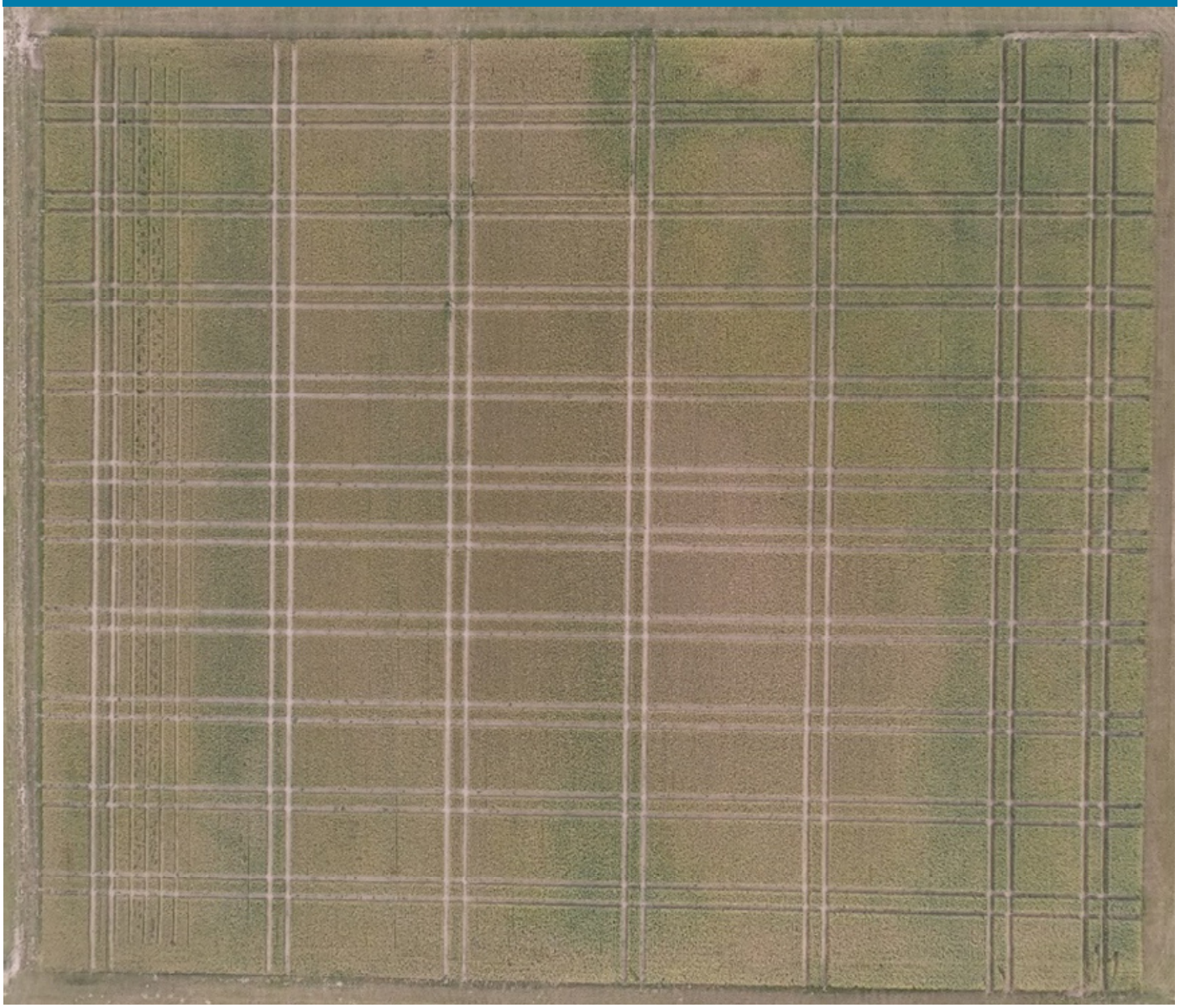
Mecklenburg Vorpommern

Landesforschungsanstalt
für Landwirtschaft und Fischerei

ZWISCHENBERICHT

Grunddüngungstrategie zur Sicherung einer hohen Effizienz des Düngemitteleinsatzes und der Bodenfruchtbarkeit in MV

Auswertungszeitraum 1997 – 2019 (2020)



IMPRESSUM

Titel
Grunddüngungstrategie zur Sicherung einer hohen Effizienz des Düngemitteleinsatzes und der Bodenfruchtbarkeit in MV

Berichtzeitraum
1997-2020

Herausgeber
Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern
Dorfplatz 1/OT Gülzow • 18276 Gülzow-Prüzen
Telefon: 03843/789-0
Fax: 03843/789-111
poststelle@lfa.mvnet.de
www.lfamv.de

Autoren
Ines Bull • Telefon: 03843 - 789 230
Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern
Institut für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft
Sachgebiet Acker- und Pflanzenbau
Dorfplatz 1/OT Gülzow • 18276 Gülzow-Prüzen • **www.lfamv.de**

Statistische Auswertungen
Andrea Zenk, Volker Michel, Friederike de Mol
Sachgebiet Biostatistik und Sortenwesen
Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern
Dorfplatz 1/OT Gülzow • 18276 Gülzow-Prüzen • **www.lfamv.de**

Titelfoto
Tim Balschmiter

Gülzow, 02.07.2020

INHALT

1 Zielstellung 6

2 Material und Methoden 6
2.1 Versuchsdurchführung 6
2.2 Witterung/Standort 9
2.3 Schwachstellenanalyse und Statistik 10

3 Ergebnisse und Diskussion 15
3.1 Nährstoffbilanzen 15
3.2 Entwicklung der pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte im Boden 16
3.2.1 Phosphor 16
3.2.1.1 Einfluss der P-Düngungshöhe auf den P-Gehalt im Boden 16
3.2.1.2 Einfluss der erweiterten Düngeplanung auf die P-Gehalte im Boden 18
3.2.1.3 Einfluss der K-Düngung und des Düngungstermins auf die P-Gehalte im Boden 20
3.2.2 Kalium 22
3.2.2.1 Einfluss der K-Düngungshöhe auf den K-Gehalt im Boden 22
3.2.2.2 Einfluss der erweiterten Düngeplanung auf die K-Gehalte im Boden 23
3.2.2.3 Einfluss der P-Düngung und des Düngungstermins auf die K-Gehalte im Boden 25
3.3 Einfluss der Nährstoffgehalte im Boden und der Düngung auf die Ertragsbildung 27
3.3.1 Vergleich über alle Düngungsvarianten 28
3.3.2 Auswirkungen eines Anbaus ohne P-/K-Düngung 32
3.3.3 Erweiterte Düngeplanung 35
3.3.4 Phosphor-Düngewirkung ohne Kaliumdüngung 39
3.3.5 Höhe der Phosphor-Düngung 41
3.3.6 Termin der Phosphordüngung 43
3.3.7 Kalium-Düngewirkung ohne Phosphordüngung 45
3.3.8 Höhe der Kaliumdüngung 48
3.3.9 Termin der Kaliumdüngung 51
3.3.10 Höhe der P-/K-Düngung im Frühjahr 53
3.3.11 Termin der P-/K-Düngung 55

4 Zusammenfassung der Schlussfolgerungen 57

5 Fazit und Ausblick 58

6 Literaturverzeichnis 60

7 Anhang 62

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: P-/K-Düngungsvarianten im Versuch 6
Tabelle 2: Mittlere jährliche mineralische Phosphor-Düngung je Kulturart 7
Tabelle 3: Mittlere jährliche mineralische Phosphor-Düngung im Versuchsverlauf 8
Tabelle 4: Mittlere jährliche mineralische Kalium-Düngung je Kulturart 8
Tabelle 5: Mittlere jährliche mineralische Kalium-Düngung im Versuchsverlauf 8
Tabelle 6: Tongehalte in Boden ausgewählter Parzellen 13
Tabelle 7: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden, Tiefe 30-60 cm 20
Tabelle 8: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt, Tiefe 30-60 cm 25
Tabelle 9: Zusammenfassung ausgewählter signifikanter Ergebnisse 60
Tabelle 10: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag in der Fruchtfolge 62
Tabelle 11: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag in der Fruchtfolge 62
Tabelle 12: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag bei Wintergerste 62
Tabelle 13: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag bei Wintergerste 62
Tabelle 14: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag bei Winterraps 62
Tabelle 15: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag bei Winterraps 63
Tabelle 16: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag bei Winterweizen 63
Tabelle 17: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag bei Winterweizen 63
Tabelle 18: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag bei Kartoffeln 63
Tabelle 19: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag bei Kartoffeln 63
Tabelle 20: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag bei Silomais 64
Tabelle 21: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag bei Silomais 64
Tabelle 22: Ertrag Winterweizen bei gleicher Düngung, Gülzow, 2020 64
Tabelle 23: Ertrag Winterraps bei gleicher Düngung, Gülzow, 2020 64
Tabelle 24: Ertrag Wintergerste bei gleicher Düngung, Gülzow, 2020 65

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Niederschlagssumme von Anfang Dezember bis Ende März 9
Abbildung 2: Trockentage (< 1mm Niederschlag/Tag) im März und April 10
Abbildung 3: Trockentage (< 1mm Niederschlag/Tag) im Mai und Juni 10
Abbildung 4: Luftbilder aus Jahren mit differenzierter Bestandesentwicklung, Versuchsschlag E1 11
Abbildung 5: Luftbilder aus Jahren mit differenzierter Bestandesentwicklung, Versuchsschlag E2 12
Abbildung 6: Luftbilder aus Jahren mit differenzierter Bestandesentwicklung, Versuchsschlag E3 12

Abbildung 7: Gegenüberstellung eines Luftbildes und der entsprechenden Bodenkarte nach dem Verfahren „Geostatistik Langparzelle Grundverfahren“ 14

Abbildung 8: Mittlere jährliche Kaliumbilanz 1998-2019 in Abhängigkeit von der Düngung 16

Abbildung 9: Mittlere jährliche Phosphorbilanz 1998-2019 in Abhängigkeit von der Düngung 16

Abbildung 10: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen P-Düngungshöhe 18

Abbildung 11: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie 19

Abbildung 12: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie, Düngungstermin unterschiedlich..... 19

Abbildung 13: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie auf gleicher P-Düngungsstufe (nach 100% Abfuhr) 21

Abbildung 14: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie auf gleicher P-Düngungsstufe (nach 50% Abfuhr) 22

Abbildung 15: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen K-Düngungshöhe 23

Abbildung 16: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie 24

Abbildung 17: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie, Düngungstermine unterschiedlich..... 25

Abbildung 18: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie auf gleicher K-Düngungsstufe (100%),27

Abbildung 19: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie auf gleicher K-Düngungsstufe (0%), .. 27

Abbildung 20: Jährliches Phosphorbilanzsaldo ohne P- und ohne K-Düngung 28

Abbildung 21: Jährliches Kaliumbilanzsaldo ohne P- und ohne K-Düngung..... 28

Abbildung 22: Ertrag in Abhängigkeit der langjährigen Düngungsstrategie und der Zeit, Gülzow, 1998-2019 31

Abbildung 23: Ertrag in Abhängigkeit der langjährigen Düngungsstrategie und der Zeit mit und ohne P-/K-Düngung 34

Abbildung 24: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich der Variante erweiterte Düngeplanung mit allen anderen Düngungsvarianten 37

Abbildung 25: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich erweiterte Düngeplanung mit Düngung entsprechend Abfuhr 38

Abbildung 26: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich der Variante ohne Düngung mit der Variante P-Düngung entsprechend Abfuhr und ohne K-Düngung 40

Abbildung 27: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich unterschiedlicher P-Düngungshöhe 42

Abbildung 28: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich unterschiedlicher Düngungstermine einer P-Düngung entsprechend halber Abfuhr 44

Abbildung 29: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich der Variante ohne Düngung mit der Variante K-Düngung entsprechend Abfuhr und ohne P-Düngung 47

Abbildung 30: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich unterschiedlicher K-Düngungshöhe 50

Abbildung 31: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich unterschiedlicher Düngungstermine einer K-Düngung entsprechend halber Abfuhr 52

Abbildung 32: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich unterschiedlicher Düngungshöhen einer P-/K-Düngung im Frühjahr 54

Abbildung 33: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich der P-/-K-Düngungstermine bei Menge entsprechend Abfuhr 56

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

DL	Doppellactat-Methode
F	Frühjahr
FF	Fruchtfolge
GD	Grenzdifferenz
GE	Getreideeinheiten
H	Herbst
K	Kalium
Ka	Kartoffeln
P	Phosphor
PG	Prüfglied
PLAN+	erweiterte Düngeplanung
SM	Silomais
WG	Wintergerste
WRa	Winterraps
WW	Winterweizen

1 Zielstellung

Im Zwischenbericht 2018 wurden die grundlegenden versuchsmethodischen Probleme des Gülzower P-/K-Dauerdüngungsversuches für Ertragsauswertungen dargelegt. Die Aufgabenstellung für den aktuellen Bericht bestand darin, unter Einbeziehung aller bis 2019 ermittelten Erträge, für alle Kulturarten und mithilfe einer zusätzlichen Schwachstellenanalyse eine erweiterte Auswertung vorzunehmen.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsdurchführung

Da es in diesem Bericht um die speziellen Wirkungen der P- und/oder K-Düngung geht, wird der Begriff „Düngung“ ohne weiteren Zusatz generell als Synonym für „P-/K-Düngung“ verwendet.

Der Gülzower P-/K-Dauerdüngungsversuch ist ein statischer, also ortsstabiler Versuch, der 1997 auf dem Versuchsfeld „Am Hechtsoll“ angelegt wurde. Ursprünglich wurden dort in jedem Jahr alle vier Kulturarten einer Rotation angebaut. 2010 wurde ein Schlag aus der Versuchsbewirtschaftung herausgenommen, so dass seitdem pro Jahr drei von vier Kulturen gleichzeitig angebaut werden.

Der Versuch läuft in der vierfeldrigen Fruchtfolge: Winterraps – Winterweizen – Kartoffeln – Wintergerste. Seit 2014 wurden die Kartoffeln durch Silomais ersetzt. Er ist als Langparzellenanlage mit wiederholten Standards konzipiert und umfasst elf Düngungsvarianten sowie zwölf Standards mit jeweils vier unechten Wiederholungen. Als Standard dient das Prüfglied 0-0, die Variante ohne P- und ohne K-Düngung, welches in jedem Versuchsschlag 12mal mit je vier unechten Wiederholungen angelegt ist (Tabelle 1 und Abbildung 4). Mithilfe dieser Standards sollte über ein geostatistisches Verfahren der Ausgleich der Bodeneinflüsse erfolgen (Michel, 2002).

Tabelle 1: P-/K-Düngungsvarianten im Versuch

Kurzbezeichnung	PG	Düngungsniveau in % der Abfuhr, Düngungstermin	
		Phosphor	Kalium
0 - 0	1	0	0
PLAN+	2	erweiterte Düngeplanung, zu Mais im Frühjahr, sonst Herbst	
F 50 – F 50	3	50, Frühjahr	50, Frühjahr
H 100 – F 50	4	100, Herbst	50, Frühjahr
H 50 – H 100	5	50, Herbst	100, Herbst
H 100 – H 50	6	100, Herbst	50, Herbst
H 100 – H 100	7	100, Herbst	100, Herbst
F 100 – F 100	8	100, Frühjahr	100, Frühjahr
F 50 – H 100	9	50, Frühjahr	100, Herbst
0 – H 100	10	0	100, Herbst
H 100 – 0	11	100, Herbst	0

In allen Parzellen verbleibt das Stroh auf dem Feld. Die Bodenbearbeitung erfolgt jeweils angepasst an die Kultur. Mindestens einmal in der Rotation kommt der Pflug zum Einsatz, so dass eine Durchmischung der oberen Ackerkrume gewährleistet ist. Eine Einzelparzelle hat eine Größe von 9 m x 9 m. Die Ertragsermittlung erfolgt als Kerndrusch mit einer Breite von 1,50 m. Durch die Parzellenbreite von 9 m ist gewährleistet, dass das geplante Düngungsniveau in der Kernparzelle auch nach der Bodenbearbeitung erhalten bleibt.

Die Düngung bemisst sich an der erwarteten Nährstoff-Abfuhr. Die Nährstoff-Abfuhr wird aus dem Zielertrag, welcher von den erzielten Erträgen der vergangenen Jahre abgeleitet wird, und den mittleren P-/K-Gehalten im Erntegut der vergangenen Jahre berechnet. Lagen noch nicht ausreichend Daten vor Beginn einer Rotation vor (Rotation 1 und für Silomais Rotation 5), wurden stattdessen Richtwerte verwendet. Die Berechnung erfolgt jeweils einheitlich für eine Rotation. Ergänzend dazu werden für die Prüfvariante „erweiterte Düngeplanung“ – in den vorhergehenden Berichten als „LUFA-Empfehlung“ bezeichnet – die Nährstoffzufuhr durch das Stroh der Vorfrucht (ermittelter Strohertrag x Nährstoffgehalt nach Richtwerten sowie Zu- und Abschläge in Abhängigkeit der Nährstoffgehalte im Boden zu Beginn einer Rotation) berücksichtigt. Es werden die jeweils gültigen Richtwerte und die empfohlenen Zu- und Abschläge des Landes MV genutzt (Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, 2017). Nach 100 % Abfuhr und nach erweiterter Düngeplanung wurden ähnliche Mengen an Phosphor gedüngt. Einen Unterschied gibt es bei der Kaliumdüngung. Nach erweiterter Düngeplanung wurde über die gesamte Fruchtfolge ca. die 1,5fache Menge Kalium ausgebracht (Tabelle 2, Tabelle 3, Tabelle 4, Tabelle 5).

Die Grunddüngung wurde in Abhängigkeit von den Prüfvarianten im Herbst vor der Grundbodenbearbeitung oder im Frühjahr bei Befahrbarkeit bzw. vor der Maisaussaat ausgebracht. Die Frühjahrsdüngung zu Kartoffeln erfolgte auf die Dämme. Für die Prüfvariante PLAN+ wurde mit dem Wechsel der Kulturart (Silomais anstelle Kartoffeln) der Grunddüngungstermin zur Hackfrucht verändert. Die Grunddüngung erfolgte in der Prüfvariante PLAN+ zu Kartoffeln immer im Herbst, zu Silomais jedoch im Frühjahr.

In der Varianten F50-F50 wurde bis 2017 NPK-Dünger verwendet. Dadurch waren Abweichungen zu den geplanten P-/K-Mengen nicht zu vermeiden. Vor allem zu den Mähdruschfrüchten wurde mehr Kalium als nach 50 % der Abfuhr geplant ausgebracht.

Tabelle 2: Mittlere jährliche mineralische Phosphor-Düngung je Kulturart, Gülzow 1998-2019, [P kg/ha und Jahr]

gedüngte Kultur	ohne Düngung	nach erweiterter Düngungsplanung (PLAN+)	entsprechend 100% Abfuhr	entsprechend 50% Abfuhr	entsprechend 50% Abfuhr mit NPK
Winterraps	0	35	34	17	15
Winterweizen	0	29	29	15	14
Kartoffeln	0	21	27	15	15
Silomais	0	26	36	18	18
Wintergerste	0	29	29	14	13
Fruchtfolge	*0*	*28*	*30*	*15*	*15*

Tabelle 3: Mittlere jährliche mineralische Phosphor-Düngung im Versuchsverlauf, Gülzow 1998-2019, [P kg/ha und Jahr]

Erntejahr	ohne Düngung	nach erweiterter Düngungsplanung (PLAN+)	entsprechend 100% Abfuhr	entsprechend 50% Abfuhr	entsprechend 50% Abfuhr mit NPK
1998-2001	0	30	31	16	16
2002-2005	0	34	31	16	16
2006-2009	0	31	31	15	14
2010-2013	0	30	31	15	14
2014-2017	0	27	30	15	15
2018-2019	0	7	26	13	13
1998-2019	*0*	*28*	*30*	*15*	*15*

Tabelle 4: Mittlere jährliche mineralische Kalium-Düngung je Kulturart, Gülzow 1998-2019, [K kg/ha und Jahr]

gedüngte Kultur	ohne Düngung	nach erweiterter Düngungsplanung (PLAN+)	entsprechend 100% Abfuhr	entsprechend 50% Abfuhr	entsprechend 50% Abfuhr mit NPK
Winterraps	0	121	35	18	26
Winterweizen	0	59	40	21	26
Kartoffeln	0	179	218	117	111
Silomais	0	163	202	98	99
Wintergerste	0	131	39	19	23
Fruchtfolge	*0*	*121*	*83*	*43*	*46*

Tabelle 5: Mittlere jährliche mineralische Kalium-Düngung im Versuchsverlauf, Gülzow 1998-2019, [K kg/ha und Jahr]

Erntejahr	ohne Düngung	nach erweiterter Düngungsplanung (PLAN+)	entsprechend 100% Abfuhr	entsprechend 50% Abfuhr	entsprechend 50% Abfuhr mit NPK
1998-2001	0	99	83	48	46
2002-2005	0	160	88	44	46
2006-2009	0	122	85	44	48
2010-2013	0	135	86	45	48
2014-2017	0	102	78	37	46
2018-2019	0	92	73	36	36
1998-2019	*0*	*121*	*83*	*43*	*46*

Bodenproben zur Analyse der pflanzenverfügbaren P- und K-Gehalte im Boden werden nach der Ernte parzellenweise jedes Jahr in der Bodentiefe 0 - 30 cm und jedes vierte Jahr zusätzlich in 30 - 60 cm auf genau eingemessenen Teilflächen jeder Langparzelle gezogen.

In der Versuchsfruchtfolge wurden Kartoffeln von 1998 – 2013 insgesamt in 12 Jahren angebaut. Davon wurden zehn Jahre in die Auswertung einbezogen. Mit dem Anbaujahr 2014 erfolgte ein Kulturartenwechsel zu Mais. Dieser wurde als Silomais von 2014 bis 2019 angebaut, ab Erntejahr 2015 mit vorheriger Zwischenfrucht. Das Zwischenfruchtgemenge (ohne Kruziferen) wurde nach Winterweizen im Anschluss an die Herbstdüngung und Bodenbearbeitung ausgesät. Für Silomais liegen

der Auswertung 5 Ernten zugrunde. Die drei anderen Kulturen wurden in der Fruchtfolge unverändert von 1997/98 bis 2018/19 angebaut. Von Winterraps konnten 12, von Winterweizen 14 und von Wintergerste 16 Ernten in die mehrjährige Auswertung einbezogen werden.

2.2 Witterung/Standort

Die Versuchsstation Gülzow liegt zentral in Mecklenburg im Güstrower Becken, einem vergleichsweise niederschlagsarmen Gebiet. Im langjährigen Mittel (1988-2017) beträgt die Jahresniederschlagssumme 557 mm, die Jahresmitteltemperatur 9,1 °C. Im Laufe der Versuchsanstellung hatte unterschiedliche Jahreswitterung Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Insbesondere Jahre mit langen Trockenperioden in der Hauptwachstumszeit sind mit besonders niedrigen Erträgen verbunden. Jahre mit hohen Winterniederschlägen könnten durch höhere Auswaschungsverluste an Nitrat aber auch Kalium die Versuchsergebnisse beeinflusst haben.

Der Standort ist dem Boden-Klima-Raum 101 „mittlere diluviale Böden MV und Uckermark “ zuzuordnen (Roßberg et al. 2007). Die Bodendecke besteht aus Geschiebemergel der Weichselkaltzeit. Die Höhe über NN beträgt ca. 10 m. Der Grundwasserabstand liegt in dem leicht welligen Relief um zwei bis drei Meter. In der Ackerkrume sind die Bodenarten schwach lehmiger Sand (Sl2), mittel lehmiger Sand (Sl3) und schwach schluffiger Sand (Su2) anzutreffen. Diese wurden für die Düngungskalkulationen der Bodengruppe 2 nach VdLUFA zugeordnet.

Deumlich (2008) beschrieb den Boden eines benachbarten Schlages auf dem Versuchsfeld „Am Hechtsoll“ als sandigen Regosol über reinem Sand. Aufgrund der kleinräumigen Heterogenität fand er auch karbonathaltige Fahlerde-Haftpseudogleye und Normparabraunerden über Lehmsanden und karbonatfreie Kolluvisole. Der Humusgehalt des Oberbodens liegt zwischen 1,1 und 1,3 %. Die nutzbare Feldkapazität wurde als „gering“ eingestuft.

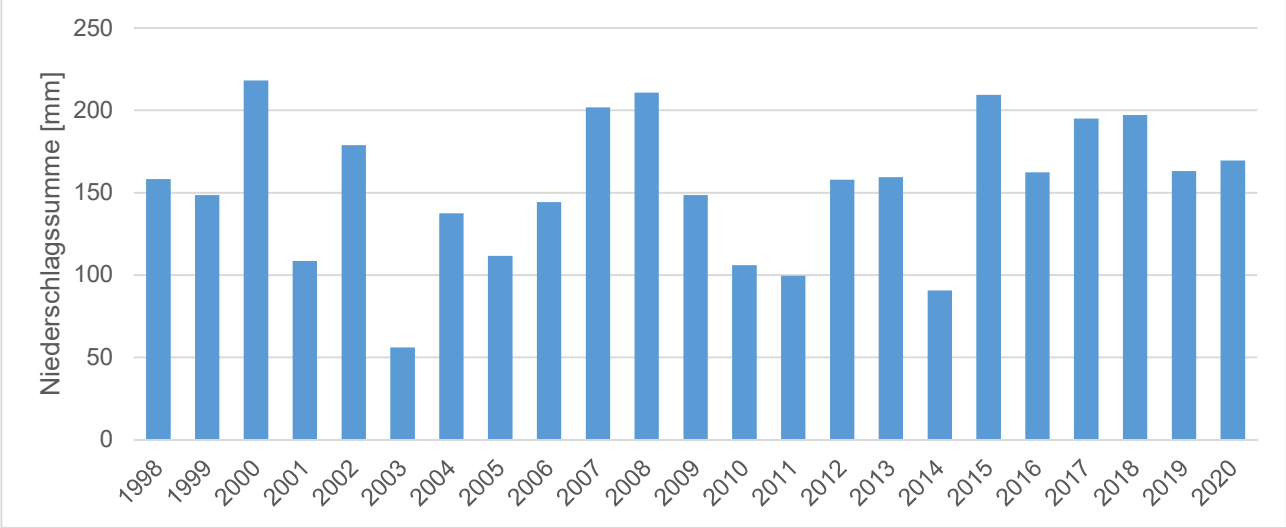


Abbildung 1: Niederschlagssumme von Anfang Dezember bis Ende März bezogen auf das Erntejahr, Gülzow

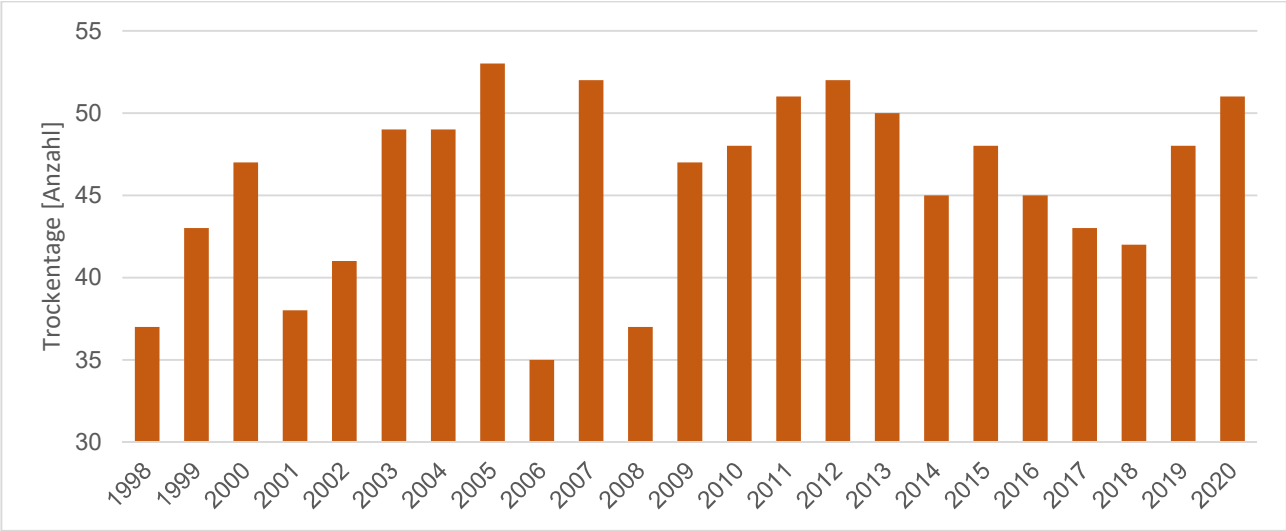


Abbildung 2: Trockentage (< 1mm Niederschlag/Tag) im März und April, Gülzow

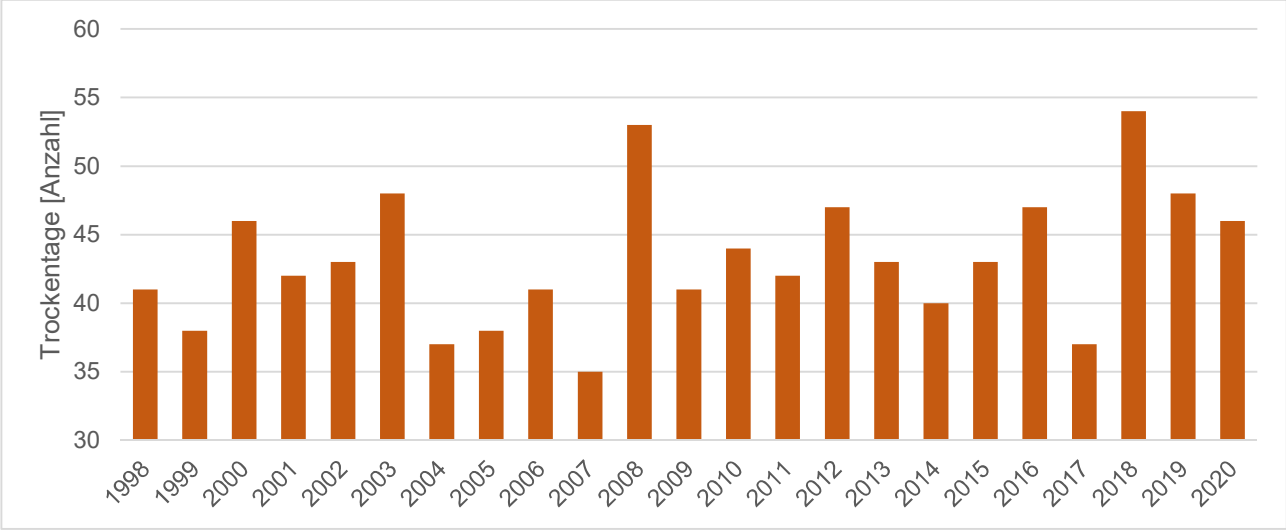


Abbildung 3: Trockentage (< 1mm Niederschlag/Tag) im Mai und Juni, Gülzow

2.3 Schwachstellenanalyse und Statistik

Das Problem bei der Auswertung von Langparzellenanlagen mit wiederholten Standards besteht in fehlender Randomisation und echter Wiederholung der Prüfvarianten. Bodeneinflüsse, die die Effekte der Prüffaktoren überlagern, sollen durch die Standards ausgeglichen werden. Bei Düngungsversuchen ist jedoch von erheblichen Interaktionen zwischen Boden- und Prüfvarianteneinflüssen auszugehen, so dass diese Anlageform nach heutigem Wissensstand ungeeignet ist. Die der Versuchsfrage geschuldete statische Ausführung und die leider identischen Parzellen-Lagepläne der drei Versuchsschläge verschärfen das Problem. Eine weitere Schwachstelle besteht darin, dass es keine Bodengehalts- und Ertragsfeststellungen vor Versuchsbeginn gibt, aus der evtl. der Einfluss der Bodenunterschiede auf die Ertragsdifferenzierung zwischen den Parzellen abgeleitet werden könnte. So bleiben in allen ermittelten Parzellenerträgen Düngungs- und Standorteinflüsse vermengt.

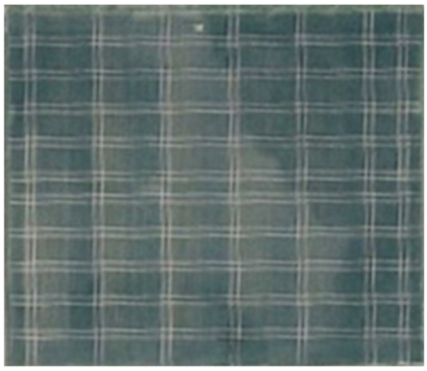
Die statistische Auswertung der Einzeljahresergebnisse bezogen auf einen Schlag erfolgt mit dem PIAFStat-Verfahren „Geostatistik Dauerdüngung“, welches eine Anpassung des Verfahrens „Geostatistik Langparzelle Grundverfahren“ an die spezielle Anlage des beschriebenen Versuches ist und die geostatistische Auswertung mit optimiertem Bodenausgleich ermöglichen soll (Michel et al. 2007,

Zenk & Michel 2006). Für die Ertragsauswertung der Jahre 2016, 2018 und 2019 wurde das neuere Verfahren „EVA - einfaktorielle Versuchsauswertung“ ‚Stand I/2019 verwendet. Die Bodenheterogenität wird hier durch einen geostatistischen Autokorrelationsansatz modelliert, Basis sind die in der Fläche verteilten Parzellen des Standards. Die Softwaregrundlage für PIAFStat-Verfahren ist SAS® (Michel & Zenk 2010).

Für einen Teil der Versuchsjahre liegen Luftbilder für die Versuchsschläge vor. Diese und eine Übersicht der Tongehalte im Boden für die unterschiedlichen Parzellen zeigen die typischen Bodenunterschiede einer sandigen Grundmoräne in MV. Leider liegen nicht für alle Parzellen Analysen des Tongehaltes vor, so dass diese nicht für die geostatistische Korrektur genutzt werden können (Tabelle 6). In Jahren mit optisch sichtbarer Bestandesdifferenzierung im Luftbild wir deutlich, dass diese in weit größerem Ausmaß durch Bodenunterschiede als durch die Prüfvarianten verursacht wird. Der Einfluss der Prüfvarianten ist an der streifenförmigen Ausprägung aufgrund der Lage der Parzellen zu erkennen. Bodenbedingte Einflüsse verursachen eher rundliche abgegrenzte Formen, die unabhängig zu den Parzellengrenzen verlaufen. Im Luftbild sind Düngungseffekte auf einem Teil der Parzellen auf dem Schlag E1 in den Jahren 2016, 2019 und 07/2020, nie auf dem Schlag E2 und auf dem Schlag E3 in den Jahren 2016 und 2019 zu erkennen (Abbildung 4, Abbildung 5 und Abbildung 6). Ein geostatistischer Ausgleich dieser Bodenunterschiede der gemessenen Parzellenerträge ist vor diesem Hintergrund dringend geboten. Dass das Erfassen der Bodenunterschiede mittels der gleichmäßig auf der Fläche verteilten Standards funktioniert, ist in Abbildung 7 gut sehen.



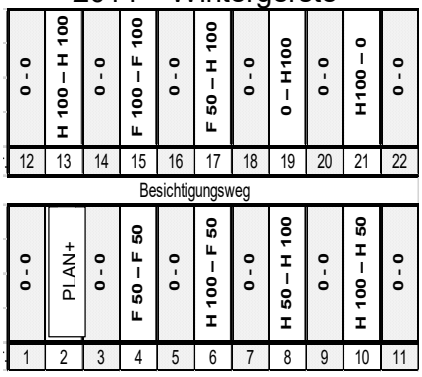
2014 – Wintergerste*



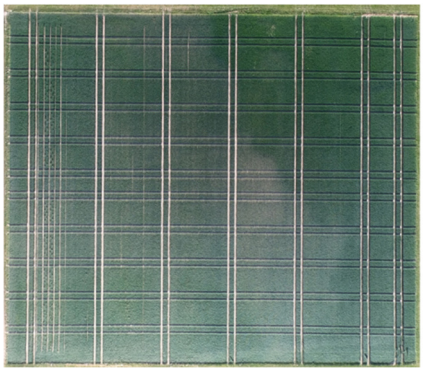
2016 – Sommerweizen*



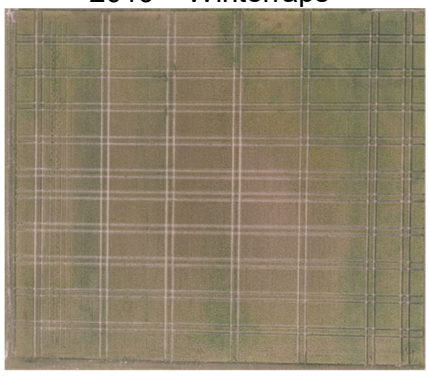
2019 – Winterraps*



Lageplan für alle Schläge

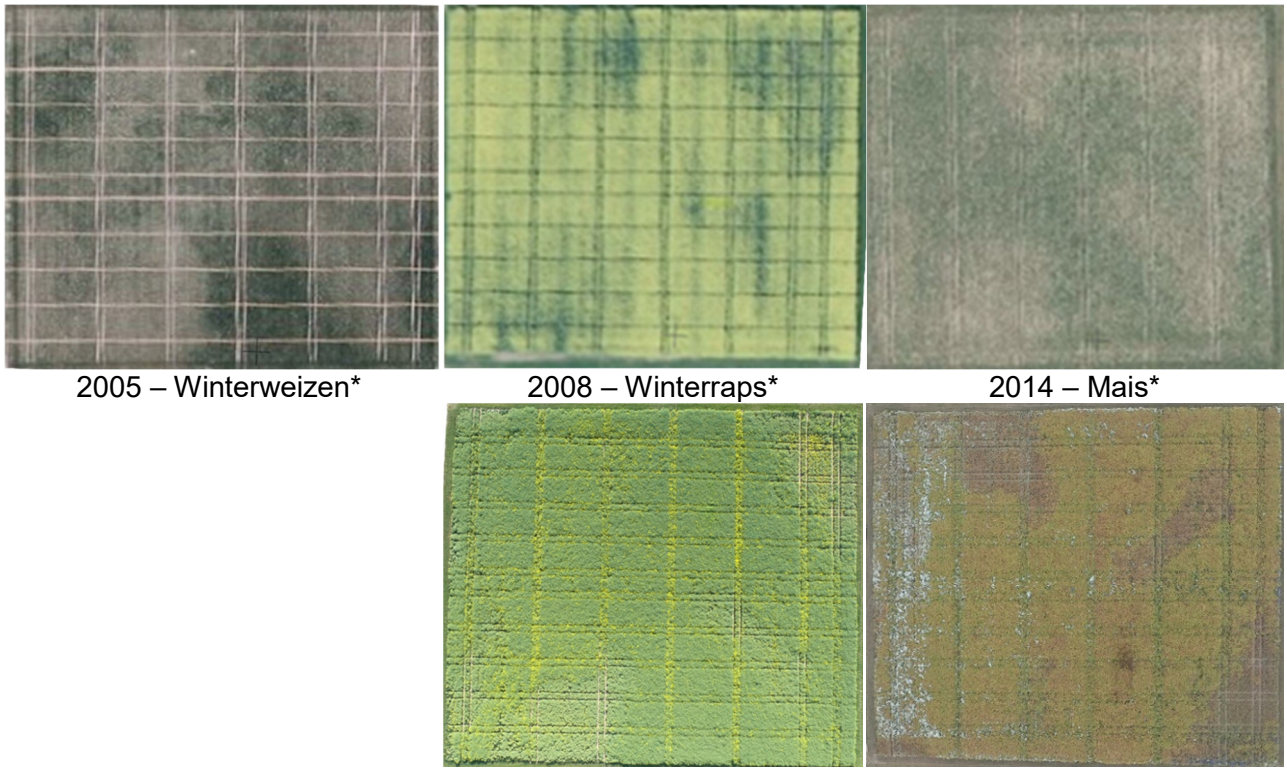


05/2020 – Winterweizen**



07/2020 – Winterweizen**

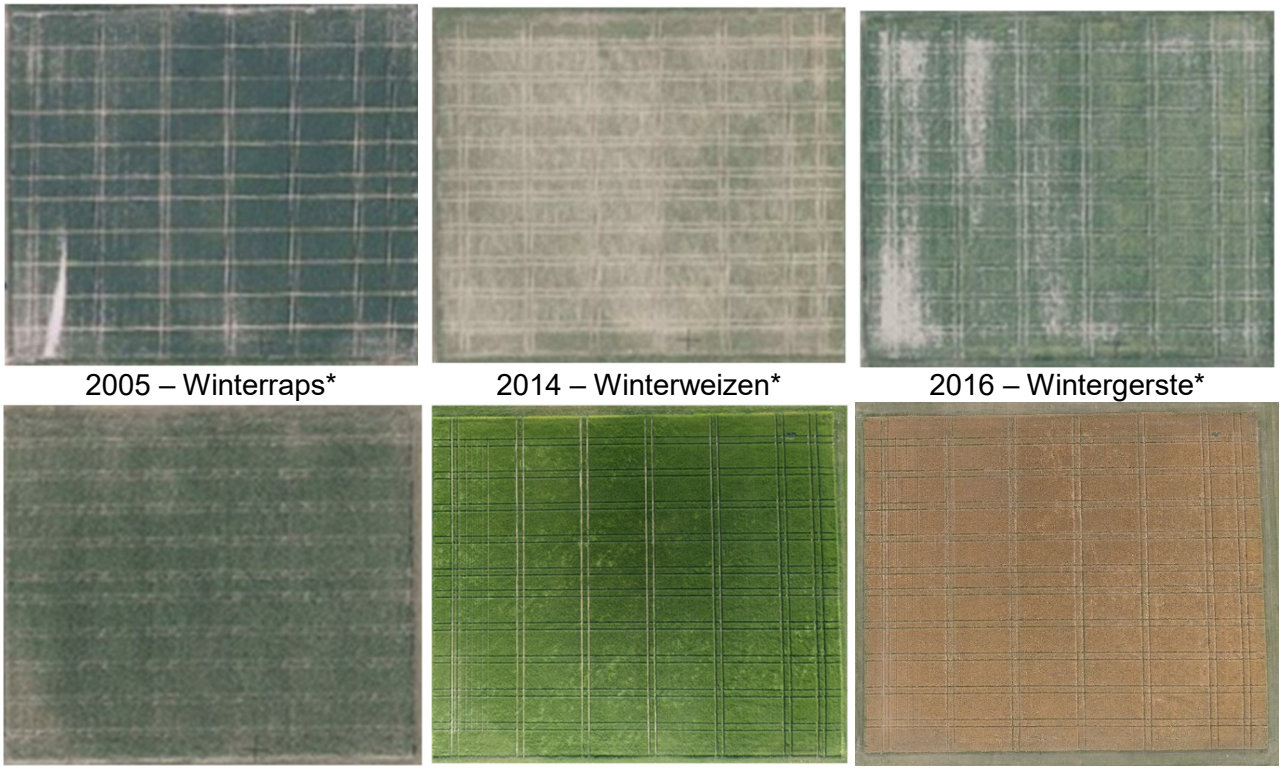
*Abbildung 4: Luftbilder aus Jahren mit differenzierter Bestandesentwicklung, Versuchsschlag E1, *Orthophotos: © GeoBasis-DE/M-V 2020, ** Foto: Balschmiter, 2020*



2005 – Winterweizen* | 2008 – Winterraps* | 2014 – Mais*

05/2020 – Winterraps** | 07/2020 – Winterraps**

*Abbildung 5: Luftbilder aus Jahren mit differenzierter Bestandesentwicklung, Versuchsschlag E2, *Orthophotos: © GeoBasis-DE/M-V 2020, ** Foto: Balschmiter, 2020*



2005 – Winterraps* | 2014 – Winterweizen* | 2016 – Wintergerste*

2019 – Mais* | 05/2020 – Wintergerste** | 07/2020 – Wintergerste**

*Abbildung 6: Luftbilder aus Jahren mit differenzierter Bestandesentwicklung, Versuchsschlag E3, *Orthophotos: © GeoBasis-DE/M-V 2020, ** Foto: Balschmiter, 2020*

Tabelle 6: Tongehalte in Boden ausgewählter Parzellen (Messwerte mehrerer Teilparzellen einer Langparzelle sind durch Schrägstrich getrennt)

Versuchsschlag	Parzellennummer	Tongehalt 0-30 cm [%]	Tongehalt 30-60 cm [%]
1	1	6	4
1	2	6,3	4,7
1	3	5,5	4
1	5	6	5
1	7	7	4
1	9	7	7
1	11	8	8
1	12	7/7	7
1	14	6	6
1	15	5,6	4,4
1	16	7/6	6
1	18	7/6,4	6/5,3
1	20	6	10
1	22	7	7
2	1	5	5
2	2	7,4	5,3
2	3	7	8
2	5	6	5
2	7	7,5	8
2	9	6	6
2	11	8,5	9
2	12	9/6	7
2	14	6	6
2	15	8,2	6,2
2	16	10/8	6
2	18	7/7,5	8/15,5
2	20	8/7	10
2	22	5	3
3	1	7	6
3	3	8/6	3/6
3	5	6,5	5,5
3	7	8/8	6/12
3	9	8/7	13/10
3	11	7/10	5/14
3	12	7/9	7/7
3	14	7,5	5
3	16	6/7	6/6
3	18	7/7	7/8
3	20	8/7	16/6
3	22	7	7

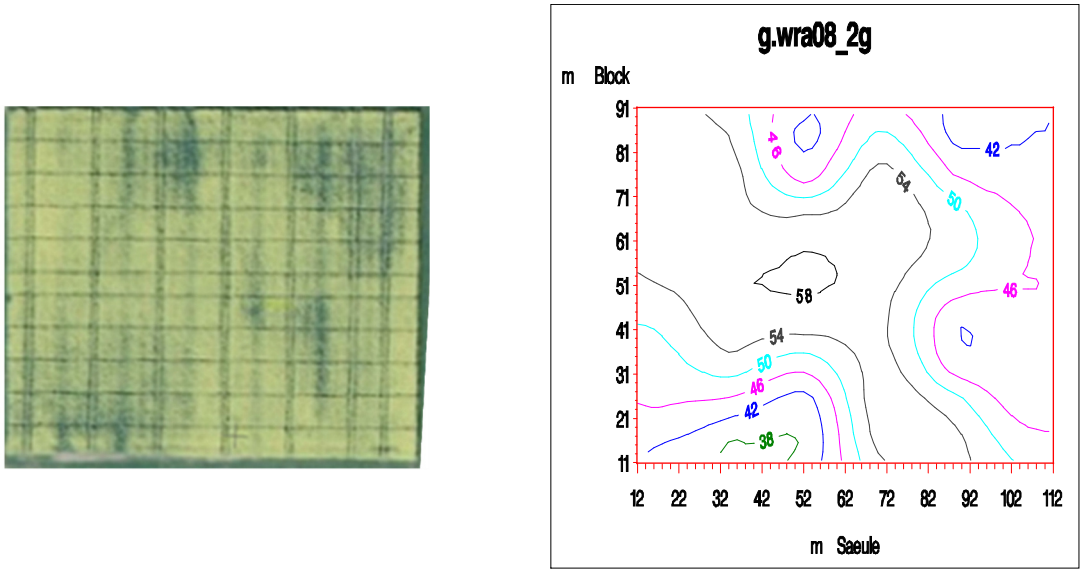


Abbildung 7: Gegenüberstellung eines Luftbildes und der entsprechenden Bodenkarte nach dem Verfahren „Geostatistik Langparzelle Grundverfahren“

Für die aktuelle Schwachstellenanalyse der Ertragsauswertungen wurden alle Einzeljahresauswertungen auf Plausibilität geprüft. Als sicher unplausible signifikante Unterschiede werden dabei signifikant höhere Erträge bezeichnet, die bei gleichem Düngeniveau eines Nährstoffes und insgesamt gleichen Düngeterminen, mit einem niedrigeren Düngeniveau des anderen Nährstoffes zusammentreffen. Für diese Fehleranalyse können folgend aufgelistete Vergleiche als unplausibel gewertet werden:

- 0 - 0 > alle anderen Prüfvarianten
- 0 – H 100 > H 50 – H 100, F 50 – H 100, H 100 – H 100, LUFA
- H 100 – 0 > H 100 – F 50, H 100 – H 50, H 100 – H 100, LUFA
- H 50 – H 100 > H 100 – H 100, LUFA
- H 100 – H 50 > H 100 – H 100, LUFA
- F 50 – F 50 > F 100 – F 100

Eine Häufung von unplausiblen Vergleichen deutet darauf hin, dass Bodeneinflüsse auf den zugrundeliegenden Parzellen die Ertragsergebnisse dominieren. Im Datenpool fallen sowohl einzelne Parzellen mit einer Häufung unplausibler Vergleiche und als auch einzelne Jahre mit besonders vielen unplausiblen Vergleichen mehrerer Parzellen auf. Beachtet werden muss, dass ein Vergleich immer zwei Parzellen betrifft. Als Ansatz zur Verbesserung der Ergebnisauswertung sollten die Daten mit hohen Bodeneinflüssen aus dem Auswertungsdatensatz entfernt werden. Der Balanceakt besteht darin, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit verzerrten Parzellen zu identifizieren ohne dabei den Datensatz zu sehr auszudünnen oder nach subjektiver Einschätzung unpassende Ergebnisse zu löschen. Die Entscheidung zur Löschung wurde deshalb nur bei sehr deutlichen Indizien getroffen. Insgesamt wurden Daten von fünf Parzellen und zusätzlich von neun Jahresergebnissen für jeweils alle Parzellen geprüft. Dabei wurde jeder Versuchsschlag unabhängig betrachtet. Wurde angenommen, dass der Bodeneinfluss die Ertragsergebnisse einer Parzelle extrem verzerrt, wurden die Daten nicht nur der besonders auffälligen, sondern aller Jahre von der Auswertung ausgeschlossen. Wurde angenommen, dass ein Jahresergebnis besonders verzerrt ist, wurden die Daten aller Parzellen dieses Jahres von der Auswertung ausgeschlossen. In beiden Fällen bezog sich die Entscheidung nur auf einen konkreten Versuchsschlag.

Diese so identifizierten kritischen Daten wurden vor der anschließenden Varianzanalyse gelöscht. So wurden für den Versuchsschlag E1 alle Ertragsergebnisse des Prüfglieds 7 gelöscht. Diese Entscheidung bezog sich auf die Ertragsergebnisse aller Jahre, unabhängig ob in einzelnen Jahren keine unplausiblen Unterschiede festgestellt wurden. Außerdem wurde entschieden, für 1998 alle Ertragsergebnisse der Versuchsschläge E2 und E3, alle Ergebnisse des Jahres 1999, alle Ergebnisse des Jahres 2005 vom Versuchsschlag E3 und alle Ergebnisse des Jahres 2007 vom Versuchsschlag E1 nicht in die weitere Auswertung einzubeziehen. In der anschließenden wiederholten Plausibilitätsprüfung traten weiterhin einige unplausible Unterschiede auf. Da jedoch keine Parzelle besonders auffällig war, die Löschung den Gesamteindruck der Ertragsergebnisse nicht wesentlich verändert hätte und auch kein anderer Anhaltspunkt gefunden werden konnte, der eine halbwegs objektive Löschung der Versuchsdaten rechtfertigen würde, blieben die restlichen Ertragsergebnisse im Auswertungsdatensatz.

Die anschließende Varianzanalyse zur Prüfung von Ertragsunterschieden in Abhängigkeit vom Prüfglied und der Versuchsdauer erfolgte mittels Modellierung im Programm SAS®. Für die Vergleiche auf der Ebene der Kulturart wurden die Ertragsdaten dazu auf den mittleren Ertrag des Einzeljahres bezogen. Für den Vergleich über die gesamte Fruchtfolge erfolgte der Vergleich über die Umrechnung in Getreide-Einheiten und ebenfalls auf den Mittelwert des Einzelversuchs bezogen.

Die Stationarität der Prüfglieder wurde im Modell berücksichtigt. Es wurden sowohl lineare als auch quadratische Funktionen geprüft. In den allermeisten Vergleichen ist die quadratische Funktion nach statistischer Prüfung abzulehnen. In den wenigen anderen Fällen ist der Kurvenverlauf fachlich nicht mit dem Prüfgliedeinfluss zu erklären. Es ist vielmehr anzunehmen, dass die Häufung von Jahren mit ungünstiger Witterung am Ende des Versuches (2016, 2018) zu diesen Ergebnissen führte. Deshalb wurde entschieden, für die Auswertung aller Vergleiche lineare Funktionen anzunehmen.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Nährstoffbilanzen

Der Einfluss der P-/K-Düngung auf die P-/K-Nährstoffaufnahme der Pflanzen ist nachgewiesen (Bull 2018). Eine Kalkulation von vereinfachten Düngebilanzen ohne Bestimmung der Nährstoffgehalte im Erntegut zur Auswertung der Versuchsdaten ist deshalb mit größeren Fehlern verbunden. Vergleiche über Düngebilanzen werden also nur für die Varianten durchgeführt, für die laut Versuchsplan die P- und K-Gehalte im Erntegut untersucht wurden. Die Ertragsdaten für diese Vergleiche entsprechen hier den tatsächlich gemessenen Parzellenerträgen, um die tatsächliche Nährstoffbilanz auf der realen Fläche darzustellen (Abbildung 8, Abbildung 9).

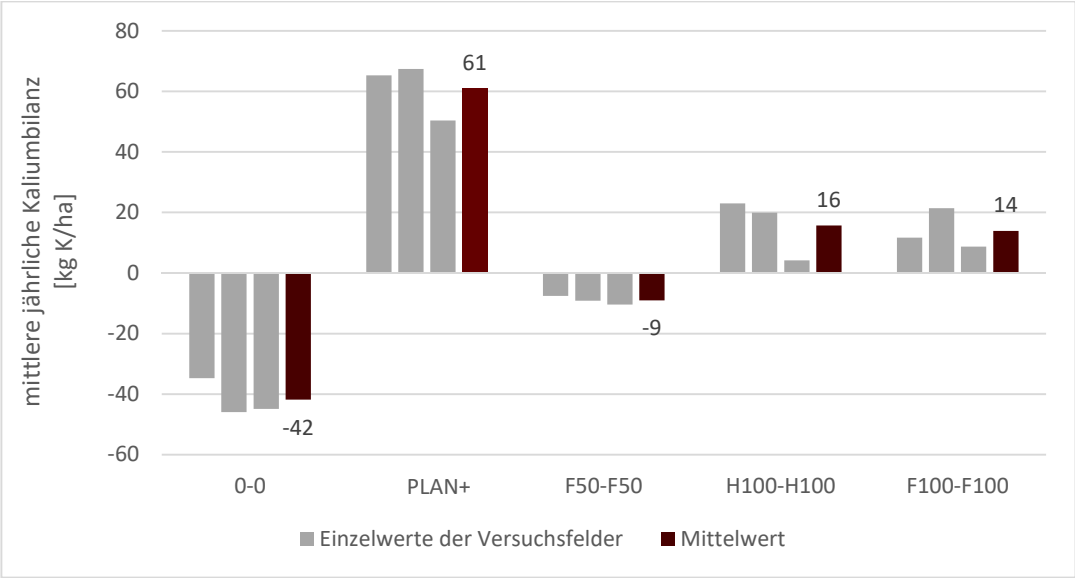


Abbildung 8: Mittlere jährliche Kaliumbilanz 1998-2019 in Abhängigkeit von der Düngung

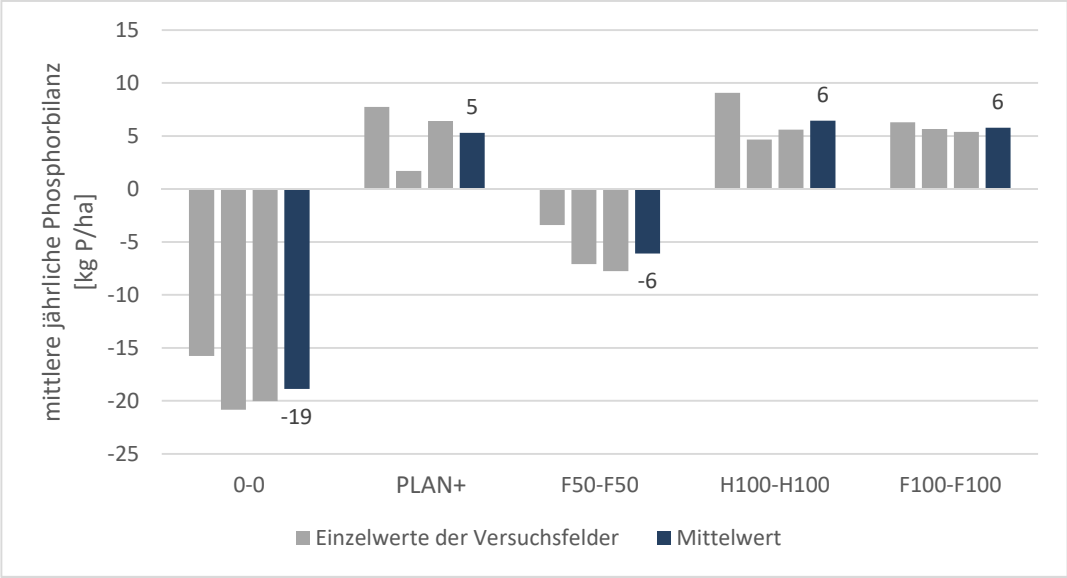


Abbildung 9: Mittlere jährliche Phosphorbilanz 1998-2019 in Abhängigkeit von der Düngung

3.2 Entwicklung der pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte im Boden

3.2.1 Phosphor

3.2.1.1 Einfluss der P-Düngungshöhe auf den P-Gehalt im Boden

Thesen:

A) Die vor allem durch die P-Düngungshöhe bestimmte langfristige P-Bilanz beeinflusst den P-Bodengehalt an einem Standort. Langfristig verändern sich die pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte im Boden entsprechend der Nährstoffbilanz.
B) Positive Nährstoffbilanzen führen zu einem Anstieg, negative Bilanzen zu einem Absinken der Nährstoffgehalte im Boden.
C) Dabei reagieren die P-Gehalte im Boden in Abhängigkeit von der Bodenart vergleichsweise träge.
D) Bei einer Düngung, die entsprechend 100% der abgefahrenen Nährstoffmengen kalkuliert wird, bleiben die Nährstoffgehalte im Boden langfristig auf dem gleichen Niveau.

Beobachtungen:

- Zu Versuchsbeginn liegen auf der gesamten Versuchsfläche optimale bis hohe pflanzenverfügbare Phosphorgehalte im Boden vor.
- Nach 22 Versuchsjahren sind klare Gruppierungen der Nährstoffgehalte in Abhängigkeit von den Düngungsstufen erkennbar.
- Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden nehmen bei allen Varianten mit P-Düngung zu.
- Dieser Anstieg fällt bei den Varianten mit Düngung entsprechend 100% der Abfuhr höher als nach 50%iger Abfuhr aus.
- Ohne Phosphordüngung sinken die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden.
- Auf den Flächen ohne Phosphordüngung sinkt der pflanzenverfügbaren Phosphorgehalt ca. um 0,5 bzw. 1,5 mg/100 g Boden.
- Die absoluten Werte der Flächen ohne Phosphordüngung sind trotz des Abfalls der P-Gehalte während der gesamten Versuchsdauer dem Bereich der optimalen Gehalte zuzuordnen (Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, 2017).

Diskussion:

- Die hohen Nährstoffgehalte im Boden sowohl in 0-30 cm als auch in 30-60 cm Bodentiefe (vgl. Tabelle 7) zu Versuchsbeginn lassen eine gute Nährstoffaufnahme durch Pflanzenwurzeln erwarten. Über Stroh und Ernterückstände können Nährstoffe aus tieferen Bodenschichten in die Ackerkrume verlagert werden. Dieser Nährstoffaufschluss aus tieferen Bodenschichten trägt zur Verzögerung der Wirkung von Nährstoffbilanzen auf die Bodengehalte bei. Langfristig wird jedoch der Einfluss der Nährstoffbilanz zunehmen. Im vorliegenden Versuch kann der Einfluss der P-Bilanz ab ca. dem 12. Versuchsjahr in den Bodengehalten erkannt werden.
- Der Nährstoffaufschluss aus der Unterkrume kann ebenfalls als eine Ursache für die steigenden Bodengehalte trotz negativer Düngebilanz (bei Düngung nach 50%iger Abfuhr) und für sehr stark steigenden Bodengehalte bei Düngung nach 100%iger Abfuhr benannt werden.
- Eine weitere Ursache dieser unerwartet zunehmenden Bodengehalte liegt jedoch im vorgegebenen Berechnungsalgorithmus, nach dem die Düngungshöhe bemessen wurde. Da die vor dem Anbaujahr angenommenen Erträge zur Düngungsbemessung am langjährigen mittleren Ertrag der Versuchsschläge ausgerichtet wurden, kam es in verschiedenen Jahren zu Abweichungen von berechneter und tatsächlicher Nährstoffabfuhr. Ein nachträglicher Ausgleich war im Versuchsplan nicht vorgesehen. Das führte in den Varianten mit Düngung nach 100% der P-Abfuhr zu positiven P-Bilanzen (Abbildung 9).
- Es ist wahrscheinlich, dass fortgesetzt negative Düngebilanzen auch bei gering negativen Salden zu einem Absinken der Nährstoffgehalte im Boden führen. Auf der Versuchsfläche ist das bis zum 22. Versuchsjahr jedoch nicht zu erkennen.

Schlussfolgerungen:

- Die These A) wird für alle Düngungsstufen bestätigt.
- Die These B) wird für positive P-Salden und für den Fall sehr negativer P-Salden bei unterlassener P-Düngung bestätigt. Für gering negative P-Salden kann These B) nicht bestätigt werden.
- These C) wird bestätigt.
- These D) wird nicht bestätigt.
- Die verfügbaren Nährstoffgehalte in der Ackerkrume werden nicht allein durch die Nährstoffbilanz beeinflusst. Weitere Einflussfaktoren sind z.B. die Nährstoffgehalte tieferer Bodenschichten, die Freisetzung aus schwerer löslichen P-Fraktionen im Boden und die Kulturarten in der Fruchtfolge.

- Zu Versuchsbeginn kann von einer guten P-Versorgung über den Boden ausgegangen werden. Es sind keine bzw. nur geringe Mehrerträge durch P-Düngung zu erwarten (Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, 2017).
- Auch auf den Flächen ohne P-Düngung sollte die P-Nachlieferung aus dem Boden während der gesamten Versuchsdauer in den meisten Fällen für die Pflanzenernährung ausreichen. Der langjährige Verzicht auf die P-Düngung sollte hier nur bei ungünstigen Bedingungen oder/und Kulturen mit hohem Nährstoffbedarf zu geringen Ertragsnachteilen führen.

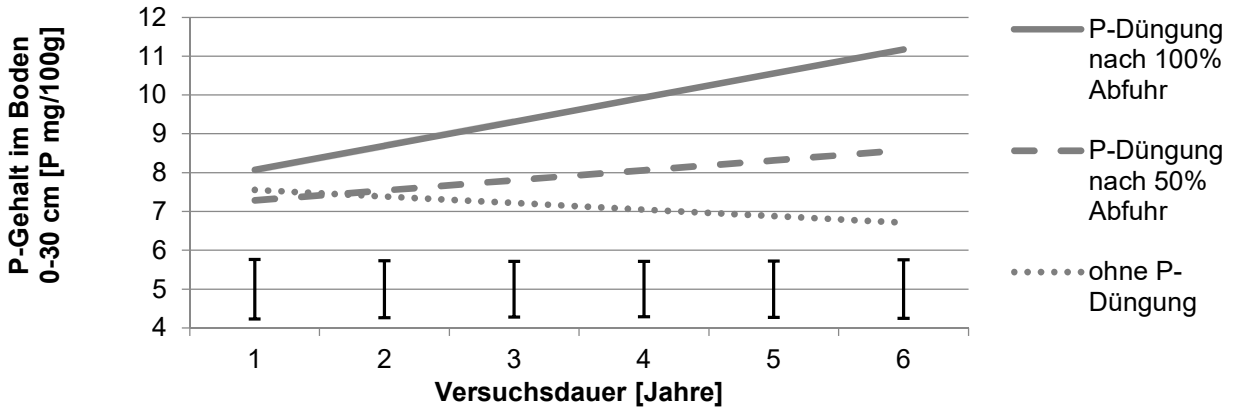


Abbildung 10: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen P-Düngungshöhe, K-Düngungshöhe und Düngungstermine unterschiedlich, GD (t; 0,05)

3.2.1.2 Einfluss der erweiterten Düngeplanung auf die P-Gehalte im Boden

Thesen:

A) Die erweiterte Düngeplanung durch Kalkulation der kulturartspezifischen Nährstoffbedarfe, der Berücksichtigung der Nährstoffzufuhr über die Strohdüngung sowie der Anwendung von Zu- und Abschlägen in Abhängigkeit von den pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalten im Boden entsprechend der offiziellen Empfehlung ist gegenüber der einfachen Düngungsplanung nach der Nährstoffabfuhr vorteilhaft. Der Vorteil ergibt sich aus der genaueren Berechnung der Nährstoffflüsse und -bedarfe.

B) Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden werden mit der erweiterten Düngeplanung schneller eingestellt und besser gehalten als mit der Düngung entsprechend der Abfuhr.

Beobachtungen (Abbildung 11, Abbildung 12):

- Mit erweiterter Düngeplanung stiegen die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden über 22 Versuchsjahre um ca. 3 mg/100 g Boden an.
- Sowohl in der absoluten Höhe als auch im Anstieg konnte kein Unterschied zu den entsprechend 100 % der Abfuhr gedüngten Varianten festgestellt werden.

Diskussion:

- Da sich die mittleren P-Bilanzen über den Versuchszeitraum zwischen bei Düngeplanung nach 100% Abfuhr und bei erweiterter Düngeplanung nicht unterscheiden (vgl. Abbildung 9), sind ähnliche Nährstoffgehalte im Boden sowie ihre ähnlichen Änderungen erwartbar und plausibel.
- Obwohl mit der erweiterten Düngeplanung bei den hohen P-Gehalten im Boden Abschläge von der Düngemenge einkalkuliert wurden, stiegen die P-Gehalte im Boden weiter an. Ein Aussetzen der P-Düngung erfolgte entsprechend der Empfehlung erst nach Überschreiten des P-Gehaltes von 10,9 mg /100 g Boden. Der anschließende Versuchszeitraum ab 2018 reichte nicht aus, um eine Abnahme des verfügbaren Phosphors im Boden nachzuweisen (vgl. Tabelle 3).

- Das Herabsetzen der Empfehlungswerte 2017, oberhalb derer eine P-Düngung nicht mehr empfohlen wird bzw. das Erhöhen der Abschläge und Verringern der Zuschläge zum Nährstoffentzug in Abhängigkeit von der Bodenversorgung wird durch die Versuchsergebnisse bestätigt. Leider wurde die Grundlage für die Bemessung der neuen Zu- und Abschläge nicht benannt (Tab. 15 in: Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, 2017).
- Eine Bewertung der Höhe der neuen Zu- und Abschläge ist auf der Grundlage des vorliegenden Versuches nicht möglich. Unabhängig davon ist Transparenz bei der Festlegung von Düngungsempfehlungen wünschenswert.

Schlussfolgerungen:

- Die Thesen A) und B) können unter den gegebenen Standortbedingungen nicht bestätigt werden. Trotz genauerer Nährstoffkalkulation wurde ein Ansteigen der Bodennährstoffgehalte mit der erweiterten Düngeplanung nicht verhindert.
- Die Anwendung der seit 2017 empfohlenen Zu- und Abschläge wird zu geringeren Nährstoffüberhängen führen. Ein Ertragsnachteil ist nach dem aktuellen Kenntnisstand nicht zu befürchten.

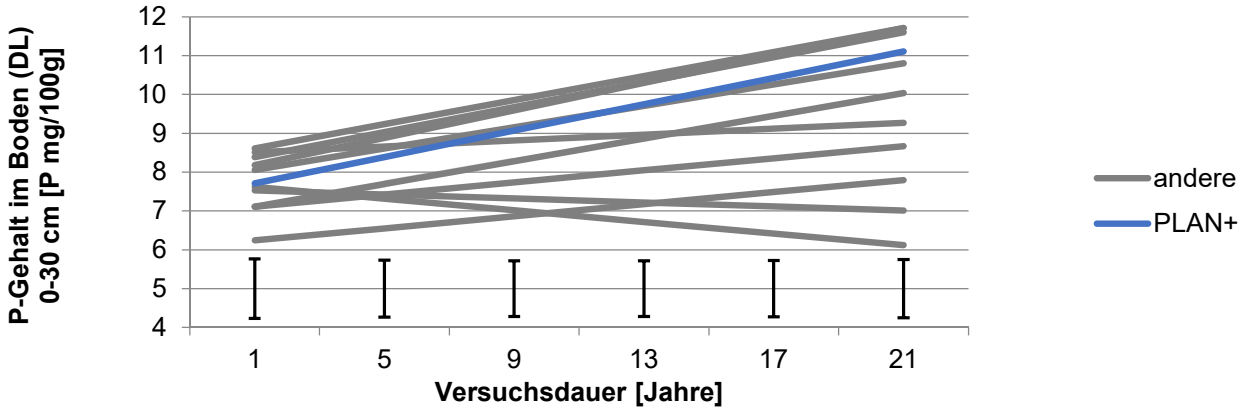


Abbildung 11: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie, GD (t; 0,05)

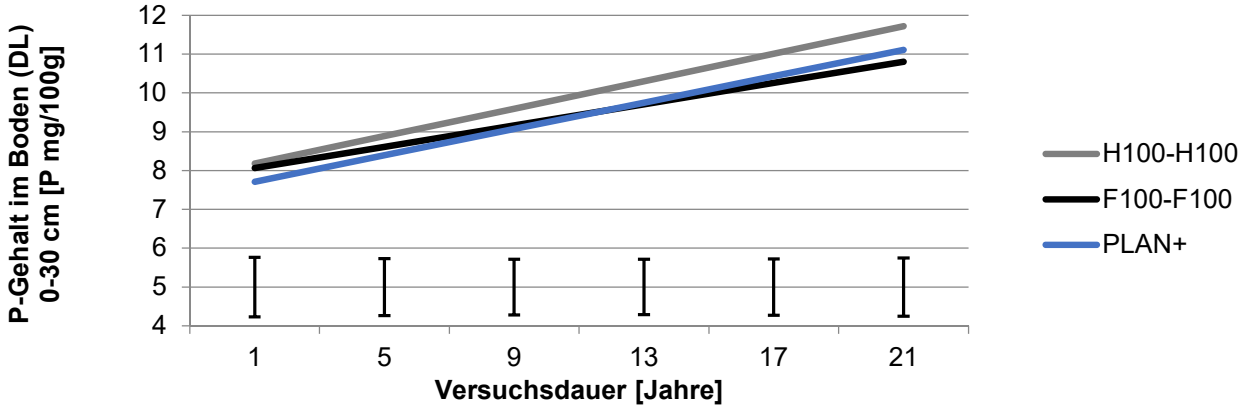


Abbildung 12: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie, Düngungstermin unterschiedlich, GD (t; 0,05)

Tabelle 7: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie, Tiefe 30-60 cm, Mittelwerte und Spannweiten von drei Versuchsschlägen, n=Anzahl der beprobten Parzellen, Angaben in P mg/100 g Boden (DL)

Düngungsvarianten	zu Versuchsbeginn	nach 4 Jahren	nach 8 Jahren	nach 20 Jahren
0-0	5 (4-7) n=18	6 (4-9) n=9	5 (2-10) n=36	6 (3-12) n=36
LUFA	-	5 (4-6) n=3	5 (5-6) n=3	6 (5-7) n=3
F50-F50	-	6 (5-7) n=3	5 (3-5) n=3	5 (5-6) n=3
H100-F50	-	-	5 (4-6) n=3	6 (4-7) n=3
H50-H100	-	-	7 (6-9) n=3	7 (5-11) n=3
H100-H50	-	-	7 (5-10) n=3	6 (4-8) n=3
H100-H100	-	6 (5-7) n=3	7 (4-10) n=3	7 (5-7) n=3
F100-F100	-	8 (6-10) n=3	6 (3-10) n=3	8 (5-11) n=3
F50-H100	-	4-	5 (3-7) n=3	7 (6-8) n=3
0-H100	-	6 (5-6) n=3	5 (3-7) n=3	6 (4-9) n=3
H100-0	-	7 (5-7) n=3	6 (6-7) n=3	8 (8-9) n=3

3.2.1.3 Einfluss der K-Düngung und des Düngungstermins auf die P-Gehalte im Boden

Thesen:

A) Nur die vor allem durch die P-Düngungshöhe bestimmte langfristige P-Bilanz bestimmt die Veränderungen des P-Bodengehaltes an einem Standort.
B) Die Kaliumdüngung hat in der Regel keinen Einfluss auf die P-Gehalte im Boden.
C) Der Termin der P-Düngung hat in der Regel keinen Einfluss auf die P-Gehalte im Boden.

Beobachtungen (Abbildung 13, Abbildung 14):

- Die mittleren P-Bodengehalte variieren im Versuch bei P-Düngung nach 100%iger Abfuhr um etwa 1,5 mg/100 g Boden. Alle Varianten weisen fast gleiche Anstiege der P-Bodengehalte auf. Die Reihung zwischen den Varianten verändert sich kaum. In der Variante ohne Kaliumdüngung werden im gesamten Versuchszeitraum die höchsten Werte gemessen.
- Die mittleren P-Bodengehalte variieren im Versuch bei P-Düngung nach 50%iger Abfuhr zu Versuchsbeginn um 2,3 mg/100 g Boden und nach 22 Versuchsjahren um 1,5 mg/100 g Boden. Die Reihung der Varianten ändert sich im Versuchsverlauf nicht.
- Die im Frühjahr mit Phosphor gedüngten Varianten weisen bei P-Düngung nach 50%iger Abfuhr einen steileren Anstieg der P-Bodengehalte auf als die im Herbst gedüngte Variante. Bei P-Düngung entsprechend 100%iger Abfuhr ist es umgekehrt; hier ist die Variante mit Frühjahrsdüngung mit dem geringsten Anstieg der Bodengehalte.

Diskussion:

- Der Anstieg der P-Bodengehalte in Abhängigkeit von der P-Düngungshöhe wird unter Abbildung 10 diskutiert.

- Die P-Verfügbarkeit im Boden wird durch die Kaliumdüngung in der Regel nicht beeinflusst. Allenfalls könnten unterschiedliche P-Entzüge der Pflanzen durch Unterschiede in der Kaliumernährung den P-Gehalt im Boden indirekt beeinflussen. Im Fall extrem niedriger K-Gehalte im Boden könnte also durch K-Mangel verursachten geringen P-Entzug eine P-Anreicherung im Boden stattfinden. Trotz starken Absinkens der K-Gehalte im Boden ohne K-Düngung kann dieser Effekt auf der Versuchsfläche nicht nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 15).
- Ausreichende P-Gehalte im Boden vorausgesetzt, sollte der Einfluss einer ggf. durch den Düngungstermin veränderten P-Aufnahme der Pflanzen vergleichsweise gering sein und von anderen Faktoren überlagert werden. Langfristig können im Versuch keine P-Bilanzunterschiede zwischen Frühjahrs- und Herbstdüngung festgestellt werden (vgl. Abbildung 9). Da die Beobachtungen zum unterschiedlichen Anstieg der Bodengehalte in Abhängigkeit vom Düngungstermin zwischen den beiden P-Düngungsstufen einander entgegengesetzt sind, ist die Überlagerung durch andere Faktoren wahrscheinlich.
- Da sich die Varianz der P-Gehalte im Boden zwischen den Varianten im Versuchsverlauf nicht vergrößert, die Reihung der Varianten untereinander erhalten bleibt und die Unterschiede im Anstieg der Bodengehalte im Vergleich der beiden K-Düngungsstufen sachlich konträr sind, können die Unterschiede zwischen den P-Bodengehalten nicht auf einen ursächlichen Einfluss der K-Düngung zurückgeführt werden.

Schlussfolgerungen:

- Im vorliegenden Versuch kann nur für Bodengehaltsunterschiede, die größer als die Unterschiede zwischen den Varianten zu Versuchsbeginn sind, die Düngungshöhe als Ursache angenommen werden.
- Die These A) wird bestätigt. Bei ausreichenden P-Gehalten im Boden beeinflusst die Höhe der Kaliumdüngung die P-Gehalte im Boden nicht.
- Die These B) wird für die Versuchsbedingungen bestätigt. Mögliche Effekte des P-Düngungstermins sind im Vergleich zu anderen Bestimmungsgrößen sehr gering.
- Fragen zur P- und K-Düngung sollten in getrennten Versuchen bearbeitet werden.

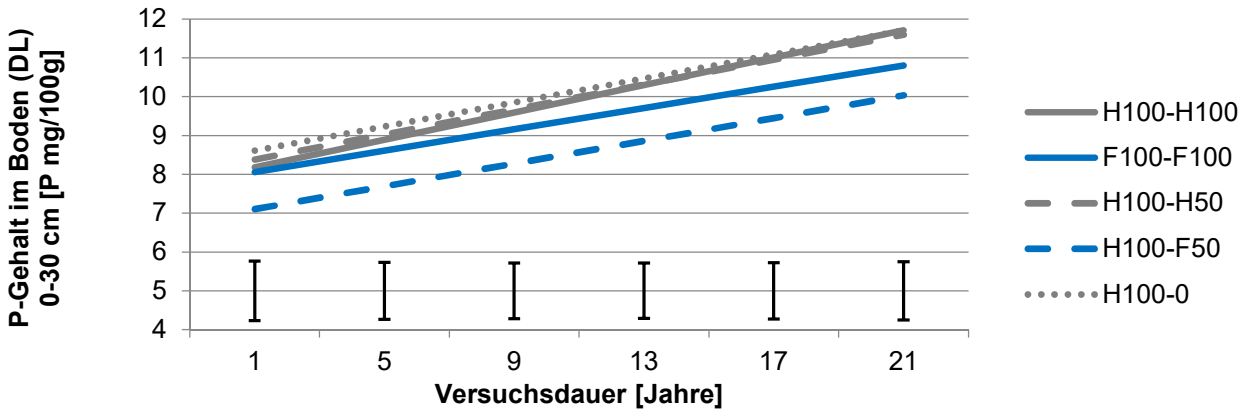


Abbildung 13: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie auf gleicher P-Düngungsstufe (nach 100% Abfuhr), Düngungstermine unterschiedlich, GD (t; 0,05)

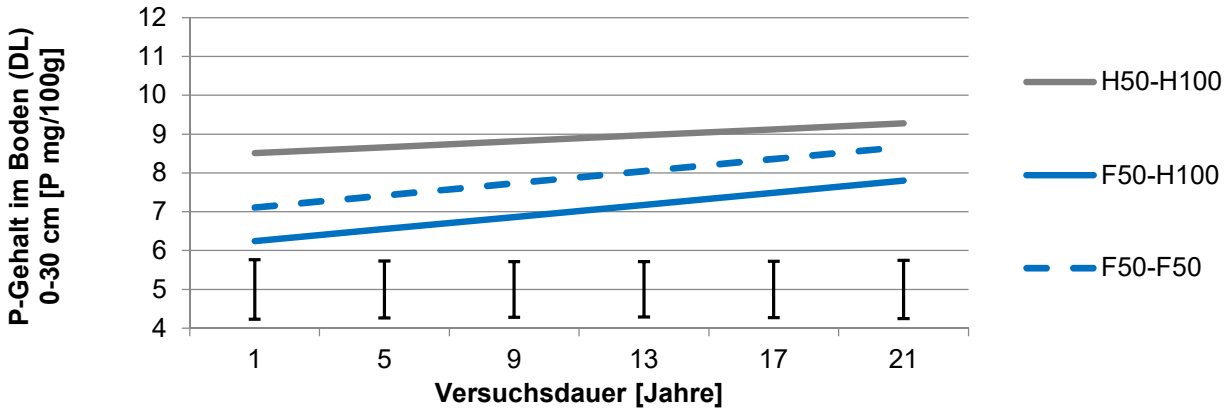


Abbildung 14: Pflanzenverfügbarer Phosphorgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie auf gleicher P-Düngungsstufe (nach 50% Abfuhr), GD (t; 0,05)

3.2.2 Kalium

3.2.2.1 Einfluss der K-Düngungshöhe auf den K-Gehalt im Boden

Thesen:

A) Die durch die K-Düngungshöhe bestimmte langfristige K-Bilanz beeinflusst den K-Bodengehalt an einem Standort. Mittelfristig verändern sich die pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte im Boden entsprechend der Nährstoffbilanz.
B) Negative Nährstoffbilanzen führen zu einem Absinken der Nährstoffgehalte im Boden.
C) Dabei reagieren die K-Gehalte im Boden in Abhängigkeit von der Bodenart eher als die P-Bodengehalte.
D) Aufgrund der relevanten Menge der K-Auswaschung auf sandigen Böden reicht ein K-Düngungsausgleich der mit dem Erntegut abgefahrenen K-Mengen nicht zum Erhalt der K-Gehalte im Boden aus. Eine Düngung entsprechend 100% der K-Abfuhr führt langfristig zu sinkenden K-Gehalten im Boden.

Beobachtungen:

- Zu Versuchsbeginn liegen auf der gesamten Versuchsfläche optimale Kaliumgehalte im Boden vor.
- Nach 22 Versuchsjahren sind klare Gruppierungen der Nährstoffgehalte in Abhängigkeit von den Düngungsstufen erkennbar.
- Alle Varianten mit einer negativen K-Düngungsbilanz weisen abnehmende Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium im Boden auf.
- Bei drei von vier entsprechend 100% Abfuhr gedüngten Varianten ist ein leichter Abfall der Bodengehalte erkennbar, bei einer Variante ein leichter Anstieg.

Diskussion:

- Die Nährstoffgehalte im Boden sowohl in 0-30 cm als auch in 30-60 cm Bodentiefe (vgl. Tabelle 8) zu Versuchsbeginn lassen eine gute Nährstoffaufnahme durch Pflanzenwurzeln erwarten. Über Stroh und Ernterückstände können Nährstoffe aus tieferen Bodenschichten in die Ackerkrume verlagert werden. Dieser Nährstoffaufschluss aus tieferen Bodenschichten trägt zur Verzögerung der Wirkung von Nährstoffbilanzen auf die Bodengehalte bei. Die beobachteten Veränderungen können also auf anderen Standorten mit geringeren K-Gehalten in der Unterkrume schneller eintreten.
- Da gerade auf sandigen Standorten, denen der Versuchsstandort zuzurechnen ist, mit bedeutender Kaliumauswaschung zu rechnen ist, ist ein Absinken der Bodengehalte auch bei ausgeglichener bis leicht positiver Düngebilanz plausibel (K-Düngung entsprechend 100% Abfuhr).

Schlussfolgerungen:

- Die These A) wird bestätigt. Die K-Düngungshöhe spiegelt sich in den K-Gehalten im Boden wider.
- Die Thesen B) und C) werden bestätigt. Eine negative Kaliumbilanz führt schon mittelfristig zum Absinken der Gehalte im Boden.
- Die These D) wird bestätigt. Auf sandigen Standorten mit relevanter Kaliumauswaschung sind zum Erhalt optimaler Kaliumgehalte im Boden Zuschläge zur Kaliumdüngung zu kalkulieren.

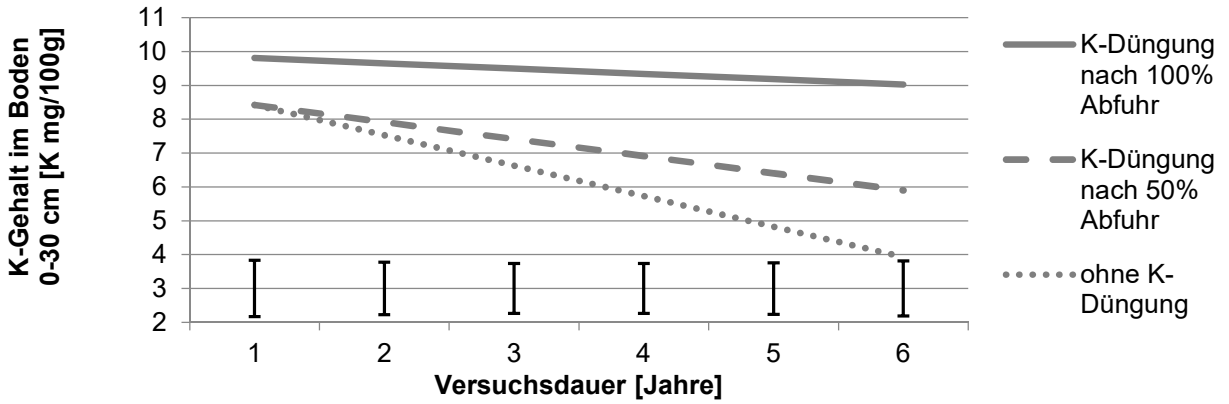


Abbildung 15: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen K-Düngungshöhe, P-Düngungshöhe und Düngungstermine unterschiedlich, GD (t; 0,05)

3.2.2.2 Einfluss der erweiterten Düngeplanung auf die K-Gehalte im Boden

These:

A) Auf sandigen Standorten mit relevanter Kaliumauswaschung sind zum Erhalt optimaler Kaliumgehalte im Boden Zuschläge bei Düngung nach Pflanzenentzug in Abhängigkeit von der Bodenart zu kalkulieren. Die in MV empfohlenen Zuschläge für Standorte der Bodengruppe 2, in die der Versuchsstandort einzuordnen ist, reichen dafür aus (Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, 2017).

Beobachtungen (Abbildung 16, Abbildung 17):

- Nur zwei der insgesamt elf geprüften Düngungsvarianten weisen einen Anstieg der Kaliumgehalte im Boden über den Versuchszeitraum auf. Dabei ist nur bei der nach der erweiterten Düngeplanung gedüngten Variante ein wesentlicher Anstieg zu verzeichnen (um reichlich 1 mg/100 g Boden).
- Bei den beiden entsprechend 100% der Abfuhr gedüngten Varianten wurden gegensätzliche Verläufe der K-Bodengehalte im Versuchszeitraum festgestellt.
- Jahresabhängige Schwankungen der K-Bodengehalte um 1,5 bis 3,5 mg/100 g Boden auf derselben Fläche zwischen aufeinanderfolgenden Jahren sind am Standort nicht ungewöhnlich.

Diskussion:

- Der relativ deutliche Anstieg der K-Bodengehalte bei erweiterter Düngeplanung kann mit der relativ hohen K-Bilanz erklärt werden (vgl. Abbildung 8). Genau wie bei der Phosphordüngung spielt hier jedoch auch der vorgegebene Berechnungsalgorhythmus für die Düngungshöhe eine Rolle. Da die vor dem Anbaujahr angenommenen Erträge zur Düngungsbemessung am mittleren langjährigen der Versuchsschläge ausgerichtet wurden, kam es in verschiedenen Jahren zu Abweichungen von berechneter und tatsächlicher Nährstoffabfuhr. Ein

nachträglicher Ausgleich war im Versuchsplan nicht vorgesehen. Ob bei höherer Kaliumdüngung als nach Abfuhr bemessen tatsächlich ein Anstieg der Bodengehalte vorliegt, kann aus den ermittelten Werten deshalb nicht abgeleitet werden.

- Der K-Bilanzunterschied zwischen den beiden nach 100% der Abfuhr gedüngten Varianten erscheint dagegen zu klein, um den unterschiedlichen Verlauf der K-Bodengehalte im Versuchsverlauf zu erklären. Allerdings muss beachtet werden, dass aufgrund der hohen Bodenheterogenität des Standortes und den typischen jahresabhängigen Schwankungen der pflanzenverfügbaren K-Gehalte im Boden dieser beiden Varianten statistisch nicht voneinander unterscheidbar sind und sich mit zunehmender Versuchsdauer einander annähern.
- Die Höhe der jahresabhängigen Schwankungen kann zu einem Bewertungsunterschied für die Bodenversorgung um bis zu eine Bodengehaltsklasse führen.

Schlussfolgerungen:

- Die These A) kann anhand dieser Versuchsdaten nicht bestätigt werden. Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass die Düngungszuschläge, mit denen die Kaliumauswaschung auf sandigen Böden ausgeglichen werden soll, weniger hoch bemessen werden können.
- Neben der Nährstoffbilanzierung sollte die Düngungsplanung regelmäßige Bodenuntersuchungen einbeziehen, um Ungleichgewichte frühzeitig zu erkennen und auszugleichen.
- Für eine realistische Einschätzung der K-Bodengehalte sind mehrjährige Bodenuntersuchungen in engen Zeitabständen wünschenswert.

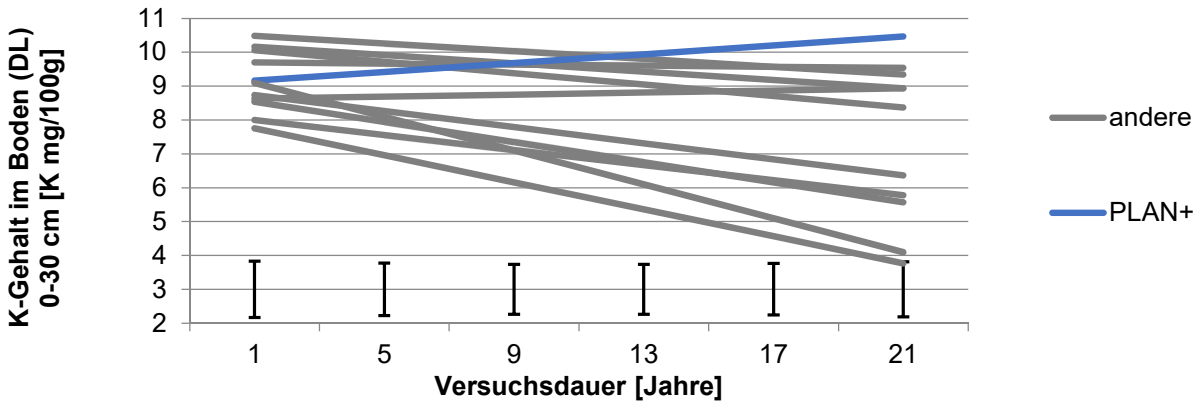


Abbildung 16: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie, GD (t; 0,05)

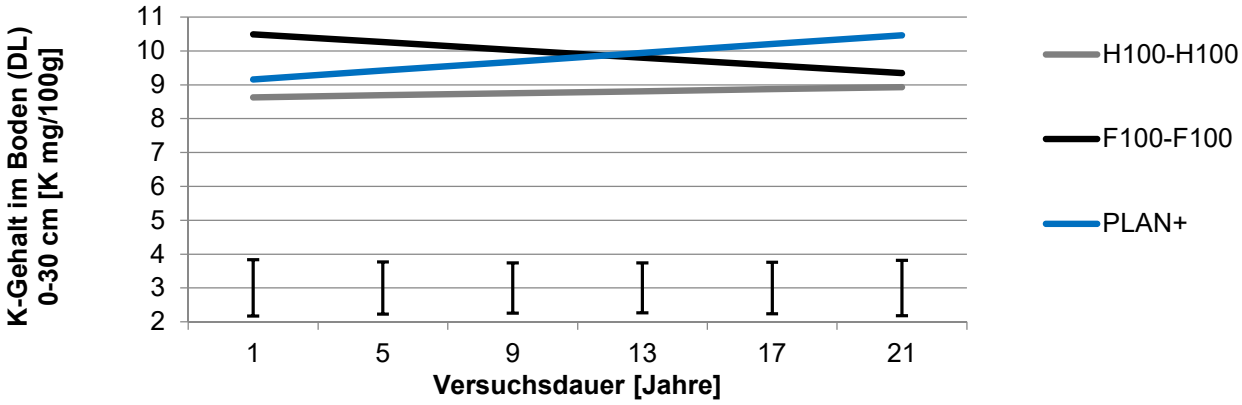


Abbildung 17: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie, Düngungstermine unterschiedlich, Variante PLAN+ mit eingezeichneter GD (t; 0,05)

Tabelle 8: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie, Tiefe 30-60 cm, Mittelwerte und Spannweiten von drei Versuchsschlägen, n=Anzahl der beprobten Parzellen, Angaben in K mg/100 g Boden (DL)

Düngungsvarianten	zu Versuchsbeginn	nach 4 Jahren	nach 8 Jahren	nach 20 Jahren
0-0	7 (4-9) n=18	7 (4-9) n=9	6 (2-10) n=36	3 (1-6) n=36
LUFA	-	9 (8-9) n=3	12 (10-13) n=3	6 (4-8) n=3
F50-F50	-	8 (7-9) n=3	7 (5-9) n=3	3 (1-4) n=3
H100-F50	-	-	7 (5-9) n=3	4 (1-6) n=3
H50-H100	-	-	10 (7-13) n=3	6 (4-8) n=3
H100-H50	-	-	7 (7-8) n=3	3 (2-5) n=3
H100-H100	-	10 (6-13) n=3	11 (9-13) n=3	7 (4-11) n=3
F100-F100	-	11 (9-12) n=3	8 (6-10) n=3	4 (2-7) n=3
F50-H100	-	-	10 (9-11) n=3	5 (4-6) n=3
0-H100	-	11 (6-14) n=3	9 (7-12) n=3	6 (3-9) n=3
H100-0	-	9 (7-11) n=3	9 (7-10) n=3	7 (4-8) n=3

3.2.2.3 Einfluss der P-Düngung und des Düngungstermins auf die K-Gehalte im Boden

Thesen:

A) Die Phosphordüngung hat in der Regel keinen Einfluss auf die K-Gehalte im Boden.
B) Die Reduzierung der K-Auswaschungsverluste bei Frühjahrsdüngung führt im Vergleich zur K-Herbstdüngung langfristig zu höheren K-Gehalten im Boden.

Beobachtungen (Abbildung 18, Abbildung 19):

- Die mittleren K-Bodengehalte variieren im Versuch bei P-Düngung nach 100%iger Abfuhr um etwa 1-2 mg/100 g Boden. Nur zu Versuchsbeginn wurden für die Variante mit 100%iger K-Herbstdüngung (H100-H100) unterscheidbar niedrigere Werte im Variantenvergleich ermittelt.
- Bei K-Düngung nach 50%iger Abfuhr liegen die mittleren K-Bodengehalte im Versuch dicht beieinander und variieren um weniger als 1 mg/100 g Boden. Das Absinken der K-Bodengehalte verläuft in diesen drei Varianten sehr ähnlich.
- Bei Kaliumdüngung im Frühjahr fallen die Bodengehalte in ähnlicher Weise wie zwei der Varianten mit K-Düngung im Herbst ab. Zwei Varianten mit K-Düngung im Herbst zeigen keine Änderung der Bodengehalte. So fallen bei K-Düngung entsprechend 100% Abfuhr die Gehalte der beiden Varianten mit P-Frühjahrsdüngung und ohne P-Düngung im Verlauf der 22 Jahre leicht ab. Die Werte der beiden Varianten mit P-Herbstdüngung ändern sich kaum.

Diskussion:

- Der Abfall der K-Bodengehaltswerte in Abhängigkeit der K-Düngungshöhe wird unter Abbildung 15 diskutiert.
- Die K-Verfügbarkeit im Boden wird durch die P-Düngung in der Regel nicht beeinflusst. Allenfalls könnten unterschiedliche K-Entzüge der Pflanzen durch Unterschiede in der Phosphorernährung den K-Gehalt im Boden indirekt beeinflussen. Da über die gesamte Versuchsdauer in allen Varianten eine ausreichende bis hohe P-Versorgung im Boden festgestellt wurde, kann dieser Fall für die Versuchsfläche ausgeschlossen werden (vgl. Abbildung 10). Der fehlende Nachweis von Unterschieden bei unterschiedlicher P-Düngungshöhe bestätigt diese Überlegungen.
- Mit einer Kaliumdüngung im Frühjahr ist die Erwartung verbunden, Kalium-Auswaschungsverluste, die auf sandigen Böden 20-50 kg K/ha betragen können, zu reduzieren (Scheffer 2010). Der gewünschte Haupteffekt liegt jedoch in einer besseren Pflanzenernährung in der folgenden Vegetationsperiode. Über einen höheren Ertrag würde die verringerte Auswaschung in der Bilanz ausgeglichen, so dass eine Erhöhung der K-Bodengehalte unwahrscheinlich ist. Außerdem werden im normalen Stoffumsatz im Boden bei Abbau von Stroh, Wurzeln und Ernterückständen große Mengen Kalium freigesetzt, die die geringeren Bilanzunterschiede überlagern. Ein weiterer überlagernder Prozess sind erhöhte K-Auswaschungs- und Festlegungsraten bei höheren Gehalten an verfügbarem Kalium im Boden.
  Der unterschiedliche Verlauf der Varianten mit gleicher K-Düngung im Versuch kann nicht auf den K-Düngungstermin zurückgeführt werden, da zwei gegenläufige Beobachtungen vorliegen. Dafür sprechen auch die geringen Unterschiede zwischen den Varianten (meist < GD) und der geringe mittlere K-Bilanzunterschied von 2 kg K/ha und Jahr im Versuchszeitraum (vgl. Abbildung 8).
- Ein möglicher Einfluss des P-Düngungstermins auf die K-Bodengehalte erscheint fachlich unplausibel. Für die Beobachtung der unterschiedlichen Veränderung der Bodengehalte sollten andere Faktoren ursächlich sein.

Schlussfolgerungen:

- Die These A) wird bestätigt. Bei ausreichenden K-Gehalten im Boden beeinflusst die Höhe der Phosphordüngung die K-Gehalte im Boden nicht.
- Die These B) wird nicht bestätigt. Es kann kein Einfluss des K-Düngungstermins auf die K-Bodengehalte nachgewiesen werden.
- Fragen zur P- und K-Düngung sollten in getrennten Versuchen bearbeitet werden.

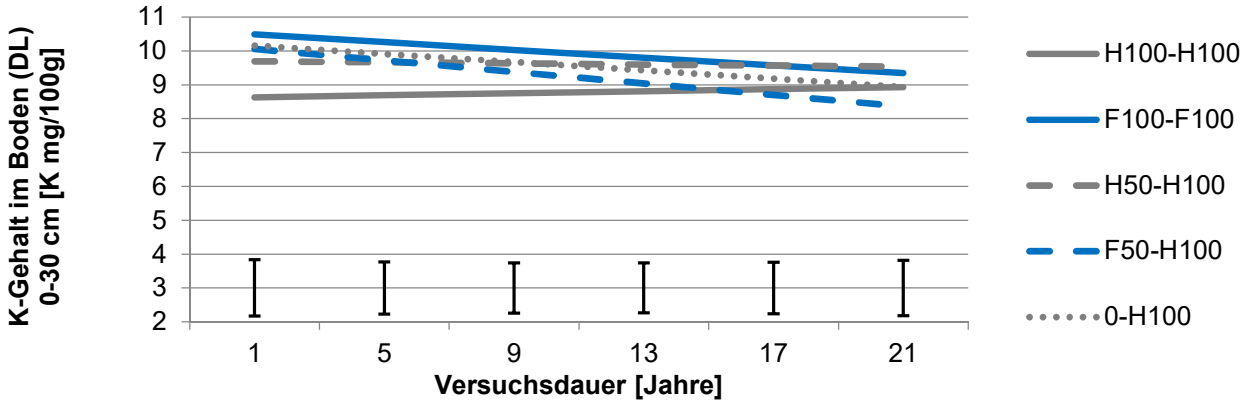


Abbildung 18: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie auf gleicher K-Düngungsstufe (100%), GD (t; 0,05)

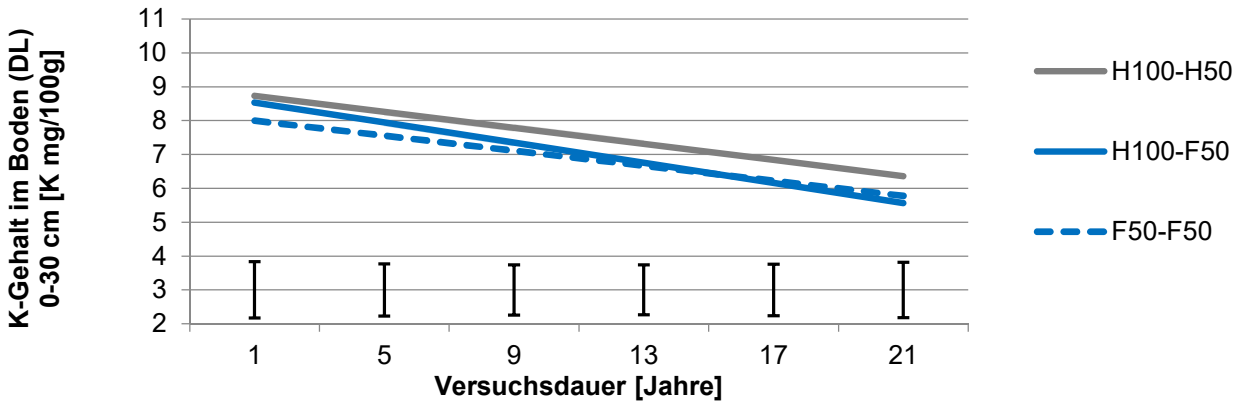


Abbildung 19: Pflanzenverfügbarer Kaliumgehalt im Boden in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie auf gleicher K-Düngungsstufe (50%), GD (t; 0,05)

3.3 Einfluss der Nährstoffgehalte im Boden und der Düngung auf die Ertragsbildung

Auch nach 23 Versuchsjahren sind nicht in allen Kulturen und allen Jahren Düngungseffekte nachweisbar. Bei der Ausprägung spielt die Witterung eine entscheidende Rolle. P/K-Düngung wirkt besonders in Jahren mit mangelnder Wasserversorgung oder in Situationen mit hohem Auswinterungsrisiko positiv. P/K-Düngung kann auch bei Boden-Nährstoffgehalten der Versorgungsstufe C positiv ertragswirksam werden. Dabei reagieren die Kulturarten unterschiedlich stark auf die P/K-Düngung. Am stärksten reagieren Kartoffeln und Silomais. Danach folgen in absteigender Reihenfolge Wintergerste, Winterweizen und Winterraps.

Eine Veränderung der Ertragswirkungen im Verlauf der Versuchsdauer ist nur für Winterraps, Winterweizen, Kartoffeln und Wintergerste und nicht für Silomais untersuchbar, da dieser erstmalig im sechzehnten Versuchsjahr angebaut wurde.

Für alle Kulturarten zeigen die Varianten mit langjährig unterlassener P-/K-Düngung zum Versuchsende die geringsten Erträge.

Eine im Versuchsverlauf zunehmend positive oder negative Ertragsabweichung zum Versuchsmittel ist nicht mit einer Ertragssteigerung bzw. einem Ertragsabfall im Laufe der Versuchsdauer gleichzusetzen, da der Bezugspunkt das jährliche Ertragsniveau ist. Tatsächlich sind bedingt durch ungünstige Witterungsbedingungen am Ende der Versuchsdauer gehäuft in allen Varianten geringe Erträge ermittelt worden.

Bemerkenswert sind die nach wie vor hohen Nährstoffentzüge auf den Flächen ohne P-/K-Düngung, von denen auf das Nährstoffnachlieferungspotenzial des Standortes geschlossen werden kann (dargestellt ist allerdings nur die Nährstoffabfuhr mit dem Erntegut). Die geringeren Nährstoffsalden in

den letzten Versuchsjahren haben mehrere Ursachen: den Anbau von Silomais statt Kartoffeln ab Versuchsjahr 17, die Häufung von Jahren mit allgemein niedrigem Ertragsniveau in MV nach 2015 insbesondere bei Winterraps sowie die zunehmend ertragsrelevant werdende K-Mangelversorgung der Pflanzen. Letztere tritt unter ungünstigen Witterungsbedingungen wie im Trockenjahr 2018 (Versuchsjahr 21) besonders zutage. Betrachtet man die einzelnen Kulturarten über den gesamten Versuchszeitraum, scheint sich der Entzug trotz dauerhaft unterlassener P-/K-Düngung über den Versuchszeitraum nur wenig verändert zu haben (Abbildung 20, Abbildung 21).

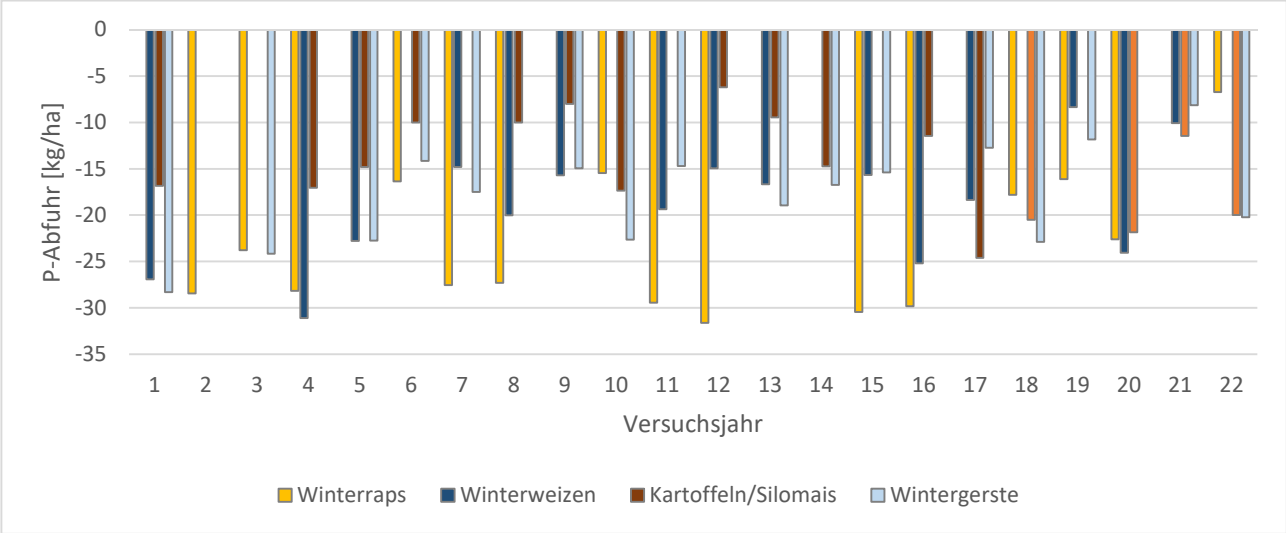


Abbildung 20: Jährliches Phosphorbilanzsaldo ohne P- und ohne K-Düngung, 1998-2019

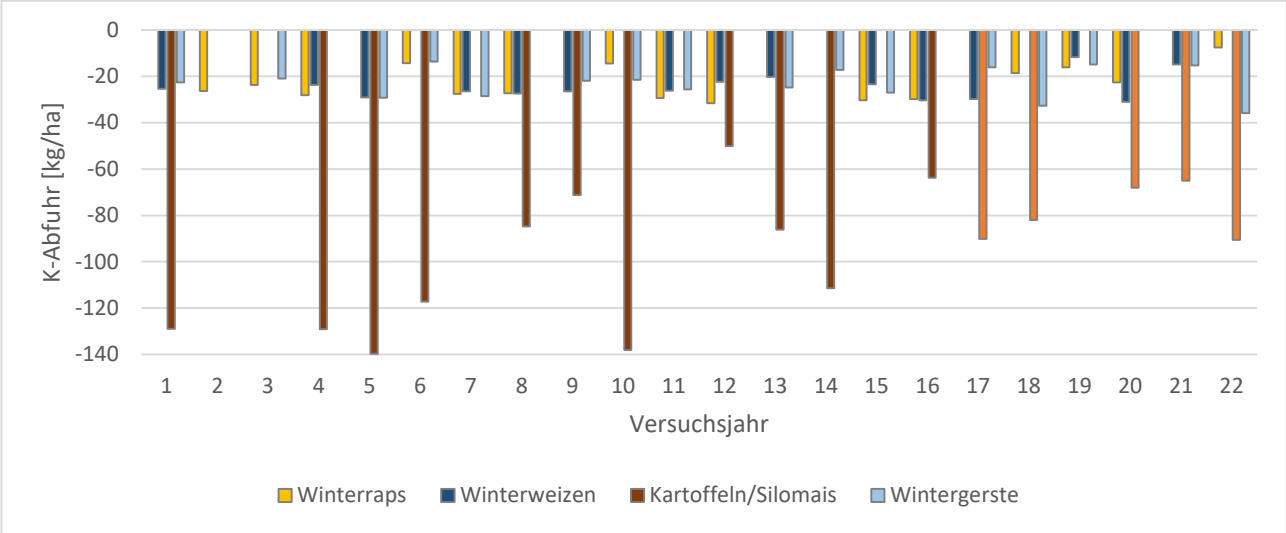


Abbildung 21: Jährliches Kaliumbilanzsaldo ohne P- und ohne K-Düngung, 1998-2019

3.3.1 Vergleich über alle Düngungsvarianten

Ein Vergleich aller Düngungsvarianten über die Dauer des Versuches ermöglicht die Abschätzung, ob und in welchem Ausmaß Effekte, die auf die Prüfvarianten zurückgehen, aufgetreten sind.

Thesen:

A) Unterschiede in den P-/K-Nährstoffbilanzen beeinflussen die Ertragsbildung mittel- bzw. langfristig.
B) Mit zunehmender Ausdifferenzierung der Nährstoffgehalte im Boden während der Versuchsdauer nehmen die Ertragsunterschiede zwischen den unterschiedlichen Düngungsvarianten zu.

C) Die Kulturpflanzenarten haben unterschiedliche Nährstoffansprüche. Die Wirkung einer Düngung wird bei den verschiedenen Kulturpflanzen unterschiedlich ausfallen.

Beobachtungen (zu Abbildung 22):

- Schon zu Versuchsbeginn zeigt sich eine hohe Streuung zwischen den Varianten von ca. 10% im Mittel der Fruchtfolge. Die Streuung nimmt im Versuchsverlauf zu und liegt nach 22 Jahren im Mittel der Fruchtfolge bei 25%. Bei Kartoffeln und Wintergerste ist die Streuung ab Jahr 5 bzw. 9 höher als am Anfang, im Jahr 21 ist sie mehr als dreifach so hoch.
- Die Reihung der Versuchsvarianten verändert sich im Versuchsverlauf und scheint auch nach 22 Jahren noch in Änderung begriffen. Bei Wintergerste hat sich die Reihung der Versuchsvarianten am Ende der Versuchsdauer (bis auf eine Ausnahme) ab Jahr 9 eingestellt.
- Im Vergleich mit Winterraps und Winterweizen sind bei Kartoffeln und Wintergerste die Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten größer und die Reihung der Versuchsvarianten stellt sich schneller ein.

Diskussion:

- Die hohe Ertragsvarianz der Anfangsjahre deutet auf die Bodenheterogenität der Versuchsfläche.
- Mit zunehmender Versuchsdauer prägen die durch die unterschiedlichen Düngungsvarianten verursachten Nährstoffbilanzunterschiede die Nährstoffgehalte im Boden (vgl. Abschnitt 3.2). Die Höhe der Differenz der Nährstoffgehalte im Boden spiegelt sich in der Ertragsdifferenz zwischen den Düngungsvarianten (erkennbarer Zeittrend bei Kartoffeln, Wintergerste und evtl. bei Winterraps im Versuch).
- Schon nach wenigen Jahren scheinen die Düngungseffekte den Bodeneinfluss zu übertreffen. Bei Kartoffeln und Wintergerste überlagert der Bodeneinfluss die Düngungsunterschiede in den ersten 5-10 Versuchsjahren. Danach treten die Düngungseffekte zunehmend zu Tage.
- Es ist bekannt, dass Kartoffeln stärker als Getreide bei Kaliummangel im Ertrag abfallen. Die deutlich schnellere und stärkere Aufspreizung der Ertragsergebnisse bei Kartoffeln im Vergleich der angebauten Kulturen lässt sich so erklären.
- Gerste steht in der gegebenen Fruchtfolge nach Kartoffeln bzw. Silomais, mit deren Ernte eine hohe Nährstoffabfuhr verbunden ist. Aus dieser ungünstigen Fruchtfolgestellung folgt eine schlechtere Nährstoffversorgung aus dem Boden für Gerste. Die Wirkung einer Düngung stellt sich deshalb hier schneller und mit größerem Effekt als bei Winterweizen mit der günstigen Fruchtfolgestellung nach Winterraps ein.
- Obschon Winterweizen ähnlich wie Gerste ein geringes Nährstoffaneignungsvermögen hat, scheinen die ungünstigen Wirkungen unterlassener P-/K-Düngung auch nach 22 Jahren durch die positiven Vorfruchteffekte des Rapses überdeckt zu werden.
- Zu den Ertragsvergleichen passen Beobachtungen im Versuchsverlauf. So wurden optische Prüfvarianten-Unterschiede während der Versuchsdauer zuerst und am stärksten ausgeprägt bei Kartoffeln/Silomais beobachtet. In der Wintergerste traten sie erst seit 2015/16 deutlich, im Winterweizen seit 2016/17 und nur vorübergehend schwach auf. Im Winterraps gab es eine solche Beobachtung erstmals 2019.
- Die Schlussfolgerung, dass z. B. Winterweizen in günstiger Fruchtfolgestellung fortgesetzt ohne P-/K-Düngung ohne Ertragsverluste angebaut werden könne, muss jedoch zurückgewiesen werden. Es ist im Gegensatz dazu wahrscheinlich, dass ähnlich wie bei Wintergerste unter zusätzlich ungünstigen Bedingungen wie Kahlfrost oder Trockenheit Totalausfälle auf den sandigsten Parzellen vermehrt vorkommen.
- Bei Mais muss beachtet werden, dass der erste Anbau nach fünfzehn Jahren mit differenzierter Düngung stattfand. Aus den folgenden fünf Jahren kann also keine Information über eine Ertragsentwicklung in Abhängigkeit der langfristigen Nährstoffbilanz abgeleitet werden. Allerdings kann aus der starken Änderung in der Reihung der Prüfvarianten auf einen starken

Einfluss der jeweiligen Jahreswitterung auf das Nährstoffaneignungsvermögen von Mais geschlossen werden.
- Da die Streuung der Versuchsergebnisse bei Winterraps nach 22 Versuchsjahren nur wenig größer als zu Beginn ist, kann ohne einen konkreten Variantenvergleich keine Erkenntnis abgeleitet werden.

Schlussfolgerungen:

- Mit Blick auf die Bodenheterogenität, die nicht vorhandene Randomisation und die nur eingeschränkt vorhandenen Wiederholungen in der Versuchsanlage müssen alle Versuchsergebnisse vorsichtig interpretiert werden und stehen unter dem Vorbehalt einer weiteren Überprüfung.
- Die Nährstoffgehalte im Boden wirken sich auf den Ertrag/die Ertragswirkung der Düngung aus. Beide Effekte können im vorliegenden Versuch nicht voneinander getrennt werden.
- Bei Wintergerste erscheint ein Vergleich der Varianten mit Ergebnissen der ersten zehn, bei Kartoffeln der ersten fünf Versuchsjahre nicht sinnvoll.
- Die Thesen A), B) und C) werden bestätigt.
- Kartoffeln, Mais und Wintergerste haben in der gegebenen Fruchtfolge einen höheren Düngebedarf als Winterraps und Winterweizen. Ob dies für Phosphor und Kalium gleichermaßen gilt, kann aus dem vorgestellten Versuchsergebnissen nicht abgeleitet werden.
- Die Düngewirkung bzw. die Wirkung von akkumuliertem Nährstoffmangel wird also sowohl durch die Kulturart und ihr spezifisches Nährstoffaneignungsvermögen als auch durch die Fruchtfolgestellung der Kultur beeinflusst.

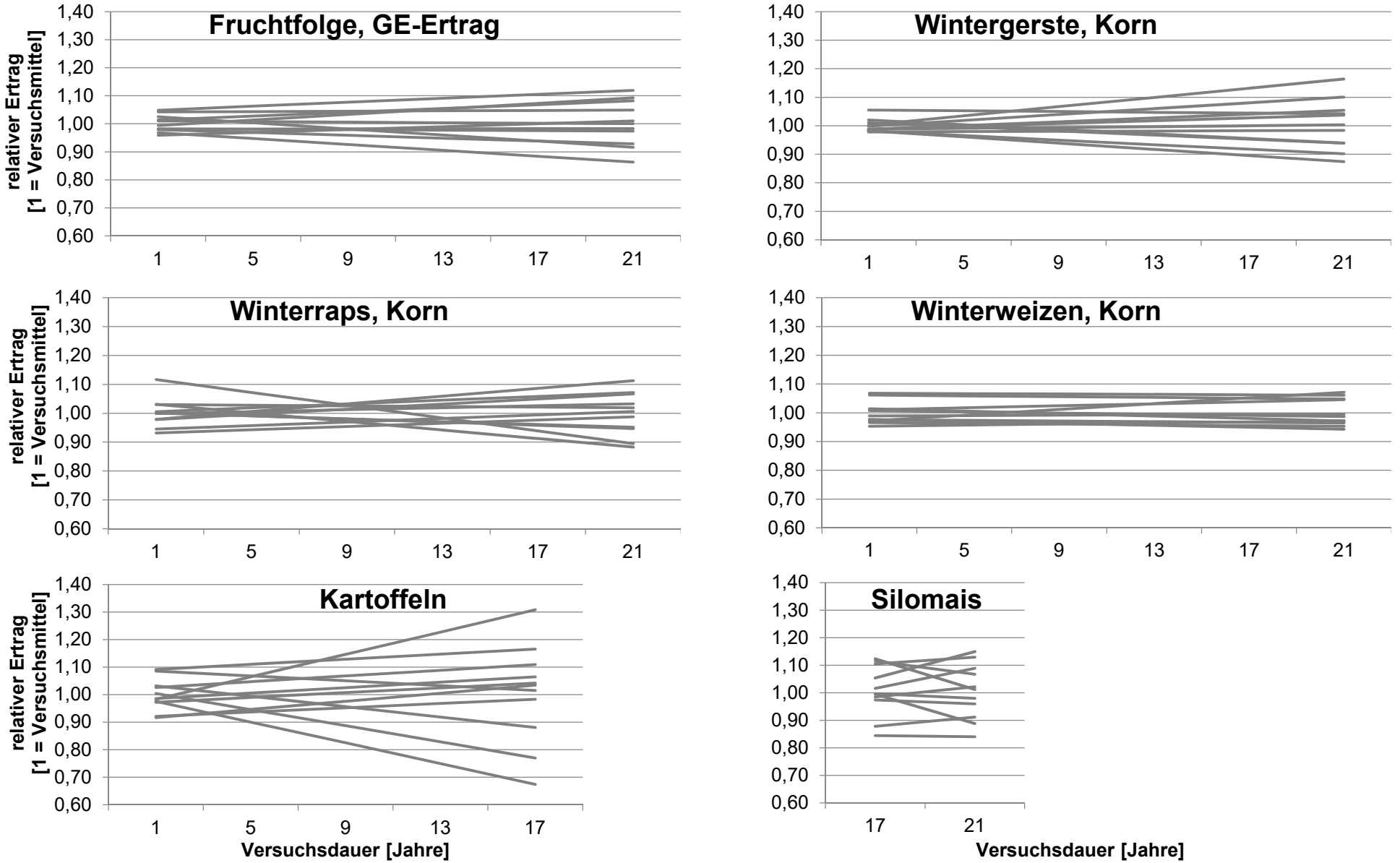


Abbildung 22: Ertrag in Abhängigkeit der langjährigen Düngungsstrategie und der Zeit, Gülzow, 1998-2019

3.3.2 Auswirkungen eines Anbaus ohne P-/K-Düngung

Mit dem Vergleich der Varianten ohne P- und/oder K-Düngung mit denen mit P-/K-Düngung entsprechend 100% der Abfuhr kann erkannt werden, ob und ab wann signifikante Düngewirkungen auftreten.

Thesen:

A) Das Weglassen jeglicher P-/K-Düngung führt langfristig zu Ertragsverlusten.
B) Das Weglassen der P- und/oder K-Düngung führt langfristig zu Ertragsnachteilen, egal ob nur ein oder zwei Nährstoffe fehlen.
C) Dieser Ertragsnachteil wird mit abnehmenden pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalten im Boden, d.h. mit zunehmender Versuchsdauer, größer.

Beobachtungen (zu Abbildung 23):

- Ohne P- und ohne K-Düngung werden meist die geringsten Erträge im Versuch ermittelt. Schon nach ca. 7 Jahren ist dieser Ertragsnachteil im Mittel der Fruchtfolge signifikant. Der Ertragsunterschied der Variante ohne P- und ohne K-Düngung wird bei den Kulturarten im Verlauf des Versuches in folgender Reihenfolge nachweisbar: Kartoffeln>Wintergerste>Winterraps>Winterweizen.
- Am Ende der Versuchsdauer können die Düngungsvarianten zwei Ertragsgruppen zugeordnet werden, die sich sicher voneinander unterscheiden lassen. Im Mittel der Fruchtfolge erreicht die erste Gruppe mit P-/K-Düngung entsprechend 100% der Abfuhr nach 22 Versuchsjahren 5-10% höhere Erträge als im Versuchsmittel. Ohne P-/K-Düngung, bzw. ohne P- bzw. ohne K-Düngung werden nach 22 Jahren 5 bzw. 15% geringere Erträge als im Versuchsmittel erzielt.
- Nur bei Kartoffeln ist der Ertragsabfall der Variante ohne P- und ohne K-Düngung so groß, dass in einem Fall eine signifikante Unterscheidung zur Düngung mit nur einem der beiden Nährstoffe möglich ist. Bei den anderen Kulturarten lassen sich sowohl im Vergleich der Erträge eines Erntejahres als auch im relativen Ertragsabfall keine Unterschiede nachweisen, ob nun einer oder beide Nährstoffe nicht gedüngt wurden. Im Mittel der Fruchtfolge können die Varianten zu Versuchsende jedoch nur knapp nicht voneinander unterschieden werden.

Diskussion:

- Dass Phosphor und Kalium wichtige Nährstoffe für die Pflanzenernährung sind und beide für optimale Ertragsbildung in Abhängigkeit von der Nachlieferung aus dem Boden gedüngt werden sollten, ist bekannt. Die Versuchsergebnisse sind hier plausibel.
- Bemerkenswert ist der relative Ertragsabfall der Variante mit Kaliumdüngung entsprechend 100% Abfuhr aber ohne Phosphordüngung. Da die Phosphorgehalte im Boden auch nach 22 Jahren noch in dem Bereich liegen, der als optimal für die Pflanzenernährung eingeschätzt wird, ist es weder plausibel, dass diese Düngungsvariante nicht von der ohne P-/K-Düngung und der ohne K- aber mit P-Düngung unterscheidbar ist, noch dass die relativen Erträge mit der Zeit abfallen.
- Geringere Nährstoffgehalte in der Unterkrume als auf der Versuchsfläche zu Versuchsbeginn sind für Praxisflächen in Ackerbauregionen typisch. Dort dürften Ertragsnachteile früher und in größerem Maß auftreten.
- In Übereinstimmung mit den Schlussfolgerungen aus Abschnitt 3.3.1 ist die Düngewirkung abhängig von Kulturart und Fruchtfolgestellung. Allerdings können hier für alle geprüften Kulturarten, also auch für Winterraps und Winterweizen, im Laufe des Versuches Düngewirkungen sicher festgestellt werden.

Schlussfolgerungen:

- Die These A) wird bestätigt. Eine regelmäßige Grunddüngung ist für den Erhalt des Ertragspotenzials des Bodens/der Bodenfruchtbarkeit notwendig.

- Die These B) wird bestätigt. Es bestehen jedoch Zweifel an der Gültigkeit der Aussage bei ausreichenden Nährstoffgehalten im Boden.
- Die These C) wird bestätigt. Je länger Grunddüngungsmaßnahmen aufgeschoben werden, mit desto größeren Ertragsnachteilen ist zu rechnen.
- Dabei sind 10% Ertragsnachteil für Winterraps und Rapsweizen nach zwanzig Jahren, 10% für Wintergerste nach zehn Jahren auf einem sandigen Diluvialstandort mindestens anzunehmen. Bei Kartoffeln und Silomais ist noch deutlich früher und mit deutlich größeren Ertragsnachteilen zu rechnen.
- Die Düngewirkung ist abhängig von Kulturart und Fruchtfolgestellung.

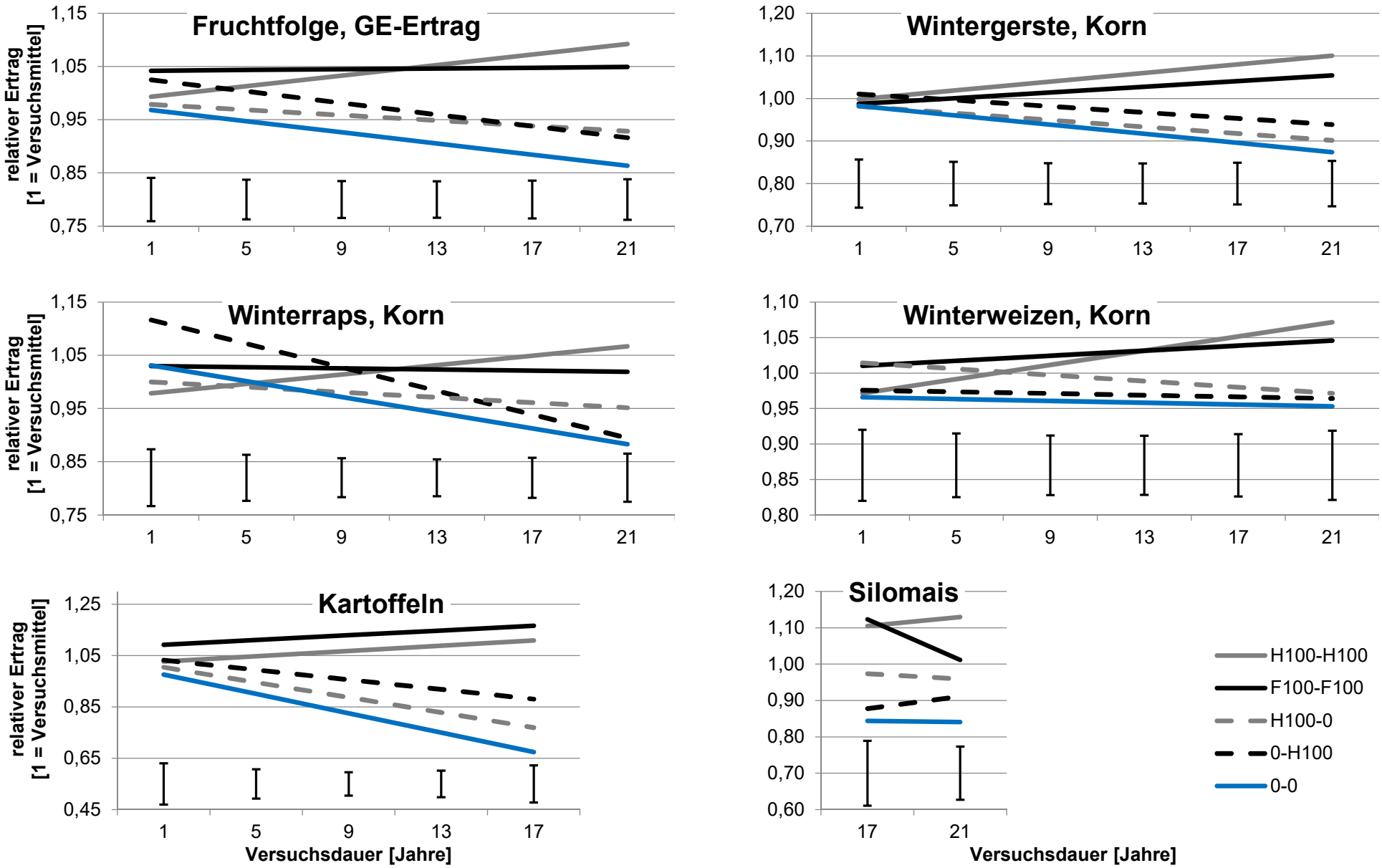


Abbildung 23: Ertrag in Abhängigkeit der langjährigen Düngungsstrategie und der Zeit mit und ohne P-/K-Düngung, Gülzow, 1998-2019, GD (t; 0,05)

3.3.3 Erweiterte Düngeplanung

Kalium wird unabhängig von der Bewirtschaftung aber standort- und witterungsabhängig mit dem Sickerwasser im Boden verlagert. Die so entstehenden Nährstoffauswaschungsverluste sind weitgehend unvermeidbar und sollten bei der Grunddüngung beachtet werden. In der erweiterten Düngeplanung werden, anders als bei der Düngungskalkulation nach Abfuhr, diese Verluste durch Zuschläge ausgeglichen. Ein weiterer Unterschied der erweiterten Düngeplanung besteht in der jährlichen Anrechnung der mit dem Stroh aufgenommenen und mit einer Strohdüngung zurückgeführten Nährstoffmengen.

So ist mit der erweiterten Düngeplanung einerseits die Annahme verbunden, dem Nährstoffbedarf der Kulturarten besser als mit einer einfachen Düngungsbemessung entsprechend erwarteter Abfuhr zu entsprechen. Andererseits ist es bekannt, dass die P-/K-Düngung als Vorratsdüngung in der Fruchtfolge eingeordnet werden kann, ohne dass Ertragsverluste einzelnen Kulturen entstehen. Vorratsdüngung, oftmals aus wirtschaftlichen Gründen zusätzlich mit höheren als den kalkulierten Abschlägen, wird häufig in der Praxis angewandt. Es soll also geprüft werden, ob und in welchem Umfang eine erweiterte Düngeplanung vorteilhaft ist. Dafür wird als Vergleichsvariante, diejenige gewählt, die zum gleichen Termin mit Nährstoffmengen entsprechend 100% der Abfuhr gedüngt wurde.

Thesen:

A) Mit der erweiterten Düngeplanung werden höhere Erträge als mit Düngung in Höhe der Abfuhr erzielt, wenn beide zum selben Termin gedüngt werden.
B) Mit der zunehmenden Ausdifferenzierung der Nährstoffgehalte im Boden sollte der relative Ertragsvorteil nach erweiterter Düngeplanung im Vergleich zum Versuchsmittel deutlicher werden, ohne dass absolute Ertragszuwächse zu erwarten sind.

Beobachtungen (zu Abbildung 24, Abbildung 25):

- Von Beginn an werden mit erweiterter Düngeplanung im Mittel der Fruchtfolge die höchsten Erträge erzielt. Für Winterweizen trifft diese Feststellung fast durchgehend, für Kartoffeln und Wintergerste trifft sie ab dem 9. Versuchsjahr zu. Bei Winterraps und Silomais gehört diese Variante zu den besten im Gesamtvergleich.
- Mit der Versuchsdauer können zunehmend signifikante Unterschiede der Variante mit erweiterter Düngeplanung zu anderen Varianten ausgewiesen werden.
- Bei Kartoffeln und bei Wintergerste wird im Versuchsverlauf mit der erweiterten Düngeplanung der höchste Anstieg der relativen Ertragszuwächse im Vergleich zum Versuchsmittel realisiert.
- Nur bei Kartoffeln kann nach ca. 10 Jahren ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten nach erweiterter Düngeplanung und nach Düngung entsprechend 100% der Abfuhr festgestellt werden. Bei allen anderen Kulturarten unterscheiden sich diese drei Varianten ohne negative Nährstoffbilanzen bei gleichem Düngungstermin auch nach 22 Versuchsjahren nicht.
- Zu Versuchsende liegt die Variante mit Frühjahrsdüngung im Mittel der Fruchtfolge jedoch nur knapp nicht signifikant unter der mit erweiterter Düngeplanung.

Diskussion:

- Nach 100% Abfuhr und nach erweiterter Düngeplanung wurden im Mittel der Fruchtfolge und auch zu den einzelnen Kulturen ähnliche Mengen an Phosphor gedüngt. Da also weder bei der P-Düngung noch in den P-Bodengehalten Unterschiede vorliegen, können eventuelle Ertragsunterschiede nur auf Kaliumeffekte zurückgeführt werden. Die Kalium-Düngemengen unterscheiden sich zwischen den Varianten. Nach erweiterter Düngeplanung wurde zu den Mähdruschfrüchten mehr und zu den Hackfrüchten weniger Kalium gedüngt. Der Variantenvergleich ist deshalb vor allem kulturartbezogen sinnvoll. Im Mittel der Fruchtfolge führt die

erweiterte Düngeplanung jedoch nicht zu signifikant höheren Erträgen als eine Düngung nach 100% Abfuhr.

- Da die Kalium- und Phosphorgehalte im Boden sowohl nach erweiterter Düngeplanung als auch bei Düngung nach 100% Abfuhr den für die Pflanzenernährung optimalen Bereich nicht unterschreiten, sollten eventuelle Unterschiede zwischen diesen Varianten im Versuchsverlauf stabil bleiben. Das ist jedoch für Kartoffeln nicht der Fall. Hier ist die erweiterte Düngeplanung der Düngung nach 100% Abfuhr überlegen. Da nach erweiterter Düngeplanung 40 kg/ha weniger K gedüngt wurden, Magnesium optimal gedüngt wurde, ein Nachteil durch das Anion durch die Verwendung von Kaliumsulfat ausgeschlossen und bei den gemessenen K-Gehalten im Boden ein anderer negativer Effekt zu hoher Kaliumdüngung unwahrscheinlich ist, kann der Vorteil der erweiterten Düngeplanung nicht erklärt werden.
- Zu Gerste wurde dagegen nach erweiterter Düngeplanung mehr als die dreifache Menge Kalium als nach 100% Abfuhr ausgebracht. Ein Ertragsvorteil bei erweiterter Düngeplanung könnte damit erklärt werden, lässt sich aber statistisch nicht absichern.
- Trotz gegensätzlicher K-Düngestrategie bei Kartoffeln und Wintergerste ist der Anstieg der relativen Erträge im Versuchsverlauf nach erweiterter Düngeplanung bei beiden Kulturen größer als nach Düngung entsprechend der Abfuhr. Da für beide Kulturen ein erhöhter Kaliumbedarf angenommen werden kann, lässt sich der ähnliche Verlauf der Ertragsentwicklung nicht erklären.
- Dass bei Winterweizen im Versuchsverlauf keine Veränderung im Vergleich zum Versuchsmittel sichtbar wird, wird der guten Vorfruchtwirkung des Winterrapses zugeschrieben. Außerdem unterscheidet sich die K-Düngemenge nach erweiterter Düngeplanung nur um +20 kg/ha von der nach 100% Abfuhr.

Schlussfolgerungen:

- These A) kann für die Mähdruschfrüchte und Silomais nicht bestätigt werden. Bei optimalen Nährstoffgehalten im Boden sind mögliche Ertragsvorteile einer erweiterten Düngeplanung geringer als die mit dem vorliegenden Versuch nachweisbaren Unterschiede.
- These A) wird für Kartoffeln bestätigt, kann aber nicht plausibel erklärt werden.
- These B) wird in Bezug zum Versuchsmittel bestätigt. Im Vergleich zu den nach 100% Abfuhr gedüngten Varianten kann die These nicht bestätigt oder nicht erklärt werden.

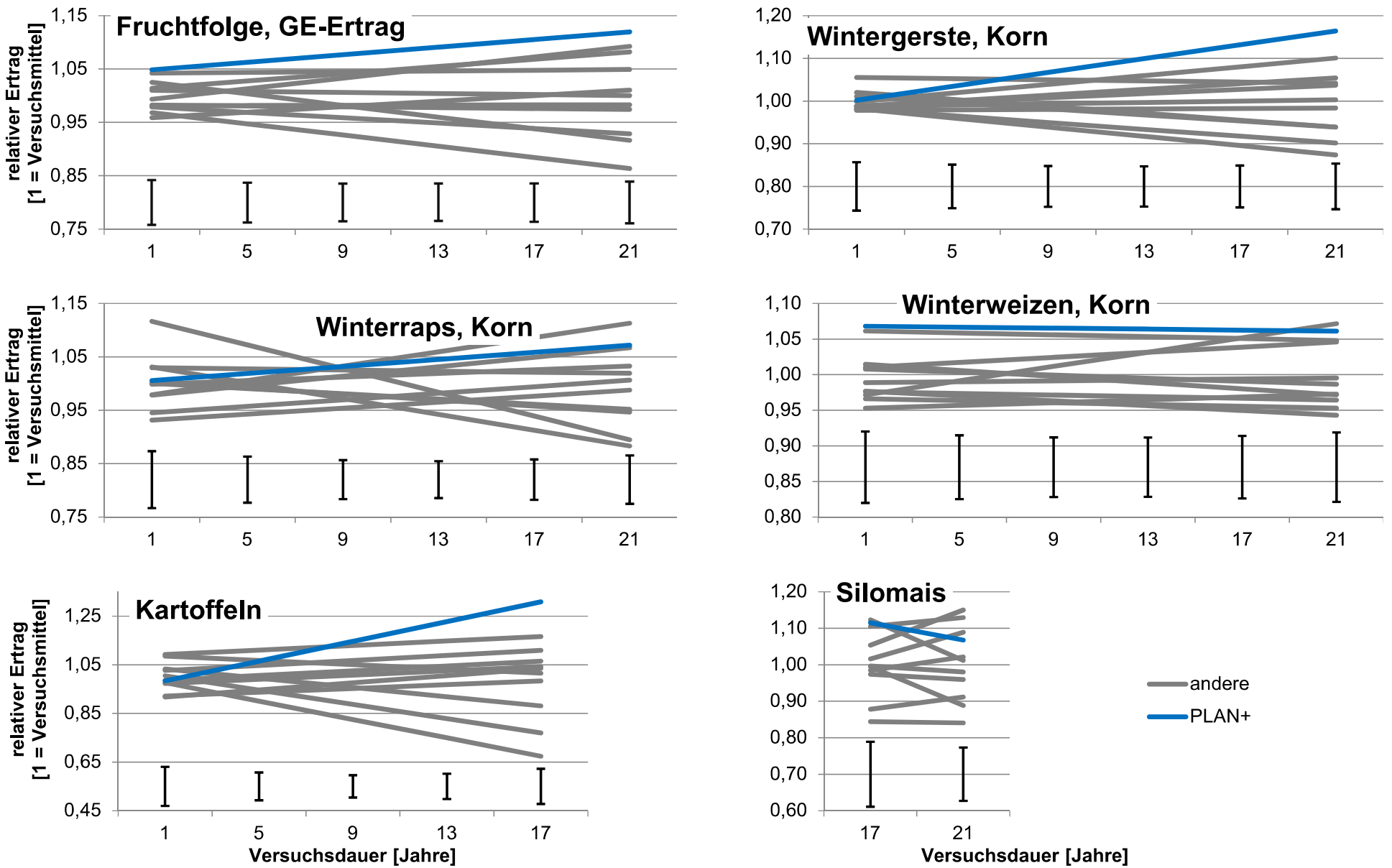


Abbildung 24: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich der Variante erweiterte Düngeplanung = PLAN+ mit allen anderen Düngungsvarianten im Versuch, GD (t; 0,05)

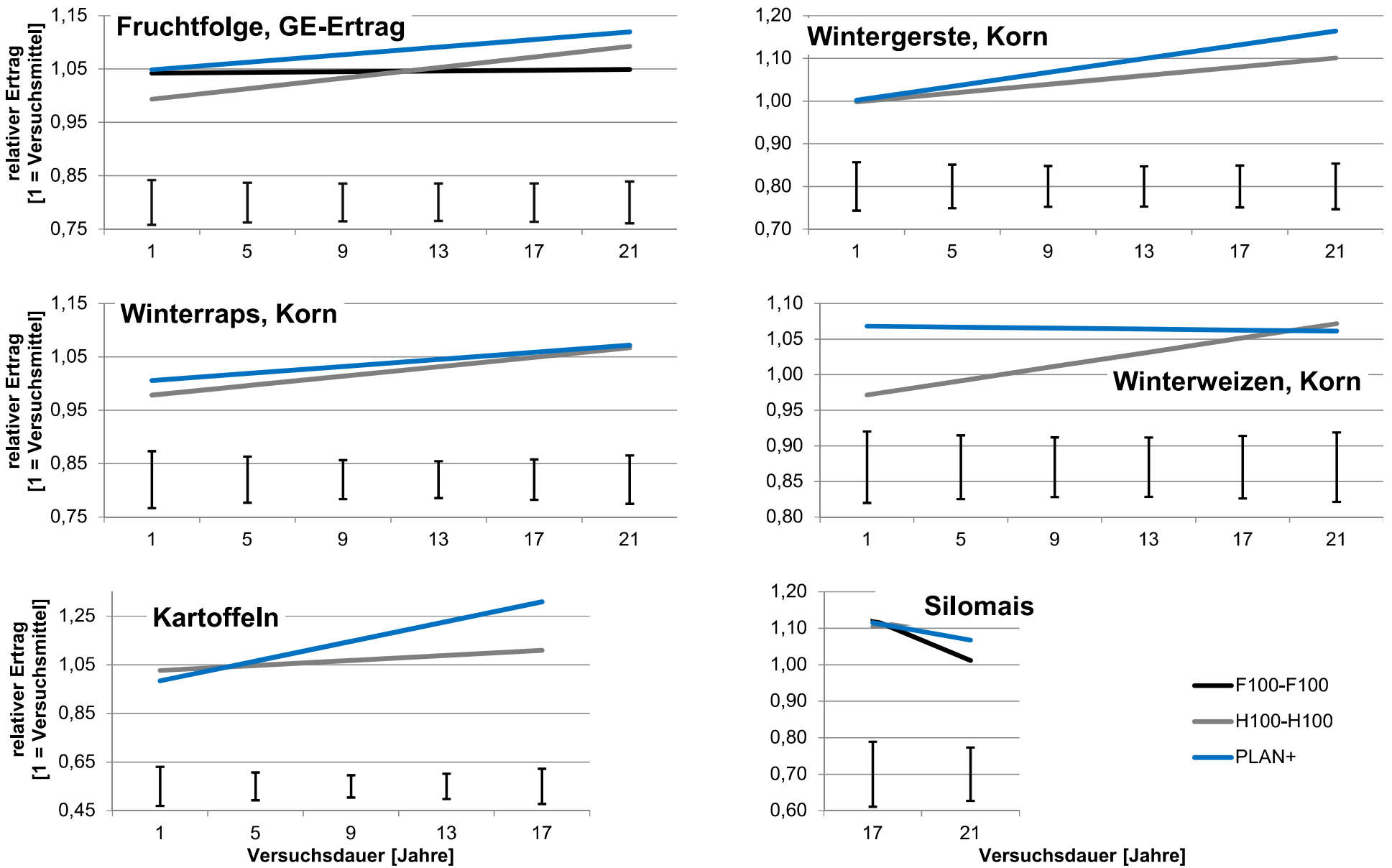


Abbildung 25: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich erweiterte Düngeplanung = PLAN+ mit Düngung entsprechend Abfuhr = H/F100-H/F100, Düngungstermin: Herbst (abweichend bei Mais: Frühjahr), GD (t; 0,05)

3.3.4 Phosphor-Düngewirkung ohne Kaliumdüngung

Thesen:

A) Ohne P-Düngung werden die P-Gehalte im Boden im Laufe der Versuchsdauer abnehmen. Dadurch sollte die ertragspositive Düngewirkung einer P-Düngung zunehmen.
B) Ohne K-Düngung nehmen die K-Gehalte im Boden im Laufe der Versuchsdauer ab. Durch die schlechtere K-Versorgung der Pflanzen wird der Ertrag unabhängig von der P-Düngung zunehmend negativ beeinflusst.

Beobachtungen (zu Abbildung 26):

- Ohne K-Düngung nehmen die Erträge mit der Versuchsdauer ab. Diese Ertragsabnahme ist besonders hoch, wenn zusätzlich Phosphor nicht gedüngt wird.
- Nach 20 Versuchsjahren lagen die Erträge im Mittel der Fruchtfolge 10% unter dem Versuchsmittel, welches die Mangelvarianten einschließt.
- Trotzdem lassen sich beide Varianten bis zum Versuchsende weder im Mittel der Fruchtfolge noch in einzelnen Kulturen signifikant voneinander unterscheiden.
- Diese Beobachtungen treffen für Winterweizen nicht zu. Die Ertragsabnahme über die Versuchsdauer ist hier, wenn überhaupt, gering.

Diskussion:

- Trotz langjährig unterlassener P-Düngung und daraus folgend absinkenden P-Gehalten im Boden reichte die P-Nachlieferung aus dem Boden bis zum Versuchsende für die P-Versorgung der Pflanzen aus. Dafür sprechen auch die als optimal zu bewertenden P-Gehalte im Boden.
- Anders als bei Phosphor sind die Kalium-Gehalte im Boden schon nach 5-10 Jahren Unterlassen der K-Düngung als niedrig und nach 20 Jahren als sehr niedrig zu bewerten. Hohe Ertragsnachteile aufgrund der nach 20 Jahren extremen K-Mangelsituation sind deshalb erwartbar.
- Die Beobachtungen lassen sich für beide Düngungsvarianten also mit dominierendem K-Mangel bei noch ausreichender P-Versorgung erklären.
- Die fehlenden oder geringen Ertragsreaktionen bei Winterweizen sind wieder der Vorfrucht Winterraps gutzuschreiben.

Schlussfolgerungen:

- Die These A) wird unter den Bedingungen einer ausreichenden P-Nachlieferung aus dem Boden nicht bestätigt.
- Die These B) wird bestätigt. Ein Aussetzen der Kaliumdüngung führt schon mittelfristig (10 Jahre) und unabhängig von der Versorgung mit anderen Nährstoffen zu relevanten Ertragsnachteilen.

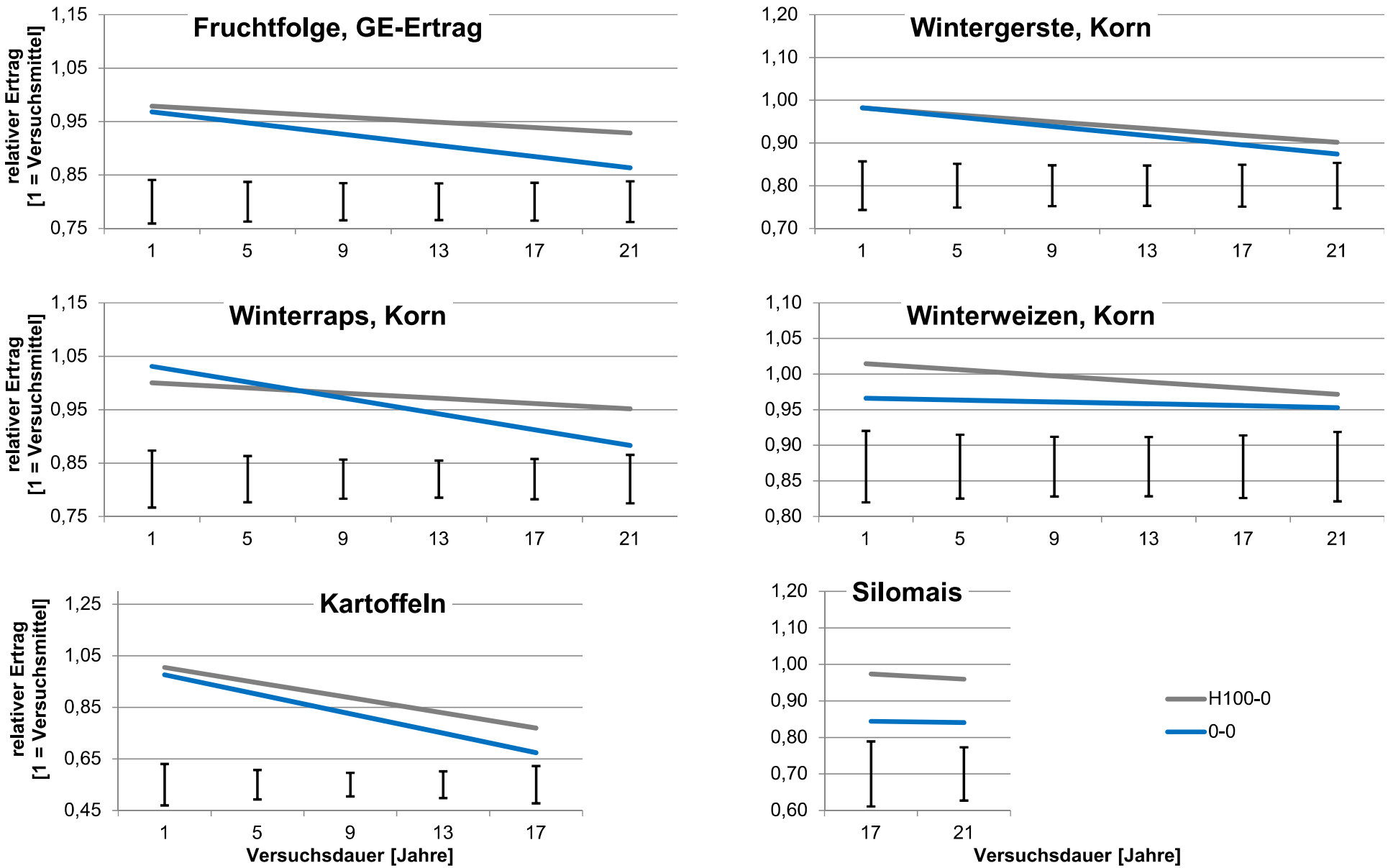


Abbildung 26: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich der Variante ohne Düngung = 0-0 mit der Variante P-Düngung entsprechend Abfuhr und ohne K-Düngung = H100-0, Düngungstermin: Herbst, GD (t; 0,05)

3.3.5 Höhe der Phosphor-Düngung

Thesen:

A) Eine höhere P-Düngung führt zu höheren Erträgen als eine niedrigere P-Düngung.
B) Eine negative Nährstoffbilanz führt langfristig zu abnehmenden Erträgen.
C) Je weiter die Bodengehalte abfallen (mit zunehmender Versuchsdauer), desto größer ist die Ertragsdifferenz bei unterschiedlicher Düngungshöhe.

Beobachtungen (zu Abbildung 27):

- Die Unterschiede zwischen den P-Düngungsstufen nehmen im Mittel der Fruchtfolge und bei allen Kulturen im Versuchszeitraum zu.
- Ohne P-Düngung fallen die Erträge im Vergleich zum Versuchsmittel im Laufe der Jahre leicht ab. Ein Ertragsunterschied zwischen 50%iger Düngung und der Variante ohne P-Düngung kann jedoch auch nach 22 Versuchsjahren nur bei Kartoffeln sicher festgestellt werden.
- Mit P-Düngung entsprechend 50% der Abfuhr werden in allen Kulturen in etwa gleichbleibend Erträge wie im Versuchsmittel erreicht.
- Mit der höchsten P-Düngung im Vergleich werden spätestens nach zehn Jahren auch die höchsten Erträge erreicht.

Diskussion:

- Der Ertragsabfall im Versuchsverlauf ohne P-Düngung deutet darauf hin, dass auch bei optimalen P-Bodengehalten eine regelmäßige P-Düngung vorteilhaft ist.
- Mittlere P-Düngemengen (50% der Abfuhr) führten jedoch bei ausreichenden P-Gehalten im Boden außer bei Kartoffeln nicht zu wesentlichen Ertragsvorteilen im Vergleich zur ungedüngten Variante. Eine höhere Düngung wirkte dagegen bei allen Kulturen mit den im Laufe des Versuches zunehmenden P-Gehalten im Boden ertragssteigernd.
- Möglicherweise reicht die Düngemenge nach 50% der Abfuhr nicht für einen deutlichen Ertragseffekt aus. Das würde höhere Erträge bei Düngung nach 100% Abfuhr erklären. Dagegen spricht sowohl, dass diese Mehrerträge nicht schon zu Versuchsbeginn auftraten als auch, dass die Mehrerträge mit der Versuchsdauer zunehmen. Diese Zunahme verläuft parallel mit der Zunahme der P-Gehalte im Boden über den Optimalbereich hinaus. Bei zunehmenden P-Gehalten im Boden wäre jedoch eher von abnehmenden Ertragseffekten auszugehen. Diese Erklärung ist also nicht plausibel.
- Nach der anerkannten Bewertung der Bodennährstoffgehalte wären unabhängig von der Düngungshöhe im Versuch keine oder nur geringe Mehrerträge durch eine P-Düngung zu erwarten (Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, 2017).
- Der Verlauf der Ertragsentwicklung der Variante ohne P-Düngung bei Winterraps ist vor allem zu Versuchsbeginn nicht mit den Prüfvarianten zu erklären und sollte deshalb kritisch betrachtet und nicht weiter ausgewertet werden.
- Die Versuchsergebnisse dieses Vergleiches lassen sich also nur für Kartoffeln gut interpretieren.

Schlussfolgerungen:

- Die Thesen A), B) und C) können im Mittel der Fruchtfolge und für die Mähdruschfrüchte und Silomais mit den Versuchsergebnissen nicht geprüft werden, da die Beobachtungen nicht schlüssig erklärt werden können.
- Für Kartoffeln wird die These A) unter den Bedingungen mindestens optimaler P-Gehalte im Boden abgelehnt. Die Ertragswirkung einer reduzierten P-Düngung lässt sich nicht sicher von einer Düngung entsprechend 100% der P-Abfuhr unterscheiden.
- Die Thesen B) und C) werden für Kartoffeln bestätigt. Auch bei optimalen P-Gehalten im Boden sollte langfristig nicht vollkommen auf eine P-Düngung verzichtet werden.

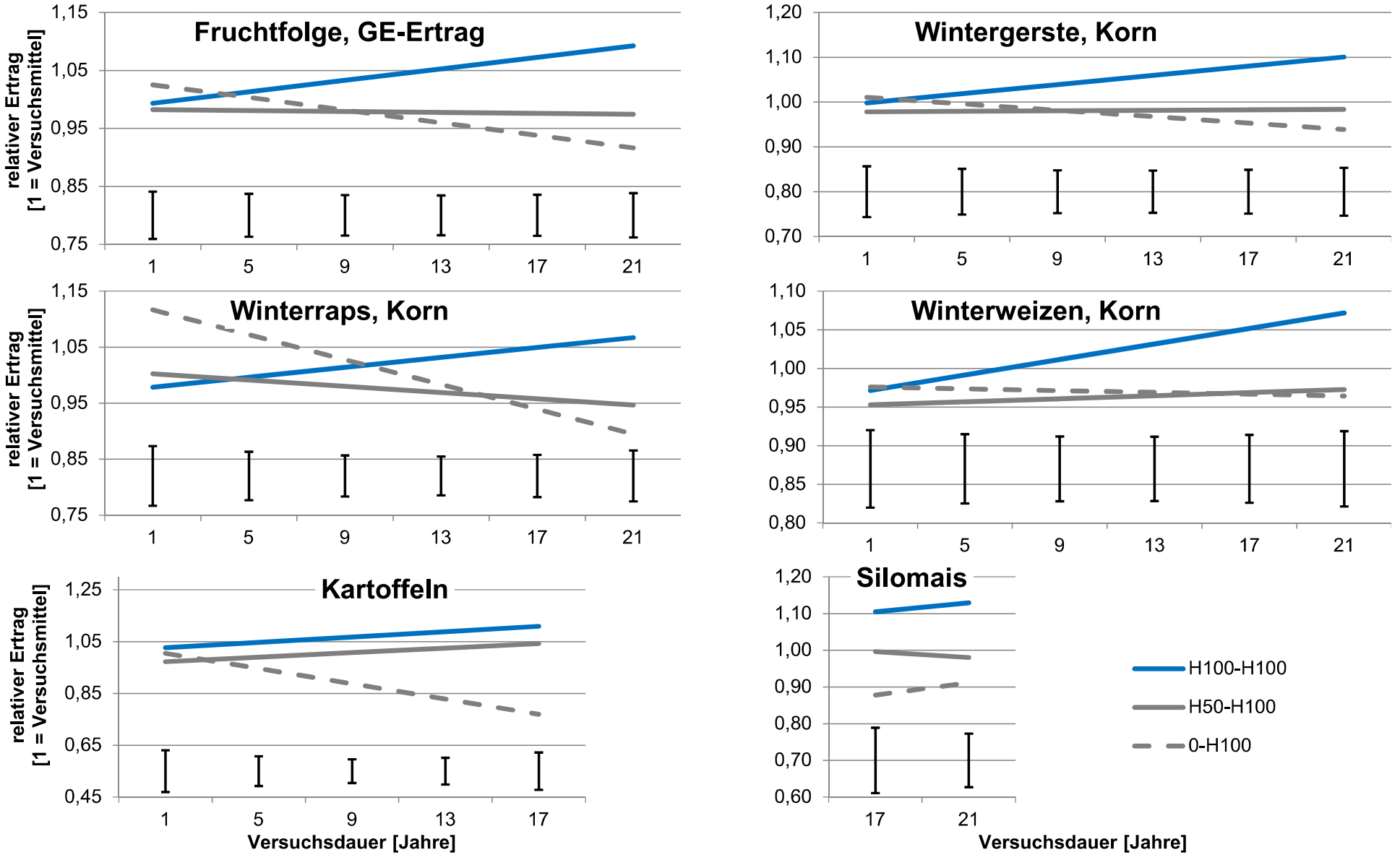


Abbildung 27: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich unterschiedlicher P-Düngungshöhe bei identischer K-Düngung entsprechend Abfuhr (P-Düngung entsprechend Abfuhr = H100-H100, P-Düngung entsprechend halber Abfuhr = H50-H100, ohne P-Düngung = 0-H100,) Düngungstermin aller Varianten: Herbst, GD (t; 0,05)

3.3.6 Termin der Phosphordüngung

Thesen:

A) Der Termin der P-Düngung beeinflusst die Düngewirkung.
B) Da Phosphor im Boden schnellen Festlegungsprozessen unterliegt, führt eine Frühjahrsdüngung, die zeitlich dichter am Nährstoffbedarf liegt, zu besseren Ergebnissen als eine Herbstdüngung.
C) Bei langfristig negativer Düngebilanz nehmen die Unterschiede mit der Zeit zu.

Beobachtungen (zu Abbildung 28):

- Beide dargestellten Varianten unterscheiden sich nicht voneinander.
- Diese Beobachtung trifft für Wintergerste und Winterweizen den gesamten Versuchszeitraum zu, es ist keine Veränderung im Laufe der Versuchsdauer erkennbar.
- Bei Winterraps ist der Unterschied zwischen beiden Varianten zu Versuchsende nur knapp nicht signifikant. Hier könnte sich ein Vorteil der Frühjahrsdüngung andeuten.
- Bei Kartoffeln zeichnet sich ein positiver Ertragsanstieg beider Varianten im Versuchsverlauf ab.

Diskussion:

- Die P-Nachlieferung durch den Boden ist im ganzen Versuchszeitraum so hoch, dass auch bei negativer P-Bilanz der Zeitpunkt der P-Düngung keine Rolle spielt.
- Da die P-Gehalte im Boden trotz negativer Düngebilanz im Versuchszeitraum leicht ansteigen, sind gleichbleibende Ergebnisse im Versuchszeitraum plausibel (vgl. Abbildung 10).
- Die positive Ertragsentwicklung beider Varianten bei Kartoffeln wird in dem besonders starken Abfall der komplett ungedüngten Varianten bei dieser Kultur liegen, da hier der relative Ertrag zum Versuchsmittelwert zugrunde liegt.
- Der unterschiedliche Ertragsverlauf bei Winterraps kann bei den vorliegenden P-Bodengehalten schwer erklärt werden und soll deshalb hier, auch weil der Signifikanztest negativ ist, nicht weiter betrachtet werden.

Schlussfolgerungen:

- Die Thesen A), B) und C) werden unter den Versuchsbedingungen nicht bestätigt.
- Bei ausreichender P-Versorgung im Boden kann der Düngungstermin frei gewählt werden, eine Verbesserung der Düngewirkung durch die Terminwahl ist nicht zu erwarten.
- Die auf der Versuchsfläche vorliegenden hohen P-Gehalte im Boden reichen auch bei langjährig negativer Düngebilanz zur Nährstoffversorgung der Pflanzen aus. Es können keine P-Düngewirkungen festgestellt werden.

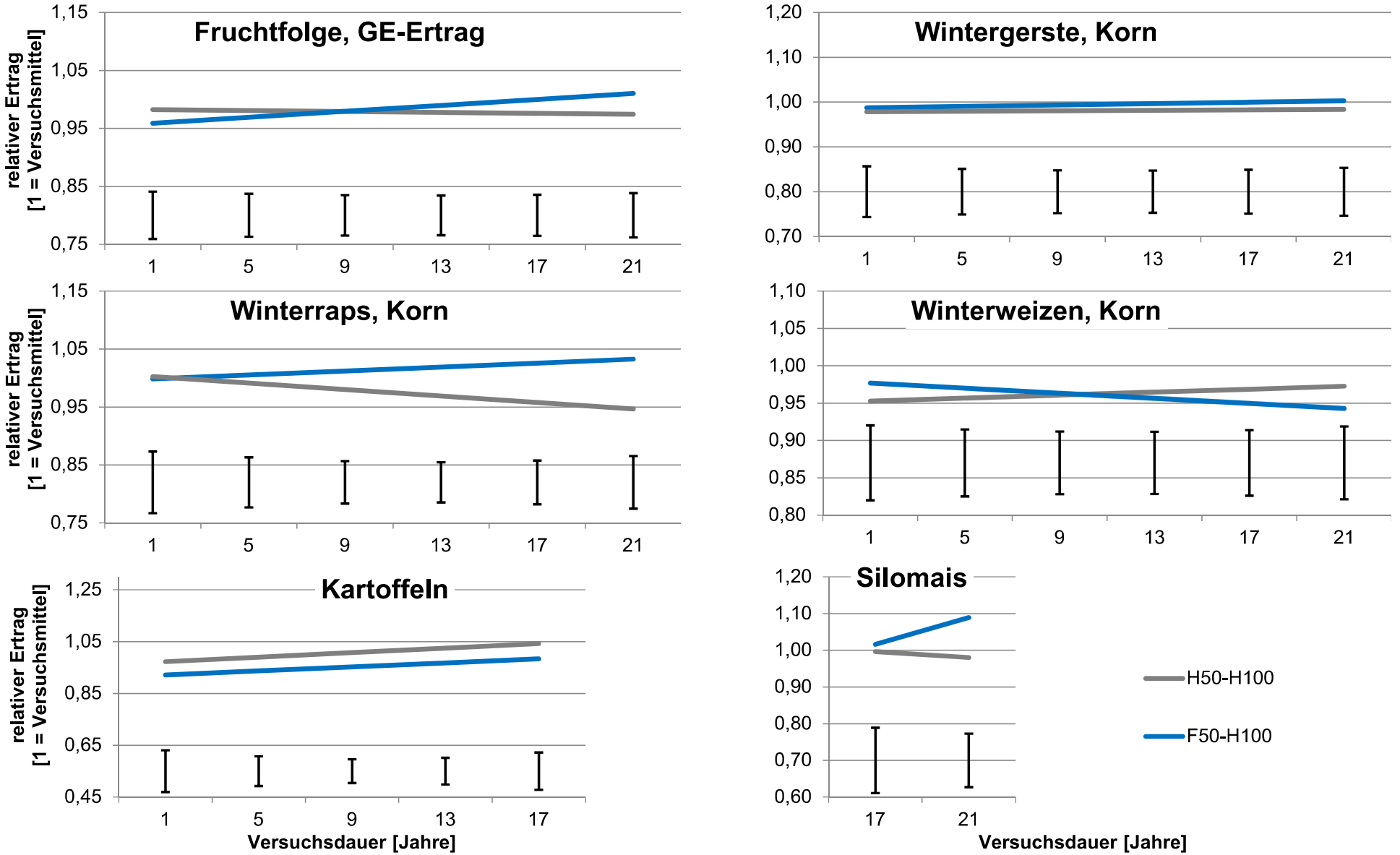


Abbildung 28: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich unterschiedlicher Düngungstermine einer P-Düngung entsprechend halber Abfuhr bei identischer K-Düngung im Herbst entsprechend Abfuhr (P-Düngung im Frühjahr = F50-H100 , P-Düngung im Herbst = H50-H100), GD (t; 0,05)

3.3.7 Kalium-Düngewirkung ohne Phosphordüngung

Thesen:

A) Unter sonst gleichen Bedingungen und wenn die Versorgung mit anderen Nährstoffen gesichert ist, führt K-Düngung zu Ertragssteigerung.
B) Mit zunehmender Ausdifferenzierung der Kalium-Gehalte im Boden wird der Ertragsunterschied zwischen den Düngungsstufen zunehmen.
C) Bei P-Gehalten im Boden im für die Pflanzenernährung optimalen Bereich kann auf P-Düngung ohne Ertragsnachteil verzichtet werden.

Beobachtungen (zu Abbildung 29):

- Ohne P-Düngung nehmen die relativen Erträge im Mittel der Fruchtfolge und bei allen Kulturen außer Winterweizen mit der Versuchsdauer ab, unabhängig davon ob Kalium gedüngt wurde oder nicht. Nach 20 Versuchsjahren lagen die Erträge der Mähdruschfrüchte 5-10% unter dem Versuchsmittel, welches die Mangelvarianten einschließt. Bei Kartoffeln und Mais ist der Ertragsabfall größer. Mit nur 70% vom Versuchsmittelwert wurden die niedrigsten relativen Erträge bei Kartoffeln ohne P- und ohne K-Düngung festgestellt. Bei Winterweizen liegen die Erträge beider Varianten leicht unterdurchschnittlich, ohne erkennbaren Zeittrend und dicht beieinander.
- Unterschiede zwischen beiden Varianten sind nur bei Kartoffeln ab ca. 8 Versuchsjahren sicher nachweisbar.

Diskussion:

- Trotz langjährig unterlassener K-Düngung und daraus folgend absinkenden K-Gehalten im Boden konnten sich die Pflanzen bis zu Versuchsende soweit aus dem K-Bodenpool ernähren, dass eine mögliche Kalium-Düngewirkung bei Silomais und den Mähdruschfrüchten unter der Grenzdifferenz liegt und sich damit nicht ausreichend sicher feststellen lässt. Die zu Versuchsende festgestellten extrem niedrigen Kaliumgehalte im Boden sprechen jedoch gegen eine auch nur halbwegs ausreichende Kaliumversorgung aus dem Boden.
- Für Kartoffeln, der Kulturart im Versuch mit dem wahrscheinlich höchsten Kaliumbedarf, kann dagegen eine Kaliumdüngewirkung ab dem 8. Versuchsjahr nachgewiesen werden. Nach 15 Jahren ohne Kaliumdüngung liegt das Ertragsdefizit im Vergleich zur Variante mit Kaliumdüngung nach 100% der Abfuhr bei 20%.
- Der relative Ertragsabfall beider Düngungsvarianten im Mittel der Fruchtfolge, bei Winterraps, Wintergerste und Kartoffeln im Versuchsverlauf deutet neben Kalium auf einen weiteren Einflussparameter hin. Da in beiden Varianten kein Phosphor gedüngt wurde, kann dies als P-Mangeleffekt gedeutet werden. Gegen diese Interpretation sprechen die optimalen P-Bodengehalte auf den Parzellen im gesamten Versuchszeitraum.
- Das völlige Fehlen einer Differenzierung der Ertragsergebnisse bei Winterweizen im Versuchsverlauf kann übereinstimmend mit anderen Variantenvergleichen mit der Vorfruchtwirkung des Winterrapses erklärt werden.
- Unter Ignoranz der Nährstoffgehalte im Boden müsste man die Beobachtungen in Bezug auf die Mähdruschfrüchte und Silomais als dominierenden P-Mangel und leichter Kaliumunterversorgung aus dem Boden erklären. Im Gegensatz dazu würde bei Kartoffeln ein starker und dominierender Kaliummangel bei gleichzeitiger Phosphorunterversorgung vorliegen. Für diese Interpretation spricht, dass außer bei Kartoffeln keine signifikante positive Kaliumdüngewirkung erkennbar ist. Der parallele Variantenvergleich einer P-Düngewirkung unter den Bedingungen ohne K-Düngung weist im Gegensatz dazu auf einen mit zunehmender Versuchsdauer starken und dominierenden Kaliummangel bei wenigstens leichter P-Unterversorgung hin (siehe Abschnitt 3.3.4.). Der Widerspruch kann anhand der Versuchsergebnisse nicht aufgeklärt werden.

Schlussfolgerungen:

- Ohne P-/K-Düngung werden im Laufe der Zeit die Erträge geringer. Eine regelmäßige P-/K-Düngung ist zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit/des Ertragspotenzials notwendig.
- Trotz als optimal eingeschätzter P-Gehalte im Boden reicht eine Kaliumdüngung bei den Mähdruschfrüchten und Silomais nicht für eine wesentliche Ertragssteigerung aus. Aufgrund dieses Widerspruches können die Thesen A), B) und C) deshalb für diese Kulturarten und im Mittel der Fruchtfolge mit diesen Versuchsergebnissen nicht geprüft werden.
- Für Kartoffeln werden die Thesen A) und B) bestätigt. Die These C) wird für Kartoffeln abgelehnt. Kartoffeln haben einen hohen Kaliumdüngebedarf, jedoch sollte auch bei optimalen P-Bodengehalten eine regelmäßige Phosphordüngung eingeplant werden.
- Trotz langjährig unterlassener Kaliumdüngung und extrem geringen Kaliumgehalten können noch erstaunliche Mengen Kalium von den Pflanzen aus dem Bodenvorrat mobilisiert und aufgenommen und zur Ertragsbildung umgesetzt werden.

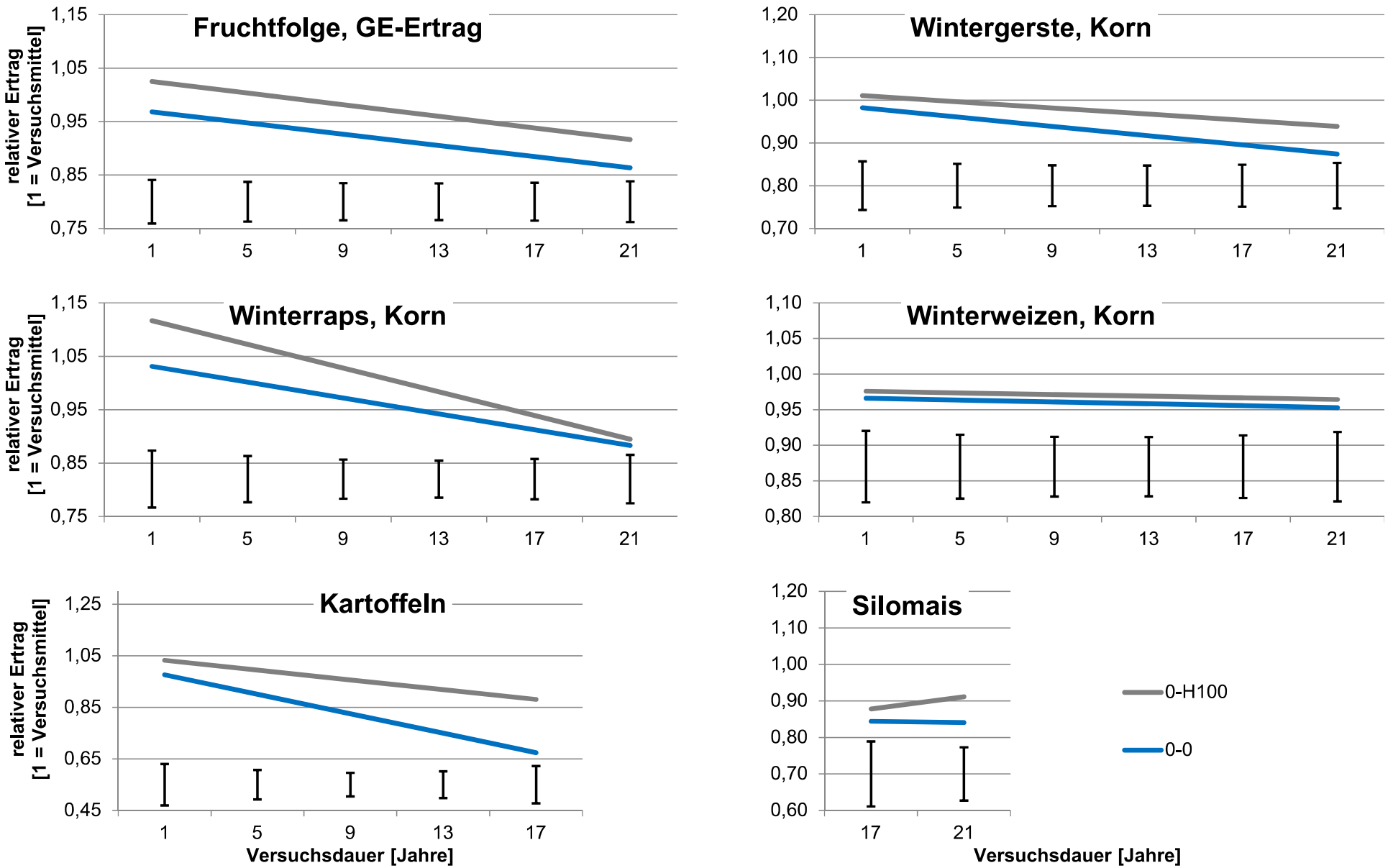


Abbildung 29: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich der Variante ohne Düngung = 0-0 mit der Variante K-Düngung entsprechend Abfuhr und ohne P-Düngung = H100-0, Düngungstermin: Herbst, GD (t; 0,05)

3.3.8 Höhe der Kaliumdüngung

Thesen

A) Bei niedrigen bis optimalen K-Gehalten im Boden führt eine Kaliumdüngung zu steigenden Erträgen.
B) Eine negative Kaliumbilanz führt langfristig zu abnehmenden Erträgen.
C) Mit zunehmender Ausdifferenzierung der K-Gehalte im Boden nehmen die Unterschiede zwischen den abgestuften K-Düngungshöhen zu.

Beobachtungen (zu Abbildung 30):

- Extrem negative Kaliumbilanzen ohne Kaliumdüngung bewirken in allen Kulturen einen Abfall der relativen Erträge im Versuchsverlauf. Bei positiver Kaliumbilanz wird ein Anstieg der relativen Erträge im Versuchsverlauf ermittelt.
- Nach ca. 10 Jahren können im Mittel der Fruchtfolge und zu Versuchsende bei allen Kulturarten mit Kalium-Düngung nach 100% der Abfuhr höhere Erträge als ohne Kalium-Düngung nachgewiesen werden. Ein Ertragsvorteil im Vergleich zur Düngung nach 50% der Abfuhr ist während der Versuchsdauer nur bei Wintergerste sicher feststellbar.
- Die Varianten ohne Kaliumdüngung und mit Düngung nach 50% der Abfuhr unterscheiden sich im Versuch nur bei Kartoffeln und erst ab dem 10. Versuchsjahr.
- Bei Wintergerste und Winterweizen verläuft der Ertragsabfall ohne Kaliumdüngung und mit Düngung nach 50% der Abfuhr parallel.

Diskussion:

- Die Ab- bzw. Zunahme der relativen Erträge im Versuchsverlauf weisen auf einen Einfluss der Kaliumdüngung hin. Dass die Unterschiede mit zunehmender Ausdifferenzierung der Bodengehalte größer werden, ist plausibel.
- Diskussionsbedürftig ist die Beobachtung, dass die K-Düngung nach 50% der Abfuhr im Mittel der Fruchtfolge, bei Wintergerste, Winterweizen, Winterraps und Silomais keine bzw. keine nachweisbare Ertragswirkung zeigt. Ein Erklärungsansatz wäre die Vermutung, dass die K-Nachlieferung aus dem Boden so niedrig ist, dass kleine Düngemengen nicht einmal für eine minimale Pflanzenversorgung ausreichten. Gegen diese Vermutung sprechen dieselbe Beobachtung in der Mitte des Versuchszeitraumes bei weniger stark ausdifferenzierten Bodengehalten und relative Erträge dieser Variante von ca. 95% bis >100 % in den Kulturen zu Versuchsende. Bei Winterraps und Winterweizen ist der Ertragsvorteil auch der nach 100% K-Abfuhr gedüngten Variante zur Variante ohne Kaliumdüngung erst zu Versuchsende nur knapp bzw. knapp nicht signifikant. Aufgrund der entsprechend höheren Unsicherheit der Ergebnisse soll der Widerspruch für diese beiden Kulturen nicht weiter verfolgt werden. Bei Wintergerste ist der Widerspruch jedoch sehr deutlich und kann mit den vorliegenden Versuchsergebnissen nicht aufgeklärt werden.
- Die im Vergleich der Kulturarten abweichenden Ergebnisse bei Kartoffeln könnten übereinstimmend mit dem allgemein anerkannten Wissen zur Kaliumdüngung dahingehend interpretiert werden, dass auch geringere K-Mengen eine Düngewirkung haben. Die weiter auf 100% der Abfuhr erhöhte Düngung führt entsprechend des Gesetzes vom abnehmenden Ertragszuwachs zu weiterer aber weniger hoch ausfallender Ertragssteigerung, die hier jedoch nicht signifikant ist.
- Langfristig abfallende Erträge bei negativer Kaliumbilanz werden für alle Kulturen ohne Kaliumdüngung, bei Kaliumdüngung entsprechend 50 % der Abfuhr jedoch sicher nur im Mittel der Fruchtfolge (da das Versuchsmittel auch die Varianten mit sinkenden Erträgen umfasst), bei Winterweizen und Wintergerste nachgewiesen. Mit K-Düngung nach 50 % der Abfuhr sind die K-Gehalte im Boden auf 6-7 mg/100 g gefallen. Es ist anzunehmen, dass bei Fortsetzung der negativen Kaliumbilanz die K-Gehalte im Boden weiter sinken und dann auch die Erträge der anderen Kulturen abfallen werden.

Schlussfolgerungen:

- Die These A) kann mit den Versuchsergebnissen außer für Kartoffeln nicht geprüft werden, da die Beobachtungen nicht schlüssig erklärt werden können. Bei Kartoffeln wird die These bestätigt.
- Die These B) wird bei allen Kulturen nur für extrem niedrige Kaliumbilanzen ohne Kaliumdüngung und darüber hinaus für die Mähdruschfrüchte bestätigt. Für Kartoffeln und Winterraps wird sie bei K-Gehalten im Boden ≥ 6 mg/100 g nicht bestätigt. Unabhängig von der Düngewirkung zu den einzelnen Kulturen sollte eine ausgeglichene Kaliumbilanz über die Fruchtfolge angestrebt werden.
- Die These C) kann nur für den extremen Vergleich ohne Kalium-Düngung und Kalium-Düngung nach 100 % der Abfuhr bestätigt werden. Für den Vergleich mit der reduzierten Kaliumdüngung nach 50 % der Abfuhr kann die These C) nicht geprüft werden, da die Beobachtungen nicht schlüssig erklärt werden können.

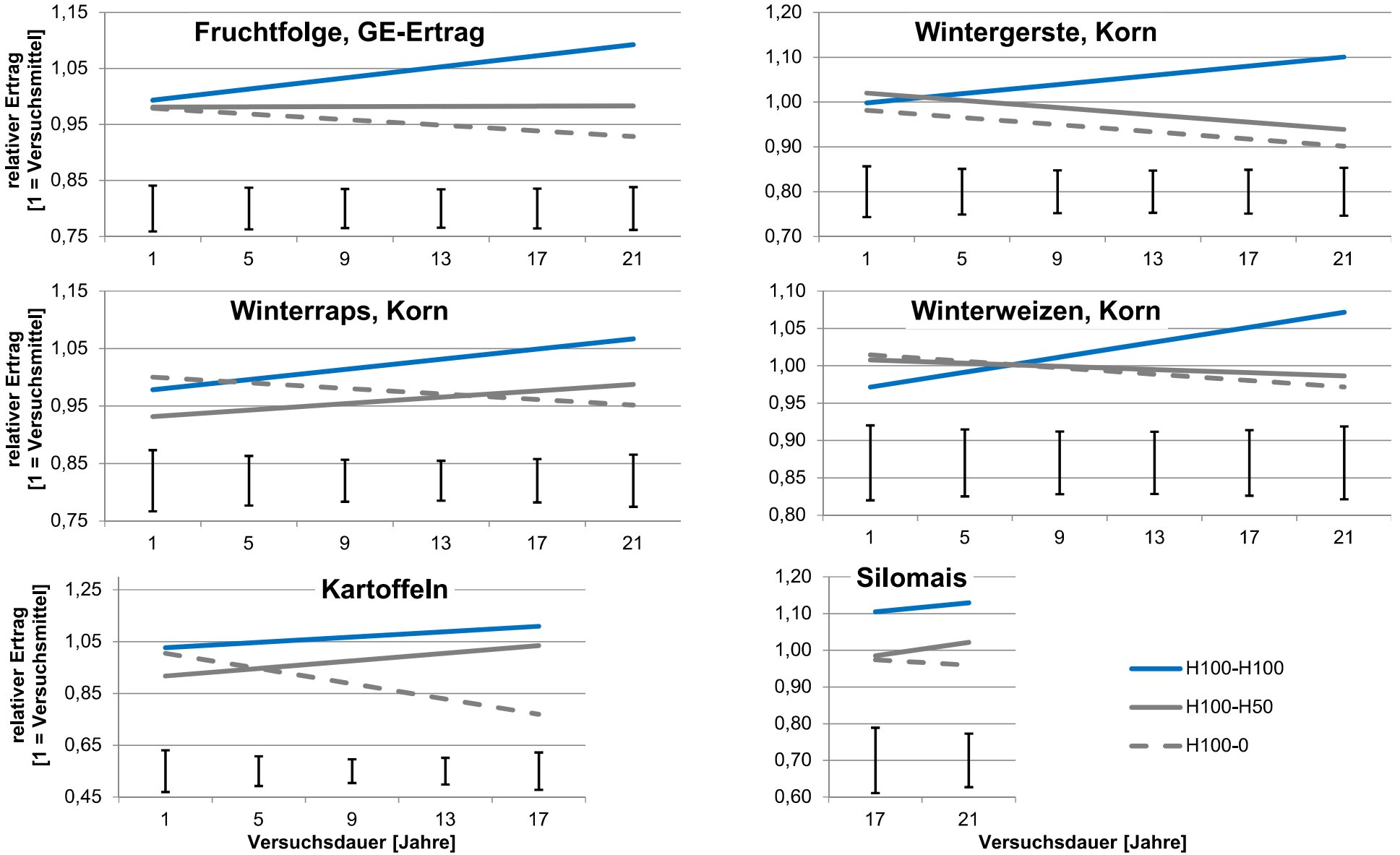


Abbildung 30: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich unterschiedlicher K-Düngungshöhe bei identischer P-Düngung entsprechend Abfuhr (K-Düngung entsprechend Abfuhr = H100-H100, K-Düngung entsprechend halber Abfuhr = H100-H50, ohne K-Düngung = H100-0,) Düngungstermin aller Varianten: Herbst, GD (t; 0,05)

3.3.9 Termin der Kaliumdüngung

Auf sandigen Böden (geringes Nährstoffbindungsvermögen) sowie auf lehmigen Böden in niederschlagsreichen Regionen kann eine Kalium-Düngung zur Vegetationszeit an Stelle einer hohen Grunddüngung im Herbst dazu beitragen, die Nährstoffverluste zu begrenzen.

Thesen:

A) Der Termin der Kaliumdüngung beeinflusst die Düngewirkung.
B) Da Kalium im Boden mit den Winterniederschlägen ausgewaschen wird, werden mit einer Frühjahrsdüngung bessere Ergebnisse als mit einer Herbstdüngung erreicht.
C) Bei anhaltender Düngung unter Entzug nehmen die Unterschiede mit der Zeit zu.

Beobachtungen (zu Abbildung 31):

- Im Mittel der Fruchtfolge und in allen Einzelkulturen werden mit Frühjahrsdüngung höhere Erträge als mit K-Düngung im Herbst erreicht. Signifikant höhere Erträge sind allerdings nur im Mittel der Fruchtfolge und bei Winterraps nachweisbar.
- Bei Winterraps und Wintergerste nimmt der Unterschied zwischen beiden Düngungsterminen im Laufe der Versuchsdauer zu, bei Kartoffeln und Winterweizen bleibt er in etwa gleich.

Diskussion:

- Die Beobachtungen entsprechen der Erwartung einer besseren K-Düngewirkung bei Frühjahrsdüngung.
- Interessant erscheint, dass der positive Effekt der Frühjahrsdüngung vor allem bei den Kulturen mit der besseren Durchwurzelung im Herbst, Winterraps und Wintergerste, auftritt. Da nicht vorhandene Effekte bei Winterweizen immer im Zusammenhang mit der Vorfrucht zu sehen sind, bleibt die Frage, warum beide Düngungstermine zu Kartoffeln mit ähnlichen Erträgen verbunden sind. Wenn die positive Wirkung der Frühjahrsdüngung mit verringerter Auswaschung erklärt wird, ist nicht plausibel, dass diese Auswaschung auf der Schwarzbrache vor Kartoffeln in geringerem Ausmaß als in Raps- und Gerstenbeständen stattfand. Dass ein Kaliumeffekt bei der kaliumbedürftigeren Kultur Kartoffeln nicht auftritt, wenn er im Mittel der Fruchtfolge beobachtet wird, ist ebenfalls schwer erklärbar. Dieser Widerspruch kann hier nicht aufgeklärt werden.
- Die positive Düngewirkung einer K-Frühjahrsdüngung kann schon seit Versuchsbeginn aufgetreten sein. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass später bei weiter fortgesetzter negativer K-Düngebilanz ebenfalls mit abfallenden Erträgen gerechnet werden muss. Bei Düngung nach 50% der Abfuhr liegen die K-Gehalte im Boden der Variante mit Frühjahrsdüngung sogar leicht unter der mit Herbstdüngung (Abbildung 19).
- Bei durch den Klimawandel zunehmenden Trockenperioden im Frühjahr steht zu befürchten, dass die bessere Düngewirkung einer K-Frühjahrsdüngung unsicherer wird und schwindet. Für die volle Düngewirkung sind ausreichende Niederschläge zum Einwaschen und Verteilen des Düngers in die/in der Krume nötig.

Schlussfolgerungen

- Die Thesen A), B) und C) werden mit etwas größerer Unsicherheit und nur für Winterraps, Wintergerste und Silomais bestätigt. Mit einer Verlegung der Kalium-Düngung vom Herbst ins Frühjahr kann die Düngewirkung in diesen Kulturen wahrscheinlich verbessert werden. Bei der Anwendung dieser Erkenntnis sollten ihre Grenzen (nötig sind ausreichende Frühjahrsniederschläge und langfristig eine ausgeglichene Kaliumbilanz) beachtet werden.
- Für Kartoffeln werden die Thesen A), B) und C) nicht bestätigt.
- Für Winterweizen nach Raps-Vorfrucht ist der Termin einer K-Düngung von geringer Bedeutung, die Thesen A), B) und C) werden nicht bestätigt.
- Allerdings sollten aus diesen Ergebnissen aufgrund der nicht erklärten Widersprüche keine Düngungsempfehlungen abgeleitet werden.

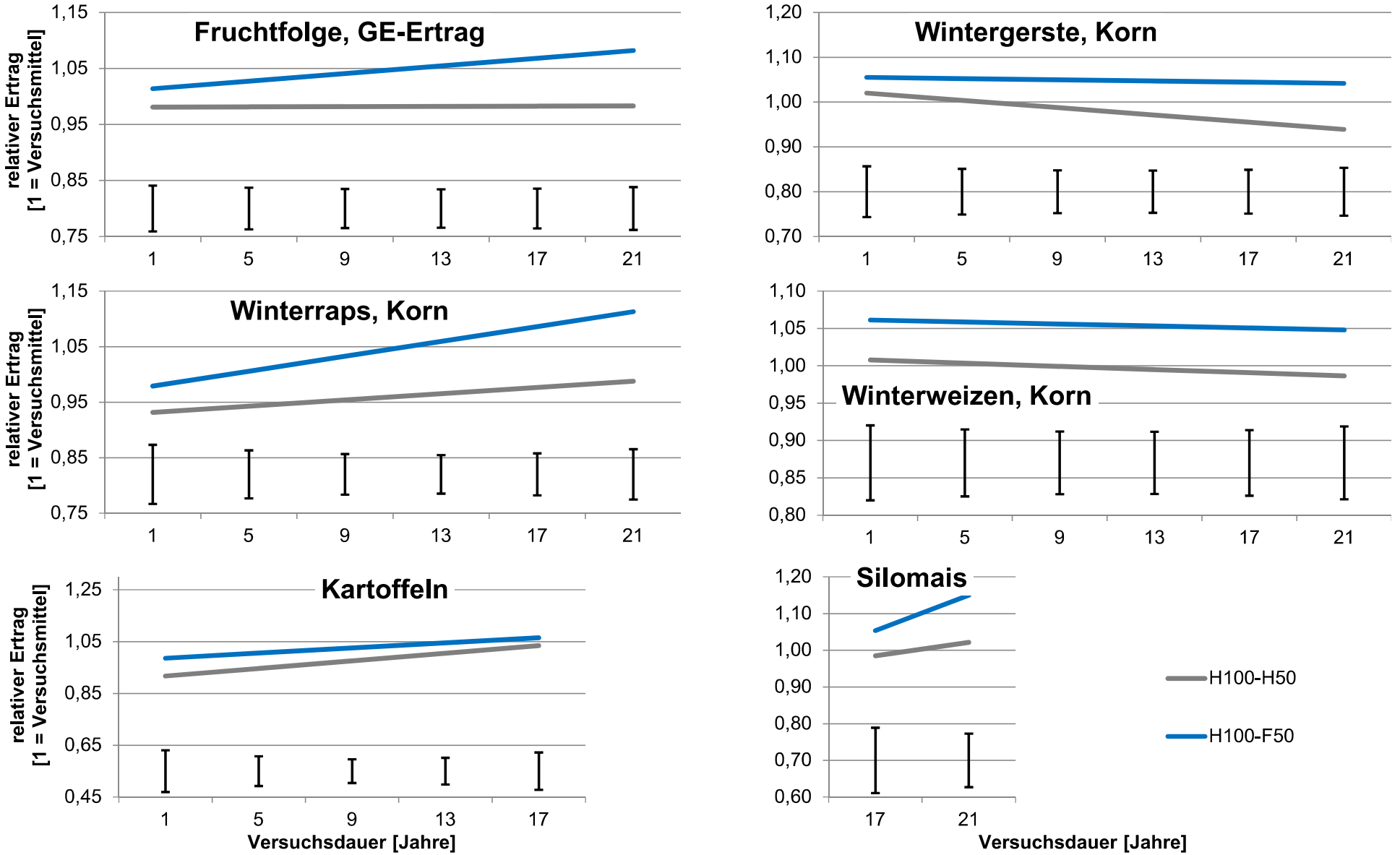


Abbildung 31: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich unterschiedlicher Düngungstermine einer K-Düngung entsprechend halber Abfuhr bei identischer P-Düngung im Herbst entsprechend Abfuhr (K-Düngung im Frühjahr = H100-F50, K-Düngung im Herbst = H100-H50), GD (t; 0,05)

3.3.10 Höhe der P-/K-Düngung im Frühjahr

Thesen:

A) Eine höhere P-/K-Düngung führt auch bei Frühjahrsdüngung zu höheren Erträgen.
B) Mit zunehmender Ausdifferenzierung der Nährstoffgehalte im Boden wird der Ertragsvorteil höherer Düngung größer.

Beobachtungen (zu Abbildung 32):

- Mit Kaliumdüngung von nur 50% der Abfuhr sind immer geringere oder gleiche Erträge wie mit einer Düngung entsprechend 100 % der Abfuhr verbunden.
- In beiden Frühjahrsdüngungsvarianten wurden unabhängig von den Düngungshöhen bei allen Mähdruschfrüchten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Varianten im Laufe des Versuches ermittelt. Bei Kartoffeln und mit geringerer Sicherheit auch bei Silomais sind zum Ende des Versuches höhere Erträge mit höherer Düngung verbunden.

Diskussion:

- Der Vorteil, der aus dem Termin der Frühjahrsdüngung folgt (siehe Seite 51), könnte den Vorteil der höheren Düngemenge nivelliert haben. Das könnte die fehlenden Unterschiede bei Winterraps und Wintergerste erklären. Dazu passt, dass für Kartoffeln kein positiver Frühjahrstermineffekt nachgewiesen wurde und hier ein Nachteil der geringeren Düngemenge signifikant wird.
- Aus dem Vergleich kann nicht abgeleitet werden, ob der Effekt gleichermaßen auf P- und K-Düngungseffekte zurückzuführen ist. Da jedoch in anderen Vergleichen ein Termineffekt für Kalium, nicht jedoch für Phosphor (siehe Seite 43) nachgewiesen wurde, ist ein Überwiegen einer K-Düngewirkung wahrscheinlich.
- Da mit einer Düngung von nur 50% der Abfuhr negative Nährstoffbilanzen verbunden sind, ist bei einer Fortführung dieser Düngestrategie abweichend zu den Beobachtungen im Versuch langfristig von einem Abfall der Erträge auszugehen.

Schlussfolgerungen

- Unter den Bedingungen des Versuches (optimale P- und mittlere Kalium-Gehalte im Boden) werden die Thesen A) und B) für die Mähdruschfrüchte nicht bestätigt. Mit der besseren Düngewirkung einer K-Frühjahrsdüngung kann die geringere Düngemenge für eine begrenzte Zeit ausgeglichen werden.
- Für Kartoffeln und Silomais ist der Düngebedarf unabhängig vom Düngungstermin vorhanden.

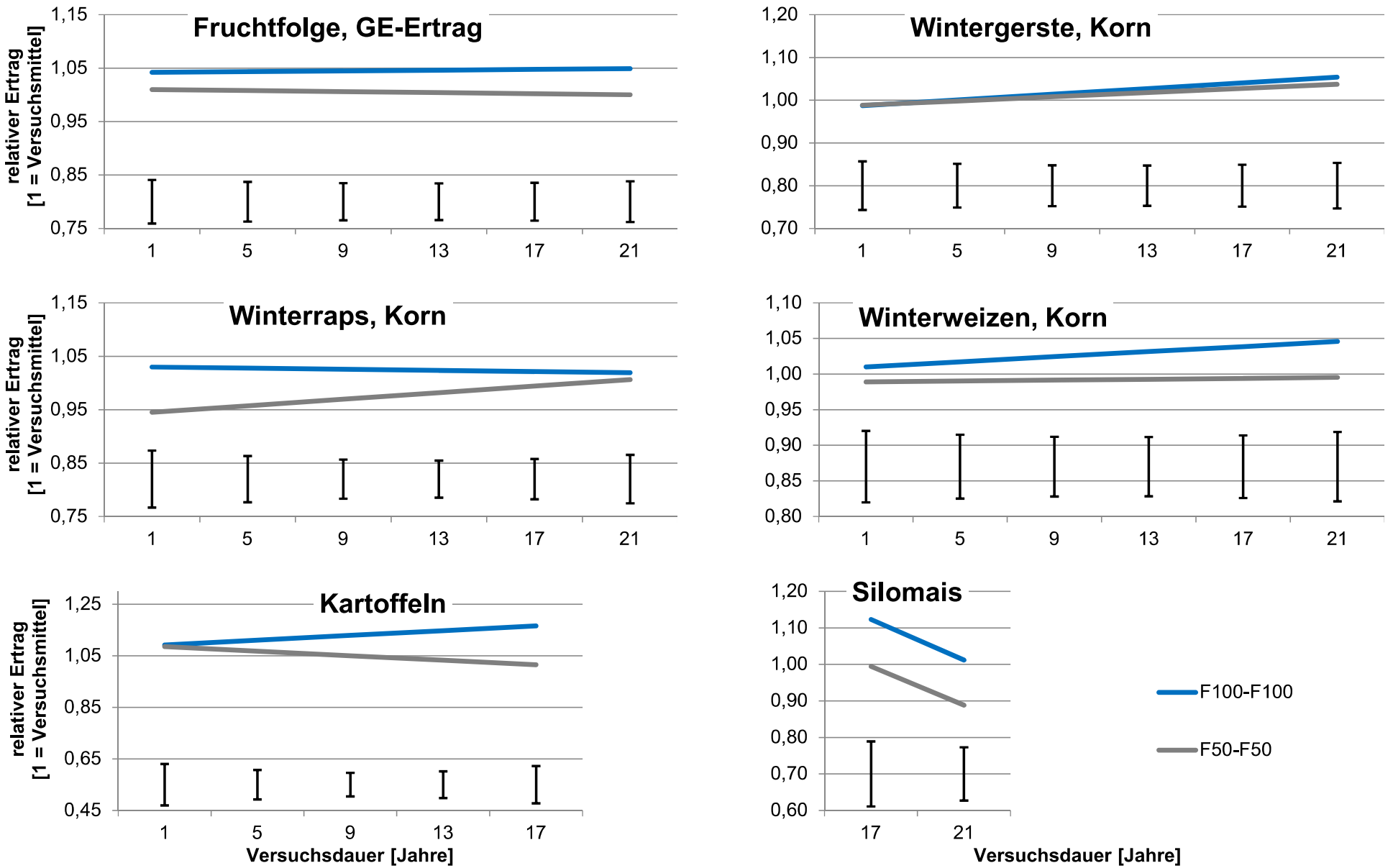


Abbildung 32: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich unterschiedlicher Düngungshöhen einer P-/K-Düngung im Frühjahr (P-/K-Düngung nach halber Abfuhr = F50-F50 mit P-/K-Düngung nach Abfuhr = F100-F100), GD (t; 0,05)

3.3.11 Termin der P-/K-Düngung

Thesen:

A) Der Termin einer P-/K-Düngung beeinflusst die Düngewirkung.
B) Dabei werden mit Frühjahrsdüngung bessere Effekte als mit Herbstdüngung erreicht.
C) Bei nicht negativen Düngebilanzen sollte das Ertrags-Verhältnis zwischen den Terminvarianten über die Versuchsdauer gleichbleiben (ohne Zeittrend).

Beobachtungen (zu Abbildung 33):

- Zu Versuchsende liegen die Ertragswerte für alle Kulturen außer Kartoffeln bei Herbstdüngung über denen bei Frühjahrsdüngung.
- Zwischen beiden Düngungsvarianten kann jedoch weder im Mittel der Fruchtfolge, noch bei den Einzelkulturen während der gesamten Versuchsdauer ein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden.

Diskussion:

- Nach den Ergebnissen anderer Variantenvergleiche ist nur ein Termineffekt der K-Düngung, nicht jedoch der P-Düngung zu erwarten (s.o.).
- Anders als für Winterraps und evtl. Wintergerste und Silomais beim Düngeniveau von 50% der Abfuhr kann hier bei Düngung nach 100% der Abfuhr kein Terminvorteil der Frühjahrsdüngung festgestellt werden. Eine Erklärung könnte in der besseren Nährstoffversorgung bei höherem Düngeniveau liegen. Die höhere Düngemenge und/oder die höhere Nährstoffnachlieferung aus dem Boden überlagern den positiven Termineffekt.
- Solange die P-/K-Gehalte im Boden mindestens im optimalen Bereich bleiben, wie dies über den Versuchszeitraum für diese Varianten der Fall war, führt der mögliche positive Termineffekt nicht zu wesentlichen Ertragsvorteilen.

Schlussfolgerungen:

- Die Thesen A) und B) werden für das Düngeniveau nach 100% Abfuhr nicht bestätigt. Bei leicht positiver Düngebilanz bringt eine Verlagerung der P-/K-Düngung keinen wesentlichen Ertragsvorteil.
- Die These C) wird bestätigt.
- Bei optimalen Nährstoffgehalten im Boden und nicht unterbilanzierter Düngemenge kann der Düngungstermin frei gewählt werden.

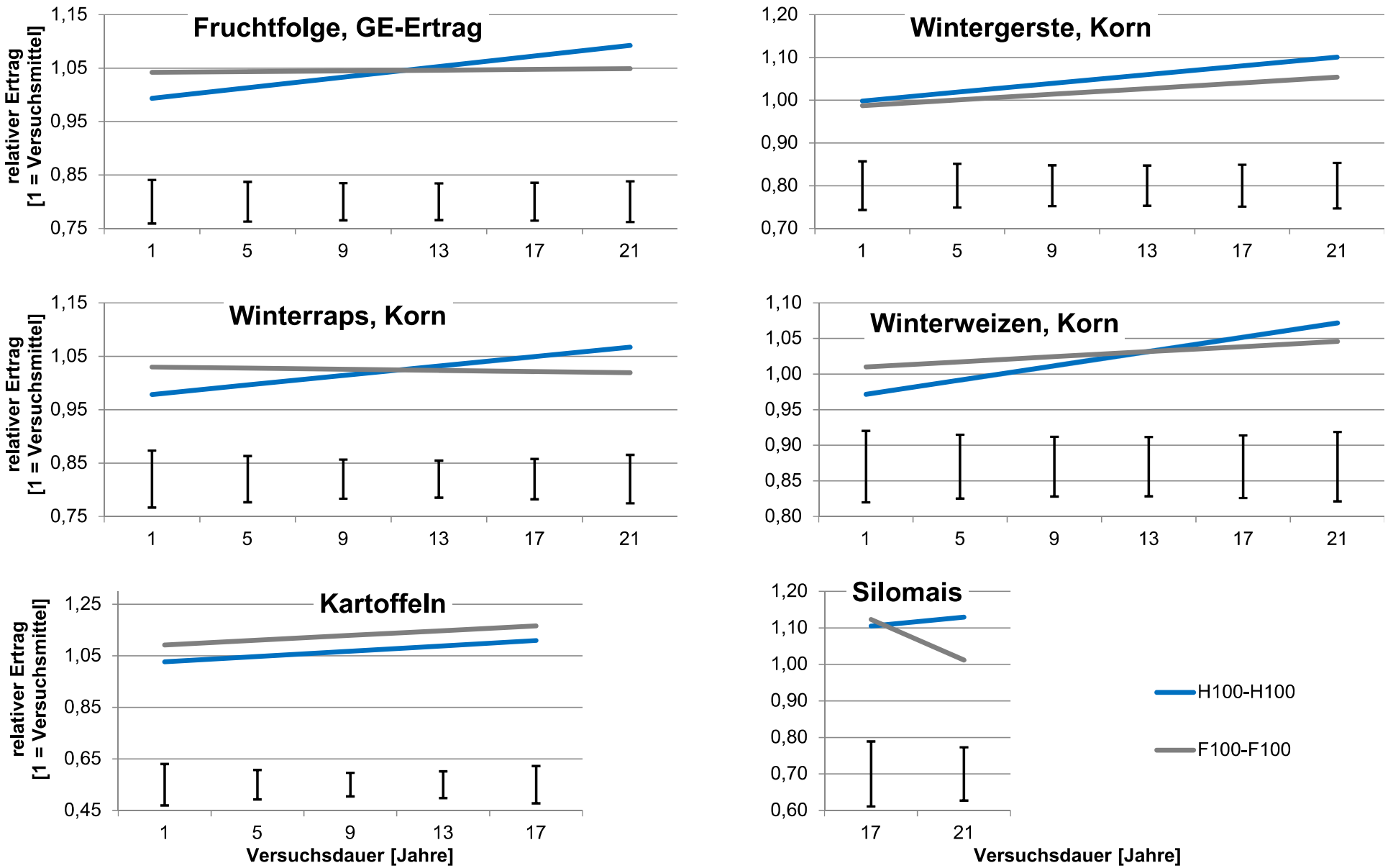


Abbildung 33: Ertrag in Abhängigkeit von der langjährigen Düngungsstrategie (Gülzow, 1998-2019), Vergleich der P-/-K-Düngungstermine bei Menge entsprechend Abfuhr: Düngung im Herbst = H100-H100, Düngung im Frühjahr = F100-F100, GD (t; 0,05)

4 Zusammenfassung der Schlussfolgerungen

- Alle hier vorgestellten Versuchsergebnisse stehen unter dem Vorbehalt einer weiteren Überprüfung. Die Auswertungsunsicherheit aller Schlussfolgerungen ist mit 10% Ertragsunterschied relativ hoch.

- Unterschiede in den P-/K-Nährstoffbilanzen beeinflussen die Nährstoffgehalte im Boden, den Ertrag/die Ertragswirkung der Düngung mittel- bzw. langfristig.
- Eine regelmäßige P-/K-Düngung ist für den Erhalt des Ertragspotenzials des Bodens/der Bodenfruchtbarkeit notwendig.
- Das Weglassen der P- und/oder K-Düngung führt langfristig zu Ertragsnachteilen, egal ob nur ein oder zwei Nährstoffe fehlen.
- Je länger P-/K-Düngungsmaßnahmen aufgeschoben werden, mit desto größeren Ertragsnachteilen ist zu rechnen.
- Dabei sind 10% Ertragsnachteil für Winterraps und Rapsweizen nach zwanzig Jahren, 10% für Wintergerste nach zehn Jahren auf einem sandigen Diluvialstandort mindestens anzunehmen. Bei Kartoffeln und Silomais ist noch deutlich früher und mit deutlich größeren Ertragsnachteilen zu rechnen.
- Die P-/K-Düngewirkung bzw. die Wirkung von akkumuliertem Nährstoffmangel wird sowohl durch die Kulturart als auch durch die Fruchtfolgestellung der Kultur beeinflusst.
- Kartoffeln, Mais und Wintergerste haben in der gegebenen Fruchtfolge einen höheren P-/K-Düngebedarf als Winterraps und Winterweizen.
- Bei Mais hat die Witterung einen hohen Einfluss auf die P-/K-Düngewirkung.
- Welcher der beiden Nährstoffe in welchem Umfang bei den Mähdruschfrüchten und Silomais entscheidend ist, kann aus den Versuchsergebnissen nicht abgeleitet werden. Außerdem bestehen bei den Mähdruschfrüchten und Silomais Zweifel an der Gültigkeit der Aussage bei ausreichenden Nährstoffgehalten im Boden.
- Bei optimalen Nährstoffgehalten im Boden und nicht unterbilanzierter Düngemenge kann der Düngungstermin frei gewählt werden.

- Bei ausreichenden P-Gehalten im Boden beeinflusst die Höhe der Kaliumdüngung die P-Gehalte im Boden nicht. Bei ausreichenden K-Gehalten im Boden beeinflusst die Höhe der Phosphordüngung die K-Gehalte im Boden nicht.
- Fragen zur P- und K-Düngung sollten in getrennten Versuchen bearbeitet werden.

- Langfristig beeinflusst die P-Bilanz den pflanzenverfügbaren P-Gehalt im Boden. Dabei reagieren die P-Gehalte im Boden in Abhängigkeit von der Bodenart vergleichsweise träge. Weitere Einflussfaktoren wie die Nährstoffgehalte tieferer Bodenschichten, die Freisetzung aus schwerer löslichen P-Fraktionen im Boden und die Kulturarten in der Fruchtfolge können den Einfluss der P-Bilanz überlagern.
- Der Termin der P-Düngung hat in der Regel keinen wesentlichen Einfluss auf die P-Gehalte im Boden.
- Eine negative P-Bilanz führt langfristig zu abnehmenden Erträgen.
- Die P-Düngung kann bei hohen P-Gehalten im Boden reduziert oder ausgesetzt werden. Bei mindestens als optimal eingeschätzten P-Gehalten im Boden reicht die P-Nachlieferung aus dem Boden auch für eine mindestens mittlere Ertragsbildung aus. Für Kartoffeln sollte jedoch wenigstens eine reduzierte P-Düngung eingeplant werden.
- Die Versuchsergebnisse zur Höhe einer P-Düngung können im Mittel der Fruchtfolge, für die Mähdruschfrüchte und Silomais nicht ausgewertet werden, da die Beobachtungen nicht schlüssig erklärt werden können.

- Bei ausreichender P-Versorgung im Boden kann der Düngungstermin frei gewählt werden, eine Verbesserung der Düngewirkung durch die Terminwahl ist nicht zu erwarten.

- Die K-Düngungshöhe spiegelt sich in den K-Gehalten im Boden wider. Eine negative Kaliumbilanz führt schon mittelfristig zum Absinken der Gehalte im Boden.
- Auf sandigen Standorten mit relevanter Kaliumauswaschung sind zum Erhalt optimaler Kaliumgehalte im Boden Zuschläge zur Kaliumdüngung zu kalkulieren. Wird durch die Düngung nur die K-Abfuhr ausgeglichen, sinken die K-Gehalte im Boden langfristig.
- Ein Aussetzen der Kaliumdüngung führt schon mittelfristig (10 Jahre) und unabhängig von der Versorgung mit anderen Nährstoffen zu relevanten Ertragsnachteilen.
- Der mögliche Einfluss des K-Düngungstermins auf die K-Bodengehalte ist gering.
- Die Kalium-Gehalte im Boden im optimalen bis unterversorgten Bereich sind direkt proportional zum Ertrag.
- Trotz langjährig unterlassener Kaliumdüngung und extrem geringen Kaliumgehalten können noch erstaunliche Mengen Kalium von den Pflanzen aus dem Bodenvorrat mobilisiert und aufgenommen und zur Ertragsbildung umgesetzt werden.
- Bei niedrigen bis optimalen K-Gehalten im Boden, unter sonst gleichen Bedingungen und wenn die Versorgung mit anderen Nährstoffen gesichert ist, führt K-Düngung bei Kartoffeln zu Ertragssteigerung. Bei Wintergerste und wahrscheinlich auch bei Winterraps und Silomais enthalten die Versuchsergebnisse zur Höhe einer Kaliumdüngung Widersprüche, die nicht schlüssig erklärt werden können.
- Für Winterweizen mit Rapsvorfrucht und für Kartoffeln spielt der Termin einer Kaliumdüngung eine untergeordnete Rolle. Bei Winterraps, Wintergerste und Silomais und bei K-Gehalten im Boden ≤ 7 mg/100 g kann jedoch wahrscheinlich eine Verlegung des Düngungstermins vom Herbst ins Frühjahr die K-Düngewirkung verbessern. Die Interpretation dieser Ergebnisse lässt jedoch Fragen offen.
- Bei K-Gehalten im Boden ≥ 8 mg/100 g und mindestens ausgeglichener K-Bilanz bringt eine Verlagerung der P-/K-Düngung keinen wesentlichen Ertragsvorteil.

- Hohe P-Nachlieferung aus den Bodenvorrat wird durch die erweiterte Düngeplanung nicht ausreichend erfasst und berücksichtigt.
- Düngungszuschläge der erweiterten Düngeplanung, mit denen die Kaliumauswaschung auf sandigen Böden ausgeglichen werden soll, können wahrscheinlich weniger hoch bemessen werden.
- Neben der Nährstoffbilanzierung sind mehrjährige Bodenuntersuchungen in engen Zeitabständen sinnvoll.
  Bei optimalen Nährstoffgehalten im Boden sind mögliche Ertragsvorteile einer erweiterten Düngeplanung im Vergleich zur Düngung nach 100% der Abfuhr für die Mähdruschfrüchte und Silomais geringer als die mit dem vorliegenden Versuch nachweisbaren Unterschiede. Für Kartoffeln ist die erweiterte Düngeplanung dagegen vorteilhaft. Diese Schlussfolgerung steht aufgrund von Widersprüchen in den Versuchsergebnissen jedoch unter dem Vorbehalt einer Bestätigung in anderen Untersuchungen.

5 Fazit und Ausblick

Bei den mit den negativen K-Bilanzen stark absinkenden Kalium-Gehalten im Boden im Versuchsverlauf und den bis zum Schluss hohen bis optimalen P-Gehalten im Boden sind fehlende Nachweisbarkeit einer K-Düngewirkung und die ähnliche Anzahl an positiven P-Düngewirkungen im Variantenvergleich schwierig zu bewerten (Tabelle 9). An dieser Stelle muss wieder auf die eingeschränkte Auswertbarkeit der gegebenen Versuchsanlage hingewiesen werden. Deshalb scheint es auch gewagt, die ermittelten Ergebnisse in Bezug auf den Düngungstermin zu vergleichen.

Ein Vergleich mit im Anschluss an die Versuchsdurchführung im Jahr 2020 auf den identischen Parzellen ermittelten Erträgen, bestärkt diese Skepsis. 2020 wurden alle Parzellen identisch gedüngt (ohne P, mit mittleren Düngemengen K, Düngungstermin aller Parzellen: Herbst). Die Parzellenerträge der bis 2019 unterschiedlich gedüngten Varianten wurden mit gleichen statistischen Methodik wie in den Vorjahren ausgewertet. Ein fortgesetztes Wirken der ehemaligen Düngungsvarianten über die unterschiedlichen Bodengehalte ist vorauszusetzen. Bei einem Vergleich von Varianten mit ehemals gleichem Düngeniveau aber unterschiedlichem Düngetermin sollten 2020 keine signifikanten Unterschiede auftreten. Da trotz identischem Düngungstermin scheinbare signifikant Vorteile für Varianten mit ehemaliger Frühjahrsdüngung ermittelt wurden, ist von einer weiteren Verwertung der Ertragsvergleiche abzusehen (Tabelle 22, Tabelle 23, Tabelle 24).

Besonders aufschlussreich sind die zusätzlichen Ergebnisse der Ertragsauswertungen für die fachliche Beratung zur P-/K-Düngung nicht. Die gesicherten Ergebnisse sind aus der älteren Literatur bekannt. Fachlich interessante Vergleiche sind meist aufgrund von inhaltlichen Widersprüchen oder mangelnder Abgrenzbarkeit (Grenzdifferenz = ca.10%) nicht nutzbar. Die Auswertung verdeutlicht aber noch einmal die Notwendigkeit von Randomisation und Wiederholungen im Feldversuchswesen.

Unabhängig davon bleiben die im Zwischenbericht aufgelisteten Ergebnisse und die Auswertung der P-/K-Gehalte im Boden wertvoll und sollen weiter für die fachliche Beratung aufbereitet und genutzt werden.

Die Versuchsdurchführung in ihrer bisherigen Form wurde beendet. Da Fragen zur nachhaltigen K- und P-Düngung aktuell bleiben, soll die statische Versuchsanlage mit den entstandenen Teilflächen unterschiedlicher Bodengehalte weiter genutzt werden. Die Versuchsschläge werden geteilt, um künftig Fragen zur P- und K-Düngung in getrennten Versuchen zu bearbeiten. Auf den Flächen für künftige P-Versuche erfolgt eine K-Aufdüngung mit dem Ziel optimaler K-Bodengehalte (Gehaltsklasse C). Mit der Phosphordüngung bzw. dem Unterlassen der Phosphordüngung werden für unterschiedliche Teilflächen die P-Gehaltsklassen B+ bzw. A+ angestrebt. Für die Flächen für künftige K-Versuche wird die P-Düngung am Ziel der P-Gehaltsklasse C ausgerichtet. Eine differenzierte K-Düngung zielt hier auf das Erreichen der K-Gehaltsklassen B- und C-.

Während der Aufdüngungsphase soll beobachtet werden, welche Zeiträume und Düngemengen zur Erreichung optimaler Kaliumgehalte nach 22 Jahren negativer Kaliumbilanz nötig sind. In Bezug auf Phosphor bleibt zu beobachten, wie lange die P-Düngung bis zum Erreichen der für die Versuche angestrebten niedrigen P-Bodengehalte ausgesetzt werden muss.

In einem Tastversuch wird ab 2020 die Praktikabilität verkleinerter Parzellengrößen (Aussaat: 4,5 m x 9,0 m; Ernte: 1,5 m x 6,5 m) auf diesen Flächen geprüft.

Tabelle 9: Zusammenfassung ausgewählter signifikanter Ergebnisse nach 22 Versuchsjahren (signifikante Unterschiede ≤ 1% sind in Klammern dargestellt), Zählung vgl. Anhang Tabelle 10 bis Tabelle 21

	FF	WRa	WW	Ka	SM	WG
Die Nährstoffgehalte im Boden wirken sich auf den Ertrag/ die Ertragswirkung der Düngung aus.						
	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Eine negative Nährstoffbilanz führt langfristig zu abnehmenden Erträgen.						
	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Düngungseinfluss überwiegt nach ca. … Jahren die Bodenheterogenität (für wenigsten einige Varianten)						
	7	12	20	5	-	10
Kaliumdüngung wirkt positiv auf den Ertrag (Anzahl Vergleiche)						
ja	3	2	4(+1)	4	3	3
nein	2	3	0	1	2	2
Phosphordüngung wirkt positiv auf den Ertrag (Anzahl Vergleiche)						
ja	3	3	3(+1)	2	2	1(+1)
nein	1(+1)	2	0(+1)	3	2(+1)	3
K-Frühjahrsdüngung wirkt positiv auf den Ertrag (bei 50% der Abfuhr)						
	ja	ja	nein	nein	nein	nein
P-Frühjahrsdüngung wirkt positiv auf den Ertrag (bei 50% der Abfuhr)						
	nein	nein	nein	nein	nein	nein
P-/K-Frühjahrsdüngung wirkt positiv auf den Ertrag (bei 100% der Abfuhr)						
	nein	nein	nein	nein	nein	nein

6 Literaturverzeichnis

Bull, I. (2018): Grunddüngungstrategie zur Sicherung einer hohen Effizienz des Düngemitteleinsatzes und der Bodenfruchtbarkeit in MV. Zwischenbericht 1997-2017. 30.11.2018. Gülzow

Deumlich, D., 2008: Teilprojekt Standortuntersuchungen. In: ZALF (Hrsg.): Zwischenbericht. Ökologische Folgewirkungen des Maispflanzenanbaus, 5-13, Müncheberg.

Michel, V. (2002): Nutzung geostatistischer Methoden in der Auswertung eines statischen Fruchtfolge-Dauerversuches zur P- und K-Düngung. – Tagungsband Landwirtschaftliches Versuchswesen, S. 37-45.

Michel, V.; A. Zenk, Schmidtke, J. (2007): Gülzower PIAFStat-Verfahren. Standard der Versuchsauswertung in Deutschland. In: Mitteilungen der LFA, Heft 37, 61-71.

Michel, V.; Zenk, A. (2010): Optimierte Einzelversuchsauswertung mit weitgehender Ausschaltung von Bodenheterogenität. Forschungsbericht 6/09. Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV.

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (2017): Richtwerte für die Untersuchung und Beratung zur Umsetzung der Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 in Mecklenburg-Vorpommern.

Roßberg, D., V. Michel, R. Graf & R. Neukampf, 2007: Defintion von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes 59 (7), 155-161.

Scheffer, F.; Schachtschabel, P.; Blume, H.; Brümmer, G.; Horn, R.; Kandeler, E. et al. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Heidelberg: Springer Spektrum Akademischer Verlag.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) (Hg.) (2018): Langjährige Untersuchungen zur P-, K-, Mg-, und S-Auswaschungen aus landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland. Kooperation Lysimeter/Bodenwassermessstellen. Jena.

Zenk, A.; Michel, V. (2006): Verfahren zur Auswertung von Feldversuchen mit Methoden der Geoinformatik und Geostatistik. Abschlussbericht 6/03. Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV.

7 Anhang

Tabelle 10: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag in der Fruchtfolge nach 22 Versuchsjahren

	0-0	H100-0	H100-H50
0-H100	nein	-	-
H100-H50	-	nein	-
H100-F50	-	ja	-
H100-H100	-	ja	ja

Tabelle 11: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag in der Fruchtfolge nach 22 Versuchsjahren, (Vergleiche mit einem Unterschied <1% werden in Klammern dargestellt)

	0-0	0-H100	H50-H100
H100-0	(nein)	-	-
H50-H100	-	nein	-
F50-H100	-	ja	-
H100-H100	-	ja	ja

Tabelle 12: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag bei Wintergerste nach 22 Versuchsjahren

	0-0	H100-0	H100-H50
0-H100	nein	-	-
H100-H50	-	nein	-
H100-F50	-	ja	-
H100-H100	-	ja	ja

Tabelle 13: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag bei Wintergerste nach 22 Versuchsjahren, Vergleiche mit einem Unterschied <1% werden in Klammern dargestellt)

	0-0	0-H100	H50-H100
H100-0	nein	-	-
H50-H100	-	nein	-
F50-H100	-	nein	-
H100-H100	-	ja	(ja)

Tabelle 14: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag bei Winterraps nach 22 Versuchsjahren

	0-0	H100-0	H100-H50
0-H100	nein	-	-
H100-H50	-	nein	-
H100-F50	-	ja	-
H100-H100	-	ja	nein

Tabelle 15: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag bei Winterraps nach 22 Versuchsjahren

	0-0	0-H100	H50-H100
H100-0	nein	-	-
H50-H100	-	nein	-
F50-H100	-	ja	-
H100-H100	-	ja	ja

Tabelle 16: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag bei Winterweizen nach 22 Versuchsjahren, (Vergleiche mit einem Unterschied <1% werden in Klammern dargestellt)

	0-0	H100-0	H100-H50
0-H100	nein	-	-
H100-H50	-	nein	-
H100-F50	-	nein	-
H100-H100	-	(nein)	nein

Tabelle 17: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag bei Winterweizen nach 22 Versuchsjahren, (Vergleiche mit einem Unterschied <1% werden in Klammern dargestellt)

	0-0	0-H100	H50-H100
H100-0	nein	-	-
H50-H100	-	Nein	-
F50-H100	-	Nein	-
H100-H100	-	(ja)	(nein)

Tabelle 18: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag bei Kartoffeln nach 15 Versuchsjahren

	0-0	H100-0	H100-H50
0-H100	ja	-	-
H100-H50	-	ja	-
H100-F50	-	ja	-
H100-H100	-	ja	nein

Tabelle 19: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag bei Kartoffeln nach 15 Versuchsjahren

	0-0	0-H100	H50-H100
H100-0	nein	-	-
H50-H100	-	ja	-
F50-H100	-	nein	-
H100-H100	-	ja	nein

Tabelle 20: Positive K-Düngewirkung auf den Ertrag bei Silomais nach 22 Versuchsjahren

	0-0	H100-0	H100-H50
0-H100	nein	-	-
H100-H50	-	nein	-
H100-F50	-	Ja	-
H100-H100	-	ja	nein

Tabelle 21: Positive P-Düngewirkung auf den Ertrag bei Silomais nach 22 Versuchsjahren, Vergleiche mit einem Unterschied <1% werden in Klammern dargestellt)

	0-0	0-H100	H50-H100
H100-0	nein	-	-
H50-H100	-	nein	-
F50-H100	-	ja	-
H100-H100	-	ja	(nein)

Tabelle 22: Ertrag Winterweizen bei gleicher Düngung, Gülzow, 2020, Versuchsschlag E1

Varianten bis 2019	K-Gehalt im Boden Herbst 2019 [K mg/100g]	P-Gehalt im Boden Herbst 2019 [P mg/100g]	Korn-Ertrag 2020 [dt/ha]	signifikante Unterschiede nach t-Test α≤0,05
H100-H50	10	9,0	73,92	b,c
H100-F50	3	7,4	81,71	a
H50-H100	4	6,1	63,61	d
F50-H100	11	6,3	70,7	c
H100-H100	8	8,9	77,18	b
F100-F100	8	8,3	75,98	b
GD			4,25	

Tabelle 23: Ertrag Winterraps bei gleicher Düngung, Gülzow, 2020, Versuchsschlag E2

Varianten bis 2019	K-Gehalt im Boden Herbst 2019 [K mg/100g]	P-Gehalt im Boden Herbst 2019 [P mg/100g]	Korn-Ertrag 2020 [dt/ha]	signifikante Unterschiede nach t-Test α≤0,05
H100-H50	5	7,6	40,68	c
H100-F50	6	7,2	46,52	a, b
H50-H100	9	7,1	43,64	b
F50-H100	10	6,2	49,02	a
H100-H100	13	10,3	48,15	a, b
F100-F100	10	11,3	46,03	a, b
GD			4,68	

Tabelle 24: Ertrag Wintergerste bei gleicher Düngung, Gülzow, 2020, Versuchsschlag E3

Varianten bis 2019	K-Gehalt im Boden Herbst 2019 [K mg/100g]	P-Gehalt im Boden Herbst 2019 [P mg/100g]	Korn-Ertrag 2020 [dt/ha]	signifikante Unterschiede nach t-Test α≤0,05
H100-H50	8	8,4	85,89	b, c
H100-F50	7	7,2	82,93	c
H50-H100	10	7,0	89,36	a
F50-H100	11	6,1	94,85	b
H100-H100	8	7,8	84,50	c
F100-F100	8	6,7	82,83	c
GD			3,52	