

Berichte aus dem Ökolandbau 2021

Dauerversuch zur organischen und mineralischen Grunddüngung



Einfluss steigender organischer sowie mineralischer P- und K-Düngung auf Merkmale der Bodenfruchtbarkeit, Ertrag und Qualität der Fruchtarten in einem ökologischen Dauerversuch auf Lehm Boden

Katharina Farack, Peter Müller, Dr. Wilfried Schliephake & Dr. Hartmut Kolbe

1	Einleitung und Problemstellung	11
2	Material und Methoden	13
2.1	Standortbeschreibung	13
2.2	Versuchsbeschreibung	15
2.3	Methoden der Pflanzen- und Bodenanalyse	19
2.4	Mathematisch-statistische Methoden	20
3	Ergebnisse	21
3.1	Gesteigerter Einsatz von organischen Düngern	21
3.1.1	Erträge der Fruchtarten	21
3.1.2	Inhaltsstoffe und andere Merkmale der Fruchtarten	30
3.1.3	Nährstoffbilanzen	32
3.1.4	Entwicklung der Bodenparameter	34
3.2	Ergebnisse der P-Steigerung	45
3.2.1	Erträge der Fruchtarten	45
3.2.2	Inhaltsstoffe und weitere Merkmale der Fruchtarten	50
3.2.3	Entwicklung der verschiedenen Bodenparameter	54
3.3	Ergebnisse der K-Steigerung	62
3.3.1	Erträge der Fruchtarten	63
3.3.2	Gehalte an Inhaltsstoffen und anderen Merkmalen	68
3.3.3	Nährstoffbilanzen	70
3.3.4	Entwicklung der Bodenparameter	72
3.4	Zusammenhänge zwischen den Merkmalen	78
3.4.1	Einfluss von Nährstoffzufuhr und -Saldo auf die Veränderung der Nährstoffgehalte im Boden	78
3.4.2	Einfluss der Nährstoffversorgung auf die Ertragsreaktion der Fruchtarten	84
4	Diskussion und Schlussfolgerungen	91
4.1	Einschätzung der organischen Düngung	92
4.2	Einschätzung der mineralischen P-Düngung	95
4.3	Einschätzung der mineralischen K-Düngung	97
4.4	Hinweise zur Weiterentwicklung von Methoden zur Düngebedarfseermittlung	98
5	Zusammenfassung	101
5.1	Organische Düngung	101
5.2	Mineralische P-Düngung	102
5.3	Mineralische K-Düngung	102
5.4	Weiterentwicklung von Düngungssystemen	103
6	Literaturverzeichnis	104
7	Anhang	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Jahresniederschläge im Zeitabschnitt der Versuchsdurchführung am Standort Roda	14
Abbildung 2: Langjährige mittlere Niederschlagsverteilung im Jahresverlauf am Standort Roda	15
Abbildung 3: Anlageplan des Dauerversuchs Ro11 auf der Versuchsstation des LfULG in Roda	16
Abbildung 4: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens nach organischer Düngung im Jahr 2000	22
Abbildung 5: GE-Ertrag des Winterweizens in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung im Jahr 2000	22
Abbildung 6: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2001 nach organischer Düngung.....	22
Abbildung 7: GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2001 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung.....	22
Abbildung 8: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2002 nach organischer Düngung.....	23
Abbildung 9: GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2002 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung	23
Abbildung 10: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste nach organischer Düngung im Jahr 2003.....	23
Abbildung 11: GE-Ertrag der Wintergerste in 2003 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung	23
Abbildung 12: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases nach organischer Düngung im Jahr 2004	23
Abbildung 13: GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases im Jahr 2004 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung	23
Abbildung 14: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases in 2005 nach organischer Düngung	24
Abbildung 15: GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases im Jahr 2005 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung	24
Abbildung 16: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2006 nach organischer Düngung.....	24
Abbildung 17: GE-Ertrag der Kartoffeln in 2006 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung.....	24
Abbildung 18: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2007 nach organischer Düngung	24
Abbildung 19: GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2007 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung	24
Abbildung 20: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2008 nach organischer Düngung	25
Abbildung 21: GE-Ertrag der Ackerbohnen in 2008 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung	25
Abbildung 22: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste in 2009 nach organischer Düngung.....	25
Abbildung 23: GE-Ertrag der Wintergerste des Jahres 2009 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung	25
Abbildung 24: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases in 2010 nach organischer Düngung	25
Abbildung 25: GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases im Jahr 2010 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung	25
Abbildung 26: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases in 2011 nach organischer Düngung	26
Abbildung 27: GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases des Jahres 2011 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung.....	26
Abbildung 28: GE-Erträge in Abhängigkeit von der eingesetzten organischen Nährstoffmenge im Durchschnitt des Versuchszeitraumes.....	28
Abbildung 29: Durchschnittliche GE-Erträge der einzelnen Fruchtarten im Versuchszeitraum nach fortgesetzter organischer Düngung.....	29
Abbildung 30: Regressionsfunktion der mittleren Kornträge von W.-Weizen und W.-Gerste in Abhängigkeit von steigender N-Versorgung aus organischer Düngung	29
Abbildung 31: Mittlerer jährlicher GE-Ertrag im Versuchszeitraum in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischen Düngern und die damit im Durchschnitt der Jahre einhergehenden Nährstoffentzüge	32
Abbildung 32: Jährlich ermittelte DL-P-Gehalte im Durchschnitt von vier Wiederholungen im Versuchszeitraum der Varianten mit steigender organischer Düngung.....	35
Abbildung 33: Ergebnisse der jährlichen Bodenuntersuchung (inklusive Standardabweichung der Mittelwerte) auf die DL-P-Gehalte in den Varianten ohne Düngung und mit 160 kg N/ha als organische Dünger	35
Abbildung 34: Einfluss der organischen Düngung auf die DL-P-Gehalte des Bodens in den verschiedenen Versuchsabschnitten.....	36
Abbildung 35: Einfluss der organischen Düngung auf die CAL-P-Gehalte des Bodens in den verschiedenen Versuchsabschnitten.....	36
Abbildung 36: Jährlich ermittelte DL-K-Gehalte der Ackerkrume im Versuchszeitraum von 1999 – 2011.....	38

Abbildung 37: Entwicklung der DL-K-Gehalte in den Prüfgliedern mit organischer Düngung in einzelnen Versuchsabschnitten.....	38
Abbildung 38: Entwicklung der CAL-K-Gehalte in den Prüfgliedern mit organischer Düngung in den einzelnen Versuchsabschnitten.....	38
Abbildung 39: Mittlere DL- bzw. CAL-K-Gehalte über die vier Stufen mit organischer Düngung im Verlauf des Versuchszeitraums	39
Abbildung 40: Mittlere DL- bzw. CAL-K-Gehalte der Düngungsstufe 160 kg N/ha aus organischer Düngung im Verlauf des Versuchszeitraums	39
Abbildung 41: Entwicklung der C_{org} -Gehalte in den Prüfgliedern mit organischen Düngern über die Versuchsjahre	40
Abbildung 42: C_{org} -Gehalte in den jeweiligen Düngungsstufen zu Beginn und zum Ende der Versuchsreihe	40
Abbildung 43: Mittelwert der C_{org} -Gehalte aus den Jahren 2010 und 2011 in den jeweiligen Stufen der organischen Düngung.....	41
Abbildung 44: Entwicklung der N_r -Gehalte in den Prüfgliedern mit organischen Düngern über die Versuchsjahre.....	41
Abbildung 45: Einfluss der langjährigen organischen Düngung auf die Entwicklung der N_{min} -Werte (0 – 90 cm Tiefe) zu verschiedenen Versuchsabschnitten zu Vegetationsbeginn im Frühjahr	42
Abbildung 46: Einfluss der langjährigen organischen Düngung auf die Entwicklung der N_{min} -Werte (0 – 90 cm Tiefe) zu verschiedenen Versuchsabschnitten nach der Ernte im Herbst.....	42
Abbildung 47: Veränderungen im pH-Wert des Bodens im Versuchszeitraum in den Stufen der organischen Düngung	43
Abbildung 48: Einfluss der organischen Düngung auf die C_{org} -Gehalte sowie die löslichen P-Gehalte und K-Gehalte in der Ackerkrume und im Untergrund bis 60 cm Bodentiefe im Jahr 2011	44
Abbildung 49: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2000.....	45
Abbildung 50: GE-Ertrag des Winterweizens in 2000 in Abhängigkeit von der P-Steigerung.....	45
Abbildung 51: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2001	45
Abbildung 52: GE-Ertrag der Kartoffeln des Jahres 2001 in Abhängigkeit von der P-Steigerung	45
Abbildung 53: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen in 2002.....	46
Abbildung 54: GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2002 in Abhängigkeit von der P-Steigerung	46
Abbildung 55: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste des Jahres 2003.....	46
Abbildung 56: GE-Ertrag der Wintergerste in 2003 in Abhängigkeit von der P-Steigerung	46
Abbildung 57: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Kleeegrases im Jahr 2004	46
Abbildung 58: GE-Ertrag des Luzerne-Kleeegrases in 2004 in Abhängigkeit von der P-Steigerung.....	46
Abbildung 59: Mittlerer GE-Ertrag an Luzerne-Klee gras im Jahr 2005.....	46
Abbildung 60: GE-Ertrag an Luzerne-Klee gras in 2005 in Abhängigkeit von der P-Steigerung	46
Abbildung 61: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2006	47
Abbildung 62: GE-Ertrag der Kartoffeln in 2006 in Abhängigkeit von der P-Steigerung	47
Abbildung 63: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens in 2007.....	47
Abbildung 64: GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der P-Steigerung.....	47
Abbildung 65: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen des Jahres 2008.....	47
Abbildung 66: GE-Ertrag der Ackerbohnen in 2008 in Abhängigkeit von der P-Steigerung	47
Abbildung 67: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste des Jahres 2009.....	47
Abbildung 68: GE-Ertrag der Wintergerste im Jahr 2009 in Abhängigkeit von der P-Steigerung	47
Abbildung 69: Mittlerer GE-Ertrag an Luzerne-Klee gras des Jahres 2010	48
Abbildung 70: GE-Ertrag des Luzerne-Kleeegrases in 2010 in Abhängigkeit von der P-Steigerung.....	48
Abbildung 71: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Kleeegrases im Jahr 2011	48
Abbildung 72: GE-Ertrag des Luzerne-Kleeegrases in 2011 in Abhängigkeit von der P-Steigerung.....	48
Abbildung 73: Einfluss der gestaffelten P-Düngung auf die zusammengefassten GE-Erträge der angebauten Fruchtarten.....	49
Abbildung 74: Einfluss der mineralischen P-Düngung auf die GE-Erträge im Durchschnitt der Fruchtarten	49
Abbildung 75: Mittlerer GE-Ertrag und mittlerer jährlicher Nährstoffentzug in der P-Steigerungsreihe	52
Abbildung 76: Übersicht zu den mittleren jährlichen P-Entzügen in den Stufen ohne und mit 15 kg P/ha	53
Abbildung 77: Übersicht zu den mittleren jährlichen P-Entzügen in den Stufen ohne und mit 60 kg P/ha	53
Abbildung 78: Entwicklung der DL-P-Gehalte in Folge steigender Phosphatdüngung	54

Abbildung 79: Entwicklung der P-Bodengehalte nach Extraktion mit Doppellaktatlösung in der Phosphatsteigerungsreihe im Verlauf von 5 zeitlich zusammengefassten Phasen der zwölfjährigen Versuchsdurchführung	55
Abbildung 80: Beziehungen zwischen den mit unterschiedlichen P-Extraktionsmitteln vor Anlage und zum Ende der Versuchsdurchführung ermittelten P-Gehalte der Varianten mit steigender mineralischer P-Zufuhr	56
Abbildung 81: Beziehungen zwischen den an den jeweils gleichen Bodenproben gemessenen CAL-P- und den DL-P-Gehalten vor Anlage und zum Ende der Versuchsserie mit organischer Düngung	56
Abbildung 82: Einfluss des Extraktionsmittels auf die ermittelten P-Gehalte (Mittelwerte der Jahre 2009 – 2011)	57
Abbildung 83: Ermittelte P-Gehalte in der Ackerkrume in der Stufe mit 60 kg P/ha als Dolophos in Abhängigkeit vom Extraktionsmittel (DL- bzw. CAL-Extrakt) in den einzelnen Versuchsabschnitten	57
Abbildung 84: Ergebnisse zur Wasserlöslichkeit des P in drei Prüfgliedern	60
Abbildung 85: Einfluss der P-Düngung auf die löslichen P-Gehalte (Mittelwerte aus DL- u. CAL-P) in der Ackerkrume und im Untergrund bis 60 cm Tiefe im Jahr 2011	61
Abbildung 86: Veränderungen im pH-Wert des Bodens in den Prüfgliedern der P-Steigerung über den Versuchszeitraum	62
Abbildung 87: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2000 in der K-Steigerungsreihe	63
Abbildung 88: GE-Ertrag des Winterweizens in 2000 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	63
Abbildung 89: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln des Jahres 2001 in der K-Steigerungsreihe	63
Abbildung 90: GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2001 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	63
Abbildung 91: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen des Jahres 2002 in der K-Steigerungsreihe	64
Abbildung 92: GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2002 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	64
Abbildung 93: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste in 2003 in der K-Steigerungsreihe	64
Abbildung 94: GE-Ertrag der Wintergerste in 2003 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	64
Abbildung 95: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Kleegrases in 2004 in der K-Steigerungsreihe	64
Abbildung 96: GE-Ertrag an Luzerne-Kleegras in 2004 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	64
Abbildung 97: Mittlerer GE-Ertrag an Luzerne-Kleegras für 2005 in der K-Steigerungsreihe	64
Abbildung 98: GE-Ertrag an Luzerne-Kleegras in 2005 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	64
Abbildung 99: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln des Jahres 2006 in der K-Steigerungsreihe	65
Abbildung 100: GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	65
Abbildung 101: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens in 2007 in der K-Steigerungsreihe	65
Abbildung 102: GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	65
Abbildung 103: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen für 2008 in der K-Steigerungsreihe	65
Abbildung 104: GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2008 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	65
Abbildung 105: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste im Jahr 2009 in der K-Steigerungsreihe	65
Abbildung 106: GE-Ertrag der Wintergerste in 2009 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	65
Abbildung 107: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Kleegrases für 2010 in der K-Steigerungsreihe	66
Abbildung 108: GE-Ertrag an Luzerne-Kleegras in 2010 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	66
Abbildung 109: Mittlerer GE-Ertrag an Luzerne-Kleegras im Jahr 2011 in der K-Steigerungsreihe	66
Abbildung 110: GE-Ertrag an Luzerne-Kleegras in 2011 in Abhängigkeit von der K-Steigerung	66
Abbildung 111: Größenfraktionen der im Jahr 2001 angebauten Kartoffeln (Sorte Arcula) in den einzelnen Prüfgliedern	66
Abbildung 112: Größenfraktionen der im Jahr 2006 angebauten Kartoffeln (Sorte Agria) in den einzelnen Prüfgliedern	67
Abbildung 113: Wirkung des gesteigerten Kaliemeinsatzes auf den Trockenmasseertrag von Kartoffeln in den Jahren 2001 und 2006.	67
Abbildung 114: K-Gehalte in der TM der Kartoffeln in der K-Steigerungsreihe des Jahres 2001	67
Abbildung 115: Einfluss steigender mineralischer K-Zufuhr auf die mittleren GE-Erträge der angebauten Fruchtarten	68
Abbildung 116: Einfluss der K-Düngung auf die GE-Erträge im Durchschnitt der Fruchtarten	68
Abbildung 117: Mittlerer GE-Ertrag und mittlerer jährlicher Nährstoffentzug in der K-Steigerungsreihe	71
Abbildung 118: Einfluss des Extraktionsmittels auf die ermittelten K-Gehalte im Prüfglied ohne K-Düngung	72
Abbildung 119: Einfluss des Extraktionsmittels auf die ermittelten K-Gehalte in der höchsten K-Stufe	72
Abbildung 120: Übersicht zur Entwicklung der DL-K-Gehalte in Folge steigender mineralischer K-Düngung	73
Abbildung 121: Übersicht zur Entwicklung der CAL-K-Gehalte in der Kaliumsteigerungsreihe	74

Abbildung 122: Mittlere lösliche K-Gehalte des Bodens in den einzelnen Düngungsstufen zum Ende der Versuchsserie im Jahr 2011.....	74
Abbildung 123: Einfluss der mineralischen K-Düngung auf die löslichen K-Gehalte (Mittelwert aus DL- u. CAL-K) der Ackerkrume und des Untergrundes bis 60 cm Bodentiefe im Jahr 2011	76
Abbildung 124: Übersicht zur Entwicklung der pH-Werte der Versuchsvarianten mit steigender organischer Düngung, P-Düngung und K-Düngung in verschiedenen Zeitabschnitten des Versuches	77
Abbildung 125: Einfluss der P-Schlagsalden auf die jährliche Veränderung der DL- und CAL-löslichen P-Gehalte des Bodens in Folge steigender organischer und mineralischer P-Düngung.....	79
Abbildung 126: Einfluss der K-Schlagsalden auf die jährliche Veränderung der DL- und CAL-löslichen K-Gehalte des Bodens in Folge steigender organischer und mineralischer K-Düngung.....	81
Abbildung 127: Einfluss der N-Schlagsalden auf die jährliche Veränderung der C_{org} - und N_T -Gehalte des Bodens in Folge steigender organischer Düngung	83
Abbildung 128: Beziehungen zwischen den relativen Ertragswirkungen der mineralischen P-Düngung in Abhängigkeit von den löslichen CAL-P-Bodengehalten sowie Einordnung des Versuches Ro11 in Relation mit Ergebnissen von insgesamt 8 Standorten in Deutschland	85
Abbildung 129: Durchschnittliche Ertragswirkung einzelner Fruchtartengruppen durch zusätzliche mineralische P-Düngung in Abhängigkeit von den DL-P-Bodengehalten ermittelt durch einfache Regressionsanalysen.....	86
Abbildung 130: Durchschnittliche Ertragswirkung einzelner Fruchtartengruppen durch zusätzliche mineralische P-Düngung in Abhängigkeit von den CAL-P-Bodengehalten ermittelt durch einfache Regressionsanalysen.....	86
Abbildung 131: Beziehungen zwischen der relativen Ertragswirkung der mineralischen K-Düngung in Abhängigkeit von den löslichen CAL-K-Bodengehalten sowie Einordnung des Versuches Ro11 in Relation mit Ergebnissen von insgesamt 9 Standorten in Deutschland	87
Abbildung 132: Durchschnittliche Ertragswirkungen einzelner Fruchtartengruppen durch zusätzliche mineralische K-Düngung in Abhängigkeit von den DL-K-Bodengehalten ermittelt durch einfache Regressionsanalysen.....	88
Abbildung 133: Durchschnittliche Ertragswirkungen einzelner Fruchtartengruppen durch zusätzliche mineralische K-Düngung in Abhängigkeit von den CAL-K-Bodengehalten ermittelt durch einfache Regressionsanalysen	88
Abbildung 134: Beziehungen zwischen der relativen Ertragswirkung von zusätzlichen organischen Düngungsmaßnahmen und den Brutto-N-Salden aus konventionellen und ökologischen Dauerversuchen unter der separaten Ausweisung der Ergebnisse des Versuches Ro11.....	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Merkmale des Versuchsstandortes Roda	13
Tabelle 2: Prüfglieder zur organischen und mineralischen Düngung im Dauerversuch Ro11 (eingesetzte Nährstoffmengen in kg Reinnährstoff/ha u. Jahr)	16
Tabelle 3: Plan für den Einsatz der organischen Düngemittel zu den angebauten Fruchtarten der Fruchtfolge (Varianten 1 – 4, Düngebemessung nach Stickstoff in kg N/ha u. Jahr)	17
Tabelle 4: Nährstoffzusammensetzung der angewendeten organischen Düngemittel (in % Reinnährstoff)	17
Tabelle 5: Im Versuch ausgebrachte Düngerarten und Nährstoffmengen (kg Reinnährstoff/ha) in den organischen Düngungsvarianten 2 – 4	18
Tabelle 6: Stickstoffzufuhren über die ermittelte symbiotische N-Bindung der angebauten Leguminosen	19
Tabelle 7: Einflussfaktoren auf den Kornertrag des Winterweizens in den beiden Anbaujahren 2000 und 2007 sowie die erzielten Rohproteingehalte nach steigender organischer Düngung	21
Tabelle 8: N_{min} -Mengen zu Vegetationsbeginn in den jeweiligen Prüfgliedern mit steigender organischer Düngung	26
Tabelle 9: Korrelationskoeffizienten zwischen den N_{min} -Mengen zu Beginn der Vegetation und den erzielten GE-Erträgen der Fruchtarten	26
Tabelle 10: Entwicklung der GE-Ertragsdifferenzen (dt/ha), legume N-Bindung (kg N/ha) und der Leguminosen-Anteile im LKG-Gemenge (%) der Fruchtarten im Vergleich zwischen der ersten (Jahre 2000 – 2005) und der zweiten (2006 – 2011) Rotation	27
Tabelle 11: Durchschnittliche Gehalte an Inhaltsstoffen (% TM) und anderen Merkmalen der angebauten Getreidearten in Folge steigender organischer Düngung	30
Tabelle 12: Durchschnittliche Gehalte an Inhaltsstoffen (% TM) und anderen Merkmalen der angebauten Kartoffeln, Ackerbohnen und Luzerne-Klee gras in Folge steigender organischer Düngung	31
Tabelle 13: Einfache Schlagbilanz der Prüfglieder mit gesteigertem N-Einsatz durch organische Düngemittel	33
Tabelle 14: Erweiterte Schlagbilanz und Nährstoffeffizienz für Stickstoff der Prüfglieder mit gesteigertem N-Einsatz aus organischen Düngern	34
Tabelle 15: Korrelationskoeffizienten zwischen den GE-Erträgen und den nach der Ernte ermittelten DL-P- bzw. CAL-P-Gehalten in 0 – 20 cm Bodentiefe* der Varianten mit organischer Düngung	37
Tabelle 16: Korrelationskoeffizienten der GE-Erträge mit den nach der Ernte ermittelten DL-K- bzw. CAL-K-Gehalten in 0 – 20 cm Bodentiefe* der Varianten mit organischer Düngung	39
Tabelle 17: Regressionsanalytische Ermittlung der linearen jährlichen Veränderung der Gehalte an C_{org} und N_t sowie der Grundnährstoffe im Boden nach steigender organischer Düngung	41
Tabelle 18: Durchschnittliche Gehalte an Inhaltsstoffen und anderen Merkmalen der angebauten Getreidearten in Folge steigender mineralischer P-Düngung	50
Tabelle 19: Durchschnittliche Gehalte an Inhaltsstoffen und anderen Merkmalen von Kartoffeln, Ackerbohnen und Luzerne-Klee gras in Folge steigender mineralischer P-Düngung	51
Tabelle 20: Einfache Schlagbilanz der Prüfglieder mit gesteigertem P-Einsatz in Form von Dolophos	53
Tabelle 21: Veränderungen in den DL-P-Gehalten der jeweiligen Düngungsstufen im Verlauf der Versuchsdurchführung	55
Tabelle 22: Veränderung der Gehalte an Grundnährstoffen im Boden je Versuchsjahr nach steigender mineralischer P-Düngung	58
Tabelle 23: Korrelationskoeffizienten zwischen den GE-Erträgen und den in den jeweiligen Ertragsjahren nach der Ernte ermittelten P-DL- und P-CAL-Werten der Einzelparzellen	59
Tabelle 24: Laktatlösliches P (mg/100 g Boden) im Unterboden aus den Jahren 2003 und 2011	60
Tabelle 25: P_r -Gehalte vor Beginn und nach Abschluss der Versuche in Stufen der P-Steigerung	61
Tabelle 26: K-Gehalte in den Ernteprodukten der Varianten mit steigender mineralischer K-Düngung	68
Tabelle 27: Zusammengefasster Einfluss der mineralischen K-Düngung auf Inhaltsstoffe und andere Merkmale in Haupt- und Nebenprodukten der angebauten Getreidearten	69
Tabelle 28: Durchschnittliche Gehalte an Inhaltsstoffen (% TM) und anderen Merkmalen der angebauten Kartoffeln, Ackerbohnen und Luzerne-Klee gras in Folge steigender mineralischer K-Düngung	70
Tabelle 29: Einfache Schlagbilanz der Prüfglieder mit gesteigerter K-Düngung mit Patentkali	71

Tabelle 30: Korrelationskoeffizienten zwischen den GE-Erträgen und den in den jeweiligen Versuchsjahren nach der Ernte ermittelten DL-K- und CAL-K-Werten der Einzelparzellen der Varianten mit steigender mineralischer K-Düngung	75
Tabelle 31: Veränderung der Gehalte an Grundnährstoffen im Boden je Versuchsjahr nach steigender mineralischer K-Düngung	75
Tabelle 32: K_f -Gehalte vor Beginn und nach Abschluss der Versuche in den Stufen der mineralischen K-Steigerung.....	76
Tabelle 33: K-Salden aus den K_f -Ausgangs- und -Endgehalten sowie aus der Zufuhr durch Düngung und der Abfuhr mit den Erträgen der Fruchtarten im Bodenprofil bis 60 cm Tiefe in den vier K-Steigerungsstufen.....	77

Abkürzungsverzeichnis

AB	Ackerbohne
C _t , C _{org}	Gesamter Kohlenstoff
DE	Dungeinheit
GE	Getreideeinheit
K	Kalium
K _(CAL)	K-Bestimmung im Calcium-Acetat-Laktat-(CAL)-Auszug
K _(DL)	K-Bestimmung im Doppellaktat- (DL)-Auszug
Kart	Kartoffeln
K _t	Gesamtes Kalium
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LKG	Luzerne-Kleegrass
N	Stickstoff
n.s.	nicht signifikant
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff
N _{min}	NH ₄ -N + NO ₃ -N
NO ₃ -N	Nitratstickstoff
N _t	Gesamter Stickstoff
P	Phosphor
P _(CAL)	P-Bestimmung im Calcium-Acetat-Laktat-(CAL)-Auszug
P _(DL)	P-Bestimmung im Doppellaktat- (DL)-Auszug
P _t	Gesamter Phosphor
TM	Trockenmasse
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
WG	Wintergerste
WW	Winterweizen

1 Einleitung und Problemstellung

Laut EU-Verordnung über den Ökologischen Landbau (ANON., 2007, 2008, 2018) wird das nachhaltige Ertragsvermögen des Bodens durch kurz- und langfristige anbautechnische Maßnahmen gesichert, indem die organische Substanz und Fruchtbarkeit des Bodens erhalten und in geeigneten Fällen gesteigert wird, vorwiegend durch:

- Mehrjährige vielfältige Fruchtfolgen, die Leguminosen als Hauptfrucht, Untersaat oder Gründüngung einschließen
- Förderung der Bodenstabilität, des Bodenlebens und der biologischen Vielfalt
- Verhinderung von Bodenverdichtungen und Erosion
- Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen, hauptsächlich über das Ökosystem des Bodens
- Aus tierischer Produktion stammenden Wirtschaftsdüngern oder anderen organischen Substanzen, vorzugsweise Komposten
- Wiederverwertung von Abfallstoffen und Nebenerzeugnissen der pflanzlichen und tierischen Produktion
- Minimierung der Verwendung von nicht erneuerbaren Ressourcen und außerbetrieblichen Produktionsmitteln unter Beachtung natürlicher Kreisläufe und eines nachhaltigen Umwelt- und Klimaschutzes
- Einsatz von Düngemitteln und Bodenverbesserer nur im erforderlichen Maße mit zugelassenen Stoffen und Aufzeichnung der Verwendung
- Bevorzugung vorbeugender, regional und standortangepasster Maßnahmen.

Die Zielstellungen im Ökologischen Landbau sind daher in besonderer Weise darauf ausgerichtet, schonend mit den vorhandenen Ressourcen umzugehen, eine Produktion im Einklang mit der Natur in möglichst geschlossenen Nährstoffkreisläufen vorzunehmen sowie die Bodenfruchtbarkeit stetig zu fördern. Eine angemessene Grundnährstoffversorgung gehört hierbei zum Fundament für einen ertragreichen und nährstoffeffizienten Pflanzenbau. Auf Grund des teilweise niedrigeren Produktionsniveaus im Vergleich zur konventionellen Landbewirtschaftung treten in den ökologischen Anbauverfahren geringere Nährstoffabfuhr auf. Aber auch die Nährstoffsalden liegen auf niedrigerem Niveau, wodurch deutliche Vorteile ökologischer Anbauverfahren in Wasserschutzgebieten bestehen (KOLBE, 2000).

Umfangreiche Untersuchungen auf Ökobetrieben verschiedener Bundesländer kommen darüber hinaus jedoch zu dem Ergebnis, dass besonders bei den Grundnährstoffen z. T. deutlich negative Nährstoffsalden vorherrschen, die u. a. zu einer Abnahme der Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphat und Kalium im Boden geführt haben (DIEZ & WEIGELT, 1986; SCHULTE & SCHRÖDER, 1996; KOLBE, 2015; KOLBE & MEYER, 2021).

Zur Herausarbeitung erster Richtlinien zur Nährstoffversorgung und Düngung im ökologischen Landbau wurden daraufhin aus Ermangelung entsprechender ökologischer Versuche zunächst eine Reihe geeigneter konventioneller Dauerversuche zur Grunddüngung ausgewertet (SCHELLER, 1999; LINDENTHAL, 2000; SPIEGEL et al., 2001; KOLBE & KÖHLER, 2008). Aus den erhaltenen Ergebnissen konnten bereits geeignete Düngungsverfahren erstellt werden, weil wichtige fachliche Zusammenhänge für den Aufbau dieser Verfahren, z. B. zwischen den Nährstoffsalden und der Veränderung der pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalte im Boden, weitgehend unabhängig vom Anbausystem (konventionell oder ökologisch) und der Art der Düngung (organisch oder mineralisch) angesehen werden können (KOLBE et al., 1999; KOLBE & KÖHLER, 2008).

Im Gegensatz hierzu können die für ein angemessenes Ertragsniveau anzustrebenden Nährstoffgehalte im Boden durchaus vom Anbausystem abhängig sein. So ist im Allgemeinen das Ertragsniveau im Ökolandbau je nach Fruchtart z. T. deutlich geringer als im konventionellen Landbau (LEUFERT et al., 2012; KOLBE, 2009a). Das liegt vor allem daran, weil von dem am meisten ertragsbegrenzenden Nährstoff, dem Stickstoff, mit der

mineralischen Düngung im konventionellen Landbau ein wesentlich höheres Niveau verabreicht wird. Damit es zu keinen Nährstoffungleichgewichten kommen kann, sind daher auf Grundlage entsprechender experimenteller Arbeiten die Düngungssysteme auch für die anderen Grundnährstoffe auf ein entsprechend höheres Niveau ausgerichtet worden (GRAß, 1979; JANSSEN & DE WILLIGEN, 2006). Zur Anpassung der Düngungssysteme an die Bedingungen des Ökologischen Landbaus ist daher eine eigene Versuchstätigkeit auf den verschiedenen Standorten unbedingt erforderlich.

Ein wichtiges Segment, um die mit dem Ertrag abgefahrenen Nährstoffe zu ersetzen, ist im Ökologischen Landbau der Einsatz von organischen Düngemitteln. Die in ihnen enthaltenen Nährstoffe weisen längerfristig, nach Freisetzung durch Umsetzung der organischen Bestandteile der Substrate, die gleiche Düngewirkung wie Mineraldünger auf. Durch den Anbau von Zwischenfrüchten und tiefwurzelnden Fruchtarten kann zudem ein weiterer Nährstoffaufschluss aus dem durchwurzelbaren Bodenraum eingeleitet werden. Zusammen mit den Ernte- und Wurzelresten der vorausgehenden Früchte kann so ein höherer Anteil dieser Nährstoffe bezüglich des Bedarfs der anschließend angebauten Fruchtarten aus dem Umsatz und der Mineralisation der organischen Substanz abgedeckt werden (EICHLER, 1999a, 2004; OEHL et al., 2002; RANDHAWA et al., 2005). Allerdings sind organische Dünger gleichzeitig Mehrnährstoffdünger und Humuslieferanten und somit nur bedingt zur gezielten P- oder K-Düngung geeignet, um z. B. Ungleichgewichte zwischen den Nährstoffen im Boden zu vermeiden. Folglich ist für die Grunddüngung auch der Einsatz von zugelassenen Mineraldüngern im ökologischen Landbau angezeigt.

Darüber hinaus gelingt eine versuchstechnisch einwandfreie Prüfung der Wirkung der Höhe der Bodennährstoffversorgung auf die Ertragsreaktion der Fruchtarten nur, wenn eine singuläre Steigerung einzelner Nährstoffe vorgenommen wird und andere Einflussfaktoren, wie z. B. Begleitnährstoffe, gleichhoch gehalten werden (*Ceteris-paribus*-Klausel). Das gelingt in der Regel nur mit mineralischen Düngemitteln.

Beim Kalium ist mit den Kalirohsalzen wie Kaliumsulfat, Patentkali oder Magnesia-Kainit eine entsprechende Auswahl löslicher Dünger mit einer hohen Pflanzenverfügbarkeit vorhanden. Auch lässt sich die Wirkung der Düngung auf die Bodengehalte an Kalium gut quantifizieren, da neben dem Nährstoffsaldo lediglich der Einfluss der Bodenart zu berücksichtigen ist (BAUMGÄRTEL et al., 1999; KOLBE & KÖHLER, 2008).

Ungünstiger ist die Situation beim Phosphat einzuschätzen. Eine direkte Zufuhr ist im ökologischen Landbau nur in Form von Rohphosphaten zugelassen. Deren Löslichkeit ist jedoch stark von den jeweiligen Bodeneigenschaften abhängig. In der Regel bedarf es zunächst des Aufschlusses durch Bodensäuren, durch Mikroorganismen oder durch direkte Wurzelausscheidungen der angebauten Kulturarten. Die Pflanzenverfügbarkeit des Rohphosphates ist also von Prozessen im Boden abhängig, die nur langsam und mengenmäßig begrenzt ablaufen. Die P-Aufnahme der Pflanzen ist folglich von verschiedenen Boden- und Pflanzeigenschaften abhängig. Einfluss auf die P-Verfügbarkeit nehmen zudem verschiedene ackerbauliche sowie pflanzenbauliche Maßnahmen (u. a. Bodenbearbeitung, Fruchtfolge).

Zu den speziellen Einflussfaktoren auf die P-Dynamik und P-Verfügbarkeit zählen der Gesamt-P-Gehalt im durchwurzelbaren Bodenhorizont und das sich daraus ergebende P-Nachlieferungsvermögen (STUMPE et al., 1994). Der leicht pflanzenverfügbare P-Gehalt und das Verfügbarwerden stehen in enger Beziehung zu Bodeneigenschaften wie dem pH-Wert (AMBERGER, 1984), den Ton- und Humusgehalten (AMBERGER & AMANN, 1984), der aktuellen Bodenfeuchte (STEFFENS, 1987), dem Witterungsverlauf (KÖSTER & SCHACHTSCHABEL, 1983; STUMPE et al., 1994), der angebauten Pflanzenart (STEFFENS, 1987; DEUBEL et al., 2002) sowie dem Aufbau und dem Leistungsvermögen des jeweiligen Wurzelsystems (AMANN & AMBERGER, 1989).

Trotz dieser vielfältigen Abhängigkeiten kann der Einfluss der Zufuhr von P-haltigen Düngemitteln unabhängig von der Art des Düngemittels auf die löslichen P-Gehalte des Bodens langfristig recht einfach abgeschätzt werden, da die Veränderung der Bodengehalte lediglich von dem ermittelten Nährstoffentzug bzw. dem Nährstoffsaldo abhängig ist (KERSCHBERGER et al., 1997; KOLBE, 2007).

Neben der Prüfung der vorhandenen Düngemittelarten ist aber auch die Frage zu beantworten, mit welchem Düngungsniveau unter den jeweiligen Bedingungen gewirtschaftet werden muss, um das standorttypische

Ertragsniveau aufrechtzuerhalten und langfristig zu sichern. Wie weit können die Gehalte an Grundnährstoffen im Boden absinken, ohne das z. B. in Folge widriger Witterungsbedingungen Ertragsausfälle auftreten bzw. wie hoch muss die Nährstoffversorgung mindestens sein, damit Intensivierungsmaßnahmen mit anderen Einflussfaktoren noch zur Wirkung kommen können? Diese Fragen sind für die Anbaubedingungen des Ökolandbaus bisher nicht eindeutig geklärt.

Hierzu wurde in den Jahren 2000 – 2011 auf der Versuchsstation in Roda des LfULG auf einem nährstoffverarmten Lösslehm ein Dauerversuch zu Fragen der Grundnährstoffversorgung im Ökologischen Landbau durchgeführt. Geprüft werden sollte der Einfluss steigender organischer Düngung sowie mineralischer P- und K-Düngemittel in einer Fruchtfolge auf Merkmale der Bodenfruchtbarkeit und der angebauten Kulturarten.

Als Ziel der Veröffentlichung wird eine Gesamtauswertung der Ergebnisse des Dauerversuches in Roda vorgenommen. Im Mittelpunkt stehen hierbei sowohl die erzielten Erträge und Qualitäten der Haupt- und Nebenprodukte der Fruchtarten als auch die Veränderungen der verschiedenen Bodenparameter in der Ackerkrume und im Untergrund in Abhängigkeit von den jeweiligen Prüffaktoren. Darüber hinaus wird eine aktuelle Gewichtung der erhaltenen Ergebnisse zur Bewertung der P- und K-Versorgung des Bodens an einem überregionalen Verbund an Versuchen aus 8 Bundesländern vorgenommen. Zur allgemeinen Bewertung der Wirkung der organischen Düngung auf die Erträge der Fruchtarten kommt für ökologische Anbauverfahren erstmals ein System auf Basis der N-Bilanzierung zum Einsatz. Die Veröffentlichung richtet sich an Berater sowie Einrichtungen zur Forschung und Entwicklung mit Schwerpunkt Pflanzenernährung und Düngung.

2 Material und Methoden

2.1 Standortbeschreibung

Der Dauerfeldversuch wurde auf der Versuchsstation Roda des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) angelegt, auf der etwa 25 ha konventionelle und 13 ha Versuche zum Ökologischen Landbau durchgeführt worden sind. Den Standort prägende Faktoren sind in Tabelle 1 zusammengestellt worden.

Tabelle 1: Merkmale des Versuchsstandortes Roda

Merkmal	Ausprägung
Leitbodenform:	Löss-Braunstaugley
Bodentyp:	Lö 4b, Fahlerde-Pseudogley
Bodenart:	Lehm
Ackerzahl:	im Mittel 68
Humus:	im Mittel 2,1 %
Feinerde:	im Mittel 22,5 %
Trockenrohdichte	1,31 g/cm ³
Höhenlage:	224 m
Klima:	mäßig trockenes, mäßig warmes Klima des Hügellandes, schwach maritim beeinflusst
Mittlerer Jahresniederschlag (mm):	641 mm (Mittel der Jahre 1994 – 2014)
Mittlere Jahrestemperatur (°C):	9,8°C (Mittel der Jahre 1994 – 2014)

Der ökologisch bewirtschaftete Teil der Versuchsstation bestand aus 10 Feldern mit zwei Fruchtfolgen, die zum einen für einen Gemischtbetrieb mit ca. 1 GV/ha an organischer Düngung und zum anderen für einen viehlosen Marktfruchtbetrieb in der Region repräsentativ waren (MEYER et al., 2021).

Neben den Bodenbedingungen sind zur Interpretation der Ergebnisse die spezifischen Niederschlagsverhältnisse von Bedeutung (Abb. 1). Dabei fällt auf, dass in diesem Zeitabschnitt neben vier trockenen auch mehrere überdurchschnittlich feuchte Jahre mit eher niedrigen Jahresmitteltemperaturen auftraten. Die Verteilung der Niederschläge im Jahresverlauf (Abb. 2) lässt erkennen, dass in den warmen Monaten von Mai bis September auch die höchsten Niederschlagsmengen verzeichnet wurden, von denen vor allem der Ackerfutterbau und die Hackfrüchte profitiert haben sollten.

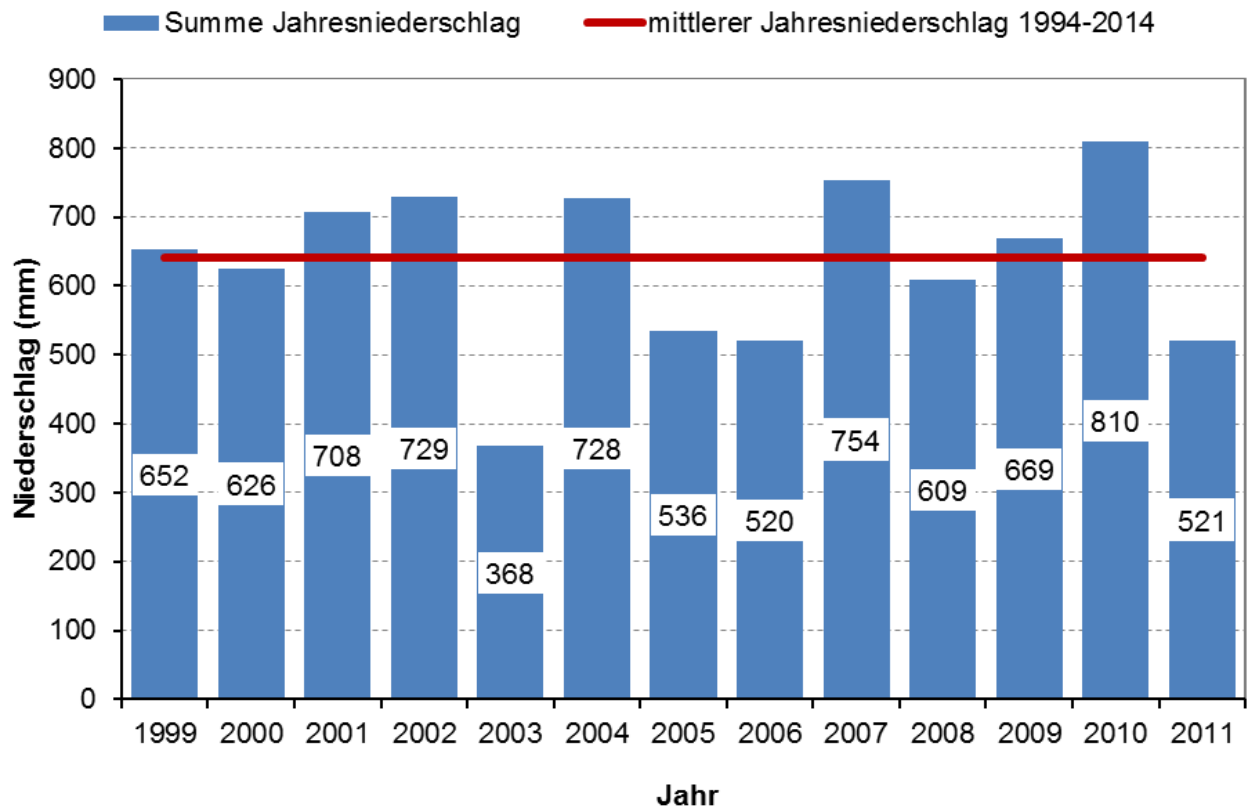


Abbildung 1: Jahresniederschläge im Zeitabschnitt der Versuchsdurchführung am Standort Roda

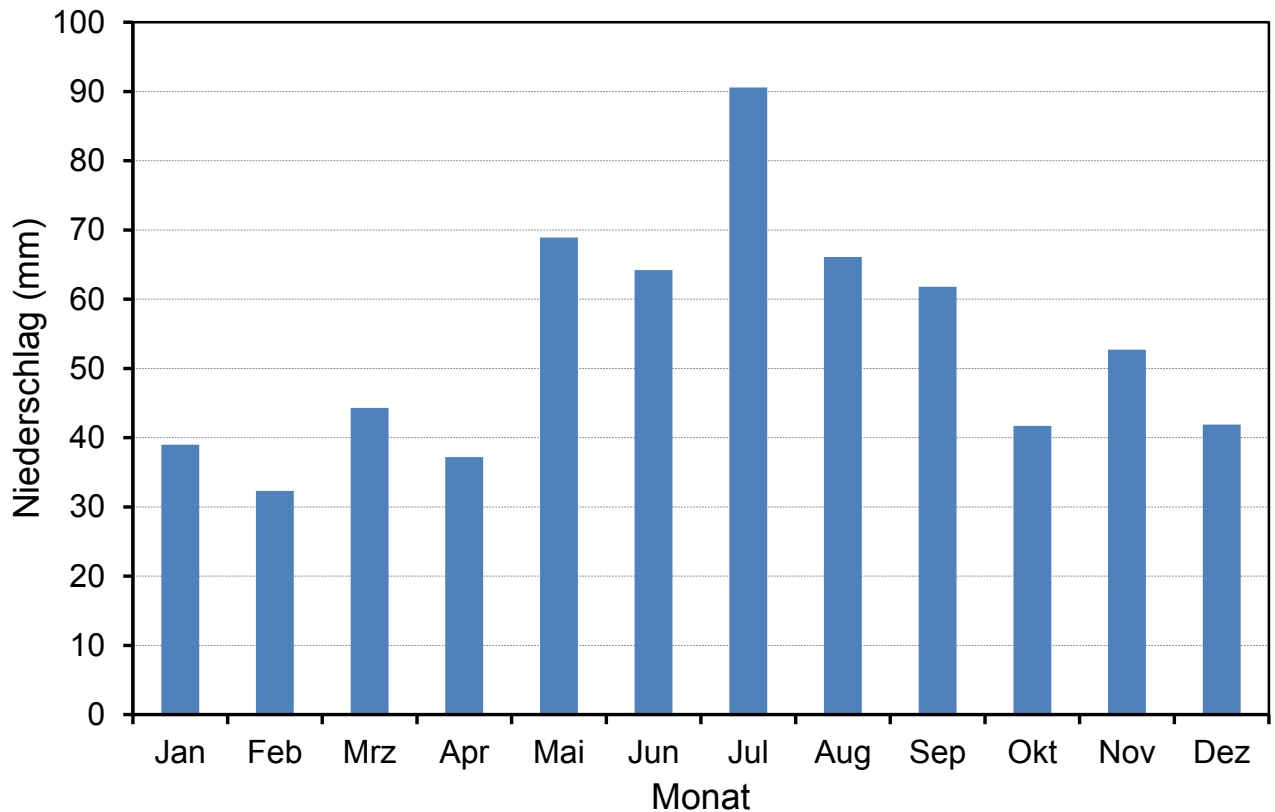


Abbildung 2: Langjährige mittlere Niederschlagsverteilung (1994 – 2014) im Jahresverlauf am Standort Roda

2.2 Versuchsbeschreibung

Der Dauerversuch Ro11 zur Prüfung einer steigenden organischen sowie einer mineralischen P- und K-Düngung wurde in Form einer Blockanlage mit jeweils vier Wiederholungen angelegt. Die Parzellengröße betrug $10\text{ m} \times 3\text{ m} = 30\text{ m}^2$. Die Ernteparzelle umfasste in der Regel $10\text{ m} \times 1,5\text{ m} = 15\text{ m}^2$. Die Prüfglieder und die jeweiligen Behandlungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt worden (Anlageplan in Abb. 3).

Entsprechend den Daten der vorliegenden Unterlagen ergibt sich für den Einsatz der organischen Dünger das in Tabelle 3 dargestellte Düngungsniveau in den einzelnen Prüfgliedern. Der Einfachheit halber werden im weiteren Verlauf die Prüfglieder entsprechend der in Tabelle 2 vorgegebenen Bezeichnung der Düngungsvarianten beibehalten.

K-3	O-3	O-2	P-3	O-1	P-1	P-4	K-4	PK-2	O-4	K-1	d
O-4	P-3	P-1	K-4	K-1	O-3	O-1	K-3	O-2	P-4	PK-2	c
K-1	PK-2	P-4	K-3	P-3	K-4	O-2	O-4	O-1	P-1	O-3	b
O-1	O-2	O-3	O-4	P-1	PK-2	P-3	P-4	K-1	K-3	K-4	a

Abbildung 3: Anlageplan des Dauerversuchs Ro11 auf der Versuchsstation in Roda (Prüfglieder siehe Tab. 2)

Tabelle 2: Prüfglieder und Düngungsvarianten zur organischen und mineralischen Düngung im Dauerversuch Ro11 (eingesetzte Nährstoffmengen in kg Reinnährstoff/ha u. Jahr)

Prüfglieder	Düngungsvarianten		N	P	K
				(kg/ha)	
O-1	ohne Düngung	-	0	0	0
O-2	40 kg N/ha	als organische Dünger	40	8	38
O-3	80 kg N/ha	als organische Dünger	80	16	76
O-4	160 kg N/ha	als organische Dünger	160	32	152
P-1	0 kg P/ha	+ 40 kg K/ha als mineralische Dünger	0	0	40
P-2	15 kg P/ha	+ 40 kg K/ha als mineralische Dünger	0	15	40
P-3	30 kg P/ha	+ 40 kg K/ha als mineralische Dünger	0	30	40
P-4	60 kg P/ha	+ 40 kg K/ha als mineralische Dünger	0	60	40
K-1	0 kg K/ha	+ 15 kg P/ha als mineralische Dünger	0	15	0
K-2	40 kg K/ha	+ 15 kg P/ha als mineralische Dünger	0	15	40
K-3	80 kg K/ha	+ 15 kg P/ha als mineralische Dünger	0	15	80
K-4	160 kg K/ha	+ 15 kg P/ha als mineralische Dünger	0	15	160

Tabelle 3: Plan für den Einsatz der organischen Düngemittel zu den angebauten Fruchtarten der Fruchtfolge (Varianten O-1 bis O-4, Düngebemessung nach Stickstoff in kg N/ha u. Jahr)

Jahr	Kulturart (Sorte)	Organische Düngung						
		O-1	O-2 (40 kg N/ha)		O-3 (80 kg N/ha)		O-4 (160 kg N/ha)	
		Ohne Düngung	Stalldung	Gülle	Stalldung	Gülle	Stalldung	Gülle
2000	Winterweizen (Alidos)	-	-	40	-	80	-	160
2001	Kartoffeln (Arcula)	-	100	-	200	-	400	-
2002	Ackerbohne (Gloria)	-	-	-	-	-	-	-
2003	Wintergerste (Theresa)	-	100	-	200	-	400	-
2004	Luzerne- Kleegras	-	-	-	-	-	-	-
2005	Luzerne- Kleegras	-	-	-	-	-	-	-
2006	Kartoffeln (Agria)	-	100	-	200	-	400	-
2007	Winterweizen (Naturastar)	-	-	40	-	80	-	160
2008	Ackerbohne (Fuego)	-	-	-	-	-	-	-
2009	Wintergerste (Fridericus)	-	100	-	200	-	400	-
2010	Luzerne- Kleegras	-	-	-	-	-	-	-
2011	Luzerne- Kleegras	-	-	-	-	-	-	-
Summe I (12 Jahre)		0	400	80	800	160	1600	320
Summe II (je Jahr)		0	40		80		160	

Als organische Düngemittel (Varianten O-2 bis O-4) wurden Stallmist und Gülle vom Rind mit folgender durchschnittlicher Zusammensetzung verwendet (Tab. 4):

Tabelle 4: Nährstoffzusammensetzung der angewendeten organischen Düngemittel (in % Reinnährstoff)

Düngerart	TM	N	P	K	Mg
	(% FM)		(% TM)		
Rinder-Gülle	6,32	6,36	0,95	3,46	0,82
Rinder-Stalldung	32,20	2,61	0,43	3,16	0,31

Abweichend vom Versuchsplan wurde in den Jahren 2006 und 2009 an Stelle des Stalldung eine Güllédüngung verabreicht. Die genauen ausgebrachten Nährstoffmengen aus organischen Düngemitteln wurden in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Im Versuch ausgebrachte Düngerarten und Nährstoffmengen (kg Reinnährstoff/ha) in den organischen Düngungsvarianten O-2 bis O-4

Jahr	Düngerart	Variante	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)	Mg (kg/ha)
2000	Gülle	O-2	22	4,6	11,4	3,0
		O-3	44	9,2	22,8	5,9
		O-4	88	18,6	45,7	11,9
2001	Stalldung	O-2	158	26,0	190,8	18,7
		O-3	315	51,9	381,6	37,4
		O-4	630	103,9	763,2	74,9
2002	-					
2003	Stalldung	O-2	158	26,0	190,8	18,7
		O-3	315	51,9	381,6	37,4
		O-4	630	103,9	763,2	74,9
2004	-					
2005	-					
2006	Gülle	O-2	48	7,6	28,4	5,9
		O-3	96	15,2	56,8	11,8
		O-4	192	30,5	113,6	23,6
2007	Gülle	O-2	47	6,5	24,9	5,9
		O-3	94	12,9	49,8	11,9
		O-4	188	25,8	99,6	23,7
2008	-					
2009	Gülle	O-2	48	7,0	26,6	5,9
		O-3	95	14,1	53,3	11,8
		O-4	190	28,2	106,6	23,7
2010	-					
2011	-					
Summe I (12 Jahre)		O-2	480	78	473	58
		O-3	959	155	946	116
		O-4	1918	311	1892	233
Summe II (je Jahr)		O-2	40,0	6,5	39,4	4,8
		O-3	79,9	12,9	78,8	9,7
		O-4	159,8	25,9	157,7	19,4

Als Düngungsformen wurden in den P-Steigerungsvarianten weicherdiges Rohphosphat (Dolophos) mit folgender Nährstoffzusammensetzung eingesetzt: 6,5 % P; 4,3 % Mg; 46,0 % CaO. Für die Kali-Düngungsvarianten wurde granuliertes Kaliumsulfat (Patentkali) folgender Zusammensetzung verwendet: 24,9 % K; 6,0 % Mg. Die mineralische P- und K-Düngung erfolgte jeweils unmittelbar vor der Aussaat der Kulturarten, bei Winterkulturen im Spätsommer und bei Frühjahrskulturen zum Vegetationsbeginn. Zu dem zweijährigen Luzerne-Kleegras erfolgte eine PK-Düngung in doppelter Höhe vor der Saatbettbereitung im Ansaatjahr.

Der Versuch wurde auf Fläche 2 der viereichen Fruchtfolge des Ökofeldes nach zweijährigem Luzerne-Klee gras angelegt. Der Boden ist durch eine besonders niedrige P- und K-Versorgung gekennzeichnet (siehe MEYER et al., 2021). Die für die Versuchsanlage ausgewählte Fläche befand sich vor der Anlage beim Phosphat mit 2,2 mg P/100 g Boden und beim Kalium mit 5,7 mg K/100 g Boden im oberen Bereich der Gehaltsklasse A. Der Gehalt an Magnesium war mit 9,6 mg Mg/100 g Boden im Bereich des Übergangs von Gehaltsklasse B zu Klasse C einzuordnen. In den folgenden 12 Versuchsjahren blieb der Mg-Gehalt unverändert, so dass keine Beeinflussung der Ergebnisse durch eine unzureichende Magnesiumversorgung erfolgte.

Die im Verlauf der 12jährigen Versuchsdurchführung angebauten Fruchtarten und deren Abfolge (2 Rotationen von je 6 Jahren) sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Im Verlauf der Versuchsdurchführung wurden 50 % Leguminosen bzw. Leguminosengemenge, 33 % Getreide und 17 % Hackfrüchte angebaut. Neben der in der Tabelle 3 aufgeführten N-Zufuhr durch die organischen Dünger wurde in Tabelle 4 die berechnete symbiotische N-Bindung zusammengefasst. Hierbei wurden neben den ermittelten Erträgen beim Luzerne-Klee gras die jeweils bonitierten Leguminosen- zu Grasverhältnisse (siehe Anhang, Abb. A1 – A3) und bei den Ackerbohnen die $N_{\min}$ -Werte im Frühjahr einbezogen.

Tabelle 6: Stickstoffzufuhren über die ermittelte symbiotische N-Bindung der angebauten Leguminosen

Prüfglied	Düngungsvariante	Symbiotische N-Bindung (kg N/ha)						
		2002	2004	2005	2008	2010	2011	Summe
O-1	ohne Düngung	110,7	195,8	246,9	21,2	106,1	307,4	988,0
O-2	40 kg N/ha organ. Dünger	135,6	231,6	238,4	37,3	124,9	314,5	1082,2
O-3	80 kg N/ha organ. Dünger	141,4	246,2	244,1	54,5	136,5	297,3	1119,9
O-4	160 kg N/ha organ. Dünger	123,3	224,6	240,5	49,6	137,5	308,3	1083,5
P-1	0 kg P/ha	123,8	240,8	259,0	40,6	119,7	313,5	1097,5
P-2, K-2	15 kg P/ha	117,8	222,5	248,2	35,9	118,8	313,8	1057,2
P-3	30 kg P/ha	120,3	227,6	234,2	43,2	130,6	327,5	1083,6
P-4	60 kg P/ha	129,1	246,9	255,7	39,8	113,6	360,6	1145,8
K-1	0 kg K/ha	109,8	214,5	250,8	22,2	116,8	355,4	1069,5
K-3	80 kg K/ha	132,2	228,9	260,2	36,4	131,9	351,3	1140,9
K-4	160 kg K/ha	127,9	186,3	253,3	35,7	112,6	339,4	1055,0
	Mittelwert	124,7	224,1	248,3	37,8	122,6	326,3	1083,9

2.3 Methoden der Pflanzen- und Bodenanalyse

Die Laboruntersuchungen des Pflanzen- und Bodenmaterials sind in der Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) durchgeführt worden. Folgende Merkmale wurden untersucht:

Methoden der Bodenuntersuchung

- $N_{\min}$ 0 – 90 cm Bodentiefe (WEHRMANN & SCHARPF, 1979)
- pH-Wert 0 – 20 cm Tiefe in 0,01 molarer Calciumchlorid-Lösung ($CaCl_2$) (KERSCHBERGER et al., 2000)
- DL-lösliches Phosphat (DL-P) und Kalium (DL-K) 0 – 20 cm Tiefe (EGNER & RIEHM, 1955)
- CAL-lösliches Phosphat und Kalium (CAL-P, CAL-K) 0 – 20 cm Tiefe (SCHÜLLER, 1969)

- Wasserlösliches Phosphat 0 – 20 cm Tiefe (VDLUFA-Methodenbuch, Bd. 1, A 6.2.3.2)
- CaCl_2 -verfügbares Magnesium 0 – 20 cm Tiefe (Mg) (SCHACHTSCHABEL, 1956)
- C_{org} mit Elementaranalyse 0 – 20 cm Tiefe (DIN ISO, 10694)
- N_t 0 – 20 cm Tiefe (VDLUFA-Methodenbuch, Bd. 1, A 2.2.1)
- Bodentiefe 0 – 60 cm: Gesamtnährstoffe (P_t , K_t , Mg_t) (Aufschluss mit Königswasser, VDLUFA-Methodenbuch, Bd. 1, A 2.4.3.1, gemessen mit ICP-OES nach EN ISO 11885:1997 E22), Phosphat (DL, CAL), Kalium (DL, CAL).
- Klassifikation der löslichen Bodennährstoffe nach VDLUFA-Bewertungsschlüssel für P (KERSCHBERGER et al., 1997) und K (BAUMGÄRTEL et al., 1999) verändert nach ALBERT et al. (2007) bzw. KOLBE & KÖHLER (2008).
- Zur Umrechnung von Gehalten in Mengen an Bodennährstoffen wurde ein spezifisches Gewicht des Bodens von $1,31 \text{ g/cm}^3$ und eine Ackerkrume von 0,30 m angenommen: 1 mg/100 g bzw. $0,001 \%$ Nährstoff = $39,3 \text{ kg/ha}$ Nährstoff.

Methoden der Pflanzenuntersuchung

- Gehalt an Trockenmasse (TM): 105°C Trockenschrank
- Gehalte an Nährstoffen (N, P, K, Mg): DIN 51418 (1996 – 2009), ISO 11885 (2005 – 2011)
- Rohprotein (W.-Weizen): $\text{N} \times 5,7$ (W.-Weizen-Korn, andere $\text{N} \times 6,25$)
- Stärke (Kartoffeln), Unterwassergewicht
- Ährentragende Halme (je m^2)
- Bestandeshöhe (in cm)
- Tausendkornmasse (TKM)
- Berechnung der Getreideeinheiten (GE) nach BECKER (1988)
- Fruchtartenschlüssel: WW: Winterweizen; WG: Wintergerste; AB: Ackerbohne; Kart: Kartoffeln; LKG: Luzerne-Kleegras
- Methoden der Bilanzierung und Bewertung an löslichen Bodennährstoffen
- Legume N-Bindung: spezielle Methoden zur Eignung im Ökolandbau (KOLBE, 2009b)
- experimentelle Ermittlung der (aggregierten) Schlag-Bilanzen für die Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg), incl. Deposition an Nährstoffen (N) über die Atmosphäre, incl. nichtlegume N-Bindung, 100 % Anrechnung organischer Dünger (PARCOM, 1993; KOLBE & KÖHLER, 2008)
- Nährstoffe- bzw. Ressourcen-Effizienz (%): $\text{Gesamt-Abfuhr (incl. Bodenänderung)} \times 100 / \text{Gesamt-Zufuhr eines Nährstoffs}$ (BECKMANN et al., 2001)

2.4 Mathematisch-statistische Methoden

Die statistische Auswertung der Versuchsdaten erfolgte mit dem Statistik-Software-Paket SPSS. Es wurden Varianzanalysen, Regressionsanalysen, Korrelationen nach PEARSON, Rangkorrelationen nach SPEARMAN, die Standardabweichung und das Bestimmtheitsmaß gerechnet. Für die Prüfung der Mittelwerte wurde der TUKEY-Test verwendet. Unterschiedliche Buchstaben (a, b, ...) stehen für die Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 5 \%$. Signifikanzniveaus: $p = 5 \%$ *, 1% ***, $0,1 \%$ ****. Auf Grund häufigen Auftretens von geringen signifikanten Effekten kamen verschiedene statistische Auswertungsformen zum Einsatz.

3 Ergebnisse

Die Vorstellung der Ergebnisse erfolgt getrennt nach den drei Versuchsschwerpunkten „organische Düngung“, „mineralische P-Düngung“ und „mineralische K-Düngung“. Neben dem Einfluss der einzelnen Behandlungen auf den Ertrag stehen die durch die Prüffaktoren hervorgerufenen Veränderungen der Gehalte an den Nährstoffen im Boden im Vordergrund der Betrachtung.

3.1 Gesteigerter Einsatz von organischen Düngern

3.1.1 Erträge der Fruchtarten

Die Abbildungen 4 bis 27 geben einen Überblick zu den in den einzelnen Jahren erzielten Erträgen. Zur besseren Vergleichbarkeit und zur Berücksichtigung der ebenfalls abgefahrenen Nebenprodukte (Getreidestroh) erfolgte eine Umrechnung in Getreideeinheiten (GE). Dargestellt sind die mittleren GE-Erträge sowie die quadratischen Regressionsfunktionen aus den Einzelwerten (jeweils vier Wiederholungen).

Obwohl teilweise die Mittelwerte durch beachtliche Streuungen gekennzeichnet waren, führte die eingesetzte organische Düngung bei den meisten Fruchtarten zu einem Ertragsanstieg (sign. Bestimmtheitsmaße). Auf die differenzierte organische Düngung reagierte am deutlichsten die Kartoffel. Während im Jahr 2001 der höchste Ertrag in der Stufe mit 80 kg N/ha erreicht wurde, stieg der GE-Ertrag im Jahr 2006 bis zur höchsten N-Stufe an (Abb. 6 u. Abb. 7, bzw. Abb. 16 u. Abb. 17, siehe auch Abb. 111, Abb. 112).

Der direkte Einsatz der Gülle zum Winterweizen während des Schossens mittels Schleppschlauch im Jahr 2000 erbrachte keine Differenzen im Ertrag und im Rohproteingehalt des Weizens (Tab. 7, Abb. 4 u. Abb. 5). Anders war das im zweiten Weizenjahr 2007 (Abb. 18 u. Abb. 19). Hier gab es einen leichten Ertragsanstieg bis zur höchsten N-Stufe (allerdings nicht statistisch gesichert) und sehr hohe Gehalte an Rohprotein im Korn. Einen wesentlichen Einfluss auf diese unterschiedlichen Ergebnisse dürften die sehr großen Differenzen im $N_{\min}$ -Gehalt in 0 – 90 cm zu Beginn der Vegetation in den beiden Jahren gehabt haben. Dass die Ertragsdifferenzierung nicht deutlicher ausgefallen war, ist vermutlich durch eine zu Beginn der Vegetation zu starke Förderung der Bestandesdichte verursacht worden, die letztendlich mit einer schlechten Kornausbildung und mit einer niedrigeren Tausendkornmasse einherging.

Tabelle 7: Einflussfaktoren auf den Kornertrag des Winterweizens in den beiden Anbaujahren 2000 und 2007 sowie die erzielten Rohproteingehalte nach steigender organischer Düngung

Düngungsvariante	Versuchsjahr 2000				Versuchsjahr 2007			
	$N_{\min}$ Beginn Vegetation (kg/ha)	Korn-TM-Ertrag (dt/ha)	Rohproteingehalt (%)	TKM (g)	$N_{\min}$ Beginn Vegetation (kg/ha)	Korn-TM-Ertrag (dt/ha)	Rohproteingehalt (%)	TKM (g)
ohne Düngung	55	40,5	10,6	43,5	121	37,5	13,0	34,1
40 kg N/ha	54	40,6	10,7	44,1	152	43,0	14,4	38,2
80 kg N/ha	49	40,8	11,0	42,1	139	44,6	14,8	37,3
160 kg N/ha	42	39,7	11,0	42,6	158	46,5	15,4	39,3

Bei der Wintergerste zeigten sich deutliche Reaktionen auf die Düngung. Im Jahr 2009 stieg der GE-Ertrag bis zur höchsten Stufe signifikant an. Auf Grund der aufgetretenen Streuungen lassen sich die erzielten Ertragsunterschiede im Jahr 2003 nicht statistisch sichern (Abb. 10 u. Abb. 11, bzw. Abb. 22 u. Abb. 23).

Die GE-Leistung der Ackerbohne liegt im Vergleich zu den anderen angebauten Früchten deutlich niedriger (Abb. 8 u. Abb. 9, bzw. Abb. 20 u. Abb. 21). Da in dem jeweiligen Anbaujahr keine direkte organische Düngung erfolgte, sind nur leichte Differenzierungen im Ertrag eingetreten.

Die höchste GE-Leistung, die sich meistens jedoch zwischen den Varianten nicht statisch sichern ließ, erbrachte das Leguminosen-Gras-Gemisch in den vier geprüften Versuchsjahren (Abb. 12, Abb. 13, Abb. 24 – Abb. 27). Da hierzu ebenfalls kein Einsatz an organischen Düngern erfolgte, wird das Leguminosengras von den Nachwirkungen aus den in den Jahren zuvor eingesetzten und nicht von den Vorfrüchten ausgenutzten Nährstoffen profitiert haben.

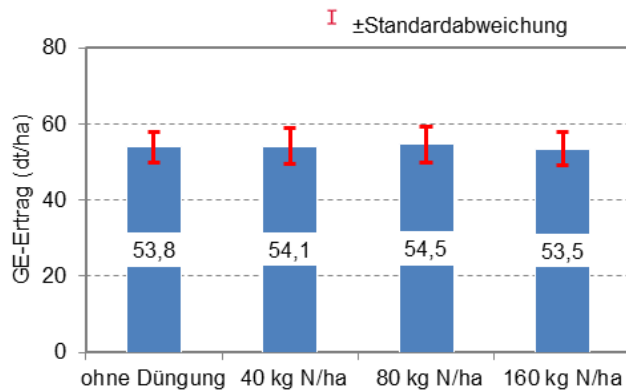


Abbildung 4: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens nach organischer Düngung im Jahr 2000

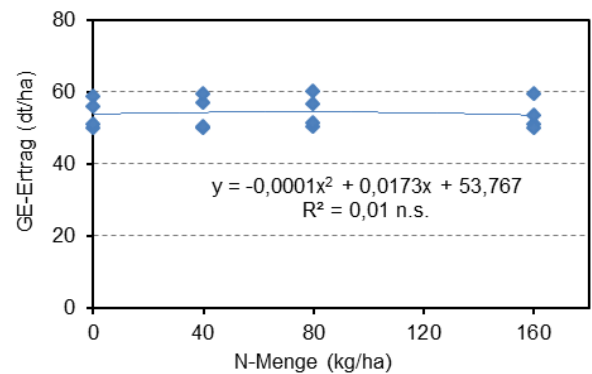


Abbildung 5: GE-Ertrag des Winterweizens in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung im Jahr 2000

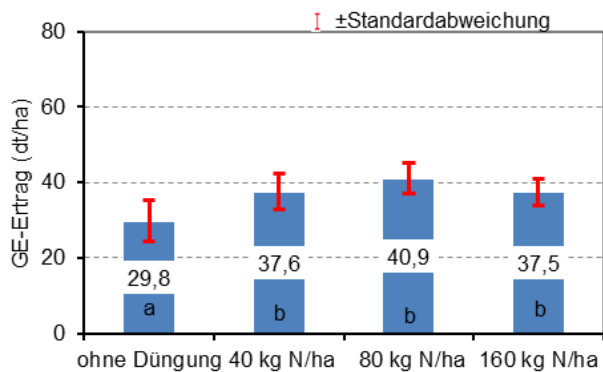


Abbildung 6: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2001 nach organischer Düngung

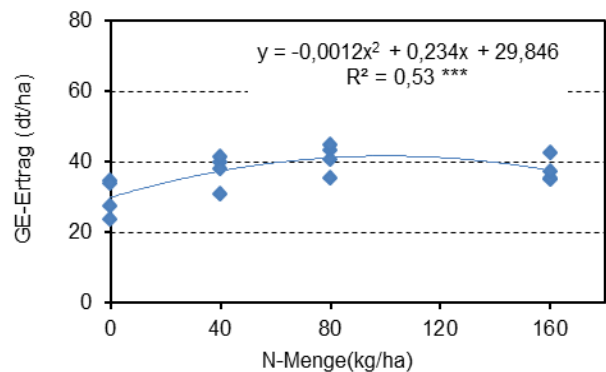


Abbildung 7: GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2001 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

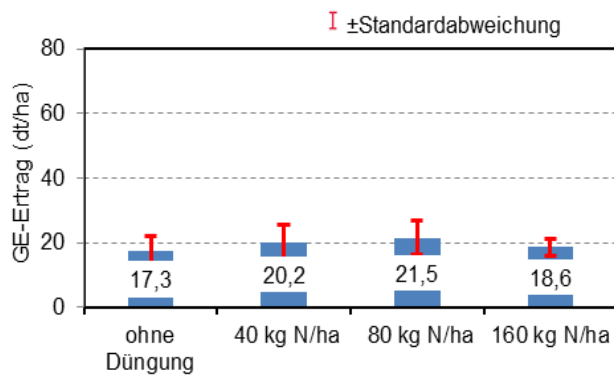


Abbildung 8: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2002 nach organischer Düngung

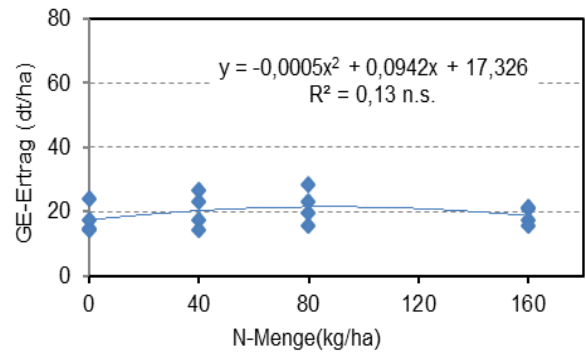


Abbildung 9: GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2002 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

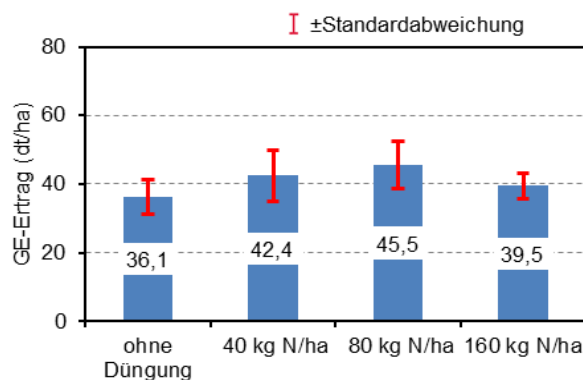


Abbildung 10: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste nach organischer Düngung im Jahr 2003

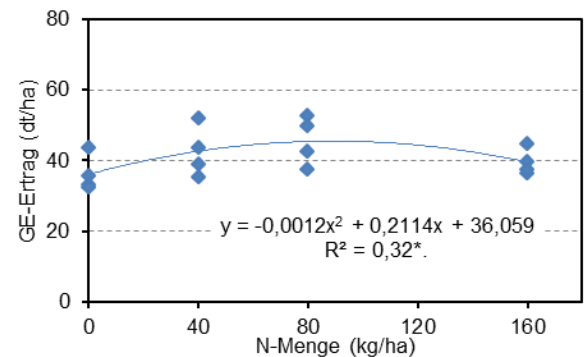


Abbildung 11: GE-Ertrag der Wintergerste in 2003 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

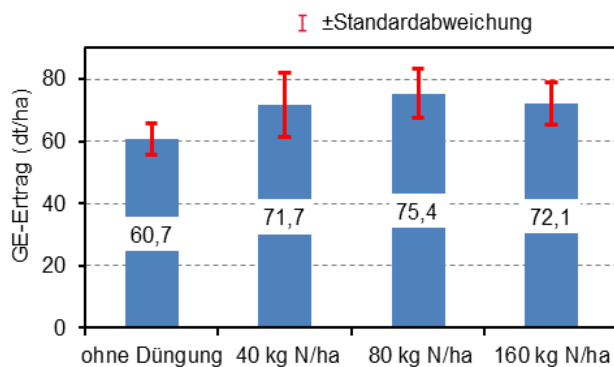


Abbildung 12: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Kleeegrases nach organischer Düngung im Jahr 2004

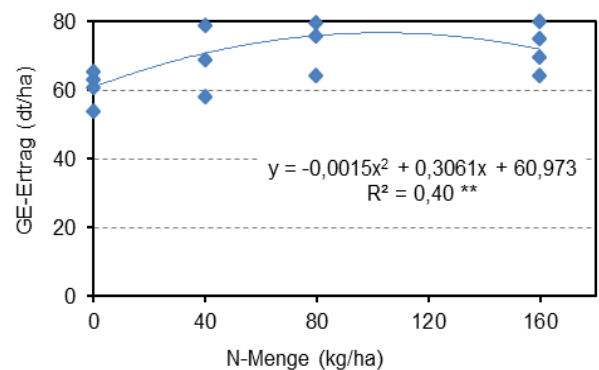


Abbildung 13: GE-Ertrag des Luzerne-Kleeegrases im Jahr 2004 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

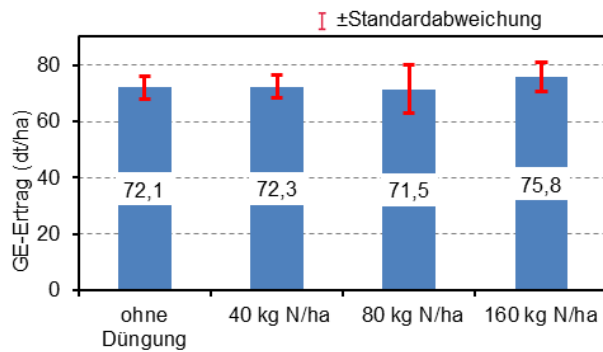


Abbildung 14: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee grasses in 2005 nach organischer Düngung

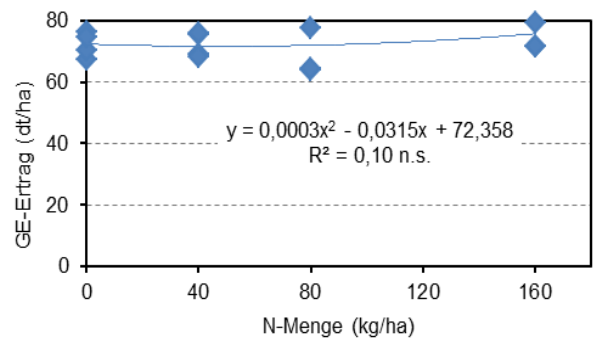


Abbildung 15: GE-Ertrag des Luzerne-Klee grasses im Jahr 2005 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

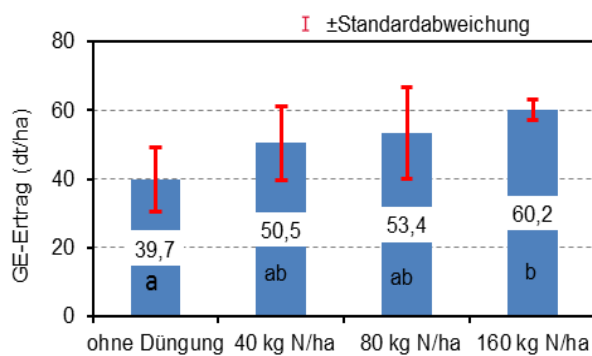


Abbildung 16: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2006 nach organischer Düngung

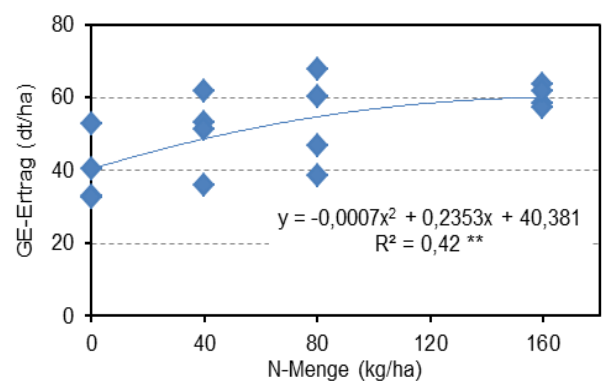


Abbildung 17: GE-Ertrag der Kartoffeln in 2006 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

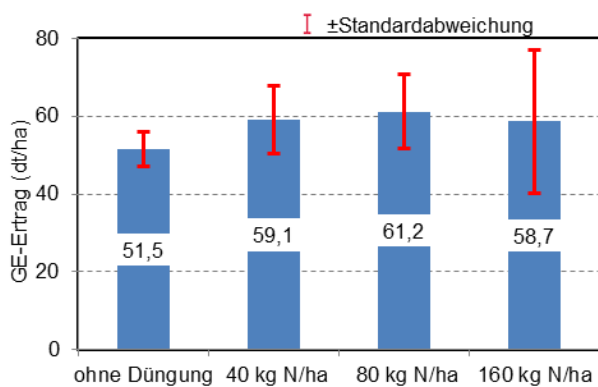


Abbildung 18: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2007 nach organischer Düngung

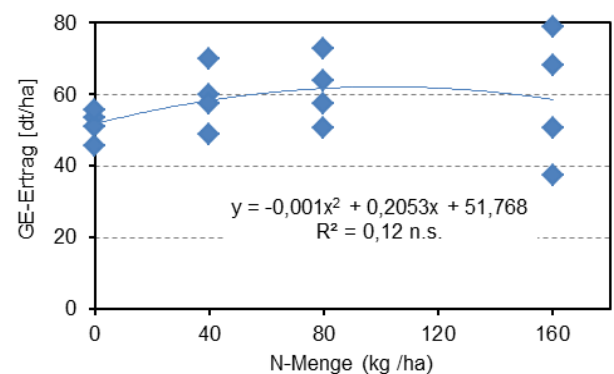


Abbildung 19: GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2007 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

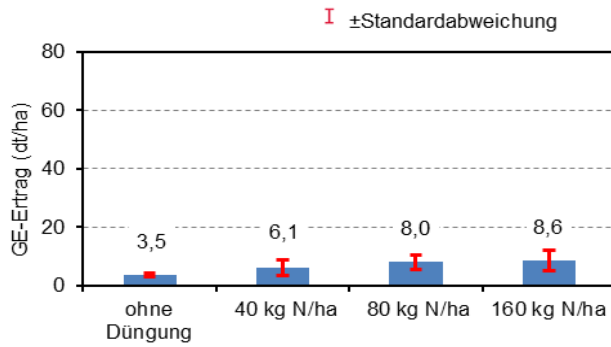


Abbildung 20: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2008 nach organischer Düngung

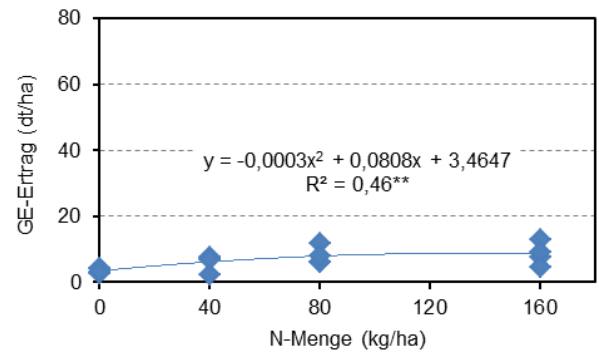


Abbildung 21: GE-Ertrag der Ackerbohnen in 2008 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

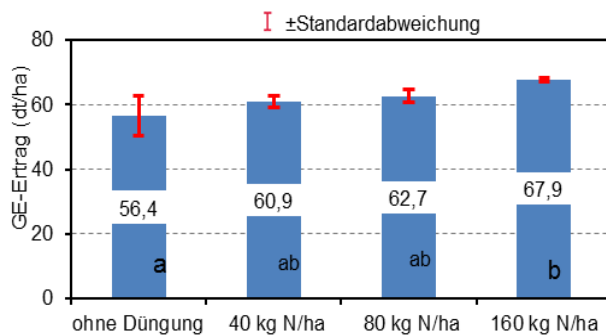


Abbildung 22: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste in 2009 nach organischer Düngung

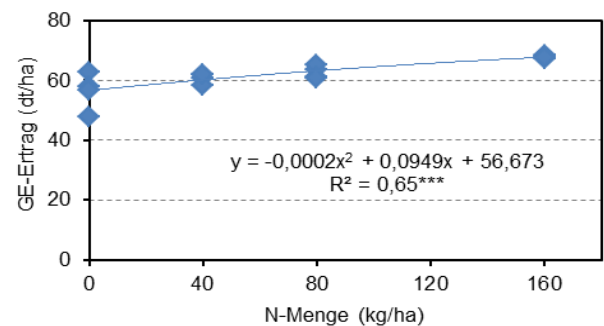


Abbildung 23: GE-Ertrag der Wintergerste des Jahres 2009 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

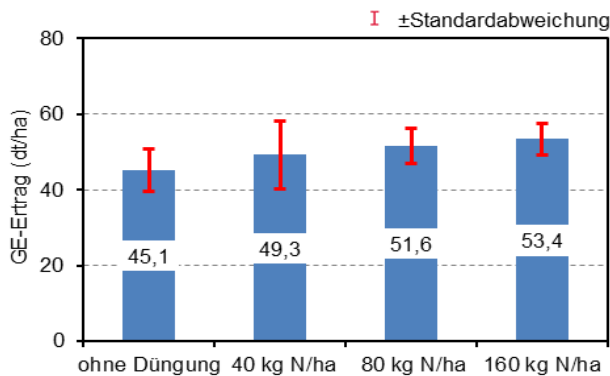


Abbildung 24: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases in 2010 nach organischer Düngung

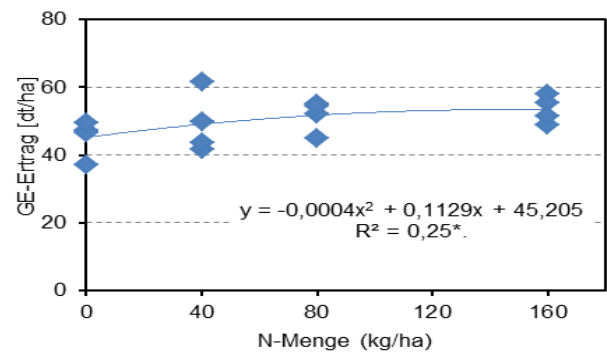


Abbildung 25: GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases im Jahr 2010 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

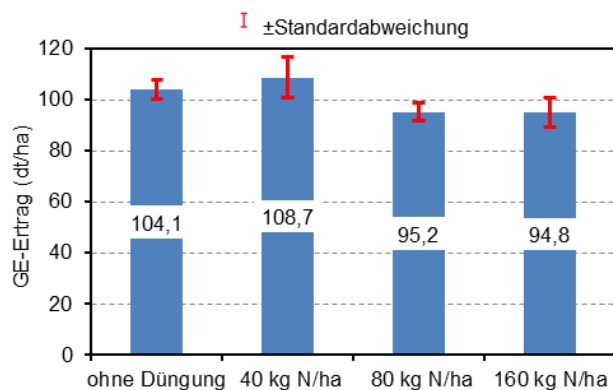


Abbildung 26: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases in 2011 nach organischer Düngung

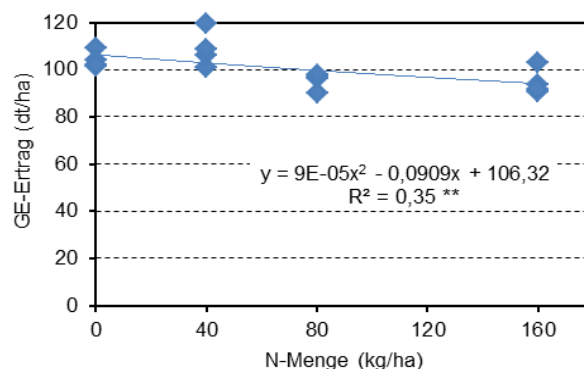


Abbildung 27: GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases des Jahres 2011 in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischer Düngung

Wie aus Tabelle 8 ersichtlich ist, gab es zwischen den Jahren eine starke Differenzierung bei den $N_{\min}$ -Gehalten zu Vegetationsbeginn. Die Unterschiede in den eingesetzten N-Mengen spiegeln sich hier jedoch nur bedingt wider. Im Mittel der Versuchsjahre waren es dann auch nur 20 kg N/ha in 0 – 90 cm Bodentiefe zwischen dem Prüfglied ohne organischer Düngung und der höchsten Düngungs-Stufe. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den $N_{\min}$ -Gehalten und dem GE-Ertrag sind vielfach hoch. Signifikant sind allerdings nur die Korrelationen der Anbaujahre mit Kartoffeln (Tab. 9).

Tabelle 8: $N_{\min}$ -Mengen zu Vegetationsbeginn in den jeweiligen Prüfgliedern mit steigender organischer Düngung

Merkmal	$N_{\min}$ (kg/ha in 0 – 90 cm Tiefe)												
Jahr:	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009*	2010*	2011	Mittelwert
Fruchtart:	WW	Kart	AB	WG	LKG	LKG	Kart	WW	AB	WG	LKG	LKG	
ohne Düngung	55	133	129	64	42	10	91	121	132	49	60	10	75
40 kg N/ha	54	160	106	74	34	8	104	152	152	45	42	25	80
80 kg N/ha	49	172	114	94	43	11	107	139	150	50	48	16	83
160 kg N/ha	42	166	113	88	53	16	143	158	175	80	34	16	90

Tabelle 9: Korrelationskoeffizienten zwischen den $N_{\min}$ -Mengen zu Beginn der Vegetation und den erzielten GE-Erträgen der Fruchtarten

Merkmal	$N_{\min}$ (kg/ha in 0 – 90 cm Tiefe)												
Jahr:	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009*	2010*	2011	
Fruchtart:	WW	Kart	AB	WG	LKG	LKG	Kart	WW	AB	WG	LKG	LKG	
PEARSON-Korrelation													
Korrelationskoeffizient	0,42	0,98	0,70	0,74	0,1	0,83	0,90	0,72	0,86	0,81	-0,88	0,44	
einseitige Signifikanz	n.s.	++	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	+	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

In Tabelle 10 wurden die durchschnittlichen GE-Erträge der ersten Rotation mit den Erträgen der zweiten Rotation verglichen. Durch diese Ergebnisse kommt zum Ausdruck, dass für die Ertragsbildung im Ökolandbau die Nährstoffnachlieferung während der Vegetation von größerer Bedeutung ist als der alleinige Bezug auf die $N_{\min}$ -Mengen zu Vegetationsbeginn. Die Ertragszuwächse zwischen keiner Düngung und den Mittelwerten der Varianten aus 80 kg und 160 kg N/ha sind in der zweiten Rotation z. T. deutlich höher als in der ersten Fruchtfolge-rotation.

Außer beim Luzernekleegras trifft das auch auf die anderen nicht direkt gedüngten Fruchtarten zu. So beträgt die Nachwirkung bei Ackerbohne in der ersten Rotation 2,7 dt GE/ha und einer legumen N-Bindung von fast 22 kg N/ha, während in der zweiten Rotation bereits eine Wirkung von 4,8 dt GE/ha bzw. von 52 kg N/ha zu verzeichnen war. Die nichtlegumen Fruchtarten profitieren jedoch wesentlich deutlicher von einer fortgesetzten Düngung. Im Durchschnitt dieser Arten beträgt die Wirkung der organischen Düngung in der ersten Rotation 5,3 GE/ha und in der zweiten Rotation sogar 11,5 dt GE/ha. Die Nachwirkung der organischen Düngung ist von der Fruchtart abhängig und nimmt somit mit der Dauer der Düngungsregime zu. Die Luzerne-Klee-gras-Gemenge haben nach diesen Ergebnissen nicht von dieser Nachwirkung profitiert (Tab. 10).

Tabelle 10: Entwicklung der GE-Ertragsdifferenzen (dt/ha), legume N-Bindung (kg N/ha) und der Leguminosen-Anteile im LKG-Gemenge (%) der Fruchtarten im Vergleich zwischen der ersten (Jahre 2000 – 2005) und der zweiten (2006 – 2011) Rotation (jeweils Variante 1 im Vergleich zum Mittelwert aus Varianten 3 u. 4)

Fruchtfolge-Rotation		GE-Erträge Fruchtarten								Leguminosen		
		Fruchtart:	WW	Kart	AB	WG	LKG	MW (alle Arten)	MW (ohne LKG)	MW (nur nicht-leg. Arten)	Legume N-Bindung AB	Legume N-Bindung LKG
1.	Rotation (2000 – 2005)	0,16	9,46	2,69	6,36	7,28	5,19	4,67	5,33	21,6	17,5	-11,0
2.	Rotation (2006 – 2011)	8,43	17,07	4,80	8,91	-0,86	7,67	9,80	11,47	52,1	13,2	-5,5

Eine Zusammenfassung der mittleren GE-Erträge aus beiden Fruchtfolgerotationen (Abb. 28) macht deutlich, dass die eingesetzten abgestuften Mengen an organischen Düngern zu einem Ertragsanstieg geführt haben, aus dem der abnehmende Ertragszuwachs deutlich zu Tage tritt. Nach geringer stetiger Düngung ist im Durchschnitt der Fruchtarten ein deutlicherer Ertragsanstieg zu verzeichnen, während nach hoher Düngung von über 80 kg N/ha und Jahr kein weiterer Ertragsanstieg mehr zu erkennen ist. Bis zur dritten Düngungsstufe ist ein durchschnittlicher relativer Ertragsanstieg auf 112 % zu verzeichnen.

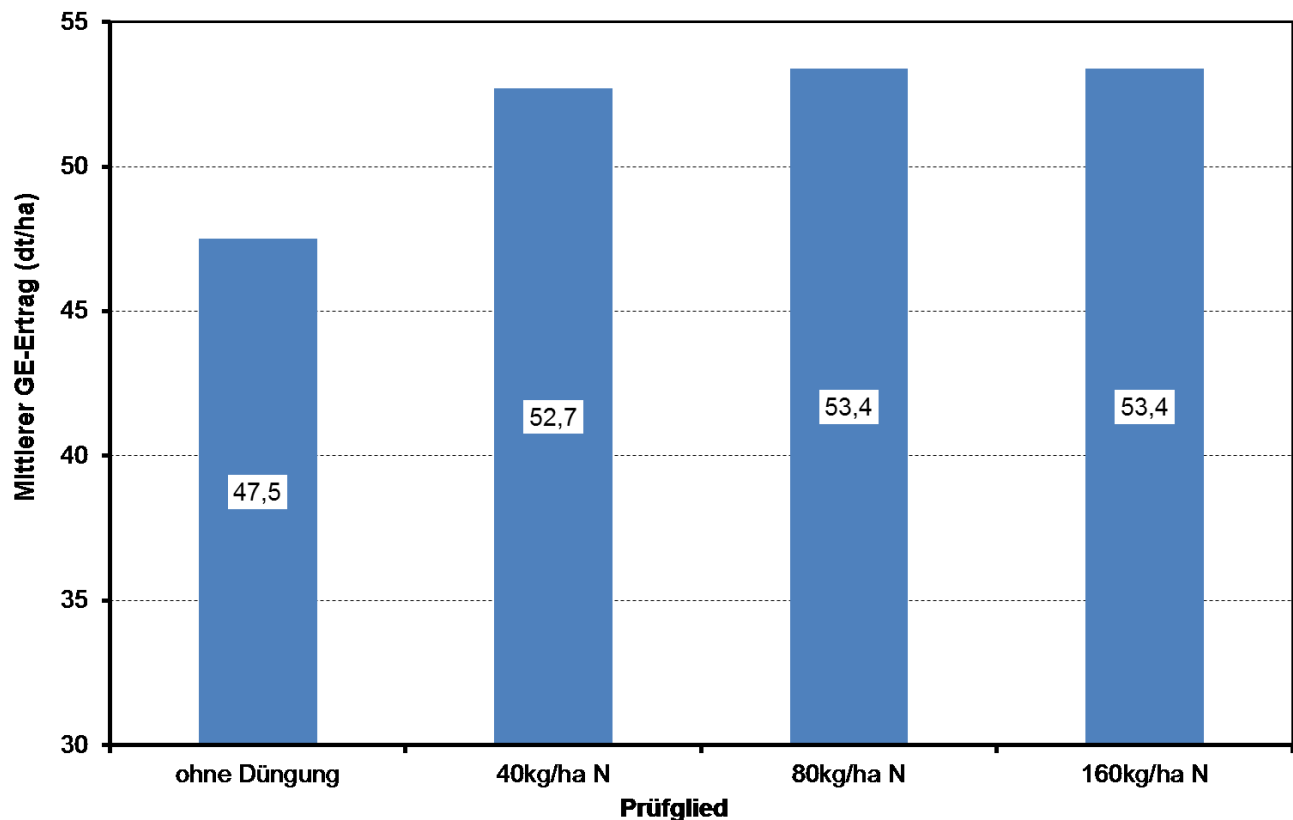


Abbildung 28: GE-Erträge in Abhängigkeit von der eingesetzten organischen Nährstoffmenge im Durchschnitt des Versuchszeitraumes

Nach Aufschlüsselung auf die einzelnen Fruchtarten zeigen sich dann deutlichere Differenzierungen (Abb. 29). Die Kartoffeln erzielten bis zur höchsten Düngungsstufe einen Ertragszuwachs. Die Differenz beträgt immerhin 14 dt/ha Getreideeinheiten. Das Luzerne-Klee gras verfügt über das höchste Leistungspotenzial, weitgehend unabhängig vom verabreichten Düngungs niveau.

Auf die organische Düngung reagieren die Getreidearten und die Ackerbohne (wobei ein Erntejahr als Missernte zu bewerten ist) mit einer mittleren Ertragsreaktion bis zu einer Düngung in Höhe von 80 kg N/ha und Jahr. Für das Getreide ergibt sich im Mittel der vier Anbaujahre (zweimal Winterweizen und zweimal Wintergerste) die in Abbildung 30 dargestellte Regressionsfunktion mit einem maximalen Kornertrag von 49,4 dt/ha bei einem N-Einsatz von 100 kg N/ha als organischen Dünger.

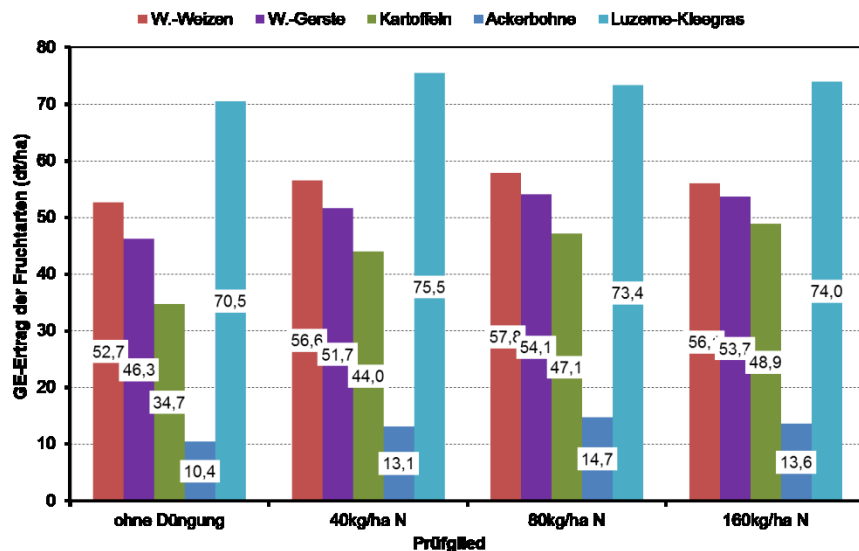


Abbildung 29: Durchschnittliche GE-Erträge der einzelnen Fruchtarten im Versuchszeitraum nach fortgesetzter organischer Düngung

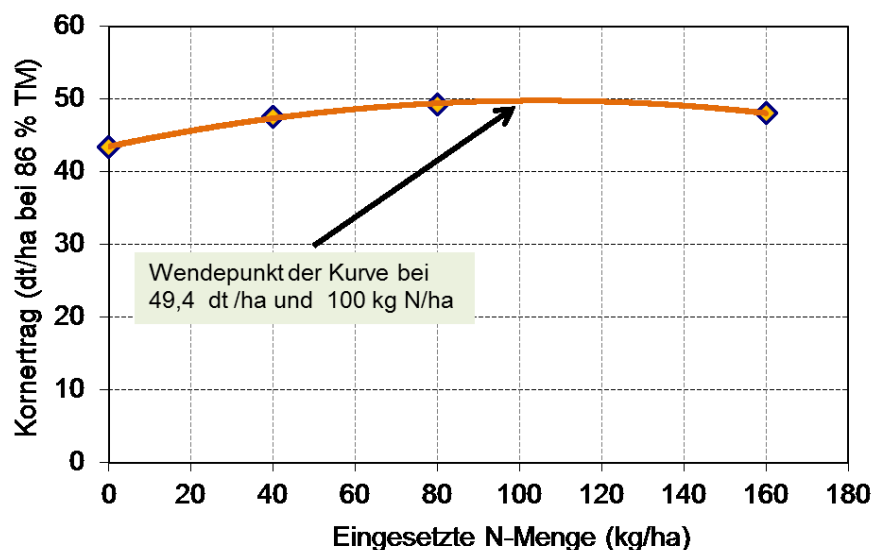


Abbildung 30: Regressionsfunktion der mittleren Kornerträge von W.-Weizen und W.-Gerste in Abhängigkeit von steigender N-Versorgung aus organischer Düngung

3.1.2 Inhaltsstoffe und andere Merkmale der Fruchtarten

In den nachfolgenden Tabellen 11 und 12 wurden die für die Fragestellungen wichtigen Inhaltsstoffe der Haupt- und der erfassten Nebenprodukte (falls abgefahren) sowie einige weitere Qualitätsparameter der angebauten Fruchtarten als Mittelwerte zusammengefasst.

In Folge steigender organischer Düngung sind bei Winterweizen die N-Gehalte im Korn und Stroh z. T. deutlich angestiegen (Tab. 11, WW). Die anderen erfassten Nährstoffe haben sich dagegen nicht verändert. Die TKM-Werte sowie die Anzahl ährentragender Halme sind in Folge erhöhter Düngung etwas angestiegen. Auch die N-Gehalte im Korn, die K-Werte im Stroh sowie die Pflanzenlänge der Wintergerste konnten durch die steigende Düngung etwas erhöht werden (Tab. 11, WG). Die anderen Nährstoffe wurden durch die steigende Düngung in ihren Konzentrationen im Korn nicht verändert oder im Stroh sogar leicht abgesenkt (N, P, Mg).

Steigende organische Düngung mit Gülle und Stalldung führte bei den angebauten Kartoffeln nur zu leichten Veränderungen in den analysierten Gehalten an TM und Stärke (Tab. 12, Kart). Die meisten erfassten Nährstoffe wurden in ihren Gehalten entweder gar nicht verändert oder sogar leicht reduziert (N, P, Mg), nur die K-Gehalte stiegen in den Knollen deutlich an und auch die Krautfäulehäufigkeit erhöhte sich ebenfalls etwas. Obwohl die Ackerbohnen nicht direkt gedüngt wurden, haben sie regelmäßig von der Nachwirkung der Düngemaßnahmen z. T. deutlich profitiert (Tab. 12, AB). Mindestens bis zu einer Höhe von 80 kg N/ha und Jahr wurden die Gehalte annähernd aller untersuchter Inhaltsstoffe positiv verändert (außer Mg). Auch die legume N-Bindung wurde deutlich angehoben und die TKM konnte sogar bis zur höchsten Düngungsstufe angehoben werden.

Tabelle 11: Durchschnittliche Gehalte an Inhaltsstoffen (% TM) und andere Merkmale der angebauten Getreidearten in Folge steigender organischer Düngung

Haupt- bzw. Neben- produkt:	Korn							Stroh				
Merkmal:	N	P	K	Mg	TKM	Ährent. Halme	Wuchs- höhe	N	P	K	Mg	Lager
Dimension:	(% TM)				(g)	(je m²)	(cm)	(% TM)				(Bonitur)
Winterweizen (WW)												
ohne Düngung	2,07	0,36	0,45	0,12	38,8	312,0	87,3	0,22	0,06	0,54	0,11	3,25
40 kg N/ha	2,19	0,36	0,44	0,13	41,2	394,0	86,0	0,23	0,06	0,56	0,12	3,00
80 kg N/ha	2,26	0,37	0,45	0,13	39,7	361,0	87,0	0,28	0,07	0,54	0,12	2,50
160 kg N/ha	2,31	0,37	0,45	0,13	41,0	362,0	88,5	0,29	0,06	0,58	0,11	3,25
Wintergerste (WG)												
ohne Düngung	1,86	0,30	0,43	0,07	47,3	298,5	91,9	0,69	0,12	1,11	0,12	-
40 kg N/ha	1,87	0,30	0,44	0,07	46,7	297,8	91,9	0,63	0,11	1,20	0,11	-
80 kg N/ha	1,88	0,30	0,44	0,07	47,0	320,3	93,3	0,59	0,10	1,18	0,10	-
160 kg N/ha	1,90	0,30	0,44	0,07	47,1	288,8	96,4	0,66	0,10	1,18	0,11	-

Tabelle 12: Durchschnittliche Gehalte an Inhaltsstoffen (% TM) und andere Merkmale der angebauten Kartoffeln, Ackerbohnen und Luzerne-Klee gras in Folge steigender organischer Düngung

Kartoffeln (Kart.)							
Haupt- bzw. Neben- produkt:	Knollen						Kraut
Merkmal:	N	P	K	Mg	TM	Stärke	Krautfäule
Dimension:	(% TM)				(% FM)	(% TM)	(Bonitur)
ohne Düngung	1,96	0,23	1,61	0,12	21,08	65,20	4,00
40 kg N/ha	1,91	0,23	1,66	0,11	21,90	65,90	6,00
80 kg N/ha	1,83	0,21	1,81	0,12	21,19	66,70	6,25
160 kg N/ha	1,90	0,22	1,88	0,12	21,42	66,30	5,75
Ackerbohnen (AB)							
Haupt- bzw. Neben- produkt:	Korn					Gesamt- Pflanze	
Merkmal:	N	P	K	Mg	TKM	Legume N-Bindung	
Dimension:	(% TM)				(g)	(kg N/ha)	
ohne Düngung	5,31	0,80	1,33	0,20	343,4	66,0	
40 kg N/ha	5,43	0,82	1,37	0,20	369,5	87,0	
80 kg N/ha	5,67	0,83	1,40	0,19	363,8	98,0	
160 kg N/ha	5,42	0,79	1,39	0,19	397,7	86,4	
Luzernekleegras (LKG)							
Haupt- bzw. Neben- produkt:	Aufwuchs						Gesamt- Pflanze
Merkmal:	N	P	K	Mg	TM	Legumino- sen-Anteil	Legume N-Bindung
Dimension:	(% TM)				(g)	(%)	(kg N/ha)
ohne Düngung	2,46	0,23	1,48	0,34	23,23	58,0	214,1
40 kg N/ha	2,44	0,24	1,80	0,31	23,39	55,0	227,4
80 kg N/ha	2,36	0,23	1,77	0,31	22,82	52,7	231,0
160 kg N/ha	2,38	0,24	2,00	0,30	22,72	48,7	227,7

In Folge der steigenden Düngung kam es auch zu Veränderungen bei den nicht direkt gedüngten Legumino-
sen-Grasbeständen (LKG), deren Durchschnittswerte von drei Schnitten und vier Anbaujahren in Tabelle 12
niedergelegt sind. Mit ansteigendem Düngungsniveau haben sich zunächst die im Gemenge angebauten Ar-
ten zugunsten des Gräseranteils deutlich verschoben, so dass der Leguminosenanteil entsprechend reduziert
worden ist. Trotz der Abnahme der Leguminosen im Gemenge konnte die berechnete legume N-Bindung ent-
sprechend der verbesserten Ertragssituation durch die nachwirkende Düngung bis zur dritten Düngungsstufe
noch angehoben werden. Dagegen sind die N-Gehalte und die Mg-Werte in den Futteraufwüchsen leicht ab-
gefallen, während nur der K-Gehalt wiederum in den vegetativen Beständen deutlich angestiegen ist.
Insgesamt kann festgestellt werden, dass die steigende organische Düngung oder deren Nachwirkung auch
die Inhaltsstoffe und anderen Merkmale der Fruchtarten beeinflusst hat. Die Auswirkungen waren aber deut-
lich von der angebauten Fruchtart abhängig. Im Durchschnitt der Fruchtarten wurde der N-Gehalt in der
höchsten Düngungsstufe um ca. 2 Prozent-Anteile angehoben. Der P-Gehalt konnte dagegen nicht beeinflusst

werden, während die K-Gehalte um 14 Prozentanteile angehoben worden sind. Die Mg-Werte des Erntegutes sind dagegen im Vergleich zur ungedüngten Variante um 4 Prozentanteile reduziert worden.

3.1.3 Nährstoffbilanzen

Die in dieser Steigerungsreihe im Durchschnitt eines Jahres erzielten Entzüge an Makronährstoffen sind in Abbildung 31 dargestellt. Im Hinblick auf den Stickstoff ergaben sich dabei zwischen den gedüngten Prüfgliedern keine großen Unterschiede. In den gedüngten Varianten wurde im Vergleich zum Prüfglied ohne Düngung lediglich ein Mehrentzug von ca. 13 kg N/ha und Jahr ermittelt. Auch bei den Nährstoffen Phosphor und Magnesium sind die Unterschiede gering. Deutlich anders ist es beim Nährstoff Kalium. Die mit dem Ertrag abgefahrenen Entzüge steigen hier bis zur höchsten Stufe an, was auf eine gute Verfügbarkeit des mit den organischen Düngern verabreichten Kaliums hinweist.

In Tabelle 13 sind die Nährstoffbilanzen für Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium zusammengestellt. Nach diesen Ergebnissen der einfachen Schlagbilanz wird deutlich, dass beim Stickstoff ab der Stufe mit 80 kg N/ha ein leicht positiver Saldo erzielt wurde und in der Stufe mit 160 kg N/ha bereits ein vergleichsweise hoher Überschuss vorhanden war. Im Hinblick auf die P-, K- und Mg-Zufuhr konnte erst in der höchsten Düngungsstufe ein positiver Saldo erzielt werden, was zunächst im Hinblick auf die laktatlöslichen Nährstoffe im Boden keine gravierende Verbesserung des niedrigen Versorgungszustandes erwarten lässt.

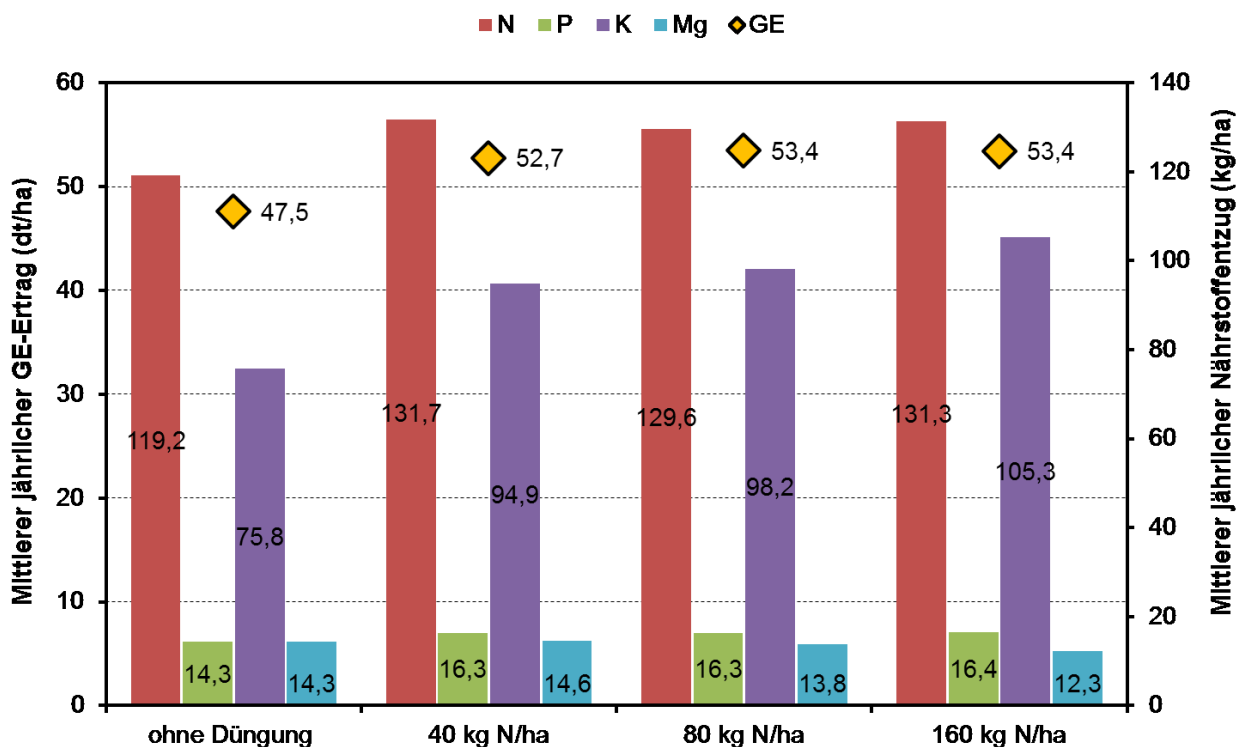


Abbildung 31: Mittlerer jährlicher GE-Ertrag im Versuchszeitraum in Abhängigkeit vom N-Einsatz aus organischen Düngern und die damit im Durchschnitt der Jahre einhergehenden Nährstoffentzüge

Tabelle 13: Einfache Schlagbilanz der Prüfglieder mit gesteigertem N-Einsatz durch organische Düngemittel

Prüfglied	Zufuhr		Abfuhr	Saldo
	Organ. Dünger	Symbiot. N-Bindung		
		(kg Reinnährstoff/ha u. Jahr)		
Stickstoff				
ohne Düngung	0	82,3	119,2	-36,9
40 kg N/ha	40	90,2	131,7	-1,5
80 kg N/ha	79,9	93,3	129,6	43,6
160 kg N/ha	159,8	90,3	131,3	118,8
Phosphor				
ohne Düngung	0	-	14,3	-14,3
40 kg N/ha	6,5	-	16,3	-9,8
80 kg N/ha	12,9	-	16,3	-3,4
160 kg N/ha	25,9	-	16,4	9,5
Kalium				
ohne Düngung	0	-	75,8	-75,8
40 kg N/ha	39,4	-	94,9	-55,5
80 kg N/ha	78,8	-	98,2	-19,4
160 kg N/ha	157,7	-	105,3	52,4
Magnesium				
ohne Düngung	0	-	14,3	-14,3
40 kg N/ha	4,8	-	14,6	-9,8
80 kg N/ha	9,7	-	13,8	-4,1
160 kg N/ha	19,4	-	12,3	7,1

Werden die Bedingungen zur Bruttobilanzierung für den Nährstoff Stickstoff zu Grunde gelegt, so ergibt sich ein etwas anderes Bild (Tab. 14). Die N-Deposition und die nicht-legume N-Bindung werden für den Standort in Roda pauschal mit 35 kg N/ha und Jahr veranschlagt (vgl. MEYER et al., 2021). Eine genaue Analyse der Entwicklung der N_t -Menge im Boden ergab keine großen Veränderungen im Bodenfonds (siehe Kap. 3.1.4). Hier zeigt sich, dass die Versuchsdauer von 12 Jahren noch nicht ausreicht, um den Umfang der N_t -Bilanz quantitativ abschätzen zu können, obwohl die C_{org} -Gehalte insgesamt bereits deutlich angestiegen sind. Nach den bisherigen Auswertungen wird in der Variante ohne Düngung ein jährlicher Betrag von ca. 3 kg N/ha aus dem N_t -Gehalt des Bodenhumus freigesetzt, während in den Varianten mit hoher Düngung lediglich Werte um 16 kg N/ha im Humus zwischenzeitlich festgelegt werden.

Tabelle 14: Erweiterte Schlagbilanz und Nährstoffeffizienz für Stickstoff der Prüfglieder mit gesteigertem N-Einsatz aus organischen Düngern

Prüfglied	Zufuhr			Gesamt	Abfuhr	Saldo	Effizienz (Gesamt = 100) (%)
	Düngung + legume N-Bindung	N-Deposition + nicht- legume N-Bindung	Boden N _t				
			(kg/ha u. Jahr)				
ohne Düngung	82,3	35	3,3	120,6	119,2	1,4	98,8
40 kg N/ha	130,2	35	-6,6	158,6	131,7	26,9	83,0
80 kg N/ha	173,2	35	-3,3	204,9	129,6	75,3	63,3
160 kg N/ha	250,1	35	-16,4	268,7	131,3	137,4	48,9

Durch diese zusätzlichen N-Quellen wird in der Variante ohne Düngung noch ein weitgehend ausgeglichener Nährstoffsaldo mit einer annähernd 100%igen Effizienz des eingesetzten reaktiven Stickstoffs erreicht. Mit steigendem Düngereinsatz wird der berechnete Bruttosaldo deutlich angehoben, während die Nährstoffeffizienz abnimmt. Bei einem Saldo von 137 kg N/ha wird schließlich nur noch eine Effizienz von ca. 50 % erreicht (Tab. 14). Die geringe Versuchsdauer lässt allerdings noch keine abschließende Bewertung für den Nährstoff Stickstoff zu.

3.1.4 Entwicklung der Bodenparameter

Im Vordergrund der Betrachtungen in dieser Versuchsreihe stehen in erster Linie die P- und K-Gehalte in Abhängigkeit des Einsatzes der organischen Dünger. Darüber hinaus wird auch berichtet, wie sich die C_{org}- und N_t-Gehalte sowie der pH-Wert des Bodens über den Versuchszeitraum entwickelt haben.

Die P-Gehalte im Boden

Die Entwicklung der DL-P-Gehalte der Ackerkrume in den vier Stufen der organischen Düngung ist in Abbildung 32 dargestellt worden. Eine eindeutige Differenzierung ist zunächst kaum zu erkennen. Nach zwölfjähriger Versuchsdurchführung ist in der Variante ohne P-Zufuhr keine wesentliche Veränderung der Gehalte festzustellen. Hinzuweisen ist auf die beachtliche Standardabweichung der Mittelwerte (Abb. 33).

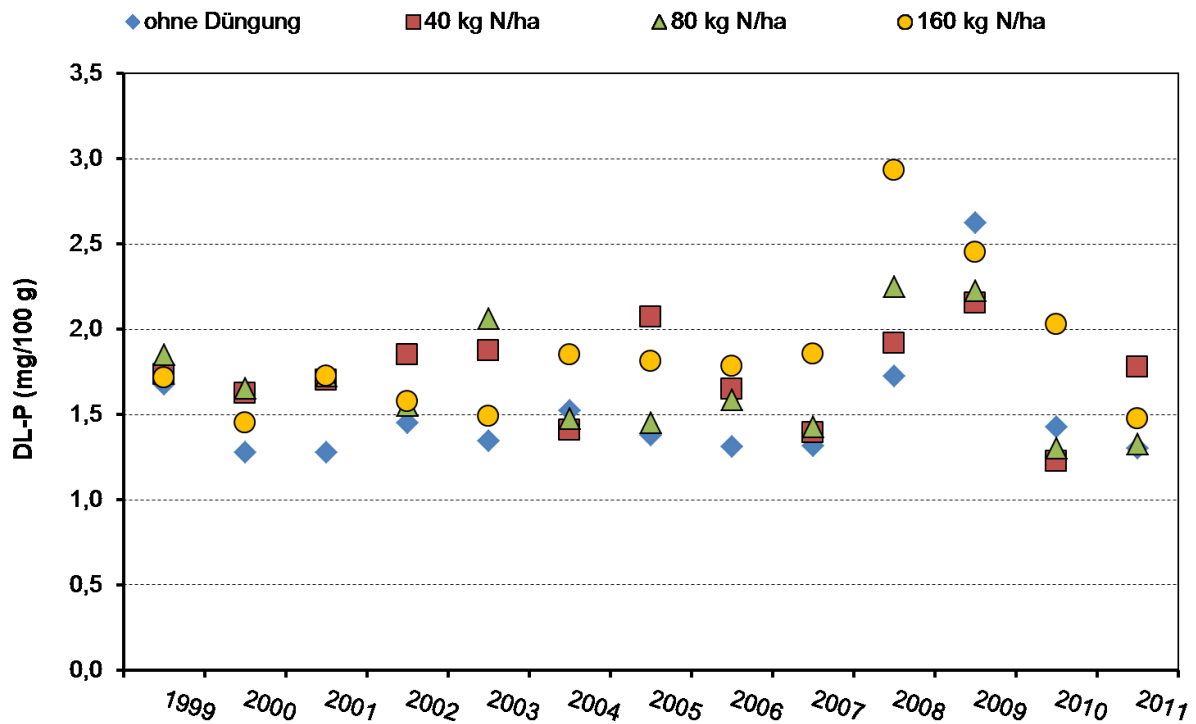


Abbildung 32: Jährlich ermittelte DL-P-Gehalte im Durchschnitt von vier Wiederholungen im Versuchszeitraum der Varianten mit steigender organischer Düngung

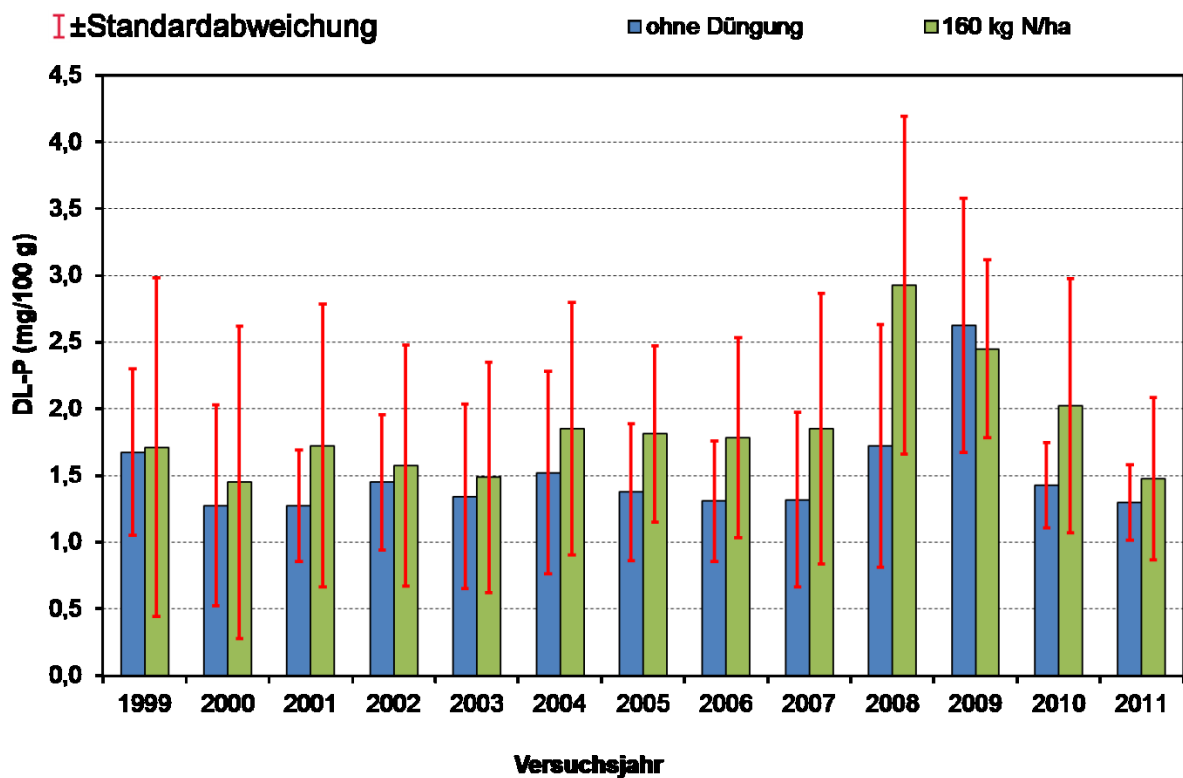


Abbildung 33: Ergebnisse der jährlichen Bodenuntersuchung (inklusive Standardabweichung der Mittelwerte) auf die DL-P-Gehalte in den Varianten ohne Düngung und mit 160 kg N/ha als organische Dünger

Ob für den deutlichen Anstieg der P-Gehalte im Jahr 2008 unter Umständen die geringeren Entzüge durch das niedrige Ertragsniveau der Ackerbohnen verantwortlich sind, kann nur vermutet werden. Die aufgetretenen Schwankungen lassen sich jedoch durch Zusammenfassung einzelner Versuchsabschnitte deutlich einschränken, wodurch aufgezeigt werden kann, dass in den gedüngten Varianten über die Jahre eine leichte Erhöhung der DL-P-Gehalte gegenüber den ungedüngten Parzellen eingetreten ist (Abb. 34). Bleiben die deutlich erhöhten Ausgangsgehalte unbeachtet, kann auch bei den CAL-P-Gehalten die gleiche Tendenz beobachtet werden (Abb. 35).

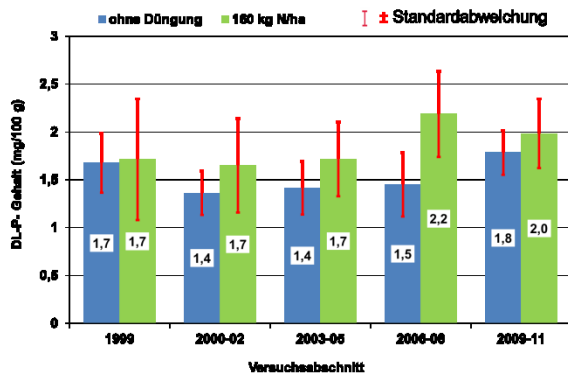


Abbildung 34: Einfluss der organischen Düngung auf die DL-P-Gehalte des Bodens in den verschiedenen Versuchsabschnitten

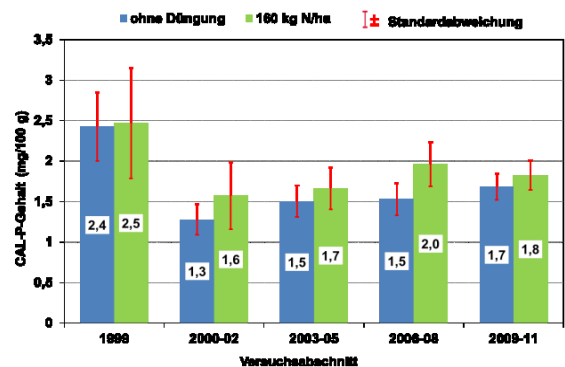


Abbildung 35: Einfluss der organischen Düngung auf die CAL-P-Gehalte des Bodens in den verschiedenen Versuchsabschnitten

Der Einsatz der organischen Düngemittel erbrachte nur eine verhältnismäßig geringe Erhöhung in den P-Gehalten über den Versuchszeitraum. In Anbetracht der niedrigen mittleren Gehalte des Bodens trat zudem eine beachtliche Standardabweichung auf. Der Einsatz der organischen Dünger verbesserte jedoch in der Tendenz die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe. Wie aus den Ergebnissen zur P-Saldierung bereits hervorging (siehe Tab. 13), war auch eine deutliche Anreicherung der P-Bodenvorräte nicht zu erwarten gewesen. Bemerkenswert ist jedoch, dass in dem Prüfglied ohne P-Einsatz keine deutliche Absenkung der Nährstoffgehalte zu erkennen war, was darauf hindeutet, dass wahrscheinlich auch der Unterboden einen entsprechenden Anteil an der P-Versorgung der Bestände beitrug, insbesondere durch die tiefwurzelnden Leguminosen-Grasbestände.

Entsprechend der verhältnismäßig geringen Differenzierung in den Laktatwerten des Bodens waren keine engen signifikanten Zusammenhänge zwischen den GE-Erträgen und den P-Gehalten (DL- bzw. CAL-löslich) zu erwarten, zumal bei der organischen Düngung immer mehrere wichtige Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind (Tab. 15). Im Vergleich zur PEARSON-Korrelation werden bei der Rangkorrelation nach SPEARMAN keine wesentlich besseren Zusammenhänge gefunden.

Tabelle 15: Korrelationskoeffizienten zwischen den GE-Erträgen und den nach der Ernte ermittelten DL-P- bzw. CAL-P-Gehalten in 0 – 20 cm Bodentiefe* der Varianten mit organischer Düngung

Merkmal	GE-Ertrag												
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009*	2010*	2011	MW
	WW	Kart	AB	WG	LKG	LKG	Kart	WW	AB	WG	LKG	LKG	-
PEARSON-Korrelation DL-P													
Korrelationskoeffizient	0,26	0,48	0,54	0,53	0,51	0,03	0,48	0,74	0,32	0,26	0,43	0,31	0,408
einseitige Signifikanz	n.s.	+	+	+	+	n.s.	+	++	n.s.	n.s.	+	n.s.	-
PEARSON-Korrelation CAL-P													
Korrelationskoeffizient	0,32	0,47	0,51	0,54	0,51	-0,03	0,46	0,74	0,38	0,23	0,59	0,10	0,402
einseitige Signifikanz	n.s.	+	+	+	+	n.s.	+	++	n.s.	n.s.	++	n.s.	-
SPEARMAN-Rangkorrelation DL-P													
Korrelationskoeffizient	0,39	0,67	0,44	0,37	0,39	0,22	0,43	0,48	0,59	0,24	0,65	0,25	0,427
einseitige Signifikanz	n.s.	+	+	n.s.	n.s.	n.s.	+	+	+	n.s.	+	n.s.	-
SPEARMAN-Rangkorrelation CAL-P													
Korrelationskoeffizient	0,46	0,65	0,45	0,32	0,29	0,16	0,40	0,51	0,58	0,19	0,80	-0,01	0,400
einseitige Signifikanz	+	++	+	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	+	+	n.s.	+++	n.s.	-

* In den Jahren 2009 und 2010 wurde die Bodentiefe von 0 – 30 cm beprobt!

Besonders Kartoffeln, aber auch Ackerbohnen und teilweise auch Leguminosengras und Getreide, haben mit einer positiven Ertragsreaktion auf die bessere P-Verfügbarkeit reagiert. Zwischen den Extraktionsmitteln bestehen jedoch kaum Unterschiede.

K-Gehalte im Boden

Wie bereits beim Phosphat festgestellt wurde, haben sich auch die Gehalte an laktatlöslichem Kalium mit der Steigerung an organischen Düngern in der Ackerkrume im Verlauf der Versuchsjahre nicht in hohem Ausmaß verändert (Abb. 36). In der Stufe mit der höchsten Düngmenge und einem deutlichen positiven K-Saldo (siehe Tab. 13) scheint sich jedoch bis zum Jahr 2009 eine entsprechende Anreicherung an Kalium im Boden abzuzeichnen. Allerdings sind in den letzten Versuchsjahren dann die Werte wieder abgefallen, so dass kaum noch Unterschiede zwischen den Varianten vorhanden waren. Inwieweit die hohen K-Entzüge der Jahre 2010 und 2011 durch den Anbau von Luzerne-Klee gras als Ursache für diesen Abfall anzusehen sind, lässt sich allerdings schwer einschätzen. Immerhin waren es auch auf Grund der erhöhten K-Gehalte in den vegetativen Materialien dieser Varianten (siehe Tab. 12) in der Summe der höchsten Düngungsstufe mit 382 kg/ha Kalium etwa 90 kg K/ha mehr als in dem ungedüngten Prüfglied. Zumindest deuteten sich während des zweijährigen Luzerne-Klee grasanbaus der Jahre 2004 und 2005 ähnliche Verhältnisse an (vgl. Abb. 36 – Abb. 38).

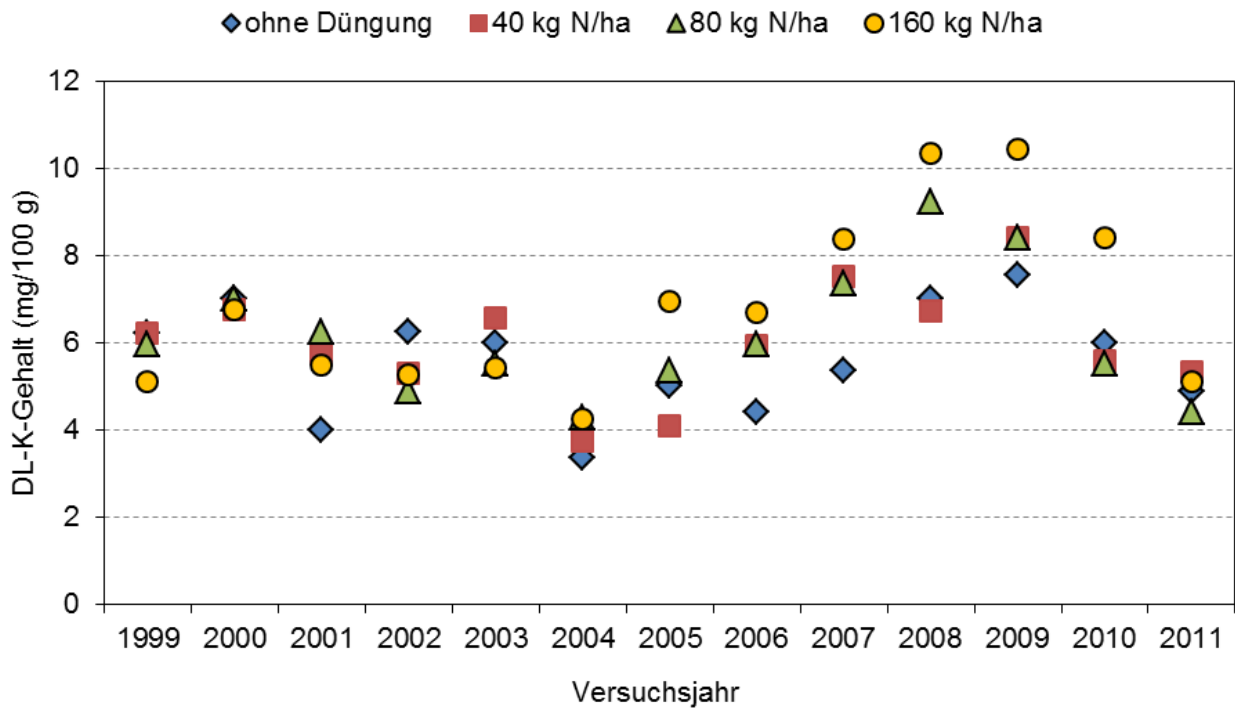


Abbildung 36: Jährlich ermittelte DL-K-Gehalte der Ackerkrume im Versuchszeitraum von 1999 – 2011

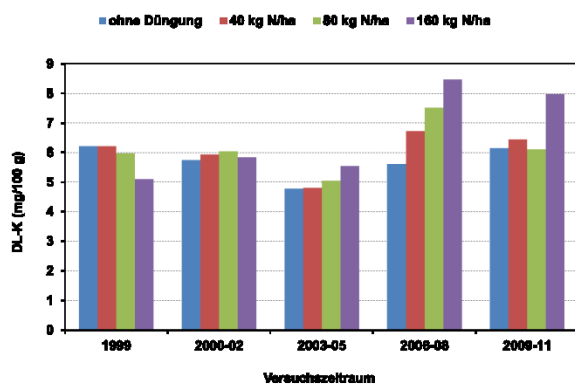


Abbildung 37: Entwicklung der DL-K-Gehalte in den Prüfgliedern mit organischer Düngung in einzelnen Versuchsabschnitten

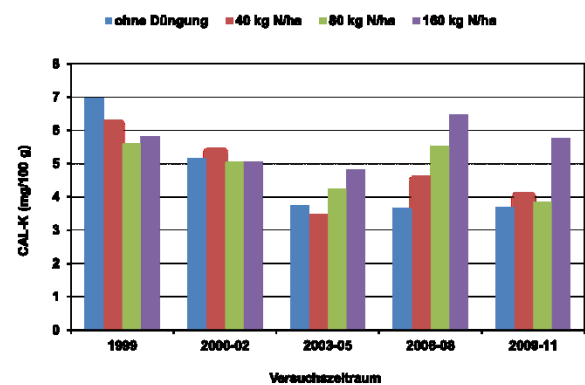


Abbildung 38: Entwicklung der CAL-K-Gehalte in den Prüfgliedern mit organischer Düngung in den einzelnen Versuchsabschnitten

Zwischen den Stufen mit steigender organischer Düngung bleiben die Unterschiede eher gering. Einen Tiefstand erreichen die K-Gehalte in der Periode 2003 – 2005. Das in diesem Zeitraum angebaute zweijährige Luzerne-Klee gras verzeichnete die größten K-Entzüge mit jährlich durchschnittlich 194 – 201 kg K/ha, die in den Anbaujahren nicht direkt durch Düngung ausgeglichen wurden. Während sich im Versuchsabschnitt 2006 – 2008 eine Differenzierung andeutete, nivellieren sich diese Unterschiede im letzten Versuchsabschnitt (2009 – 2011) wieder. Nur in der höchsten Düngungsstufe mit einem mittleren Saldenüberschuss von 52 kg K/ha und Jahr werden mit beiden Extraktionsmitteln höhere Gehalte an Kalium im Boden erreicht (Abb. 37 – 38).

Im Vergleich zu den CAL-Werten sind die DL-löslichen Gehalte an Kalium im Boden in der zweiten Versuchsphase deutlicher angestiegen als in der ersten Phase vor dem Jahr 2005 (Abb. 39 u. Abb. 40). Die Unterschiede zwischen den beiden Extraktionsmitteln prägten sich im Verlauf der Versuchsdurchführung stärker

aus. Das geht sowohl aus den Mittelwerten über die vier Stufen mit organischer Düngung als auch aus den Mittelwerten der Stufe mit 160 kg N/ha aus organischer Düngung hervor, in der die größte K-Zufuhr erfolgte.

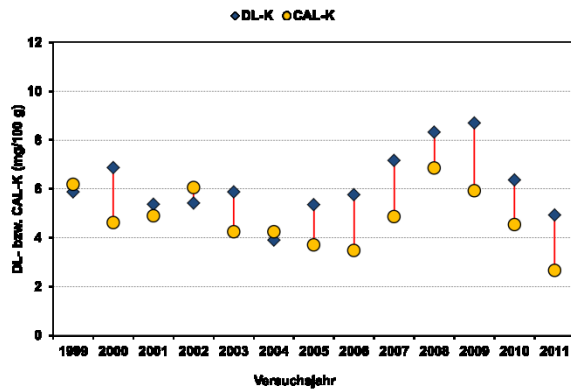


Abbildung 39: Mittlere DL- bzw. CAL-K-Gehalte über die vier Stufen mit organischer Düngung im Verlauf des Versuchszeitraums

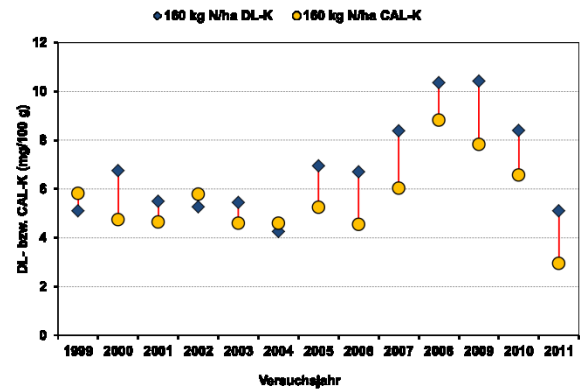


Abbildung 40: Mittlere DL- bzw. CAL-K-Gehalte der Düngungsstufe 160 kg N/ha aus organischer Düngung im Verlauf des Versuchszeitraums

Die Korrelationskoeffizienten zwischen den GE-Erträgen und den K-Gehalten von Bodenproben, die in den einzelnen Jahren jeweils nach der Ernte gewonnenen wurden, weisen besonders auf die starke Reaktion der Kartoffel auf die K-Verfügbarkeit aus den organischen Düngemitteln hin (Tab. 16). Auch bei den Ergebnissen zum Kalium bestehen jedoch keine großen Unterschiede zwischen den Extraktionsmitteln. Im Durchschnitt wurden die höheren Korrelationskoeffizienten bei Verwendung der DL-Methode ermittelt. Dass der Zusammenhang zwischen den GE-Erträgen und den unterschiedlichen Extraktionsmitteln nicht immer übereinstimmt, deutet vermutlich auch auf untersuchungsmethodische Ungenauigkeiten hin.

Tabelle 16: Korrelationskoeffizienten der GE-Erträge mit den nach der Ernte ermittelten DL-K- bzw. CAL-K-Gehalten in 0 – 20 cm Bodentiefe* der Varianten mit organischer Düngung

Merkmal	GE-Ertrag												
	2000 WW	2001 Kart	2002 AB	2003 WG	2004 LKG	2005 LKG	2006 Kart	2007 WW	2008 AB	2009* WG	2010* LKG	2011 LKG	MW -
PEARSON-Korrelation DL-K													
Korrelationskoeffizient	0,60	0,84	0,28	0,36	0,32	0,55	0,71	0,43	0,41	0,53	0,40	0,15	0,465
einseitige Signifikanz	++.	+++	n.s.	n.s.	n.s.	+	++	+	n.s.	+	n.s.	n.s.	-
PEARSON-Korrelation CAL-K													
Korrelationskoeffizient	0,50	0,02	0,37	0,60	0,22	0,51	0,72	0,31	0,42	0,60	0,42	0,19	0,407
einseitige Signifikanz	+	n.s.	n.s.	++	n.s.	+	+++	n.s.	+	++.	+	n.s.	-

* In den Jahren 2009 und 2010 wurde die Bodentiefe von 0 – 30 cm beprobt!

Entwicklung der C_{org} - und N_t -Gehalte

Von besonderem Interesse ist auch, wie sich die eingesetzten organischen Dünger auf die C_{org} - und N_t -Gehalte des Bodens ausgewirkt haben. In den Prüfgliedern war zu beobachten, dass sich über den Versuchszeitraum eine signifikante Anreicherung im C_{org} -Gehalt vollzogen hat (Abb. 41). Zwischen den Düngungsstufen gab es allerdings keine gesicherten Unterschiede (Abb. 42 – 43). Dargestellt sind hier die zusammengefassten Ergebnisse der Bodenuntersuchung aus den letzten beiden Versuchsjahren mit dem Anbau von Leguminosen-Grasgemisch.

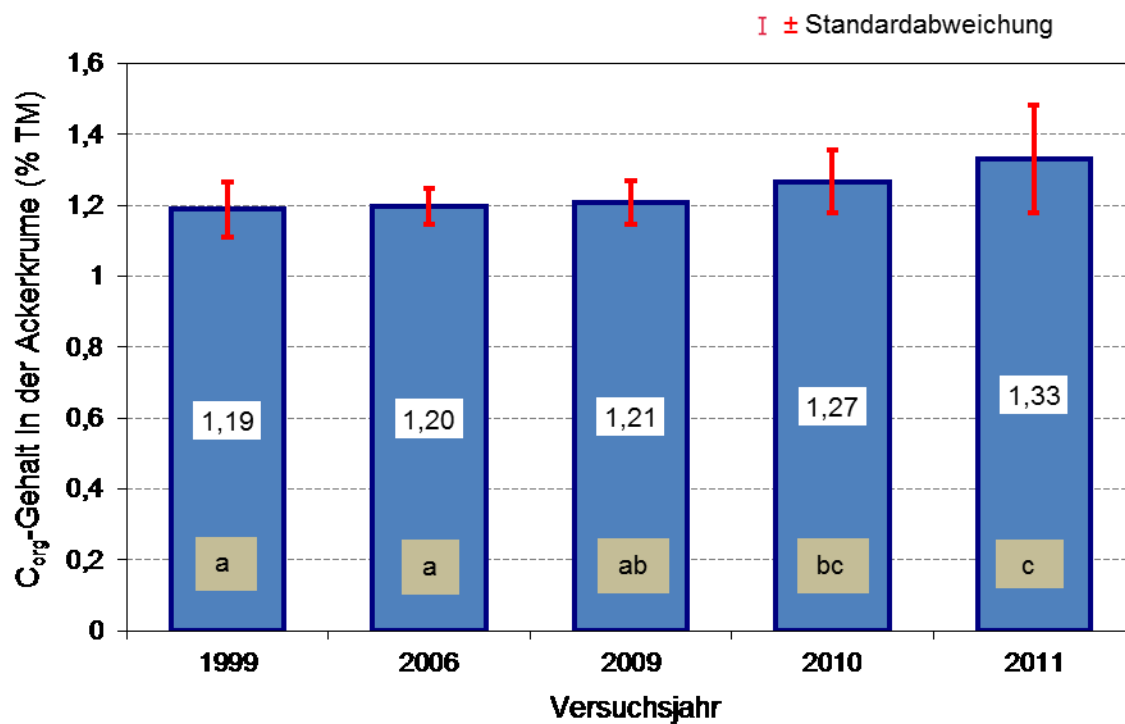


Abbildung 41: Entwicklung der C_{org} -Gehalte in den Prüfgliedern mit organischen Düngern über die Versuchsjahre

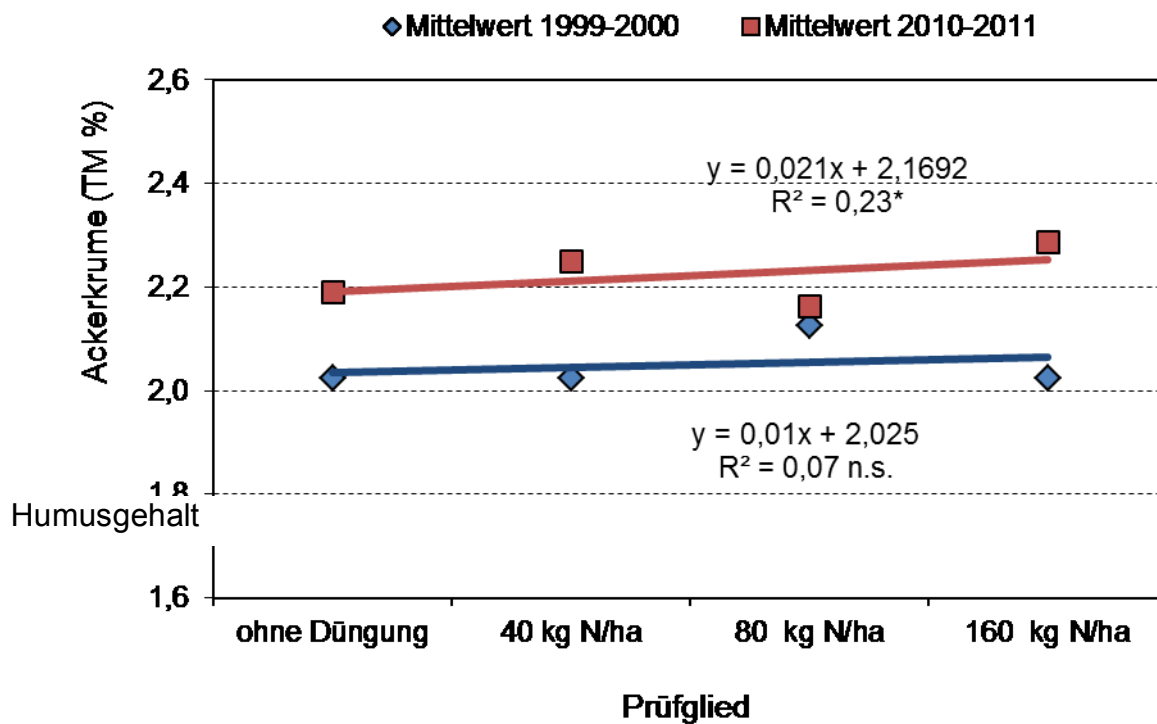


Abbildung 42: Humus-Gehalte in den jeweiligen Düngungsstufen zu Beginn und zum Ende der Versuchsreihe

Das Niveau der C_{org} -Gehalte wurde in etwa gleichmäßig angehoben, was vermutlich vor allem von den angebauten Fruchtarten und ihren auf dem Feld verbliebenen organischen Rückständen verursacht worden ist. Die ausgebrachten Düngemittel haben nur geringfügig zur Differenzierung der C_{org} -Gehalte beigetragen. Anders als beim Kohlenstoff konnten bei den N_t -Gehalten keine Veränderungen über die Zeit festgestellt werden (Abb. 44), wodurch sich das Verhältnis von C zu N der organischen Bodensubstanz im Verlauf der Versuchsdurchführung im Durchschnitt von 8,5 auf 9,5 erweitert hat.

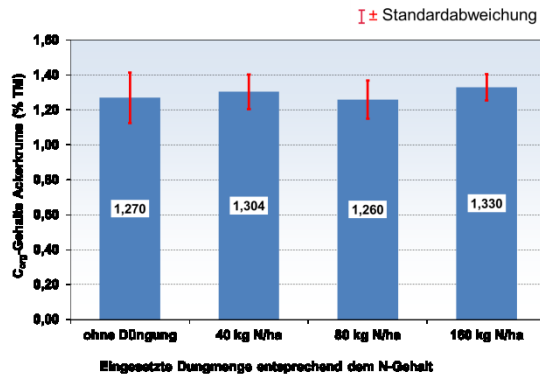


Abbildung 43: Mittelwert der C_{org} -Gehalte aus den Jahren 2010 und 2011 in den jeweiligen Stufen der organischen Düngung

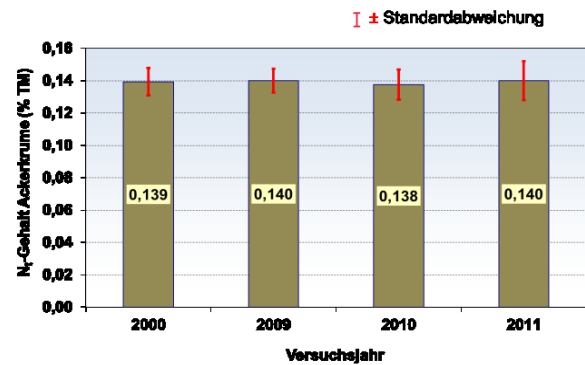


Abbildung 44: Entwicklung der N_t -Gehalte in den Prüfgliedern mit organischen Düngern über die Versuchsjahre

Zusammenfassung der jährlichen Veränderung an C_{org} , N_t , P und K

Nach genauer regressionsanalytischer Auswertung der untersuchten Merkmale des Bodens kann jedoch ziemlich eindeutig die Wirkung der stetigen organischen Düngung auch bereits nach 12 Jahren quantifiziert werden (Tab. 17). In den Varianten ohne Düngung haben sich die Gehalte an N_t , löslichem P und an CAL-K etwas verringert. Mit steigender organischer Düngung sind dann die Gehalte an C_{org} und an N_t sowie die Werte an DL-K bereits mindestens ab Düngungsstufe 2 angestiegen, während in der höchsten Düngungsstufe alle erfassten Merkmale im Boden angereichert worden sind.

Tabelle 17: Regressionsanalytische Ermittlung der linearen jährlichen Veränderung der Gehalte an C_{org} und N_t sowie der Grundnährstoffe im Boden nach steigender organischer Düngung

Prüfglied	C_{org}	N_t	DL-P	CAL-P	DL-K	CAL-K
	(% TM)		(mg/100 g)			
ohne Düngung	0,00917	-0,000083	-0,0083	-0,0042	0,0250	-0,1792
40 kg N/ha	0,01167	0,000167	-0,0042	0,0000	0,0500	-0,1292
80 kg N/ha	0,01083	0,000083	-0,0042	0,0067	0,0625	-0,0792
160 kg N/ha	0,01500	0,000417	0,0417	0,0333	0,2667	0,0875

N_{min} -Gehalte des Bodens

Nach fortgesetzter organischer Düngung ist auch die Entwicklung der N_{min} -Werte im Boden von Interesse, die in jedem Jahr zu zwei Terminen untersucht worden sind (Abb. 45 – 46). Die N_{min} -Gehalte stehen im deutlichen Zusammenhang mit den angebauten Fruchtarten. Unter vorwiegendem Anbau von Luzerne-Klee gras (2004 – 2005, 2010 – 2011) lagen die Werte deutlich niedriger als bei dem Anbau der anderen Arten. Durch die organische Düngung sind die N_{min} -Werte im Durchschnitt etwas angestiegen. Im Vergleich zur Variante ohne Dün-

gung wurden die Werte zu Beginn der Vegetation um ca. 15 kg auf insgesamt 90 kg N/ha und nach der Ernte im Herbst um 11 kg auf durchschnittlich 72 kg N/ha in der höchsten Düngungsstufe angehoben.

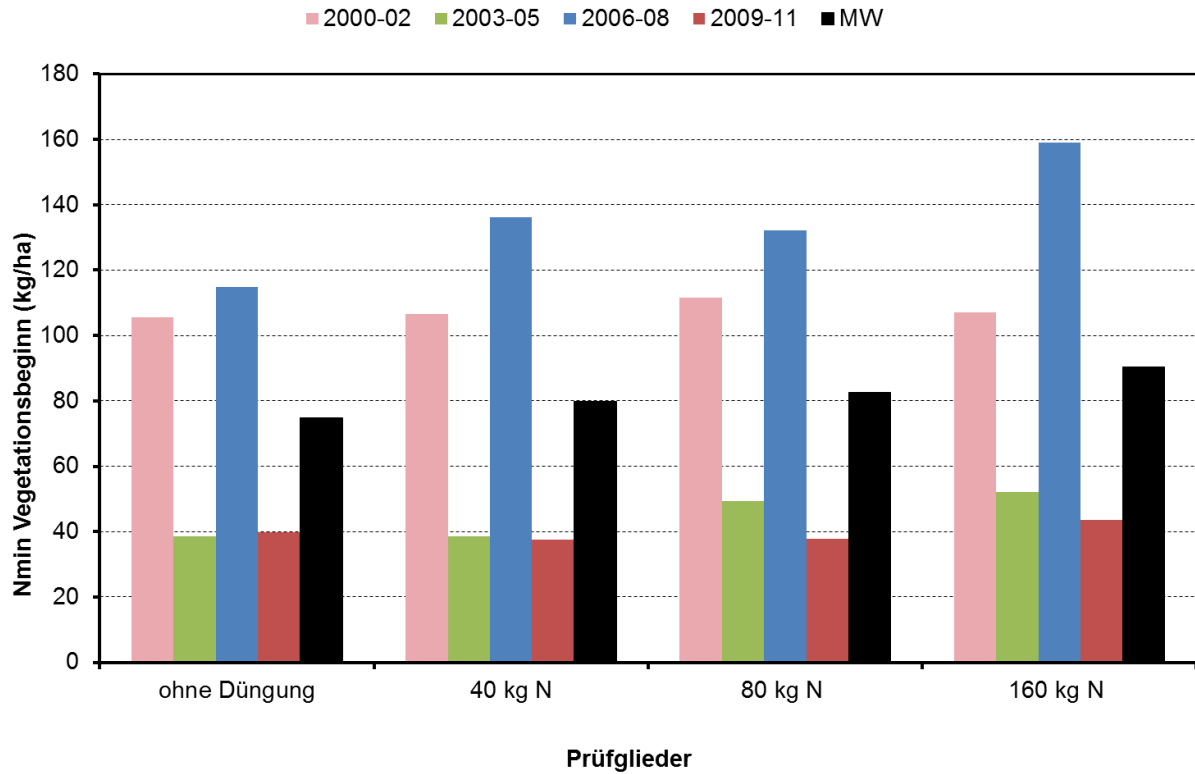


Abbildung 45: Einfluss der langjährigen organischen Düngung auf die Entwicklung der N_{min} -Werte (0 – 90 cm Tiefe) zu verschiedenen Versuchsabschnitten zu Vegetationsbeginn im Frühjahr

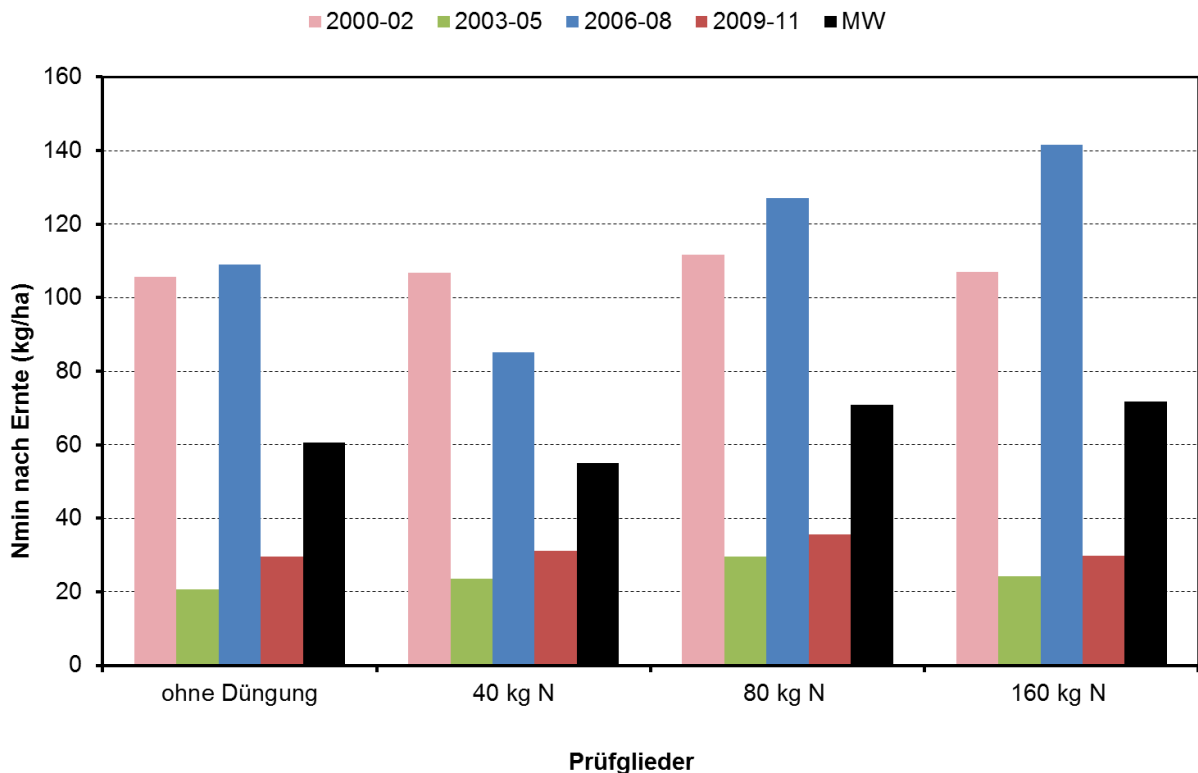


Abbildung 46: Einfluss der langjährigen organischen Düngung auf die Entwicklung der N_{min} -Werte (0 – 90 cm Tiefe) zu verschiedenen Versuchsabschnitten nach der Ernte im Herbst

Der pH-Wert des Bodens

Im Versuchszeitraum ist ein leichtes Absinken der pH-Werte in der Ackerkrume zu beobachten (Abb. 47). Lag der pH-Wert zur Anlage des Versuches bei etwa 6,0, so sank er bis zum Versuchsende auf etwa 5,4 ab. Der gestaffelte Einsatz an organischen Düngern hatte keinen differenzierenden Einfluss auf den pH-Wert des Bodens ausgeübt.

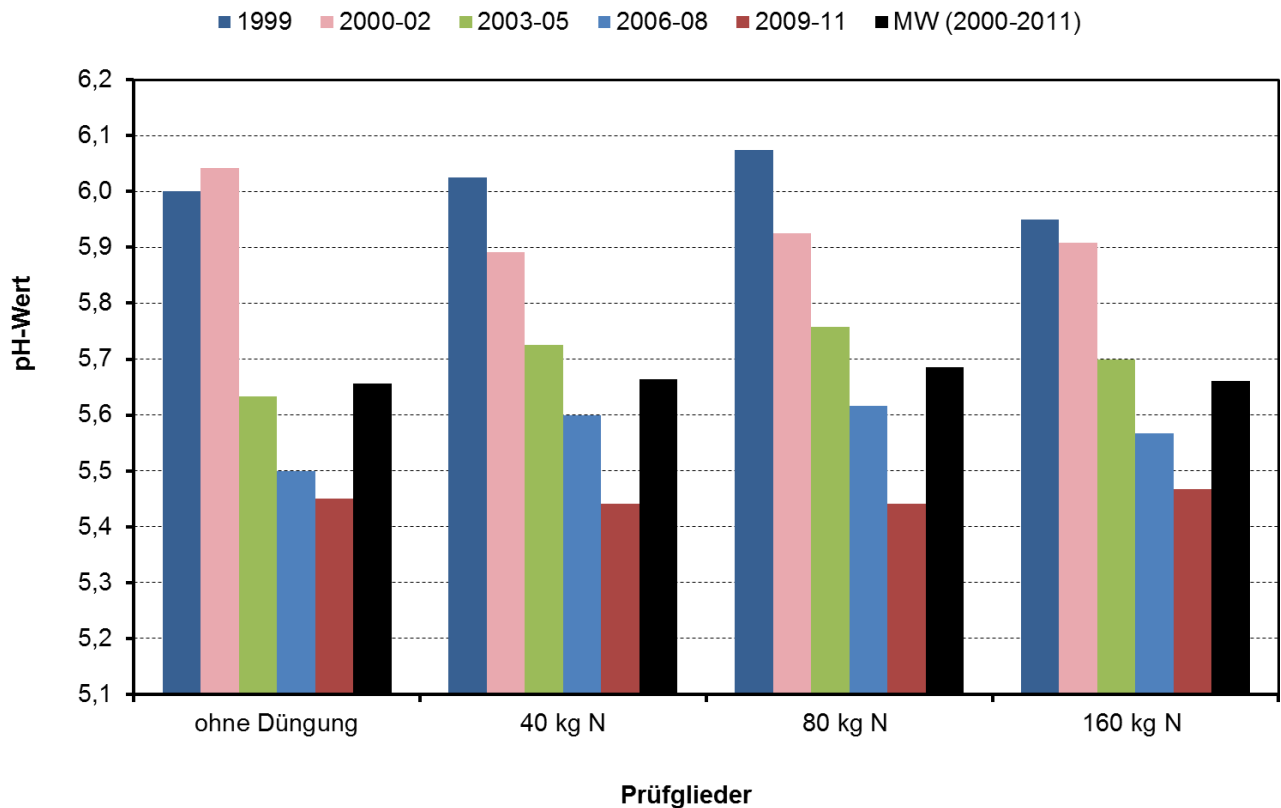


Abbildung 47: Veränderungen im pH-Wert des Bodens im Versuchszeitraum in den Stufen der organischen Düngung

Gehalte an C_{org} und löslichen Bodennährstoffen im Untergrund

Eine unterschiedlich intensive Bewirtschaftung über einen längeren Zeitraum hat nicht nur Auswirkungen auf die Ackerkrume, sondern kann sich auch, je nach Merkmal, unterschiedlich auf die tieferliegenden Bodenschichten auswirken. Da der Untergrund in vielfältiger Weise von den Wurzeln der Pflanzen durchwachsen wird, tragen auch diese Schichten zur Bodenfruchtbarkeit und Pflanzenernährung bei.

In diesem 12-jährigen Versuch sind daher neben der Ackerkrume (i.d.R. 0 – 20 cm Tiefe) auch die Bodenschichten von 20 – 60 cm Tiefe auf einige Merkmale untersucht worden. Wie aus Abbildung 48 hervorgeht, hat die organische Düngung nicht nur die C_{org} -Gehalte der Ackerkrume, sondern auch die Werte der Bodenschicht in 20 – 40 cm Tiefe in ähnlichem Umfang etwas angehoben. Zu bedenken ist, dass die vom Pflug erfasste Ackerkrume allerdings zwischen 25 cm und 30 cm zu fixieren ist. In der Bodenschicht 40 – 60 cm Tiefe erfolgte dagegen offenbar keine Veränderung der C_{org} -Gehalte des Bodens.

Auch die löslichen Gehalte an Phosphor und Kalium (Mittelwerte aus DL- u. CAL-Extrakt) sind in der Tendenz durch die organische Düngung nicht nur in der Ackerkrume, sondern auch in der Schicht zwischen 20 cm und 40 cm Tiefe etwas erhöht worden (z. T. ist in dieser Schicht eine Zunahme der Heterogenität zu beobachten). Auf die N_t -Gehalte sowie die pH-Werte in den tieferen Bodenschichten wurde kein Einfluss der Düngung festgestellt (ohne Darstellung).

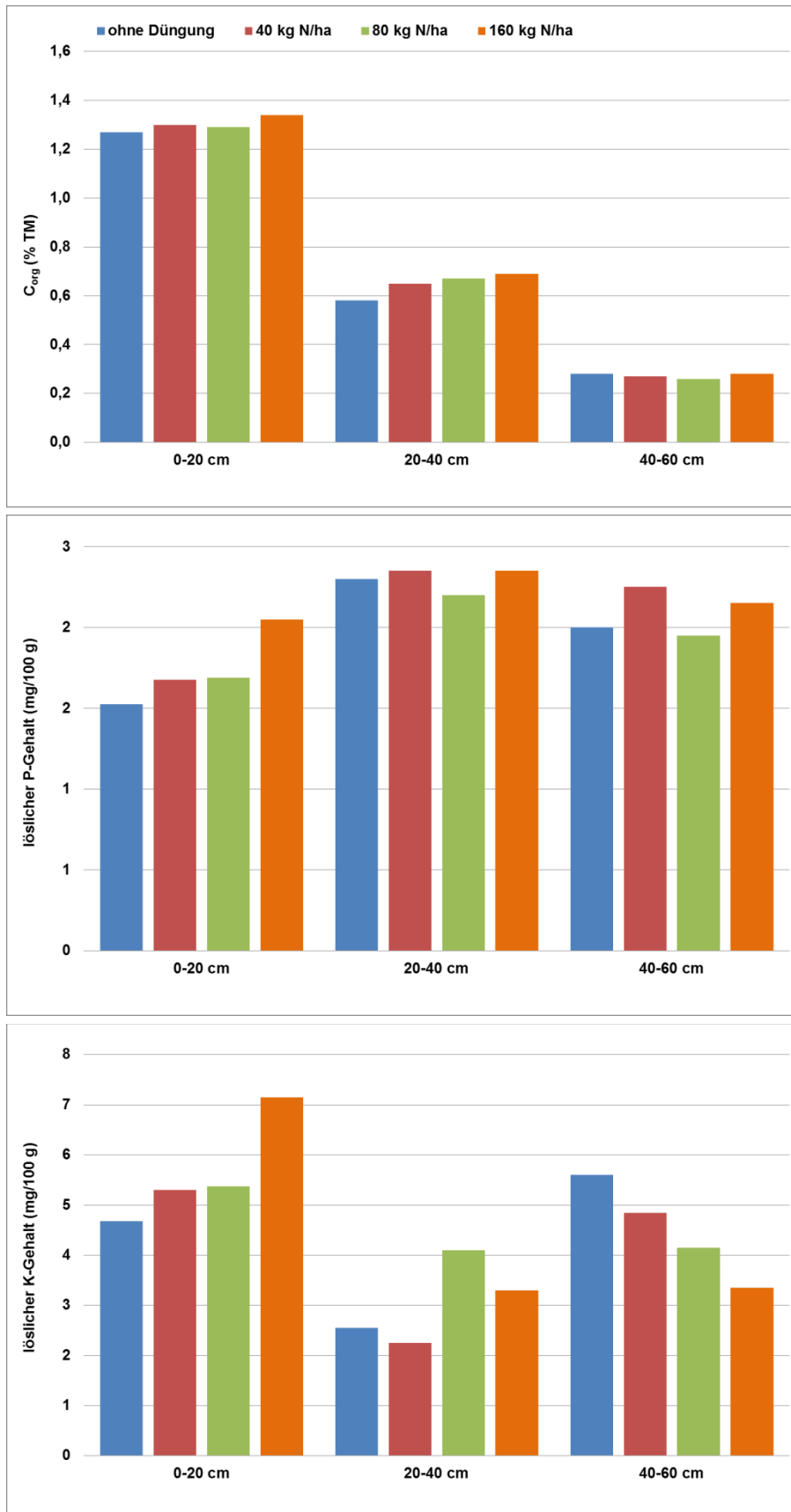


Abbildung 48: Einfluss der organischen Düngung auf die C_{org} -Gehalte (oben) sowie die löslichen P-Gehalte (Mitte) und K-Gehalte (unten) in der Ackerkrume und im Untergrund bis 60 cm Bodentiefe im Jahr 2011

3.2 Ergebnisse der P-Steigerung

Die Auswertung der Ergebnisse der P-Steigerungsreihe erfolgt in gleicher Weise wie bei den Varianten der organischen Düngung. Neben den Erträgen interessieren vor allem die Veränderungen in den Gehalten im Boden über den zwölfjährigen Versuchszeitraum. Vor Versuchsanlage wurden im Durchschnitt der 16 hierfür genutzten Einzelparzellen ein DL-P-Gehalt von 1,43 mg/100 g Boden bzw. ein CAL-P-Gehalt von 2,12 mg/100 g Boden in 0 – 20 cm Bodentiefe ermittelt. Damit sind die P-Gehalte in die Gehaltsklasse A (sehr niedrig) einzustufen.

3.2.1 Erträge der Fruchtarten

Entsprechend den niedrigen Ausgangsgehalten vor Anlage der Versuchsreihe war eine deutliche Reaktion der angebauten Fruchtarten auf die gesteigerte P-Zufuhr zu erwarten. Die unter den Anbaubedingungen des Ökolandbaus erzielten Erträge belegen allerdings nur einen verhaltenen Einfluss des eingesetzten Rohphosphats auf das Ertragsgeschehen. Es gab einzelne leichte Differenzierungen, die sich meistens jedoch nicht statistisch absichern lassen. In den Abbildungen 49 – 72 sind die gemittelten GE-Erträge in den jeweiligen P-Düngungsstufen mit den dazugehörigen Standardabweichungen sowie den Regressionsauswertungen abgebildet worden. Leichte Ertragsreaktionen finden sich, wie bereits beim gesteigerten Einsatz der organischen Dünger nachgewiesen, bei den Kartoffeln und im Jahr 2007 offenbar auch beim Winterweizen. Keine Reaktion zeigte sich beim angebauten Luzerne-Klee gras. In drei Versuchsjahren traten signifikante Blockeffekte auf. Betroffen davon war im Jahr 2003 die Wintergerste, in 2007 der Winterweizen und in 2011 das Klee gras.

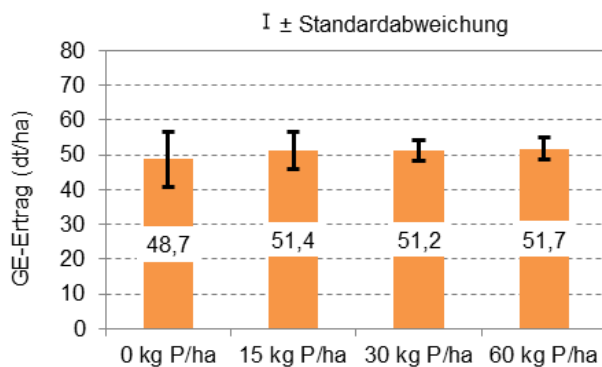


Abbildung 49: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2000

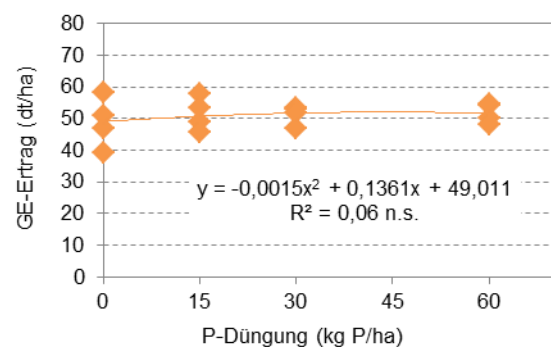


Abbildung 50: GE-Ertrag des Winterweizens in 2000 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

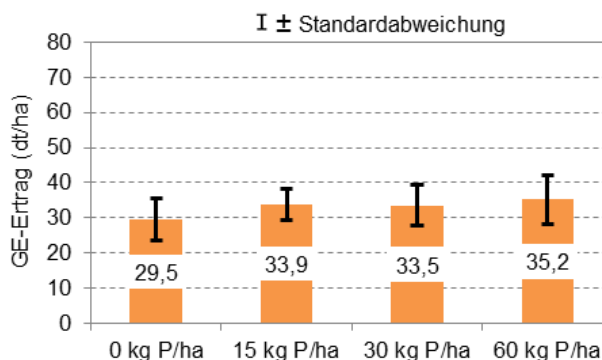


Abbildung 51: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2001

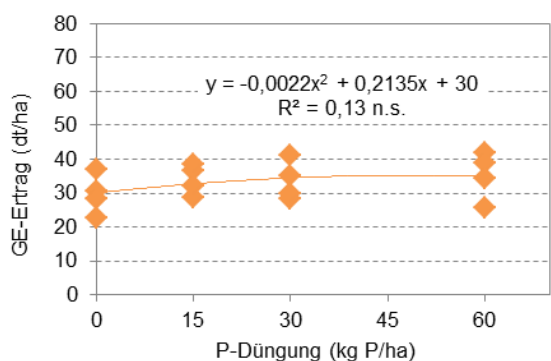


Abbildung 52: GE-Ertrag der Kartoffeln des Jahres 2001 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

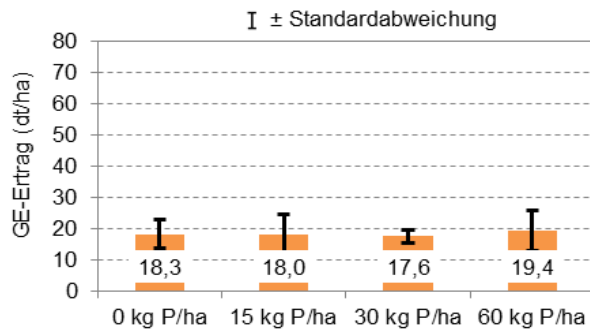


Abbildung 53: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen in 2002

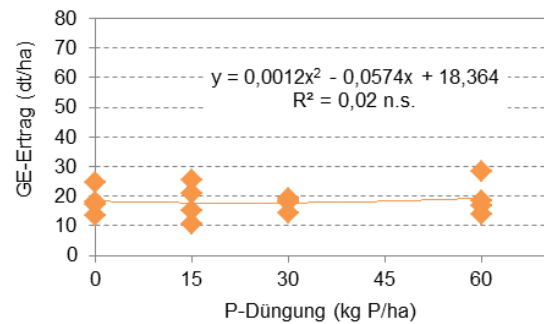


Abbildung 54: GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2002 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

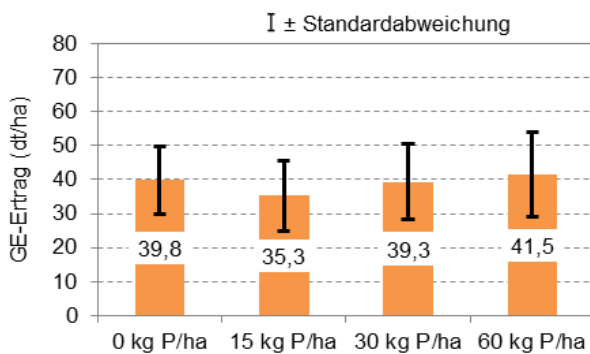


Abbildung 55: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste des Jahres 2003

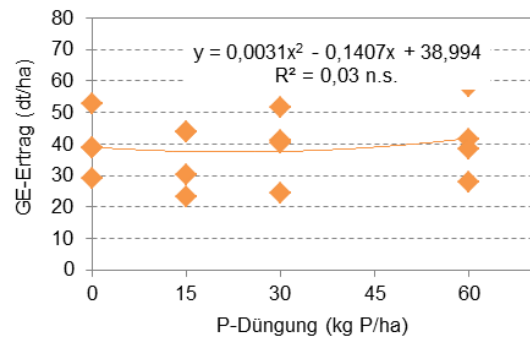


Abbildung 56: GE-Ertrag der Wintergerste in 2003 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

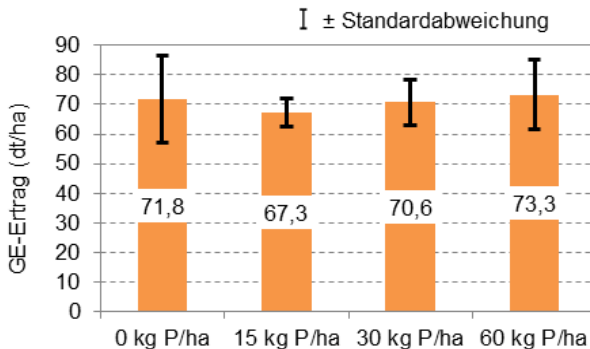


Abbildung 57: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases im Jahr 2004

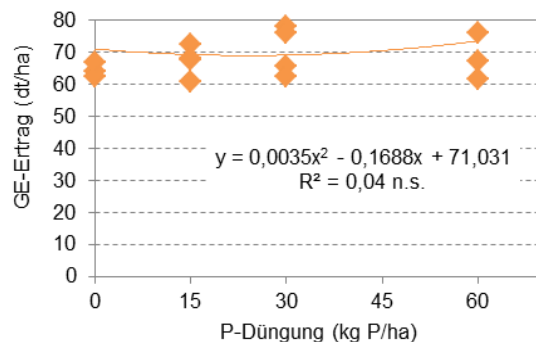


Abbildung 58: GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases in 2004 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

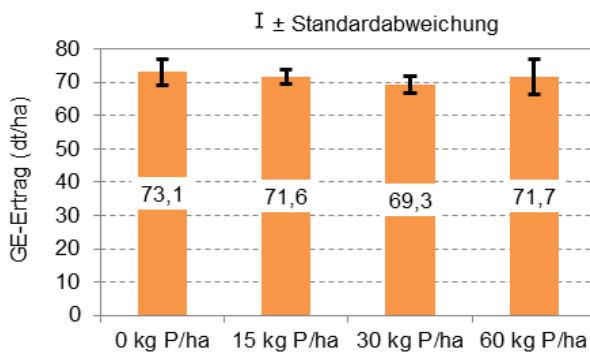


Abbildung 59: Mittlerer GE-Ertrag an Luzerne-Klee-gras im Jahr 2005

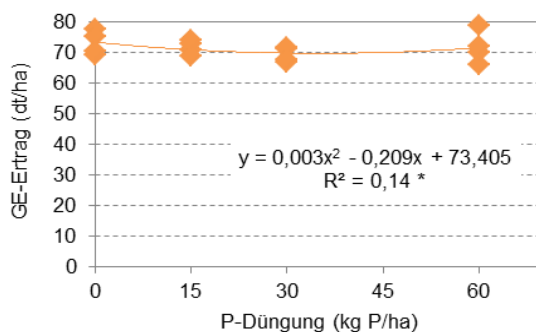


Abbildung 60: GE-Ertrag an Luzerne-Klee-gras in 2005 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

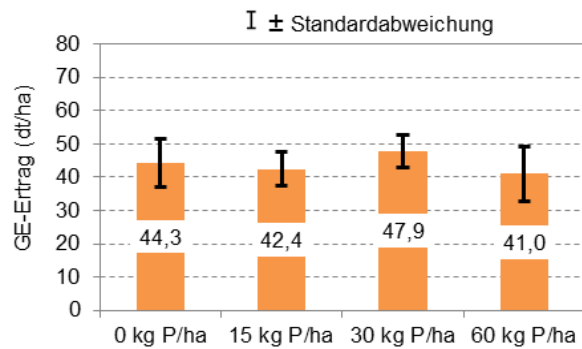


Abbildung 61: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2006

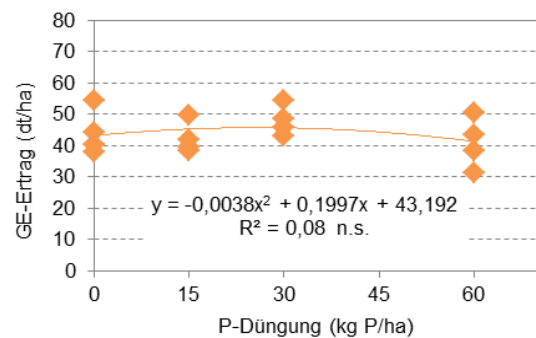


Abbildung 62: GE-Ertrag der Kartoffeln in 2006 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

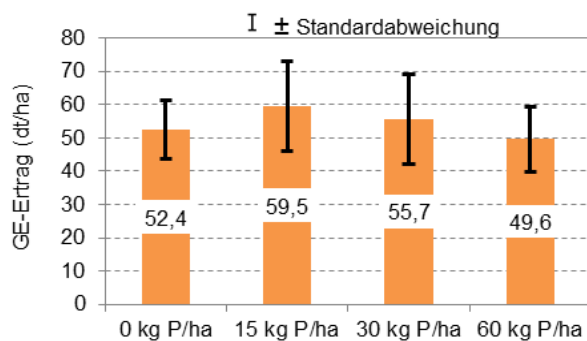


Abbildung 63: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens in 2007

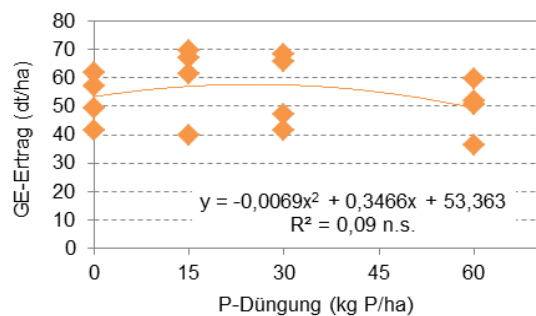


Abbildung 64: GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

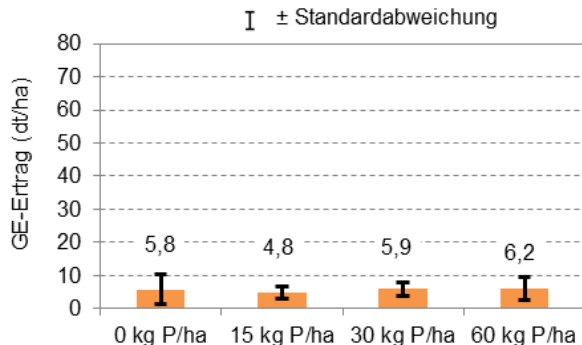


Abbildung 65: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen des Jahres 2008

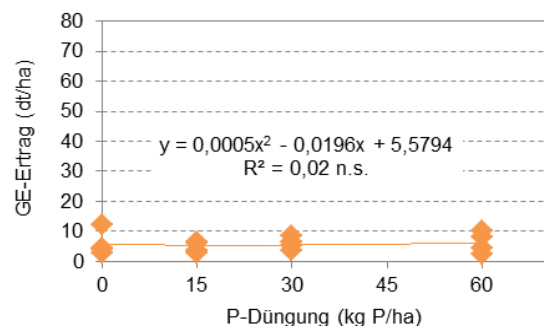


Abbildung 66: GE-Ertrag der Ackerbohnen in 2008 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

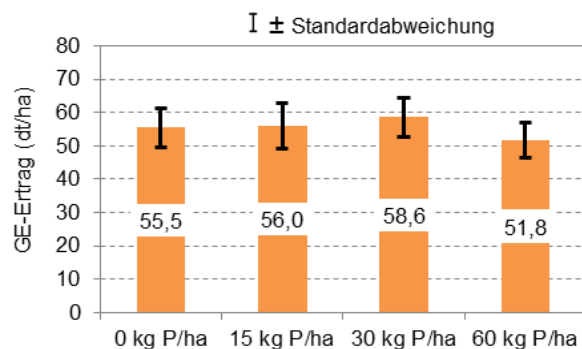


Abbildung 67: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste des Jahres 2009

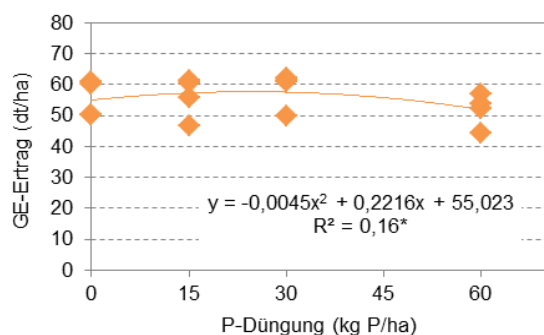


Abbildung 68: GE-Ertrag der Wintergerste im Jahr 2009 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

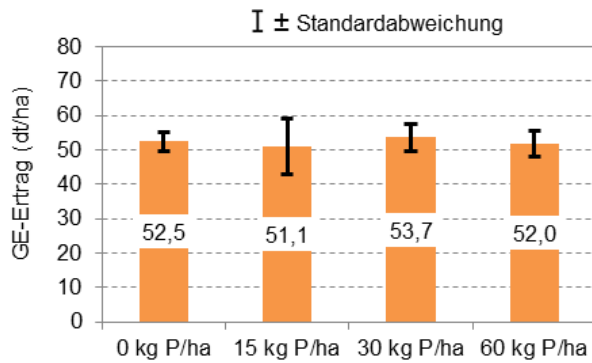


Abbildung 69: Mittlerer GE-Ertrag an Luzerne-Klee-gras des Jahres 2010

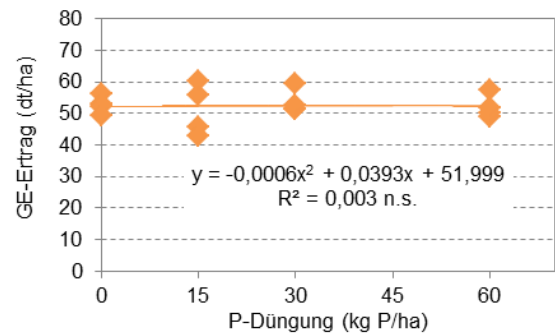


Abbildung 70: GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases in 2010 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

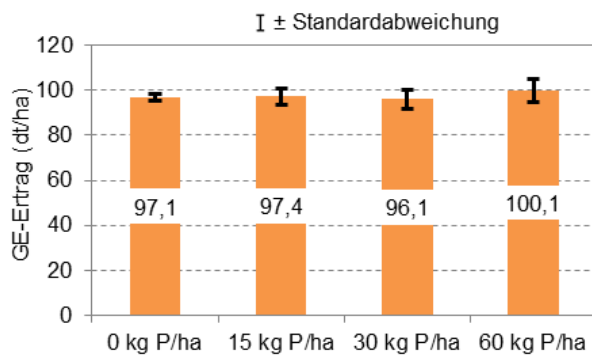


Abbildung 71: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases im Jahr 2011

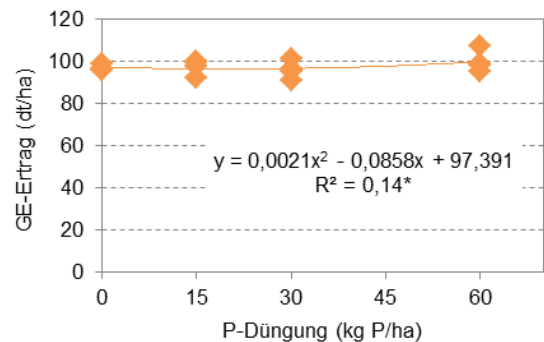


Abbildung 72: GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases in 2011 in Abhängigkeit von der P-Steigerung

Auf Grund der geringen Ertragseffekte durch die gesteigerte Rohphosphatversorgung gab es auf dem Löss-lehm auch nach Aggregation der Einzelergebnisse keine eindeutig gerichteten Wirkungen auf die GE-Erträge der Fruchtarten (Abb. 73 u. Abb. 74). Eine gewisse positive Wirkung der P-Düngung war auf den Kartoffelertrag zu erkennen. Auch die zusammengefassten Getreidearten zeigten in der Tendenz eine leichte ertragserhöhende Wirkung: 0 kg P/ha = 49,1 dt; 15 kg P/ha = 50,6 dt; 30 kg P/ha = 51,2 dt und 60 kg P/ha = 48,7 dt GE/ha. Auf die Erträge der Leguminosenarten hatte die P-Düngung keinen Einfluss.

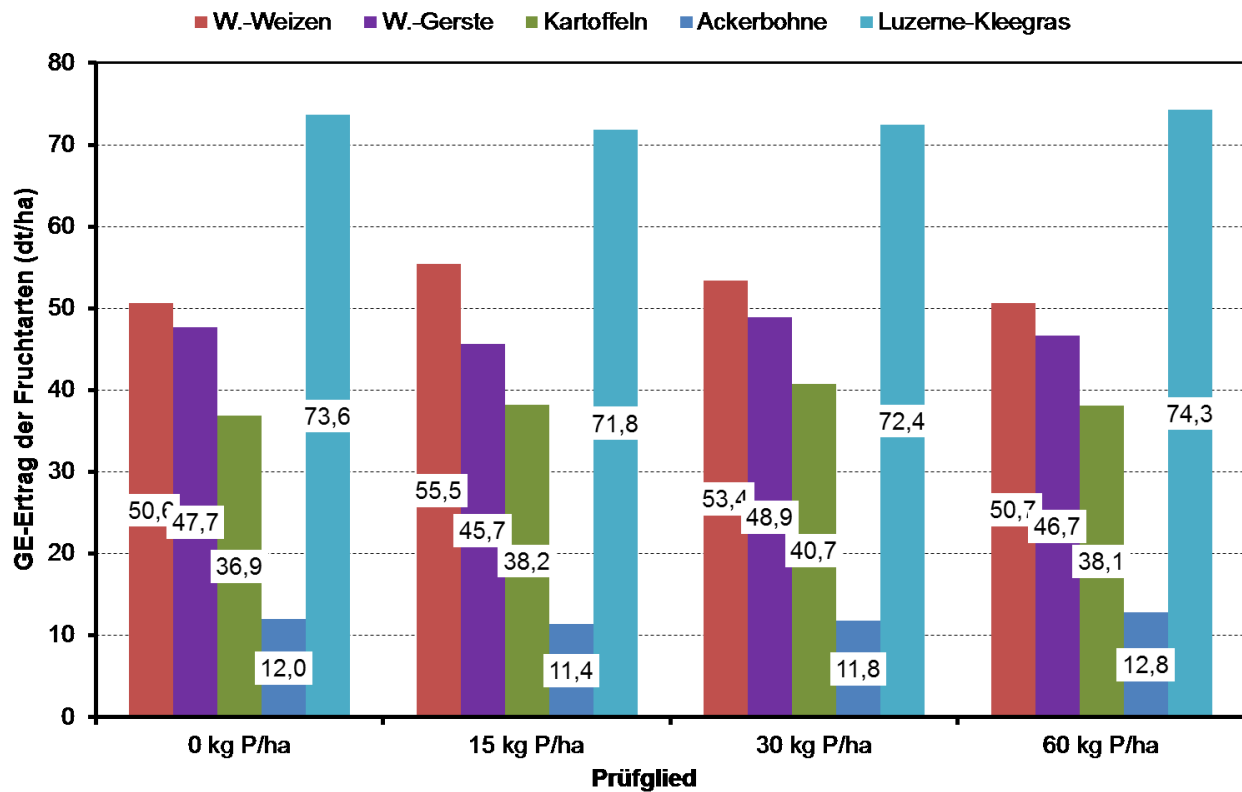


Abbildung 73: Einfluss der gestaffelten P-Düngung auf die zusammengefassten GE-Erträge der angebauten Fruchtarten

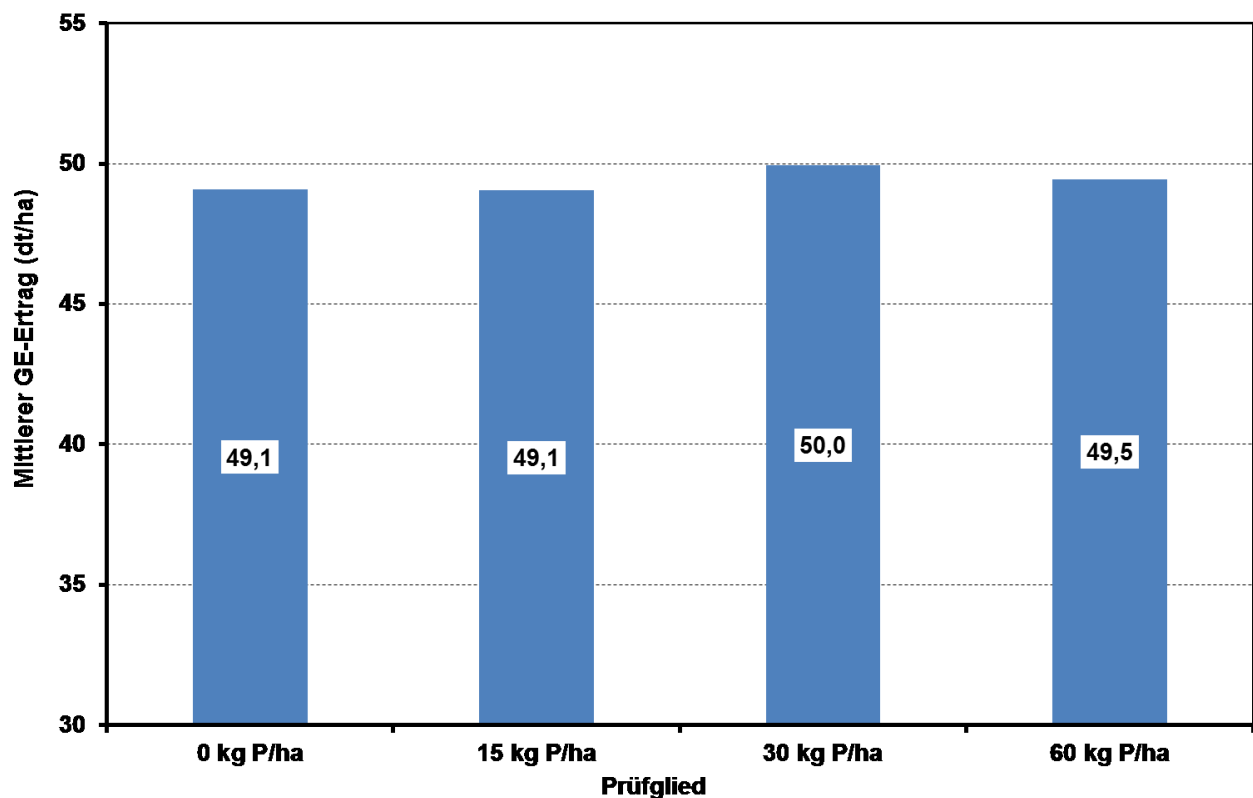


Abbildung 74: Einfluss der mineralischen P-Düngung auf die GE-Erträge im Durchschnitt der Fruchtarten

3.2.2 Inhaltsstoffe und weitere Merkmale der Fruchtarten

Auf die erfassten Inhaltsstoffe der angebauten Fruchtarten waren durch die gesteigerte P-Düngung keine wesentlichen Wirkungen eingetreten (Tab. 18 u. Tab. 19). Auch auf den Leguminosenanteil im Leguminosen-gras-Gemenge sowie auf die Menge an legumer N-Bindung von Ackerbohne und Futterleguminosen hat sich die unterschiedliche P-Düngung nicht ausgewirkt. Im Durchschnitt der angebauten Fruchtarten konnte der P-Gehalt in der höchsten Düngungsstufe im Vergleich zur Variante ohne Düngung im Erntegut um lediglich 0,02 % angehoben werden.

Tabelle 18: Durchschnittliche Gehalte an Inhaltsstoffen und anderen Merkmalen der angebauten Getreidearten in Folge steigender mineralischer P-Düngung

Haupt- bzw. Nebenprodukt:	Korn							Stroh				
Merkmal:	N	P	K	Mg	TKM	Ährentr. Halme	Wuchs- höhe	N	P	K	Mg	Lager
Dimension:	(% TM)				(g)	(je m²)	(cm)	(% TM)				(Bonitur)
Winterweizen												
0 kg P/ha	2,12	0,37	0,47	0,13	39,4	361,0	85,5	0,27	0,07	0,55	0,11	3,25
15 kg P/ha	2,13	0,37	0,46	0,13	39,5	386,0	83,5	0,25	0,06	0,60	0,11	3,25
30 kg P/ha	2,10	0,38	0,47	0,13	40,3	410,0	86,8	0,23	0,06	0,59	0,11	3,25
60 kg P/ha	2,11	0,38	0,46	0,13	40,6	383,0	85,0	0,22	0,05	0,58	0,11	3,25
Wintergerste												
0 kg P/ha	1,88	0,30	0,44	0,07	47,4	307,5	92,8	0,60	0,10	1,25	0,10	-
15 kg P/ha	1,93	0,30	0,43	0,07	46,7	309,0	92,3	0,68	0,10	1,22	0,12	-
30 kg P/ha	1,83	0,30	0,45	0,08	47,3	327,8	91,5	0,65	0,10	1,19	0,10	-
60 kg P/ha	1,81	0,31	0,46	0,09	47,0	309,8	91,5	0,73	0,13	1,21	0,12	-

Tabelle 19: Durchschnittliche Gehalte an Inhaltsstoffen und anderen Merkmalen von Kartoffeln, Ackerbohnen und Luzerne-Klee gras in Folge steigender mineralischer P-Düngung

Kartoffeln							
Haupt- bzw. Nebenprodukt:				Knollen			
Merkmal:	N	P	K	Mg	TM	Stärke	Krautfäule
Dimension:		(% TM)			(% FM)	(% TM)	(Bonitur)
0 kg P/ha	1,95	0,23	1,64	0,12	21,48	67,7	4,50
15 kg P/ha	1,88	0,21	1,61	0,11	22,20	64,6	3,75
30 kg P/ha	1,87	0,22	1,67	0,12	21,76	67,3	4,75
60 kg P/ha	1,84	0,20	1,54	0,11	21,69	65,7	4,25

Ackerbohnen							
Haupt- bzw. Nebenprodukt:				Korn		Gesamt-Pflanze	
Merkmal:	N	P	K	Mg	TKM	Legume N-Bindung	
Dimension:		(% TM)			(g)	(kg N/ha)	
0 kg P/ha	5,70	0,79	1,45	0,20	397,1	82,2	
15 kg P/ha	5,67	0,79	1,34	0,20	367,7	76,9	
30 kg P/ha	5,76	0,82	1,40	0,20	363,6	81,8	
60 kg P/ha	5,39	0,81	1,39	0,20	368,4	84,5	

Luzerne-Klee gras							
Haupt- bzw. Nebenprodukt:				Aufwuchs		Gesamt-Pflanze	
Merkmal:	N	P	K	Mg	TM	Leguminosen-Anteil	Legume N-Bindung
Dimension:		(% TM)			(% FM)	(%)	(kg N/ha)
0 kg P/ha	2,47	0,22	1,61	0,34	23,05	61,7	233,3
15 kg P/ha	2,47	0,22	1,69	0,33	22,50	59,3	225,8
30 kg P/ha	2,42	0,24	2,07	0,29	22,62	60,3	230,0
60 kg P/ha	2,49	0,23	1,96	0,35	22,09	60,0	244,2

3.2.3 Nährstoffbilanzen

Mit einem GE-Ertrag von 49 – 50 dt/ha im Durchschnitt der zwölf Versuchsjahre in den einzelnen P-Stufen (Abb. 75) blieb das Niveau zwischen dem ungedüngten Prüfglied und der Variante mit 40 kg N/ha in der Steigerungsreihe mit organischem Dünger (vgl. Abb. 31). Ein Ausdruck für die geringe Wirkung des eingesetzten P-Düngers sind dann auch die aus den Erträgen und deren Inhaltsstoffen ermittelten P-Entzüge. Im Durchschnitt der Versuchsjahre zeigen sich zwischen den P-Steigerungsstufen kaum Unterschiede. In Abhängigkeit von der P-Zufuhr ergaben sich entsprechende negative sowie positive P-Salden (Tab. 20). Kaum Unterschiede hingegen weisen die N- und K-Salden zwischen den einzelnen Prüfgliedern auf.

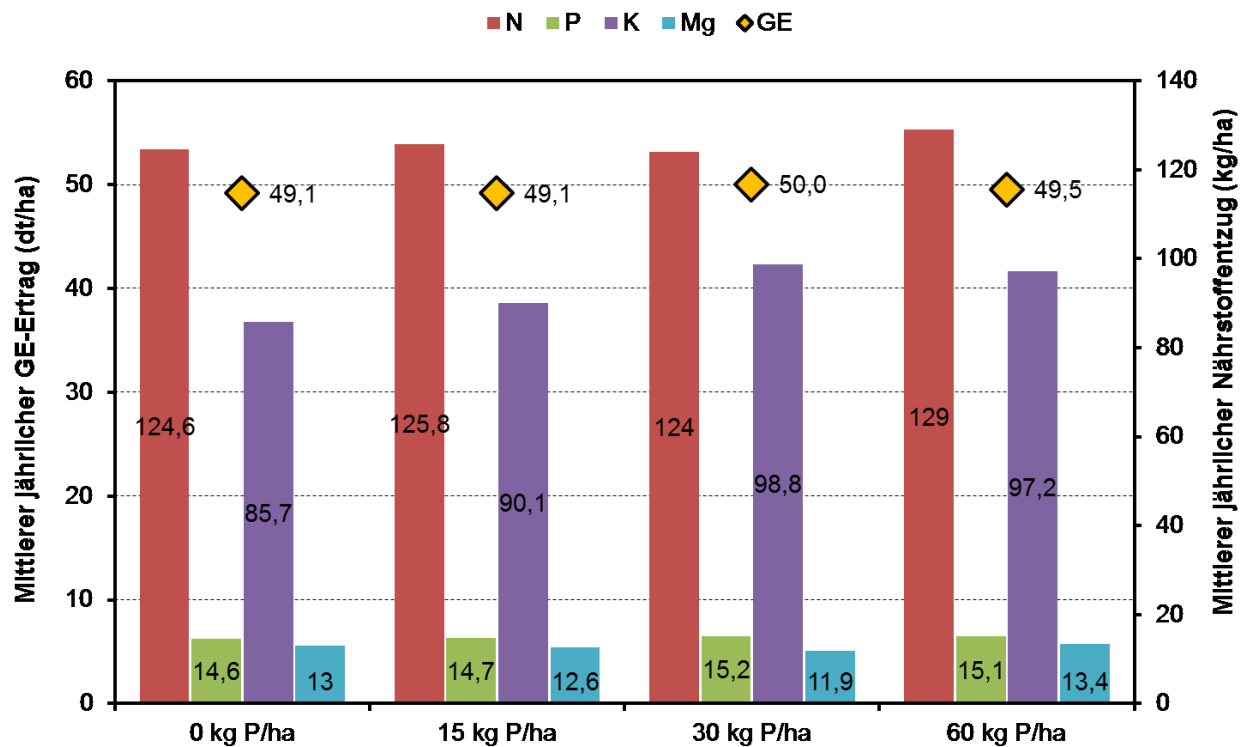


Abbildung 75: Mittlerer GE-Ertrag und mittlerer jährlicher Nährstoffentzug in der P-Steigerungsreihe

Auf dem Versuchsstandort war zwischen den Einzeljahren eine sehr große Differenzierung der P-Abfuhr mit dem Ertrag der Fruchtarten beobachtet worden (Abb. 76). Dabei gab es allerdings keine düngungsbedingten Unterschiede. In der Abbildung ist der Vergleich zwischen der ungedüngten und der Stufe mit 15 kg P/ha als Dolophos dargestellt, bei der über die Jahre eine ausgeglichene P-Bilanz verzeichnet wurde. Die Unterschiede zwischen den Jahren fanden sich auch mit gleichem Niveau in den beiden anderen P-Stufen (Abb. 77).

Tabelle 20: Einfache Schlagbilanz der Prüfglieder mit gesteigertem P-Einsatz in Form von Dolophos

Prüfglied	Zufuhr		Abfuhr	Saldo
	Mineralische Dünger	Symbiot. N-Bindung		
		(kg Reinnährstoff/ha u. Jahr)		
Stickstoff				
ohne Düngung	0	91,5	124,6	-33,1
15 kg P/ha	0	88,1	125,8	-37,7
30 kg P/ha	0	90,3	124,0	-33,7
60 kg P/ha	0	95,5	129,0	-33,5
Phosphor				
ohne Düngung	0	-	14,6	-14,6
15 kg P/ha	15	-	14,7	0,3
30 kg P/ha	30	-	15,2	14,8
60 kg P/ha	60	-	15,1	44,9
Kalium				
ohne Düngung	40	-	85,7	-45,6
15 kg P/ha	40	-	90,1	-50,1
30 kg P/ha	40	-	98,8	-58,9
60 kg P/ha	40	-	97,2	-57,2
Magnesium				
ohne Düngung	0	-	13,0	-13,0
15 kg P/ha	10	-	12,6	-2,6
30 kg P/ha	20	-	11,9	8,1
60 kg P/ha	40	-	13,4	26,6

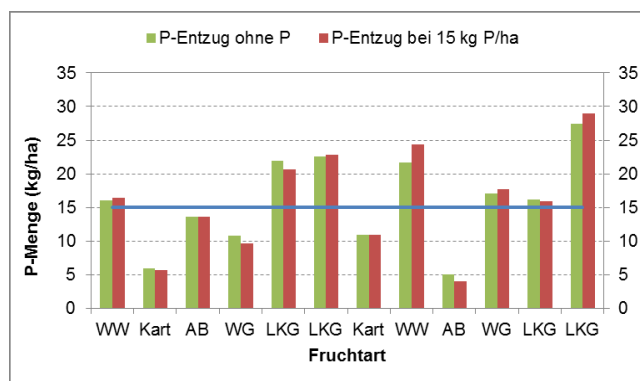


Abbildung 76: Übersicht zu den mittleren jährlichen P-Entzügen in den Stufen ohne und mit 15 kg P/ha (blaue Linie = 15 kg/ha P-Zufuhr)

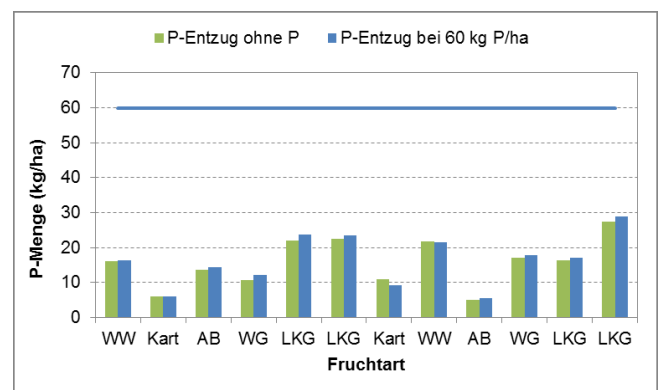


Abbildung 77: Übersicht zu den mittleren jährlichen P-Entzügen in den Stufen ohne und mit 60 kg P/ha (blaue Linie = 60 kg/ha P-Zufuhr)

3.2.3 Entwicklung der verschiedenen Bodenparameter

Laktatlösliche P-Gehalte

In Abbildung 78 ist die Entwicklung der DL-P-Gehalte in den Stufen der Phosphatsteigerung dargestellt worden. Die Probenahme erfolgte jeweils nach der Ernte der angebauten Früchte im Herbst. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte der vier Wiederholungen. Die Auswirkungen der P-Düngung auf den Boden sind deutlich ausgeprägt. Im Verlauf der Versuchsdurchführung ergab sich eine signifikante Differenzierung zwischen den einzelnen Steigerungsstufen. Die Messwerte sind im Versuchszeitraum allerdings nicht kontinuierlich angestiegen. Es ergaben sich zwischen den Prüfgliedern Schwankungen zwischen den Jahren, die bei entsprechend hohem P-Einsatz auch deutlich ausgeprägt waren (vgl. Tab. 21).

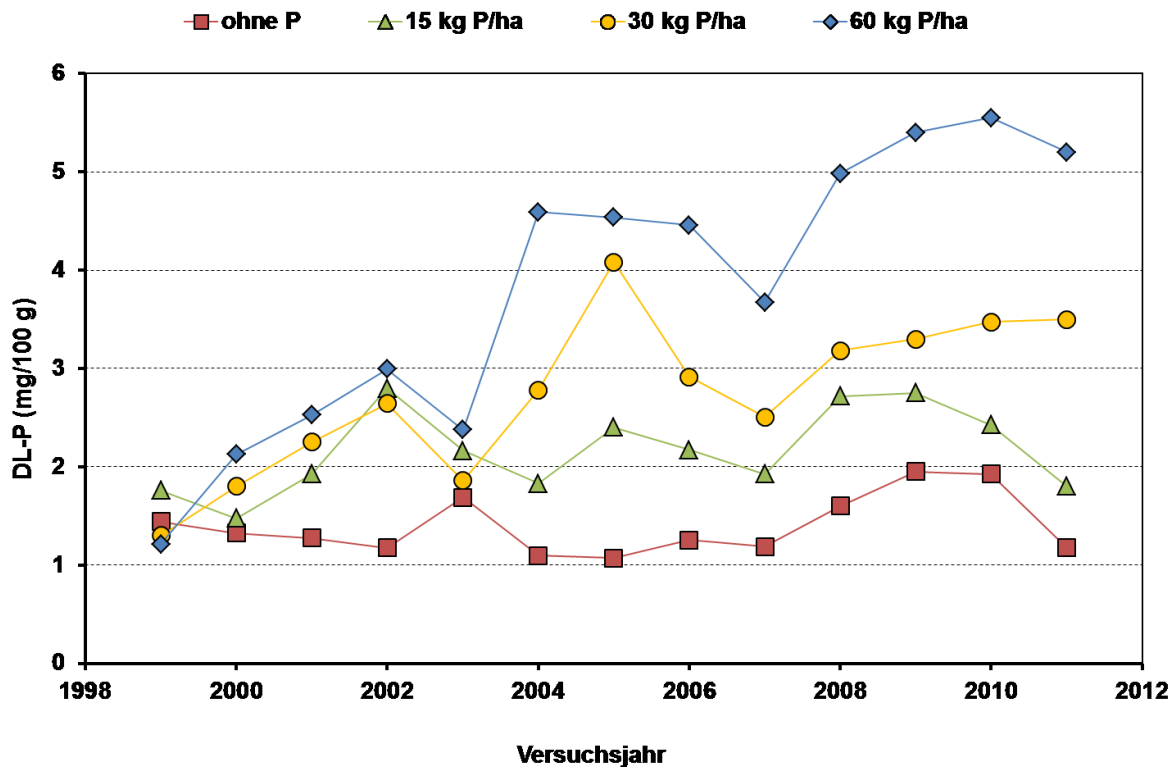


Abbildung 78: Entwicklung der DL-P-Gehalte in Folge steigender Phosphatdüngung (Durchschnitt von vier Wiederholungen)

Die Feststellung, dass das Niveau auf dem sich die Unterschiede zwischen den Varianten von Jahr zu Jahr darstellen erheblich wechseln kann, stimmt mit den Erfahrungen aus vielen Dauerversuchen überein. Eine Zusammenfassung der Werte jeweils über drei Jahre gleicht diese Fluktuationen aus und es ist ein recht kontinuierlicher Anstieg der P-Gehalte zu erkennen (Abb. 79, Tab. 21).

Bemerkenswert ist auch, dass in dem Prüfglied ohne P-Zufuhr die gemessenen Werte in etwa auf gleicher Höhe geblieben sind. Bei mittleren Entzügen von 16 kg P/ha und Jahr wird anscheinend aus dem stabilen Pool des Bodens kontinuierlich lösliches Phosphat nachgeliefert. Das ist insofern auch nicht verwunderlich, da in der Bodenschicht von 0 – 20 cm Tiefe immerhin noch mehr als 1500 kg P/ha vorhanden sind (vgl. Tab. 25). Da zudem die P-Aufnahme auch aus tieferen Bodenschichten erfolgt, betrug die gesamte aufgenommene Menge deutlich weniger als 1 % vom gesamten P-Pool dieser Bodenschicht.

Zwischen dem Anstieg der mittels DL-Extrakt ermittelten Bodengehalte und dem Ertragsgeschehen ergibt sich nach den bisherigen Auswertungen insofern ein Widerspruch, da die Anreicherung im Boden sich nicht entsprechend im Ertrag und nicht in dem damit einhergehenden P-Entzug wiederfindet.

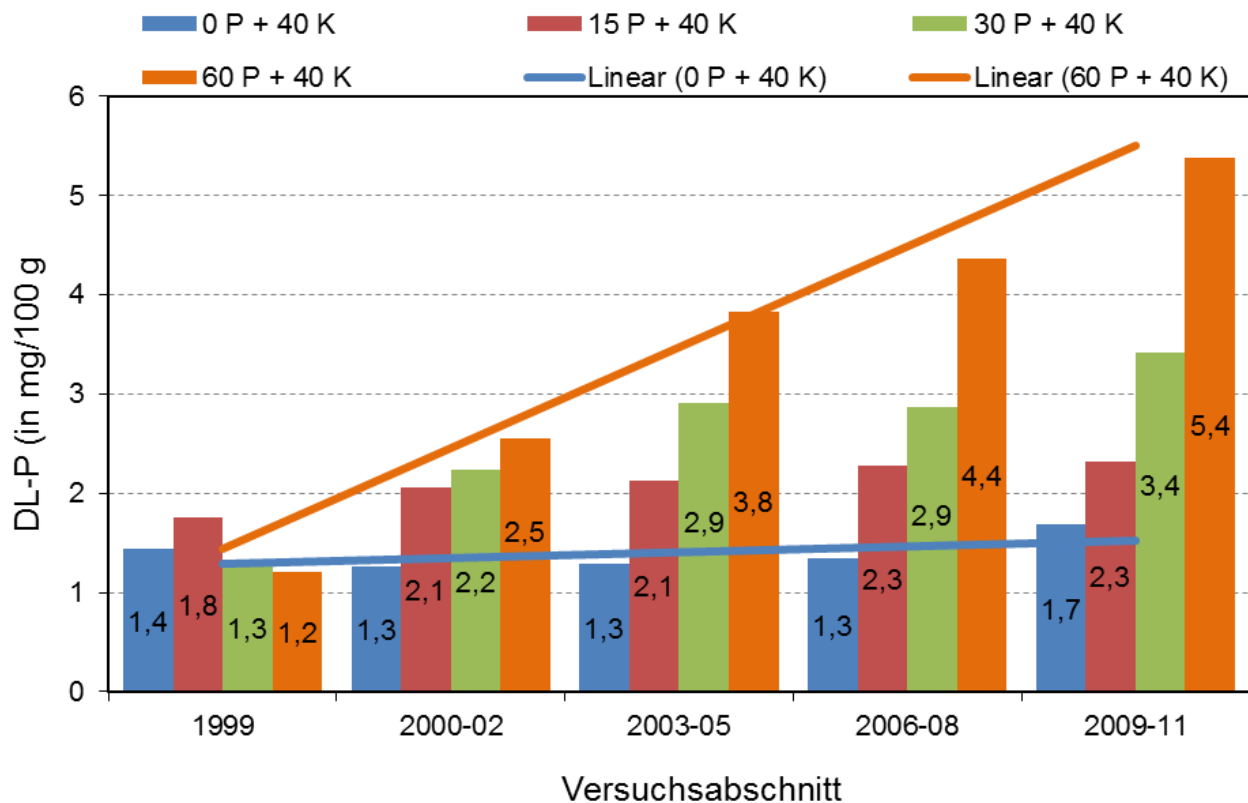


Abbildung 79: Entwicklung der P-Bodengehalte nach Extraktion mit Doppellaktatlösung in der Phosphatsteigerungsreihe im Verlauf von 5 zeitlich zusammengefassten Phasen der zwölfjährigen Versuchsdurchführung

Tabelle 21: Veränderungen in den DL-P-Gehalten der jeweiligen Düngungsstufen im Verlauf der Versuchsdurchführung

Versuchsjahr	Düngungsstufen (mg P/100g Boden)			
	ohne P	15 kg P/ha	30 kg P/ha	60 kg P/ha
Ausgangswerte (1999)	1,44	1,76	1,30	1,21
2000	1,33	1,48	1,80	2,13
2001	1,28	1,93	2,25	2,53
2002	1,18	2,80	2,65	3,00
2003	1,69	2,16	1,86	2,38
2004	1,10	1,83	2,78	4,59
2005	1,07	2,40	4,08	4,54
2006	1,25	2,17	2,91	4,46
2007	1,19	1,93	2,51	3,68
2008	1,60	2,72	3,18	4,98
2009	1,95	2,75	3,30	5,40
2010	1,93	2,43	3,48	5,55
2011	1,18	1,80	3,50	5,20

Anders als die in der DL-Lösung ermittelten Gehalte reagierte das im CAL-Extrakt bestimmte Phosphat nur sehr undeutlich auf die gestaffelten Rohphosphatgaben. Während vor Anlage der Versuchsserie zwischen den DL- und den CAL-Werten eine enge Beziehung bestand, ist nach zwölfjähriger Versuchsdurchführung dies nicht mehr der Fall (Abb. 80). Im Vergleich dazu traten in den Prüfgliedern mit organischer Düngung diese Unterschiede nicht auf (Abb. 81). Zu bemerken ist jedoch, dass die etwas größere Differenzierung der CAL-P-Einzelwerte im Verlauf des Versuchszeitraums nicht mehr vorhanden war.

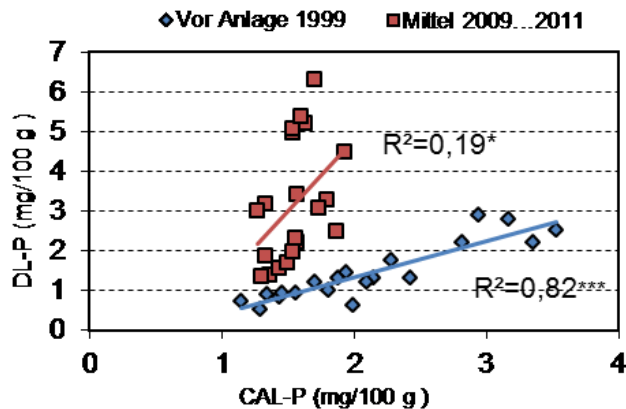


Abbildung 80: Beziehungen zwischen den mit unterschiedlichen P-Extraktionsmitteln vor Anlage und zum Ende der Versuchsdurchführung ermittelten P-Gehalte der Varianten mit steigender mineralischer P-Zufuhr

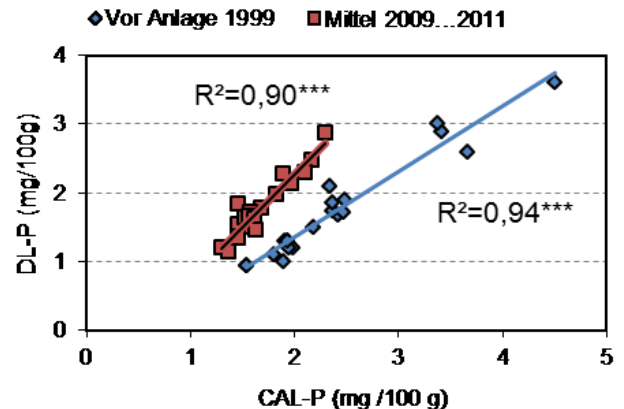


Abbildung 81: Beziehungen zwischen den an den jeweils gleichen Bodenproben gemessenen CAL-P- und den DL-P-Gehalten vor Anlage und zum Ende der Versuchsserie mit organischer Düngung (vgl. Kap. 3.1)

Die mittels CAL-Extrakt bestimmten Messwerte erfahren über die Zeit keine wesentlichen Veränderungen. Es ergaben sich zum Versuchsende die in Abbildung 82 dargestellten Verhältnisse in den jeweiligen P-Stufen. Während die P-Steigerung bei den DL-P-Werten einen signifikanten Unterschied aufwies, erfuhren die CAL-Werte keine deutliche Differenzierung und verblieben weitgehend im Bereich des Ausgangsniveaus. Zur Verdeutlichung der Entwicklung der jeweiligen Werte erfolgt in Abbildung 83 ein zeitlicher Vergleich der Ergebnisse auf der Düngungsstufe mit 60 kg P/ha. Bereits für den Versuchsabschnitt der Jahre 2000 – 2002 traten zwischen den beiden Extraktionsmitteln signifikante Unterschiede auf. Sichtbar wird auch die Zunahme über die Versuchsdauer bei den DL-löslichen P-Gehalten und das von dieser Entwicklung unbeeinflusste CAL-lösliche Phosphat.

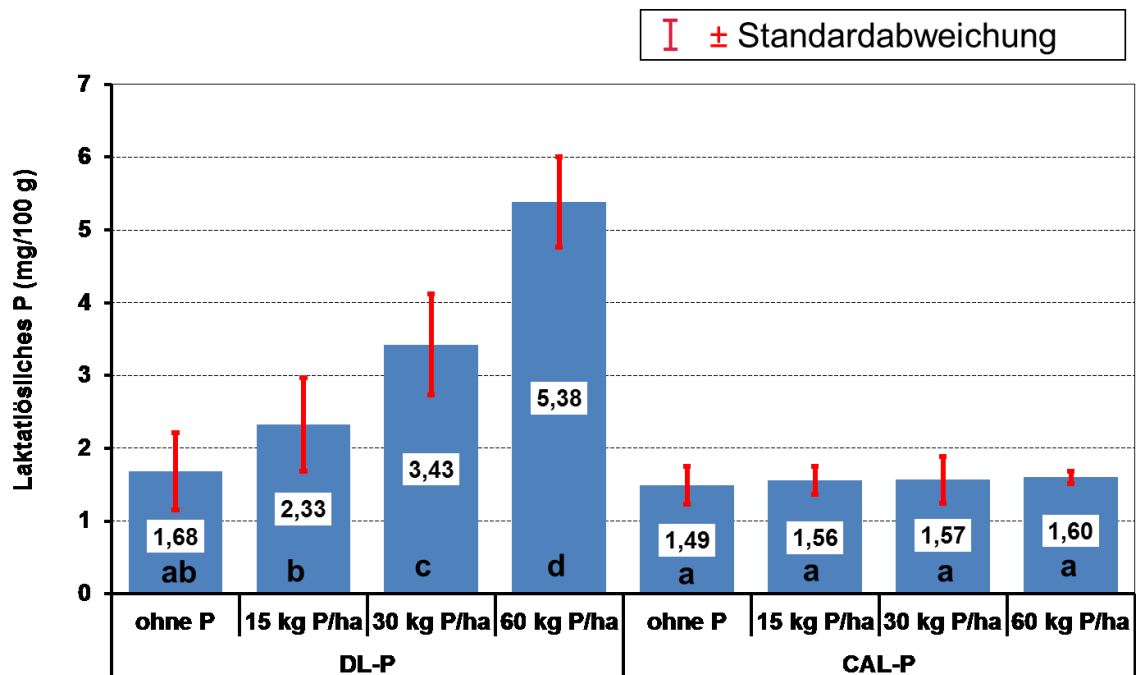


Abbildung 82: Einfluss des Extraktionsmittels auf die ermittelten P-Gehalte (Mittelwerte der Jahre 2009 – 2011)

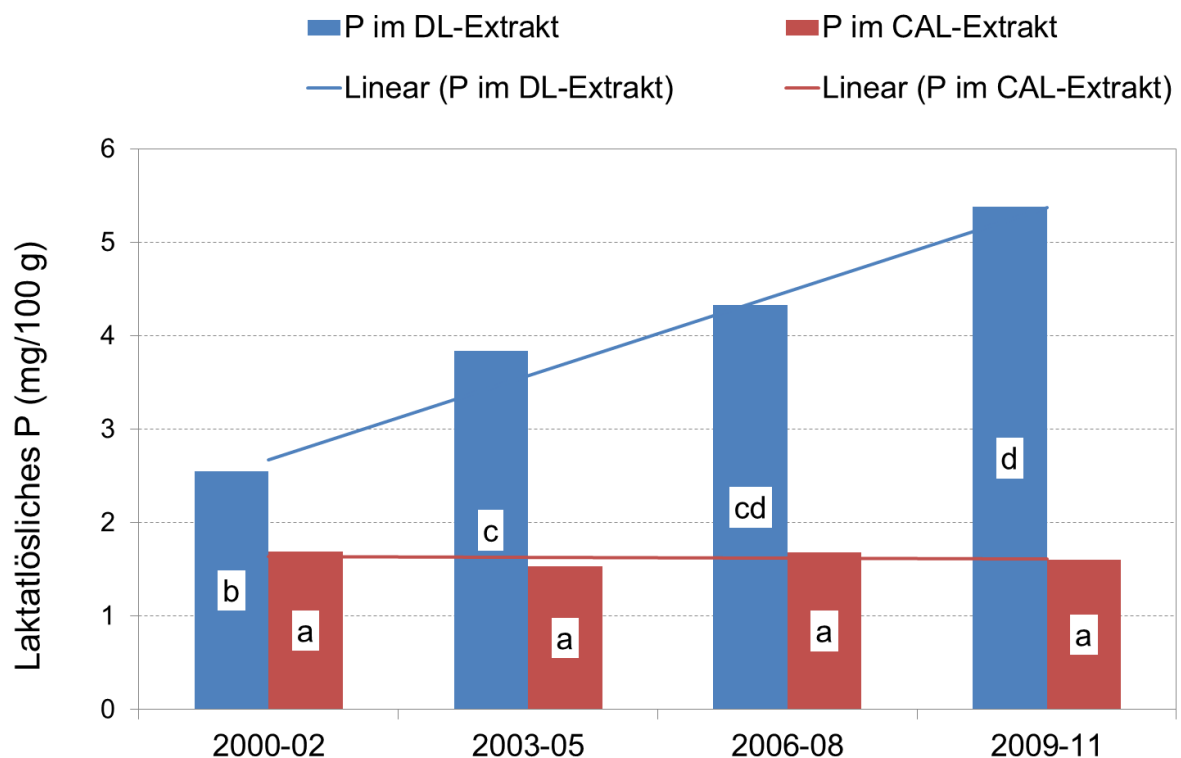


Abbildung 83: Ermittelte P-Gehalte in der Ackerkrume in der Stufe mit 60 kg P/ha als Dolophos in Abhängigkeit vom Extraktionsmittel (DL- bzw. CAL-Extrakt) in den einzelnen Versuchsabschnitten

Aus den jährlich gemessenen Einzelwerten der P-Gehalte wurden Regressionsfunktionen berechnet, um die mittleren jährlichen Veränderungen in den löslichen Nährstoffgehalten im Verlauf der Versuchsdurchführung möglichst genau zu bestimmen (Tab. 22). In der Stufe mit 60 kg P/ha als Rohphosphat ergab sich, dass der DL-P-Gehalt jährlich um 0,32 mg/100 g Boden angestiegen ist. Die CAL-P-Anreicherung ist mit ca. 0,03 mg P/100 g Boden dagegen deutlich geringer. Hierbei wurden jedoch die singulär stark erhöhten CAL-P-Werte vor Versuchsbeginn (1999) von der Verrechnung ausgeschlossen.

Überraschend ist dann allerdings, dass sich trotz negativer Nährstoffbilanz (siehe Tab. 20) in dem ungedüngten Prüfglied kein Anstieg (CAL-P) oder sogar ein leichter positiver Wert ergibt (DL-P). Dies ist sicher auch ein Indiz dafür, dass durch entsprechende Umsetzungen von organischer Substanz die Pflanzenverfügbarkeit der P-Reserven des Bodens verbessert wird, was in dieser Fruchtfolge bereits durch den hohen Anteil an Klee-gras gegeben sein kann.

Tabelle 22: Veränderung der Gehalte an Grundnährstoffen im Boden je Versuchsjahr nach steigender mineralischer P-Düngung

Prüfglied	DL-P	CAL-P	DL-K	CAL-K
	(mg/100 g)			
0 kg P/ha	0,0167	0,0000	0,2250	0,0125
15 kg P/ha	0,0333	-0,0033	0,1292	-0,0458
30 kg P/ha	0,1417	0,0167	0,3292	0,1417
60 kg P/ha	0,3167	0,0250	0,4208	0,1583

Die in Tabelle 23 dargestellten Korrelationskoeffizienten zwischen den GE-Erträgen und den P-Gehalten des Bodens basieren auf den Einzelmesswerten der Parzellen. Damit wird die zwischen den Blöcken vorhandene Streuung berücksichtigt. Da in Abhängigkeit von der ausgebrachten P-Menge keine wesentliche Ertragsbeeinflussung erfolgte, verwundert es auch nicht, dass mit zunehmender Versuchsdauer und der Differenzierung im DL-P-Gehalt der Ackerkrume kein ausgeprägter Zusammenhang zwischen den Bodengehalten und den GE-Erträgen, insbesondere im zweiten Versuchsabschnitt, auftrat. Da die CAL-P-Gehalte nur schwache Unterschiede aufwiesen, konnte zu den GE-Erträgen ebenfalls keine deutlichen Zusammenhänge erwartet werden. Im Vergleich zur PEARSON-Korrelation bringt die Rangkorrelation nach SPEARMAN keine bessere Aussage. Es ist aber auch zu bedenken, dass zwischen den Bodengehalten an Phosphat und den GE-Erträgen in der ersten Versuchsphase (2000 – 2005) z. T. hochsignifikante Korrelationskoeffizienten aufgetreten sind, besonders zu den Fruchtarten Kartoffeln, Wintergerste und teilweise auch beim Luzerne-Klee-gras. Insgesamt scheinen die CAL-löslichen Bodengehalte etwas enger mit den GE-Erträgen korreliert zu sein als die DL-löslichen P-Gehalte. Eine Gegenüberstellung der Korrelationswerte der Tabelle 23 mit den aufgetretenen Wetterdaten, insbesondere den Niederschlägen im Bereich zwischen März bis Juni, brachte keine gesicherten Erkenntnisse (ohne Darstellung).

Tabelle 23: Korrelationskoeffizienten zwischen den GE-Erträgen und den in den jeweiligen Ertragsjahren nach der Ernte ermittelten P-DL- und P-CAL-Werten der Einzelparzellen

Merkmal	GE-Ertrag												
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009*	2010*	2011	MW
	WW	Kart	AB	WG	LKG	LKG	Kart	WW	AB	WG	LKG	LKG	-
PEARSON-Korrelation DL-P													
Korrelationskoeffizient	0,40	0,67	-0,20	0,71	0,45	-0,21	-0,21	0,30	0,04	-0,01	0,1	0,30	0,195
einseitige Signifikanz	n.s.	++	n.s.	+++	+	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-
PEARSON-Korrelation CAL-P													
Korrelationskoeffizient	0,59	0,78	-0,08	0,79	0,61	-0,21	-0,19	0,64	-0,09	0,54	-0,00	-0,25	0,261
einseitige Signifikanz	++	+++	n.s.	+++	++	n.s.	n.s.	++	n.s.	+	n.s.	n.s.	-
SPEARMAN-Rangkorrelation DL-P													
Korrelationskoeffizient	0,38	0,65	0,02	0,73	0,44	-0,17	-0,03	0,42	0,00	0,13	-0,08	0,07	0,213
einseitige Signifikanz	n.s.	++	n.s.	+++	+	n.s.	n.s.	+	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-
SPEARMAN-Rangkorrelation CAL-P													
Korrelationskoeffizient	0,63	0,85	0,24	0,74	0,66	-0,03	-0,16	0,69	0,00	0,50	-0,05	-0,39	0,307
einseitige Signifikanz	++	+++	n.s.	+++	++	n.s.	n.s.	++	n.s.	+	n.s.	n.s.	-

* In den Jahren 2009 und 2010 wurde die Tiefe von 0 - 30 cm beprobt.

Wasserlösliche P-Gehalte

An den Prüfgliedern ohne Düngung, 160 kg N/ha als organische Düngung (siehe Kap. 3.1) und der höchsten P-Steigerungsstufe (60 kg P/ha) wurde in Proben der Jahre 2010 und 2011 das wasserlösliche Phosphat ermittelt. Die in Abbildung 84 dargestellten Werte zeigen die nach sechsmaliger Wasserextraktion in Lösung gegangenen P-Mengen. Bei insgesamt großer Streuung der Einzelwerte ergab sich, dass das Prüfglied mit organischer Düngung die größte Nachlieferung erbrachte. In der Summe der Einzelwerte zeigt sich zwischen dem Prüfglied ohne Düngung und der höchsten P-Steigerungsstufe kein deutlicher Unterschied. Ab der fünften Extraktion bleiben die Unterschiede gering und die Streuungen zwischen den Einzelwerten nehmen ab.

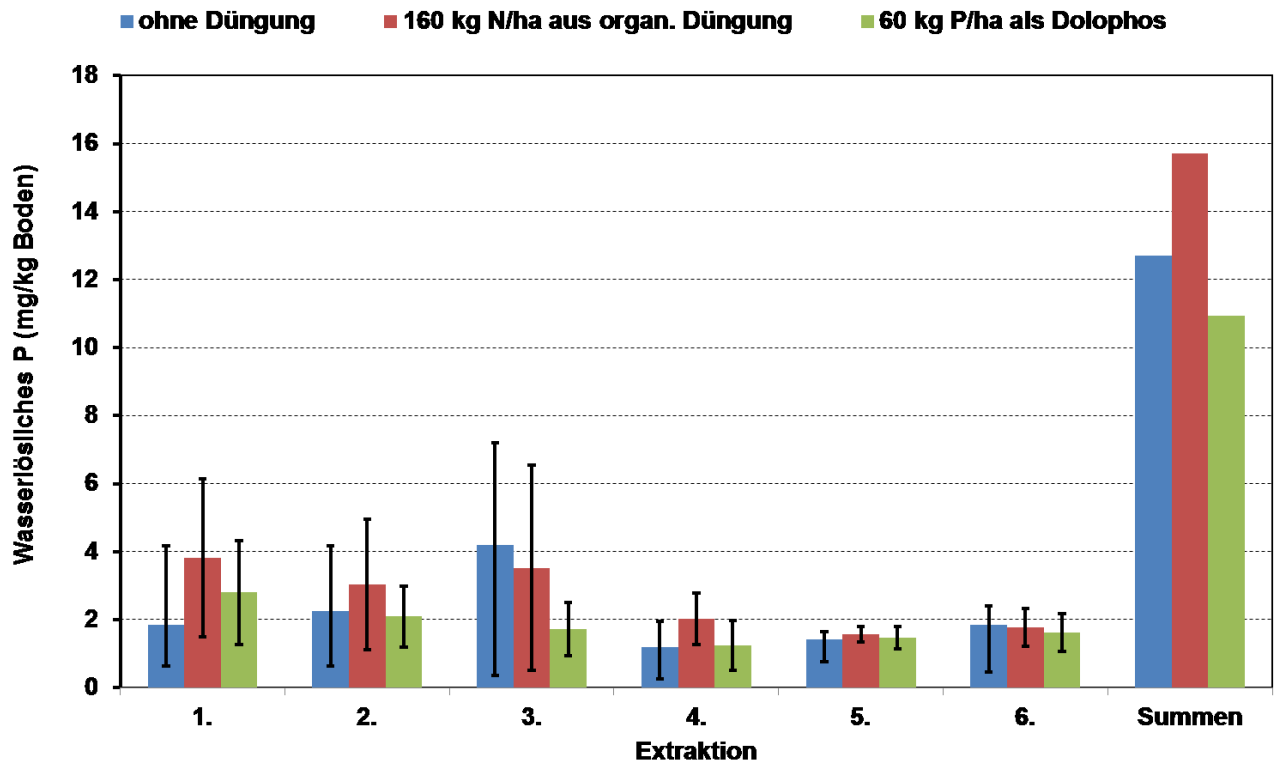


Abbildung 84: Ergebnisse zur Wasserlöslichkeit des P in drei Prüfgliedern

P_t-Gehalte und Unterbodenphosphat

Besonders in trockeneren Lagen ist neben der Wasserversorgung der Unterboden auch ein wichtiger Nährstofflieferant. Die aus den Jahren 2003 und 2011 vorliegenden Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Bodenschicht von 20 – 60 cm Tiefe über ähnlich niedrige laktatlösliche Gehalte wie die ungedüngte Ackerkrume verfügt (Tab. 24). Nach Darstellung der löslichen P-Gehalte (als Mittelwerte aus DL- und CAL-Werten) kann doch verhältnismäßig eindeutig aufgezeigt werden, dass die steigende Düngung mit Dolophos auch eine gewisse Anreicherung der Gehalte in der Schicht 20 – 40 cm Bodentiefe bewirkt hat (Abb. 85).

Tabelle 24: Laktatlösliches P (mg/100 g Boden) im Unterboden aus den Jahren 2003 und 2011

Prüfglied	Versuchsjahr 2003				Versuchsjahr 2011			
	CAL-P		DL-P		CAL-P		DL-P	
	20 – 40 cm	40 – 60 cm	20 – 40 cm	40 – 60 cm	20 – 40 cm	40 – 60 cm	20 – 40 cm	40 – 60 cm
0 kg P/ha	1,7	1,7	1,4	1,1	2,3	-	1,5	-
15 kg P/ha	1,9	2,2	1,6	1,9	2,6	2,5	2,3	1,5
30 kg P/ha	1,8	1,4	1,6	0,9	2,7	2,7	2,5	2,7
60 kg P/ha	1,8	2,2	1,4	1,7	2,7	3,0	3,0	1,9
Mittelwert	1,8	1,9	1,5	1,4	2,6	3,1	2,3	2,5

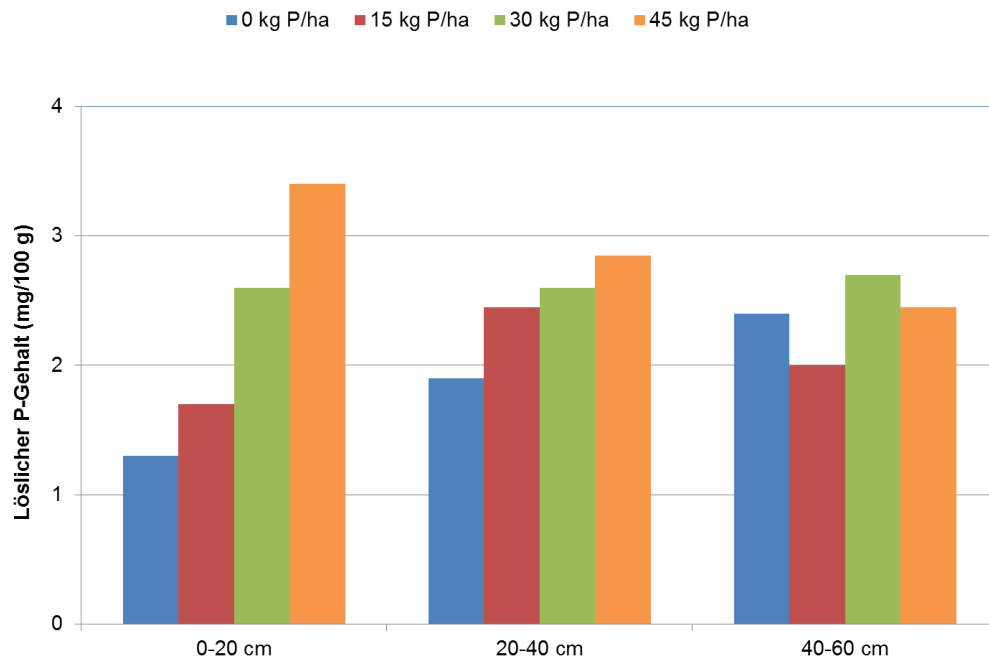


Abbildung 85: Einfluss der P-Düngung auf die löslichen P-Gehalte (Mittelwerte aus DL- u. CAL-P) in der Ackerkrume und im Untergrund bis 60 cm Tiefe im Jahr 2011

Eine Gegenüberstellung der Gesamt-P-Mengen in den Schichten von 0 – 60 cm vor Versuchsbeginn und nach zwölf Jahren der Versuchsdurchführung weist auf die insgesamt beachtlichen P-Reserven dieses Standortes hin (Tab. 25). Die dargestellten Werte verdeutlichen zugleich, dass sich die über die Jahre erzielten P-Entzüge von insgesamt 170 – 180 kg/ha in Relation zu den maximal verabreichten P-Mengen von 720 kg P/ha in Anbetracht der hohen Gesamtphosphatbeträge von ca. 3500 – 4400 kg/ha aus methodischen Gründen nicht wiederfinden lassen. Zwar wird für die höchste P-Stufe eine Zunahme von mehr als 100 kg P/ha ausgewiesen, allerdings wurde in der Stufe ohne P-Zufuhr sogar eine positive Differenz von etwa 400 kg P/ha berechnet.

Tabelle 25: P_t-Gehalte vor Beginn und nach Abschluss der Versuche in Stufen der P-Steigerung

Bodentiefe	Ohne P		Mit 60 kg P/ha		Mittel der vier Stufen	
	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)
Ausgangswerte 1999						
0-20 cm	0,052	1560	0,046	1386	0,050	1500
20-40 cm	0,040	1200	0,040	1200	0,042	1260
40-60 cm	0,040	1200	0,030	900	0,035	1080
Summe	-	3960	-	3486	-	3840
Anschlusswerte 2011						
0-20 cm	0,055	1650	0,050	1500	0,050	1500
20-40 cm	0,050	1500	0,040	1200	0,042	1260
40-60 cm	0,040	1200	0,030	900	0,035	1080
Summe	-	4350	-	3600	-	3840

pH-Wert des Bodens

In den Parzellen der P-Steigerungsreihe ist im Verlauf der Versuchsdurchführung ein geringes Absinken des pH-Wertes zu beobachten (Abb. 86). Auffällig ist allerdings eine deutliche Verringerung der Abnahme der pH-Werte mit steigendem Einsatz an Dolophos. In der höchsten Stufe bleibt der pH-Wert etwa auf dem Ausgangsniveau erhalten. Das Ergebnis weist auf die neutralisierende Wirkung des verwendeten P-Düngers hin. Im vorhandenen pH-Bereich der Versuchsfläche wird in der Literatur von einer angemessenen Löslichkeit der weicherartigen Rohphosphate berichtet (MENGEL, 1986). Daher ist es etwas verwunderlich, dass demgegenüber die erzielten Ertragswirkungen nicht besonders groß waren.

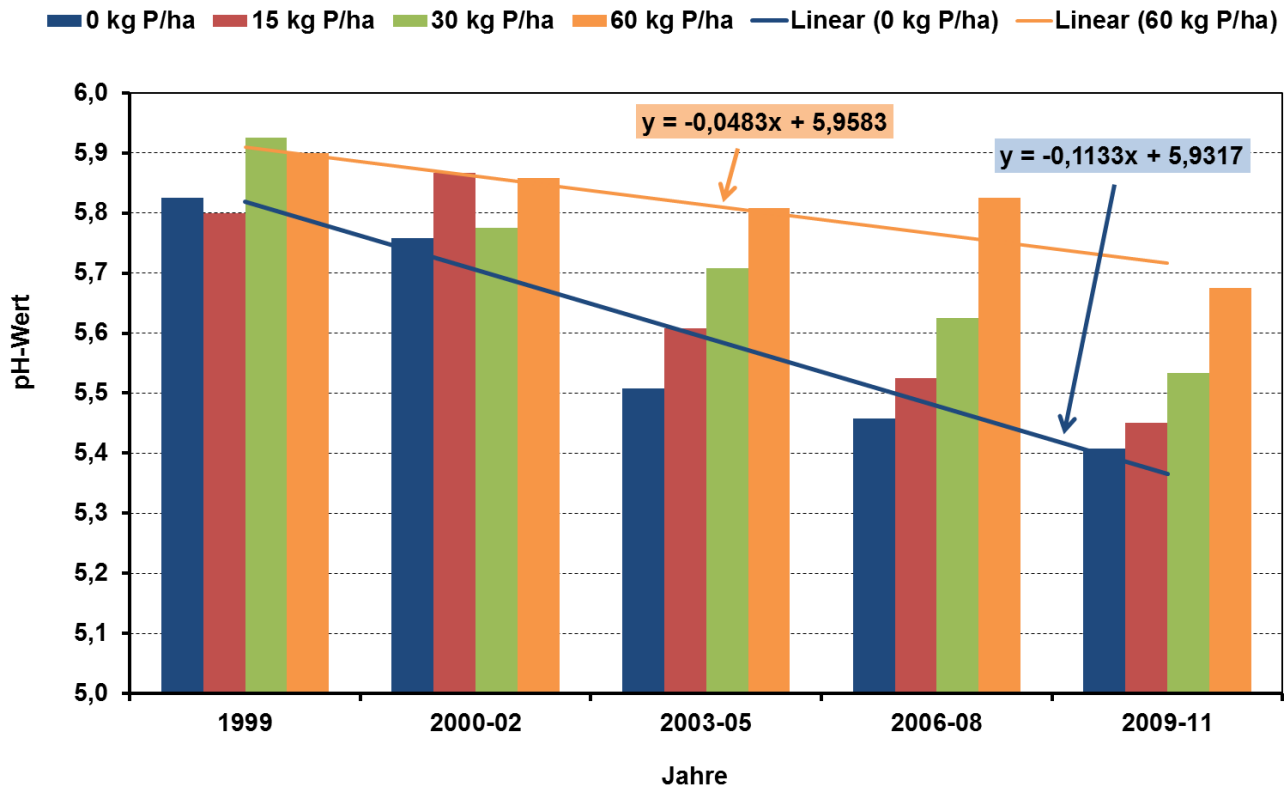


Abbildung 86: Veränderungen im pH-Wert des Bodens in den Prüfgliedern der P-Steigerung über den Versuchszeitraum

3.3 Ergebnisse der K-Steigerung

Die Auswertung der Ergebnisse der K-Steigerungsreihe erfolgt in gleicher Weise wie bei der gesteigerten organischen Düngung und der P-Steigerung. Neben den Erträgen interessieren vor allem die Veränderungen in den Gehalten im Boden über den zwölfjährigen Versuchszeitraum. Vor Versuchsanlage wurden im Durchschnitt der 16 hierfür genutzten Einzelparzellen ein DL-K-Gehalt von 5,2 mg/100 g bzw. ein CAL-K-Gehalt von 5,6 mg/100 g Boden in 0 – 20 cm Tiefe ermittelt. Damit sind die Gehalte entsprechend der Bodenart Lehm (L) in die Gehaltsklasse A einzustufen.

Diese Beträge entsprechen in etwa 156 kg bzw. 168 kg K/ha in der betreffenden Bodenschicht. Das sind relativ kleine Beträge in Anbetracht von berechneten Gesamtbeträgen von etwa 18.600 kg K_t/ha in der Bodenschicht 0 – 60 cm Tiefe. Aus den Untersuchungsergebnissen wurde auch deutlich, dass mit zunehmender Bodentiefe der K_t-Gehalt von durchschnittlich 0,16 % auf 0,29 % ansteigt.

3.3.1 Erträge der Fruchtarten

Die Erträge der K-Steigerungsstufen sind in den Abbildungen 87 – 110 dargestellt worden. Insgesamt traten signifikante Ertragsunterschiede nur in wenigen Jahren auf. So wurde bei den Kartoffeln im Jahr 2006 ein deutlicher Ertragseffekt festgestellt. Die Ergebnisse zur Fraktionierung hinsichtlich der Knollengrößen stehen für beide Anbaujahre in den Abbildungen 111 – 112. Eine Gegenüberstellung der Knollenerträge mit den übrigen beiden Versuchsreihen zeigt, dass in den Varianten mit steigenden Kaliumgaben im Jahr 2006 annähernd der gleiche Ertrag erzielt wurde wie in den Prüfgliedern mit organischer Düngung. Im Jahr 2001 konnte dieser Sachverhalt allerdings nicht festgestellt werden (vgl. Kap. 3.1 u. Kap. 3.2).

In der K-Steigerungsreihe gab es signifikante Blockeffekte bei der Wintergerste im Jahr 2003, den Kartoffeln in 2006, beim Winterweizen in 2007 und der Wintergerste im Jahr 2009 sowohl beim GE-Ertrag als auch dem Ertrag des Hauptproduktes. Beim Winterweizen des Jahres 2000 traten diese signifikanten Blockeffekte nur beim Korn auf. Da hiervon vor allem das Getreide betroffen war und der Ertragsabfall besonders die Außenblöcke betraf, kann vermutet werden, dass die Effekte nicht durch bodenbedingte Einflüsse hervorgerufen wurden (vermutlich Vogelfraß).

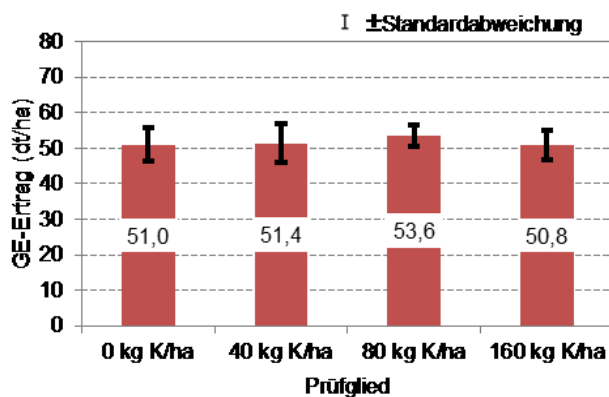


Abbildung 87: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2000 in der K-Steigerungsreihe

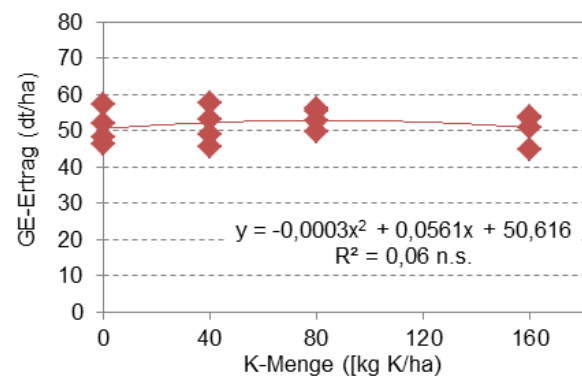


Abbildung 88: GE-Ertrag des Winterweizens in 2000 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

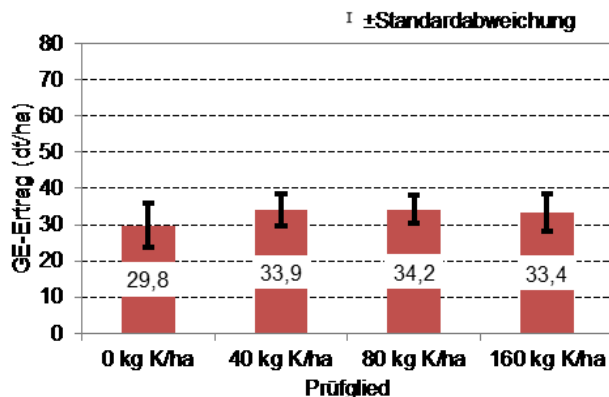


Abbildung 89: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln des Jahres 2001 in der K-Steigerungsreihe

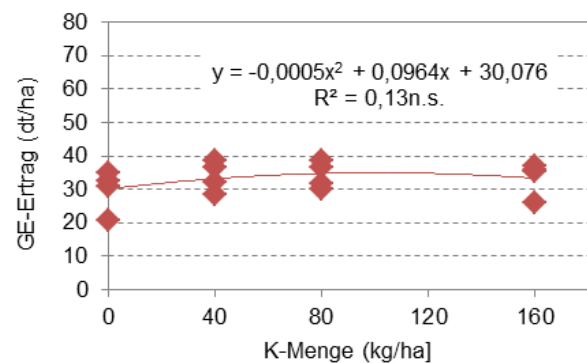


Abbildung 90: GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2001 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

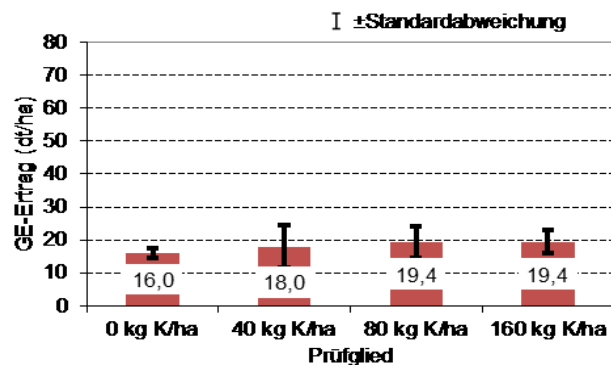


Abbildung 91: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen des Jahres 2002 in der K-Steigerungsreihe

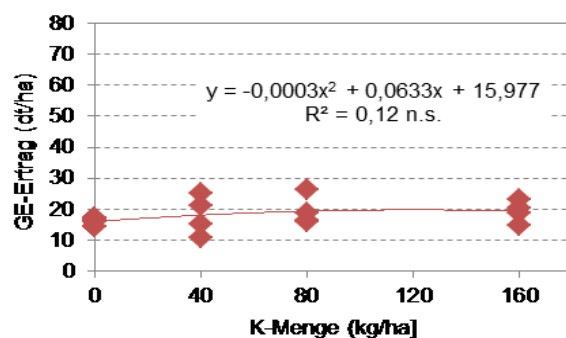


Abbildung 92: GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2002 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

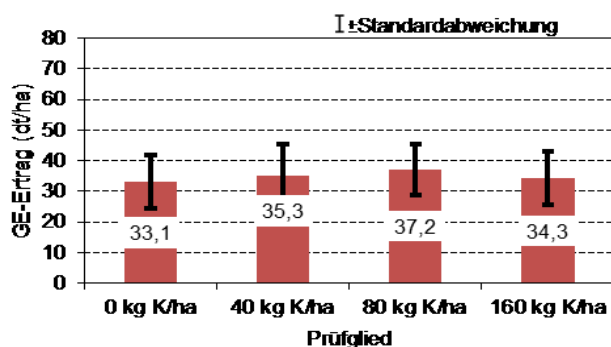


Abbildung 93: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste in 2003 in der K-Steigerungsreihe

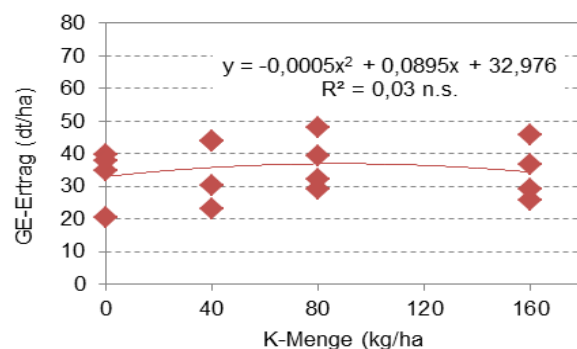


Abbildung 94: GE-Ertrag der Wintergerste in 2003 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

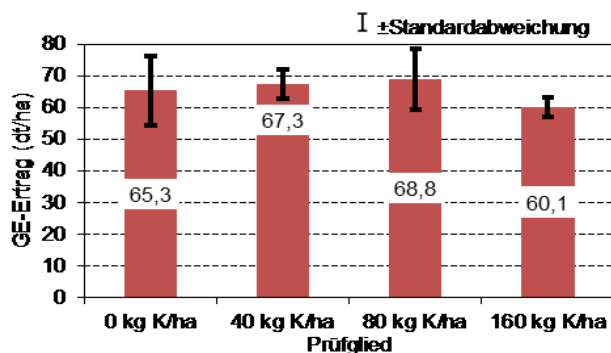


Abbildung 95: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases in 2004 in der K-Steigerungsreihe

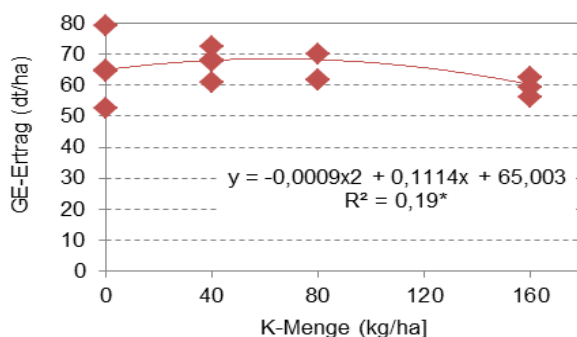


Abbildung 96: GE-Ertrag an Luzerne-Klee-gras in 2004 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

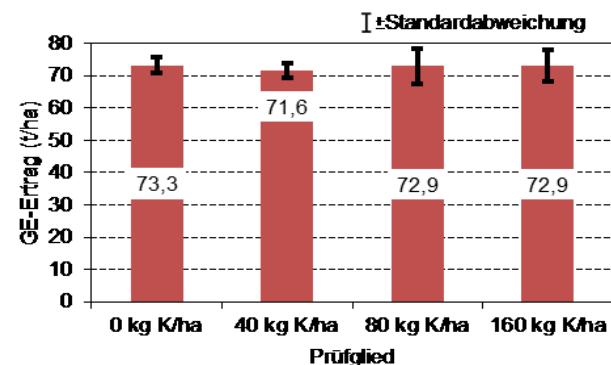


Abbildung 97: Mittlerer GE-Ertrag an Luzerne-Klee-gras für 2005 in der K-Steigerungsreihe

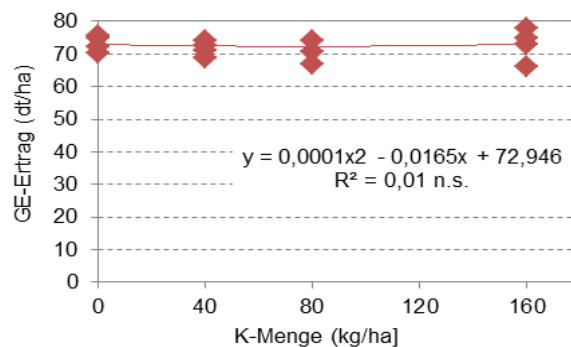


Abbildung 98: GE-Ertrag an Luzerne-Klee-gras in 2005 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

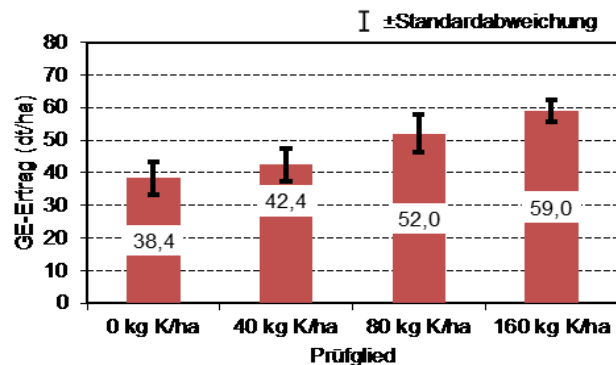


Abbildung 99: Mittlerer GE-Ertrag der Kartoffeln des Jahres 2006 in der K-Steigerungsreihe

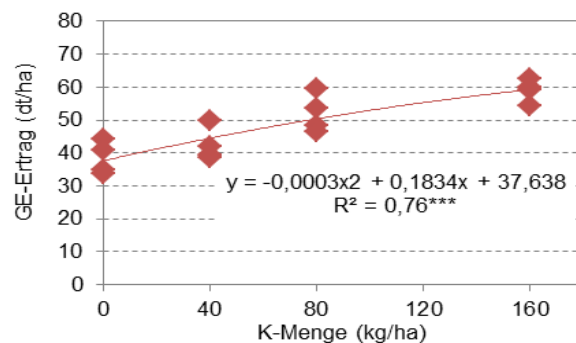


Abbildung 100: GE-Ertrag der Kartoffeln im Jahr 2006 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

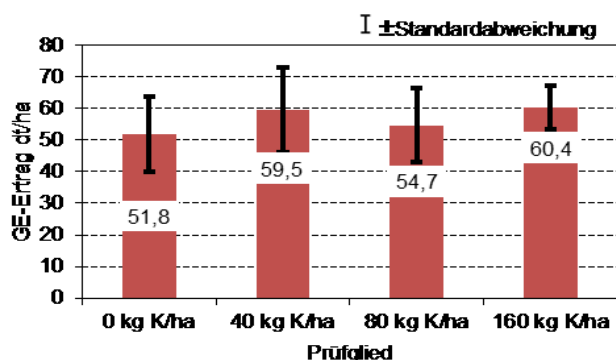


Abbildung 101: Mittlerer GE-Ertrag des Winterweizens in 2007 in der K-Steigerungsreihe

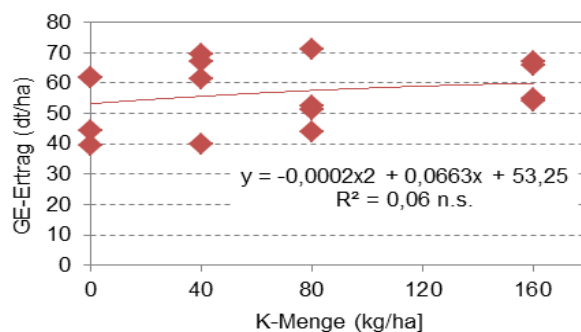


Abbildung 102: GE-Ertrag des Winterweizens im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

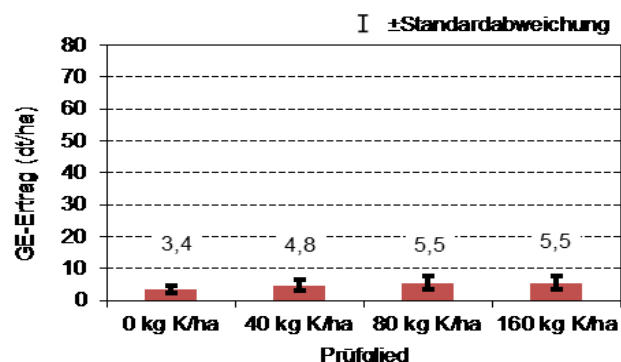


Abbildung 103: Mittlerer GE-Ertrag der Ackerbohnen für 2008 in der K-Steigerungsreihe

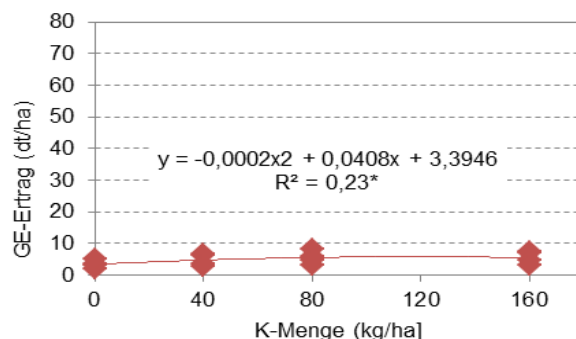


Abbildung 104: GE-Ertrag der Ackerbohnen im Jahr 2008 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

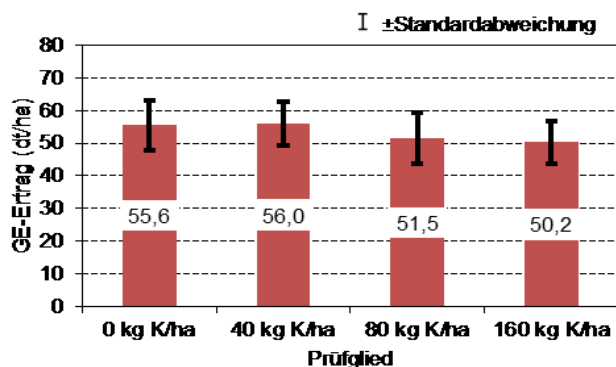


Abbildung 105: Mittlerer GE-Ertrag der Wintergerste im Jahr 2009 in der K-Steigerungsreihe

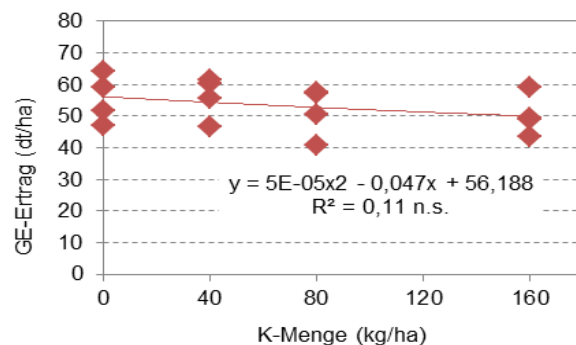


Abbildung 106: GE-Ertrag der Wintergerste in 2009 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

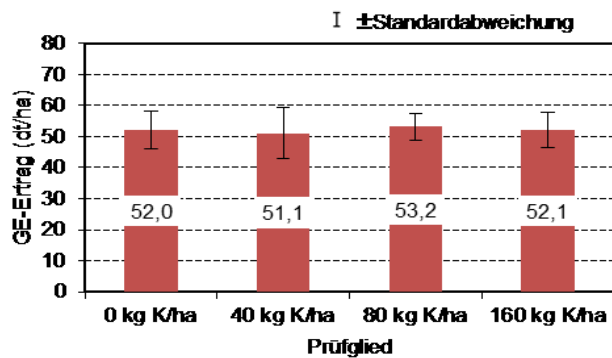


Abbildung 107: Mittlerer GE-Ertrag des Luzerne-Klee-grases für 2010 in der K-Steigerungsreihe

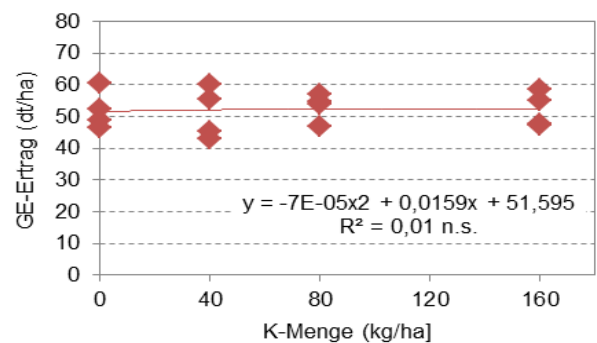


Abbildung 108: GE-Ertrag an Luzerne-Klee-gras in 2010 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

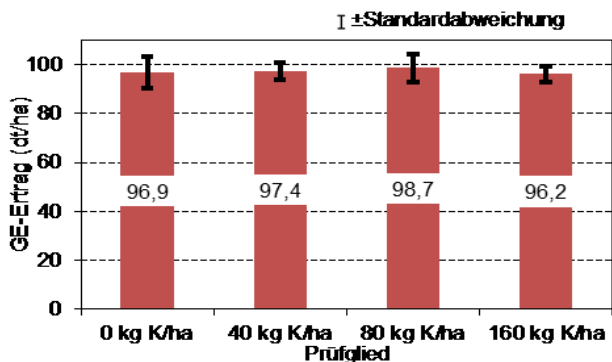


Abbildung 109: Mittlerer GE-Ertrag an Luzerne-Klee-gras im Jahr 2011 in der K-Steigerungsreihe

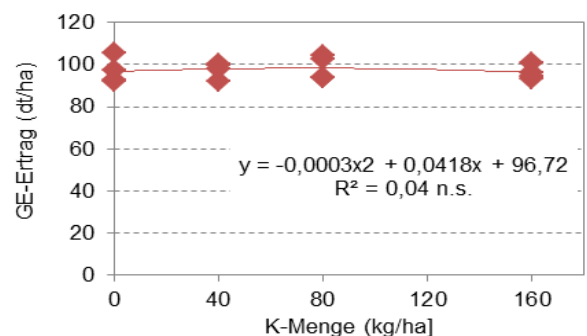


Abbildung 110: GE-Ertrag an Luzerne-Klee-gras in 2011 in Abhängigkeit von der K-Steigerung

Die Kartoffeln reagierten in den beiden Anbaujahren sowohl auf die differenzierte organische Düngung als auch auf den gesteigerten Einsatz von Kalium am deutlichsten (Abb. 111 – 112). Am stärksten macht sich das in Jahren mit höherem Ertragsniveau bemerkbar. Während im Versuchsjahr 2001 die unterschiedlichen Behandlungen keinen Einfluss auf die Größenfraktionen hatten, konnte im Jahr 2006 beobachtet werden, dass die Übergrößen unter den günstigeren Wachstumsbedingungen insgesamt zugenommen haben. Obwohl die Steigerung mit organischen Düngern nur einen Zuwachs an Übergrößen von etwa 4 % erbrachte, nahm diese Fraktion mit steigender mineralischer K-Düngung um ca. 16 % zu. Zu beachten ist, dass die Sorte Agria (Jahr 2006) zur Ausbildung übergroßer Knollen neigt.

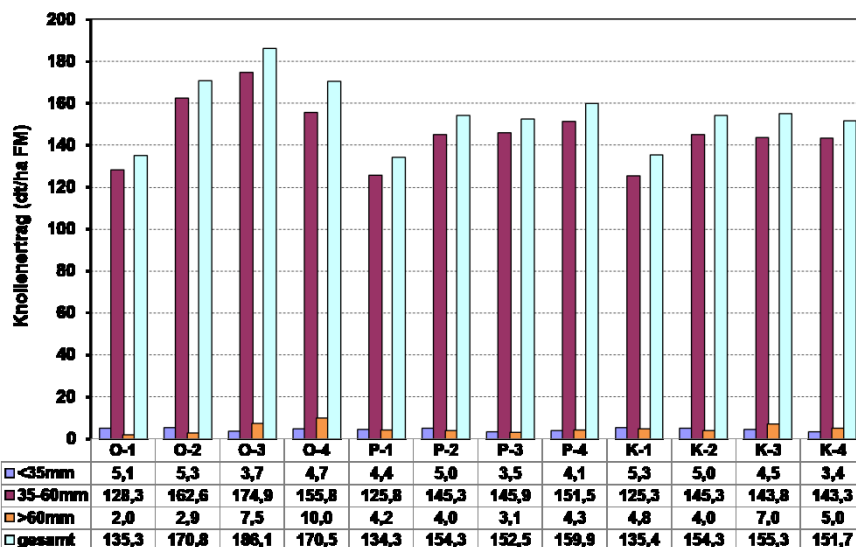


Abbildung 111: Größenfraktionen der im Jahr 2001 angebauten Kartoffeln (Sorte Arcula) in den einzelnen Prüfgliedern (O = organische Düngung; P = P-Düngung; K = K-Düngung)

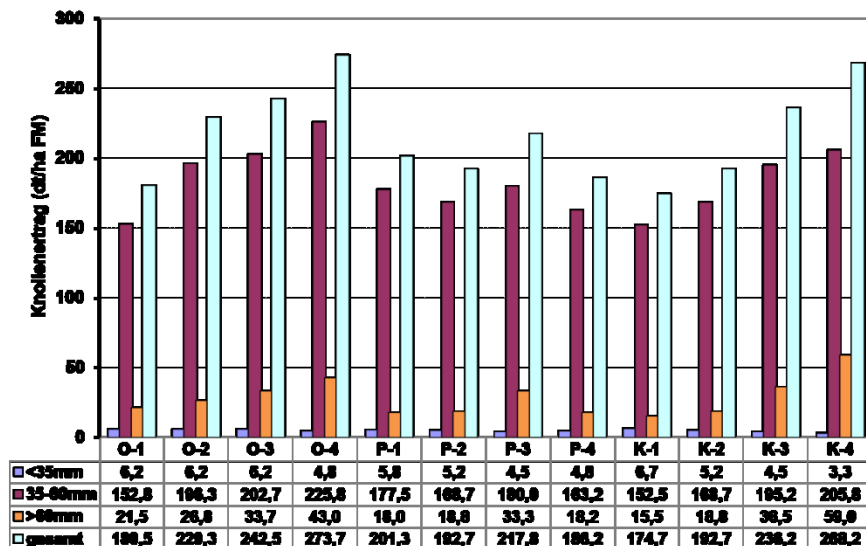


Abbildung 112: Größenfraktionen der im Jahr 2006 angebauten Kartoffeln (Sorte Agria) in den einzelnen Prüfgliedern (O = organische Düngung; P = P-Düngung; K = K-Düngung)

Das niedrige Ertragsniveau des Jahres 2001 (Abb. 113) war sicher in erster Linie den feuchten Jahresbedingungen und dem frühen Befall mit *Phytophthora infestans* geschuldet. Wie die vorliegende Bonitur von Ende Juli belegt, gab es zwischen den Prüfgliedern der Kaliumsteigerungsreihe allerdings zu diesem Termin noch keine Unterschiede. Der Befall wurde mit gering bis mittel eingeschätzt (siehe Tab. 28). Die ausgebliebene Ertragsdifferenzierung zwischen den Stufen sollte trotz des niedrigen Niveaus in den K-Gehalten des Bodens durch die günstige Bodenwasserversorgung ausreichend gewesen sein. In den Monaten Juni und Juli des Jahres 2001 fielen insgesamt 170 mm Niederschlag, so dass eine gute Nachlieferung aus der labilen K-Bodenfraktion gewährleistet war. In den K-Gehalten der Kartoffeln zur Ernte zeigen sich dann ebenfalls signifikante Unterschiede (Abb. 114; siehe nächstes Kapitel).

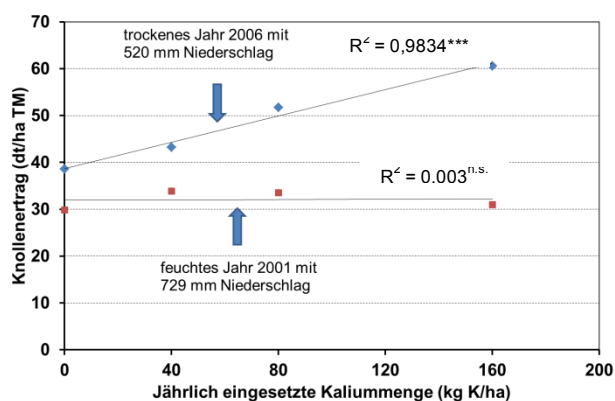


Abbildung 113: Wirkung des gesteigerten Kaliumumsatzes auf den Trockenmasseertrag von Kartoffeln in den Jahren 2001 und 2006.

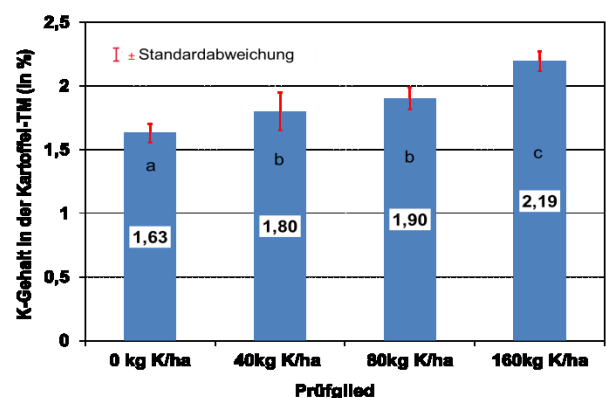


Abbildung 114: K-Gehalte in der TM der Kartoffeln in der K-Steigerungsreihe des Jahres 2001

Die zusammengefassten GE-Erträge der Fruchtarten sind in den Abbildungen 115 – 116 dargestellt worden. Trotz der deutlich gesteigerten K-Düngung reagierten die Fruchtarten im Durchschnitt nur sehr verhalten auf die Düngung. Durch das Luzerne-Klee gras wurden zwar hohe GE-Erträge erzielt. Die K-Düngung zeigte aber keinen Einfluss auf die Erträge. Durch eine geringe K-Düngung konnte der GE-Ertrag im Durchschnitt der Getreidearten in der Tendenz noch um ca. 2 dt GE/ha (ca. 5 %) erhöht werden. Nur die Ackerbohne und be-

sonders die Kartoffeln reagierten durch die steigende K-Versorgung durch z. T. deutliche Ertragszuwächse von über 35 % (Kartoffeln) und von 29 % bei der Ackerbohne. Im Durchschnitt der Fruchtarten konnten die Erträge lediglich um 2 – 3 dt GE/ha (= ca. 6 %) angehoben werden (Abb. 116).

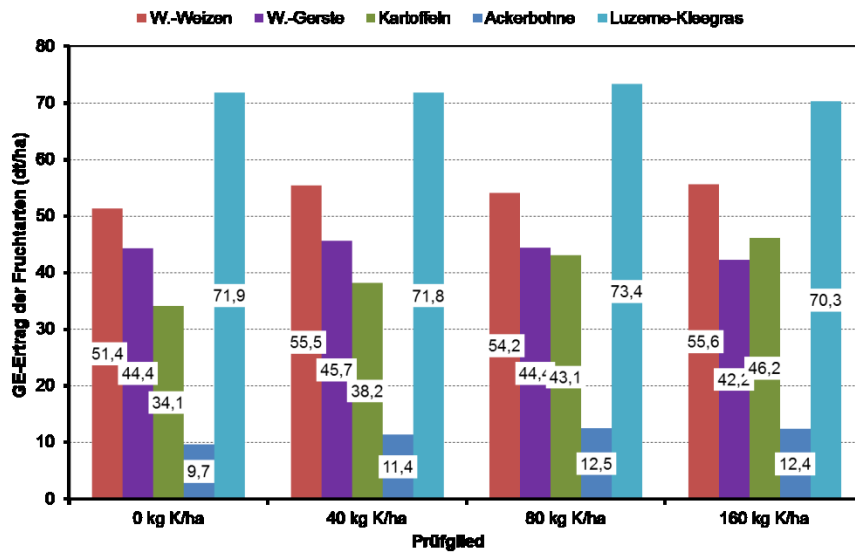


Abbildung 115: Einfluss steigender mineralischer K-Zufuhr auf die mittleren GE-Erträge der angebauten Fruchtarten

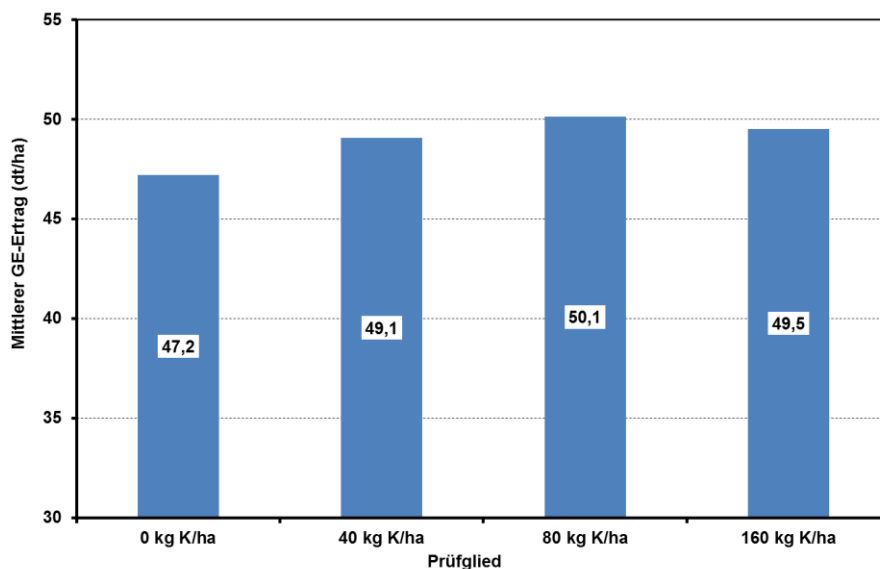


Abbildung 116: Einfluss der K-Düngung auf die GE-Erträge im Durchschnitt der Fruchtarten

3.3.2 Gehalte an Inhaltsstoffen und anderen Merkmalen

Während sich der Ertragszuwachs in Abhängigkeit von dem gesteigerten K-Einsatz in Grenzen hielt, war allerdings zu beobachten, dass im Erntegut die K-Gehalte in den einzelnen Anbaujahren deutlich beeinflusst worden sind. Das trifft sowohl für die Kartoffeln und das Getreidestroh als auch für das Luzerne-Klee gras zu (Tab. 26). Die Nährstoffentzüge insgesamt werden allerdings stärker durch das Ertragsniveau als durch die vorhandenen Unterschiede in den Nährstoffgehalten bestimmt.

Tabelle 26: K-Gehalte in den Ernteprodukten der Varianten mit steigender mineralischer K-Düngung

Prüfglied	K-Gehalte (% TM)											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
	WW Stroh	Kart Knolle	AB Korn	WG Stroh	LKG Auf- wuchs	LKG Auf- wuchs	Kart Knolle	WW Stroh	AB Korn	WG Stroh	LKG Auf- wuchs	LKG Auf- wuchs
0 kg K/ha	0,56	1,63	1,42	1,12	1,69	1,85	1,35	-	1,30	1,20	2,19	1,53
40 kg K/ha	0,60	1,84	1,47	1,07	1,89	1,96	1,48	-	1,22	1,37	1,89	1,36
80 kg K/ha	0,60	1,90	1,54	1,22	2,24	2,46	1,55	-	1,36	1,39	2,25	1,64
160 kg K/ha	0,67	2,19	1,55	1,26	2,36	2,82	1,69	-	1,25	1,50	2,40	1,65
Mittelwert	0,61	1,89	1,50	1,17	2,05	2,27	1,52	-	1,28	1,37	2,18	1,55

Der Einfluss der K-Düngung auf die mittleren Gehalte an erfassten Inhaltsstoffen und weiteren Merkmalen der Fruchtarten wurde in den Tabellen 27 und 28 zusammengestellt. Besonders die K-Gehalte der vegetativen Pflanzenteile (Stroh, Knollen, Gemenge-Aufwuchs) konnten z. T. deutlich angehoben werden. Außer in den Ackerbohnen wurden die K-Gehalte in Körnern nicht beeinflusst. Im Durchschnitt aller Fruchtarten wurden im Vergleich zu keiner K-Düngung (= 100 %) die K-Gehalte in den geernteten Pflanzenteilen deutlich angehoben:

- 40 kg K/ha = 101 %
- 80 kg K/ha = 110 %
- 160 kg K/ha = 116 %.

Die Anteile an Leguminosen im Leguminosengras-Gemenge sind in der Tendenz zwar etwas reduziert worden, die legume N-Bindung wurde jedoch durch die K-Zufuhr kaum beeinflusst. Bei den Ackerbohnen wurde die legume N-Bindung etwas erhöht. Die TKM-Beträge konnten bei den Getreidearten und bei der Ackerbohne durch die K-Düngung im Vergleich zu den Varianten ohne Düngung angehoben werden (Tab. 28).

Tabelle 27: Zusammengefasster Einfluss der mineralischen K-Düngung auf Inhaltsstoffe und andere Merkmale in Haupt- und Nebenprodukten der angebauten Getreidearten

Haupt- bzw. Nebenprodukt:	Korn							Stroh				
Merkmal:	N	P	K	Mg	TKM	Ährentr. Halme	Wuchs- höhe	N	P	K	Mg	Lager
Dimension:	(% TM)				(g)	(je m²)	(cm)	(% TM)				(Bonitur)
Winterweizen												
0 kg K/ha	2,12	0,37	0,47	0,13	38,4	388,0	86,0	0,26	0,06	0,56	0,12	3,00
40 kg K/ha	2,13	0,37	0,46	0,13	39,5	386,0	83,5	0,25	0,06	0,60	0,11	3,25
80 kg K/ha	2,09	0,37	0,46	0,13	41,3	395,0	88,3	0,22	0,06	0,60	0,11	3,00
160 kg K/ha	2,06	0,37	0,46	0,13	41,9	372,0	84,5	0,25	0,06	0,67	0,12	3,50
Wintergerste												
0 kg K/ha	1,82	0,30	0,44	0,07	46,4	293,3	92,1	0,73	0,11	1,15	0,12	-
40 kg K/ha	1,93	0,30	0,43	0,07	46,7	309,0	92,3	0,68	0,10	1,22	0,12	-
80 kg K/ha	1,81	0,30	0,43	0,07	46,7	309,0	93,3	0,63	0,10	1,31	0,11	-
160 kg K/ha	1,85	0,29	0,43	0,07	47,6	327,0	92,4	0,69	0,11	1,38	0,13	-

Tabelle 28: Durchschnittliche Gehalte an Inhaltsstoffen (% TM) und anderen Merkmalen der angebauten Kartoffeln, Ackerbohnen und Luzerne-Kleegras in Folge steigender mineralischer K-Düngung

Kartoffeln							
Haupt- bzw. Nebenprodukt:	Knollen						Kraut
Merkmal:	N	P	K	Mg	TM	Stärke	Krautfäule
Dimension:	(% TM)				(% FM)	(% TM)	(Bonitur)
0 kg K/ha	1,98	0,22	1,51	0,12	22,05	66,45	5,25
40 kg K/ha	1,88	0,21	1,61	0,11	22,20	64,55	3,75
80 kg K/ha	1,87	0,19	1,73	0,11	21,74	66,60	4,25
160 kg K/ha	1,78	0,20	1,94	0,14	21,53	68,40	4,00

Ackerbohnen							
Haupt- bzw. Nebenprodukt:	Korn				Gesamt-Pflanze		
Merkmal:	N	P	K	Mg	TKM	Legume N-Bindung	
Dimension:	(% TM)				(g)	(kg N/ha)	
0 kg K/ha	5,45	0,85	1,36	0,21	304,0	66,00	
40 kg K/ha	5,67	0,79	1,34	0,20	367,7	76,9	
80 kg K/ha	5,33	0,79	1,45	0,20	372,2	84,3	
160 kg K/ha	5,29	0,72	1,40	0,19	352,4	81,8	

Luzernekleegras							
Haupt- bzw. Nebenprodukt:	Aufwuchs						Gesamt-Pflanze
Merkmal:	N	P	K	Mg	TM	Leguminosen-Anteil	Legume N-Bindung
Dimension:	(% TM)				(% FM)	(%)	(kg N/ha)
0 kg K/ha	2,42	0,23	1,78	0,33	23,12	59,7	234,4
40 kg K/ha	2,47	0,22	1,69	0,33	22,50	59,3	225,8
80 kg K/ha	2,49	0,22	1,98	0,32	22,15	58,3	243,1
160 kg K/ha	2,48	0,21	2,16	0,30	22,09	55,0	222,9

3.3.3 Nährstoffbilanzen

Im Hinblick auf die GE-Produktion finden sich in der K-Steigerungsreihe ähnliche Verhältnisse wie nach steigender organischer Düngung. Zwischen der Stufe ohne Düngung und den hohen K-Stufen ergab sich im Durchschnitt der Versuchsjahre ein Mehrertrag von 3 GE/ha (Abb. 117, Tab. 29). Der Unterschied in den K-Entzügen zwischen der ungedüngten und der höchsten Steigerung betrug im Durchschnitt der Jahre 20 kg K/ha. Ein positiver K-Saldo ergab sich letztendlich mit rund 55 kg K/ha nur bei einem jährlichen Einsatz von 160 kg K/ha (Tab. 29).

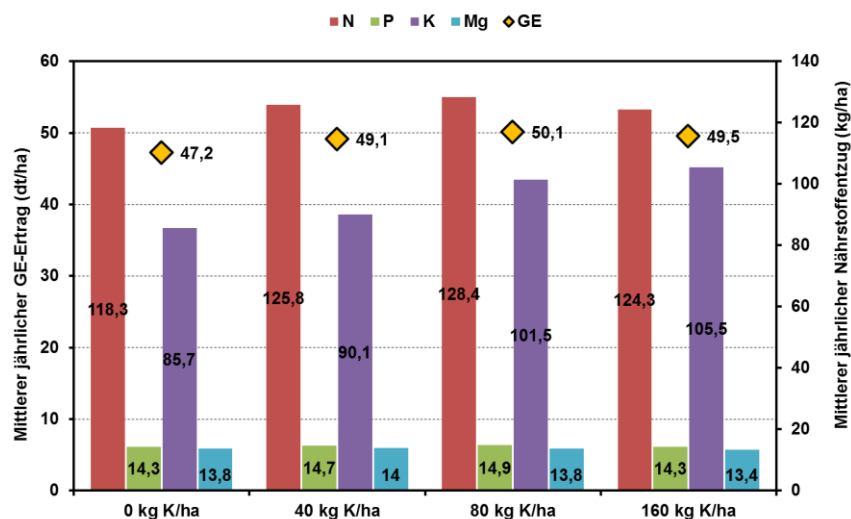


Abbildung 117: Mittlerer GE-Ertrag und mittlerer jährlicher Nährstoffentzug in der K-Steigerungsreihe

Tabelle 29: Einfache Schlagbilanz der Prüfglieder mit gesteigerter K-Düngung mit Patentkali

Prüfglied	Zufuhr		Abfuhr	Saldo
	Mineralische Dünger	Symbiot. N-Bindung		
Stickstoff				
ohne Düngung	0	89,1	118,3	-29,1
40 kg K/ha	0	88,1	125,8	-37,7
80 kg K/ha	0	95,1	128,4	-33,3
160 kg K/ha	0	87,9	124,3	-36,3
Phosphor				
ohne Düngung	15	-	14,3	0,8
40 kg K/ha	15	-	14,7	0,3
80 kg K/ha	15	-	14,9	0,1
160 kg K/ha	15	-	14,3	0,8
Kalium				
ohne Düngung	0	-	85,7	-85,7
40 kg K/ha	40	-	90,1	-50,1
80 kg K/ha	80	-	101,5	-21,5
160 kg K/ha	160	-	105,5	54,5
Magnesium				
ohne Düngung	0	-	13,8	-13,8
40 kg K/ha	2,9	-	14,0	-11,1
80 kg K/ha	5,8	-	13,8	-7,9
160 kg K/ha	11,6	-	13,4	-1,8

3.3.4 Entwicklung der Bodenparameter

K-Gehalt des Bodens

Wie bereits beim laktatlöslichen Phosphat weisen die Ergebnisse der Laboruntersuchungen der Bodenproben nach der jährlichen Ernte über den Versuchszeitraum eine deutliche Fluktuation auf. In den Abbildungen 118 – 119 wird dies am Beispiel der Stufe ohne K-Düngung und in der höchsten K-Stufe in Abhängigkeit des Extraktionsmittels dargestellt. Neben den jeweiligen Jahresschwankungen waren auch die Extraktionsverfahren davon betroffen.

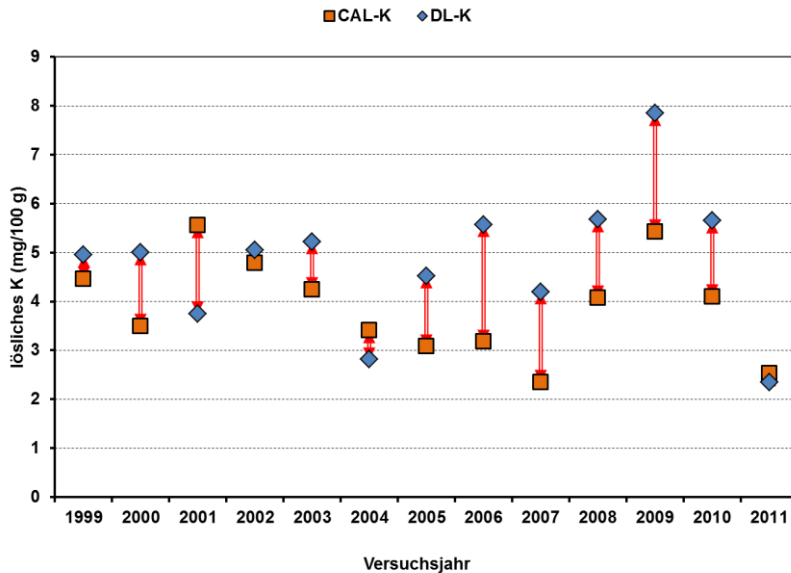


Abbildung 118: Einfluss des Extraktionsmittels auf die ermittelten K-Gehalte im Prüfglied ohne K-Düngung

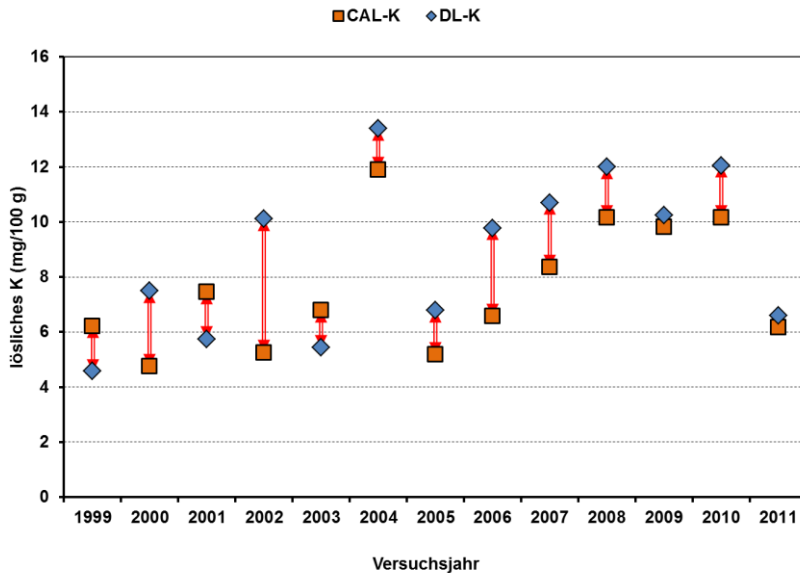


Abbildung 119: Einfluss des Extraktionsmittels auf die ermittelten K-Gehalte in der höchsten K-Stufe

Durch Zusammenfassen der Untersuchungsergebnisse einzelner Zeitabschnitte und unter Einbeziehung der K-Gehalte aus dem Jahr 1999 (vor Versuchsbeginn) zeichnen sich, wie beim Phosphat, auch in den Kaliumgehalten deutliche Entwicklungstendenzen ab (Abb. 120 u. Abb. 121). Dabei werden allerdings wiederum

Unterschiede zwischen den Extraktionsmitteln deutlich. Während bei der DL-K-Reihe die Variante mit leicht negativer K-Bilanz von -22 kg/ha und Jahr (vgl. Tab. 29) im Gehalt noch leicht ansteigt und das Prüfglied ohne Düngung auf dem Ausgangsniveau bleibt, steigt bei der CAL-K-Reihe im Wesentlichen nur die Variante mit der höchsten K-Düngung und einem positiven K-Saldo von 55 kg/ha deutlich an. Sowohl in der ungedüngten als auch in der Stufe mit 40 kg K/ha kann jeweils ein leichtes Absinken der Gehalte beobachtet werden, was die aus der K-Bilanz ersichtlichen Werte am besten wiedergibt.

Ohne Berücksichtigung der Werte aus dem Vorversuchsjahr 1999 ist dieser Trend beim CAL-K-Gehalt nicht mehr so deutlich ausgeprägt. Die Differenzierungen in den Darstellungen beruhen im Wesentlichen auf den in den Jahren 2009 und 2010 bestehenden Unterschieden. Im Abschlussjahr 2011 nivellieren sich diese Unterschiede beachtlich (Abb. 122). Vermutlich beruht diese Entwicklung der K-Gehalte auf den hohen K-Entzügen des Luzerne-Klee-grases in den beiden letzten Versuchsjahren. In der Summe dieser Jahre betrugen die Entzüge immerhin zwischen 340 kg und 400 kg K/ha. Mit 370 kg K/ha war bei dem Prüfglied ohne Kaliumdüngung der Entzug nur um 20 kg/ha geringer als im Prüfglied mit 160 kg K/ha und Jahr.

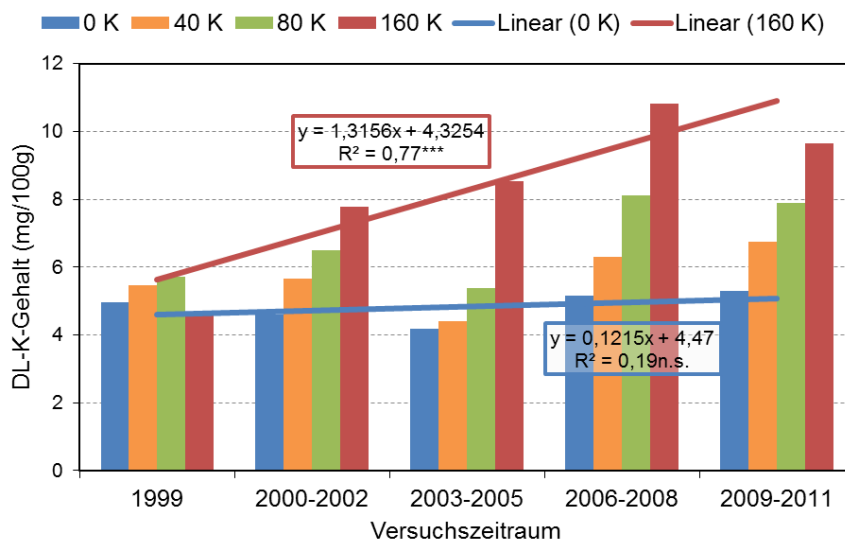


Abbildung 120: Übersicht zur Entwicklung der DL-K-Gehalte in Folge steigender mineralischer K-Zufuhr (Düngung in kg K/ha)

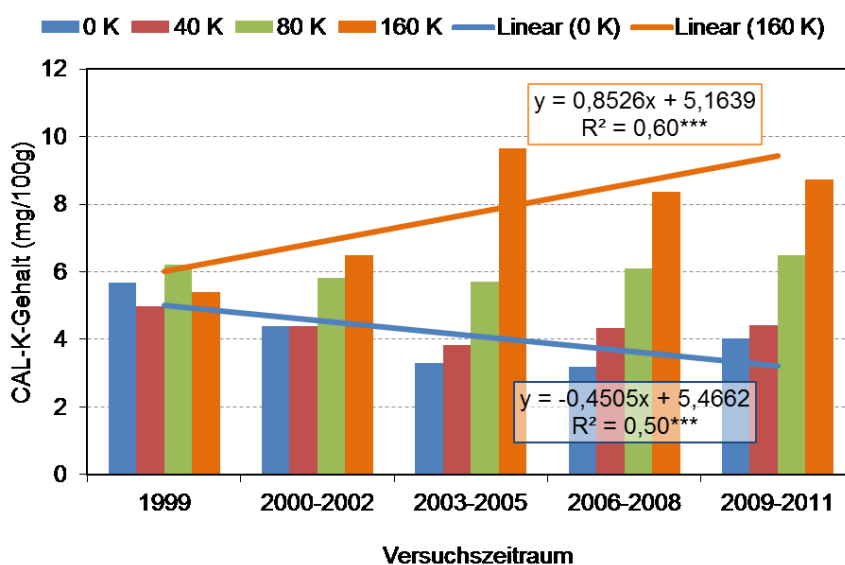


Abbildung 121: Übersicht zur Entwicklung der CAL-K-Gehalte in der Kaliumsteigerungsreihe (Düngung in kg K/ha)

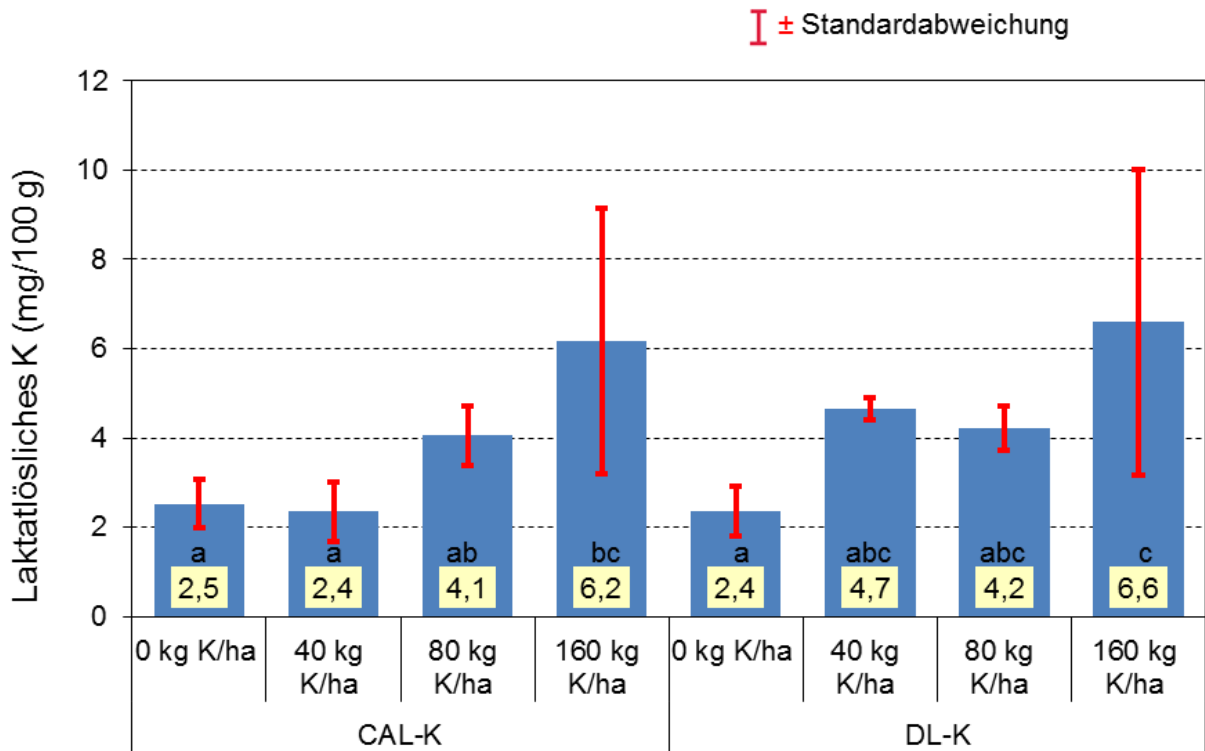


Abbildung 122: Mittlere lösliche K-Gehalte des Bodens in den einzelnen Düngungsstufen zum Ende der Versuchsserie im Jahr 2011

Der statistische Zusammenhang zwischen den DL- bzw. CAL-löslichen K-Gehalten in der Ackerkrume und den GE-Erträgen ist insgesamt gering ausgeprägt (Tab. 30). Signifikante Beziehungen finden sich vor allem zu Beginn der Versuchsreihe und am stärksten bei den Kartoffeln. Auch die Ackerbohne zeigt entsprechende Reaktionen. Nicht zu erklären sind die teilweisen vorhandenen Abweichungen zwischen DL- und CAL-K-Gehalten im Hinblick auf das Ertragsgeschehen. Beim Luzerne-Klee gras sind keine signifikanten Korrelationen vorhanden, was darauf hindeutet, dass die K-Versorgung und die hohen K-Aufnahmen auch aus tieferen Bodenschichten erfolgt sein konnten. Zwischen den beiden Extraktionsmitteln bestehen nur geringe Unterschiede, mit leichten Vorteilen für das DL-lösliche Kalium, da dessen durchschnittliche Korrelationen etwas besser sind.

Die mit Hilfe der Regressionsanalyse geschätzten jährlichen Veränderungen der DL- und CAL-löslichen K-Gehalte des Bodens zeigt Tabelle 31. Während in der DL-K-Reihe alle Varianten durch einen unterschiedlich intensiven Anstieg der K-Werte gekennzeichnet sind, steigen die CAL-löslichen K-Gehalte nur nach höherer Düngung deutlich an. In den Varianten ohne und mit geringer K-Zufuhr ist dagegen eine leichte Abnahme der K-Werte zu verzeichnen.

Tabelle 30: Korrelationskoeffizienten zwischen den GE-Erträgen und den in den jeweiligen Versuchsjahren nach der Ernte ermittelten DL-K- und CAL-K-Werten der Einzelparzellen der Varianten mit steigender mineralischer K-Düngung

Merkmal	GE-Ertrag												
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009*	2010*	2011	MW
	WW	Kart	AB	WG	LKG	LKG	Kart	WW	AB	WG	LKG	LKG	-
PEARSON-Korrelation DL-K													
Korrelationskoeffizient	0,50	0,54	0,44	0,34	-0,16	0,00	0,65	0,27	0,45	-0,24	0,07	-0,17	0,224
einseitige Signifikanz	+	+	+	n.s.	n.s.	n.s.	++	n.s.	+	n.s.	n.s.	n.s.	-
PEARSON-Korrelation CAL-K													
Korrelationskoeffizient	0,33	0,34	0,07	0,03	-0,19	0,00	0,67	0,25	0,46	-0,43	0,09	-0,15	0,122
einseitige Signifikanz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	++	n.s.	+	+	n.s.	n.s.	-
SPEARMAN-Rangkorrelation DL-K													
Korrelationskoeffizient	0,55	0,49	0,40	0,43	-0,16	0,20	0,68	0,32	0,42	-0,28	0,07	0,13	0,271
einseitige Signifikanz	+	+	n.s.	+	n.s.	n.s.	++	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-
SPEARMAN-Rangkorrelation CAL-K													
Korrelationskoeffizient	0,41	0,34	0,19	0,12	-0,14	0,16	0,71	0,20	0,45	-0,55	0,06	-0,01	0,162
einseitige Signifikanz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	++	n.s.	+	+	n.s.	n.s.	-

* In den Jahren 2009 und 2010 wurde die Tiefe von 0 – 30 cm beprobt.

Tabelle 31: Veränderung der Gehalte an Grundnährstoffen im Boden je Versuchsjahr nach steigender mineralischer K-Düngung

Prüfglied	DL-P	CAL-P	DL-K	CAL-K
	(mg/100 g)			
0 kg K/ha	0,0542	0,0067	0,0292	-0,0800
40 kg K/ha	0,0333	-0,0033	0,1292	-0,0458
80 kg K/ha	0,1000	0,0042	0,1958	0,1875
160 kg K/ha	0,2292	0,0308	0,3750	0,2833

Untergrund

Durch die unterschiedlich hohe mineralische K-Düngung konnten nicht nur die löslichen K-Werte (Mittelwert aus DL- u. CAL-K) der Ackerkrume in 0 – 20 cm Tiefe beeinflusst werden. Wie aus Abbildung 123 ersichtlich, ist auch ein Anstieg der K-Gehalte in der Schicht 20 – 40 cm Tiefe eingetreten. Der Untergrund ab 40 cm Tiefe weist zudem eine relativ ungleichmäßige K-Versorgung auf.

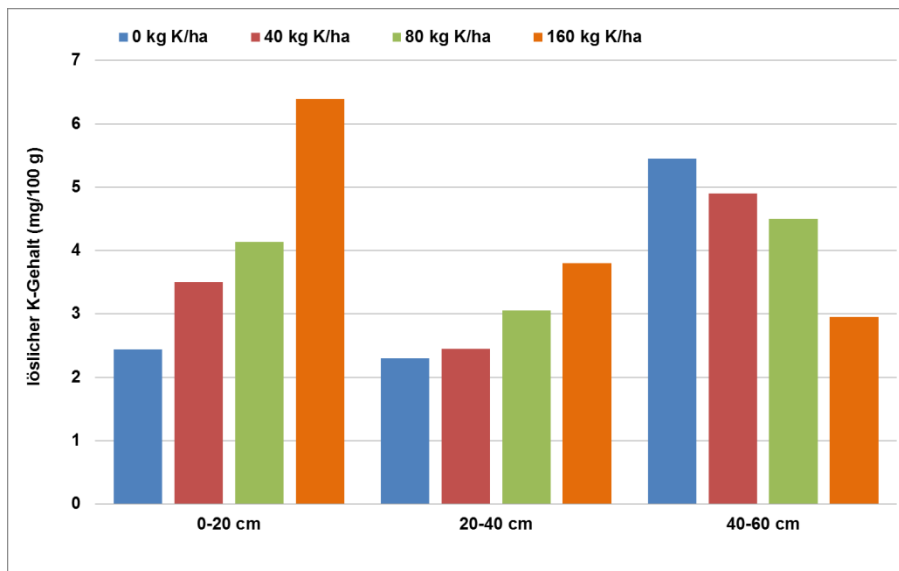


Abbildung 123: Einfluss der mineralischen K-Düngung auf die löslichen K-Gehalte (Mittelwert aus DL- u. CAL-K) der Ackerkrume und des Untergrundes bis 60 cm Bodentiefe im Jahr 2011

In Tabelle 32 sind die vor Anlage der Versuchsreihe im Jahr 1999 und die nach ihrer Beendigung ermittelten Gesamt-K-Mengen (K_t) in den Schichten bis 60 cm Tiefe zusammengestellt worden. Zunächst wird deutlich, dass der Lössboden in Roda beachtliche K-Mengen speichert. Sie sind zu großen Teilen in den Tonmineralien stabil eingebunden. Es ist darauf hinzuweisen, dass der Gehalt sogar in den tieferen Bodenschichten noch zunimmt. Das erklärt auch die beachtlichen K-Entzüge, selbst bei niedrigen K-Gehalten in der Ackerkrume. Die beachtlichen Unterschiede in den K-Salden zwischen den Versuchsvarianten (-1028 kg bis +654 kg/ha) lassen sich allerdings aus den Veränderungen durch eine Bestimmung des Gesamtkaliums nicht einfach wiederfinden (Tab. 33). Die Bestimmung der K_t -Beträge führt insgesamt nur zu groben Orientierungswerten.

Tabelle 32: K_t -Gehalte vor Beginn und nach Abschluss der Versuche in den Stufen der mineralischen K-Steigerung

Bodentiefe	0 kg K/ha		40 kg K/ha		80 kg K/ha		160 kg K/ha	
	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)
Ausgangswerte im Jahr 1999								
0-20 cm	0,19	5550	0,20	5850	0,17	5100	0,17	5100
20-40 cm	0,19	5700	0,21	6300	0,20	6000	0,19	5700
40-60 cm	0,33	9900	0,30	9000	0,25	7500	0,28	8400
Summe	-	21150	-	21150	-	18600	-	19200
Abschlusswerte im Jahr 2011								
0-20 cm	0,167	5025	0,15	4500	0,167	5025	0,16	4800
20-40 cm	0,18	5400	0,17	5100	0,18	5400	0,16	4800
40-60 cm	0,32	9600	0,29	8700	0,29	8700	0,26	7800
Summe	-	20025	-	18300	-	19125	-	17400

Tabelle 33: K-Salden aus den K_i-Ausgangs- und -Endgehalten sowie aus der Zufuhr durch Düngung und der Abfuhr mit den Erträgen der Fruchtarten im Bodenprofil bis 60 cm Tiefe in den vier K-Steigerungsstufen

Merkmal	0 kg K/ha	40 kg K/ha	80 kg K/ha	160 kg K/ha
Saldo (K _i -Boden)	-1125	-2850	+525	-1800
Saldo (Zu- u. Abfuhr)	-1028	-601	-258	+653

pH-Wert des Bodens

Im Gegensatz zu den Varianten der Gülle- und P-Düngung hatte die Kaliumdüngung einen geringeren Einfluss auf den pH-Wert des Bodens. In der Abbildung 124 sind die Werte aller elf Prüfglieder in den einzelnen Versuchsabschnitten zusammengefasst worden. Dadurch sind die teilweise beachtlichen Jahresunterschiede nicht mehr vorhanden und ein Trend lässt sich deutlich erkennen. Die dargestellten Werte basieren somit jeweils auf insgesamt zwölf Einzelwerten. Festzustellen ist, dass der pH-Wert in allen Prüfgliedern eine leichte Absenkung erfahren hat. Der eingesetzte Dolophos hat mit steigendem P-Einsatz den Versauerungsprozess allerdings deutlich verlangsamt (siehe vorhergehendes Kapitel).

Bei vergleichsweise etwas erhöhten Ausgangswerten sank der pH-Wert im Prüfglied ohne Düngung und in den Varianten mit steigender organischer Düngung etwas ab. Hier war es mehr als eine halbe pH-Einheit. Im Gegensatz dazu war in der K-Steigerungsreihe, mit tendenziell niedrigeren Ausgangs-pH-Werten, auch der geringste Rückgang zu verzeichnen.

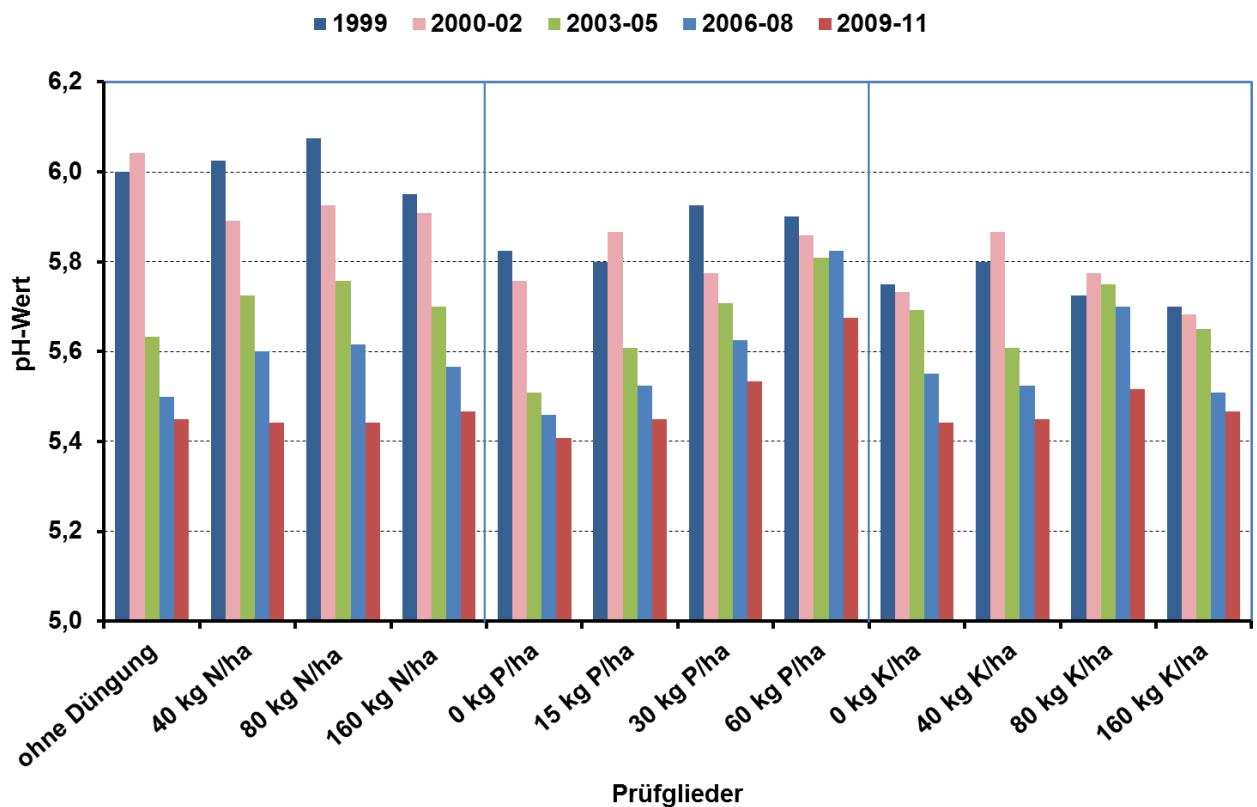


Abbildung 124: Übersicht zur Entwicklung der pH-Werte der Versuchsvarianten mit steigender organischer Düngung (ohne Düngung – 160 kg N/ha), P-Düngung (0 kg P/ha – 60 kg P/ha) und K-Düngung (0 kg K/ha – 160 kg K/ha) in verschiedenen Zeitabschnitten des Versuches

3.4 Zusammenhänge zwischen den Merkmalen

3.4.1 Einfluss von Nährstoffzufuhr und -Saldo auf die Veränderung der Nährstoffgehalte im Boden

Aus der Auswertung von einer Reihe von Dauerversuchen hat sich herausgestellt, dass zwischen den Nährstoffsalden in der Regel als einfache und erweiterte Schlagbilanz und den Veränderungen an Bodennährstoffen verhältnismäßig enge Beziehungen bestehen. Diese Relationen, die bisher jedoch meistens aus Dauerversuchen des konventionellen Landbaus mit den dort üblichen landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsbedingungen stammen, wurden genutzt, um vielfältige methodische Ansätze für den Aufbau und die Verbesserung von Bilanzierungs- und Düngungssystemen im ökologischen Landbau zu erstellen (siehe u. a. KOLBE & KÖHLER, 2008). Mit der Zeit stehen immer mehr Ergebnisse aus Dauerversuchen des ökologischen Landbaus zur Verfügung, um die bisherigen methodischen Ansätze zu überprüfen und weiter zu entwickeln.

Phosphor

Der Einfluss der organischen und mineralischen Düngung ist auf die Gehalte an DL- bzw. CAL-löslichem Phosphat untersucht worden (siehe Kap. 3.1 u. 3.2). Da gleichzeitig auch die Schlagsalden für den Nährstoff Phosphor aus diesen experimentellen Daten vorliegen, kann an dieser Stelle nun untersucht werden, welchen quantitativen Einfluss die Nährstoffsalden auf die Entwicklung der Bodengehalte an Phosphat ausgeübt haben (Abb. 125).

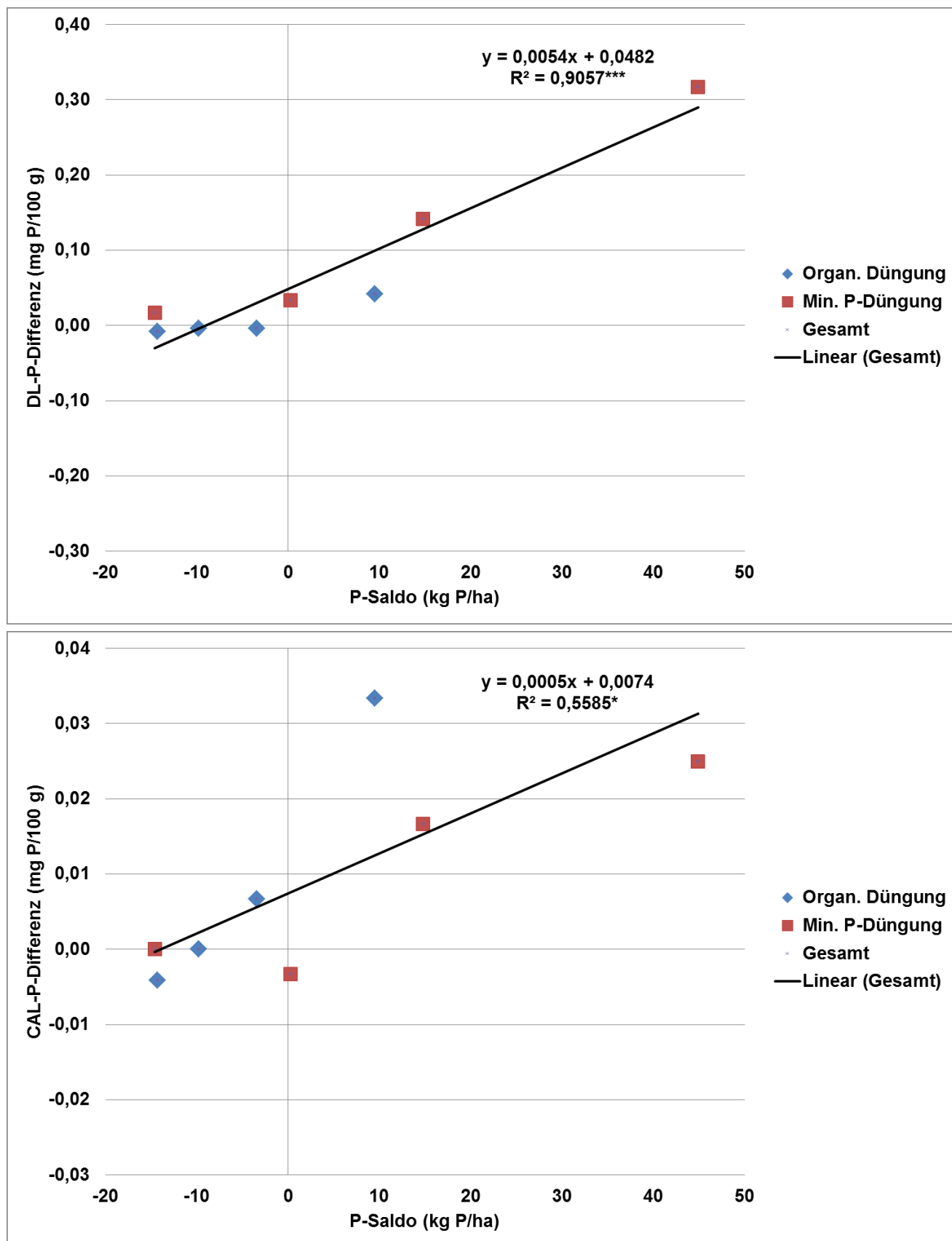


Abbildung 125: Einfluss der P-Schlagsalden auf die jährliche Veränderung der DL- und CAL-löslichen P-Gehalte des Bodens in Folge steigender organischer und mineralischer P-Düngung

Das mit beiden Extraktionsmitteln erfasste Phosphat steht in einer relativ engen positiven Beziehung mit den P-Schlagsalden in Folge der steigenden mineralischen oder organischen Düngung. Dabei sind die Bestimmtheitsmaße der Regressionen des DL-Phosphats höher und es erfolgt eine deutlichere jährliche Veränderung der P-Gehalte in Folge steigender P-Salden als es bei den Ergebnissen mit den CAL-löslichen Werten zu erkennen ist. Insbesondere beim Rohphosphat werden geringere lösliche Gehalte durch den CAL-Extrakt erfasst. Eine Differenz im Saldo von 10 kg P/ha führt hierbei zu einer umgerechneten jährlichen Differenz in der löslichen P-Menge von 0,20 kg P/ha (= 2,0 %), während beim DL-Extrakt eine P-Menge von 2,1 kg P/ha (= 21,2 % des P-Saldos) berechnet wurde (zur Umrechnung von Gehalten in Mengen an Bodennährstoffen siehe Kap. 2.3).

Im Allgemeinen bestehen jedoch keine großen Unterschiede zwischen den löslichen Werten in Folge organischer Düngung (Gülle, Stalldung) oder der mineralischen P-Düngung mit Dolophos. Ungefähr ein Saldo um -10 kg P/ha und Jahr ist für beide Extrakte erforderlich, um den Versorgungsgrad an Phosphat im Boden aufrecht zu erhalten (Bodenänderung = 0 mg P/100 g, Abb. 125). Es erfolgen somit noch weitere Zufuhren an Phosphor, die durch die Saldierung nicht erfasst werden (u. a. Untergrund, P-Umsatz aus weiteren organischen Quellen der Fruchtfolge, P-Deposition aus der Atmosphäre).

Während im DL-Extrakt eine ungefähr 10fach höhere Menge an Phosphat als löslich ausgewiesen wird, besteht zwischen beiden Extraktionsmitteln bei der Erfassung der löslichen P-Mengen aus der organischen Düngung eine sehr hohe Übereinstimmung, wie aus folgender Gleichung abgelesen werden kann ($y = 0,0019x + 0,016$; $R^2 = 0,88^{***}$; DL-P-Steigung $b = 0,0021$, CAL-Steigung $b = 0,0016$; vgl. Abb. 125). Bei einem Saldo zwischen -8 kg bis -9 kg P/ha wird keine Bodenänderung mehr festgestellt. Eine Saldo-Differenz von 10 kg P/ha führt im DL-Extrakt zu einer jährlichen Überführung von umgerechnet 0,8 kg P/ha (= 8,3 %) und im CAL-Extrakt von 0,6 kg P/ha (= 6,3 %) in die jeweils lösliche Nährstofffraktion.

Insgesamt gibt es auch eine relativ gute Übereinstimmung mit den bisher ermittelten Ergebnissen aus P-Steigerungsversuchen des konventionellen Landbaus. Das trifft sowohl für die Allgemeingültigkeit der Relation zwischen den P-Salden und der Veränderung der P-Gehalte des Bodens in Folge verschiedener organischer und mineralischer Düngemittel als auch für die ermittelten Steigungen (b) der mathematischen Gleichungen bei Nutzung verschiedener Extraktionsmittel zu (siehe KOLBE & KÖHLER, 2008).

Kalium

Die statistischen Beziehungen zwischen den ermittelten K-Schlagsalden und der jährlichen Bodenänderung an DL- bzw. CAL-löslichem Kalium verschiedener Düngemittel sind in Abbildung 126 dargestellt worden. Es bestehen ebenfalls positive Regressionen ähnlicher statistischer Signifikanz, wie sie bereits für das Phosphat beschrieben worden sind. Im Durchschnitt der Varianten erfolgt bei einer Saldo-Differenz von 100 kg K/ha eine Veränderung der DL-löslichen Nährstofffraktion um 8,7 kg K/ha und Jahr (= 8,7 %) und bei Zugrundelegung der CAL-Extraktion eine Veränderung um 10,2 kg K/ha und Jahr (= 10,2 % der Saldo-Differenz).

Im Vergleich zu den mineralisch verabreichten P- bzw. K-Mengen werden etwas geringere Werte in der Änderung der Bodengehalte bei organisch verabreichtem Phosphat oder Kalium ermittelt. Eine Ursache hierfür könnte sein, weil in Folge des Humusumsatzes jeweils eine etwas geringere Freisetzung an diesen Nährstoffen erfolgt ist bzw. noch höhere in der organischen Substanz festgelegte Mengen vorhanden sind, als durch die Nährstoffsaldierung bei 100%iger Anrechnung der Nährstoffe angezeigt werden kann.

Für den Humusumsatz ist daher auch die Versuchsdauer zu beachten, die im vorliegenden Versuch mit 12 Jahren noch als verhältnismäßig kurz zu bezeichnen ist. Es kann erwartet werden, dass mit Zunahme der Versuchsdauer im Vergleich zum Nährstoffsaldo ein immer höherer Anteil an freigesetzten Nährstoffen im Bodenextrakt erfasst wird, so dass die aufgezeigten Unterschiede in der Bodenänderung zwischen organisch und mineralisch verabreichten Nährstoffen noch geringer werden oder schließlich nicht mehr vorhanden sind. Eine Ausnahme stellt der CAL-P-Extrakt dar, bei dem aus Dolophos ein deutlich geringerer Anteil als pflanzenverfügbares Phosphat ausgewiesen wird als im DL-Extrakt (siehe Abb. 125).

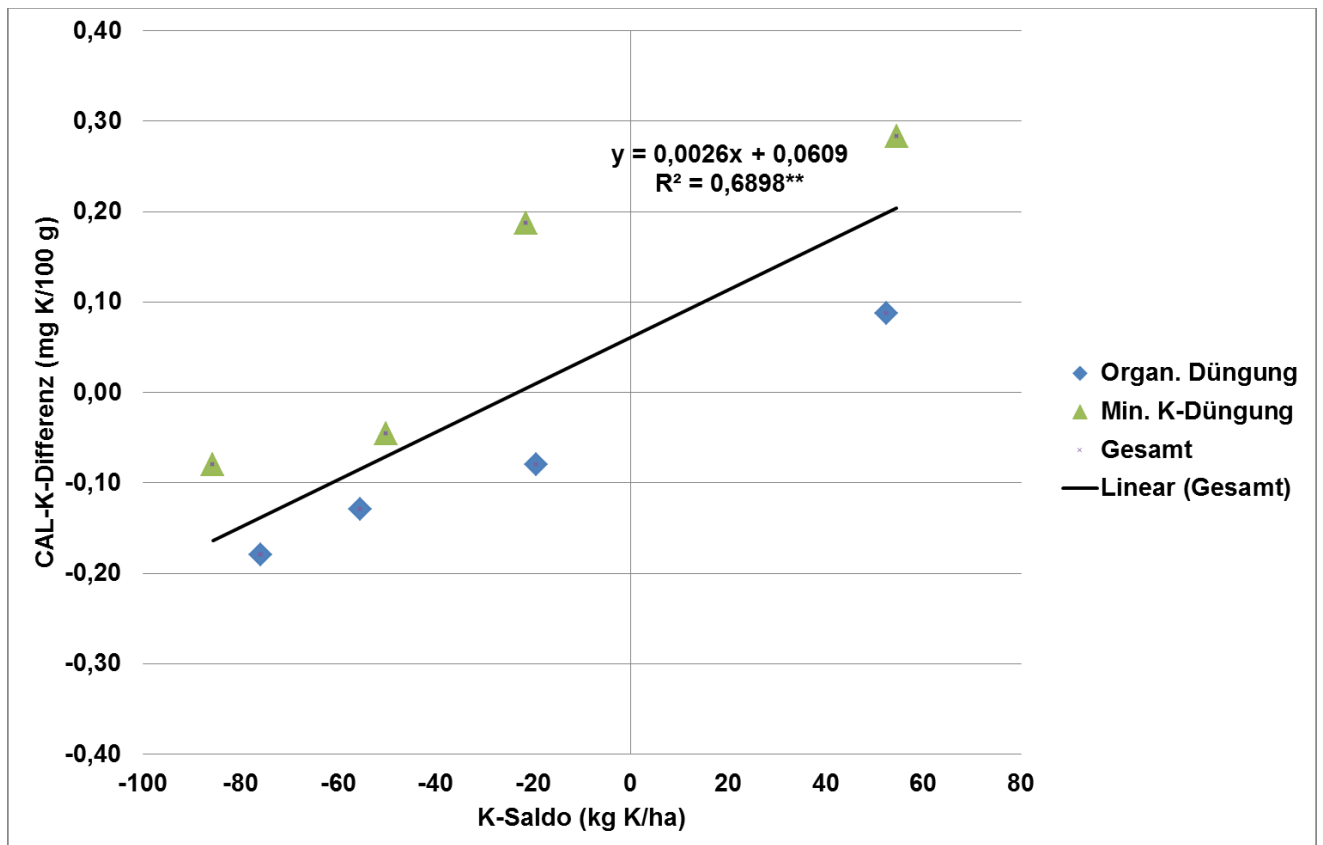
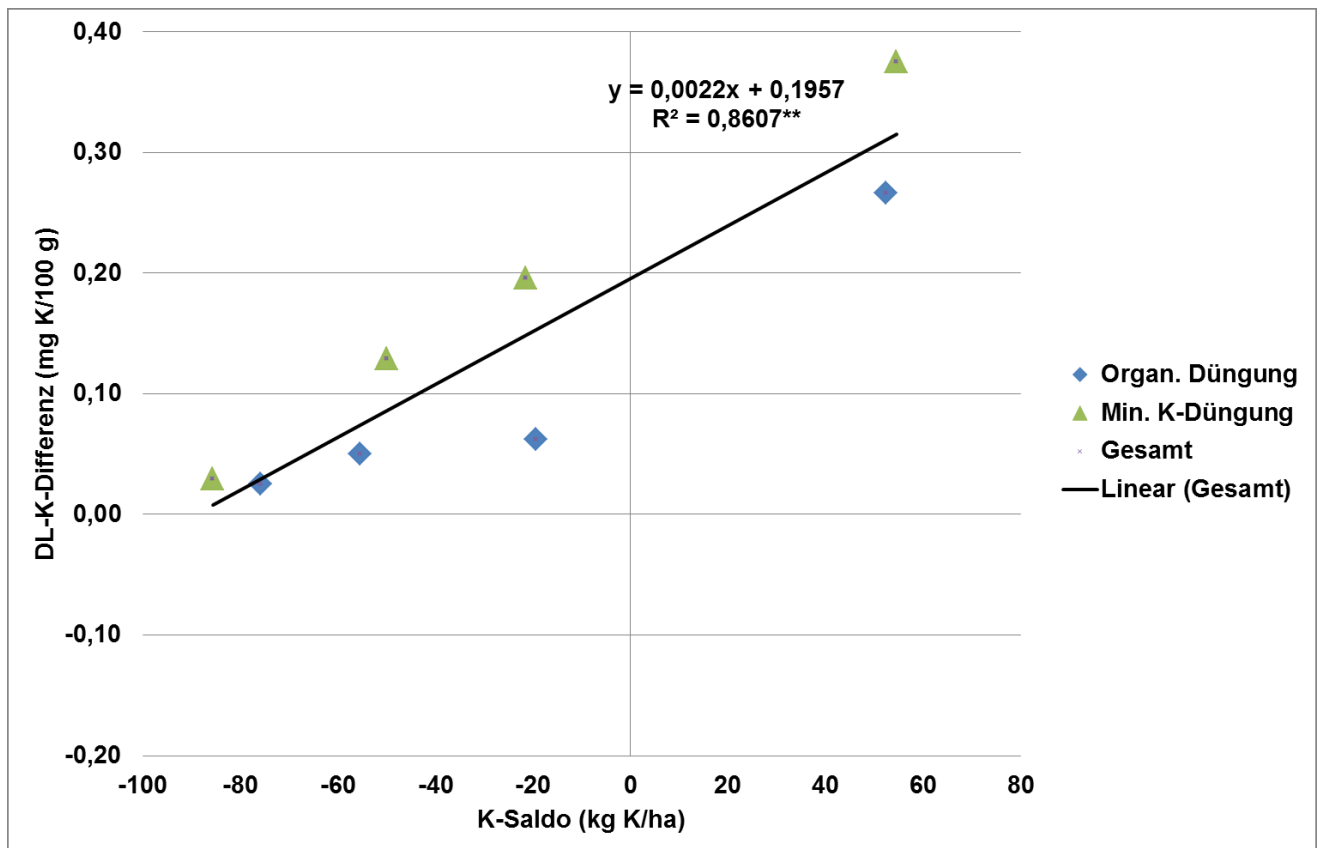


Abbildung 126: Einfluss der K-Schlagsalden auf die jährliche Veränderung der DL- und CAL-löslichen K-Gehalte des Bodens in Folge steigender organischer und mineralischer K-Düngung

An der generellen Ausrichtung der gefundenen Beziehungen werden hierdurch aber keine deutlichen Veränderungen zu erwarten sein. Auch beim Nährstoff Kalium verwundert es daher nicht, dass im Vergleich zu früheren Auswertungen aus konventionellen Dauerversuchen wiederum sehr ähnliche mathematische Zusammenhänge gefunden werden (vgl. KOLBE & KÖHLER, 2008). Das trifft sowohl für die Steigung der Gleichungen als auch für die ablesbaren Nährstoffmengen zu, die zu veranschlagen sind, wenn keine Bodenänderung an Kalium stattfindet (Bodenänderung = 0 mg K/100 g, Abb. 126).

Bei der Nährstoffnachlieferung ist die Bodenart von ausschlaggebender Bedeutung. Für den Lehm Boden des Rodaer Standortes kann somit eine Nährstoffnachlieferung von durchschnittlich über 80 kg K/ha und Jahr bei Nutzung des DL-Extraktes und von Werten um 20 kg K/ha und Jahr bei Verwendung der CAL-Extraktionsmethode veranschlagt werden. Daher können je nach verwendetem Extraktionsmittel, negative K-Salden zwischen -20 bis -80 kg K/ha und Jahr vorliegen, ohne dass die löslichen K-Gehalte des Bodens sich über die Zeit verändern.

Humus- und Stickstoffgehalt des Bodens

In Folge des Einsatzes der organischen Düngemittel ist zunächst von Bedeutung, welche Beziehungen zwischen der Entwicklung der C_{org} - bzw. der N_t -Gehalte des Bodens einerseits und den Nährstoffbilanzen andererseits bestehen. Hierbei steht die N-Schlagbilanz im Vordergrund des Interesses (Abb. 127).

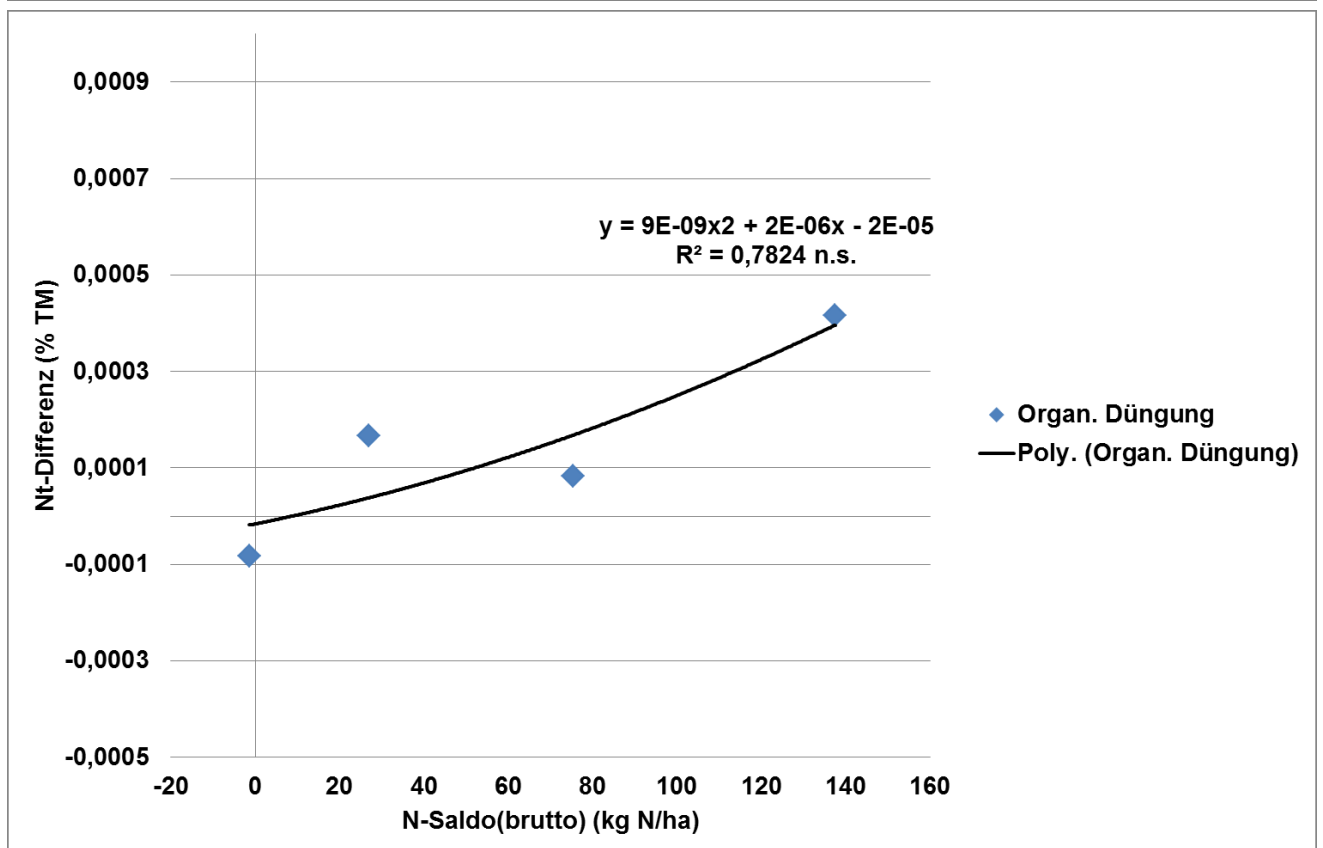
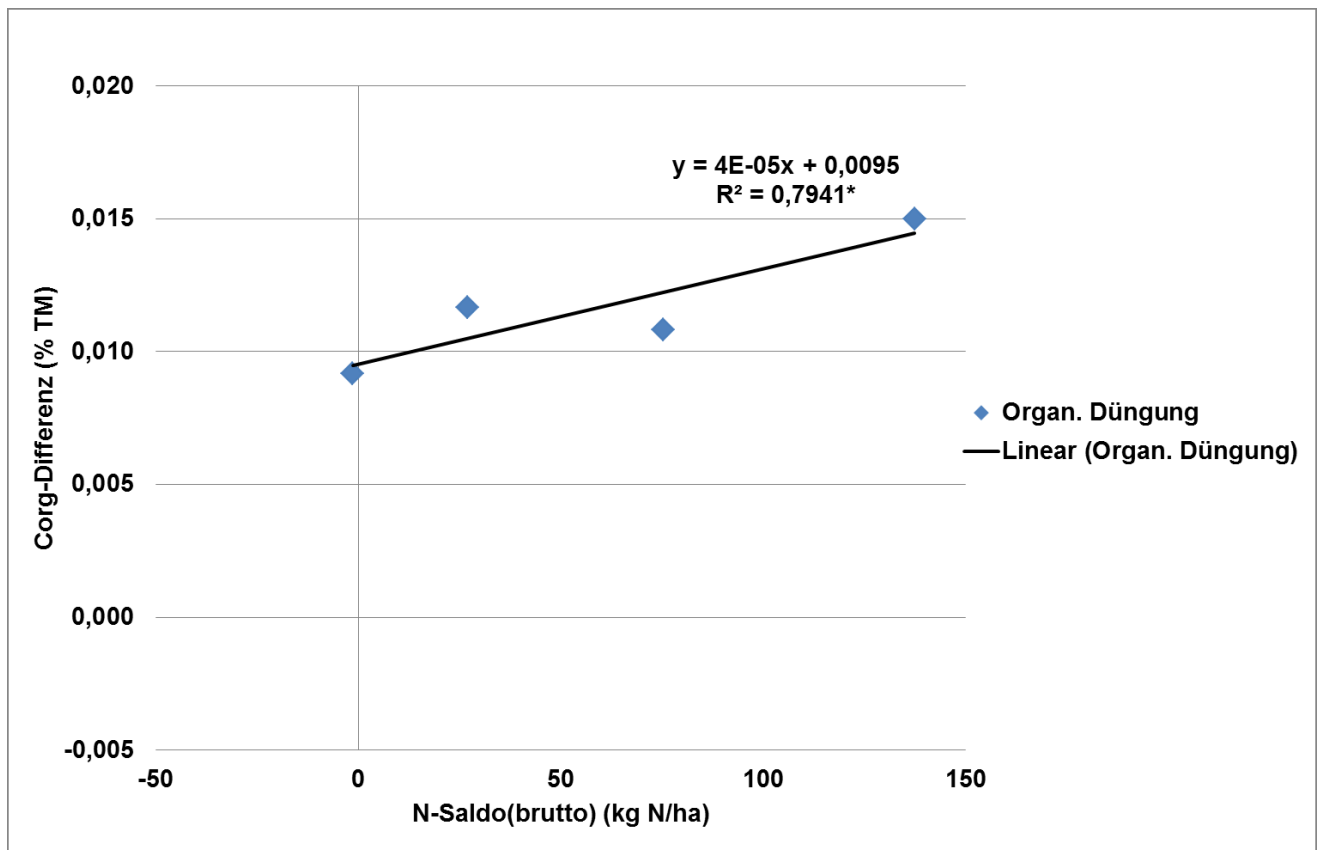


Abbildung 127: Einfluss der N-Schlagsalden auf die jährliche Veränderung der C_{org} - und N_t -Gehalte des Bodens in Folge steigender organischer Düngung

Durch die organische Düngung sind sowohl die C_{org} - als auch in der Tendenz die N_t -Gehalte des Bodens angestiegen. Die jährlichen Veränderungen sind aber als sehr gering anzusehen. In Folge steigender N-Salden nehmen beide Komponenten im Boden zu. Durch eine Saldo-Differenz von 100 kg N/ha erfolgt eine Veränderung der C_{org} -Menge im Boden von 157,2 kg/ha und tendenziell auch eine Änderung des N_t -Pools von 11,8 kg N/ha und Jahr (= 11,8 % der veranschlagten Saldo-Differenz). Im Allgemeinen werden Brutto-Salden zwischen ungefähr ± 0 kg N bis ca. +50 kg N/ha als optimale Werte einer „guten fachlichen Praxis“ angenommen (KOLBE, 2015). Nach diesen Ergebnissen kann der untere Bereich der Toleranz recht gut markiert werden, weil unterhalb von 0 kg N/ha es auch zu einer Abnahme der N_t -Gehalte des Bodens kommen kann. Dieser Zusammenhang ist aus dem Verlauf der eingezeichneten Regressionskurve recht gut ablesbar obwohl die Variantenanzahl noch etwas gering ist.

3.4.2 Einfluss der Nährstoffversorgung auf die Ertragsreaktion der Fruchtarten

In den vorherigen Kapiteln sind die Erträge der Fruchtarten in Folge der differenzierten organischen und mineralischen Düngung im Einzelnen dargestellt worden. Außer zur organischen Düngung wurden jedoch nicht einheitliche und z. T. nur geringe Ertragsreaktionen insbesondere nach einer steigenden mineralischen P- und K-Versorgung ermittelt.

In diesem zusammenfassenden Kapitel soll daher nochmals eine genaue Untersuchung und relative Einordnung der Ertragsreaktionen der Fruchtarten in Verbindung mit der spezifischen Bodenversorgung an Phosphat und Kalium sowie einer unterschiedlichen N-Versorgung aus der organischen Düngung ins Auge gefasst werden. Hierzu werden weitere Ergebnisse aus Untersuchungen von anderen Standorten einbezogen, um die eigenen Versuchsergebnisse besser einzuordnen.

Phosphor

Eine anschauliche Methode zur allgemeinen Einschätzung der Düngungswirkung besteht darin, die Ertragswirkung der Grunddüngung aus möglichst vielen Feldversuchen und Standorten in Abhängigkeit von dem Versorgungsniveau an löslichen Bodennährstoffen in einem zusammenfassenden Streudiagramm darzustellen (siehe SCHACHTSCHABEL et al., 1976). Auf diese Weise sind auch die verfügbaren Ergebnisse zur Grunddüngung, die bisher aus ökologischen Versuchen über einen längeren Zeitraum ermittelt worden sind, zusammengeführt worden (siehe KOLBE, 2010, 2019).

Im Vergleich zu den anderen Ergebnissen aus Deutschland, wird zunächst deutlich, wie die Ergebnisse des Versuches aus Roda bei Einbeziehung aller Prüfgliedkombinationen an CAL-löslichem Phosphor einzuordnen sind (Abb. 128). Es ist zu erkennen, dass für den Standort Roda lediglich Ergebnisse bei sehr niedriger Bodenversorgung an löslichem Phosphat ermittelt worden sind, die im Bereich der VDLUFA-Versorgungsklasse A liegen. Trotz langjähriger mineralischer P-Düngung konnte dieses niedrige Versorgungsniveau nur geringfügig angehoben werden. Von den anderen Versuchen und Standorten liegen demgegenüber Werte vor, die aus dem gesamten P-Versorgungsbereich von Mangel der Klasse A bis zu einer sehr hohen Versorgung der Klasse E reichen.

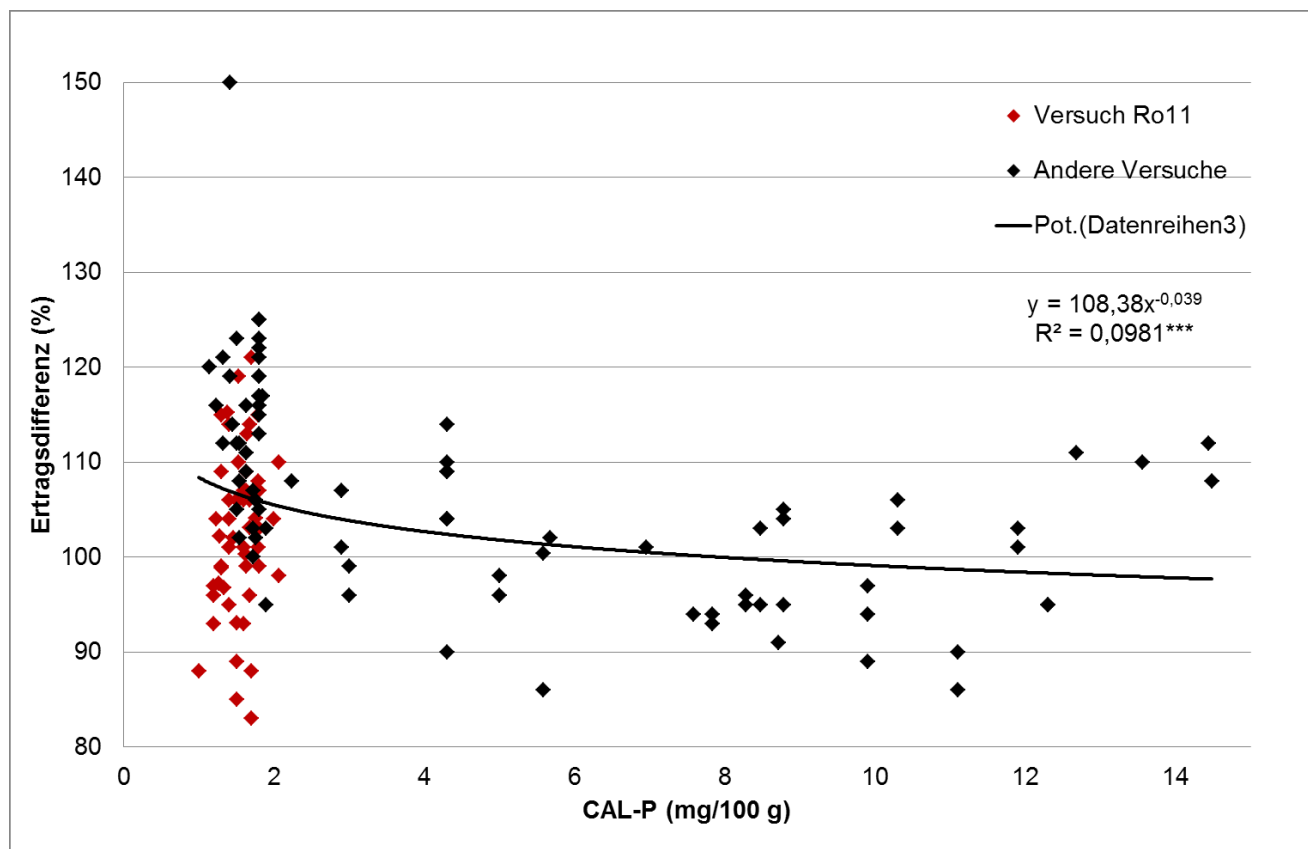


Abbildung 128: Beziehungen zwischen den relativen Ertragswirkungen der mineralischen P-Düngung (ohne Düngung = 100 %) in Abhängigkeit von den löslichen CAL-P-Bodengehalten sowie Einordnung des Versuches Ro11 in Relation mit Ergebnissen von insgesamt 8 Standorten in Deutschland (KOLBE, 2010, erweitert)

Ab ca. 5 mg P/100 g Boden an aufwärts wird keine Veränderung der Ertragsdifferenzen mehr ermittelt, was auf die Erreichung maximaler Erträge in Folge steigender P-Versorgung hinweist. Bei einem durchschnittlichen Ertragseffekt von 99,5 % wird dann eine Standardabweichung von $\pm 7,2$ % Ertragsanteilen gefunden. Es ist eindeutig zu erkennen, dass bei Bodengehalten unterhalb dieses Limits die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass durch zusätzliche Düngungsmaßnahmen Ertragseffekte erzielt werden, die über diesen Werten der Standardabweichung liegen.

In diesem niedrigen P-Versorgungsbereich wird dann eine durchschnittliche Ertragswirkung von 107,2 % bei einer Standardabweichung von $\pm 10,3$ % gefunden. Hierzu tragen auch die Ergebnisse aus Roda bei. Für die Erzielung eines optimalen Ertrages kann hiernach ein P-Versorgungsbereich von ca. 2,5 – 5,0 mg P/100 g Boden ausgewiesen werden, der nach ALBERT et al. (2007) in etwa der Versorgungsklasse B entspricht (durchschnittlicher Ertragseffekt = $102,9 \pm 6,6$ %).

Zur weiteren Charakterisierung der Ertragsreaktionen der einzelnen Fruchtarten wurden darüber hinaus die Ergebnisse des Versuches Ro11 getrennt nach Fruchtartengruppen und den eingesetzten Extraktionsmitteln dargestellt (Abb. 129 – 130). Es ist zu erkennen, dass an Hand der eingezeichneten mittleren Regressionsgraden oft keine eindeutige Rangfolge der Ertragseffekte festgelegt werden kann. In der Tendenz werden jedoch bei beiden Extraktionsmitteln die geringsten Ertragseffekte bei den Getreidearten ermittelt, gefolgt von den Leguminosen und den Kartoffeln, bei denen bei hoher Schwankung der Einzelwerte, etwas höhere mittlere Mehrerträge nach zusätzlicher P-Düngung zu erwarten sind.

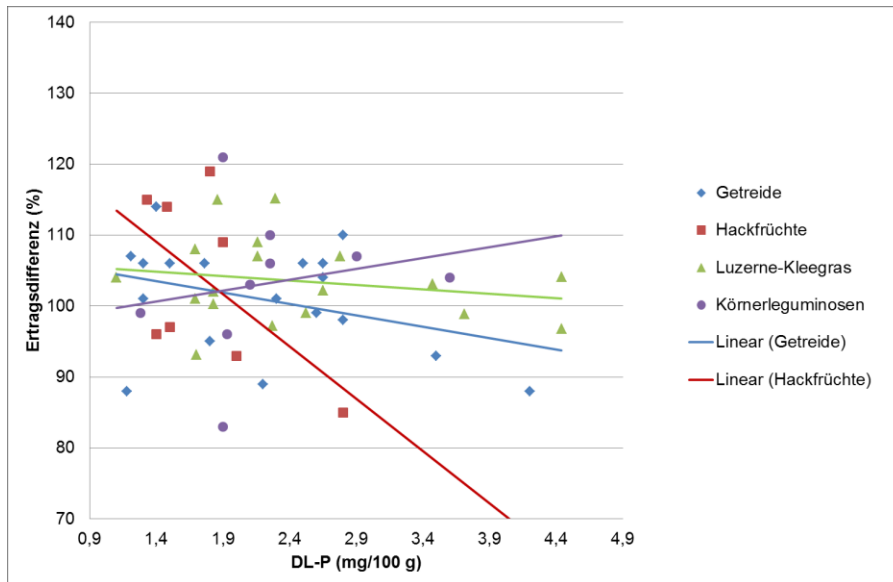


Abbildung 129: Durchschnittliche Ertragswirkung einzelner Fruchtartengruppen durch zusätzliche mineralische P-Düngung (ohne Düngung = 100 %) in Abhängigkeit von den DL-P-Bodengehalten ermittelt durch einfache Regressionsanalysen

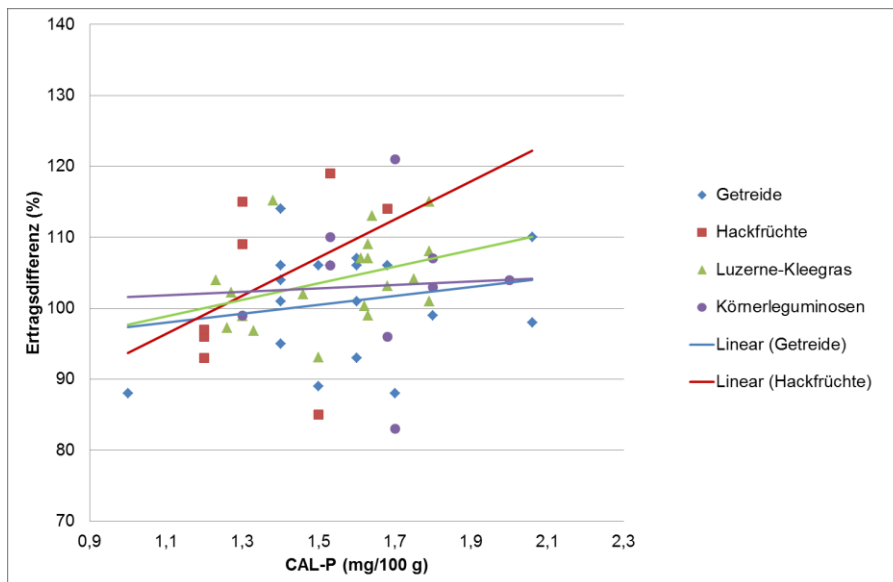


Abbildung 130: Durchschnittliche Ertragswirkung einzelner Fruchtartengruppen durch zusätzliche mineralische P-Düngung (ohne Düngung = 100 %) in Abhängigkeit von den CAL-P-Bodengehalten ermittelt durch einfache Regressionsanalysen

In den ausgewiesenen relativ niedrigen Versorgungsbereichen an DL- bzw. CAL-löslichem Phosphat wurden im vorgestellten Versuch in der Tendenz lediglich folgende Durchschnittswerte an Erträgen nach zusätzlicher mineralischer P-Düngung ermittelt (ohne P-Düngung = 100 %):

- Getreidearten 101 %
- Körnerleguminosen 103 %
- Luzerne-Kleegras 104 %
- Hackfrüchte 104 %.

Kalium

Abbildung 131 zeigt die Gegenüberstellung der Ertragswirkungen durch mineralische K-Düngung in Abhängigkeit von der Bodenversorgung an CAL-löslichem Kalium aus Versuchen von 9 Standorten in Deutschland. Auch beim Nährstoff Kalium liegen im Versuch aus Roda nur verhältnismäßig niedrige Werte in der Bodenversorgung vor. Sie passen sehr gut zu den Ergebnissen aus den anderen Versuchen und decken für den Lehm-boden in etwa die Versorgungsklassen A und B ab (durchschnittliche Ertragswirkung = 110,7 %, Standardabweichung = $\pm 16,0$ %).

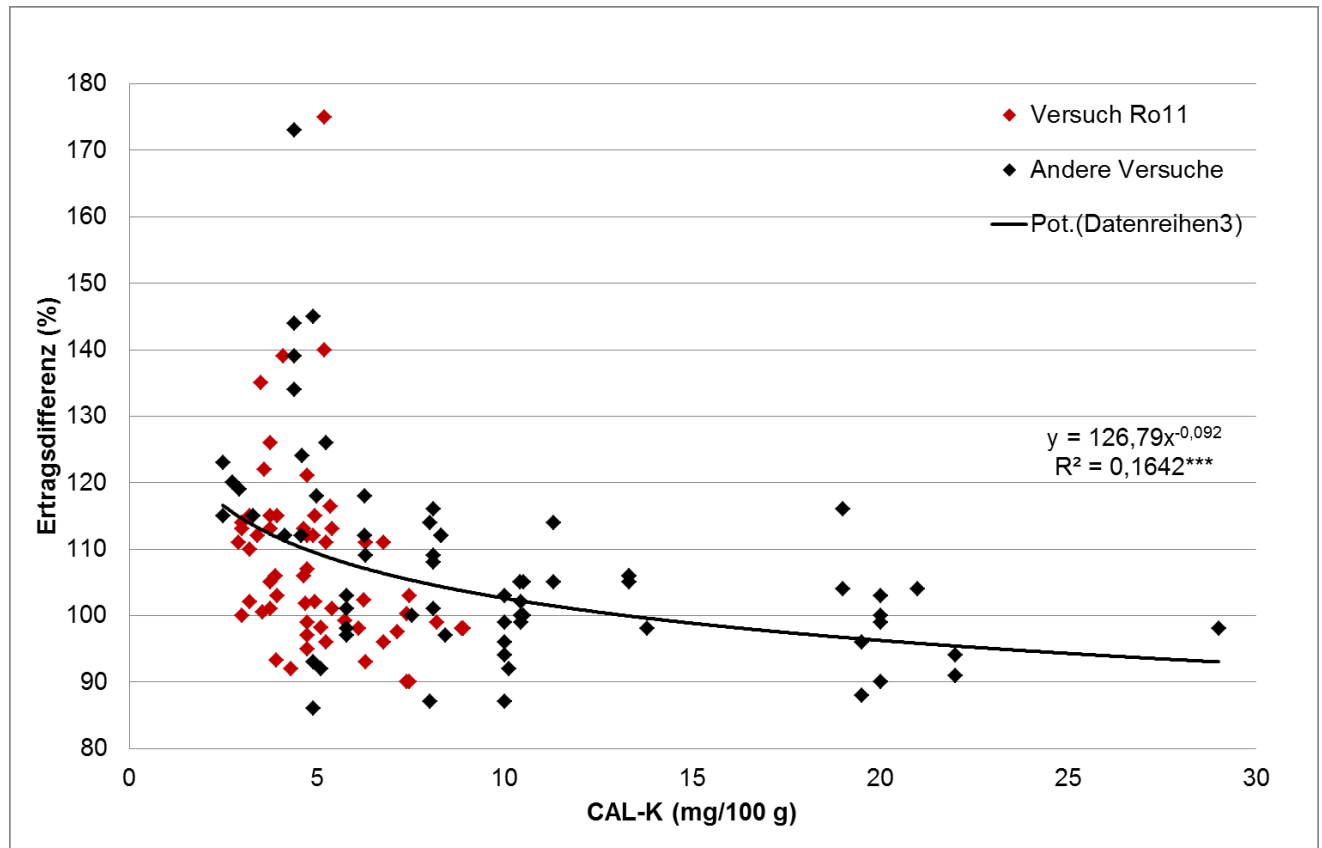


Abbildung 131: Beziehungen zwischen der relativen Ertragswirkung der mineralischen K-Düngung (ohne Düngung = 100 %) in Abhängigkeit von den löslichen CAL-K-Bodengehalten sowie Einordnung des Versuches Ro11 in Relation mit Ergebnissen von insgesamt 9 Standorten in Deutschland (KOLBE, 2010, erweitert)

Ab ca. 8,5 mg K/100 g Boden an aufwärts sind keine weiteren abnehmenden Ertragsdifferenzen mehr festzustellen. Es wird das Ertragsmaximum erreicht, wonach steigende K-Gehalte im Boden keine Ertragsreaktionen mehr aufweisen. Bei einer Ertragswirkung von 99,8 % wird dann eine Standardabweichung von $\pm 6,4$ % Ertragsanteilen ermittelt. Für die Erzielung eines optimalen Ertragsniveaus ist somit auch beim Nährstoff Kalium die Klasse B als ausreichend zu bezeichnen. Insgesamt wird deutlich, dass für beide Nährstoffe eine gesicherte Einstufung und Ableitung eines optimalen Ertragsniveaus nur aus dem bundesweiten Verbund an Versuchen gelingt.

Zur Ermittlung der Rangfolge der Ertragswirkung der einzelnen Fruchtarten wurden wiederum die im Versuch Roda ermittelten Ergebnisse zu vier Fruchtartengruppen zunächst mit Hilfe der Regressionsanalyse untersucht (Abb. 132 – 133). Für den Nährstoff Kalium ist insgesamt eine bessere Klassifizierung der Ertragseffekte gelungen als beim Nährstoff Phosphor (vgl. Abb. 129 – 130). Die Ergebnisse mit beiden Extraktionsmitteln weisen für die Körnerleguminosen den höchsten Mehrertrag aus. Durch eine zusätzliche K-Düngung konnte

für die Hackfrüchte eine etwas geringere Bedürftigkeit ermittelt werden, während bei dem Luzerne-Klee gras und den Getreidearten die geringsten Ertragswirkungen hervorgerufen worden sind.

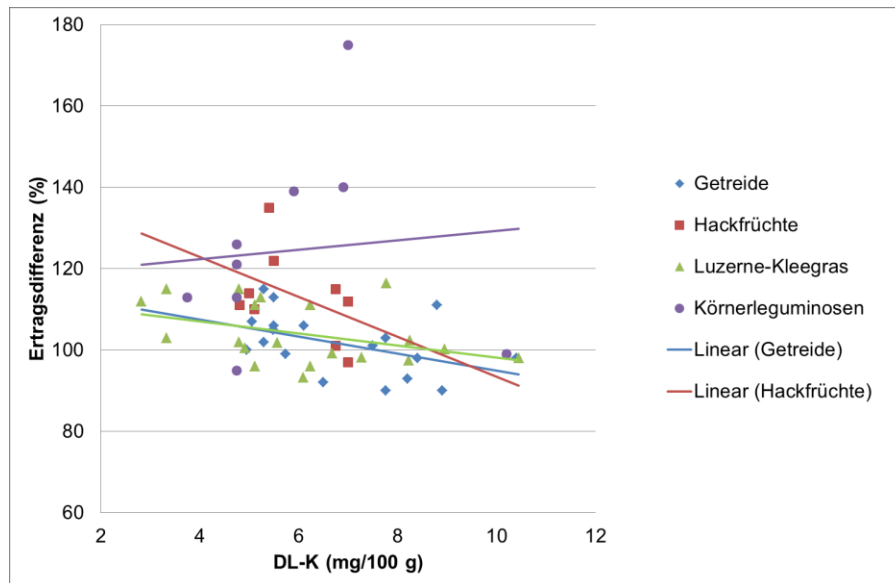


Abbildung 132: Durchschnittliche Ertragswirkungen einzelner Fruchtartengruppen durch zusätzliche mineralische K-Düngung (ohne Düngung = 100 %) in Abhängigkeit von den DL-K-Bodengehalten ermittelt durch einfache Regressionsanalysen

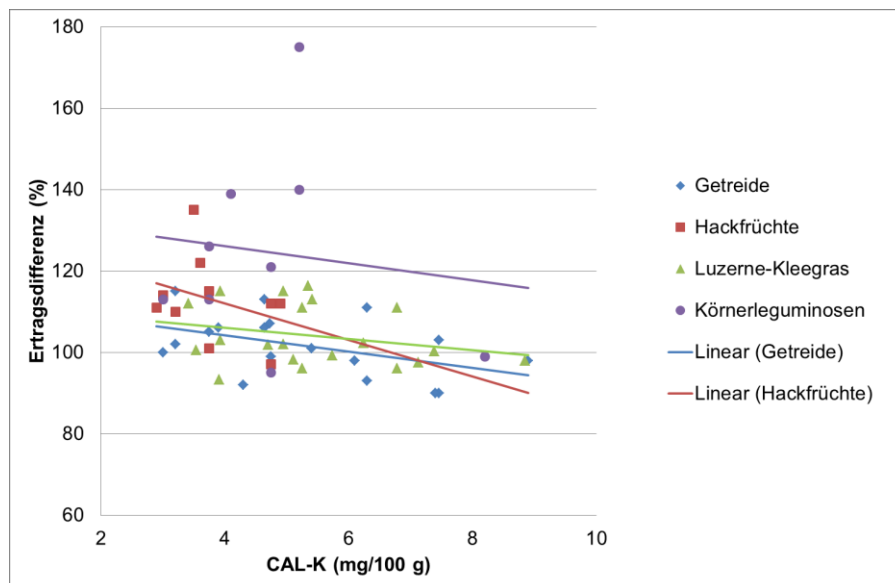


Abbildung 133: Durchschnittliche Ertragswirkungen einzelner Fruchtartengruppen durch zusätzliche mineralische K-Düngung (ohne Düngung = 100 %) in Abhängigkeit von den CAL-K-Bodengehalten ermittelt durch einfache Regressionsanalysen

In den ausgewiesenen relativ niedrigen Versorgungsbereichen an DL- bzw. CAL-löslichem Kalium wurden im Versuch Ro11 folgende Durchschnittswerte in den Erträgen durch jeweils zusätzliche mineralische K-Düngung ermittelt (ohne K-Düngung = 100 %):

- Getreidearten 102 %
- Luzerne-Klee gras 104 %

- Hackfrüchte 113 %
- Körnerleguminosen 125 %.

Stickstoff aus organischen Düngungsquellen

Die experimentelle Herausarbeitung der Ertragswirkung einzelner Nährstoffe nach Ausbringung organischer Düngemittel gelingt meistens nicht, da mit der Düngung immer gleichzeitig eine Zufuhr vieler Nährstoffe und weiterer wachstumsfördernder Substanzen erfolgt. Daher wird in der Regel – wie in diesen Versuchen auch – auf mineralische Düngemittel zurückgegriffen, wenn es darum geht, insbesondere die Ertragswirkung nachrangiger Nährstoffe, wie z. B. den Grundnährstoffen Phosphor und Kalium, nachzuweisen. Eine gewisse Ausnahme bildet der Stickstoff, da dieser Nährstoff meistens auch unter ökologischen Anbauverfahren als wesentlicher, ertragsbegrenzender Faktor anzusehen ist.

So können durch die Mineralisation aus der sich umsetzenden organischen Substanz und dem Humus des Bodens freigewordene und pflanzenverfügbare N-Mengen unter Anrechnung der $N_{\min}$ -Gehalte im Frühjahr zur N-Bedarfsermittlung einzelner Fruchtarten verwendet werden (BERRY et al., 2002; OLFS et al., 2005). Derartige Verfahren können auch im Ökolandbau mit Erfolg angewendet werden (KOLBE et al., 2015; KOLBE, 2021).

Zur übergeordneten langjährigen Klassifizierung der Bewirtschaftungsmaßnahmen ganzer Anbausysteme, vergleichbar denen der Grunddüngung (siehe vorausgehende Kapitel), sind diese Ansätze jedoch weniger geeignet. Da z. B. die $N_{\min}$ -Werte gewöhnlich großen Schwankungen unterworfen sind und andere vergleichbare N-Komponenten des Bodens nicht bekannt sind, steht daher kein geeignetes Merkmal zur langfristigen Charakterisierung der N-Versorgung aus organischen Materialien zu Verfügung.

Auf Grund der positiven Erfahrungen beim praktischen Umgang mit dem VDLUFA-Klassifizierungssystem zur Einstufung der Ergebnisse der Humusbilanzierung (siehe KOLBE, 2012; EBERTSEDER et al., 2014), bestehen seit einiger Zeit ebenfalls Bemühungen, auch die Bilanzierungsergebnisse für den Nährstoff Stickstoff als Basis für die Einstufung der Ertragswirkung der Fruchtarten im ökologischen Landbau zu verwenden (KOLBE, 2015).

Zur Klassifizierung der allgemeinen N-Versorgung wurden die Ergebnisse der N-Schlagsalden (als Bruttoansatz, vgl. Kap. 2.3) den relativen Ertragswirkungen der Fruchtarten aus Dauerversuchen in einem Streudiagramm gegenübergestellt. Da zur Beantwortung dieser speziellen Fragestellung noch nicht genügend Ergebnisse aus ökologischen Exaktversuchen vorliegen, wurden zunächst wiederum, ähnlich der Vorgehensweise bei der Grunddüngung (siehe KOLBE & KÖHLER, 2008), neben den wenigen Ökoversuchen auch einige Varianten mit extensiver N-Mineraldüngung sowie alle Varianten mit organischen Düngemitteln aus besonders ausgesuchten 39 Dauerversuchen Mitteleuropas herangezogen (KOLBE, 2012).

Auf diese Weise ist es gelungen, eine genügend hohe Grundgesamtheit von 444 Datensätzen zusammenzustellen, so dass eine quantitative Auswertung der Ertragsreaktionen ermöglicht wurde. Zur vergleichenden Bewertung wurden dann die entsprechend aufbereiteten Ergebnisse der ersten und zweiten Fruchtfolgerotation des Versuches Ro11 in dieses Grundgerüst an Ergebnissen separat ausgewiesen und graphisch dargestellt (Abb. 134).

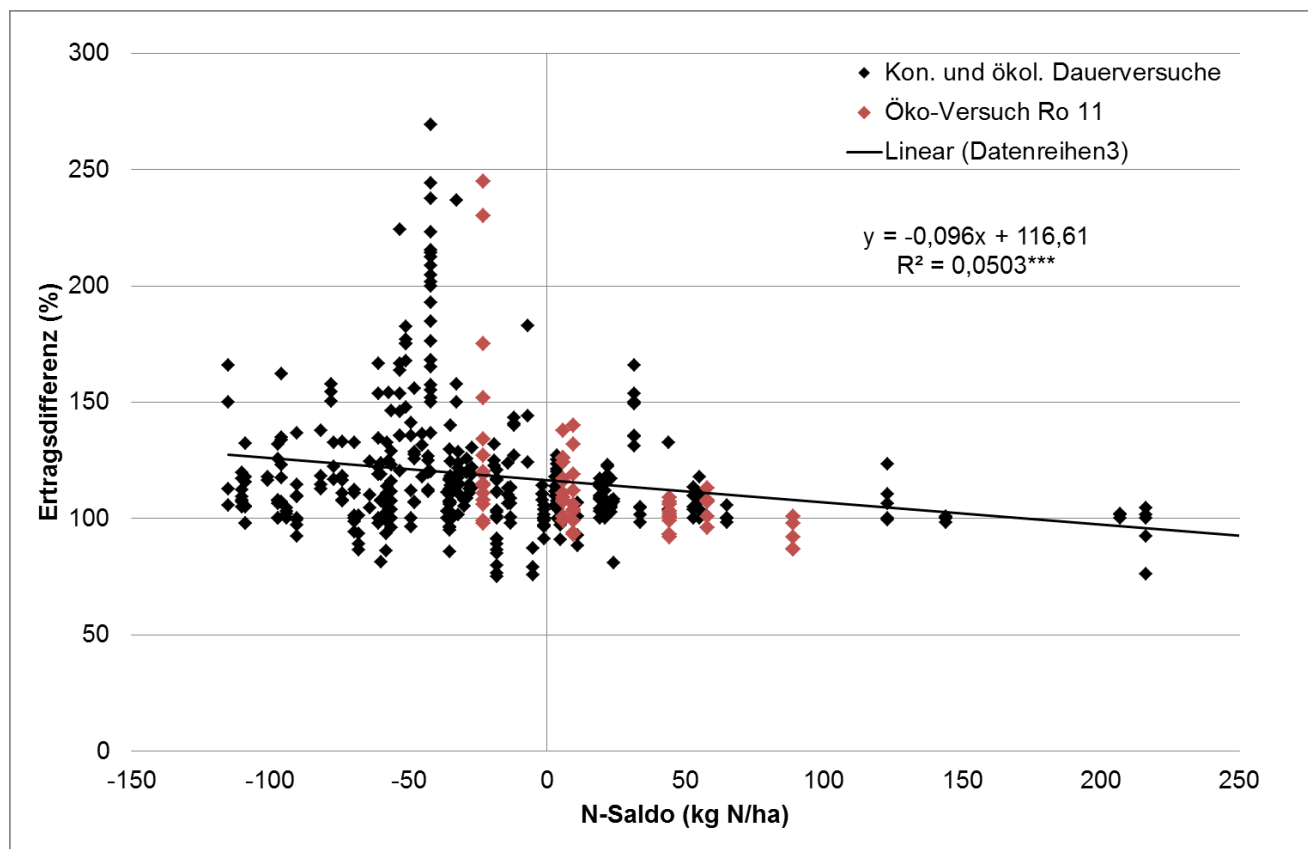


Abbildung 134: Beziehungen zwischen der relativen Ertragswirkung von zusätzlichen organischen Düngungsmaßnahmen (ohne Düngung = 100 %) und den Brutto-N-Salden aus konventionellen und ökologischen Dauerversuchen unter der separaten Ausweisung der Ergebnisse des Versuches Ro11

Zunächst ist deutlich zu sehen, dass der im Versuch Ro11 festgestellte Saldobereich wesentlich kleiner ist als der aus den anderen Dauerversuchen. Das liegt daran, dass in den Versuchen viele Varianten sowohl mit extrem niedriger als auch extrem hoher N-Versorgung untersucht worden sind, wodurch ein guter Überblick über alle vorkommenden Versorgungsbereiche gewährleistet werden kann. Diese Extremvarianten haben in der Regel jedoch keine Praxisrelevanz, daher wurde die Prüfung derartiger Varianten in den eigenen Versuchen ausgeschlossen.

Insgesamt gesehen wird eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen des Versuches Ro11 und den anderen Dauerversuchen vorgefunden (Abb. 134). Wenn die mittleren N-Salden unter 0 kg N/ha und Jahr abfallen, dann steigt die Wahrscheinlichkeit deutlich an, dass durch zusätzliche geeignete Düngungsmaßnahmen erhebliche Mehrerträge durch die angebauten Fruchtarten der Fruchtfolgen erzielt werden können. Im negativen Saldenbereich wird so bei Einbeziehung aller Ergebnisse ein durchschnittlicher Mehrertrag von 127,3 % und eine Standardabweichung von $\pm 35,5$ % erreicht. Unter diesen Bedingungen kann die Bodenfruchtbarkeit nicht aufrechterhalten werden. So steigt dann die Wahrscheinlichkeit an, dass auch z. B. die N-Gehalte des Bodens abfallen und negative Werte erreichen (siehe Abb. 127).

Im Bereich zwischen 0 kg bis ca. 50 kg N/ha N-Saldo sind deutlich kleinere Ertragseffekte zu erkennen, die mit steigenden Salden noch weiter zurückgehen (durchschnittliche Ertragswirkung = 110,3 %, Standardabweichung = $\pm 14,5$ %). In diesem N-Versorgungsbereich können nach den bisherigen Auswertungen für ökologische Anbauverfahren unterschiedlicher Intensität jeweils optimale Ertragsniveaus gewährleistet werden. Steigen die N-Salden darüber hinaus weiter an, so werden durch zusätzliche Düngungsmaßnahmen keine gesicherten Mehrerträge mehr erzielt und es wird dann das Niveau maximal möglicher Erträge erreicht (Ertragseffekt = 101,4 % $\pm 7,4$ %, Abb. 134).

Ähnlich den Ergebnissen zur Grunddüngung können die Ertragsreaktionen bis zur Erreichung eines maximalen Niveaus (= angegebene Düngungsstufe) der im Versuch Ro11 untersuchten Fruchtarten in Folge steigender organischer Düngung ebenfalls aufgezeigt werden (ohne Düngung = 100 %):

- Luzerne-Klee gras (2. Düngungsstufe) 107 %
- Winterweizen (3. Stufe) 110 %
- Wintergerste (3. Stufe) 117 %
- Ackerbohne (3. Stufe) 141 %
- Kartoffeln (4. Stufe) 141 %.

An dem Standort Roda hat somit eine steigende organische Düngung auf das Luzerne-Klee gras die geringsten Ertragsdifferenzen hervorgerufen. Im Vergleich zu keiner Düngung folgen dann die Getreidearten mit mittleren und die Körnerleguminosen und Hackfrüchte mit deutlichen Mehrerträgen. Die Wirkung der organischen Düngung war ungefähr doppelt so groß wie die nach steigender mineralischer K-Düngung mit Patentkali und annähernd 10mal größer als in Folge der untersuchten P-Düngung mit Dolophos (siehe vorausgehendes Kapitel).

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zum Einfluss steigender organischer sowie mineralischer P- und K-Düngung in einer Fruchtfolge des Ökologischen Landbaus auf Merkmale der Bodenfruchtbarkeit, Ertrag und Qualität der Kulturarten erfolgten auf einem Lössboden bei Roda, der die tiefgründigen besseren Standorte Sachsens repräsentiert. Insbesondere bei den laktatlöslichen Nährstoffgehalten war der Standort jedoch zu Versuchsbeginn mit ca. 2 mg P/100 g bzw. mit etwa 5 mg K/100 g Boden entsprechend der fünfstufigen VDLUFA-Einteilung in die sehr niedrig versorgte Gehaltsklasse A einzuordnen (Einstufungen nach ALBERT et al., 2007).

Auf Grund des ausgesprochen niedrigen Versorgungsgrades mit Grundnährstoffen bestanden daher günstige Bedingungen zur Anlage eines speziellen Versuches zum Nährstoffmanagement. Deshalb wurde in Form eines Dauerversuches mit den im Ökolandbau zugelassenen Düngemitteln geprüft, in welchem Umfang die Bodengehalte an entsprechenden Nährstoffen angehoben werden können und welche Einflüsse auf die Ertragsfähigkeit und die Qualität der Fruchtarten in den Fruchtfolgen zu erwarten sind.

Ein Teil der in dem Versuch erzielten Ergebnisse wurden bereits als Zwischenauswertung vorgestellt. Damit fundierte möglichst standortangepasste, allgemeingültige Ergebnisse zur Grunddüngung erlangt werden können, sind diese Ergebnisse in eine fortgesetzte, kooperative überregionale Auswertung eingeflossen, bei der von Zeit zu Zeit alle verfügbaren Experimente aus bisher 9 Versuchen und 8 Bundesländern gemeinsam ausgewertet worden sind (siehe KOLBE, 2010).

Diese bisherigen Auswertungen von durchgeführten ökologischen Versuchen kommen zu dem Ergebnis, dass bei Unterlassung der P- und K-Düngung es lediglich zu deutlichen Mindererträgen kommen kann, wenn die Versorgungsklasse B unterschritten wird. Im Hinblick auf mögliche Nährstoffverluste – durch Auswaschung in das Grundwasser oder durch Bodenerosion in Oberflächengewässer – ist die niedrigere optimale Gehaltsklasse B durchaus positiv zu bewerten. Jedoch sollte je nach standörtlichen Gegebenheiten eine weitere Abnahme der Bodenversorgung mit den Grundnährstoffen vermieden werden, weil dann auf Grund dem „Gesetz vom Minimum“ (MITSCHERLICH, 1909) z. T. empfindliche Ertragsverluste entstehen können und die Nachhaltigkeit des Anbausystems gefährdet erscheint.

Nach diesen experimentellen Ergebnissen kann die bisher geltende Klassifizierung im Ökologischen Landbau bestätigt werden, wodurch die Gehaltsklasse B anzustreben und aufrecht zu erhalten ist (KOLBE & KÖHLER,

2008). Nach diesem Kenntnisstand lassen sich damit eine ausreichende Versorgung der Pflanzen und ein den Produktionsbedingungen angemessenes, optimales Ertragsniveau realisieren.

Bei der ausgewählten Fruchtfolge wurde ein relativ hoher Anteil an Leguminosen bzw. Leguminosen-Grasgemisch eingestellt, damit eine ungenügende N-Versorgung ausgeschlossen werden konnte. Aus deren N-Nachlieferung profitierten das angebaute Getreide und die Kartoffeln in den Versuchsgliedern mit ausschließlicher mineralischer P- und K-Düngung. Im Sinne eines reinen Markfruchtanbaus konnte damit eine ausreichend hohe N-Versorgung gewährleistet werden, die zu ausgeglichenen Nährstoffbilanzen und zu einer sehr hohen N-Effizienz geführt hat.

Diese N-Quellen waren aber auch dafür verantwortlich, dass in den Prüfgliedern mit gesteigerter organischer Düngung bis auf 160 kg N/ha und Jahr (= 2 Dungeinheiten) eine etwas verhaltenere N-Wirkung und abnehmende N-Effizienzen festgestellt werden konnte. Dennoch sind die Erträge der Fruchtarten in z. T. weit deutlicherem Ausmaß angestiegen als nach steigender P- und K-Grunddüngung. Daher lassen sich aus den erzielten Ergebnissen auch Richtwerte zur optimalen N-Versorgung über die organische Düngung in der Fruchtfolge ableiten.

4.1 Einschätzung der organischen Düngung

Von den eingesetzten Nährstoffen der organischen Düngung profitierten besonders die Kartoffel und die Ackerbohne. Die beim Winterweizen zum Schossen eingesetzte, gestaffelte Güllemenge hatte zwar nur in einem von zwei Versuchsjahren zu einer Ertragsdifferenzierung geführt. Es erfolgte jedoch eine deutliche Anhebung der Rohproteingehalte im Korn. Dabei dürften allerdings den relativ hohen N_{min} -Gehalten zu Vegetationsbeginn, die aus der N-Nachlieferung des Luzerne-Kleeegrases des Jahres 2005 stammen, eine nicht zu unterschätzende Rolle zukommen. Dass eine entsprechende N-Nachwirkung aus dem organischen Dünger vorhanden war, belegen z. B. auch die jeweiligen Bestandesbonituren im Luzerne-Kleeegras. Mit steigendem Einsatz an organischem Dünger war jeweils, parallel zu ansteigenden N_{min} -Mengen im Frühjahr und Herbst, ein Rückgang des Leguminosenpartners zu Gunsten des Grasanteils verbunden (siehe auch SCHMIDTKE & RAUBER, 2000).

So war im Jahr 2005 der Kleeanteil in der höchsten N-Stufe immerhin um etwa 16 % geringer als im ungedüngten Prüfglied. Damit dürfte auch eine differenzierte legume N-Bindung in den jeweiligen Prüfgliedern verbunden sein (HEUWINKEL, 2007). So sind die berechneten Werte zur N-Bindung in diesen Versuchen nur bis zur dritten Düngungsstufe angestiegen. Diese aus den erzielten Erträgen entsprechend der anerkannten Richtwerte ermittelten Beträge sind allerdings nicht ganz so eindeutig zu interpretieren, zumal hier auch entsprechende Wechselwirkungen mit der P-, K- und der S-Versorgung für eine optimale N-Bindungsleistung vorhanden sein können, wie aus Gefäßversuchen abgeleitet werden konnte (RÖMER & LEHNE, 2004). So kann nach STEFFENS (1984) in Rotklee-Weidelgras-Gemengen bei niedriger P-Versorgung auch der Rotkleeanteil zurückgehen, da Weidelgras dann ein besseres P-Aneignungsvermögen aufweist. Deshalb ist es möglich, dass bei niedrigen Bodengehalten nicht der Stickstoff, sondern ein Mindestmaß an den übrigen Nährstoffen aus den organischen Düngern hierfür von Bedeutung sein kann.

Selbst unter den äußerst niedrigen Gehalten an Grundnährstoffen konnten jedoch hierzu aus den präsentierten Feldversuchen keine Anhaltspunkte gewonnen werden. So wies das Luzerne-Kleeegras durchschnittliche P-Gehalte im Erntegut und im Vergleich zu den anderen Fruchtarten nach organischer Düngung mit Abstand die geringsten Mehrerträge auf. Lediglich nach mineralischer P- und K-Düngung waren die Ertragseffekte etwas günstiger ausgefallen.

Gerade in diesen Prüfgliedern, in denen eine ausreichende N-Versorgung vorlag, können die übrigen Pflanzennährstoffe für die Ertragsbildung von höherer Bedeutung sein. War beim Stickstoff im Vergleich zum ungedüngten Prüfglied ein durchschnittlicher Mehrentzug von 10 kg N/ha und Jahr erzielt worden, so waren es beim Phosphat im Mittel nur 2 kg P/ha und Jahr, wobei die gleichfalls mit dem gesteigerten N-Einsatz erhöhte

P-Menge kaum Mehrentzüge erbrachte. Wo die aus dem organischen Dünger freiwerdenden Nährstoffe, insbesondere das Phosphat verblieben sind, kann jedoch aus den vorliegenden Ergebnissen ziemlich genau abgeleitet werden.

Der Umsatz und Abbau der organischen Substanz des Bodens ist als biologischer Vorgang zu umschreiben, dessen Intensität weitgehend durch Witterungs- und Bodenfaktoren des Standortes bestimmt wird und z. B. über Prozessmodelle berechnet werden kann (KOLBE et al., 2013; KOLBE & ZIMMER, 2015). Daher sind Bemühungen, die Nährstoffmineralisation insbesondere über chemische Analyseverfahren oder durch andere Labormethoden zu ermitteln, bisher weitgehend ohne Erfolg geblieben (siehe STAHR et al., 1992; LEPPIN, 2007; STEFFENS et al., 2010; APPEL & BEISECKER, 2015; EBERTSEDER et al., 2015).

Die aus dem Humusumsatz freiwerdenden Nährstoffe der organischen Dünger konnten durch die eingesetzten Extraktionsmittel DL und CAL gut erfasst werden. Das trifft, neben dem Kalium, auch für das lösliche Phosphat zu. Im Gegensatz zum Rohphosphat werden mit beiden Extraktionsmitteln aus organischen Düngern ähnlich hohe Werte ermittelt. Nach Analysen von DREELE & CLAASSEN (2004) ist ein großer Teil des aus organischen Quellen stammenden Phosphats (insbesondere aus Ernte- und Wurzelnückständen) sogar in wasserlöslicher Form und damit sehr gut pflanzenverfügbar. Dieses Phosphat hat oft eine gewisse Ähnlichkeit mit dem im konventionellen Landbau eingesetzten Superphosphat (siehe DOU & STEFFENS, 1993; LEPPIN, 2007; SHWIEKH et al., 2015). Die Phosphatquellen aus der organischen Düngung erscheinen daher deutlich besser zur Düngung geeignet zu sein, als die ebenfalls geprüften Rohphosphate.

Somit kann abschließend folgender Umwandlungsprozess im Rahmen der Mineralisation formuliert werden. Die im Rahmen des Humusumsatzes durch Mineralisation freiwerdenden Nährstoffe sind zunächst nach den bisher vorliegenden Informationen in hohem Maße als pflanzenverfügbar zu bezeichnen. Da im Verlauf der Vegetation in der Regel der Prozess der Mineralisation und der Nährstoffaufnahme durch das Wachstum der Pflanzen in weiten Grenzen parallel verläuft, bestehen gute Aussichten zur Erreichung einer hohen nährstoffbedingten Verwertung (KOLBE, 2021). Ein hoher Anteil dieser Nährstoffe kann bei parallel durchgeführten vegetationsbegleitenden Bodenuntersuchungen auch durch die gebräuchlichen chemischen Analysemethoden erfasst werden.

Die nicht durch die Pflanzen aufgenommenen verfügbaren Nährstoffe unterliegen dann den bekannten chemischen und biologischen Umwandlungsprozessen im Boden, der in Bezug zum Phosphat auch als „P-Alterung“ bezeichnet wird. So sind die P-Umwandlungsprozesse abhängig vom Bodenmilieu und den Düngungsmaßnahmen und verlaufen bei niedrigen und hohen pH-Werten auf unterschiedlichen Wegen ab (siehe MATZEL, 1974; BOSCH & AMBERGER, 1986; EICHLER, 2004). Kennzeichen dieser Entwicklung ist es, dass in Abhängigkeit vom Nährstoff über Zeitperioden von Monaten bis vielen Jahren einerseits eine langsame (zwischenzeitliche) Festlegung oder ein Verlust z. B. durch Erosion, Auswaschung oder Ausgasung erfolgt.

Im Zusammenhang mit einem intensiven Umsatz der organischen Substanz kann vorübergehend z. B. ein beachtlicher Anteil des pflanzenverfügbaren Phosphats in die mikrobielle Biomasse eingebunden werden, was auch eine starke Konkurrenz zu dem Bedarf der Pflanzen an P darstellen kann (SCAGNOZZI et al., 1997). In Abhängigkeit von der Bodenreaktion werden dann über die Zeit immer höhere Anteile des Phosphats bei hohen pH-Werten ab ca. 6,5 z. B. als Tricalcium-Phosphat im Apatit und bei niedrigen pH-Werten als Fe- und Al-Phosphate in Formen überführt, die nicht mehr pflanzenverfügbar sind.

Das Kalium wird demgegenüber sofort nach der Zuführung von organischen Materialien in den Boden in höherem Maße pflanzenverfügbar, da es als sogenanntes „Funktionselement“ nicht fest in die Zellverbände eingebaut ist und erst im Rahmen des Abbaus der organischen Substanz aufgeschlossen werden muss, wie dies z. B. bei dem „Baeuelement“ Phosphor der Fall ist (siehe KOLBE, 2021). Auch das von den Pflanzen nicht aufgenommene lösliche Kalium unterliegt mit der Zeit Veränderungen. Es kann in die Zwischenschichten von Tonmineralien eingelagert (= leicht verfügbar) oder von bestimmten Tonmineralien auch fixiert werden (= langsam bis gar nicht mehr verfügbar). Auf leichteren Böden und bei erhöhten Niederschlägen können erheb-

liche Mengen an Kalium im Bodenprofil zwischenzeitlich verlagert und ausgewaschen werden (= Verlustgröße).

Ohne auf die biochemischen Einzelheiten einzugehen kann zudem dieser Prozess der Umwandlung und Alterung nach Untersuchungen von vielen Autoren durch die umsetzende organische Substanz im Boden im gewissen Ausmaß verzögert und teilweise auch wieder rückgängig gemacht werden (siehe OWSSIA et al., 1966; KADENKOVA & TOVAROVA, 1971; WELP et al., 1983; DAROUB et al., 2001; KÖRSCHENS & PFEFFERKORN, 2001; BRASCHI et al., 2003; VARINDERPAL-SINGH et al., 2006a,b,c; WANDRUSZKA, 2006; WERNER, 2009; OJO et al., 2015).

Die Fruchtarten sind außerdem in unterschiedlichem Umfang dazu befähigt, durch spezifische Aufschlusseigenschaften (z. B. saure Phosphatasen) den Boden-P aus organischen Quellen besser aufzuschließen als aus dem Rohphosphat oder anderen festgelegten mineralischen Quellen, wie meistens jedoch nur in speziellen Gefäßversuchen festgestellt worden ist (DOU & STEFFENS, 1993; DESSOUGI et al., 2003; EICHLER, 2004; TARAFDAR & CLAASSEN, 2005). Diese Mechanismen gehören zu den von SCHELLER (1999) und FRIEDEL (2008) beschriebenen Prozessen der aktiven Nährstoffmobilisierung der Pflanzen.

Als Ergebnis wird dann oft ein auffallend höherer Anteil an Nährstoffen in der löslichen Fraktion ermittelt. Aus den eigenen Versuchen kann hierzu angemerkt werden, dass insbesondere in den Varianten mit organischer Düngung zwischen den Nährstoffsalden bei Anrechnung von z. B. mindestens einer Fruchtfolgerotation und den jährlichen Änderungen in den DL- und CAL-löslichen Nährstoffen des Bodens verhältnismäßig enge positive Regressionsbeziehungen bestehen.

Als Konsequenz aus diesen Untersuchungsergebnissen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Zufuhr organischer Materialien (u. a. Ernte- und Wurzelrückstände z. B. durch Zwischenfrüchte, Gründüngung, organische Dünger) insbesondere auch bei Vorlage höherer pH-Werte im Boden für eine ausreichende P-Versorgung der Pflanzen wesentlich besser geeignet erscheint, als die Zufuhr an Rohphosphaten.

Darüber hinaus können aus den Versuchen ebenfalls Aussagen zur optimalen Düngungshöhe getroffen werden. In Folge steigender organischer Düngung war bei allen geprüften Pflanzenarten ein abnehmender Ertragszuwachs zu erkennen, der jedoch z. T. deutlich von der Pflanzenart abhängig war. Die Düngebedürftigkeit nahm in folgender Reihenfolge ab: Kartoffeln, Ackerbohne > Wintergerste > Winterweizen > Luzernekleegras. Im Durchschnitt der Fruchtfolgen nahmen die Erträge bis zur dritten Düngungsstufe zu (= Ertragsmaximum).

In dieser Stufe mit 80 kg N/ha und Jahr wurde auch der durch den Ertrag entzogene P ersetzt und in diesem Bereich (80 – 100 kg N/ha) lag gleichzeitig im Mittel der vier Jahre mit Getreideanbau der maximale Kornertrag. Höhere N-Mengen wirkten sich nicht mehr positiv auf den Ertrag aus und waren eher nachteilig für die Umwelt zu beurteilen, wie am Beispiel der N-Salden und der erzielten N-Effizienzen aufgezeigt werden konnte.

Mit diesen Mengen an organischen Düngern ließen sich allerdings keine ausgeglichenen K-Bilanzen erzielen. Zum Nährstoff Kalium konnten andere Zusammenhänge aufgezeigt werden. Im Vergleich zum ungedüngten Prüfglied stiegen die Mehrentzüge bereits in der Stufe mit 40 kg N/ha und einer mittleren K-Zufuhr von etwa 38 kg/ha und Jahr um 20 kg K/ha an. Damit lag der Betrag nur um 10 kg/ha unter dem der höchsten Stufe, wo immerhin im Mittel der Jahre rund 150 kg K/ha eingesetzt wurden und damit die gleichen Entzüge wie in der höchsten K-Steigerungsstufe des mineralischen Prüfgliedes erreicht wurden.

Der eingesetzte organische Dünger hatte nur einen geringen Einfluss auf die C_{org} -Gehalte des Bodens. Die Zunahme im Versuchszeitraum erfolgte über alle Stufen und ist vor allem dem hohen Anteil an Klee gras in der Fruchtfolge zuzurechnen. Bemerkenswert ist allerdings, dass sich die N_t -Gehalte in dieser Zeit nur geringfügig verändert haben und damit das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff im Boden erweitert worden ist. Langfristig bringt diese Entwicklung ein etwas schlechteres Netto-N-Nachlieferungsvermögen.

In vielen Versuchen konnte aufgezeigt werden, dass auch im ökologischen Landbau im Allgemeinen der Stickstoff als der bedeutendste ertragsbegrenzende Nährstoff angesehen werden kann (GUNST et al., 2013).

Dieses Ergebnis konnte auch in den eigenen Versuchen bestätigt werden. Da jedoch die im Boden extrahierbaren N-Gehalte (im Gegensatz zu den löslichen P- und K-Werten) großen Schwankungen unterworfen sind, erscheint die Nutzung der $N_{\min}$ -Werte zur Etablierung eines allgemeinen N-Bewertungssystems ungeeignet zu sein.

Auf Grund der positiven Erfahrungen mit der bei der Humusbilanzierung verwendeten fünfstufigen Bewertungsskala (siehe EBERTSEDER et al., 2014) wurden zum Aufbau eines Systems zur Einstufung von Ergebnissen aus organischen Düngungsmaßnahmen erstmals die Beziehungen zwischen den erzielten Mehrerträgen mit den je Fruchtfolgerotation ermittelten N-Brutto-Salden einer näheren Untersuchung unterzogen.

Als Ergebnis konnte aufgezeigt werden, dass die N-Bilanzen zur generellen Einstufung der zu erwartenden Ertragsreaktionen der Fruchtarten aus ökologischen Anbausystemen in gleicher Weise geeignet sind, wie die Verwendung der löslichen Bodengehalte bei den P- und K-Steigerungsversuchen. Hierbei führt ein Saldo von ca. 0 – 50 kg N/ha zu weitgehend optimalen Ernteerträgen, während es durch eine zusätzliche organische Düngung bei Salden im Minusbereich und abnehmender Bodenfruchtbarkeit zu deutlichen Mehrerträgen kommt. Bei Salden von über 50 kg N/ha an aufwärts werden demgegenüber dann maximale Erträge erzielt und es kommt zu einer zunehmenden ungünstigen N-Verwertung und zu weiteren negativen Umweltwirkungen. Nach diesen Ergebnissen sollte daher in ökologischen Anbauverfahren eine Brutto-Bilanz von 0 – 50 kg N/ha und Jahr im Durchschnitt einer Fruchtfolgerotation angestrebt werden.

4.2 Einschätzung der mineralischen P-Düngung

In der Ökologischen Landwirtschaft sollte die P-Ernährung primär über die aktive Mobilisierung der im Boden vorhandenen Vorräte betrieben werden. In älteren Arbeiten wurde hierzu bereits festgestellt, dass diese Strategie nur solange praktikierbar ist, wie kein akuter P-Mangel auftritt (NOWACK, 1990; SCHULTE, 1996; SCHELLER, 1999). Diese Vorgehensweise ist daher stark vom Standort und seinen P-Vorräten, der langfristigen P-Bilanz und der Nutzungsintensität abhängig. Tritt P-Mangel auf, so kann mit dem Einsatz von organischen Düngern sowie zugelassenen Rohphosphaten Abhilfe geschaffen werden. In reinen Marktfruchtbetrieben ist dann vor allem das Rohphosphat die preiswerte Alternative. Deren Wirkung unter den Bodenbedingungen eines niedrig versorgten, typischen sächsischen Lössbodens zu untersuchen war Ziel dieser Versuchsreihe.

Ein zunächst überraschendes Ergebnis ist die vergleichsweise geringe Wirkung des eingesetzten Rohphosphats. Die Erträge wurden in Abhängigkeit von der Fruchtart nur zwischen 1 % (Getreide) und maximal 4 % (Luzernekleegrass, Kartoffeln) angehoben. Im Vergleich zu den anderen Versuchen des Ökolandbaus aus Deutschland gehören diese Ergebnisse bei ausgesprochen niedriger Bodenversorgung der Klasse A und Berücksichtigung einer großen Streubreite eher zu den Versuchen mit relativ niedrigen gemessenen Mehrerträgen. Bei dieser Bodenversorgung mit Phosphat sind bei überregionaler Betrachtung nennenswerte Mehrerträge ungefähr zwischen 5 – 10 % eingetreten. Eine besondere Bedürftigkeit bestimmter Pflanzenarten (Körnerleguminosen, Ackerfutter, Hackfrüchte) war kaum noch festzustellen (KOLBE, 2010, 2019).

Durch diese Versuche werden zudem frühere Ergebnisse aus meistens konventionellen Feldversuchen mit nicht aufgeschlossenen Phosphaten im Wesentlichen bestätigt (JUNGK et al., 1993; STUMPE et al., 1994; KERSCHBERGER & MARKS, 2000; HEGE et al., 2008; KOLBE & KÖHLER, 2008; WERNER & TRIMBORN, 2008). Auch die ermittelte Rangfolge der gefundenen Mehrerträge der Fruchtarten wird in diesen Untersuchungen beschrieben.

Nur in den Gefäßversuchen von RÖMER & LEHNE (2003) und RÖMER et al. (2004) wurde demgegenüber von einer deutlichen Wirkung durch die Rohphosphatdüngung berichtet. In den Versuchen wurde sogar eine signifikante Erhöhung des P-Gehaltes bei Rotkleeplanzen erzielt, wobei die TM-Erträge um 60 – 130 % angestiegen sind. Von den besseren Wachstumsbedingungen der legumen Vorfrucht in den Gefäßen profitierte dann auch noch der nachgebaute Hafer. Zwischen Tripelsuperphosphat und dem eingesetzten Rohphosphat bestanden unter diesen Versuchsbedingungen keine signifikanten Unterschiede.

Bei der Interpretation dieser Versuchsergebnisse ist jedoch zu bedenken, dass in den kleinen Gefäßen (MIT-SCHERLICH-Gefäße mit 6 kg Boden) die angebauten Pflanzen den Boden wesentlich intensiver durchwurzeln und räumlich besser erschließen können als unter Feldbedingungen. Daher sind Erkenntnisse aus Gefäßversuchen nicht direkt mit Ergebnissen aus entsprechenden Feldversuchen vergleichbar. Das trifft besonders für die Bedingungen im ökologischen Landbau zu.

Entsprechend der verfügbaren Unterlagen handelte es sich bei dem im Versuch Ro11 eingesetzten P-Dünger um Dolophos, einen durch Mischen von feinst vermahlenem, weicherdigem Rohphosphat mit feinem Dolomitmehl mit nachfolgender Granulierung für den ökologischen Landbau zugelassenen P-Dünger. Hinweise dazu, in welchem Umfang das Dolomitmehl die vergleichsweise günstige Löslichkeit des Rohphosphats herabsetzt, konnten nicht gefunden werden.

Einen beachtlichen Beitrag für die P-Ernährung der Pflanzen kann auch aus dem Unterboden stammen. So betrug in Versuchen von KUHLMANN & BAUMGÄRTEL (1991) (siehe auch WECHSUNG & PAGEL, 1993; TAGMANN et al., 2001; OEHL et al., 2002) unter Bedingungen des konventionellen Pflanzenbaus die P-Aufnahme von Weizen aus dem Unterboden 37 – 85 % des Gesamtentzuges. Nach Angaben von KUHLMANN (1990) nahmen Weizenpflanzen zwischen 9 – 70 % ihres K-Bedarfes aus dem Unterboden auf. In Untersuchungen von RICHTER et al. (1977) ging die Nährstoffaufnahme aus dem Unterboden mit steigender Nährstoffversorgung in der Krume zurück.

Auch aus Versuchen des Ökolandbaus ist bekannt, dass bei niedrigem Nährstoffangebot im Oberboden demzufolge eine intensivere Wurzelbildung stattfindet und die Bedeutung des Unterbodens für die Ernährung der Kulturen zunimmt (KRISTENSEN & THORUP-KRISTENSEN, 2007; CHIRINDA et al., 2012). Im besonderen Maße ist das sicherlich in Jahren mit hoher Ertragsbildung und hoher Nährstoffaufnahme und/oder ausgetrockneter Ackerkrume der Fall, wenn der Pflanzenbestand auf Wasser und damit auch auf die darin gelösten Nährstoffe aus tieferen Bodenschichten zurückgreifen muss.

Auf eine unter den Standortbedingungen von Roda verhältnismäßig geringe Wirkung des Düngers deutet allerdings die unterschiedliche Reaktion der beiden eingesetzten Extraktionsmittel für die Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphats hin. Während durch Extraktion mit Doppellaktatlösung (DL-Extraktion bei pH 3,6) die im Versuchszeitraum zugeführten P-Mengen aus Dolophos und die damit einhergehende Differenzierung sehr gut bestimmt werden konnte, wurden die Bodengehalte, die mittels Calcium-Acetat-Lactat-Extrakt (CAL bei pH 4,1) ermittelt worden sind, nur in sehr geringem Umfang angehoben. So konnte in vielen Versuchen mit verschiedenen P-Düngern und anderen Fragestellungen festgestellt werden, dass insbesondere bei höheren pH-Werten des Bodens im Gegensatz zum DL-Extrakt der CAL-Extrakt kaum auf das eingesetzte Rohphosphat reagiert (WERNER, 1969; WERNER & WIECHMANN, 1971; STEFFENS, 1987; EICHLER, 1999b; STEFFENS et al., 2003; LEPPIN, 2007).

Nach MENGEL (1984) werden zugeführte Düngemittel gut umgesetzt, wenn die Werte aus den DL- und CAL-löslichen Extrakten eine hohe Übereinstimmung aufweisen. In den eigenen Versuchen würden die organischen Düngemittel bei Phosphat und Kalium und die mineralischen K-Düngemittel in diese Kategorie einzuordnen sein. Bestehen jedoch große Unterschiede in der Höhe der Extraktionsergebnisse, wie es beim Rohphosphat auch in den eigenen Versuchen der Fall war, dann wird nur ein kleiner Anteil aus dem Dünger umgesetzt und in pflanzenverfügbare Formen überführt. Meistens trifft dies dann auch nach langen Versuchszeiten noch zu.

Bei negativen Saldowerten von -8 kg bis -9 kg P/ha und Jahr findet keine Bodenänderung an DL- oder CAL-löslichem Phosphat mehr statt. Auch aus diesen Ergebnissen kann ein gewisses Potenzial des Rodaer Standortes zur P-Mobilisierung aus dem Untergrund und auch an Deposition aus der Atmosphäre abgeleitet werden.

Welches Extraktionsmittel die engste Korrelation mit den aufgetretenen Bodenänderungen und den Ertragsreaktionen aufweist, kann aus den Versuchen nicht abschließend und eindeutig beantwortet werden. Auch unter Beachtung der Ergebnisse zum Rohphosphat sind an dem Standort Roda bei einem mittleren pH-Wert um 6,0

offenbar beide Verfahren noch als geeignet zu bezeichnen, wenn bei der Interpretation die Unterschiede in der absoluten Höhe der Extraktionswerte bedacht wird. Zusammenfassend kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass bei pH-Werten über 6,5 und beim Einsatz von Rohphosphat die DL-Analyse den pflanzenverfügbaren P-Gehalt im Boden unzureichend reflektiert und daher nicht empfohlen werden kann.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass die verhältnismäßig geringen Ertragsreaktionen als Hinweis gedeutet werden können, dass unter den Feldbedingungen der landwirtschaftlichen Praxis bereits eine relativ geringe Bodenversorgung mit löslichem Phosphat nicht nur am Standort Roda für die Ertragsbildung im Ökolandbau als ausreichend bezeichnet werden kann. Aus den bundesweiten Versuchsauswertungen kann daher die Versorgungsklasse B entsprechend der Klassifizierung nach KERSCHBERGER et al. (1997) zur Erreichung eines optimalen Ertragsniveaus als ausreichend beziffert werden (siehe Kap. 4.4).

4.3 Einschätzung der mineralischen K-Düngung

Wie bereits in der Steigerungsreihe mit organischen Düngern festgestellt, reagierten die Kartoffeln und die Ackerbohne auf den mineralischen K-Einsatz mit deutlichen Mehrerträgen. Die Ertragsreaktionen bei den Getreidearten waren eher unterschiedlich und jahresspezifisch, wobei jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten. Indifferent war dagegen die Reaktion des Kleegrases. Hier dürfte sich allerdings bemerkbar machen, dass durch die intensive Durchwurzelung des Bodens und die entsprechend großen Wurzeloberflächen die Bestände in der Lage waren, das hohe Nachlieferungsvermögen des Lössbodens in Roda zu nutzen. Insbesondere die beachtlichen K-Reserven des Unterbodens dürften von Bedeutung sein.

Im Vergleich zu den Varianten ohne Düngung wurden in den hier präsentierten Versuchen Mehrerträge zwischen 2 % und 25 % ermittelt. Auch in anderen konventionellen Untersuchungen wurden in Folge steigender mineralischer K-Düngung unterschiedlicher Arten damit vergleichbare Mehrerträge oder, je nach Standortbedingungen, auch etwas geringere Ertragsreaktionen erhalten (SCHACHTSCHABEL et al., 1976; HEGE et al., 2008).

Bemerkenswert ist bei diesen Ergebnissen ebenfalls, dass selbst bei negativen jährlichen K-Bilanzen von unter - 80 kg K/ha beim DL-löslichen Kalium der Ackerkrume im Versuchszeitraum kein Rückgang in den ermittelten Bodengehalten erfolgte und zwischen den jeweiligen Stufen sich zudem eine leichte Differenzierung herausbildete. Die im DL-löslichen Extrakt erfassten Ergebnisse weisen ein etwa doppelt so hohes K-Nachlieferungspotenzial auf als bei den Ergebnissen des CAL-Extrakts. Ein relevanter Anstieg der Bodengehalte erfolgt nur in der höchsten K-Düngungsstufe mit entsprechend positivem Saldo von rund 55 kg K/ha und Jahr. Die DL-löslichen P- und K-Gehalte bilden die Bodenveränderungen dieser Nährstoffe jedoch mit etwas höherer Präzision ab, da unabhängig von der Düngungsquelle zwischen der Bodenänderung und den P- und K-Salden z. T. deutlich engere statistische Beziehungen bestehen, als dies bei den CAL-löslichen Werten der Fall ist. Zur Bewertung der Ertragsreaktionen bestehen demgegenüber keine großen Unterschiede bei der Nutzung der beiden Extraktionsmittel. Zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Kaliums sind nach diesen Untersuchungen beide Extraktionsmittel geeignet. Negative Nährstoffsalden zwischen -40 kg und -80 kg K/ha und Jahr sind auf diesem Standort auf Dauer tolerierbar, ohne dass sich Änderungen der löslichen Bodengehalte ergeben.

Die Ergebnisse des zwölfjährigen Dauerversuches zeigen deutlich, dass selbst bei niedrig eingestuften laktatlöslichen K-Gehalten auf dem tiefgründigen Lössboden die Reaktion der Pflanzenbestände von Getreidearten und Klee gras auf die entsprechende Düngung verhältnismäßig gering ausfällt. Bei einem für den Ökologischen Landbau guten Ertragsniveau waren besonders bei den vergleichsweise flach wurzelnden Kartoffeln und den Körnerleguminosen z. T. noch deutliche Reaktionen zu beobachten, die neben den Erträgen auch die K-Gehalte und damit zusammenhängende Qualitätsveränderungen umfassen können. Es wurde eine ähnliche Rangfolge der Fruchtarten ermittelt, wie in der bundesweiten Versuchsauswertung festgestellt werden konnte (KOLBE, 2019).

Aus diesem Verbund an Versuchsergebnissen konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass auch mit Bezug auf die kritischen Fruchtarten im Wesentlichen nur in Versorgungsklasse A eine zusätzliche Düngung zu Mehrerträgen führt. Daher kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass unter den verschiedenen Standortbedingungen in Deutschland auch für den Nährstoff Kalium die bisherige Klasse B entsprechend der Klassifizierung nach BAUMGÄRTEL et al. (1999) im Allgemeinen für die Anbauverfahren des Ökolandbaus zur Erwirtschaftung eines optimalen Ertragsniveaus als ausreichend angesehen werden kann.

4.4 Hinweise zur Weiterentwicklung von Methoden zur Düngbedarfsermittlung

Zunächst haben Auswertungen von zumeist konventionellen Versuchen zur Grunddüngung zum Aufbau von Modulen zur Düngungsbemessung unter Nutzung des Personalcomputers (PC) wesentlich beigetragen (KOLBE et al., 1999). Daraus ist mit der Zeit zunächst das PC-Programm BEFU und später das Programm BESyD, Teil Ökologischer Landbau entstanden (KOLBE & KÖHLER, 2008; PETER, 2021).

Insbesondere ökologische Dauerversuche, wie der hier ausgewertete Versuch Ro11, tragen in Verbindung mit den anderen Ergebnissen aus verschiedenen Standorten Deutschlands nun immer stärker dazu bei, die bisherigen Module zur Grunddüngung zu überprüfen und ggf. anhand neuer Erkenntnisse und Erfahrungen zu überarbeiten oder auch zu erweitern. Aus den hier vorgestellten Versuchsergebnissen kann hierzu zunächst die allgemeine Schlussfolgerung gezogen werden, dass die bisher gefundenen fachlichen Zusammenhänge durch die ökologischen Versuchsergebnisse in zunehmendem Maße bestätigt werden können. Daher besteht kein Anlass für eine große Revision des Programms. Im Detail finden sich jedoch einige Gesichtspunkte, die zu einer weiteren Verbesserung der Programme zum Nährstoffmanagement im Ökolandbau beitragen können:

- Anpassung der Gleichungen zur Berechnung der Düngermengen an die verwendeten Extraktionsmittel (DL, CAL)
- Feinjustierung der Gleichungen in Abhängigkeit von der Bodenart und anderen Standorteigenschaften
- Automatisches Aufsuchen betriebswirtschaftlich günstiger mineralischer und organischer Düngemittel als Vorschlag für die praktische Ausführung von Düngungsempfehlungen
- Verbesserung der Wahlmöglichkeiten, insbesondere bei der Fruchtfolgedüngung
- Neuausrichtung des VDLUFA-Klassifizierungssystems, insbesondere Umbenennung der bisherigen anzustrebenden optimalen Klasse B in eine neue optimale ökologische Klasse C unter entsprechender Anpassung der anderen Klassen an das einheitliche fünfstufige Bewertungssystem.

Auch unter den Anbaubedingungen des konventionellen Landbaus bestehen seit längerer Zeit Bestrebungen, eine deutliche Korrektur bzw. Absenkung der empfohlenen Richtwerte für den Nährstoff Phosphor vorzunehmen. So wurden in einem Positionspapier des VDLUFA z. B. für den Nährstoff Phosphor unter konventionellen Anbaubedingungen eine entsprechende Herabsetzung der Richtwerte für die Klasse C von 4,5 – 9,0 mg P/100 g auf 3,0 – 6,0 mg P/100 g Boden vorgeschlagen (TAUBE et al., 2015) und in einem VDLUFA-Standpunkt umgesetzt (WIESLER et al., 2018). Hierdurch wurde bereits eine deutliche Annäherung an die im Ökolandbau bewährten optimalen Richtwerte (der in dieser Arbeit bisher noch als Klasse B bezeichneten Werte) von 2,1 – 4,4 mg P/100 g Boden erreicht (KOLBE et al., 2015).

Entsprechend dem Minimumgesetz (MITSCHERLICH, 1909) kann durch das z.T. deutlich niedrigere Ertragsniveau im Ökolandbau ein entsprechend unterschiedliches Niveau für die optimale Klasse dann auch in Zukunft für das pflanzenverfügbare Phosphat erforderlich sein. Auch bei der Bewertung der Ergebnisse zur Humusbilanzierung bestehen unterschiedliche Richtwerte zwischen konventionellen und ökologischen Anbauverfahren (KOLBE & KÖHLER, 2008; EBERTSEDER et al., 2014).

Die gemeinsame bundesweite Auswertung der ökologischen Versuche zur P- und K-Düngung sind in der Zwischenzeit abgeschlossen und veröffentlicht worden (KOLBE, 2019). Entsprechend den Ergebnissen können folgende Versorgungsklassen für die P-Gehalte des Bodens vorgeschlagen werden (mg P/100 g Boden):

- Klasse A $\leq 1,5$
- Klasse B 1,5 – 2,5
- Klasse C 2,5 – 4,5
- Klasse D 4,5 – 10,0
- Klasse E $\geq 10,0$.

Für die mittleren bis schweren Böden (IS – L) sollte die folgende Klasseneinteilung für den Nährstoff Kalium zur Anwendung kommen (mg K/100 g Boden):

- Klasse A $\leq 4,5$
- Klasse B 4,5 – 6,5
- Klasse C 6,5 – 10,0
- Klasse D 10,0 – ca. 23,0
- Klasse E $\geq$ ca. 23,0.

Bei Einhaltung der neu fixierten Klasse C kann bei beiden Nährstoffen ein optimales Ertragsniveau im Ökolandbau gewährleistet werden. Da beim Nährstoff Kalium die Klassen deutlich von der Bodenart abhängig sind, ist für den praktischen Einsatz noch eine weitere entsprechende Differenzierung der Werte erforderlich.

Zur Berechnung des Düngebedarfs ist bisher in der Regel ein Personalcomputer erforderlich, da die zu verwendenden mathematischen Gleichungen für eine manuelle Kalkulation nicht geeignet erscheinen (KOLBE & KÖHLER, 2008). Für die Nährstoffe Phosphor, Kalium und Magnesium würde daher die Ausarbeitung eines stark vereinfachten Verfahrens sinnvoll sein, das zur Berechnung der Grunddüngung unter Praxisbedingungen als „Bleistiftversion“ verwendet werden kann.

Zur allgemeinen Einschätzung der durchschnittlichen Ertragswirkung der Fruchtarten von ökologischen Anbausystemen (Fruchtfolge, organische Düngung) wurde in dieser Arbeit erstmals auch das Merkmal N-Bilanzierung in Form des Brutto-Saldos angewendet. Zum Aufbau einer entsprechenden Datenbasis und Darstellung in Form eines Punktediagramms zur Charakterisierung der Ertragswirkung am Beispiel einer steigenden N-Versorgung hat sich hierbei folgende Vorgehensweise bewährt:

- Auswahl geeigneter Ergebnisse aus Feldversuchen (des ökologischen Landbaus): Dauerversuche, aber auch Versuche mit jährlichem Ortswechsel sind geeignet
- Auswahl zutreffender Prüfglieder z. B. ohne organische Düngung und Varianten mit (stufenweise) steigender organischer Düngung mit (einzelnen) organischen Düngemitteln
- Berechnung der N-Schlagsalden am besten als aggregierte Brutto-Bilanzen im Durchschnitt der Fruchtfolgerotation von jeder Versuchsvariante
- Ermittlung der (mittleren) Erträge der angebauten Fruchtarten (Haupt- incl. oder ohne Nebenprodukte) der zu untersuchenden Fruchtfolgerotation
- Berechnung jeder möglichen relativen Ertragsdifferenz zwischen einer jeweiligen Standardvariante und der dazugehörigen Bilanz (ohne organische Düngung oder geringerer organischer Düngung = 100 %) und den entsprechenden Erträgen der Steigerungsvarianten
- Bildung eines Punktediagramms mit x = Brutto-Salden der jeweiligen Standardvarianten und y = relatives Ertragsniveau zwischen Standardvarianten (= 100 %) und dem Niveau der Steigerungsvarianten.

Auf Grund der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse des Versuches Ro11 in Kombination mit den Ertragsreaktionen aus weiteren 39 konventionellen und ökologischen Dauerversuchen kann folgendes fünfstufiges System von Richtwerten zur Bruttobilanzierung für den Nährstoff Stickstoff zur Erprobung für den Einsatz im Ökologischen Landbau vorgeschlagen werden (Basis ist mindestens eine vollständige Fruchtfolgerotation):

- Klasse A sehr niedrig ≤ -30 kg N/ha u. Jahr
- Klasse B niedrig -29 bis -1 kg N/ha u. Jahr
- Klasse C optimal ± 0 bis +49 kg N/ha u. Jahr
- Klasse D hoch +50 bis +79 kg N/ha u. Jahr
- Klasse E sehr hoch $\geq +80$ kg N/ha u. Jahr.

5 Zusammenfassung

Auf dem Ökofeld der Versuchsstation in Roda des LfULG wurde in den Jahren 2000 – 2011 auf einem nährstoffverarmten Lösslehm mit einer Ackerzahl von 68 und einem pH-Wert um 6,0 ein Dauerversuch zur Grunddüngung durchgeführt. Die DL- bzw. CAL-löslichen P- und K-Gehalte des Bodens lagen zu Versuchsbeginn im Versorgungsbereich der Klasse A. Geprüft wurde jeweils in vier Stufen der Einfluss einer steigenden organischen Düngung mit Stalldung in Kombination mit Rindergülle (von 0 – 160 kg N/ha) sowie eine mineralische P-Düngung mit Dolophos (0 – 60 kg P/ha) und eine K-Düngung mit Patentkali (0 – 160 kg K/ha) in einer sechsgliedrigen Fruchtfolge auf Merkmale der Bodenfruchtbarkeit der Ackerkrume und des Untergrundes sowie Erträge und Qualitäten der angebauten Fruchtarten (Luzerne-Kleegras, Ackerbohne, Winterweizen, Wintergerste, Kartoffeln).

5.1 Organische Düngung

Eine steigende organische Düngung führte zu einer Zunahme der GE-Erträge der Fruchtfolge, aus der der abnehmende Ertragszuwachs deutlich zu erkennen war. Nach geringer stetiger Düngung ist im Durchschnitt der Fruchtarten ein deutlicherer Ertragsanstieg zu verzeichnen, während nach hoher Düngung von über 80 kg N/ha und Jahr kein weiterer Ertragsanstieg mehr zu erkennen war. Bis zur dritten Düngungsstufe ist ein durchschnittlicher relativer Ertragsanstieg auf 112 % zu verzeichnen, der jedoch zwischen den Fruchtarten mit 107 % bei Luzerne-Kleegras bis 141 % bei Kartoffeln deutlich unterschiedlich hoch ausgefallen ist. In der zweiten Fruchtfolgerotation war ein größerer Ertragsanstieg erzielt worden als in der ersten Rotation.

Durch die steigende organische Düngung oder deren Nachwirkung wurden auch die Inhaltsstoffe und andere Merkmale der Fruchtarten in unterschiedlichem Ausmaß beeinflusst. Im Durchschnitt wurde der N-Gehalt in der höchsten Düngungsstufe um ca. 2 Prozent-Anteile in den Ernteprodukten angehoben. Der P-Gehalt wurde nicht beeinflusst, die K-Gehalte konnten dagegen um 14 %-Anteile erhöht werden.

Die ermittelten Nährstoffsalden waren bei einem Leguminosenanteil in der Fruchtfolge von 50 % beim Stickstoff (erweiterte Schlagbilanz) durchgehend positiv, so dass die Nährstoffeffizienzen von annähernd 100 % in der Variante ohne Düngung bis auf ca. 50 % bei stetig hoher Düngung abgefallen sind. Bei den Nährstoffen Phosphor und Kalium wurden jeweils bis zur dritten Düngungsstufe negative Salden erzielt. Die Leguminosenanteile im Luzerne-Kleegras wurden durch die organische Düngung, die zu den angebauten Vorfrüchten verabreicht wurde, um ca. 10 % reduziert. Bei Körner- und Futterleguminosen wurden in der dritten Steigerungsstufe (80 kg N/ha) maximale Werte in der Menge an legumer N-Bindung erreicht.

Die Bodengehalte an löslichen Grundnährstoffen wurden durch die organische Düngung in der Bodenkrume (0 – 20 cm Tiefe), teilweise auch im Untergrund bis 60 cm Tiefe angehoben. In relativ guter Übereinstimmung zwischen den beiden eingesetzten Extraktionsmitteln führte eine Unterlassung der Düngung zu keiner bzw. zu einer geringfügigen Abnahme der löslichen P- und K-Gehalte im Boden. Dagegen wurden die Bodengehalte nach hoher organischer Düngung beim Kalium deutlich und beim Phosphat etwas angehoben. Auch die $N_{\min}$ -Mengen (0 – 90 cm Tiefe) sowie die N_t - und C_{org} -Gehalte des Bodens (0 – 20 cm Tiefe) wurden etwas erhöht. Die organische Düngung hatte keinen Einfluss auf die pH-Werte des Bodens.

Zwischen den jährlichen Änderungen in den löslichen P- und K-Gehalten des Bodens und den entsprechenden Nährstoffsalden bestanden enge positive Beziehungen. Bei den Extraktionsmitteln wurden keine großen Unterschiede in der Erfassung der löslichen Bodennährstoffen nach organischer Düngung gefunden.

5.2 Mineralische P-Düngung

Trotz sehr niedriger P-Versorgung des Bodens wurde im Durchschnitt der Fruchtarten keine signifikante Ertragswirkung in Folge steigender Rohphosphatdüngung nachgewiesen (Getreidearten 101 %, Luzerne-Klee-gras und Kartoffeln 104 % im Vergleich zu keiner Düngung = 100 %). Auch auf die erfassten Inhaltsstoffe der angebauten Fruchtarten waren kaum Wirkungen eingetreten (im Durchschnitt weniger als 102 %). Auf den Leguminosenanteil im Gemenge sowie auf die legumer N-Bindung von Ackerbohne und Futterleguminosen hat sich die unterschiedliche P-Düngung nicht ausgewirkt. Steigende mineralische P-Düngung führte bereits in der zweiten Düngungsstufe mit 15 kg P/ha zu ausgeglichenen P-Salden.

Bei der Wirkung der mineralischen P-Düngung auf die löslichen P-Gehalte des Bodens war eine deutlich unterschiedliche Reaktion zwischen den verwendeten Extraktionsmitteln festzustellen. Es erfolgte ein deutlicher Anstieg der löslichen P-Gehalte bei DL-Extraktion und nur eine sehr geringe Wirkung bei Anwendung der CAL-Extraktion. Insgesamt scheinen zwischen den CAL-löslichen P-Gehalten und den Erträgen der Fruchtarten etwas engere positive Beziehungen zu bestehen als zu den DL-Werten. Auf Grund der Kalk-Zufuhr durch das verwendete Rohphosphat wurde der analysierte Abfall der pH-Werte im Verlauf des Versuches deutlich reduziert.

Zwischen den P-Salden und der jährlichen Veränderung der löslichen P-Gehalte im Boden bestanden enge positive statistische Beziehungen. In Folge der Düngung nahm der Bodengehalt an löslichem P im DL-Extrakt um den 10fachen Wert im Vergleich zum CAL-Extrakt zu. Um den DL-löslichen P-Gehalt um 0,1 mg/100 g Boden zu erhöhen, war eine P-Saldo-Differenz von ca. 18,5 kg erforderlich. Bei einem Saldo zwischen -8 kg bis -9 kg P/ha wird sowohl nach organischer als auch nach mineralischer P-Düngung keine Veränderung der Bodengehalte an Phosphat mehr festgestellt. Daher kann die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass an diesem Standort eine Summe aus Nachlieferung aus dem Untergrund und Deposition aus der Atmosphäre von 8 – 9 kg P/ha und Jahr zu verzeichnen ist.

5.3 Mineralische K-Düngung

Durch die mineralische K-Düngung kam es zu einer Erhöhung der GE-Erträge der Fruchtarten bis zur dritten Steigerungsstufe um durchschnittlich 106 % im Vergleich zu keiner Düngung (= 100 %). Bei Luzerne-Kleegrass und den Getreidearten gab es nur geringe Ertragseffekte, bei Kartoffeln und Ackerbohne jedoch stiegen die Erträge auf 113 – 125 % an. Die N-Bindung der Leguminosen wurde durch die K-Düngung kaum beeinflusst. Besonders die K-Gehalte der vegetativen Pflanzenteile (Stroh, Knollen, Gemenge-Aufwuchs) konnten z. T. deutlich angehoben werden. Außer bei der Ackerbohne wurden die K-Gehalte in Körnern nicht beeinflusst. Im Durchschnitt aller Fruchtarten wurden im Vergleich zu keiner K-Düngung (= 100 %) die K-Gehalte in den gemähten Pflanzenteilen nach hoher Düngung auf 116 % angehoben. Bis zur dritten Steigerungsstufe mit 80 kg K/ha waren negative K-Salden berechnet worden.

Die löslichen K-Gehalte des Bodens wurden durch die Düngungsmaßnahmen z. T. deutlich angehoben, im DL-Extrakt in höherem Ausmaß als im CAL-Extrakt. Insgesamt bestand aber eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Extraktionsmitteln. Zwischen den Erträgen der Fruchtarten und den Bodengehalten an Kalium bestanden nur geringe positive Beziehungen. Die Kartoffeln reagierten etwas deutlicher auf die K-Düngung. Die pH-Werte wurden auch durch hohe mineralische K-Düngung nicht beeinflusst.

Aus der statistischen Gegenüberstellung der jährlichen Bodenänderung an löslichem Kalium und den erhaltenen K-Salden kann für den Lehmboden des Rodaer Standortes eine Nachlieferung je nach eingesetztem Extraktionsmittel von 20 – 80 kg K/ha und Jahr veranschlagt werden. Daher können negative K-Salden dieser Höhe vorliegen, ohne dass die löslichen K-Gehalte des Bodens sich über die Zeit verändern. Eine jährliche Differenz im K-Saldo von 39 – 46 kg K/ha ist erforderlich, damit der lösliche K-Gehalt um 0,1 mg/100 g Boden angehoben werden kann.

5.4 Weiterentwicklung von Dünungssystemen

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des Versuches einer intensiven Diskussion an Hand der Fachliteratur unterzogen und es wurde eine Gewichtung der erhaltenen Ergebnisse zur Grunddünung an einem überregionalen Verbund an ökologischen Versuchen aus acht Bundesländern vorgenommen. Frühere Ergebnisse zur Bewertung der Ertragsreaktionen in Folge steigender löslicher Bodengehalte an Phosphat und Kalium konnten bestätigt werden. Im Ökolandbau konnte die Versorgungsklasse B als ausreichend bezeichnet werden, um ein optimales Ertragsniveau zu gewährleisten.

Als Ergebnis einer überregionalen Auswertung von Versuchsergebnissen können speziell für den Ökolandbau neue Versorgungsklassen für die löslichen Bodengehalte an Phosphor und Kalium vorgeschlagen werden. Die optimalen Werte für die Klasse C können für Phosphor zwischen 2,5 – 4,5 mg P/100 g und für Kalium der mittleren Böden zwischen 6,5 – 10,0 mg K/100 g Boden festgelegt werden.

Für die allgemeine Bewertung der Wirkung der organischen Dünung auf die Erträge der Fruchtarten wurde erstmals ein Verfahren auf Basis der Brutto-N-Bilanzierung erstellt, das auf einer Grundlage von 39 konventionellen und ökologischen Dauerversuchen mit 444 Vergleichsvarianten beruht. Nach diesem fünfstufigen Bewertungssystem ist im Bereich negativer Nährstoffsalden (Versorgungsklasse A, B) in Folge Stickstoff-Mangel mit deutlich erhöhten Ertragsausfällen zu rechnen. Zwischen ausgeglichenen Bilanzen und Salden bis ca. 50 kg N/ha und Jahr können weitgehend optimale Fruchtartenerträge gesichert werden (= Klasse C). Aus den durchgeführten Arbeiten wurden abschließend einige praktische Schlussfolgerungen zur Weiterentwicklung von Dünungssystemen erläutert.

6 Literaturverzeichnis

- ALBERT, E., F. FÖRSTER, H. ERNST, H. KOLBE, B. DITTRICH, H. LABER, M. HANDSCHACK, G. KRIEGHOFF, T. HEIDENREICH, G. RIEHL, S. HEINRICH, & W. ZORN (2007): Umsetzung der Düngeverordnung. Hinweise und Richtwerte für die Praxis. Broschüre. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.
- AMANN, CH. & A. AMBERGER (1989): Phosphorus efficiency of buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). Z. Pflanzenern. Bodenk. 152, 181 – 189.
- AMBERGER, A. (1984): Phosphatwirkung in Abhängigkeit von Standort und Bewirtschaftung. Die Bodenkultur 35, 4, 295 – 304.
- AMBERGER, A. & CH. AMANN (1984): Wirkungen organischer Substanzen auf Boden- und Düngerphosphat. Teil 2: Einfluss verschiedener organischer Stoffe auf die Mobilität von Dünger-P. Z. Pflanzenern. Bodenk. 147, 1, 60 – 70.
- ANONYM (2007): Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 2092/91. Amtsblatt der Europäischen Union L189 vom 20.07.2007, 1 – 23.
- ANONYM (2008): Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle. Amtsblatt der Europäischen Union L250 vom 18.09.2008, 1 – 84.
- ANONYM (2018): Verordnung (EU) 2018/848 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die ökologische/biologische Produktion und Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union L 150, 1 – 92.
- APPEL, T. & R. BEISECKER (2015): Abschätzung des mineralisierbaren Stickstoffs in ackerbaulich genutzten Böden mithilfe von Kenngrößen. VDLUFA-Schriftenreihe 71, 358 – 365.
- BAUMGÄRTEL, G., K. FRÜCHTENICHT, U. HEGE, J. HEYN & K. ORLOVIUS (1999): Kalium-Düngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Richtwerte für die Gehaltsklasse C. Standpunkt. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Forschungs- und Untersuchungsanstalten (VDLUFA), Darmstadt.
- BECKER, J. (1988): Aggregation in landwirtschaftlichen Gesamtrechnungen über physische Maßstäbe: Futtergersteneinheiten als Generalnenner. Wissenschaftlicher Fachverlag, Gießen.
- BECKMANN, U., H. KOLBE, A. MODEL & R. RUSSOW (2001): Ackerbausysteme im ökologischen Landbau unter besonderer Berücksichtigung von N-Bilanz und Effizienzkennzahlen. UFZ-Bericht Nr. 14, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, Leipzig.
- BERRY, P.M., R. SYLVESTER-BRADLEY, L. PHILIPPS, D.J. HATCH, S.P. CUTTLE, F.W. RAYNS & P. GOSLING (2002): Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? Soil Use and Management 18, 248 – 255.
- BOSCH, M. & A. AMBERGER (1986): Einfluss langjähriger Düngung mit verschiedenen N-Formen auf die Phosphat-Dynamik einer Ackerbraunerde. Z. Pflanzenern. Bodenk. 149, 51 – 59.
- BRASCHI, I, C. CIAVATTA, C. GIOVANNINI & C. GESSA (2003): Combined effect of water and organic matter on phosphorus availability in calcareous soils. Nutrient Cycling Agroecosystems 67, 67 – 74.
- CHIRINDA, N., J.E. OLESEN & J.R. PORTER (2012): Root carbon input in organic and inorganic fertilizer-based systems. Plant Soil 359, 321 – 333.

- DAROUB, S.H., B.G. ELLIS & G.P. ROBERTSON (2001): Effect of cropping and low-chemical input systems on soil phosphorus fractions. *Soil Sci.* 166, 4, 281 – 291.
- DESSOUGI, H.E., A. ZU DREELE & N. CLAASSEN (2003): Growth and phosphorus uptake of maize cultivated alone, in mixed culture with other crops or after incorporation of their residues. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 254 – 261.
- DEUBEL, A.; A. GRANSEE & W. MERBACH (2002): Einfluss langjährig unterschiedlicher P-Düngung auf die P-Dynamik in einem Dauerdüngungsversuch in Halle (Saale). *Arch. Acker-, Pflanzenb. Bodenk.* 48, 543 – 551.
- DIEZ, T. & H. WEIGELT (1986): Vergleichende Bodenuntersuchungen von konventionell und alternativ bewirtschafteten Betriebsschlägen. Einführung, Untersuchungskonzept, spatendiagnostische und chemische Untersuchungen. *Bayer. Landw. Jahrb.* 63, 979 – 991.
- DOU, H. & D. STEFFENS (1993): Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor aus organischen und anorganischen Formen in der Rhizosphäre von *Lolium perenne*. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 156, 279 – 285.
- DREELE, A. ZU, & N. CLAASSEN (2004): Phosphorus of crop residues is mainly water soluble. Poster. Jahrestagung d. Dt. Gesell. f. Pflanzenernährung, Göttingen.
- EBERTSEDER, F., E. HOMEIER, D. LOHR, K. FISCHER-KAISER, G. HENKELMANN, CH. HAAS, S. VON TUCHER & H. HEUWINKEL (2015): Prüfung alternativer Labormethoden mit dem Ziel der Bewertung der N-Düngewirkung organischer Dünger. *VDLUFA-Schriftenreihe* 71, 228 – 237.
- EBERTSEDER, TH., C. ENGELS, J. HEYN, K.-J. HÜLSBERGEN, K. ISERMANN, H. KOLBE, G. LEITHOLD, J.R. REINHOLD, H. SCHMID, K. SCHWEITZER, M. WILLMS & J. ZIMMER (2014): Humusbilanzierung. Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Forschungs- und Untersuchungsanstalten (VDLUFA), Speyer.
- EGNER, H. & H. RIEHM (1955): Die Doppellactatmethode. In: R. Thun et al.: *Methodenbuch I*. Neumann Verlag, Berlin.
- EICHLER, B. (1999a): Ausnutzung akkumulierter Phosphate in landwirtschaftlichen Böden durch morphologische und physiologische Anpassungsmechanismen verschiedener Zwischenfrüchte. Beiträge zur 5. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Berlin, Verlag Dr. Köster, Berlin, 39 – 43.
- EICHLER, B. (1999b): Bewertung der Doppellaktatmethode zur Phosphatbestimmung im Boden unter besonderer Berücksichtigung des Zwischenfruchtanbaus. *VDLUFA-Schriftenreihe* 52, Kongressband 1999, 95 – 98.
- EICHLER, B. (2004): Möglichkeiten zur Einflussnahme auf Phosphorkreisläufe für die Gestaltung nachhaltiger Bodennutzungssysteme. *Habil., Universität, Rostock*.
- FRIEDEL, J.K. (2008): Aktive Nährstoffmobilisierung und ihre Bedeutung für die Düngungspraxis im Biologischen Landbau. *Umweltökologisches Symposium, Lehr- u. Forschungszentrum f. Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irding, Österreich*, 35 – 39.
- GRAß, K. (1979): Bodenuntersuchung und Düngungswirkung auf Grund von Feldversuchen. *Landw. Forsch.* 27, SH 2, 146 – 158.
- GUNST, L., W. RICHNER, P. MÄDER & J. MAYER (2013): DOK-Versuch: Nährstoffversorgung in Winterweizen – Wo wird es eng? *Agrarforschung Schweiz* 4, 2, 74 – 81.
- HEGE, U., M. WENDLAND & K. OFFENBERGER (2008): Zur Bedeutung der Bodenversorgung mit Phosphat und Kali: Wie hoch müssen die Nährstoffgehalte im Boden sein? *Pflanzenbauwissenschaften* 12, 2, 53 – 63.
- HEUWINKEL, H. (2007): Symbiontische N₂-Fixierung im ökologischen Landbau: Ansätze zur Verbesserung der Schätzwerte. *KTBL-Schrift* 458, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt, 70 – 83.

- JANSSEN, B.H. & P. DE WILLIGEN (2006): Ideal and saturated soil fertility as bench marks in nutrient management. II. Interpretation of chemical soil tests in relation to ideal and saturated soil fertility. *Agric. Ecosys. Environm.* 116, 147 – 155.
- JUNGK, A., N. CLAASSEN, V. SCHULZ & J. WENDT (1993): Pflanzenverfügbarkeit der Phosphorvorräte ackerbau-lich genutzter Böden – Langfristige Feldversuche zur Nutzbarkeit des Bodenphosphors und zur Bewertung der Bodenuntersuchung. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 156, 397 – 406.
- KADENKOVA, Z. & K. TOVAROVA (1971): Effect of manuring and fertilizing on phosphorus, potassium and calcium status in the soil. *Trans. Internat. Symp. "Humus et Planta V"*, Prague, 91 – 94.
- KERSCHBERGER, M. & G. MARKS (2000): Düngung im Ökolandbau – Wie wichtig ist eine gute Nährstoffversorgung des Bodens? *Neue Landwirtschaft*, Nr. 4, 48 – 50.
- KERSCHBERGER, M., U. HEGE & A. JUNGK (1997): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. *Standpunkt. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA)*, Darmstadt.
- KERSCHBERGER, M., B. DELLER, U. HEGE, J. HEYN, H.-E. KAPE, O. KRAUSE, J. POLLEHN, M.J. REX & K. SEVERIN (2000): Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. *Standpunkt. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA)*, Darmstadt.
- KOLBE, H. (2000): Landnutzung und Wasserschutz. Der Einfluss von Stickstoff-Bilanzierung, N_{min} -Untersuchung und Nitrat-Auswaschung sowie Rückschlüsse für die Bewirtschaftung von Wasserschutzgebieten in Deutschland. *WLV Wissenschaftliches Lektorat & Verlag*, Leipzig.
- KOLBE, H. (2007): Berücksichtigung von Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren bei der Verbesserung von Verfahren der Grunddüngung und Humusbilanzierung. *Arbeitspapier. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft*, Leipzig, 1 – 8. <http://www.orgprints.org/11056/>
- KOLBE, H. (2009a): Auswirkungen differenzierter Land- und Bodenbewirtschaftung auf den C- und N-Haushalt der Böden unter Berücksichtigung konkreter Szenarien der prognostizierten Klimaänderung im Freistaat Sachsen. In: *Klimawandel und C-Sequestrierung. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie*, Heft 23, 1 – 143.
- KOLBE, H. (2009b): Vergleich von Methoden zur Berechnung der biologischen N_2 -Fixierung von Leguminosen zum Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis. *Pflanzenbauwissenschaften* 13, 23 – 36.
- KOLBE, H. (2010): Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – aktuelle Probleme, Herausforderungen, Düngungsstrategien. In: *Phosphor- und Kaliumdüngung – brauchen wir neue Düngekonzepte? Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD)*, Würzburg. BAD, Frankfurt/Main, 117 – 137.
- KOLBE, H. (2012): Zusammenführende Untersuchungen zur Genauigkeit und Anwendung von Methoden der Humusbilanzierung im konventionellen und ökologischen Landbau. In: *Bilanzierungsmethoden und Versorgungsniveau für Humus. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie*, Heft 19, 1 – 85.
- KOLBE, H. (2015): Wie ist es um die Bodenfruchtbarkeit im Ökolandbau bestellt: Nährstoffversorgung und Humusstatus? In: *Bodenfruchtbarkeit – Grundlage erfolgreicher Landwirtschaft. Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD)*, Würzburg. BAD, Frankfurt/Main, 89 – 123.
- KOLBE, H. (2019): Einfluss mineralischer P- und K-Düngung auf die Ertragsreaktion der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung des Bodens unter den Anbaubedingungen des ökologischen Landbaus in Deutschland. *J. Kulturpflanzen* 71, 161 – 181.

- KOLBE, H. (2021): Berichte aus dem Ökolandbau 2021 – Nährstoffumsatz, Ertrag und Qualität von Kartoffeln. Einfluss mineralischer und organischer Düngemittel auf den Nährstoffumsatz im Boden sowie Ertrag und Qualität von Kartoffeln im Ökologischen Landbau. Dr. H. Kolbe, Schkeuditz, 1 – 144.
<https://slub.qucosa.de/api/qucosa%3A76720/attachment/ATT-0/>
- KOLBE, H. & B. KÖHLER (2008): Erstellung und Beschreibung des PC-Programms BEFU, Teil Ökologischer Landbau. Verfahren der Grunddüngung, legumen N-Bindung, Nährstoff- und Humusbilanzierung. In: BEFU – Teil Ökologischer Landbau. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 36, 1 – 253.
- KOLBE, H. & J. ZIMMER (2015): Leitfaden zur Humusversorgung. Informationen für Praxis, Beratung und Schulung. Broschüre. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, 1 – 61.
- KOLBE, H. & D. MEYER (2021): Schlaggenaue Analyse von 32 Betrieben des ökologischen Landbaus im Freistaat Sachsen: Nährstoff- und Humusmanagement. Berichte Landwirtschaft 99, 2, 1 – 38.
- KOLBE, H., E. SCHMIDT & S. KLAGES (2015): Bodenfruchtbarkeit und Düngung. In: KTBL (Hrsg.): Faustzahlen für den Ökologischen Landbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt, 103 – 151.
- KOLBE, H., U. FRANKO, E. THIEL & E. LIEB (2013): Verfahren zur Abschätzung von Humusreproduktion und N-Umsatz im ökologischen und konventionellen Ackerbau. In: Humusreproduktion und N-Umsatz. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 1, 1 – 119.
- KOLBE, H., F. RIKABI, A. ALBERT, H. ERNST & F. FÖRSTER (1999): Ansätze zur PK-Düngungsberatung im Ökologischen Landbau. VDLUFA-Schriftenreihe 52, Kongressband 1999, 223 – 226.
- KÖRSCHENS, M. & A. PFEFFERKORN (2001): Bewertung der Nährstoffgehalte im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt. Arch. Acker-, Pflanzenb. Bodenk. 46, 177 – 186.
- KÖSTER, W. & P. SCHACHTSCHABEL (1983): Beziehung zwischen dem durch Phosphatdüngung erzielbaren Mehrertrag und dem Phosphatgehalt im Boden. Z. Pflanzenern. Bodenk. 146, 4, 539 – 542.
- KRISTENSEN, H.L. & K. THORUP-KRISTENSEN (2007): Effects of vertical distribution of soil inorganic nitrogen on root growth and subsequent nitrogen uptake by field vegetable crops. Soil Use Management 23, 338 – 347.
- KUHLMANN, H. (1990): Importance of the subsoil for the K nutrition of crops. Plant Soil 127, 129 – 136.
- KUHLMANN, H. & G. BAUMGÄRTEL (1991): Potential importance of the subsoil for the P and Mg nutrition of wheat. Plant Soil 137, 259 – 266.
- LEPPIN, TH. (2007): Mobilisierungspotential unterschiedlicher Pflanzen für stabile Phosphatformen im Boden. Dissertation, Universität, Gießen.
- LEUFERT, V., N. RAMANKUTTY & J.A. FOLEY (2012): Comparing the yields of organic and conventional agriculture. Research Letter, Nature 485, 229 – 235.
- LINDENTHAL, TH. (2000): Phosphorvorräte in Böden, betriebliche Phosphorbilanzen und Phosphorversorgung im Biologischen Landbau. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich.
- MATZEL, W. (1974): Probleme der Ausnutzung des Dünger- und Bodenphosphors – Übersichtsbeitrag. Arch. Acker-, Pflanzenb. Bodenk. 18, 471 – 487.
- MENGEL, K. (1984): Phosphordüngemittel – welche? DLG-Mitteilungen, Nr. 2, 77 – 79.
- MENGEL, K. (1986): Umsatz im Boden und Ertragswirksamkeit rohphosphathaltiger Düngemittel. Z. Pflanzenern. Bodenk. 149, 6, 674 – 690.

- MEYER, D., H. KOLBE & M. SCHUSTER (2021): Berichte aus dem Ökolandbau 2021 – Das Ökofeld Roda. Ergebnisse zur langjährigen Bewirtschaftung von Feldversuchsflächen der Versuchsstation Roda in Sachsen. Dr. H. Kolbe, Schkeuditz, 1 – 139. <https://slub.qucosa.de/api/qucosa%3A76643/attachment/ATT-0/>
- MITSCHERLICH, E. A. (1909): Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtsch. Jahrb.* 38, 537 – 552.
- NOWACK, K.-H. (1990): Phosphorversorgung biologisch bewirtschafteter Äcker und Möglichkeiten der Bioindikation. Dissertation, Universität, Göttingen.
- OEHL, F., A. OBERSON, H.U. TAGMANN, J.M. BESSON, D. DUBOIS, P. MÄDER, H.-R. ROTH & E. FROSSARD (2002): Phosphorus budget and phosphorus availability in soils under organic and conventional farming. *Nutrient Cycling Agroecosystems* 62, 25 – 35.
- OJO, A.O., M.T. ADETUNJI, K.A. OKELEYE & C.O. ADEJUYIGBE (2015): Soil fertility, phosphorus fractions, and yield as affected by poultry manure and single superphosphate. *Intern. Scholarly Res. Notices* 2015, Article ID 616213, 1 – 8.
- OLFS, H.-W., K. BLANKENAU, F. BRENTUP, J. JASPER, A. LINK & J. LAMMEL (2005): Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 414 – 431.
- OWISSA I., E. WILBERG & G. MICHAEL (1966): Die Wirkung einer 30jährigen Mineral- und Stallmistdüngung auf den Phosphorsäure-Bindungszustand eines Filderlehm Bodens. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 113, 159 – 169.
- PARCOM (1993): PARCOM guide lines for calculating mineral balances. Meeting of the ad hoc working group on measures to reduce the nutrient load from agriculture 3, The Hague, The Netherlands.
- PETER, CHR. (2021): Bilanzierungs- und Empfehlungssystem Düngung BESyD – das kostenfreie Programm incl. aller düngerechtlichen Regelungen für den konventionellen und ökologischen Landbau. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden. <https://www.landwirtschaft.sachsen.de/duengebedarfsermittlung-besyd-20619.html>
- RANDHAWA, P.S., L.M. CONDRON, H.J. DI, S. SINAJ & R.D. MCLENAGHEN (2005): Effect of green manure addition on soil organic phosphorus mineralisation. *Nutrient Cycling Agroecosystems* 73, 181 – 189.
- RICHTER, D., M. KERSCHBERGER & G. MARKS (1977): Einfluss der Nährstoffgehalte des Unterbodens (21 – 40 cm) auf die Versorgung der Pflanzen mit Phosphor und Kalium. *Arch. Acker-, Pflanzenb. Bodenk.* 21, 239 – 247.
- RÖMER, W. & PH. LEHNE (2004): Vernachlässigte Phosphor- und Kaliumdüngung im ökologischen Landbau senkt die biologische Stickstoffbindung bei Rotklee und den Korntrag bei nachfolgendem Hafer. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167, 106 – 113.
- RÖMER, W., J. GERKE & PH. LEHNE (2004): Phosphatdüngung erhöht Stickstofffixierung bei Leguminosen. *Ökologie & Landbau*, 132, 4, 37 – 39.
- SCAGNOZZI, A., A. SAVIOZZI, R. LEVI-MINZI & R. RIFFALDI (1997): Nutrient release from decomposing crop residues in soil: A laboratory experiment. *Am. J. Alternative Agriculture* 12, 10 – 13.
- SCHACHTSCHABEL, P. (1956): Die Magnesiumversorgung nordwestdeutscher Böden und seine Beziehungen zum Auftreten von Mangelsymptomen an Kartoffeln. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 74, 202 – 219.
- SCHACHTSCHABEL, P., H.-P. BLUME, K.-H. HARTKE & U. SCHWERTMANN (1976): Lehrbuch der Bodenkunde. 9. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHELLER, E. (1999): Pflanzenernährung und Düngung im organischen Landbau. In: I. LÜNZER & H. VOGTMANN: *Ökologische Landwirtschaft. Pflanzenbau – Tierhaltung – Management*. Springer LoseblattSysteme, med-inform Verlagsgesellschaft, Düsseldorf, 02.02, 1 – 21.

- SCHMIDTKE, K. & R. RAUBER (2000): Stickstoffeffizienz von Leguminosen im Ackerbau. In: MÖLLERS, C. (Hrsg.): Stickstoffeffizienz landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Initiativen Umweltschutz 21, 48 – 69.
- SCHÜLLER, H. (1969): Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. Z. Pflanzenern. Bodenk. 123, 48 – 63.
- SCHULTE, G. (1996): Bodenchemische und bodenbiologische Untersuchungen ökologisch bewirtschafteter Böden in Rheinland-Pfalz unter besonderer Berücksichtigung der Nitratproblematik. Dissertation, Universität, Trier.
- SCHULTE, G. & D. SCHRÖDER (1996): P- und K-Extraktionsverfahren zur Kennzeichnung des Versorgungsgrades unterschiedlich lange ökologisch bewirtschafteter Böden in Rheinland-Pfalz. VDLUFA-Schriftenreihe 44, Kongressband 1996, 437 – 440.
- SHWIEKH, R., S. KRATZ, J. SCHICK & E. SCHNUG (2015): Investigations on the identification of long term input of phosphorus from organic sources by standard soil P analysis. J. Kulturpflanzen 67, 45 – 60.
- SPIEGEL, H., T. LINDENTHAL, M. MAZOREK, A. PLONER, B. FREYER & A. KÖCHL (2001): Ergebnisse von drei 40-jährigen P-Dauerversuchen in Österreich. 1. Mitteilung: Auswirkungen ausgewählter P-Düngerformen und -mengen auf den Ertrag und die $P_{CAL/DL}$ -Gehalte im Boden. Die Bodenkultur 52, 3 – 17.
- STAHR, K., F. RÜCK & G. LORENZ (1992): Vorhersage der Stickstoffmineralisierung in Böden Baden-Württembergs. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen 30, 103 – 130.
- STEFFENS, D. (1984): Wurzelstudien und Phosphat-Aufnahme von Weidelgras und Rotklee unter Feldbedingungen. Z. Pflanzenern. Bodenk. 147, 85 – 97.
- STEFFENS, D. (1987): Einfluss langjähriger Düngung mit verschiedenen Phosphatdüngerformen auf die Phosphatverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. Z. Pflanzenern. Bodenk. 150, 75 – 80.
- STEFFENS, D., R. STAMM, G. LEITHOLD & S. SCHUBERT (2003): Phosphat-Mobilisierung durch Haupt- und Zwischenfrüchte nach Düngung von weicherdigem Rohphosphat im ökologischen Landbau. BÖLN-Projektabschlussbericht. <http://www.orgprints.org/17240>
- STEFFENS, D., TH. LEPPIN, N. LUSCHIN-EBENGREUTH, Z.M. YANG & S. SCHUBERT (2010): Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. J. Plant Nutr. Soil Sci. 173, 765 – 771.
- STUMPE, H., J. GARZ & H. SCHARF (1994): Wirkung der Phosphatdüngung in einem 40jährigen Dauerversuch auf einer Sandlöß-Braunschwarzerde in Halle. Z. Pflanzenern. Bodenk. 157, 105 – 110.
- TAGMANN, H.-U., A. OBERSON, F. OEHL, E. FROSSARD, D. DUBOIS & P. MÄDER (2001): DOK-Versuch: Phosphor-Bilanz und -Verfügbarkeit über 21 Jahre. Agrar-Forschung 8, 8, 318 – 323.
- TARAFDAR, J.C. & N. CLAASSEN (2005): Preferential utilization of organic and inorganic sources of phosphorus by wheat plant. Plant Soil 275, 285 – 293.
- TAUBE, F., TH. APPEL, TH. EBERTSEDER, T. MÜLLER, H.-W. OLFS, L. NÄTSCHER, D. STEFFENS, F. WIESLER & W. ZORN (2015): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung – Anpassung der Richtwerte für die Gehaltsklassen ist geboten und notwendig. Positionspapier. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Forschungs- und Untersuchungsanstalten (VDLUFA), Speyer. http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Positionspapiere/2015_Phosphordüngung_nach_Bodenuntersuchung.pdf
- VARINDERPAL-SINGH, N.S. DHILLON & B.S. BRAR (2006a): Influence of long-term use of fertilizers and farmyard manure on the adsorption-desorption behaviour and bioavailability of phosphorus in soils. Nutrient Cycling Agroecosystems 75, 67 – 78.
- VARINDERPAL-SINGH, N.S. DHILLON & B.S. BRAR (2006b): Effect of incorporation of crop residues and organic manures on adsorption/desorption and bio-availability of phosphate. Nutrient Cycling Agroecosystems 76, 95 – 108.

- VARINDERPAL-SINGH, N.S. DHILLON, RAJ-KUMAR & B.S. BRAR (2006c): Long-term effects of inorganic fertilizers and manure on phosphorus reaction products in a Typic Ustochrept. *Nurient Cycling Agroecosystems* 76, 29 – 37.
- WANDRUSZKA, R. VON (2006): Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochem. Transactions* 7, 6, 1 – 8.
- WECHSUNG, G. & H. PAGEL (1993): Akkumulation und Mobilisation von Phosphaten in einer Schwarzerde im Statischen Dauerversuch Lauchstädt – Betrachtung der P-Bilanz nach 84 Versuchsjahren. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 156, 301 – 306.
- WEHRMANN, J., & H. C. SCHARPF (1979): Der Mineralstickstoffgehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoffdüngbedarf (N_{min} -Methode). *Plant Soil* 52, 109 – 126.
- WELP, G., U. HERMS & G. BRÜMMER (1983): Einfluss von Bodenreaktion, Redoxbedingungen und organischer Substanz auf die Phosphatgehalte der Bodenlösung. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 146, 38 – 52.
- WERNER, W. (1969): Kennzeichnung des pflanzenverfügbaren Phosphats nach mehrjähriger Düngung mit verschiedenen Phosphaten. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 122, 19 – 32.
- WERNER, W. (2009): P-Reserven besser nutzen. *DLG-Mitteilungen*, Nr. 12, 54 – 57.
- WERNER, W. & H. WIECHMANN (1971): Vergleichende Untersuchungen zur Brauchbarkeit der CAL-Methode zur Kennzeichnung des pflanzenverfügbaren Bodenphosphats. *Landwirtschaftl. Forsch.* 24, 285 – 293.
- WERNER, W. & M. TRIMBORN (2008): Potentiale zur Effizienzsteigerung in der P-Düngung. Vortrag, Braunschweiger Nährstofftage „Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft“ 10. – 11. November. Julius Kühn-Institut, Braunschweig.
- WIESLER, F., TH. APPEL, K. DITTERT, TH. EBERTSEDER, T. MÜLLER, L. NÄTSCHER, H.-W. OLFS, M. REX, K. SCHWEITZER, D. STEFFENS, F. TAUBE & W. ZORN, (2018): Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. *VDLUFA-Standpunkt*, Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), Speyer.
https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/2018_Standpunkt_P-Duengung.pdf

7 Anhang

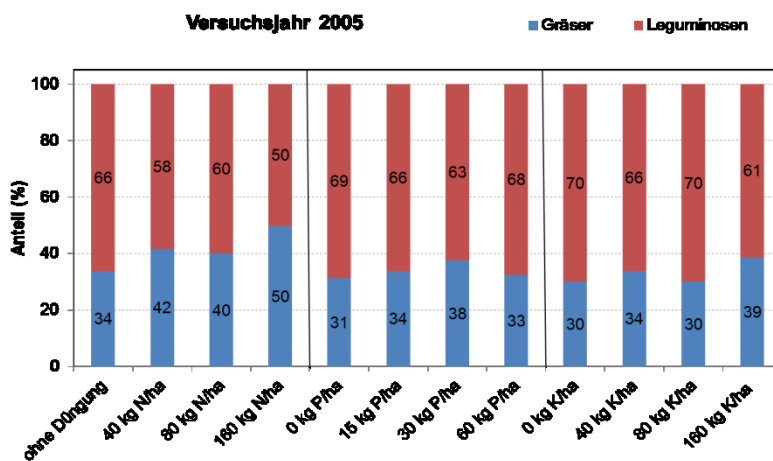


Abbildung A1: Gräser- zu Leguminosenverhältnis im Jahr 2005

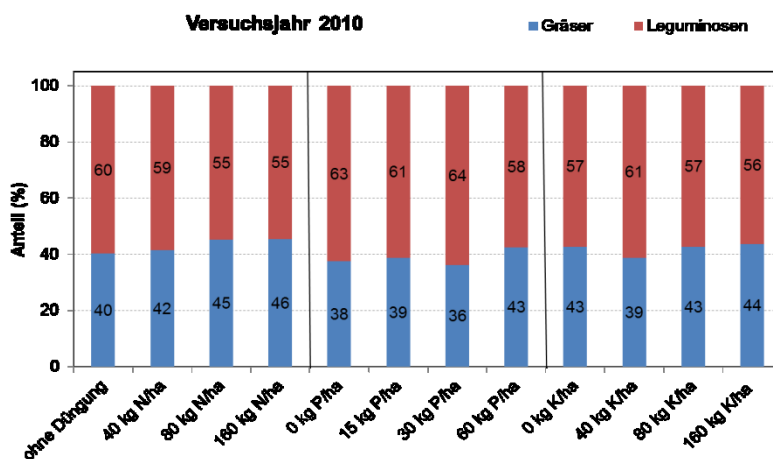


Abbildung A2: Gräser- zu Leguminosenverhältnis des Jahres 2010

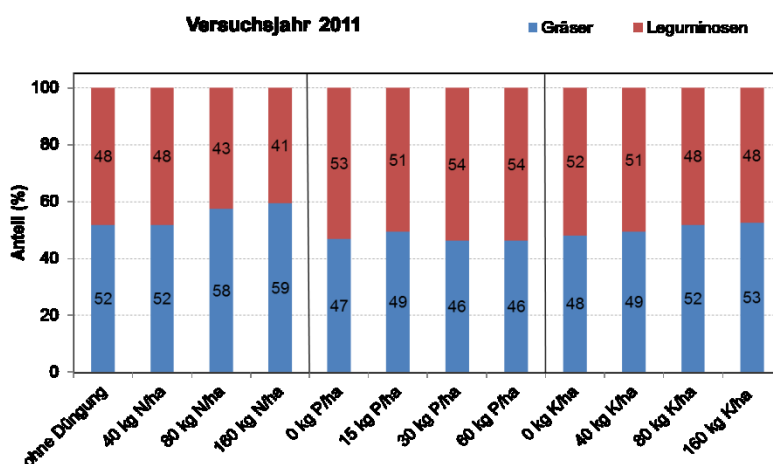


Abbildung A3: Gräser- zu Leguminosenverhältnis im Jahr 2011

IMPRESSUM

Herausgeber:

Dr. Hartmut Kolbe
Altes Dorf 19
D-04435 Schkeuditz
E-Mail: hartmutkolbe@yahoo.de

Autoren:

Katharina Farack, Peter Müller, Dr. Wilfried Schliephake, Lands-
berg
Dr. Hartmut Kolbe, Schkeuditz

Fotos:

Titelseite: LfULG

Redaktionsschluss:

November, 2021

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann
aber als PDF-Datei heruntergeladen werden.