obwohl auf den untersuchten Flächen CAL-P und P-Freisetzung im Mittel etwas höher ausfielen als auf Zechstein-Kalk.

Das Ergebnis überrascht, da theoretisch größere P-Mengen („Reserven“) in Ca-Phosphaten vorliegen könnten, aus denen P entsprechend „nachfließt“. Aus dem „Muster“ bricht lediglich ein Schlag aus, bei dem der Verdacht besteht, dass irrtümlich im Vorfeld der Probenahme eine mineralische P-Düngung mit TSP erfolgte.

Zu hinterfragen ist, ob CAL-P (die modifizierte CAL-Methode nach ZORN für Carbonat-reiche Böden mit hohem Säurepuffer-Vermögen wurde leider nicht angewendet!) plus P-Freisetzung tatsächlich für die Böden dieser beiden geologischen Herkünfte immer hinreichend beschrieben haben, wieviel P pflanzenverfügbar werden kann, zumal bekannt ist, dass Pflanzen über das Ausscheiden von Protonen oder organischen Säuren Einfluss auf die P-Löslichkeit nehmen können und möglicherweise Ca-Phosphate angreifen.

Tabelle 10: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrates für die untersuchten Muschelkalk- und Zechstein-Standorte

Schlag-Nr.	Geolog. Herkunft	Flächenanteil (%)		
		GK CAL+PF ist höher als GK nur CAL	GK bleibt gleich	GK CAL+PF ist niedriger als GK nur CAL
6	Muschelkalk	4,2	12,5	83,3
50	Muschelkalk	62,9	0,0	37,1
119	Muschelkalk	0,0	11,1	88,9
132	Muschelkalk	0,0	16,6	83,4
144100	Zechstein	5,1	35,0	59,9
150200	Zechstein	0,0	66,7	33,3
150201	Zechstein	0,0	33,3	66,7

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Auf einem nennenswerten Flächenanteil verschlechtert sich die Bewertung des CAL-P nach Hinzuziehen von PF auf den quartären Kiesen (Tabelle 11). Allerdings weisen auch diese hohe pH-Werte auf und sind Carbonat-reich. Die Prozentzahlen verdeutlichen trotzdem, dass diese Böden eine geringe P-Nachlieferungsdynamik aus dem labilen P-Pool haben und bei geringer CAL-P-Ausstattung insgesamt arm an pflanzenverfügbarem P sind. Das „Abwandern“ von Flächen in eine schlechtere Gehaltsklasse ist teilweise erheblich. Ein Schlag bricht aus dem Trend aus. Dieser erhielt vor der Probenahme eine P-Unterfußdüngung.

Tabelle 11: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrates für die untersuchten quartären Kiese

Schlag-Nr.	Geolog. Herkunft	GK CAL+PF ist höher als GK nur CAL	gleich	GK CAL+PF ist niedriger als GK nur CAL
216	quartärer Kies	0,0	8,3	91,7
116-01	quartärer Kies	85,5	12,1	2,4
205-01	quartärer Kies	36,3	16,1	47,6
232-01	quartärer Kies	25,6	20,5	53,8

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Die auf Schieferverwitterung liegenden Flächen weisen im Mittel ebenfalls eine geringe Ausstattung mit CAL-P auf. Die P-Freisetzungsraten sind mittel bis gering. Es kann hinterfragt werden, ob die speziellen P-Sorptionsverhältnisse mit hohen Anteilen an Fe-, Mn- und Al-Oxiden / Hydroxiden bei der Ausprägung der P-Freisetzung eine Rolle spielen. Entsprechende Hinweise können sich in den Untersuchungs-Ergebnissen von P-Sättigung und P-Speicherkapazität finden (Tabelle 12).

Zunächst erscheinen die Veränderungen der Einstufung in die P-Gehaltsklassen auf Schiefer ungerichtet. Vorbehaltlich der leider nur geringen Anzahl auswertbarer Feldstücke deutet sich nach Einbeziehen der Frequenz der organischen Düngung an, dass die Klassifizierung des P-Gehaltes auf wenig mit organischer Düngung versorgten Flächen eher gleichbleibt oder verschlechtert, während sie sich auf regelmäßig organisch gedüngten Flächen verbessert.

Tabelle 12: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrates für die untersuchten Schiefer-Verwitterungsstandorte

Schlag-Nr.	Geolog. Herkunft	Häufigkeit/Menge der organischen Düngung	Flächenanteil (%)		
			GK CAL+PF ist höher als GK nur CAL	GK bleibt gleich	GK CAL+PF ist niedriger als GK nur CAL
105110	Schiefer	wenig	16,7	66,7	16,7
116110	Schiefer	regelmäßig	87,9	7,2	4,8
120110	Schiefer	wenig	0,0	33,3	66,7
131100	Schiefer	regelmäßig	75,8	20,6	3,6

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Auf drei der vier untersuchten leichten Buntsandstein-Standorte führt die Neubewertung des CAL-P unter Zuhilfenahme der PF auf einem Flächenanteil > 50% zu einer Verbesserung der Gehaltsklasse (Tabelle 13). Auch hier besteht (ähnlich den Lössen) auf drei der vier untersuchten Schläge ein Einsparpotenzial für den P-Aufwand, der mit der Nutzung der P-Freisetzungsrates zur Modifizierung der Einstufung des CAL-P offengelegt werden kann.

Auf den zwei anmoorigen Standorten verschlechterte sich auf der Hälfte bzw. drei Vierteln der Fläche die Bewertung von CAL-P durch das Hinzuziehen der P-Freisetzungsrates (Tabelle 13).

Tabelle 13: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrates für die untersuchten Buntsandstein-Verwitterungsstandorte

Schlag-Nr.	Geolog. Herkunft	Flächenanteil (%)		
		GK CAL+PF ist höher als GK nur CAL	GK bleibt gleich	GK CAL+PF ist niedriger als GK nur CAL
166100	Buntsandstein	100,0	0,0	0,0
178110	Buntsandstein	71,8	19,5	8,8
180110	Buntsandstein	53,3	46,7	0,0
183010	Buntsandstein	13,9	44,4	41,7
207	Anmoor	33,3	18,5	48,1
228-01	Anmoor	6,5	19,5	74,0

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Keuper-Verwitterungsstandorte verhalten sich bezüglich der Veränderung der Gehaltsklasse durch die Neubewertung des CAL-P unter Zuhilfenahme der PF indifferent. Ein sicherer Zusammenhang zur Frequenz der organischen Düngung ist nicht zu erkennen (Tabelle 14).

Tabelle 14: Veränderung der Gehaltsklasse für den pflanzenverfügbaren P-Gehalt infolge der Neubewertung des CAL-P mittels P-Freisetzungsrates für die untersuchten Keuper-Verwitterungsstandorte

Schlag-Nr.	Geolog. Herkunft	Häufigkeit/Menge der organischen Düngung	GK CAL+PF ist höher als GK nur nach CAL	GK bleibt gleich	GK CAL+PF ist niedriger als GK nur nach CAL
3	Keuper	wenig	25,2	25,5	49,3
301	Keuper	regelmäßig	20,0	40,0	40,0
110-01	Keuper	regelmäßig	54,9	36,1	9,0
303-00	Keuper	wenig	78,7	12,1	9,1
79-3	Keuper	wenig	83,3	8,3	8,3

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Für alle Verwitterungs-Standorte (einschließlich Schiefer) scheint es im Besonderen angebracht, die Untersuchung auf CAL-P mit der Analyse der P-Freisetzungsrates zu ergänzen. Mit dieser Zusatzinformation wird es möglich, Rückschlüsse bezüglich des zukünftigen P-Düngungsaufwandes zu erhalten. Handelt es sich um Flächen, auf denen ein niedriger CAL-P-Gehalt von einer niedrigen P-Freisetzung flankiert wird, sollte eine gezielte Zufuhr von mineralischem / organischem P oberhalb der realisierten P-Abfuhr erfolgen. Die betreffenden Flächen sind wie für die untersuchten Schläge auf Zechstein-Verwitterung sehr wahrscheinlich „Sanierungsfälle“ für den Erhalt ihrer Ertragsfähigkeit.

Umgekehrt kann aus Kombinationen von mittlerem CAL-P (Gehaltsklasse C oder obere Gehaltsklasse B) und mittlerer oder sogar hoher P-Freisetzung abgeleitet werden, dass eine P-Zufuhr in Höhe der P-Abfuhr zumeist ausreicht, damit P mittelfristig nicht zum ertragslimitierenden Faktor wird.

Wird über alle Bodengeologien hinweg betrachtet, welche Verschiebungen zwischen den Gehaltsklassen die Neubewertung des CAL-P durch die Ergänzung mit der P-Freisetzungsrates bewirkt (Abbildung 10), wird deutlich, dass insbesondere in den Gehaltsklassen B und C nach CAL-P große Probenzahlen nach Hinzuziehen der P-Freisetzungsrates in die jeweils höhere P-Gehaltsklasse „wandern“.

Von 720 Proben, die nach alleiniger Bewertung nach CAL-P in die Gehaltsklasse B (niedriger pflanzenverfügbare P-Gehalt) eingestuft wurden, „schoben“ sich mehr als die Hälfte der Proben (57,8%) durch die Neubewertung CAL-P+P-Freisetzung in die Gehaltsklasse C.

Von 458 nach CAL-P mit Gehaltsklasse C (mittlerer/optimaler pflanzenverfügbare P-Gehalt) bewerteten Proben wechselten durch das Einbeziehen der P-Freisetzungsrates ebenfalls mehr als die Hälfte in die höhere Gehaltsklasse D (hoher pflanzenverfügbare P-Gehalt).

Werden alle in den einzelnen geologischen Herkünften der Böden zur Verfügung stehenden Wertepaare „Gehaltsklasse nach ausschließlicher CAL-Untersuchung“ und „Gehaltsklasse nach CAL-P+P-Freisetzung“ einer deskriptiven Statistik unterworfen, lassen sich folgende für

die einzelnen Bodengeologien charakteristischen Veränderungen erkennen (Tabelle A-2 bis Tabelle A-11 im Anhang):

Anmoor:

Die Einstufung in die Gehaltsklasse verschlechtert sich signifikant durch die Modifizierung der Einstufung des CAL-P mit der PF.

Mittlerer und unterer Buntsandstein:

Die Einstufung in die Gehaltsklasse verbessert sich signifikant durch die Modifizierung der Einstufung des CAL-P mit der PF.

Tonreiche Keuper-Verwitterungsböden (Bodengruppe 5):

Die Einstufung in die Gehaltsklasse verbessert sich signifikant durch die Modifizierung der Einstufung des CAL-P mit der PF.

Gute Löss Mittel-/Westthüringens:

Die Einstufung in die Gehaltsklasse verbessert sich signifikant durch die Modifizierung der Einstufung des CAL-P mit der PF.

Gute Löss Ostthüringens (BWZ > 60):

Die Einstufung in die Gehaltsklasse verbessert sich signifikant durch die Modifizierung der Einstufung des CAL-P mit der PF.

Schlechte Löss Ostthüringens (BWZ < 60):

Die Einstufung in die Gehaltsklasse verbessert sich in hohem Maß und signifikant durch die Modifizierung der Einstufung des CAL-P mit der PF.

Muschelkalk:

Die Einstufung in die Gehaltsklasse verschlechtert sich signifikant durch die Modifizierung der Einstufung des CAL-P mit der PF.

Quartäre Kiese:

Die Einstufung in die Gehaltsklasse verändert sich nicht gerichtet, wenn CAL-P durch die P-Freisetzungsrates ergänzt und neu bewertet wird.

Schiefer:

Die Einstufung in die Gehaltsklasse verbessert sich in hohem Maß und signifikant durch die Modifizierung der Einstufung des CAL-P mit der PF.

Zechstein-Kalk:

Die Einstufung in die Gehaltsklasse verschlechtert sich signifikant durch die Modifizierung der Einstufung des CAL-P mit der PF.

Diese „Wanderbewegungen“ signalisieren, dass

- auf großen Teilen der untersuchten Flächen von den Kulturen erschließbare P-Reserven vorhanden sind und
- das Einbeziehen der P-Freisetzung als Zusatzuntersuchung zum CAL-P ein Weg ist, die P-Zufuhr im Sinne einer Einsparung weiter zu optimieren.

Die Abbildung 10 verdeutlicht aber auch, dass in den niedrigen Gehaltsklassen B und A eine nennenswerte Probenzahl vorhanden ist, deren Bewertung sich mit der P-Freisetzungsrate verschlechtert.

Darunter sind Proben in der Gehaltsklasse A (sehr niedriger pflanzenverfügbare P-Gehalt) deren P-Freisetzungsrate so gering ist, dass sie theoretisch in eine (nicht vorhandene!) noch niedrigere Gehaltsklasse eingestuft werden müssten (in der Abbildung mit A* bezeichnet).

Aus der Gehaltsklasse B wandert außerdem fast ein Fünftel der Proben nach Hinzuziehen der P-Freisetzungsrate in die Gehaltsklasse A. Gemeinsam mit den in der Gehaltsklasse A rangierenden Proben sind diese als besonders kritisch in Bezug auf eine ertragslimitierende Wirkung zu sehen, denn nach der Bewertung nach CAL-P+P-Freisetzung sind die zu diesen Proben gehörenden Flächen im wahrsten Sinn des Wortes „leer“.

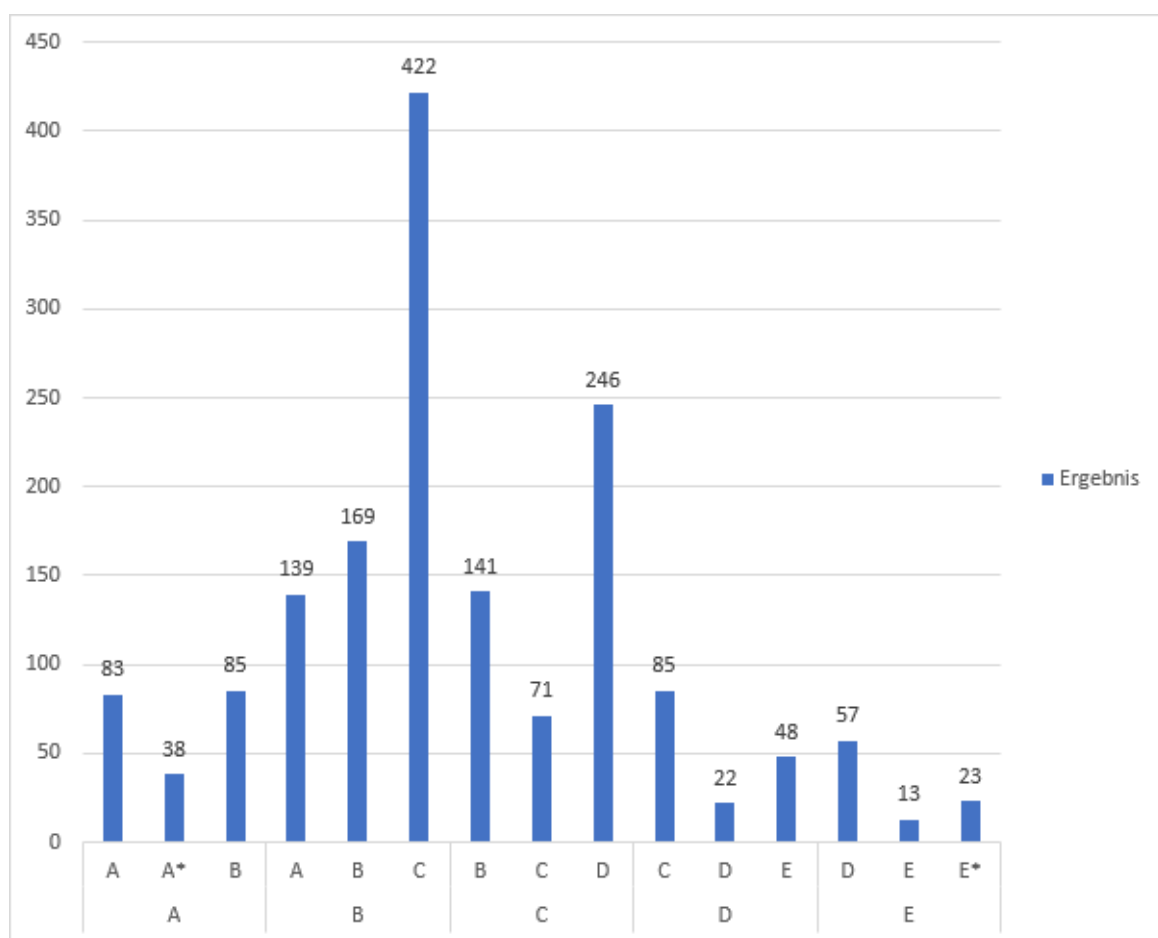


Abbildung 10: Einstufung der Bodenproben nach CAL-P (untere Gehaltsklassen-Bezeichnung an der X-Achse) und Neubewertung nach CAL-P+P-Freisetzungsrate (obere Bezeichnung). Die Säulen und aufsitzenden Zahlen zeigen, wie viele Proben nach CAL-P+PF in der ursprünglichen Gehaltsklasse verblieben bzw. die Gehaltsklasse nach oben (Verbesserung) oder unten (Verschlechterung) wechselten.

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Werden (wieder auf der Basis des 1-ha-Rasters) die Mittelwerte der einzelnen Betriebe für CAL-P und die Höhe der P-Freisetzungsrate kalkuliert, zeigt sich, dass jedes Unternehmen für beide Parameter „sein spezielles“ Niveau aufweist (Tabelle 15).

Tabelle 15: Mittlere CAL-P-Gehalte und P-Freisetzungsraten der Probenahme im 1 ha-Raster gegliedert nach Landwirtschaftsbetrieben

Betrieb	CAL-P (mg P/100 g lt. Boden)	P-Freisetzungsrate ($\mu\text{g P/kg Boden}\cdot\text{min}$)
A&R Agrarhof Alperstedt	5,5	507
APL Ranis-Ludwigshof e.G.	3,7	413
Agrar GmbH Töttelstädt	6,2	653
Agrar GmbH Ziegelheim	5,0	875

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Wird die Auswirkung der Häufigkeit der organischen Düngung auf Betriebsebene auf die P-Freisetzungsraten betrachtet (1-ha-Raster), wird deutlich, dass eine regelmäßige organische Düngung die Freisetzungsraten gegenüber Flächen mit eher sporadischer organischer P-Zufuhr steigert (Tabelle 16).

Die Aussagekraft dieser Tabelle wird allerdings dadurch geschmälert, dass nicht alle Boden-geologien in gleicher Zahl und mit bzw. ohne organische Düngung in gleicher Frequenz in die Mittelwertbildung eingingen.

Tabelle 16: Mittlere P-Freisetzungsraten der Probenahme im 1-ha-Raster in Abhängigkeit von der Frequenz der organischen Düngung gegliedert nach Landwirtschaftsbetrieben

Betrieb	P-Freisetzungsraten ($\mu\text{g P/kg Boden}\cdot\text{min}$)	
	Wenig organisch gedüngte Flächen	Regelmäßig organisch gedüngte Flächen
A&R Agrarhof Alperstedt	402	522
APL Ranis-Ludwigshof e.G.	309	707
Agrar GmbH Töttelstädt	636	705
Agrar GmbH Ziegelheim	710	977

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

In der Tabelle 17 sind die Ergebnisse aller Einzelschläge zusammengefasst, von denen im 1-ha-Raster vollständige Datensätze aus CAL-P und P-Freisetzungsraten zur Verfügung standen. Niedrige P-Freisetzungsraten sind gelb gekennzeichnet.

Es zeigt sich in dieser Tabelle, dass sich niedrige P-Freisetzungsraten auf die Unternehmen A&R Alperstedt sowie die APL Ludwigshof konzentrieren.

In dieser Tabelle fällt auch auf, dass sich niedrige P-Freisetzungsraten auf Zechstein- und Schieferverwitterungsböden sowie teilweise auf quartäre Kiese sowie auf Muschelkalk- und Keuper-Standorte konzentrieren.

Außerdem wurde untersucht, ob sich der Anstieg der PF infolge regelmäßiger organischer Düngung in allen in das Projekt einbezogenen Bodengeologien nachweisen lässt.

Der Anstieg der PF im Zusammenhang mit regelmäßiger organischer Düngung bestätigt sich für die Löss (Ausnahme schlechte Löss-Standorte Ostthüringens), die quartären Kiese sowie die an Sorptionsplätzen in Form von Fe-, Al- und Mn-Oxiden/-hydroxiden reichen Böden aus Buntsandstein und Schiefer (Abbildung A-1 bis Abbildung A-10 im Anhang).

Auf den Carbonat-Böden mit viel freiem Calcium und hohen pH-Werten (i.d.R. $\geq 7,2$), die aus Muschelkalk, Keuper und Zechsteinkalk entstanden, beeinflusste die organische Düngung die PF nicht.

Für Anmoor standen nur Proben von regelmäßig organisch gedüngten Flächen zur Verfügung, sodass kein entsprechender Vergleich vorgenommen werden konnte.

Tabelle 17: Veränderung der Bewertung des CAL-P durch Einbeziehung der P-Freisetzungsrates (Ergebnisse der Probenahme im 1-ha-Raster)

Betrieb	geolog. Herkunft Boden	Frequenz OD		Fläche	CAL-P	PF	GK nach CAL	GK nach CAL+PF	Veränderung durch Einbeziehen PF (Verbesserung/Verschlechterung)
		Frequenz der organischen Düngung wenig/regelmäßig	OD						
Alperstedt				283,7	5,5	507	C	C	unverändert
303	Keuper	wenig		32,9	4,0	599	B	C	verschlechtert
216	quartärer Kies	wenig		23,0	9,9	218	D	C	verschlechtert
207	Anmoor	regelm.		27,1	8,2	723	D	D	unverändert
228-01	Anmoor	regelm.		61,5	5,5	390	C	B	verschlechtert
301	Keuper	regelm.		10,0	4,0	317	B	A	verschlechtert
110-01	Keuper	regelm.		22,2	5,7	681	C	D	verbessert
116-01	quartärer Kies	regelm.		42,5	4,1	780	B	C	verbessert
205-01	quartärer Kies	regelm.		24,8	3,4	289	B	B	unverändert
232-01	quartärer Kies	regelm.		39,8	5,6	424	C	B	verschlechtert
Ranis				314,9	3,7	413	B	B	unverändert
105110 (Oberfeld)	Schiefer	wenig		50,5	3,6	341	B	B	unverändert
120110 (Schm. Kreuz)	Schiefer	wenig		27,9	2,7	259	B	B	unverändert
120110 (Schm. Kreuz)	Schiefer	wenig		27,9	2,7	259	B	B	unverändert
150200 (Dobianer Spitze)	Zechstein	wenig		15,9	3,1	238	B	A	verschlechtert
166100 (Holzweg)	Buntsandstein	wenig		10,0	5,1	708	C	D	verbessert
183010 (Hütt. Grund)	Buntsandstein	wenig		34,6	3,2	260	B	B	unverändert
116110 (Wurzelhügel)	Schiefer	regelm.		41,5	3,7	609	B	C	verbessert
131100 (K.Schenke Hofm.)	Schiefer	regelm.		27,5	4,9	620	B	C	verbessert
144100 (Grätz)	Zechstein	regelm.		19,7	4,0	319	B	A	verschlechtert
178110 (Ronneberg)	Buntsandstein	regelm.		45,7	4,8	569	B	C	verbessert
180110 (Sandweg)	Buntsandstein	regelm.		13,7	2,3	280	A	B	verbessert
Töttelstedt				148,7	6,2	653	C	C	unverändert
3	Keuper	wenig		23,8	3,7	350	B	B	unverändert
6	Muschelkalk	wenig		25,2	7,8	372	D	C	verschlechtert
50	Muschelkalk	wenig		22,3	5,2	682	C	D	verbessert
35-3	Löss Mittel-/Westth.	wenig		10,1	6,9	872	C	D	verbessert
79-3	Keuper	wenig		11,6	11,0	1387	E	E*	verbessert
82-1	Löss Mittel-/Westth.	wenig		18,7	5,1	709	C	D	verbessert
109	Löss Mittel-/Westth.	regelm.		21,5	5,3	917	C	D	verbessert
119	Muschelkalk	regelm.		9,7	8,1	530	D	C	verschlechtert
132	Muschelkalk	regelm.		5,8	4,0	211	B	A	verschlechtert
Ziegelheim				159,1	5,0	875	B	C	verbessert
1510	Löss Ostthür.	wenig		6,4	5,0	777	B	C	verbessert
1520	Löss Ostthür.	wenig		9,0	4,1	711	B	C	verbessert
3110	Löss Ostthür.	wenig		23,9	4,5	820	B	C	verbessert
8210	Löss Ostthür.	wenig		21,0	4,1	563	B	C	verbessert
2120	Löss Ostthür.	regelm.		27,2	4,9	1119	B	C	verbessert
5310	Löss Ostthür.	regelm.		19,0	5,6	847	C	D	verbessert
5410	Löss Ostthür.	regelm.		20,9	6,4	879	C	D	verbessert
8310	Löss Ostthür.	regelm.		31,8	5,6	999	C	D	verbessert

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

3.2.2 P-Speicherkapazität und P-Sättigungsgrad

Die untersuchten Böden differieren in der P-Speicherkapazität. Die höchsten Werte (> 70 mmol/kg Boden als Summe der Sorbenten) treten in den Lössen sowohl Ostthüringens als auch Mittel- / Westthüringens sowie in den Muschelkalk- und Schiefer-Verwitterungsböden auf (Abbildung 11). Die genannten Böden stellen demzufolge in hohem Maß Sorptionskörper für das Binden von Phosphaten zur Verfügung. Bei den untersuchten Lössen korrespondiert dieser Befund mit hohen P-Freisetzungsraten, woraus geschlussfolgert werden kann, dass größere P-Mengen nur locker gebunden sind und leicht verfügbar werden.

Auffällig ist die hohe Speicherkapazität der Schiefer-Verwitterungsböden, die möglicherweise mit ihrer reichen Ausstattung mit Fe-, Mn- und Al-Oxiden/-hydroxiden, eventuell aber auch organischen Bindungsstellen (Humusgehalte teilweise > 4,0 %) im Zusammenhang stehen kann. Theoretisch können diese Böden als „P-Fänger“ agieren. Im bekannten Prozess der „P-Alterung“ nach einer P-Düngung (d.h. schlechte Pflanzenverfügbarkeit von „frisch“ gedüngtem wasserlöslichem P) findet dies seinen Ausdruck.

Für die hohe P-Speicherkapazität der Muschelkalk-Verwitterungsböden gibt es keine explizite Erklärung, da mit der Extraktionsmethode überwiegend die als Sorptionsplätze agierenden Fe-, Mn- und Al-Verbindungen bestimmt werden.

Die geringsten Speicherkapazitäten weisen die untersuchten Standorte der Buntsandstein-Verwitterung, die quartären Kiese und die anmoorigen Böden auf.

P-Sättigungsgrade oberhalb von 30% gelten als Indikator für das Vorhandensein einer P-Austragsgefährdung mit dem Sickerwasser bzw. Drainabfluss (LOOKMANN et al., 1996; LEINWEBER et al., 1997, BOHNER et al., 2014b). Im Umkehrschluss müsste dann ein P-Sättigungsgrad knapp unterhalb dieser Größenordnung signalisieren, dass zumindest bei guter Bodendurchfeuchtung auch eine gute Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors gegeben ist.

Über alle untersuchten geologischen Herkünfte liegen die P-Sättigungsgrade bei bzw. oberhalb 20% (Abbildung 11).

Die höchsten P-Sättigungsgrade (um 25%) weisen die untersuchten Feldstücke auf, deren Böden anmoorig sind oder aus dem unteren / mittleren Buntsandstein stammen und leichte Standorte (Bodengruppe 2-3) gebildet haben. Unbenommen der sehr wahrscheinlich hohen Pflanzenverfügbarkeit des vorhandenen (wenigen) Phosphors – die teilweise niedrigen CAL-P-Gehalte und P-Freisetzungsraten werden durch die hohe P-Sättigung möglicherweise ein wenig „entschärft“ – weisen diese Böden sehr wahrscheinlich ein erhöhtes P-Austragsrisiko auf. In abgeschwächter Form gilt dies auch für die untersuchten Schläge auf quartären Kiesen.

Das P-Austragsrisiko auf den genannten Standorten wird außerdem getrieben von hohem Grundwasserstand (Anmoor) bzw. hoher Wasserzügigkeit (Buntsandstein-Verwitterung und quartäre Kiese).

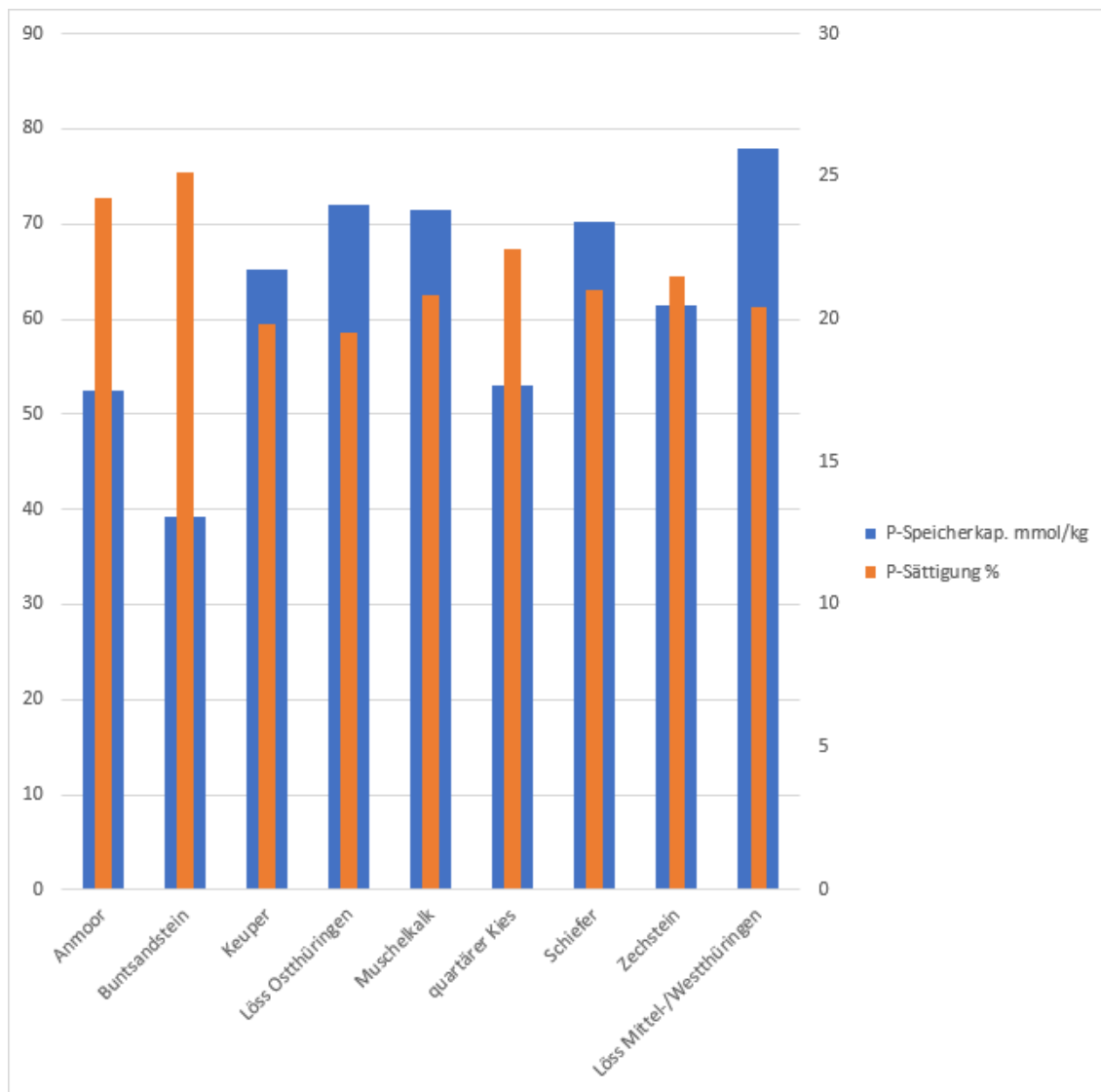


Abbildung 11: P-Sättigungsgrad und P-Speicherkapazität geordnet nach geologischer Herkunft des Bodens

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

3.2.3 Sequenzierung des schwer löslichen Phosphors in die anorganische und organische Fraktion

Der schwer lösliche Phosphor stellt eine P-Fraktion dar, die potenziell oder auch mittel- bis langfristig zur P-Ernährung der Kulturpflanzen beitragen kann. Deshalb wurde diese Fraktion im Rahmen der Projektarbeit untersucht.

Mit Ausnahme der Ostthüringer Lössen überwiegt die Fraktion des organischen P an der Summe des schwer löslichen P (Tabelle 18).

Die höchsten Gehalte sowohl an anorganischem als auch organischem schwer löslichen P treten in den untersuchten Schiefer-Verwitterungsböden auf, gefolgt – unabhängig von der regionalen Zuordnung - von den Lössen. Im Fall der Lössen gehen hohe Gehalte an schwer löslichem P mit hohen P-Freisetzungsraten und einer hohen P-Speicherkapazität parallel (Abbildung 11). In den untersuchten Schiefer-Verwitterungsböden findet sich ebenfalls eine hohe P-Speicherkapazität, jedoch treten vermehrt niedrige P-Freisetzungsraten auf. Dies

kann als Hinweis gewertet werden, dass ein nennenswerter Teil des vorhandenen Phosphors fest an Fe-, Mn- und Al-Oxiden und -Hydroxiden gebunden ist. Gleiches scheint für die Bodenproben aus der Buntsandstein-Verwitterung zutreffend zu sein, bei denen allerdings eine niedrige P-Speicherkapazität vorherrscht.

Tabelle 18: Mittlere Gehalte an schwer löslichem anorganischen und organischen Phosphor gegliedert nach geologischer Herkunft der Böden

Bodengeologie	anorganischer P (mg P/kg Boden)	organischer Phosphor (mg P/kg Boden)	Summe der Fraktionen (mg P/kg Boden)
Anmoor	58	84	142
Buntsandstein	118	136	254
Keuper	89	129	218
Löss Ostthüringen	225	142	367
Löss Mittel-/Westthüringen	151	215	366
Muschelkalk	112	128	240
quartärer Kies	68	139	207
Schiefer	238	230	468
Zechstein	79	89	168
Gesamtergebnis	137	150	287

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Der Anteil des schwer löslichen P (Summe aus schwer löslichem anorganischen und organischer P) am P-Gesamtgehalt variiert zwischen 20% und mehr als 50% (Tabelle 19). Auch hier finden sich Unterschiede in Abhängigkeit von der Bodengeologie. Die geringsten Anteile weisen Anmoor und die an Calciumcarbonat reichen Böden auf Zechstein, Muschelkalk und Keuper auf. Hohe Anteile ergeben sich für Löss, Schiefer und Buntsandstein.

Tabelle 19: Anteil der Summe des schwer löslichen anorganischem und organischen Phosphors am Gesamt-Phosphor gegliedert nach geologischer Herkunft der Böden

Bodengeologie	Anteil des schwer löslichen P am Gesamt-P (%)
Anmoor	21,4
Buntsandstein	43,7
Keuper	28,8
Löss Ostthüringen	51,4
Löss Mittel-/Westthüringen	45,5
Muschelkalk	23,2
quartärer Kies	32,4
Schiefer	59,7
Zechstein	26,4
Gesamtergebnis	36,9

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Vergleichsweise arm an schwer löslichem P waren die Böden der geologischen Herkünfte Anmoor, Zechstein, quartärer Kies und Keuper. Zumindest bei Böden aus der Zechstein-Verwitterung und bei quartären Kiesen treten parallel niedrige P-Freisetzungsraten und niedrige Vorräte an schwer löslichem P auf. Die untersuchten Böden dieser beiden geologischen Herkünfte sind wahrscheinlich arm sowohl an leicht löslichem als auch an schwer löslichem P. Ihre P-Speicherkapazität liegt ebenfalls im Ranking der untersuchten Böden im unteren Drittel (Abbildung 11). Theoretisch ist auf diesen Böden bei Vorliegen niedriger CAL-P-Gehalte eine unmittelbare P-Düngewirkung bei einer Zufuhr von wasserlöslichem P zu erwarten.

Auffällig ist, dass nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen die anmoorigen Standorte mit hohem Gehalt an organischer Substanz keine umfangreiche Fraktion an schwer löslichem organischen P aufweisen.

3.2.4 Gesamt-Phosphor im Boden

Wenngleich der Gesamt-P-Gehalt in Böden keine Rückschlüsse auf die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors zulässt, ist es häufig so, dass Böden mit sehr hohen Gehalten durch hohe P-Frachten im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Nutzung geprägt wurden. Dies drückt sich dann aber auch in hohen CAL-P-Gehalten respektive P-Freisetzungsraten aus.

WERNER et al. (1991) geben als durchschnittlichen P-Gesamtgehalt 610 mg P/kg Feinerde an. Die Spannweite variiert etwa von 200 bis 1500 mg P/kg Feinerde.

Die auf die geologischen Herkünfte der untersuchten Böden projizierten P-Gesamtgehalte variieren zwischen 570 und 1030 mg P/kg. Sie pendeln mehrheitlich um 600 mg P/kg Feinerde (Abbildung 12).

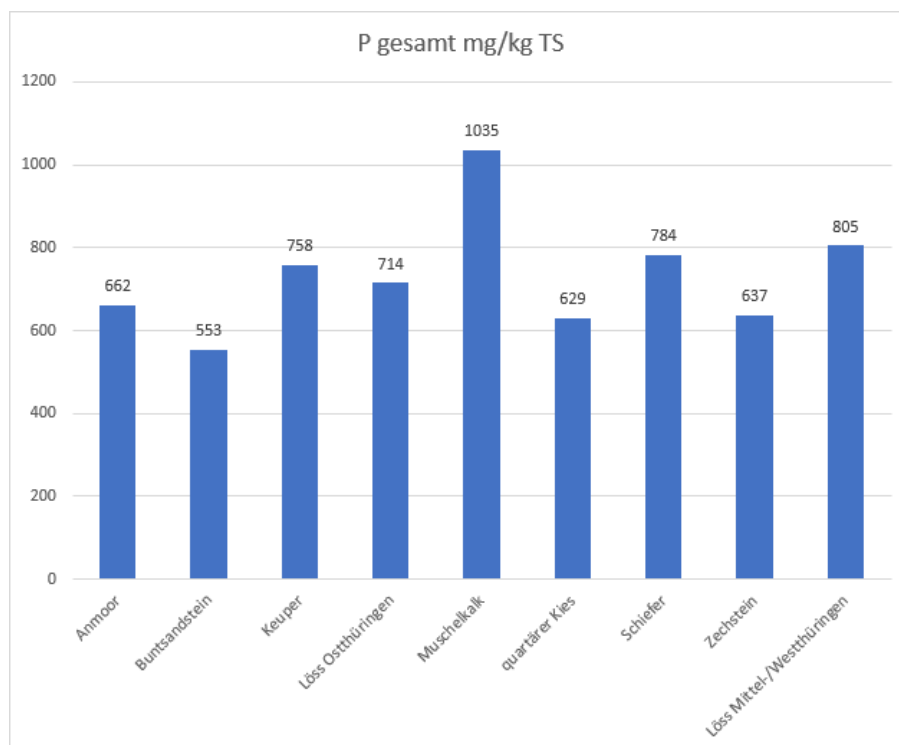


Abbildung 12: P-Gesamt-Gehalte gegliedert nach geologischer Herkunft der Böden

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Besonders hoch ist der mittlere P-Gesamtgehalt in den Muschelkalkflächen, wobei dieser Mittelwert maßgeblich durch einen einzelnen Schlag bedingt wird. Da die betreffende Fläche auch bei anderen untersuchten Parametern „auffällig“ war, besteht der Verdacht, dass irrtümlich eine frisch mit mineralischem P gedüngte Fläche beprobt wurde.

Von den untersuchten Schlägen wiesen die auf Buntsandstein, Zechstein und quartären Kiesen legenden Flächen die niedrigsten P-Gesamtgehalte auf.

Die höchsten Gehalte ergeben sich für die Löss sowie die im Keuper und Schiefer liegenden Flächen.

Für die anmoorigen Böden liegt der Gesamt-P-Gehalt im Bereich des o.g. Mittelwertes für deutsche Ackerböden.

3.3 Vorschlag für die Methodenwahl in Ergänzung der CAL-P-Untersuchung

Die Untersuchung des pflanzenverfügbaren P-Gehaltes mit der CAL-Methode wird im Freistaat Thüringen die Basismethode bleiben, auch wenn sich aktuell die Versuche mehren, mit Online-Sensorik vor Ort (im Feld) die Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen einschließlich P abzuschätzen.

Von diesem Standpunkt aus erscheint es sinnvoll, für den Laborbetrieb eine Struktur zu entwickeln, nach der zum CAL-P weitere Methoden ergänzend hinzugezogen werden.

Als Kriterium bietet sich nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen die Bodengeologie an, wobei die Verfasser die Meinung vertreten, dass weitere Daten zur Verifizierung der Ergebnisse erforderlich sind. Diese können / müssen zukünftig im „normalen“ Laborbetrieb erhoben werden.

Es erscheint über alle untersuchten geologischen Herkünfte der Böden nutzbringend, die P-Freisetzungsrate als Parameter zur Analyse des pflanzenverfügbaren P mittels CAL-Methode hinzuzuziehen. Dies betrifft im Besonderen die im Projekt untersuchten Verwitterungs-Standorte und quartären Kiese (auf denen teilweise sehr niedrige P-Freisetzungsraten auftraten, woraus ein Anheben der P-Zufuhr mit Düngern resultiert). Unter dem Gesichtspunkt des fachgerechten Reduzierens der zu düngenden P-Mengen ist das Ergänzen der CAL-P-Untersuchung durch die PF auch für die Löss-Standorte anwendbar.

Auf Standorten mit begrenzter P-Speicherkapazität (Anmoor, Buntsandstein, quartäre Kiese) erscheint es außerdem sinnvoll, zusätzlich den P-Sättigungsgrad zu untersuchen. Dieser kann als zusätzliches Merkmal herangezogen werden, ob in Flächen mit den genannten geologischen Herkünften P leicht in die Bodenlösung eintreten kann und damit pflanzenverfügbar wird.

Außerdem kann anhand des P-Sättigungsgrades abgeschätzt werden, ob der Standort ein relevantes vom Sickerwasser getragenes P-Austragsrisiko aufweisen kann.

Auf Böden mit vergleichsweise hohen P-Speicherkapazitäten (Keuper-, Muschelkalk- und Schieferverwitterung) kann dieser Parameter gemeinsam mit dem P-Sättigungsgrad eingesetzt werden, um die Düngerwahl (frischer, gut wasserlöslicher Phosphor oder langsam fließende P-Quelle) zu spezifizieren. Dabei spricht ein hoher Wert in der P-Speicherkapazität in Verbindung mit einem niedrigen Sättigungsgrad für den Einsatz von gut wasserlöslichem „frischem“ P zu Vegetationsbeginn (ggf. auch vor der Herbstsaat), bei ausreichendem Feuchteangebot im Frühjahr auch für die Anwendung von Mehrnährstoffdüngern, um den gedüngten Phosphor der P-Alterung zu entziehen.

3.4 Auswirkung der Untersuchungsergebnisse auf die Kalkulation von Düngungsempfehlungen und den resultierenden P-Aufwand

Kalkuliert wurde der P-Bedarf für Winterweizen (80 dt/ha Zielertrag) mit Vorfrucht Raps (35 dt/ha Ertrag, Rapsstroh verbleibt auf der Fläche). Die Kalkulation erfolgte auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse im 1-ha-Raster (36 Schläge, Tabelle 20) sowie im „Intelligenten Raster“ (35 Schläge, Tabelle 21). Verglichen wurde die Kalkulation auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse CAL-P „solo“ mit CAL-P plus P-Freisetzung. Damit können die Veränderungen im empfohlenen P-Aufwand infolge der Modifizierung der Bewertung des CAL-P mithilfe der P-Freisetzungsratesichtbar gemacht werden.

Tabelle 20: Veränderung der durchschnittlichen P-Düngungsempfehlung je Schlag auf Grundlage der Probenahme im 1-ha-Raster infolge der Modifizierung der P-Gehaltsklasse des CAL-P durch Nutzung der P-Freisetzungsrates

Betrieb	Schlagname/Nr.	Bodengeologie	mittlerer P-Bedarf (kg P/ha)			Tendenz beim P-Aufwand durch Hinzuziehen der PF im Vgl. zu CAL solo (1 ha-Raster)
			kg P/ha (DE nur nach CAL; kg P/ha)	kg P/ha (DE nur CAL+PF, kg P/ha)	Differenz (kg P/ha)	
Ludwigshof	Ronneberg	Buntsandstein	44	33	-11	P-Bedarf wird reduziert
	Sandweg	Buntsandstein	59	53	-6	P-Bedarf wird reduziert
	Holzweg	Buntsandstein	51	28	-23	P-Bedarf wird reduziert
	Hüttener Grund	Buntsandstein	30	32	2	P-Bedarf steigt
	Wurzelhügel	Schiefer	51	38	-12	P-Bedarf wird reduziert
	K. Schenke Hoffmann	Schiefer	37	27	-11	P-Bedarf wird reduziert
	Schmordaer Kreuz	Schiefer	53	47	-6	P-Bedarf wird reduziert
	Oberfeld	Schiefer	51	51	0	indifferent
	Dobianer Spitze I	Zechstein	47	53	5	P-Bedarf steigt
	Dobianer Spitze I	Zechstein	51	60	9	P-Bedarf steigt
	Grätz	Zechstein	48	54	7	P-Bedarf steigt
Ziegelheim	1510	Löss Ostthür.	44	32	-12	P-Bedarf wird reduziert
	1520	Löss Ostthür.	49	33	-16	P-Bedarf wird reduziert
	2120	Löss Ostthür.	43	24	-19	P-Bedarf wird reduziert
	3110	Löss Ostthür.	47	30	-17	P-Bedarf wird reduziert
	5310	Löss Ostthür.	40	22	-19	P-Bedarf wird reduziert
	5410	Löss Ostthür.	34	16	-18	P-Bedarf wird reduziert
	8210	Löss Ostthür.	51	36	-15	P-Bedarf wird reduziert
	8310	Löss Ostthür.	41	24	-18	P-Bedarf wird reduziert
Töttelstädt	3	Keuper	50	50	0	indifferent
	6	Muschelkalk	21	36	15	P-Bedarf steigt
	50	Muschelkalk	42	33	-9	P-Bedarf wird reduziert
	109	Löss Mittelhür.	40	23	-17	P-Bedarf wird reduziert
	119	Muschelkalk	17	33	16	P-Bedarf steigt
	132	Muschelkalk	44	52	8	P-Bedarf steigt
	35-3	Löss Mittelhür.	28	16	-12	P-Bedarf wird reduziert
	82-1	Löss Mittelhür.	42	31	-11	P-Bedarf wird reduziert
Alperstedt	207	Keuper	10	14	4	P-Bedarf steigt
	216	quartärer Kies	12	26	14	P-Bedarf steigt
	301	Keuper	35	35	0	indifferent
	110-01	Keuper	58	43	-15	P-Bedarf wird reduziert
	116-01	quartärer Kies	49	35	-13	P-Bedarf wird reduziert
	205-01	quartärer Kies	50	52	2	P-Bedarf steigt
	228-01 (226-1)	Anmoor	51	63	11	P-Bedarf steigt
	232-01	quartärer Kies	61	68	6	P-Bedarf steigt
	303-00	Keuper	51	40	-11	P-Bedarf wird reduziert

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Es wird ausdrücklich darauf verwiesen, dass die nachstehend beschriebenen Beobachtungen nur für die untersuchten Schläge gelten und nicht allgemein auf die untersuchten Bodengeologien übertragen werden können. Die Untersuchungsergebnisse werden neben der Bodengeologie auch maßgeblich durch die Betriebsspezifika (Viehbesatz und Strategie der Verwertung der anfallenden organischen Dünger, „Import“ organischer Dünger in die Betriebsterritorien, bisheriger Umfang und Vorgehensweise in der mineralischen P-Düngung) geprägt.

Im 1-ha-Raster verringerte sich im Zuge der Neubewertung der CAL-P Ergebnisse mittels PF der kalkulierte mittlere P-Bedarf für 21 der 36 Schläge, für die eine P-Bedarfsermittlung erfolgte (Tabelle 20). Das entspricht 58% der Schläge und ist Ausdruck eines entsprechenden Einsparungs-Potenzials für P-Dünger.

Auffällig ist, dass auf **allen** Flächen der Agrar GmbH Ziegelheim (ausschließlich Löss des Ostthüringer Lössgebietes) der kalkulierte P-Bedarf nach Modifizierung der P-Gehaltsklasse mittels P-Freisetzung sinkt. Aufgrund der hohen P-Freisetzungsrates und dem stringenten Trend zur besseren Bewertung des CAL-P durch Einbeziehen der P-Freisetzung in die Bewertung war dies zu erwarten. Die gleiche Aussage kann für die Löss Mittel- / Westthüringens in der Agrar GmbH Töttelstädt getroffen werden.

Mit wenigen Ausnahmen trifft die gleiche Beobachtung auf die untersuchten Buntsandstein- und Schiefer-Verwitterungs-Standorte in der APL Ranis-Ludwigshof und zu. Demgegenüber steigen in Ludwigshof für **alle** auf Zechstein-Kalk liegenden Flächen die P-Düngungsempfehlungen durch die Neubewertung des CAL-P mithilfe der P-Freisetzungsrates an.

In der Agrar GmbH Töttelstädt sowie der A&R Agrarhof GmbH entstehen durch die Neueinstufung des CAL-P mittels P-Freisetzung ebenfalls vermehrt P-Düngungsempfehlungen, deren Höhe von der „Standard-Empfehlung“ auf der Grundlage der „Solo“-Untersuchung mit CAL abweicht. Mit Blick auf mögliche Veränderungen in Abhängigkeit von der Bodengeologie sind diese aber nicht so stringent wie in Ziegelheim oder Ranis. Jedoch ist zu erkennen, dass auf Schlägen mit quartären Kiesen und Muschelkalk-Verwitterung der P-Aufwand im Zusammenhang mit der modifizierten Bewertung des pflanzenverfügbaren P-Gehaltes (CAL+PF) überwiegend steigt.

Lediglich auf den Keuper-Standorten gibt es durch die Bewertung der Untersuchungsergebnisse durch CAL+PF etwa zu gleichen Teilen „Wanderbewegungen“ sowohl in Richtung eines verringerten als auch eines erhöhten P-Bedarfs.

Die Kalkulationen des P-Bedarfs auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse des „Intelligenten“ Probenahme-Rasters (Wichtung der P-Empfehlung für die einzelnen Teilflächen nach deren Fläche) führt zum gleichen Ergebnis (Tabelle 21).

Für 23 Schläge ist ein paarweiser Vergleich der Probenahme-Strategien „1-ha-Raster“ und „IR“ bezüglich der Auswirkung der mittels PF modifizierten Bewertung des CAL-P auf den kalkulierten P-Bedarf im Vergleich zur Einstufung der P-Gehalte nach CAL „solo“ möglich.

Es zeigt sich, dass beim Gros der auswertbaren Schläge die Veränderung der zu düngenden P-Menge durch die Neubewertung des CAL-P mit der P-Freisetzungsrates bei beiden Probenahme-Rastern in die gleiche Richtung geht (Tabelle 22). Bei lediglich drei Schlägen wurde zwischen „keine Änderung der zu düngenden P-Menge infolge der Neubewertung der CAL-P-Gehalte mittels PF“ im Vergleich zu „CAL-solo“ in einen der möglichen Trends (P-Düngung erhöht / reduziert) gewechselt.

Auf einem Schlag (Töttelstädt, Schlag 50) traten zwischen den Rastern entgegengesetzte Entwicklungen ein. Da die Probenahmetermine zwischen 1-ha und dem „Intelligenten Raster“ teilweise mit großem Zeitversatz erfolgten, ist es in diesem Fall möglich, dass die Probenahme im 1-ha-Raster noch im Einfluss einer Düngungsmaßnahme stand.

Tabelle 21: Veränderung der durchschnittlichen P-Düngungsempfehlung je Schlag auf Grundlage der Probenahme im „Intelligenten Raster“ infolge der Modifizierung der P-Gehaltsklasse des CAL-P durch Nutzung der P-Freisetzungsrates

Betrieb	Schlagname/Nr.	Bodengeologie	mittlerer P-Bedarf (kg P/ha)			Tendenz beim P-Aufwand durch Hinzuziehen PF im Vgl. zu CAL solo (Intelligentes-Raster)
			kg P/ha (DE nur nach CAL; kg P/ha)	kg P/ha (DE nur CAL+PF, kg P/ha)	Differenz (kg P/ha)	
Ludwigshof	Ronneberg	Buntsandstein	48	30	-17	P-Bedarf wird reduziert
	Vogelherd	Buntsandstein	2	0	-2	P-Bedarf wird reduziert
	Wurzelhügel	Schiefer	52	53	1	indifferent
	K. Schenke Hoffmann	Schiefer	41	28	-13	P-Bedarf wird reduziert
	Schmordaer Kreuz	Schiefer	58	48	-9	P-Bedarf wird reduziert
	Heroldshof	Schiefer	57	47	-11	P-Bedarf wird reduziert
	Pfarrberg	Zechstein	49	46	-3	P-Bedarf wird reduziert
	Teichwand	Zechstein	55	53	-2	indifferent
Ziegelheim	1310	Löss Ostthür.	51	36	-15	P-Bedarf wird reduziert
	1320	Löss Ostthür.	51	44	-6	P-Bedarf wird reduziert
	1510	Löss Ostthür.	48	39	-10	P-Bedarf wird reduziert
	1520	Löss Ostthür.	44	36	-9	P-Bedarf wird reduziert
	2120	Löss Ostthür.	39	32	-7	P-Bedarf wird reduziert
	2220	Löss Ostthür.	50	36	-15	P-Bedarf wird reduziert
	2230	Löss Ostthür.	33	10	-23	P-Bedarf wird reduziert
	3110	Löss Ostthür.	48	32	-16	P-Bedarf wird reduziert
	5310	Löss Ostthür.	38	15	-24	P-Bedarf wird reduziert
	5410	Löss Ostthür.	31	9	-22	P-Bedarf wird reduziert
	8210	Löss Ostthür.	64	34	-31	P-Bedarf wird reduziert
8310	Löss Ostthür.	72	37	-34	P-Bedarf wird reduziert	
Keuper	3	Keuper	44	53	9	P-Bedarf steigt
	50	Muschelkalk	38	44	6	P-Bedarf steigt
	109	Löss Mittelthür.	40	24	-16	P-Bedarf wird reduziert
	118	Muschelkalk	35	40	5	P-Bedarf steigt
	132	Muschelkalk	44	48	5	P-Bedarf steigt
	35-3	Löss Mittelthür.	74	16	-58	P-Bedarf wird reduziert
	53-1	Muschelkalk	31	45	14	P-Bedarf steigt
	79-3	Keuper	40	33	-7	P-Bedarf wird reduziert
Alperstedt	216	quartärer Kies	27	41	15	P-Bedarf steigt
	425	quartärer Kies	44	35	-10	P-Bedarf wird reduziert
	110-01	Keuper	40	35	-5	P-Bedarf wird reduziert
	116-01	quartärer Kies	34	22	-12	P-Bedarf wird reduziert
	205-01	quartärer Kies	44	49	5	P-Bedarf steigt
	228-01 (226-1)	Anmoor	26	44	18	P-Bedarf steigt
	232-01	quartärer Kies	61	62	1	indifferent

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

Tabelle 22: Vergleich der Trends in den kalkulierten P-Bedarfsermittlungen durch Modifizierung des CAL mit der PF – Vergleich von Schlägen, die für 1-ha-Raster und „Intelligentes Raster“ (IR) auswertbar sind

Betrieb	Schlagname/Nr.	Bodengeologie	Tendenz beim P-Aufwand durch Hinzuziehen der PF im Vgl. zu CAL solo (1 ha-Raster)	Tendenz beim P-Aufwand durch Hinzuziehen der PF im Vgl. zu CAL solo (Intelligentes-Raster)
Ludwigshof	Ronneberg	Buntsandstein	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	Wurzelhügel	Schiefer	P-Bedarf wird reduziert	indifferent
	K. Schenke Hoffmann	Schiefer	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	Schmordaer Kreuz	Schiefer	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
Ziegelheim	1510	Löss Ostthür.	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	1520	Löss Ostthür.	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	2120	Löss Ostthür.	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	3110	Löss Ostthür.	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	5310	Löss Ostthür.	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	5410	Löss Ostthür.	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	8210	Löss Ostthür.	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	8310	Löss Ostthür.	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
Töttelstädt	3	Keuper	indifferent	P-Bedarf steigt
	50	Muschelkalk	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf steigt
	109	Löss Mittelhür.	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	132	Muschelkalk	P-Bedarf steigt	P-Bedarf steigt
	35-3	Löss Mittelthür.	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
Alperstedt	216	quartärer Kies	P-Bedarf steigt	P-Bedarf steigt
	110-01	Keuper	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	116-01	quartärer Kies	P-Bedarf wird reduziert	P-Bedarf wird reduziert
	205-01	quartärer Kies	P-Bedarf steigt	P-Bedarf steigt
	228-01 (226-1)	Anmoor	P-Bedarf steigt	P-Bedarf steigt
	232-01	quartärer Kies	P-Bedarf steigt	indifferent

Quelle: JenaBios GmbH, 2022

3.5 Ergebnisse der On-Farm-Versuche

Insgesamt zeigen sich nur geringe Reaktionen des Ertrages der angebauten Druschfrüchte auf die unterschiedlichen P-Düngungsvarianten (Tabelle 23). Diese variieren von maximal 7,3% Ertragszuwachs in Relation zur ungedüngten Kontrolle (Winterweizen, vollständiger Mähdrusch der Versuchsanlage 2020 in Töttelstädt) bis zu geringfügigen Ertragsdepressionen. Letztere traten konzentriert bei Winterhartweizen auf und sind als Hinweis auf einen hohen Einfluss von Störfaktoren in großflächigen OFR-Versuchen zu interpretieren. Im Durum könnte dabei das Krankheitsgeschehen (v.a. in Befallsnestern auftretende Halmbasis-Erkrankungen) eine maßgebliche Rolle gespielt haben. Die „Sonderstellung“ des Durums wird auch durch die statistische Auswertung belegt. In der Betrachtung der fruchtartenspezifischen Reaktion zeigt sich, dass Winterraps, Winterweizen, Wintertriticale und Wintergerste gemeinsam in einer Gruppe mit mittleren Erträgen > 100% in Relation zur ungedüngten Kontrolle stehen (Tabelle A-14 im Anhang), während Winterdurum geringfügig unter 100% rangiert.

Allerdings ist festzustellen, dass unabhängig von der P-Düngungsvariante die P-Zufuhr in der übergroßen Mehrzahl der geprüften Varianten x Standort-Kombinationen (38 von 45) zumindest tendenziell zu einem Ertragszuwachs im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle führt. In den Einzelversuchen lässt sich dieser jedoch nur teilweise statistisch sichern (Abbil-

dungen 13 bis 22 und Tabelle 23 sowie die Abbildung A-11 und Tabelle A-12 bis Tabelle A-15 im Anhang).

Tabelle 23: Zusammenfassung der Relativträge in 2020 und 2021 an den vier OFR-Standorten

Ertrags- erfassung	Regressionsanalytisch aus NDVI-Werten							Mit Praxis- mährescher		Mittelwerte (%)	Standardabweichung (%)	Signifikante Ertragsdifferenzen ⁽¹⁾
	Standort		Ranis		Töttelstädt		Ziegelheim		Alper- stedt			
Jahr	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2020	2020	2020		
Prüfglied/ Kultur	WG	WRa	WW	WTr	WRa	WDu	WDu	WG	WW			
1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		a
2	100,7	103,8	102,8	102,3	102,8	101,5	99,7	97,4	105,5	101,8	2,4	ab
3	102,0	105,9	103,7	104,7	101,5	98,1	100,9	101,2	107,3	102,8	2,9	b
4	102,8	107,2	103,2	102,0	102,6	98,6	98,0	102,3	104,7	102,4	2,8	b
5	103,3	103,9	101,4	101,8	100,8	98,3	93,8	104,6	101,2	101,0	3,3	ab
6	103,0	103,7	102,6	102,6	102,9	100,5	100,5	100,8	102,2	102,1	1,2	b

WG – Wintergerste; WRa – Winterraps; WW – Winterweizen; WTr – Wintertriticale; WDu – Winterdurum

⁽¹⁾ Unterschiede zwischen den geprüften Varianten in den OFR-Versuchen unter Berücksichtigung der Faktoren „Kultur“ und „OFR-Standort“.

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

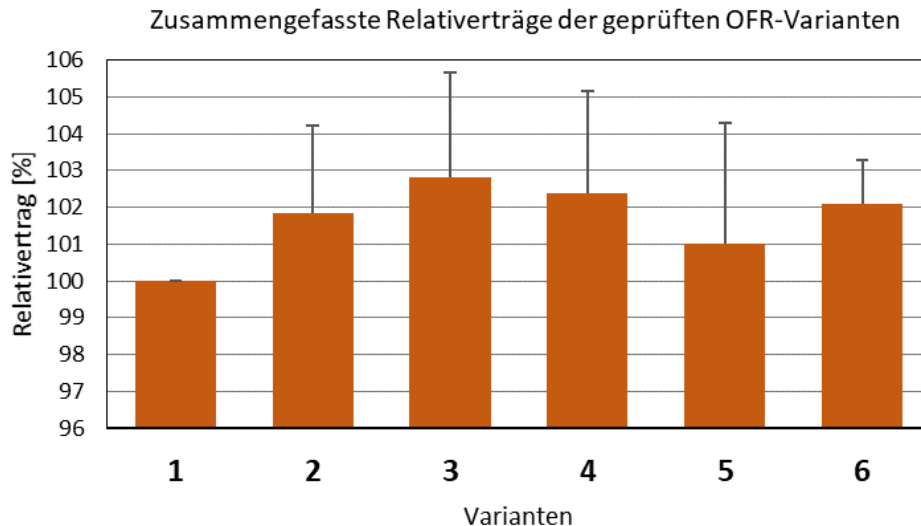


Abbildung 33: Relative Kornerträge (ungedüngte Kontrolle = Variante 1 als Bezugsbasis auf 100 % gesetzt) über alle Druschfrüchte und Versuchsjahre
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Wird geprüft, inwieweit sich die erkennbaren Tendenzen unter Berücksichtigung der Effekte von Fruchtart und Standort statistisch sichern lassen, ist zu erkennen, dass alle P-Düngungsvarianten (Varianten 2 bis 6) eine Gruppe bilden (Tabelle 23). In der Gesamtheit hat die P-Düngung eine Ertragswirkung. Ohne Berücksichtigung von Ort und Kultur sind jedoch keine statistisch zu sichernden Ertragseffekte nachweisbar (Abbildung 13 sowie Abbildung A-11 und Tabelle A-12 im Anhang). Mit Berücksichtigung von Fruchtart und Standort fällt die Ergebnisinterpretation anders aus:

Aus der o.g. Gruppe (Varianten 2 bis 6) lässt sich die Ertragsdifferenz der Varianten 2 (starres 1-ha-Raster, nur CAL-P, keine Berücksichtigung von Ertragszonen) und 5 (Intelligentes Probenahme-Raster, CAL-P+P-Freisetzung, Berücksichtigung von Ertragszonen) zur ungedüngten Kontrolle (Variante 1) statistisch **nicht** sichern.

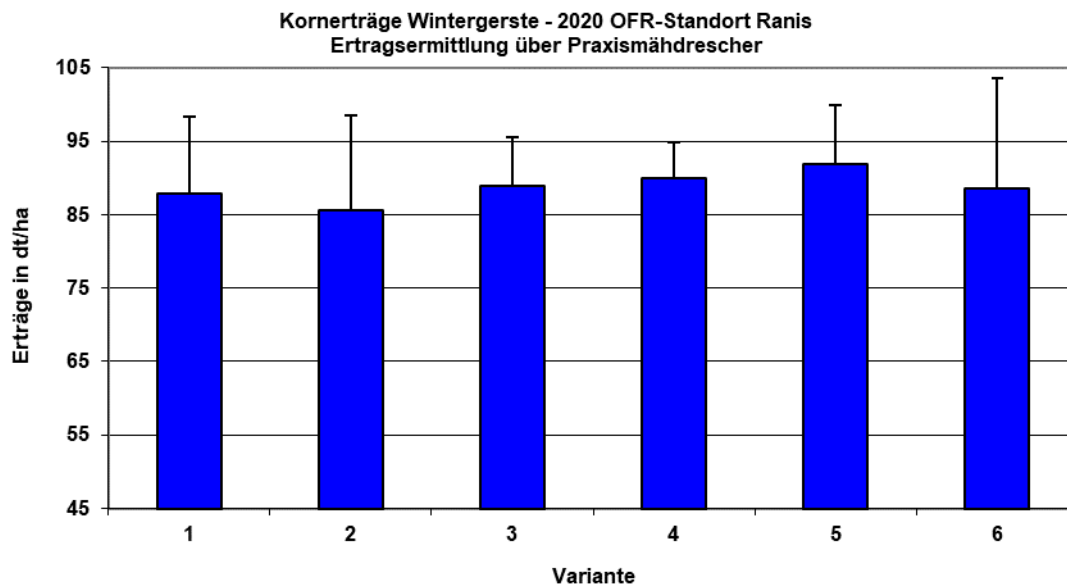
Demgegenüber führen die Varianten 3 (Intelligentes Raster, nur CAL-P, keine Berücksichtigung von Ertragszonen), 4 (Intelligentes Raster, nur CAL-P, Berücksichtigung von Ertragszonen) und 6 (starres 1-ha-Raster, CAL-P+P-Freisetzung, mit Berücksichtigung von Ertragszonen) zu einem **gesicherten Mehrertrag** gegenüber der ungedüngten Kontrolle.

In zwei der drei Varianten, die einen signifikanten Ertragszuwachs gegenüber der ungedüngten Kontrolle bewirken, erfolgte die Probenahme nach intelligenter Rasterung, in ebenfalls zwei der Varianten mit gesichertem Mehrertrag zur Kontrolle wurden die Ertragszonen berücksichtigt. Überraschender Weise war vonseiten der Analytik die Untersuchung mit CAL-P plus P-Freisetzung nur einmal am Generieren eines gesicherten Mehrertrages beteiligt.

Außerdem wird deutlich, dass die Standorte der OFR-Versuche unabhängig von den geprüften Varianten in ihrer Reaktion auf eine P-Zufuhr variieren. Der deutlichste Ertragszuwachs ergibt sich für Töttestädt und Ranis-Ludwigshof. Die Versuchsanlage in Ziegelheim nimmt eine Mittelstellung ein, die geringste – letztlich negative Tendenz – zeigt Alperstedt. Allerdings spielt in Ziegelheim und Alperstedt sehr wahrscheinlich das oben beschriebene „Ausbrechen“ des Durums eine Rolle.

Werden Kornerträge aus der vollständigen Beerntung mit Praxismähdreschern bzw. der Ertragsermittlung durch den Drusch von Transekten und Ertrags-Kalkulation über den NDVI einzeln betrachtet, dann ergibt sich Folgendes:

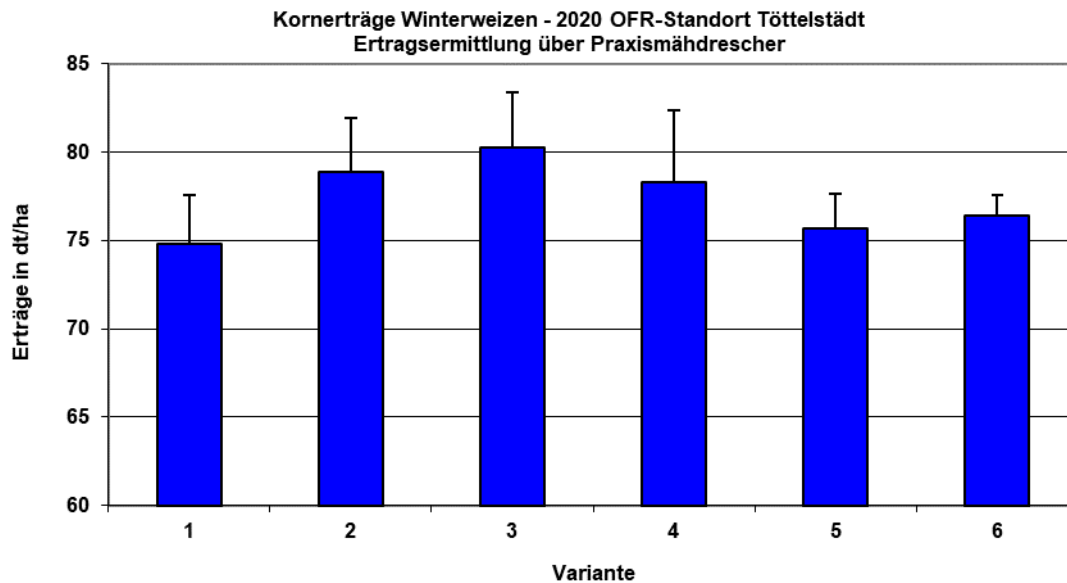
Im Jahr 2020 gab es am Standort Ranis Ludwigshof keine statistisch zu sichernde Ertragsreaktion der geprüften Varianten im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle (Variante 1). Die Erträge der Prüfglieder unterschieden sich nicht (Abbildung 14).



Ertrag bei 86 % TS	Mittelwert	STABW	Mehrertrag im Vgl. zur UK	Ertrag relativ zur UK (=100%)	signifikante Ertragsdifferenzen
PG	dt/ha	dt/ha	dt/ha	%	(¹)
1	87,9	10,4	0,0	100	a
2	85,6	13,0	-2,3	97	a
3	88,9	6,6	1,0	101	a
4	89,9	4,9	2,0	102	a
5	91,9	7,9	4,0	105	a
6	88,6	15,0	0,7	101	a
Mittelwert:	88,8	9,6	1,1	101,2	
GD_{BLSD} : (²)	22,6				
⁽¹⁾ Post-Hoc Test nach Waller-Duncan, Homogene Untergruppen					
⁽²⁾ Grenzdifferenzen (GD): Waller-Duncan Bayes LSD - BLSD (P=0,05)					

Abbildung 14: Kornerträge der in 2020 mit Praxismähdrescher geernteten OFR-Anlage am Standort Ranis-Ludwigshof, Wintergerste
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Am Standort Töttelstädt erreichten alle Behandlungsvarianten im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle tendenziell höhere Erträge. Allerdings heben nur die Erträge der Varianten 2 (starres 1-ha-Raster, nur CAL-P, keine Berücksichtigung von Ertragszonen) und 3 (Intelligentes Raster, nur CAL-P, keine Berücksichtigung von Ertragszonen) gesichert von der ungedüngten Kontrolle ab (Abbildung 15).

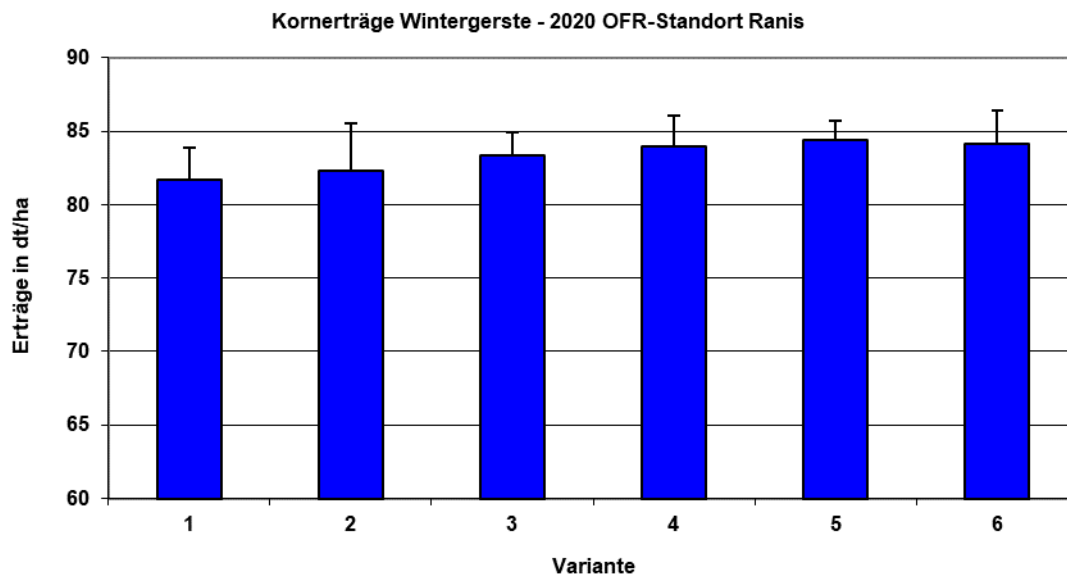


Ertrag bei 86 % TS	Mittelwert	STABW	Mehrertrag im Vgl. zur UK	Ertrag relativ zur UK (=100%)	signifikante Ertragsdifferenzen
P G	dt/ha	dt/ha	dt/ha	%	(¹)
1	74,8	2,8	0,0	100	a
2	78,9	3,1	4,1	106	bc
3	80,3	3,1	5,5	107	c
4	78,3	4,1	3,5	105	abc
5	75,6	2,0	0,9	101	ab
6	76,4	1,2	1,6	102	ab
Mittelwert:	77,4	2,7	3,1	104,2	
GD_{BLSD} : (²)	3,7				
⁽¹⁾ Post-Hoc Test nach Waller-Duncan, Homogene Untergruppen					
⁽²⁾ Grenzdifferenzen (GD): Waller-Duncan Bayes LSD - BLSD (P=0,05)					

Abbildung 15: Kornrerträge der in 2020 mit Praxismähdrescher geernteten OFR-Anlage am Standort Töttelstädt, Winterweizen

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

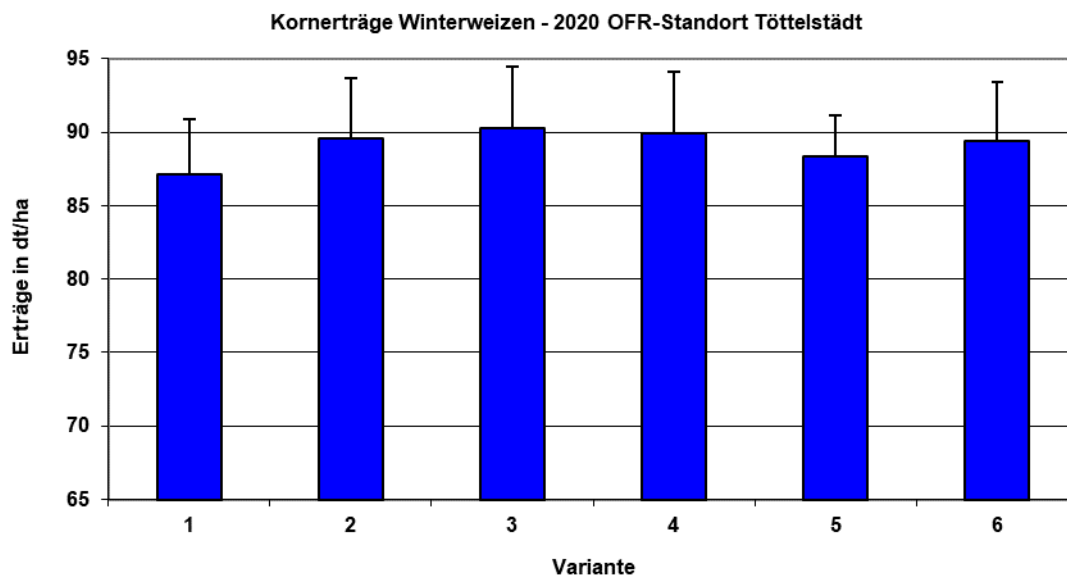
Für den Standort Ranis war in 2020 kein Einfluss der Varianten auf die Ausprägung des Kornertrages nachweisbar (Abbildung 16).



Ertrag bei 86 % TS	Mittelwert	STABW	Mehrertrag im Vgl. zur UK	Ertrag relativ zur UK (=100%)	signifikante Ertragsdifferenzen
PG	dt/ha	dt/ha	dt/ha	%	(¹)
1	81,7	2,2	0,0	100	a
2	82,3	3,2	0,6	101	a
3	83,3	1,6	1,6	102	a
4	84,0	2,1	2,3	103	a
5	84,4	1,3	2,7	103	a
6	84,1	2,2	2,4	103	a
Mittelwert:	83,3	2,1	1,9	102,3	
GD_{BLS}D : (²)	3,3				
⁽¹⁾ Post-Hoc Test nach Waller-Duncan, Homogene Untergruppen					
⁽²⁾ Grenzdifferenz (Waller-Duncan Bayes LSD - BLS), p= 0.05					

Abbildung 16: Kornerträge der in 2020 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Ranis-Ludwigshof, Wintergerste
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

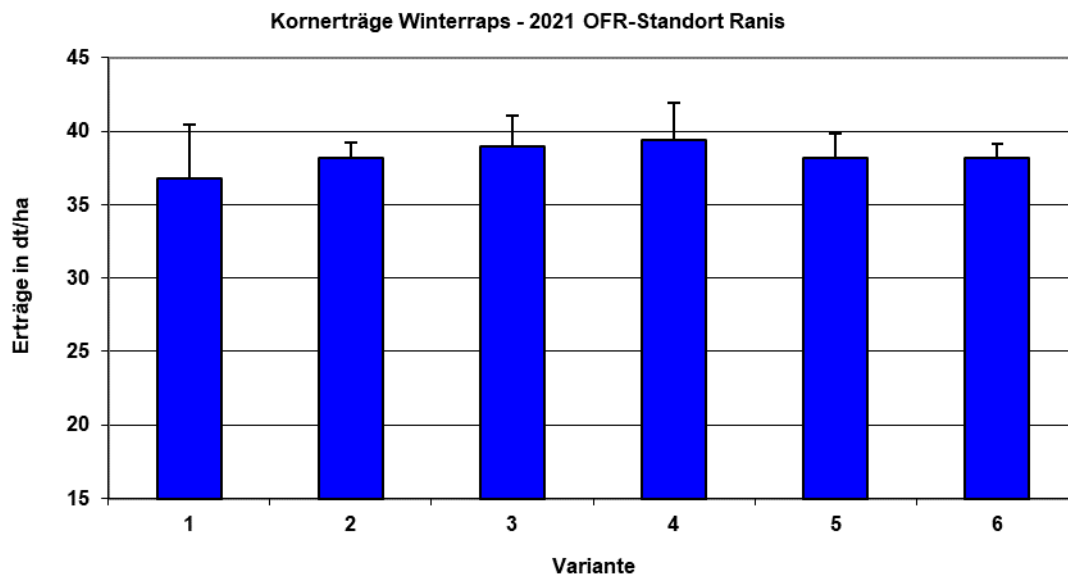
Es ist kein Einfluss der Varianten auf die Ausprägung des Kornertrages nachweisbar (Abbildung 17).



Ertrag bei 86 % TS	Mittelwert	STABW	Mehrertrag im Vgl. zur UK	Ertrag relativ zur UK (=100%)	signifikante Ertragsdifferenzen
PG	dt/ha	dt/ha	dt/ha	%	(¹)
1	87,1	3,8	0,0	100	a
2	89,5	4,1	2,4	103	a
3	90,3	4,2	3,2	104	a
4	89,9	4,2	2,8	103	a
5	88,4	2,8	1,3	101	a
6	89,4	4,1	2,3	103	a
Mittelwert:	89,1	3,8	2,4	102,7	
GD_{BLSD} : (²)	8,6				
⁽¹⁾ Post-Hoc Test nach Waller-Duncan, Homogene Untergruppen					
⁽²⁾ Grenzdifferenzen (GD): Waller-Duncan Bayes LSD - BLSD (P=0,05)					

Abbildung 17: Kornerträge der in 2020 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Ranis-Ludwigshof, Winterweizen
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

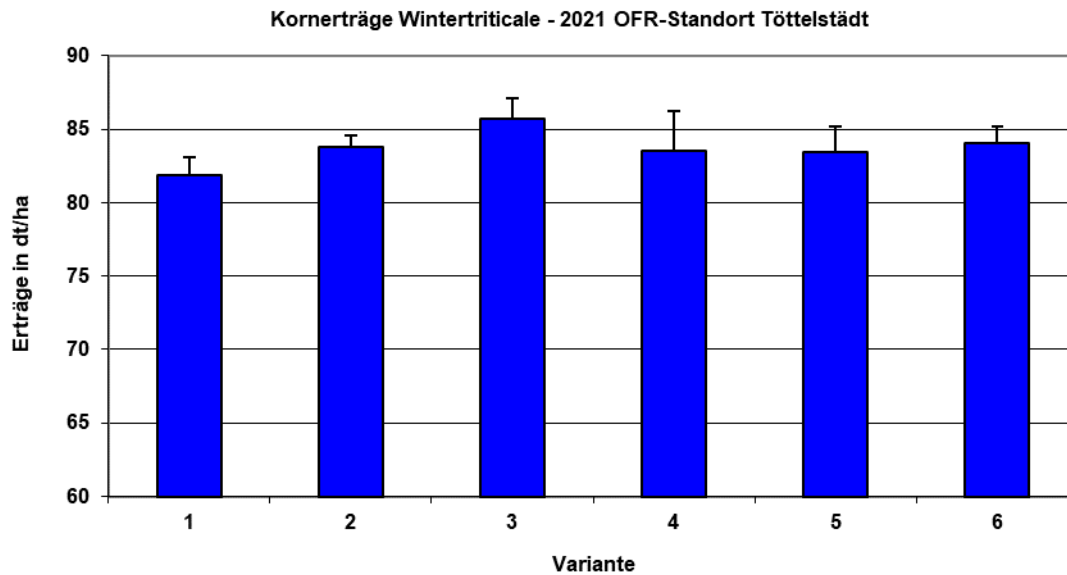
Es ist kein Einfluss der Varianten auf die Ausprägung des Kornertes nachweisbar (Abbildung 18).



Ertrag bei 91% TS	Mittelwert	STABW	Mehrertrag im Vgl. zur UK	Ertrag relativ zur UK (=100%)	signifikante Ertragsdifferenzen
PG	dt/ha	dt/ha	dt/ha	%	(¹)
1	36,8	3,7	0,0	100	a
2	38,2	1,1	1,4	104	a
3	38,9	2,1	2,2	106	a
4	39,4	2,6	2,6	107	a
5	38,2	1,6	1,4	104	a
6	38,1	1,0	1,4	104	a
Mittelwert:	38,3	2,0	1,8	104,9	
GD_{BLS}D : (²)	2,8				
⁽¹⁾ Post-Hoc Test nach Waller-Duncan, Homogene Untergruppen					
⁽²⁾ Grenzdifferenz (Waller-Duncan Bayes LSD - BLS), p= 0.05					

Abbildung 18: Kornertes der in 2021 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Ranis-Ludwigshof, Wintertraps
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Alle Varianten mit P-Düngung stehen in einer Gruppe. Jedoch ist nur der Kornertrag der Variante 3 (Probenahme im intelligenten Raster, nur CAL-P, keine Berücksichtigung von Ertragszonen) statistisch gesichert höher als in der ungedüngten Kontrolle (Abbildung 19).

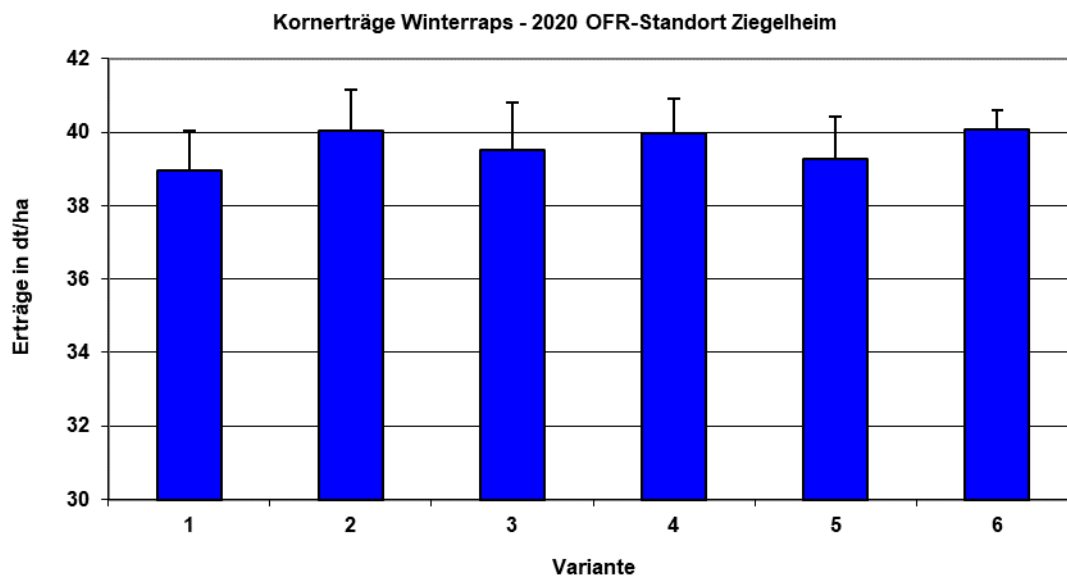


Ertrag bei 86 % TS	Mittelwert	STABW	Mehrertrag im Vgl. zur UK	Ertrag relativ zur UK (=100%)	signifikante Ertragsdifferenzen
PG	dt/ha	dt/ha	dt/ha	%	(¹)
1	81,9	1,2	0,0	100	a
2	83,7	0,8	1,8	102	ab
3	85,7	1,4	3,8	105	b
4	83,5	2,7	1,6	102	ab
5	83,4	1,8	1,5	102	ab
6	84,0	1,1	2,1	103	ab
Mittelwert:	83,7	1,5	2,2	102,7	
GD_{BLSD} : (²)	2,6				
⁽¹⁾ Post-Hoc Test nach Waller-Duncan, Homogene Untergruppen					
⁽²⁾ Grenzdifferenzen (GD): Waller-Duncan Bayes LSD - BLSD (P=0,05)					

Abbildung 19: Kornerträge der in 2021 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Töttestädt, Wintertriticale

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Es ist kein gesicherter Einfluss der Varianten auf die Ausprägung des Kornertrages nachweisbar (Abbildung 20).

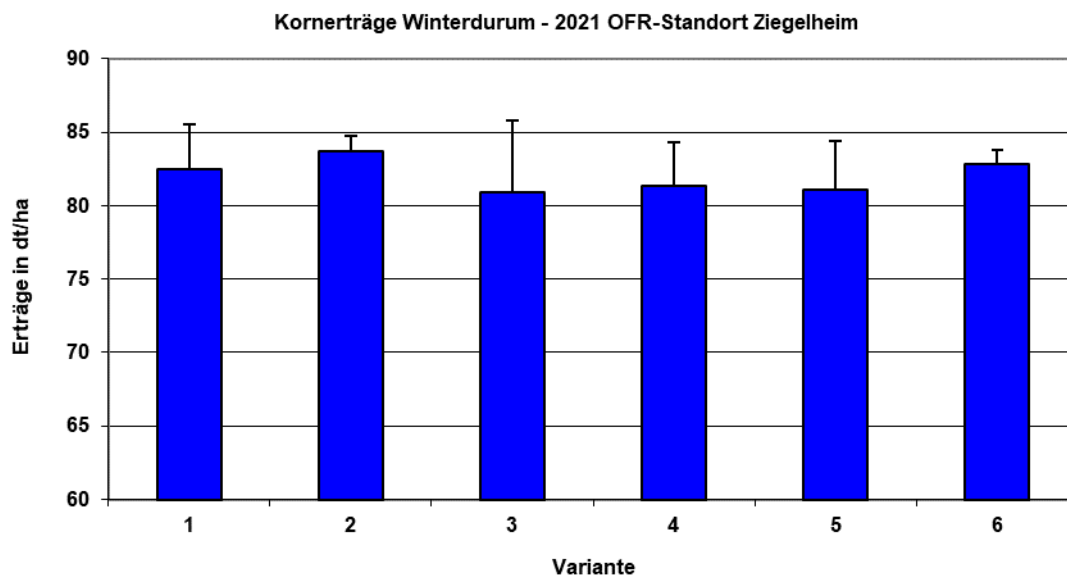


Ertrag bei 91% TS	Mittelwert	STABW	Mehrertrag im Vgl. zur UK	Ertrag relativ zur UK (=100%)	signifikante Ertragsdifferenzen
PG	dt/ha	dt/ha	dt/ha	%	(¹)
1	39,0	1,1	0,0	100	a
2	40,0	1,1	1,1	103	a
3	39,5	1,3	0,6	101	a
4	40,0	0,9	1,0	103	a
5	39,3	1,1	0,3	101	a
6	40,1	0,5	1,1	103	a
Mittelwert:	39,6	1,0	0,8	102,1	
GD_{BLSD} : (²)	1,5				
<small>(¹) Post-Hoc Test nach Waller-Duncan, Homogene Untergruppen</small>					
<small>(²) Grenzdifferenzen (GD): Waller-Duncan Bayes LSD - BLSD (P=0,05)</small>					

Abbildung 40: Kornerträge der in 2020 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Ziegelheim, Winterraps

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Es ist kein gesicherter Einfluss der Varianten auf die Ausprägung des Kornertes nachweisbar (Abbildung 21).

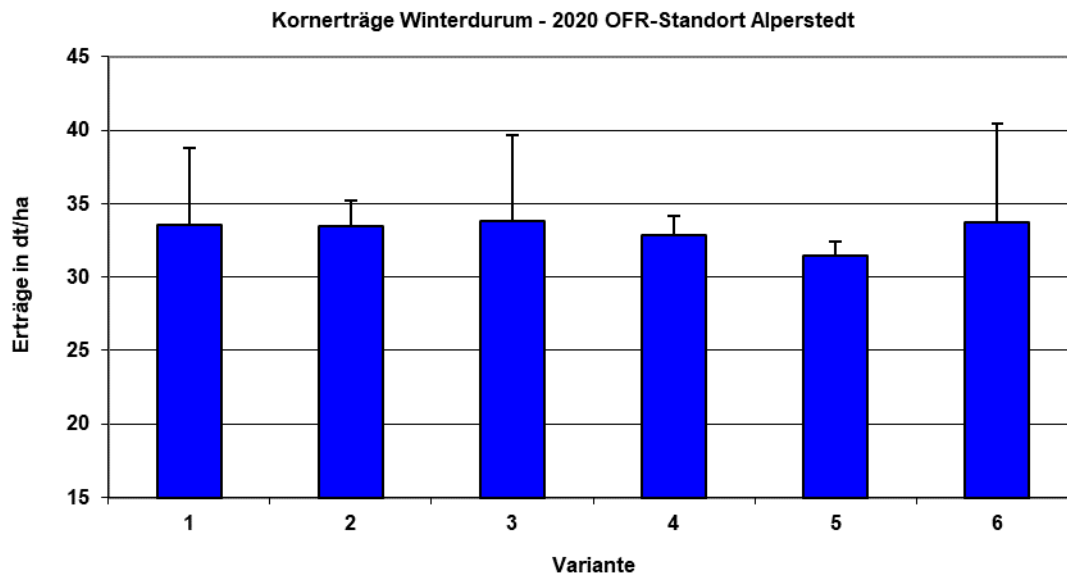


Ertrag bei 86 % TS	Mittelwert	STABW	Mehrertrag im Vgl. zur UK	Ertrag relativ zur UK (=100%)	signifikante Ertragsdifferenzen
PG	dt/ha	dt/ha	dt/ha	%	(¹)
1	82,4	3,1	0,0	100	a
2	83,7	1,0	1,3	102	a
3	80,9	4,9	-1,5	98	a
4	81,3	3,0	-1,1	99	a
5	81,0	3,4	-1,4	98	a
6	82,9	0,9	0,4	101	a
Mittelwert:	82,0	2,7	-0,5	99,4	
GD_{BLSD} : (²)	6,4				
<small>(¹) Post-Hoc Test nach Waller-Duncan, Homogene Untergruppen</small>					
<small>(²) Grenzdifferenzen (GD): Waller-Duncan Bayes LSD - BLSD (P=0,05)</small>					

Abbildung 21: Kornertes der in 2021 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Ziegelheim, Winterdurum

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Es ist kein gesicherter Einfluss der Varianten auf die Ausprägung des Kornertrages nachweisbar (Abbildung 22).



Ertrag bei 86 % TS	Mittelwert	STABW	Mehrertrag im Vgl. zur UK	Ertrag relativ zur UK (=100%)	signifikante Ertragsdifferenzen
PG	dt/ha	dt/ha	dt/ha	%	(¹)
1	33,5	5,2	0,0	100	a
2	33,5	1,8	-0,1	100	a
3	33,8	5,8	0,3	101	a
4	32,9	1,3	-0,7	98	a
5	31,5	1,0	-2,1	94	a
6	33,7	6,7	0,2	100	a
Mittelwert:	33,1	3,6	-0,5	98,6	
GD_{BLS}D : (²)	6,3				
⁽¹⁾ Post-Hoc Test nach Waller-Duncan, Homogene Untergruppen					
⁽²⁾ Grenzdifferenzen (GD): Waller-Duncan Bayes LSD - BLS D (P=0,05)					

Abbildung 22: Kornerträge der in 2020 in Transekten beernteten OFR-Anlage am Standort Alperstedt, Winterdurum

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

4 Fazit

4.1 Probenahme-Raster

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass mit dem Sprung vom 1-ha- zum 3-ha-Raster ein wesentlicher Shift in den gefundenen Untersuchungsergebnissen (sowohl CAL-P „solo“ als auch CAL-P+PF) entsteht. Die Übereinstimmungsgrade fallen so weit, dass mit gewisser Vorsicht (Repräsentativität: Die Schläge liegen in nur vier Betriebsterritorien!) abgeleitet werden muss, dass eine in einem starren Raster vorgesehene „Grundinventur“ als Einstieg in eine teilflächenspezifische P-Düngung im 1-ha-Raster erfolgen müsste. Auf dieser aufbauend können ggf. für folgende Probenahmen 1-ha-Flächen zu größeren Probenahme-Flächen zusammengefasst werden. Vorteil einer solchen Vorgehensweise ist, dass die Probenahme anhand starrer (rechteckiger bis quadratischer) Probenahmeflächen keine besonderen Anforderungen an das Probenahme-Procedere stellt.

Mit einer Probenahme nach der im Projekt erarbeiteten Vorgehensweise zur Erstellung unregelmäßiger Probenahme-Raster wird die räumliche Variabilität der P-Gehalte anders erfasst als in starren Rastern. Der Übereinstimmungsgrad zwischen der Bewertung der CAL-P-Gehalte in nach IR entnommenen Proben in Relation zum starren 1-ha-Raster ist nicht besser als beim Sprung vom 1-ha- zum 3-ha-Raster.

Da in den On-Farm-Versuchen die P-Düngung nach „Intelligenter Rasterung“ nicht zu höheren Erträgen führte als die Düngung nach einer starren 1-ha-Rasterung – und zwar unabhängig davon, ob der P-Bedarf auf der Grundlage von CAL „solo“ oder CAL+PF kalkuliert wurde – lässt mit Blick auf die insgesamt nur geringe Ertragswirkung aller P-Düngungsvarianten in den On-Farm-Experimenten den Schluss zu, dass der erforderliche Aufwand für das Generieren von IR, die Probenahme und die Kalkulation teilflächenspezifischer P-Zufuhren / -Düngungsempfehlungen aus ökonomischer Sicht nicht gerechtfertigt ist. Die Wirtschaftlichkeit einer IR verbessert sich natürlich in dem Maß, in dem die darauf beruhende Probenahme über möglichst viele Jahre fortgeschrieben wird. I.d.R. setzt dies voraus, dass ein Probenahme-Unternehmen auch vieljährig im einzelnen Landwirtschaftsbetrieb tätig ist oder die Probenahme von Landwirtschaftsunternehmen selbst realisiert wird.

Große und regelmäßige Probenahme-Raster sind nach den vorliegenden Ergebnissen am ehesten auf den in der Bodenqualität homogenen Standorten anwendbar (nach den vorliegenden Daten sind dies Löss Mittel- und Westthüringens, Löss in Ostthüringens, mittlerer und unterer Buntsandstein).

4.2 Untersuchungswesen

Mit der Projektarbeit wurde der Frage nachgegangen, welche Zusatz-Methode(n) zum CAL-P ergänzend nutzbar ist / sind, um den pflanzenverfügbaren Phosphor in landwirtschaftlich genutzten Böden besser zu beschreiben.

Nach Auffassung der Verfasser bringt die P-Freisetzungsrates nach FLOSSMANN und RICHTER für alle im Projekt untersuchten Böden eine nutzbare Zusatzinformation. Über die mögliche modifizierte Einstufung des CAL-P mithilfe der P-Freisetzung wird offengelegt, wo entweder Einsparungspotenziale hinsichtlich des P-Einsatzes in Relation zur Nutzung allei-

niger CAL-P-Untersuchungsergebnisse (CAL-P „solo“) vorhanden sind oder andererseits die P-Aushagerung aufgrund unzureichender P-Zufuhren bereits so weit fortgeschritten ist, dass ein erhöhter P-Düngungsbedarf besteht.

Vorbehaltlich des Umstandes, dass Flächen aus nur vier Landwirtschaftsbetrieben beprobt wurden, lassen sich dabei bestimmte Trends in Abhängigkeit von der Bodengeologie, aber auch Betriebsspezifika feststellen.

Für bestimmte geologische Herkünfte der Böden lassen sich außerdem die anderen geprüften Methoden zur Erfassung bestimmter P-Fractionen im Boden heranziehen, um zusätzliche Informationen zum (leicht oder potenziell) pflanzenverfügbaren P-Pool im Boden zu erhalten (P-Speicherkapazität, P-Sättigungsgrad, schwer löslicher Phosphor, organischer Phosphor).

Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang, dass der P-Sättigungsgrad nicht nur ein Zusatz-Parameter zum Charakterisieren der Pflanzenverfügbarkeit des im Boden enthaltenen Phosphors darstellt, sondern nach vorliegender Literatur auch zur Beschreibung der P-Auswaschungsgefährdung und damit der Umweltrelevanz des im Boden vorhandenen Phosphors herangezogen werden kann.

4.3 On-Farm-Experimente

Die P-Düngewirkung war insgesamt unabhängig von der Probenahme-Strategie und der zur Kalkulation verwendeten Untersuchungsergebnisse (nur CAL-P oder CAL-P+PF) gering. Da die für die Versuchsflächen ermittelten CAL-P-Gehalte im Mittel im Bereich der Gehaltsklasse C und in der oberen Hälfte der Gehaltsklasse B rangierten, war ein deutlicher Ertragszuwachs (eventuell mit Ausnahme der P-intensiven Gerste) auch nicht zwingend zu erwarten.

Bei Ertragssteigerungen von ca. 1,5 bis 2% (ca. 2,0 dt/ha Getreide und 1,0 dt/ha Raps) sind aufwändige Vorleistungen im Zusammenhang mit der Bodenprobenahme ökonomisch nicht darstellbar. Damit „verharrt“ auf den vier Versuchsstandorten die P-Düngung letztlich auf dem Level „Erhaltung des Status der Nährstoff-Ausstattung / Bodenfruchtbarkeit“.

Eine teilflächenspezifische Vorgehensweise bei der Bemessung der zu düngenden P-mengen ist mit Sicherheit zeitgemäß und erschließt auf Flächen mit stark differenzierender Ausstattung in der P-Versorgung und im teilflächenspezifischen Ertragspotenzial Reserven. Der Aufwand für das Abbilden der Teilflächen-Spezifika sollte aber so gering wie möglich gehalten werden.

Im Rahmen der Projektarbeit wurde ein neues Verfahren der Ertragserfassung für großflächige On-Farm-Experimente entwickelt (Drusch von Transekten durch die Versuchsfläche, Nutzung von NDVI-Daten zum Generieren ganzflächiger Ertragskarten). Der ganzflächige Mähdrusch derartiger Versuche kann damit bei dem im Verlauf der Erntekampagne immer sehr knappen Zeitfonds eingespart werden. Dies ist in Bezug auf die bisher für die Ernte solcher Versuche eingesetzten Kapazitäten positiv zu bewerten.

4.4 Auswirkung der Untersuchungsergebnisse auf die Kalkulation von Düngungsempfehlungen und den resultierenden P-Aufwand

Ein wichtiges Ziel der Projektarbeit war es, zum Generieren positiver betriebswirtschaftlicher Effekte und zur Minimierung der Umweltwirkung von gedüngtem Phosphor den P-Aufwand nicht nur zu optimieren, sofern fachlich gerechtfertigt nach Möglichkeit sogar zu minimieren. Durch das Einbeziehen der P-Freisetzungsrates als Zusatz-Parameter zum Bewerten des CAL-P scheint dies zu gelingen. Die teilflächenspezifischen P-Bedarfsermittlungen unter Verwendung von CAL-P+PF zeigen dies.

5 Verwertung der Ergebnisse der Projektarbeit

5.1 JenaBios GmbH

Die Untersuchung des CAL-P gehört im Rahmen der Grundbodenuntersuchung landwirtschaftlich genutzter Böden zur Routine-Analytik des Unternehmens. Im Zuge der Projektarbeit wurden folgende die P-Vorräte von Böden charakterisierenden Analytik-Methoden im Labor etabliert und können nunmehr standardisiert abgearbeitet werden:

- P-Freisetzungsrates
- P-Gesamtgehalt
- P-Speicherkapazität
- P-Sättigungsgrad
- Schwer verfügbarer Phosphor
- Fraktionierung des schwer verfügbaren P in anorganischen und organischen P

Das Methodenspektrum wurde damit sowohl als Angebot für die praktizierende Landwirtschaft als auch für Projekte im Bereich des Umweltschutzes / der Umweltanalytik (z.B. im Gewässerschutz) sinnvoll erweitert.

Für die Arbeitsgruppe Landwirtschaftliche Beratung ergeben sich aus dem Projekt neue Beratungsinhalte. Diese betreffen:

- Strategie in der teilflächenspezifischen Probenahme unter Beachtung der natürlichen Standortbedingungen (Geologische Herkunft des Bodens und Betriebsspezifika)
- Standortabhängige Auswahl der Untersuchungsmethoden, die zusätzlich zum CAL-P in Ansatz gebracht werden können / müssen
- Erschließen von Optimierungspotenzialen für den P-Einsatz in Landwirtschaftsbetrieben. Ziel ist das Generieren von ökonomischen und umweltrelevanten Vorteilswirkungen für die beratenen Landwirtschaftsbetriebe.

Die jährliche für jeden einzelnen Schlag zu erstellende Stickstoff- und Phosphor-Bedarfsermittlung ist wesentlicher Beratungsinhalt der Pflanzenbauberater der JenaBios GmbH im Winterhalbjahr. Die Kenntnis der o.g. Optimierungspotenziale fließt bereits ab dem Düngjahr 2021/22 in die P-Bedarfsermittlungen ein. Die für Düngplanungen erstellte Software wurde entsprechend erweitert. In Anbetracht der aktuellen Düngemittelpreise wird diese Erweiterung als zwingend notwendig erachtet.

5.2 U.A.S. GmbH

Die U.A.S. GmbH bietet neben dem Feldversuchswesen seit 2009 eine betriebliche und Feldstücks-spezifische Beratung zur Abschätzung der Bodenabtrags-Gefährdung und zum Erosionsschutz an. Dabei spielt die Kalkulation von P-Austragsrisiken aus dem Ackerland eine herausragende Rolle.

Die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Ergebnisse ermöglichen insbesondere dazu eine substantielle Verbesserung der Beratungsleistungen der U.A.S. GmbH. Wie die Ergebnisse zu den Auswirkungen der unterschiedlichen Probenahmeraster (1-ha, 3-ha, IR) auf die CAL-

P-Gehalte nahelegen, sind zur Abschätzung der räumlichen Variabilität der P-Gehalte und der damit im Zusammenhang stehenden Abschätzung der P-Austragsrisiken von Acker-schlägen relativ einfach zu generierende starre 1-ha oder 3-ha -Raster (in Abhängigkeit von der Bodenhomogenität des Standortortes) ausreichend. Die zusätzlich zur CAL-P -Methode berücksichtigte P-Freisetzungsrates nach FLOSSMANN und RICHTER ermöglicht unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodengeologien eine präzisere Einstufung des P-Versorgungszustandes der Ackerstandorte, was auch im Rahmen der Erosionsschutzberatung von großer Bedeutung ist. Auch die erarbeiteten Ergebnisse zum P-Sättigungsgrad verdeutlichen, dass dieser Parameter zur Beschreibung der P-Auswaschungsgefährdung belastbar ist und im Rahmen unserer Arbeit zur Abschätzung von P-Austragsrisiken zunehmend berücksichtigt wird. Bei vorsichtiger Schätzung wird davon ausgegangen, dass zukünftig ein Viertel des Ackerlands in P-Nährstoffüberschussgebieten in Thüringen (ca. 60.000 ha) mit diesem methodisch erweiterten Ansatz im Rahmen unserer Arbeiten zum Erosionsschutz beraten werden kann.

Das im Zusammenhang mit den im Projekt integrierten On-Farm-Experimenten (OFR) erarbeitete Verfahren zur Ertragsabschätzung auf Grundlage von mit Drohnenbefliegungen erstellten NDVI-Karten in Kombination mit stichprobenartigen Transekt-Beerntungen mit (präziser) Parzellenmähdreschertechnik hat sich als praktikable, arbeitsökonomische und hinreichende genaue Methode erwiesen.

Neben der Durchführung von Parzellen-Exaktversuchen besteht in der angewandten Agrarforschung ein zunehmender Bedarf an praxisnäheren Versuchsdurchführungen im Rahmen von On-Farm-Experimenten. Da dabei zumeist eine belastbare Ertragsabschätzung der geprüften Versuchsvarianten unerlässlich ist, die verlässliche Ertragserfassung mit Praxistechnik jedoch sehr kostenintensiv und aufwändig ist, bietet dieses Verfahren eine sehr gute Alternative zur ganzflächigen Beerntung.

Es ist vorgesehen, diese Methode zur Ertragsabschätzung in zukünftigen OFR-Projekten der U.A.S. GmbH vorrangig einzusetzen.

5.3 EHW – Service GmbH

Für das Probenahme-Unternehmen erbrachte die Arbeit einen Zusatznutzen hinsichtlich der Entwicklung und Anwendung von Probenahme-Strategien in der Gewinnung von Proben für die Grundboden-Untersuchung. Das erworbene Wissen kann in der Auftrags-Akquise gezielt eingesetzt werden

5.4 Landwirtschaftsbetriebe

Die im Projekt mitwirkenden Landwirtschaftsbetriebe erhielten umfangreiches Detailwissen zur P-Ausstattung der im Projekt untersuchten Schläge. Sie erhielten außerdem Expertise für eine gezielte und kostensparende Vorgehensweise in den Bereichen Bodenprobenahme, P-Bodenuntersuchung und P-Düngungsstrategien.

Im Verlauf der Projektarbeit konnte den teilnehmenden Unternehmen vermittelt werden, welche betriebsspezifischen Optimierungsmöglichkeiten in den o.g. genannten Bereichen vorliegen und wie diese zukünftig erschlossen werden können.

6 Literatur

- ADAM, C.; PEPLINSKI, B.; KLEY, G., KRATZ Silvia; SCHICK, J.; SCHNUG, E. (2008): Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen. Ergebnisse aus dem EU-Projekt SUSAN. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, S. 55-64.
- ANONYM (2014): Phosphat-Löslichkeit. Humuswirtschaft und Kompost 10 (2014), S. 1-4.
- BISCHOFF, R.; MARSCHALL, KARIN (2016): KULAP A3 „Betrieblicher Erosionsschutz“ – Erläuterung der Grundlagen. Vortrag zu einer Infoveranstaltung am 07.04.2016; http://www.tll.de/www/daten/publikationen/software/theo/KULAP_A3_Info_April_2016.pdf
- BOHNER, A., WEISSENSTEINER, C., FRIEDEL, J.K. (2014a): Phosphor-Speicherkapazität und Phosphor-Sättigungsgrad in österreichischen Böden des Dauergrünlands. Viertes Umweltökologisches Symposium. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein. S. 49-60
- BOHNER, A.; HUEMER, Christa; SCHAUMBERGER, J.; LIEBHARD, P. (2014b): Phosphor in landwirtschaftlich genutzten Böden in einem Teileinzugsgebiet der Antiesen im oberösterreichischen Innviertel. Das INTERREG IV A-Projekt „Gewässer-Zukunft“, S. 45-57
- DLG (2008): DLG-Merkblatt 349. Grunddüngung effizient gestalten. www.dlg.org/dlg-merkblatt_349.html
- ECKHARDT, K.-U., LEINWEBER, P. (1997): P-Fractionen zur Vorhersage von P-Austrägen aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Mittlg. Deutsch. Bodenkundl. Ges. 85, pp 871-874
- FLOSSMANN, R.; RICHTER, D. (1982): Extraktionsmethode zur Charakterisierung der Kinetik der Freisetzung von P aus der festen Phase des Bodens. Arch. Acker-, Pflanzenbau u. Bodenkunde 26, pp 703-709
- HOLSTEN, Bettina; PFANNERSTILL, M.; TREPEL, M. (2016): Phosphor in der Landschaft. Management eines begrenzt verfügbaren Nährstoffes. CAU Kiel. 52 Seiten
- JASINSKI, S.M. (2017): Phosphate Rock. In: Mineral Commodity Summaries 2017. U.S: Dep. of the Interior; U.S. Geological Survey, pp 123-124
- KRATZ, Sylvia; SCHNUG, E. (2009): Zur Frage der Löslichkeit und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor-Düngemitteln. Journal für Kulturpflanzen 61 (1), S. 2-8.
- LEINWEBER, P.; LÜNSMANN, F.; ECKHARDT, K. (1997): Phosphorus sorption capacities and saturation of soils in two regions with different livestock densities in northwest Germany. Soil Use and Management 13, pp 82-89
- LOOKMANN, R.; JANSEN, K.; MERCKES, R.; VLASSAK, K. (1996): Relationship between soil properties and phosphate saturation parameters. A transect study in northern Belgium. Geoderma 69, pp 265-274

- MENGEL, K. (2001): Phosphorus. In: Principles of Plant Nutrition. Kluwer Academic Publishers, pp 453-479
- RÖMER, W. (2011): Sicherung einer nachhaltigen Phosphat-Ernährung der Pflanzen. Vortrag zur Düngungstagung der SLULG in Groitzsch/Nossen am 25.2.2011.
- RÖMER, W. (2014): Möglichkeiten der P-Recyclingdüngemittel im Ökologischen Landbau. KTBL-Fachgespräch „Organische Handelsdüngemittel tierischer und pflanzlicher Herkunft für den Ökologischen Landbau. Fulda, am 23.10.2014.
- RÖMER, W. (2016): Was ist zu tun, um den Phosphor-Bedarf der Kulturpflanzen auch in Zukunft zu sichern? Vortrag zur DLG-Wintertagung 216, 29 Seiten
- RÖMER, W. (2019): Phosphordüngewirkung neuer Phosphatrecyclingprodukte. Berichte über Landwirtschaft. www.buel.bmel.de/index.php/buel/article/view/Roemer/Roemer.html
- SCHLEGEL, J.; BISCHOF, R.; HERING, T. (2019): Betrachtung von Schad- und Nährstoffen im Rahmen des Biomasse-Asche-Monitorings (BAM) sowie rechtliche Voraussetzungen für eine Asche-Verwertung. 24 Seiten. www.thueringen.de/th9/tlllr
- SCHUBERT, S. (2019): Phosphataneignung verschiedener Kulturpflanzen und Konsequenzen für die Bodenanalytik. Phosphoreinsatz in der Landwirtschaft zwischen Knappheit und Überschuss. Wiss. Tag. Dachverband Agrarforschung e.V., Agrar Spectrum Bd. 52, S. 30-41
- SCHWERTMANN, U. (1694): Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. Ztschr. Pflanzenern. Düngung Bodenk. 105, S. 194-202
- STEINGROBE, B. (2015): Anforderungen an die Pflanzenverfügbarkeit von Sekundärphosphor aus Klärschlämmen und Klärschlammaschen. 9. Klärschlammstage an der Georg August Universität Göttingen. 13 Seiten
- UBA (2022a): www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliesssgewaesser/eintraege-von-naehrstoffen-in-die#naehrstoffeintraege-sinken-wieder-langsam
- UBA (2022b): www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-eutrophierung-von-fluessen-durch-phosphor#wie-ist-die-entwicklung-zu-bewerten
- VDLUFA (2018): VDLUFA-Standpunkt – Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. 11 Seiten
- WERNER, W.; OLFS, H.-W.; AUERSWALD, K.; ISERMANN, K. (1991): Stickstoff- und Phosphor-Eintrag über „diffuse“ Quellen. In A. HAMM (Ed.): Studie über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern. Academia Verlag St. Augustin, S. 665-764
- ZORN, W., KRAUSE, O. (1999): Untersuchungen zur Charakterisierung des pflanzenverfügbaren Phosphats in Thüringer Carbonatböden. J. Plant Nutr. Soil Sci. 162, pp 463-469

ZORN, W.; SCHRÖTER, G., KIESSLING, G., WAGNER, S. (2015): Präzisierung des P-Düngebedarfs auf dem Ackerland durch zusätzliche Bodenuntersuchungen. 127. VDLUFA-Kongress Göttingen, 24 Seiten

ZORN, W.; SCHRÖTER, H.; KIESSLING, G. (2018): Präzisierung des P-Düngebedarfs auf Ackerland durch zusätzliche Bestimmung der P-Freisetzungsrates. Fachinformation. 8 Seiten

Anhang

Einfluss der geologischen Herkunft des Bodens auf die sich ergebenden Veränderungen in der Einstufung des CAL-P durch die Modifizierung mittels P-Freisetzungsrates

Nachfolgend wird folgende verkürzte Signatur verwendet:

GZ_CAL < GZ_FREI bedeutet: Die aus den CAL-P plus P-Freisetzung generierten Gehaltsklassen liegen im Durchschnitt über den aus den CAL-P-Werten generierten Gehaltsklassen.

GZ_CAL > GZ_FREI bedeutet: Die aus den CAL-P plus P-Freisetzung generierten Gehaltsklassen liegen im Durchschnitt unter den aus den CAL-P-Werten generierten Gehaltsklassen.

Tabelle A-1: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), gesamter Datenpool.

Deskriptive Statistiken								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	2135	2,50	1,015	1	5	2,00	2,00	3,00
GZ_FREI	1531	2,77	1,094	1	5	2,00	3,00	4,00

Wilcoxon-Test:

Ränge				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	404(a)	581,00	234724,00
	Positive Ränge	757(b)	581,00	439817,00
	Bindungen	370(c)		
	Gesamt	1531		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				

Statistik für Test(b)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-10,360(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000
a Basiert auf negativen Rängen.	
b Wilcoxon-Test	

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-2: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), geologische Herkunft des Bodens: **Anmoor**

Deskriptive Statistiken(a)								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	96	3,03	1,031	1	5	2,25	3,00	4,00
GZ_FREI	76	2,30	1,033	1	4	2,00	2,00	3,00
a GEOLOGIE = Anmoor								

Wilcoxon-Test:

Ränge(d)				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	56(a)	30,50	1708,00
	Positive Ränge	4(b)	30,50	122,00
	Bindungen	16(c)		
	Gesamt	76		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				
d GEOLOGIE = Anmoor				

Statistik für Test(b,c)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-6,713(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000
a Basiert auf positiven Rängen.	
b Wilcoxon-Test	
c GEOLOGIE = Anmoor	

⇒ **Signatur GZ_CAL > GZ_FREI**

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-3: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), geologische Herkunft des Bodens: **mittlerer und unterer Buntsandstein**

Deskriptive Statistiken(a)								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	215	2,28	1,202	1	5	1,00	2,00	3,00
GZ_FREI	152	2,52	1,151	1	5	1,00	3,00	3,00
a GEOLOGIE = Buntsandstein								

Wilcoxon-Test:

Ränge(d)				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	15(a)	47,50	712,50
	Positive Ränge	79(b)	47,50	3752,50
	Bindungen	58(c)		
	Gesamt	152		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				
d GEOLOGIE = Buntsandstein				

Statistik für Test(b,c)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-6,601(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000
a Basiert auf negativen Rängen.	
b Wilcoxon-Test	
c GEOLOGIE = Buntsandstein	

⇒ **Signatur GZ_CAL < GZ_FREI**

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-4: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), geologische Herkunft des Bodens: **Keuper**

Deskriptive Statistiken(a)								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	207	2,60	1,074	1	5	2,00	2,00	3,00
GZ_FREI	157	2,84	1,253	1	5	2,00	3,00	4,00
a GEOLOGIE = Keuper								

Wilcoxon-Test:

Ränge(d)				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	39(a)	52,00	2028,00
	Positive Ränge	64(b)	52,00	3328,00
	Bindungen	54(c)		
	Gesamt	157		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				
d GEOLOGIE = Keuper				

Statistik für Test(b,c)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-2,463(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,014
a Basiert auf negativen Rängen.	
b Wilcoxon-Test	
c GEOLOGIE = Keuper	

⇒ **Signatur GZ_CAL < GZ_FREI**

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-5: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), geologische Herkunft des Bodens: **Lösse Mittel- und Westthüringens (Lö 1, Lö2)**

Deskriptive Statistiken(a)								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	109	2,61	,733	1	5	2,00	3,00	3,00
GZ_FREI	84	3,38	,849	1	5	3,00	3,00	4,00
a GEOLOGIE = Löss								

Wilcoxon-Test:

Ränge(d)				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	9(a)	39,00	351,00
	Positive Ränge	68(b)	39,00	2652,00
	Bindungen	7(c)		
	Gesamt	84		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				
d GEOLOGIE = Löss				

Statistik für Test(b,c)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-6,724(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000
a Basiert auf negativen Rängen.	
b Wilcoxon-Test	
c GEOLOGIE = Löss	

⇒ **Signatur GZ_CAL < GZ_FREI**

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-6: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), geologische Herkunft des Bodens: **gute Löss Ostthüringens (BWZ > 60)**

Deskriptive Statistiken(a)								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	222	2,64	,628	1	5	2,00	3,00	3,00
GZ_FREI	168	3,55	,732	1	5	3,00	4,00	4,00
a GEOLOGIE = Löss, gut								

Wilcoxon-Test:

Ränge(d)				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	0(a)	,00	,00
	Positive Ränge	157(b)	79,00	12403,00
	Bindungen	11(c)		
	Gesamt	168		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				
d GEOLOGIE = Löss, gut				

Statistik für Test(b,c)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-12,530(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000
a Basiert auf negativen Rängen.	
b Wilcoxon-Test	
c GEOLOGIE = Löss, gut	

⇒ **Signatur GZ_CAL << GZ_FREI**

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-7: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), geologische Herkunft des Bodens: **schlechte Löss Ostthüringens (BWZ < 60)**

Deskriptive Statistiken(a)								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	197	2,28	,554	2	5	2,00	2,00	2,00
GZ_FREI	147	3,16	,689	1	5	3,00	3,00	3,00
a GEOLOGIE = Löss, schlecht								

Wilcoxon-Test:

Ränge(d)				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	2(a)	64,00	128,00
	Positive Ränge	125(b)	64,00	8000,00
	Bindungen	20(c)		
	Gesamt	147		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				
d GEOLOGIE = Löss, schlecht				

Statistik für Test(b,c)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-10,914(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000
a Basiert auf negativen Rängen.	
b Wilcoxon-Test	
c GEOLOGIE = Löss, schlecht	

⇒ **Signatur GZ_CAL << GZ_FREI**

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-8: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), geologische Herkunft des Bodens: **Muschelkalk**

Deskriptive Statistiken(a)								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	204	3,07	,967	1	5	2,00	3,00	4,00
GZ_FREI	153	2,65	,941	1	5	2,00	3,00	3,00
a GEOLOGIE = Muschelkalk								

Wilcoxon-Test:

Ränge(d)				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	96(a)	64,00	6144,00
	Positive Ränge	31(b)	64,00	1984,00
	Bindungen	26(c)		
	Gesamt	153		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				
d GEOLOGIE = Muschelkalk				

Statistik für Test(b,c)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-5,768(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000
a Basiert auf positiven Rängen.	
b Wilcoxon-Test	
c GEOLOGIE = Muschelkalk	

⇒ **Signatur GZ_CAL > GZ_FREI**

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-9: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), geologische Herkunft des Bodens: **Quartäre Kiese**

Deskriptive Statistiken(a)								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	383	2,79	1,069	1	5	2,00	3,00	3,00
GZ_FREI	267	2,78	1,056	1	5	2,00	3,00	4,00
a GEOLOGIE = quartärer Kies								

Wilcoxon-Test:

Ränge(d)				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	117(a)	111,50	13045,50
	Positive Ränge	105(b)	111,50	11707,50
	Bindungen	45(c)		
	Gesamt	267		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				
d GEOLOGIE = quartärer Kies				

Statistik für Test(b,c)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-,805(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,421
a Basiert auf positiven Rängen.	
b Wilcoxon-Test	
c GEOLOGIE = quartärer Kies	

⇒ **Signatur: Kein Unterschied GZ_CAL = GZ_FREI**

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-10: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), geologische Herkunft des Bodens: **Schiefer**

Deskriptive Statistiken(a)								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	266	1,80	,732	1	5	1,00	2,00	2,00
GZ_FREI	190	2,35	,957	1	5	2,00	2,00	3,00
a GEOLOGIE = Schiefer								

Wilcoxon-Test:

Ränge(d)				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	13(a)	57,50	747,50
	Positive Ränge	101(b)	57,50	5807,50
	Bindungen	76(c)		
	Gesamt	190		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				
d GEOLOGIE = Schiefer				

Statistik für Test(b,c)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-8,242(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,000
a Basiert auf negativen Rängen.	
b Wilcoxon-Test	
c GEOLOGIE = Schiefer	

⇒ **Signatur GZ_CAL << GZ_FREI**

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

⇒

Tabelle A-11: Vergleich der P Gehaltsklassen bzw. Gehaltszahlen nach alleiniger CAL-Untersuchung (GZ_CAL) vs. CAL-P plus P-Freisetzung (GZ_FREI), geologische Herkunft des Bodens: **Zechstein-Kalk**

Deskriptive Statistiken(a)								
	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Perzentile		
						25.	50. (Median)	75.
GZ_CAL	150	1,89	,782	1	5	1,00	2,00	2,00
GZ_FREI	79	1,68	,899	1	5	1,00	1,00	2,00
a GEOLOGIE = Zechstein								

Wilcoxon-Test:

Ränge(d)				
		N	Mittlerer Rang	Rangsumme
GZ_FREI - GZ_CAL	Negative Ränge	28(a)	20,50	574,00
	Positive Ränge	12(b)	20,50	246,00
	Bindungen	39(c)		
	Gesamt	79		
a GZ_FREI < GZ_CAL				
b GZ_FREI > GZ_CAL				
c GZ_CAL = GZ_FREI				
d GEOLOGIE = Zechstein				

Statistik für Test(b,c)	
	GZ_FREI - GZ_CAL
Z	-2,530(a)
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,011
a Basiert auf positiven Rängen.	
b Wilcoxon-Test	
c GEOLOGIE = Zechstein	

⇒ **Signatur GZ_CAL > GZ_FREI**

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

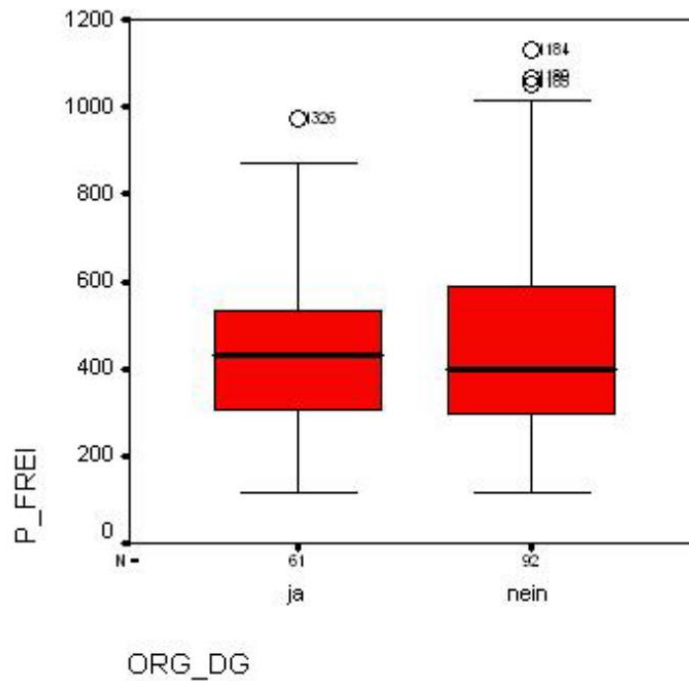


Abbildung A-1: P-Freisetzungsrates ($\mu\text{g P}/100 \text{ g Boden} \cdot \text{min}$) unter dem Einfluss einer geringen („org_Dg nein“) und regelmäßigen organischen Düngung („org_Dg ja“) – Böden auf **Muschelkalk**
 Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

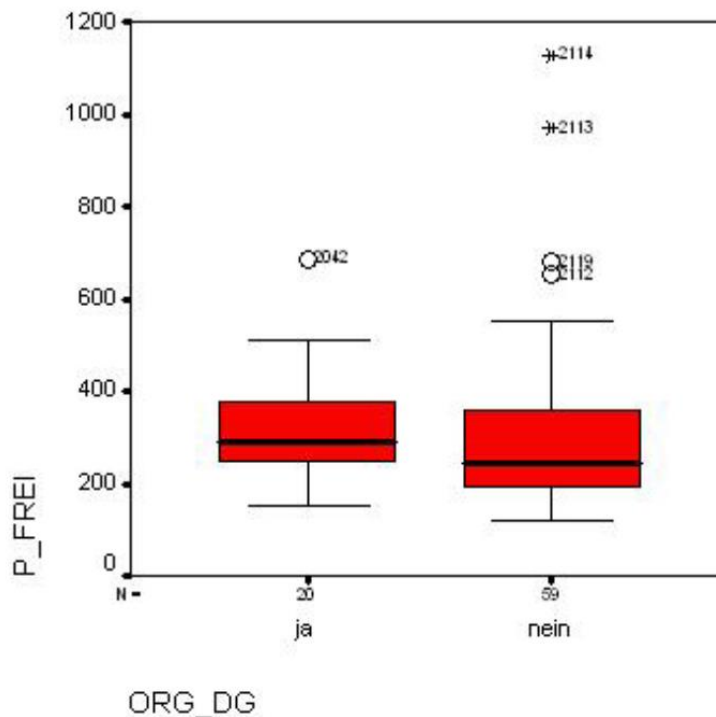


Abbildung A-2: P-Freisetzungsrates ($\mu\text{g P}/100 \text{ g Boden} \cdot \text{min}$) unter dem Einfluss einer geringen („org_Dg nein“) und regelmäßigen organischen Düngung („org_Dg ja“) – Böden auf **Zechstein-Kalk**
 Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

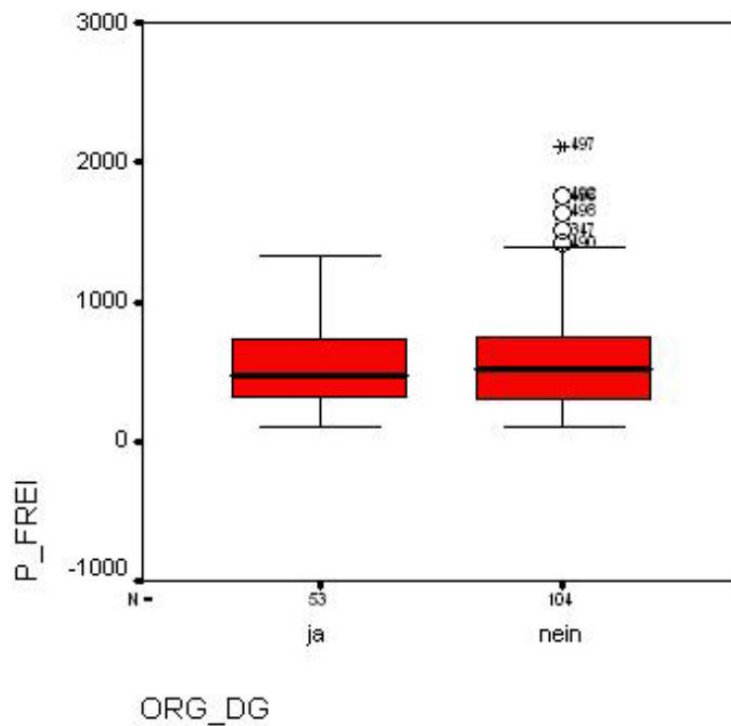


Abbildung A-3: P-Freisetzungsrates ($\mu\text{g P}/100 \text{ g Boden} \cdot \text{min}$) unter dem Einfluss einer geringen („org_Dg nein“) und regelmäßigen organischen Düngung („org_Dg ja“) – Böden auf **Keuper**
 Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

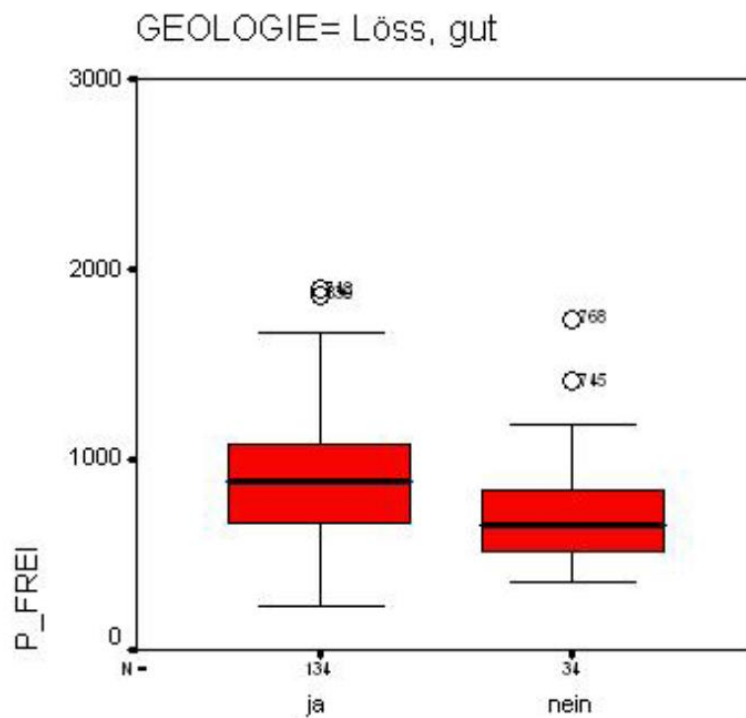


Abbildung A-4: P-Freisetzungsrates ($\mu\text{g P}/100 \text{ g Boden} \cdot \text{min}$) unter dem Einfluss einer geringen („org_Dg nein“) und regelmäßigen organischen Düngung („org_Dg ja“) – **gute Lössböden des Ostthüringer Lössgebietes**
 Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

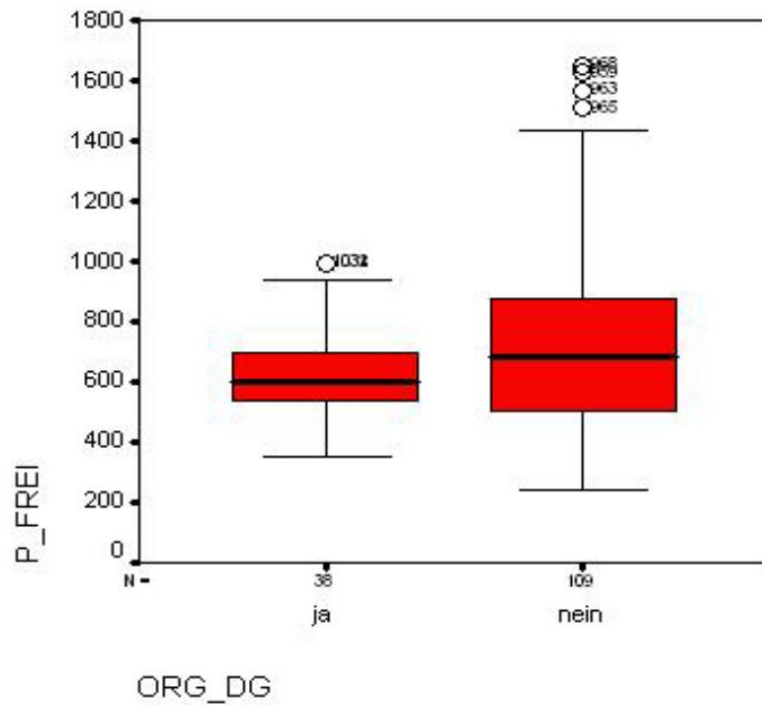


Abbildung A-5: P-Freisetzungsrates ($\mu\text{g P}/100 \text{ g Boden}\cdot\text{min}$) unter dem Einfluss einer geringen („org_Dg nein“) und regelmäßigen organischen Düngung („org_Dg ja“) – **schlechte Löss Ostthüringens**
 Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

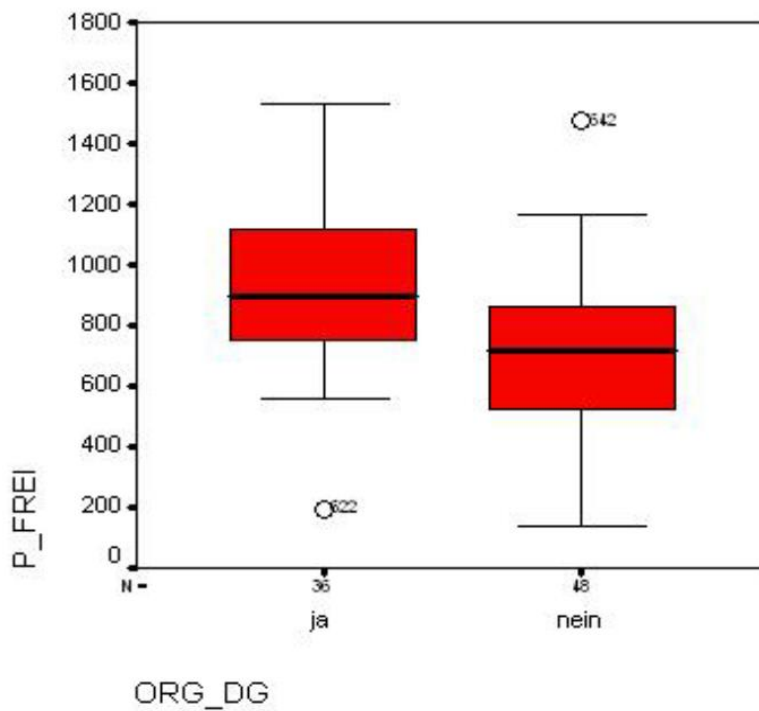


Abbildung A-6: P-Freisetzungsrates ($\mu\text{g P}/100 \text{ g Boden}\cdot\text{min}$) unter dem Einfluss einer geringen („org_Dg nein“) und regelmäßigen organischen Düngung („org_Dg ja“) – **Löss Mittel- und Westthüringens**
 Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

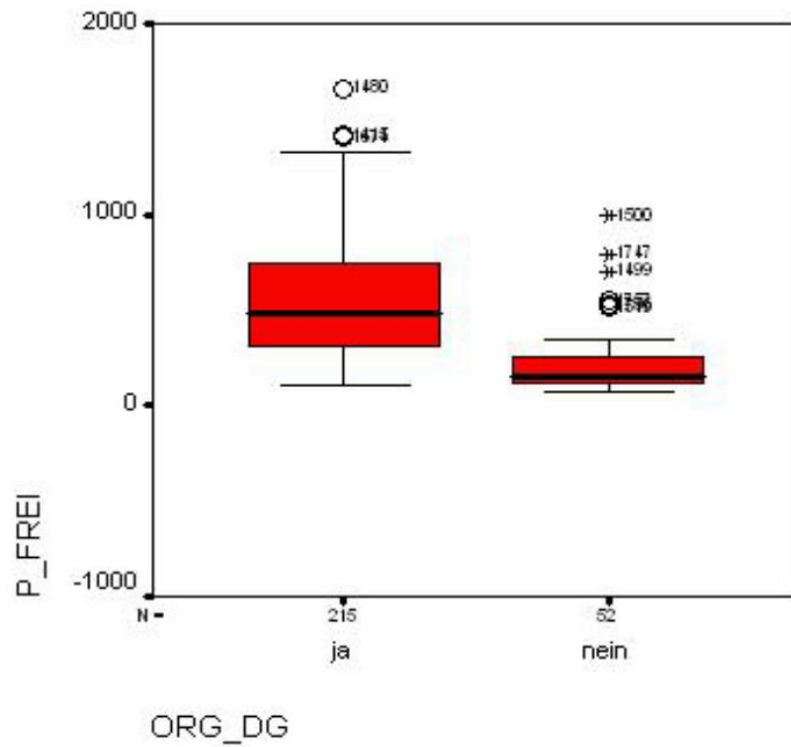


Abbildung A-7: P-Freisetzungsrates ($\mu\text{g P}/100 \text{ g Boden} \cdot \text{min}$) unter dem Einfluss einer geringen („org_Dg nein“) und regelmäßigen organischen Düngung („org_Dg ja“) – **quartäre Kiese**
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

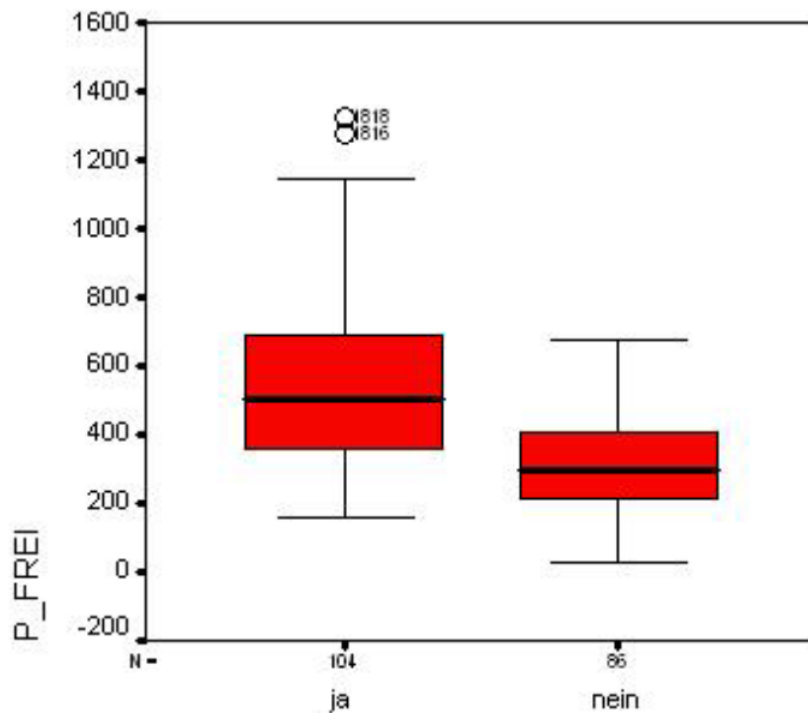


Abbildung A-8: P-Freisetzungsrates ($\mu\text{g P}/100 \text{ g Boden} \cdot \text{min}$) unter dem Einfluss einer geringen („org_Dg nein“) und regelmäßigen organischen Düngung („org_Dg ja“) – Böden auf **Schiefer**
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

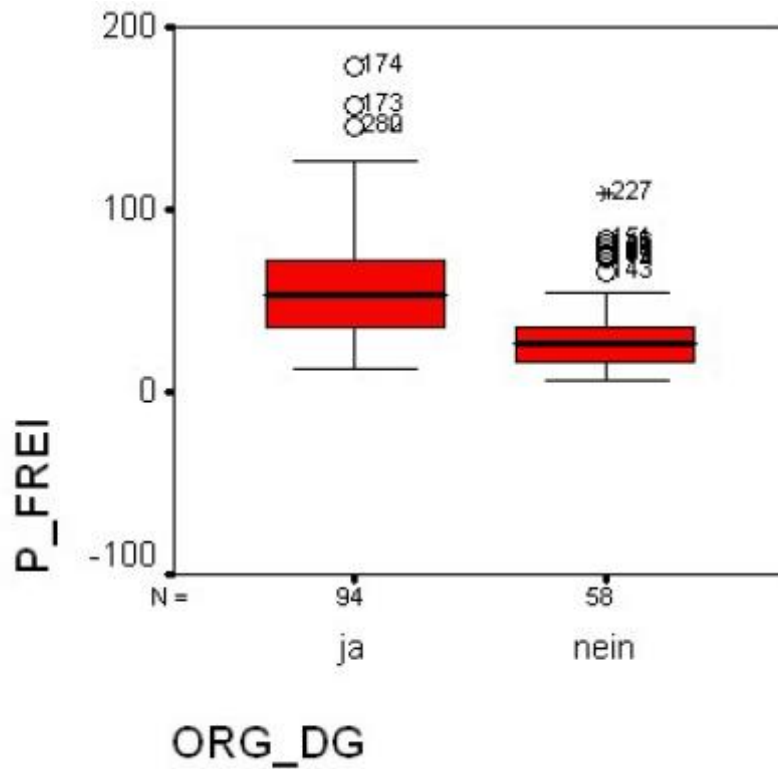


Abbildung A-9: P-Freisetzungsrates ($\mu\text{g P}/100 \text{ g Boden}\cdot\text{min}$) unter dem Einfluss einer geringen („org_Dg nein“) und regelmäßigen organischen Düngung („org_Dg ja“) – Böden auf **Buntsandstein**
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

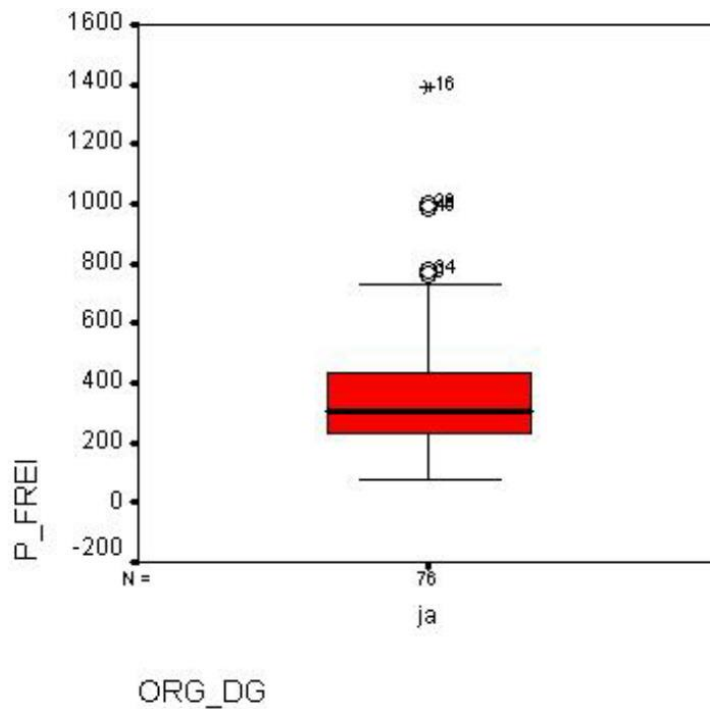


Abbildung A-10: P-Freisetzungsrates ($\mu\text{g P}/100 \text{ g Boden}\cdot\text{min}$) unter dem Einfluss einer geringen („org_Dg nein“) und regelmäßigen organischen Düngung („org_Dg ja“) – **Anmoor**
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Ergebnisse der Varianzanalysen zu den On-Farm-Versuchen

Boxplots - Relativerträge

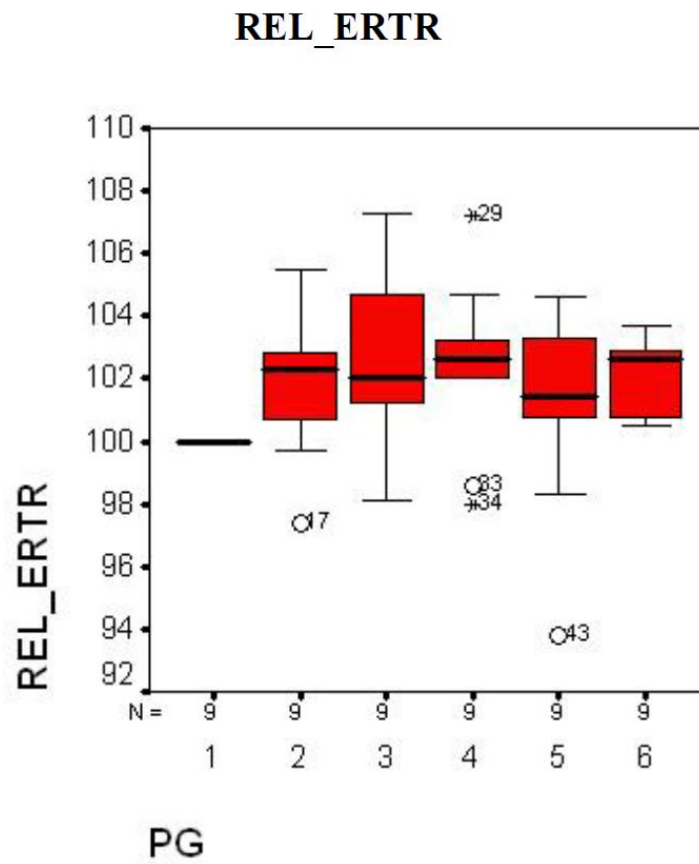


Abbildung A-11: Relativerträge in den On-Farm-Versuchen über alle Standorte und Kulturen
Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-12: Univariate Varianzanalyse der Relativerträge in den On-Farm-Versuchen ohne Berücksichtigung von Ort und Fruchtart

Tests der Zwischensubjekteffekte					
Abhängige Variable: REL_ERTR					
Quelle	Quadratsumme vom Typ I	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	47,039(a)	5	9,408	1,666	,161
Konstanter Term	558373,689	1	558373,689	98899,326	,000
PG	47,039	5	9,408	1,666	,161
Fehler	271,002	48	5,646		
Gesamt	558691,730	54			
Korrigierte Gesamtvariation	318,041	53			
a R-Quadrat = ,148 (korrigiertes R-Quadrat = ,059)					

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Ohne Berücksichtigung von Ort und Kultur keine signifikanten Unterschiede zwischen den geprüften Varianten!

Tabelle A-13: Univariate Varianzanalyse Prüfglied-Effekt unter Berücksichtigung von Versuchsort und Kultur

Tests der Zwischensubjekteffekte					
Abhängige Variable: REL_ERTR					
Quelle	Quadratsumme vom Typ I	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	179,010(a)	11	16,274	4,916	,000
Konstanter Term	558373,689	1	558373,689	168680,262	,000
KULTUR	114,470	4	28,618	8,645	,000
ORT	17,502	2	8,751	2,644	,083
PG	47,039	5	9,408	2,842	,027
Fehler	139,030	42	3,310		
Gesamt	558691,730	54			
Korrigierte Gesamtvariation	318,041	53			
a R-Quadrat = ,563 (korrigiertes R-Quadrat = ,448)					

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Unter Berücksichtigung der Faktoren KULTUR (Fruchtart) und ORT im statistischen Modell sind signifikante Unterschiede zwischen den geprüften Behandlungsvarianten sichtbar!

Tabelle A-14: Ergebnisse der Post-Hoc-Tests zu Faktor-Wirkungen – Reaktion der Fruchtart („KULTUR“); homogene Untergruppen

REL_ERTR Waller-Duncan			
KULTUR	N	Untergruppe	
		1	2
WDu	12	99,158	
WG	12		101,508
WTri	6		102,233
WW	12		102,883
WRa	12		102,925
Die Mittelwerte für Gruppen in homogenen Untergruppen werden angezeigt. Basiert auf Typ I Quadratsumme Der Fehlerterm ist "Mittel der Quadrate (Fehler) = 3,310".			
a Verwendet Stichprobengrößen des harmonischen Mittels = 10,000			
b Die Größen der Gruppen ist ungleich. Es wird das harmonische Mittel der Größe der Gruppen verwendet. Fehlerniveaus für Typ I werden nicht garantiert.			
c Quotient der Schwere des Fehlers für Typ 1/Typ 2 = 100.			

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A-15: Ergebnisse der Post-Hoc-Tests zu Faktor-Wirkungen – Reaktion der Standorte („ORT“); homogene Untergruppen

REL_ERTR Waller-Duncan				
ORT	N	Untergruppe		
		1	2	3
Alperst	6	98,817		
Ziegelh	12		100,633	
Ranis	18		102,367	102,367
Toettelst	18			102,667
Die Mittelwerte für Gruppen in homogenen Untergruppen werden angezeigt. Basiert auf Typ I Quadratsumme Der Fehlerterm ist "Mittel der Quadrate (Fehler) = 3,310".				
a Verwendet Stichprobengrößen des harmonischen Mittels = 11,077				
b Die Größen der Gruppen ist ungleich. Es wird das harmonische Mittel der Größe der Gruppen verwendet. Fehlerniveaus für Typ I werden nicht garantiert.				
c Quotient der Schwere des Fehlers für Typ 1/Typ 2 = 100.				

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022

Tabelle A- 16: Ergebnisse der Post-Hoc-Tests zu Faktor-Wirkungen – Reaktion der Prüfglieder („PG“);
homogene Untergruppen

REL_ERTR Waller-Duncan			
	N	Untergruppe	
PG		1	2
1	9	100,000	
5	9	101,011	101,011
2	9	101,833	101,833
6	9		102,089
4	9		102,378
3	9		102,811
Die Mittelwerte für Gruppen in homogenen Untergruppen werden angezeigt. Basiert auf Typ I Quadratsumme Der Fehlerterm ist "Mittel der Quadrate (Fehler) = 3,310".			
a Verwendet Stichprobengrößen des harmonischen Mittels = 9,000			
b Quotient der Schwere des Fehlers für Typ 1/Typ 2 = 100.			

Quelle: U.A.S. GmbH, 2022