

Kohlenstoffdynamik im pfluglosen Ackerbau

Schriftenreihe, Heft 6/2018



C-Status und -Dynamik sowie Grundnährstoffversorgung nach 20-jährigem Pflugverzicht

Abschlussbericht zum Projekt
„Klimarelevante Kohlenstoffspeicherung und -dynamik sowie Grundnährstoffverfügbarkeit
in Ackerböden nach 20-jähriger konservierender Bodenbearbeitung bzw. Direktsaat“
bearbeitet im Auftrag des
Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Autorenschaft und Sachbearbeitung:
Dipl.-Geograph Dr. Fabian Kirsten
Universität Leipzig

Projektnehmer:
Prof. Dr. Jürgen Heinrich
Lehrstuhl für Physische Geographie und landschaftsbezogene Umweltforschung
Universität Leipzig

Inhalt

1	Einleitung	18
2	Stand des Wissens	19
2.1	Nährstoffe und Kohlenstoff im Boden	19
2.1.1	Pflanzennährstoffe im Boden	19
2.1.2	Kohlenstoff im Boden	21
2.1.2.1	Die organische Bodensubstanz (OBS).....	21
2.1.2.2	Bedeutung und Menge der organischen Substanz.....	22
2.1.2.3	Die Bestimmung von C-Gehalten	23
2.1.2.4	C-Pools im Boden.....	24
2.2	Landwirtschaftliche Bodenbearbeitungsverfahren und ihr Einfluss auf die Kohlenstoffdynamik des Bodens.....	25
2.2.1	Bodenbearbeitung in der Landwirtschaft	25
2.2.2	Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die C-Dynamik im Boden	27
2.2.3	Wirkmechanismen der C-Stabilisierung im Boden.....	29
2.2.4	C-Sequestrierungspotentiale	30
2.2.5	Auswirkungen des einmaligen bzw. periodischen Pflugeinsatzes in Systemen reduzierter Bodenbearbeitung ..	32
2.2.6	Das Konzept der Bodenqualität	33
2.2.7	Das Konzept des Stratifizierungsverhältnisses (Stratification ratio).....	35
2.3	Kennzahlen der Bodenbearbeitung und der Erträge in Sachsen und Deutschland	36
2.3.1	Kennzahlen für den Freistaat Sachsen.....	36
2.3.2	Kennzahlen für die Bundesrepublik Deutschland	37
2.4	Landwirtschaftliche Dauerversuchsflächen	37
2.4.1	Datenerhebung auf Dauerversuchsflächen	38
2.4.2	Das Konzept der äquivalenten Bodenmassen.....	40
3	Untersuchungsstandorte	42
3.1	Lüttewitz	42
3.1.1	Klima	43
3.1.2	Geologie	44
3.1.3	Relief	46
3.1.4	Böden	47
3.1.5	Bewirtschaftung	49
3.1.6	Erosionsproblematik	51
3.1.7	Ausgangsdaten.....	53
3.1.8	Einordnung des Standortes	60
3.2	Methau	62
3.2.1	Klima	63
3.2.2	Geologie	63
3.2.3	Relief	65
3.2.4	Böden	65
3.2.5	Bewirtschaftung	67
3.2.6	Ausgangsdaten.....	67
3.2.7	Einordnung des Standortes	69
4	Methodik	73
4.1	Bodenprobenahme	73
4.1.1	Basisbeprobungen.....	73
4.1.2	Umbruchversuch	77
4.2	Probenverarbeitung	83
4.3	Laboranalytik	83
4.4	Datenkontrolle und -bearbeitung	84
4.5	Statistische Datenanalyse	86

5	Ergebnisse	88
5.1	Trockenrohdichte.....	88
5.1.1	Lüttewitz	89
5.1.1.1	Basisbeprobungen.....	89
5.1.1.2	Umbruchversuch	91
5.1.1.3	Unterboden.....	92
5.1.2	Methau	92
5.1.2.1	Oberkrume (0 - 10 cm)	93
5.1.2.2	Unterkrume (20 - 30 cm)	95
5.1.2.3	Grünland.....	96
5.2	Kohlenstoff	97
5.2.1	Lüttewitz	98
5.2.1.1	Basisbeprobungen.....	101
5.2.1.1.1	Stratifizierungsverhältnisse.....	108
5.2.1.1.2	Einfluss der Hangneigung	109
5.2.1.2	Umbruchversuch	111
5.2.1.2.1	Reliefabhängigkeit der C-Vorräte	116
5.2.1.2.2	Stratifizierungsverhältnisse.....	126
5.2.1.3	Synthese Lüttewitz	128
5.2.2	Methau	128
5.2.2.1	Block 1.....	128
5.2.2.2	Block 2.....	134
5.2.2.3	Block 3.....	140
5.2.2.4	Grünland.....	146
5.2.2.5	Korrekturfaktor Grobboden.....	149
5.2.2.6	Synthese Methau.....	149
5.3	Stickstoff.....	150
5.3.1	Lüttewitz	151
5.3.1.1	Basisbeprobungen.....	153
5.3.1.2	Umbruchversuch	155
5.3.2	Methau	157
5.3.2.1	Korrekturfaktor Grobboden.....	163
5.4	C/N-Verhältnis	164
5.4.1	Lüttewitz	165
5.4.1.1	Basisbeprobungen.....	165
5.4.1.2	Umbruchversuch	168
5.4.2	Methau	169
5.4.2.1	Block 1.....	169
5.4.2.2	Block 2.....	171
5.4.2.3	Block 3.....	173
5.4.2.4	Grünland.....	175
5.5	pH-Wert	176
5.5.1	Lüttewitz	177
5.5.1.1	Basisbeprobungen.....	179
5.5.1.2	Umbruchversuch	179
5.5.2	Methau	181
5.5.2.1	Variante Pflug.....	181
5.5.2.2	Variante Konservierend	182
5.5.2.3	Variante Grünland	182
5.6	Heißwasserlöslicher Kohlenstoff.....	183
5.6.1	Lüttewitz	184
5.6.1.1	Basisbeprobungen.....	187

5.6.1.2	Umbruchversuch	189
5.6.2	Methau	195
5.7	Mikrobielle Biomasse.....	203
5.7.1	Lüttewitz	204
5.7.1.1	Basisbeprobungen.....	204
5.7.1.2	Umbruchversuch	207
5.7.2	Methau	217
5.8	Dehydrogenaseaktivität	222
5.8.1	Lüttewitz	222
5.8.1.1	Basisbeprobungen.....	222
5.8.1.2	Umbruchversuch	223
5.8.2	Methau	226
5.9	Phosphor	229
5.9.1	Lüttewitz	230
5.9.1.1	Basisbeprobungen.....	233
5.9.1.2	Umbruchversuch	237
5.9.2	Methau	241
5.10	Kalium	250
5.10.1	Lüttewitz	250
5.10.1.1	Basisbeprobungen.....	253
5.10.1.2	Umbruchversuch	257
5.10.2	Methau	262
6	Diskussion	270
6.1	Korrelationen der untersuchten Parameter.....	270
6.2	Kohlen- und Stickstoffvorräte sowie Variantenvergleich am Standort Lüttewitz	275
6.2.1	Bewertung und Einordnung der Daten aus Voruntersuchungen	275
6.2.1.1	Ergebnisse des IfZ.....	275
6.2.1.2	Ergebnisse von Thiel und Keller.....	276
6.2.2	Einordnung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung	278
6.2.2.1	C-Vorräte.....	278
6.2.2.2	C-Gehalte	279
6.2.2.3	(Zeitliche) Schwankungen der C-Vorräte.....	280
6.2.2.4	Der Einfluss des Reliefs und der Geomorphodynamik auf die C-Vorräte am Standort Lüttewitz	281
6.2.2.5	N-Vorräte.....	291
6.3	Kohlen- und Stickstoffvorräte sowie Variantenvergleich am Standort Methau	291
6.3.1	Bewertung und Einordnung der Daten aus Voruntersuchungen	291
6.3.2	Einordnung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung	292
6.4	Einfluss von Klimaänderungen auf die Entwicklung der C-Vorräte.....	293
6.5	Auswirkungen des periodischen Pflugeinsatzes auf die C-Dynamik	293
6.6	Qualität der organischen Substanz (C/N-Verhältnis) / C_{hwl} - & C_{mik} -Gehalte	295
6.6.1	C/N-Verhältnis	295
6.6.2	C_{hwl}	295
6.6.3	Mikrobielle Biomasse und Aktivität	296
6.7	Verfügbarkeit der Makronährstoffe	298
6.7.1	Phosphor	298
6.7.1.1	Lüttewitz	298
6.7.1.2	Methau	300
6.7.2	Kalium	301
6.7.2.1	Lüttewitz	301
6.7.2.2	Methau	302
7	Zusammenfassung/Fazit.....	303
	Literaturverzeichnis	305

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lage des Untersuchungsstandortes Lüttewitz	43
Abbildung 2:	Witterung in der Region des Untersuchungsstandortes Lüttewitz im Untersuchungszeitraum 2012 bis 2015	45
Abbildung 3:	Digitales Höhenmodell der Untersuchungsfläche in Lüttewitz	46
Abbildung 4:	Bodenkarten der Untersuchungsfläche in Lüttewitz nach LfULG (2012) und TEIWES (1997)	48
Abbildung 5:	Lage der Bodenbearbeitungsparzellen auf dem Untersuchungsschlag Lüttewitz	49
Abbildung 6:	Grenze zwischen den Bearbeitungsparzellen Pflug und Direktsaat im Herbst 2015	50
Abbildung 7:	Schwemmfächer auf der Pflugparzelle im Frühjahr 2012 am Standort Lüttewitz	52
Abbildung 8:	Bewirtschaftungsmaßnahmen auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz im Untersuchungszeitraum, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten	61
Abbildung 9:	Lage des Untersuchungsstandortes Methau	62
Abbildung 10:	Witterung am Untersuchungsstandort Methau im Untersuchungszeitraum 2012 bis 2015	64
Abbildung 11:	Digitales Höhenmodell der Untersuchungsfläche in Methau	65
Abbildung 12:	Bodenprofilgrube der Catena 2 des LfULG zwischen den Blöcken 2 und 3 im Bereich der Probenahmepunkte am Standort Methau	66
Abbildung 13:	Bewirtschaftungsmaßnahmen im Block 1 der Untersuchungsfläche Methau im Untersuchungszeitraum, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten	70
Abbildung 14:	Bewirtschaftungsmaßnahmen im Block 2 der Untersuchungsfläche Methau im Untersuchungszeitraum, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten	71
Abbildung 15:	Bewirtschaftungsmaßnahmen im Block 3 der Untersuchungsfläche Methau im Untersuchungszeitraum, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten	72
Abbildung 16:	Räumliche Verteilung der Beprobungspunkte (Basisbeprobungen) auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz	74
Abbildung 17:	Räumliche Verteilung der Beprobungspunkte (Basisbeprobungen) auf der Untersuchungsfläche Methau	75
Abbildung 18:	Beprobungsschema Basisbeprobungen auf der Untersuchungsfläche Methau	76
Abbildung 19:	Lage der Pflugstreifen sowie Referenzpunkte (Umbruchversuch) auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz	77
Abbildung 20:	Beprobungsschema Referenzpunkte (Umbruchversuch) – Untersuchungsfläche Lüttewitz	78
Abbildung 21:	Beprobungsschema Pflugstreifen (Umbruchversuch) – Untersuchungsfläche Lüttewitz	79
Abbildung 22:	Profilgrube während der Probenahme auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz	81
Abbildung 23:	Unterbodenbeprobung mittels Rammkernsonde im April 2013 auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz	82
Abbildung 24:	Mittlere Trockenrohdichten in der Oberkrume (0-10 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen der Basisbeprobungen	90
Abbildung 25:	Mittlere Trockenrohdichten in der Unterkrume (20-30 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen der Basisbeprobungen	90
Abbildung 26:	Mittlere Trockenrohdichten in der Oberkrume (0-10 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	91
Abbildung 27:	Mittlere Trockenrohdichten in der Unterkrume (20-30 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	92
Abbildung 28:	Mittlere Trockenrohdichten in der Oberkrume (0-10 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau	94
Abbildung 29:	Mittlere Trockenrohdichten in der Unterkrume (20-30 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau	95

Abbildung 30:	Mittlere Trockenrohdichten in drei Tiefenstufen an zwei Beprobungsterminen in der Variante Grünland am Standort Methau.....	96
Abbildung 31:	Kohlenstoffgehalte der Variante Pflug in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine, Beprobungsschichten s. Kapitel 4.1).....	99
Abbildung 32:	Kohlenstoffgehalte der Variante Direktsaat in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine, Beprobungsschichten s. Kapitel 4.1).....	99
Abbildung 33:	Kohlenstoffgehalte der Variante Konservierend in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine, Beprobungsschichten s. Kapitel 4.1).....	100
Abbildung 34:	Kohlenstoffgehalte der Variante Konservierend Locker in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine, Beprobungsschichten s. Kapitel 4.1).....	101
Abbildung 35:	Mittlere Kohlenstoffgehalte von fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten an den vier Basisbeprobungsterminen in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz.....	102
Abbildung 36:	Mittlere Kohlenstoffgehalte von fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten an den vier Basisbeprobungsterminen in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz.....	103
Abbildung 37:	Mittlere Kohlenstoffgehalte von fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten an den vier Basisbeprobungsterminen in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz.....	104
Abbildung 38:	Mittlere Ct-Gehalte von fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten an den vier Basisbeprobungsterminen in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz.....	104
Abbildung 39:	Mittlere Kohlenstoffvorräte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten am Standort Lüttewitz (4 Basisbeprobungstermine).....	105
Abbildung 40:	Mittlere Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Basisbeprobungsterminen am Standort Lüttewitz.....	106
Abbildung 41:	Streuung der Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Basisbeprobungsterminen am Standort Lüttewitz.....	107
Abbildung 42:	Mittlere Stratifizierungsverhältnisse (SR) der Kohlenstoffgehalte der Krume differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Basisbeprobungsterminen am Standort Lüttewitz.....	109
Abbildung 43:	Gesamtkohlenstoffvorräte in Abhängigkeit von der Hangneigung und Bodenbearbeitungsvariante im Mittel der vier Basisbeprobungstermine am Standort Lüttewitz.....	110
Abbildung 44:	Streuung der Gesamtkohlenstoffvorräte in vier Hangneigungsklassen im Mittel der vier Basisbeprobungstermine am Standort Lüttewitz.....	111
Abbildung 45:	Mittlere Kohlenstoffgehalte in der Variante Pflug (PU) im Verlauf der acht Beprobungstermine, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz.....	112
Abbildung 46:	Mittlere Kohlenstoffvorräte differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz im Herbst 2013.....	112
Abbildung 47:	Mittlere Kohlenstoffgehalte in der Variante Direktsaat (DU) im Verlauf der acht Beprobungstermine, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz.....	113
Abbildung 48:	Mittlere Kohlenstoffgehalte in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) im Verlauf der acht Beprobungstermine, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz.....	114
Abbildung 49:	Mittlere Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz.....	115
Abbildung 50:	Streuungen der Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz.....	116

Abbildung 51:	Lage der Pflugstreifen DP1 - DP6 und der Referenzpunkte (PU, DU) in Bezug auf die modellierten Abflussbahnen sowie die räumliche Verteilung der normalisierten Kohlenstoffvorräte am Standort Lüttewitz	117
Abbildung 52:	Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP1 am Standort Lüttewitz (Abbildung 51).....	118
Abbildung 53:	Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP4 am Standort Lüttewitz	119
Abbildung 54:	Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP2 am Standort Lüttewitz	120
Abbildung 55:	Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP5 am Standort Lüttewitz	121
Abbildung 56:	Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP3 am Standort Lüttewitz	122
Abbildung 57:	Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP6 am Standort Lüttewitz	123
Abbildung 58:	Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) in der Bearbeitungsvariante Pflug (PU) differenziert nach Reliefposition und Beprobungstermin am Standort Lüttewitz	124
Abbildung 59:	Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) in der Bearbeitungsvariante Direktsaat (DU) differenziert nach Reliefposition und Beprobungstermin am Standort Lüttewitz	125
Abbildung 60:	Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) in der Bearbeitungsvariante Direktsaat gepflügt (DP) differenziert nach Reliefposition und Beprobungstermin am Standort Lüttewitz	126
Abbildung 61:	Mittlere Stratifizierungsverhältnisse (SR) der Ct-Gehalte in der Krume differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungstermine im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz.....	127
Abbildung 62:	Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Pflug im Block 1 (straßennah) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)	129
Abbildung 63:	Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Konservierend im Block 1 (straßennah) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)	129
Abbildung 64:	Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 1 (straßennah) am Standort Methau	130
Abbildung 65:	Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 1 (straßennah) am Standort Methau	131
Abbildung 66:	Mittlere Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 1 (straßennah) am Standort Methau.....	132
Abbildung 67:	Mittlere Kohlenstoffvorräte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und drei Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 1 (straßennah) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)	133
Abbildung 68:	Mittlere Stratifizierungsverhältnisse der Kohlenstoffgehalte in der Krume, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 1 (straßennah) am Standort Methau.....	134

Abbildung 69:	Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Pflug im Block 2 (Mitte) am Standort Methau (vier Beprobungstermine).....	135
Abbildung 70:	Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Konservierend im Block 2 (Mitte) am Standort Methau (vier Beprobungstermine).....	135
Abbildung 71:	Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 2 (Mitte) am Standort Methau	137
Abbildung 72:	Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 2 (Mitte) am Standort Methau	137
Abbildung 73:	Mittlere Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 2 (Mitte) am Standort Methau	138
Abbildung 74:	Mittlere Kohlenstoffvorräte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und drei Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 2 (Mitte) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)	139
Abbildung 75:	Mittlere Stratifizierungsverhältnisse der Kohlenstoffgehalte in der Krume, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 2 (Mitte) am Standort Methau.....	140
Abbildung 76:	Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Pflug im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau (vier Beprobungstermine).....	141
Abbildung 77:	Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Konservierend im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)	141
Abbildung 78:	Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau	142
Abbildung 79:	Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau	143
Abbildung 80:	Mittlere Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau.....	144
Abbildung 81:	Mittlere Kohlenstoffvorräte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und drei Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)	145
Abbildung 82:	Mittlere Stratifizierungsverhältnisse der Ct-Gehalte in der Krume, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau.....	146
Abbildung 83:	Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Grünland am Standort Methau (vier Beprobungstermine).....	147
Abbildung 84:	Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Grünland am Standort Methau (vier Beprobungstermine).....	148
Abbildung 85:	Mittlere Stratifizierungsverhältnisse der Kohlenstoffgehalte in der Krume der Variante Grünland, differenziert nach Beprobungsterminen, am Standort Methau	148
Abbildung 86:	Stickstoffgehalte der Variante Pflug in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine).....	151
Abbildung 87:	Stickstoffgehalte der Variante Direktsaat in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine).....	152
Abbildung 88:	Stickstoffgehalte der Variante Konservierend in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine).....	152
Abbildung 89:	Stickstoffgehalte der Variante Konservierend Locker in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine).....	153

Abbildung 90:	Mittlere Stickstoffvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (4 Basisbeprobungstermine)	154
Abbildung 91:	Mittlere Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Basisbeprobungsterminen am Standort Lüttewitz	154
Abbildung 92:	Streuung der Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Basisbeprobungsterminen am Standort Lüttewitz	155
Abbildung 93:	Mittlere Nt-Gehalte in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) im Verlauf der 8 Beprobungstermine, differenziert nach 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz	156
Abbildung 94:	Mittlere Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz.....	157
Abbildung 95:	Stickstoffgehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach 3 Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau (4 Beprobungstermine)	158
Abbildung 96:	Stickstoffgehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach 3 Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau (4 Beprobungstermine)	159
Abbildung 97:	Stickstoffgehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau (4 Beprobungstermine)	159
Abbildung 98:	Mittlere Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvariante und Beprobungstermin, am Standort Methau.....	160
Abbildung 99:	Mittlere Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Blöcken, Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Methau.....	161
Abbildung 100:	Mittlere Stickstoffvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken und Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Methau (4 Beprobungstermine).....	162
Abbildung 101:	Mittlere Stickstoffvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau (4 Beprobungstermine)	163
Abbildung 102:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz	165
Abbildung 103:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz	166
Abbildung 104:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz	167
Abbildung 105:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz	168
Abbildung 106:	Mittlere C/N-Verhältnisse im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz.....	169
Abbildung 107:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 1 am Standort Methau.....	170
Abbildung 108:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 1 am Standort Methau.....	170
Abbildung 109:	Mittleres C/N-Verhältnis im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 1 am Standort Methau	171
Abbildung 110:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 2 am Standort Methau.....	172
Abbildung 111:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 2 am Standort Methau.....	172
Abbildung 112:	Mittleres C/N-Verhältnis im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 2 am Standort Methau	173
Abbildung 113:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 3 am Standort Methau.....	174

Abbildung 114:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 3 am Standort Methau.....	174
Abbildung 115:	Mittleres C/N-Verhältnis im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 3 am Standort Methau	175
Abbildung 116:	C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Grünland am Standort Methau.....	176
Abbildung 117:	pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine).....	177
Abbildung 118:	pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine).....	178
Abbildung 119:	pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine).....	178
Abbildung 120:	pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine)	179
Abbildung 121:	Mittlere pH-Werte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen der Basisbeprobungen.....	180
Abbildung 122:	Mittlere pH-Werte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	180
Abbildung 123:	pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau	181
Abbildung 124:	pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau	182
Abbildung 125:	pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau.....	183
Abbildung 126:	C_{hwf} -Gehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz (10 Beprobungstermine).....	185
Abbildung 127:	C_{hwf} -Gehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz (10 Beprobungstermine).....	185
Abbildung 128:	C_{hwf} -Gehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine).....	186
Abbildung 129:	C_{hwf} -Gehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine).....	187
Abbildung 130:	Mittlere C_{hwf} -Vorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012).....	188
Abbildung 131:	Anteile von C_{hwf} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012).....	189
Abbildung 132:	Mittlere C_{hwf} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug (PU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	190
Abbildung 133:	Mittlere C_{hwf} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat (DU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	191
Abbildung 134:	Mittlere C_{hwf} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	191
Abbildung 135:	C_{hwf} -Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	192

Abbildung 136:	Streuung der C_{hwf} -Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	193
Abbildung 137:	Mittlere Anteile von C_{hwf} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches.....	194
Abbildung 138:	C_{hwf} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau im Herbst 2012	195
Abbildung 139:	C_{hwf} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau im Herbst 2012	196
Abbildung 140:	C_{hwf} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Herbst 2012	197
Abbildung 141:	Streuungen der C_{hwf} -Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Herbst 2012	198
Abbildung 142:	Mittlere C_{hwf} -Vorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Herbst 2012	198
Abbildung 143:	Mittlere C_{hwf} -Vorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Herbst 2012.....	199
Abbildung 144:	Anteile von C_{hwf} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 1 am Standort Methau im Herbst 2012	201
Abbildung 145:	Anteile von C_{hwf} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 2 am Standort Methau im Herbst 2012	201
Abbildung 146:	Anteile von C_{hwf} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 3 am Standort Methau im Herbst 2012	202
Abbildung 147:	C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012).....	205
Abbildung 148:	Mittlere C_{mik} -Massen in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012).....	206
Abbildung 149:	Anteile von C_{mik} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012).....	207
Abbildung 150:	Mittlere C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug (PU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	208
Abbildung 151:	Mittlere C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat (DU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	209
Abbildung 152:	Mittlere C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	210
Abbildung 153:	Mittlere C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen der Wiederholung des Umbruchversuches im Jahr 2014/2015	211
Abbildung 154:	Mittlere C_{mik} -Massen im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	211
Abbildung 155:	Streuungen der C_{mik} -Massen im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	212

Abbildung 156:	Streuungen der C_{mik} -Massen im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen der Wiederholung des Umbruchversuches im Jahr 2014/2015	213
Abbildung 157:	Anteile von C_{mik} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches.....	214
Abbildung 158:	Anteile von C_{mik} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen der Wiederholung des Umbruchversuches im Jahr 2014/2015	215
Abbildung 159:	Anteile von C_{mik} am Gesamtkohlenstoff im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	216
Abbildung 160:	C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau	217
Abbildung 161:	C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau	218
Abbildung 162:	C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau.....	219
Abbildung 163:	C_{mik} -Massen im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, Blöcken und Beprobungsterminen, am Standort Methau	220
Abbildung 164:	Anteile von C_{mik} am Gesamtkohlenstoff im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, Blöcken und Beprobungsterminen, am Standort Methau	221
Abbildung 165:	Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012).....	223
Abbildung 166:	Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	224
Abbildung 167:	Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen der Wiederholung des Umbruchversuches im Jahr 2014/2015.....	225
Abbildung 168:	Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau (2 Beprobungstermine im Jahr 2012)	226
Abbildung 169:	Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau (2 Beprobungstermine im Jahr 2012).....	227
Abbildung 170:	Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau (2 Beprobungstermine im Jahr 2012).....	228
Abbildung 171:	P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine).....	230
Abbildung 172:	P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine).....	231
Abbildung 173:	P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine).....	232
Abbildung 174:	P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine)	232
Abbildung 175:	Mittlere Phosphor-Gesamtvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012	233
Abbildung 176:	Phosphor-Gesamtgehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012	234
Abbildung 177:	Mittlere P(CAL)-Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz.....	235

Abbildung 178:	Anteile von P(CAL) am Gesamtphosphorvorrat im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012	236
Abbildung 179:	Anteile von P(CAL) am Gesamtphosphorvorrat in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012	236
Abbildung 180:	Mittlere P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug (PU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	238
Abbildung 181:	Mittlere P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat (DU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	238
Abbildung 182:	Mittlere P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	239
Abbildung 183:	Mittlere P(CAL)-Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	240
Abbildung 184:	Mittlere Gesamtphosphorvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Frühjahr 2012.....	241
Abbildung 185:	Mittlere Gesamtphosphorvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Frühjahr 2012.....	242
Abbildung 186:	P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau (4 Beprobungstermine).....	244
Abbildung 187:	P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau (4 Beprobungstermine).....	245
Abbildung 188:	P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau (4 Beprobungstermine).....	246
Abbildung 189:	Anteile von P(CAL) an den Phosphor-Gesamtvräten im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) am Standort Methau im Frühjahr 2012	247
Abbildung 190:	Anteile von P(CAL) an den Phosphor-Gesamtvräten in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Frühjahr 2012	247
Abbildung 191:	Anteile von P(CAL) an den Phosphor-Gesamtvräten in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Frühjahr 2012.....	249
Abbildung 192:	K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine).....	251
Abbildung 193:	K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine).....	252
Abbildung 194:	K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine).....	252
Abbildung 195:	K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine).....	253
Abbildung 196:	Mittlere K(CAL)-Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz.....	254
Abbildung 197:	Mittlere Kalium-Gesamtvräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012	255
Abbildung 198:	Kalium-Gesamtgehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012.....	255
Abbildung 199:	Anteile von K(CAL) an den Gesamtkaliumvräten im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012	256

Abbildung 200:	Anteile von K(CAL) an den Gesamtkaliumvorräten im 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012.....	257
Abbildung 201:	K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug (PU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	258
Abbildung 202:	K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat (DU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	259
Abbildung 203:	K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	260
Abbildung 204:	K(CAL)-Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches	261
Abbildung 205:	Mittlere Gesamtkaliumvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Frühjahr 2012.....	262
Abbildung 206:	Mittlere Gesamtkaliumvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Frühjahr 2012.....	263
Abbildung 207:	K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau (4 Beprobungstermine).....	265
Abbildung 208:	K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau (4 Beprobungstermine)	266
Abbildung 209:	K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau (4 Beprobungstermine)	266
Abbildung 210:	Anteile von K(CAL) an den Gesamtkaliumvorräten im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Frühjahr 2012.....	267
Abbildung 211:	Anteile von K(CAL) an den Gesamtkaliumvorräten in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Frühjahr 2012.....	268
Abbildung 212:	Anteile von K(CAL) an den Gesamtkaliumvorräten in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Frühjahr 2012	269
Abbildung 213:	Verbreitung von Erosionsgefährdungsklassen am Untersuchungsstandort Lüttewitz, Auflösung 5 m (Datengrundlage: LfULG 2016, eigene Darstellung)	283
Abbildung 214:	Klassifizierte Hangneigungen in der Fläche sowie mittlere Kohlenstoffvorräte an den Basisbeprobungspunkten am Untersuchungsstandort Lüttewitz.....	285
Abbildung 215:	Modellierte kumulierte Abflussmengen nach "kinematic routing algorithm" am Untersuchungsstandort Lüttewitz auf Basis des DGM2 (GeoSN)	286
Abbildung 216:	Modellierte Abflussbahnen sowie normalisierte mittlere Kohlenstoffvorräte in der Oberkrume (0-5 cm) an den Basisbeprobungspunkten am Untersuchungsstandort Lüttewitz	287
Abbildung 217:	Modellierte Abflussbahnen, interpolierte räumliche Verteilung der normalisierten, mittleren Ct-Massen in der Oberkrume (0-5 cm) sowie normalisierte mittlere Ct-Gesamtmassen an den Basisbeprobungspunkten am Untersuchungsstandort Lüttewitz.....	288
Abbildung 218:	Modellierte Abflussbahnen, interpolierte räumliche Verteilung der normalisierten, mittleren Kohlenstoffvorräte in der Oberkrume (0-5 cm) sowie normalisierte mittlere Standardabweichungen der Ct-Gesamtvorräte an den Basisbeprobungspunkten am Untersuchungsstandort Lüttewitz	290

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mittlere absolute und relative Erträge am Standort Lüttewitz im Zeitraum 2002 bis 2015.....	51
Tabelle 2:	Ergebnisse der Bodenuntersuchungen des IfZ in den Jahren 1995/1996 sowie 2010 auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz	55
Tabelle 3:	Ergebnisse der Bodenuntersuchungen des IfZ in den Jahren 2005 sowie 2010 auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz (Messfelder)	56
Tabelle 4:	Kohlen- und Stickstoffgehalte sowie Kohlenstoffmassen in vier Bearbeitungsvarianten am Standort Lüttewitz für die Jahre 1999-2002 nach Daten von THIEL (2002).....	59
Tabelle 5:	Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte bzw. -massen in den obersten 5000 t Boden je Hektar in vier Bodenbearbeitungsvarianten am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2005 (nach KELLER 2005).....	60
Tabelle 6:	Humus/C _{org} - sowie N _t -Gehalte der Versuchsfläche Methau im Herbst 1992 (Versuchsbeginn)	68
Tabelle 7:	Trockenrohdichten sowie Grenztiefen der Beprobungsschichten im April 2012 auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz	81
Tabelle 8:	Mittlere Kohlenstoffgehalte über alle Basisbeprobungstermine in fünf Beprobungsschichten und vier Bodenbearbeitungsvarianten am Standort Lüttewitz.....	105
Tabelle 9:	Matrix der Signifikanzen zwischen Kohlenstoffvorräten der vier Bodenbearbeitungsvarianten über vier Basisbeprobungstermine aus Post-Hoc-Test nach Scheffé	108
Tabelle 10:	Nach potentiellen Skelettanteilen korrigierte Kohlenstoffvorräte innerhalb der einzelnen Blöcke und Bodenbearbeitungsparzellen am Standort Methau	150
Tabelle 11:	Nach potentiellen Skelettanteilen korrigierte Stickstoffvorräte innerhalb der einzelnen Blöcke und Bodenbearbeitungsparzellen am Standort Methau	164
Tabelle 12:	Nach potentiellen Skelettanteilen korrigierte heißwasserlösliche Kohlenstoffvorräte innerhalb der einzelnen Blöcke und Bodenbearbeitungsparzellen am Standort Methau im Herbst 2012.....	200
Tabelle 13:	Nach potentiellen Skelettanteilen korrigierte Gesamtphosphorvorräte innerhalb der einzelnen Blöcke und Bodenbearbeitungsparzellen am Standort Methau im Frühjahr 2012	243
Tabelle 14:	Nach potentiellen Skelettanteilen korrigierte Gesamtkaliumvorräte innerhalb der einzelnen Blöcke und Bodenbearbeitungsparzellen am Standort Methau im Frühjahr 2012	264
Tabelle 15:	Korrelationsmatrix der untersuchten Parameter am Standort Lüttewitz	271
Tabelle 16:	Korrelationsmatrix der untersuchten Parameter am Standort Methau	273
Tabelle 17:	Trockenrohdichten am Standort Lüttewitz nach 12 Versuchsjahren (nach JACOBS et al. 2015: 5)	277
Tabelle 18:	Kennzahlen der C-Gehalte bzw. -Vorräte am Standort Lüttewitz im Rahmen der 4 Basisbeprobungstermine	284

Abkürzungsverzeichnis

BfUL	(Staatliche) Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (Freistaat Sachsen)
C _{mik} /N _{mik}	mikrobieller Biomasse - Kohlenstoff/Stickstoff
CFE	Chloroform Fumigation Extraktion
C _{hwl} /N _{hwl}	heißwasserlöslicher Kohlen- bzw. Stickstoff
Ct/Nt/Pt/Kt/Mgt	Kohlenstoff /Stickstoff/Phosphor/Kalium/Magnesium (gesamt)
Corg	organischer Kohlenstoff
CT	Conventional Tillage (wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug, i.d.R. bis ca. 25-30 cm Tiefe)
CV	Variationskoeffizient (Coefficient of Variation)
DHA	Dehydrogenaseaktivität
ESM	Equivalent soil masses -> Konzept der äquivalenten Bodenmasse
GHK	Gehaltsklasse
GOF	Geländeoberfläche
HGS	Humusgehaltsstufe (nach Bodenkundlicher Kartieranleitung KA 5)
IfZ	Institut für Zuckerrübenforschung (Göttingen)
K (CAL)	pflanzenverfügbares Kalium (Calcium-Acetat-Laktat-Auszug)
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.
LfL	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
MDD	Minimal detectable difference -> kleinster ermittelbarer Unterschied
Mg (CaCl ₂)	pflanzenverfügbares Magnesium (Calciumchlorid - Auszug)
MN	Median
MW	Arithmetischer Mittelwert
N _{min}	mineralischer Stickstoff (= Nitrat-N und Ammonium-N)
NT	No Tillage (Direktsaat)
OS/OBS	Organische Substanz / organische Bodensubstanz
P (CAL)	pflanzenverfügbarer Phosphor (Calcium-Acetat-Laktat-Auszug)
POM	Partikuläre organische Substanz
RT	Reduced Tillage (Konservierende, nicht-wendende Bodenbearbeitung, i.d.R. bis ca. 10 – 20 cm Tiefe)
SA	Standardabweichung
SOC	Soil organic carbon (Bodenkohlenstoff)
SR	Stratification ratio (Stratifizierungsverhältnis)
TM	Trockenmasse
TPF	Triphenylformazan
TRD	Trockenrohddichte
WG	Wintergerste
WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG)
WW	Winterweizen
ZR	Zuckerrübe
ZWB	Zentralwertebereich (in der Beschreibung der Box - Whisker - Plots der Wertebereich der zentralen Box, also die mittleren beiden Quartile bzw. 50 % aller Werte)

1 Einleitung

Das (mittel)sächsische Lösshügelland stellt historisch und rezent die wichtigste und produktivste Agrarregion Sachsens dar. Dies verdankt sie insbesondere ihren Lössböden, welche ackerbaulich sehr günstige bodenphysikalische und -chemische Eigenschaften aufweisen. Die Region wird heutzutage durch den Anbau von Wintergetreide, Zuckerrüben, Mais und Raps auf vergleichsweise großen Schlägen dominiert. Zugleich sind die Böden aufgrund der schluffreichen Bodenarten und des hügeligen Reliefs sehr anfällig für Wassererosion.

Die bereits historisch sehr intensive agrarische Nutzung erfuhr im 20. Jahrhundert im Rahmen der zunehmenden Mechanisierung der Landwirtschaft nebst Bewirtschaftung von zunehmend größeren Schlägen aufgrund der Agrarstruktur der DDR eine weitere Intensivierung, wodurch die Problematik der Wassererosion verschärft wurde. Dabei kam und kommt es sowohl zur Verminderung der Ertragsfähigkeit von Ackerflächen (On-site-Schäden) als auch zum unerwünschten Eintrag von Nährstoffen in Gewässerkörper sowie von Sediment auf Siedlungs- und Verkehrsflächen (Off-Site-Schäden).

Als eine zentrale Maßnahme der Erosionsminderung und des vorsorgenden Bodenschutzes wurde ab den 1990er Jahren durch die Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) sowie in der Folge durch das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) die Anwendung von dauerhaft konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren untersucht und gefördert. Die Förderung geschah im Rahmen der Programme „Umweltgerechte Landwirtschaft“ (UL-Programm, Laufzeit 1992-2006) sowie „Agrarumweltmaßnahmen und Waldmehrung (AuW-Programm, Laufzeit 2007-2013). Die positiven Effekte konservierender Bodenbearbeitungsverfahren im Hinblick auf eine Reduzierung der Wassererosionsanfälligkeit, insbesondere aufgrund höherer Bodenbedeckungsgrade sowie Aggregatstabilität, wurden durch zahlreiche Untersuchungen bestätigt, u. a. auf der 1992 angelegten Dauerversuchsfläche in Methau (E1-Versuch). Zudem wurden die Auswirkungen konservierender Bodenbearbeitungsverfahren auf verschiedene bodenphysikalische, -chemische und -biologische Parameter z. B. im Rahmen des „Elbeprojekt“ der LfL (SCHMIDT ET AL. 2002) untersucht.

Neben der wissenschaftlich belegten Verminderung der Wassererosion durch den Einsatz konservierender Bodenbearbeitungsverfahren sind in den letzten Jahren und Jahrzehnten insbesondere deren Auswirkungen auf den Humushaushalt des Bodens in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen getreten. Während höhere Humusgehalte einerseits aufgrund einer damit verbundenen höheren Aggregatstabilität ebenfalls der Wassererosion vorbeugen, können sie andererseits zugleich durch eine verbesserte Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität zu einer Erhöhung der Ertragsfähigkeit von Böden beitragen. Zudem könnten landwirtschaftliche Böden, bei einer substantiellen Erhöhung der C-Vorräte durch entsprechende Bewirtschaftungsmaßnahmen, einen Beitrag zur klimawirksamen Sequestrierung von Treibhausgasen leisten (LAL et al. 2012).

Zu den Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die C-Vorräte und -Dynamik im Boden existieren weltweit bereits zahlreiche Untersuchungen mit sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Dies liegt zum einen an den sehr unterschiedlichen Ausgangsbedingungen an den Untersuchungsstandorten (Klima, Bodeneigenschaften, Bewirtschaftungssysteme), zum anderen an sehr unterschiedlichen methodischen Herangehensweisen. In vielen Untersuchungen wird dabei eine Erhöhung der C-Vorräte bei geringeren Bodenbearbeitungsintensitäten ermittelt, wobei insbesondere die Zunahme der C-Gehalte in der Oberkrume sehr charakteristisch ist. Entscheidend für die Bilanzierung ist letztlich, ob diese Zugewinne in der Oberkrume durch eine entsprechende Abnahme in der Unterkrume ausgeglichen werden. Zudem besteht die Vermutung, dass bei geringen Bodenbearbeitungsintensitäten eine ausreichende Verfügbarkeit von Nährstoffen in allen Bereichen der Krume aufgrund der ausbleibenden Homogenisierung derselben nicht gegeben ist, sodass es zu Ertragseinbußen kommen kann.

Für die Region Mittelsachsen wurden bereits im Rahmen des Elbeprojektes (SCHMIDT ET AL. 2002) sowie durch die Arbeiten von THIEL (2002, 2010) und KELLER (2006) wertvolle Erkenntnisse zur Entwicklung der C-Gehalte bzw. -Vorräte gewonnen. Hinzu kommen Ergebnisse aus der Auswertung von Dauerfeldversuchen der Südzucker AG durch das Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ), insbesondere am Standort Lüttewitz (KOCH 2010, JACOBS et al. 2015). Im Rahmen der genannten Untersuchungen wurden allerdings jeweils nur zu einem Zeitpunkt bzw. für eine sehr begrenzte Anzahl an Feldwiederholungen entsprechende Ergebnisse ermittelt, welche größtenteils auf eine Erhöhung der C-Vorräte bei geringer Bodenbearbeitungsintensität hindeuten. Aufgrund der in diesen Untersuchungen aufgetretenen und auch aus anderen Arbeiten bekannten starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen der C-Gehalte bzw. -Vorräte landwirtschaftlicher Böden bestand daher die Notwendigkeit einer breiter und länger angelegten Untersuchung zur Entwicklung und Dynamik der C-Vorräte an repräsentativen Standorten in Mittelsachsen.

Im Rahmen des Projektes „C-Status und -Dynamik sowie Grundnährstoffversorgung nach 20-jährigem Pflugverzicht“ (Laufzeit: 10/2014-11/2016) wurden die mittelsächsischen Standorte Methau und Lüttewitz über mehrere Vegetationsperioden (2012-2015) intensiv hinsichtlich der Kohlenstoff- und Nährstoffdynamik (C, N, P, K, pH) untersucht. Hinzu kam die Erfassung mehrerer bodenchemischer und -biologischer Parameter (heißwasserlöslicher Kohlenstoff, mikrobieller Kohlenstoff, Bodenenzyme), die Erkenntnisse über kurz- und mittelfristige Veränderungen der Umsatzdynamik liefern. Zudem wurde die praxisrelevante Fragestellung untersucht, wie sich ein erneuter ein- bis zweimaliger Pflugeinsatz auf einer langjährig konservierend bzw. in Direktsaat bestellten Fläche auf diese C-Dynamik auswirkt.

In der vorliegenden Publikation werden die Ergebnisse der Untersuchung vorgestellt. Dabei erfolgt zunächst eine umfangreiche Dokumentation des Forschungsstandes zur C-Dynamik im Boden sowie den Auswirkungen von Bodenbearbeitungsverfahren auf diese. Zudem werden die in diesem Zusammenhang, insbesondere in den USA, häufig verwendeten Konzepte der Bodenqualität und des Stratifizierungsverhältnisses kurz vorgestellt. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse erfolgt eine ausführliche Darstellung der Untersuchungsstandorte sowie -methoden.

Aus Gründen der Dokumentation und Nachvollziehbarkeit werden die erzielten Ergebnisse sehr umfangreich vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf dem zentralen Parameter Kohlenstoff liegt.

Abschließend erfolgt eine Diskussion der erzielten Ergebnisse nebst Einordnung vor dem Hintergrund der genannten Voruntersuchungen sowie den Ergebnissen anderer Studien. Es werden Gemeinsamkeiten und Unterschiede beider Standorte benannt und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt. Zudem werden die bei der Untersuchung aufgetretenen Probleme und Unsicherheiten diskutiert.

Am Ende dieser Publikation findet sich eine umfangreiche Literaturliste zum Thema.

2 Stand des Wissens

2.1 Nährstoffe und Kohlenstoff im Boden

2.1.1 Pflanzennährstoffe im Boden

Nährstoffe stellen im Boden, neben Wasser, die wichtigste Ressource für das Pflanzenwachstum und damit die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion dar. Die Fähigkeit eines Bodens, Früchte bzw. Erträge zu erzeugen

gen, wird als Bodenfruchtbarkeit, Ertragsfähigkeit oder Produktivität bezeichnet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 273).

Als Nährelemente werden jene 14 Elemente bezeichnet, ohne die ein Pflanzenwachstum nicht möglich ist. Diese werden, nach den jeweils benötigten Mengen, in Makro- und Mikroelemente unterteilt. Zu den Makroelementen zählen Stickstoff, Kalium, Calcium, Magnesium, Phosphor und Schwefel. Zu den Mikroelementen gehören Chlor, Eisen, Mangan, Zinn, Bor, Kupfer, Molybdän und Nickel. Hinzu kommen viele weitere Elemente wie Silizium, Natrium und Kobalt, die als nützliche Elemente bezeichnet werden und Wachstum sowie Resistenz der Pflanzen fördern und u. U. unspezifische Funktionen der essenziellen Elemente übernehmen können. Die Elemente werden von den Pflanzen über die Wurzeln, meist als Ionen, aufgenommen. Die aufnehmbaren Formen der Nährelemente werden als Nährstoffe bezeichnet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 273). Die Aufnahme durch die Pflanzen ist dabei insbesondere durch die im Boden vorhandene Menge des jeweiligen Nährstoffes begrenzt, allerdings auch durch weitere (bodenchemische) Faktoren wie den pH-Wert oder Ionenkonkurrenz.

Ein Teil der Nährstoffe ist am Boden an die organische Substanz (OS) gebunden. Diese werden, wenn sie nicht als austauschbare Ionen in der OS vorliegen, erst nach dem Abbau, d. h. der Mineralisierung der organischen Substanz zu einfachen anorganischen Stoffen pflanzenverfügbar.

Im Rahmen von landwirtschaftlicher Pflanzenproduktion werden, um ausreichende Gehalte an leicht verfügbaren Nährstoffen und damit möglichst hohe Erträge zu gewährleisten, Nährstoffbilanzen aufgestellt. Nährstoffentzüge finden insbesondere über den Pflanzenentzug, die Auswaschung, die Bodenerosion, das Entweichen als Gas (insbesondere Stickstoffverbindungen) sowie die Immobilisierung statt. Bei den Nährstoffvorräten im Boden handelt es sich zunächst grundsätzlich zum überwiegenden Teil um native Nährstoffe, welche aus den Ausgangsgesteinen der Bodenbildung stammen. Die weitere Nährstoffzufuhr (in der Landwirtschaft) erfolgt hauptsächlich über die mineralische und organische Düngung sowie in geringerem Ausmaß über den Niederschlag, die Atmosphäre und das Grundwasser (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 274).

Da die Aufnahme der Nährstoffe über die Wurzeln erfolgt, sind die Durchwurzelungsintensität und -tiefe des Bodens sowie die (kurzfristige) Nährstoffverfügbarkeit im Wurzelraum die entscheidenden Steuergrößen für die Nährstoffversorgung der Pflanzen. Die Durchwurzelungsintensität und -tiefe hängt dabei insbesondere von der Pflanzenart und von bodenphysikalischen Parametern (z. B. Lagerungsdichte) ab und kann bei Getreide 100 – 150 cm und bei der Zuckerrübe mehrere Meter betragen. Die Hauptmenge der Wurzelmasse (>90 %) befindet sich dabei im Ackerbau in den obersten 40 cm, bei flachwurzelnden Kulturarten wie Mais sogar in einem noch flacheren Bereich des Oberbodens.

Die Nährstoffverfügbarkeit im Wurzelraum hängt von der Konzentration bzw. Aktivität eines Nährelementes in der (wurzelnahen) Bodenlösung, dem Vorrat des jeweiligen Nährelementes, der Rate der Nachlieferung sowie dem Aufschließungsvermögen der Pflanze ab (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 277). Letzteres wird durch die Wurzeldichte, die Art und Menge der Wurzelausscheidungen sowie die mikrobielle Aktivität in der Rhizosphäre bestimmt.

Die Bestimmung der Nährstoffversorgung des Bodens erfolgt häufig über chemische Bodenuntersuchungen. Dabei werden Bodenmischproben im Hauptwurzelraum genommen und mit Hilfe von Extraktionsmitteln (Wasser, Salzlösungen, Säuren oder Komplexbildner) die Mengen an pflanzenverfügbaren Nährelementen im Feinboden (< 2 mm) bestimmt. Die ermittelten Gehalte (g kg^{-1} o.ä.) können, nach Ermittlung der Lagerungsdichte des Bodens, auf Volumeneinheiten Boden oder Bodenmassen sowie Flächen bezogen werden.

Aus der Beziehung zwischen den Nährstoffgehalten der Böden und den erzielten Erträgen kann eine Einordnung dieser Gehalte in Gehaltsklassen mit je einem unteren und oberen Grenzwert sowie Düngungsempfehlungen abgeleitet werden. Der Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) unterscheidet dabei, je nach Nährstoff und nach Landnutzungsart, Bodenart und Gehalt an

organischer Substanz bis zu sechs Gehaltsklassen (A - F). In Sachsen wird eine Einteilung in fünf Gehaltsklassen (A - E) vorgenommen (SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2007). Dabei wird die Gehaltsklasse C als Bereich optimaler Nährstoffgehalte definiert, bei der eine Erhaltungsdüngung empfohlen wird, welche den ermittelten Nährstoffentzug ausgleicht. In den Gehaltsklassen A und B wird eine um 66 % bzw. 33 % über der Erhaltungsdüngung, in der Gehaltsklasse D eine um 50 % darunter liegende Düngung empfohlen. In der Gehaltsklasse E wird keine Düngung empfohlen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 283 f.).

Die genaue Erfassung von Nährstoffgehalten kurze Zeit nach einer Düngung ist häufig schwierig, da je nach Witterung und Bodenbearbeitung die ausgebrachten Nährstoffe mehr oder weniger stark im Bodenprofil verlagert werden. Zudem kommt es, insbesondere im Hinblick auf eine schichtbasierte Angabe von Gehalten, zu Verzerrungen aufgrund von Heterogenitäten der Nährstoffverteilung.

2.1.2 Kohlenstoff im Boden

Der Boden stellt, nach der Lithosphäre, das zweitgrößte terrestrische Kohlenstoffreservoir dar, noch deutlich vor der Biosphäre (RICE 2005: 165). Nach LAL et al. (2012: 1) sind weltweit ca. 2300 Gt Kohlenstoff in den obersten 3 m der Erdoberfläche bzw. des Bodens als organischer Bodenkohlenstoff (SOC) gespeichert, hinzu kommen ca. 1700 Gt im Permafrost, 600 Gt im Torf sowie 1700 Gt als anorganischer Bodenkohlenstoff ($C_{i,org}$). Diese Autoren geben weiterhin an, dass durch Abholzung und Landnutzungsänderungen im Rahmen landwirtschaftlicher Aktivitäten in den letzten 12 000 bis 14 000 Jahren insgesamt 476 Gt C freigesetzt wurden, wovon ca. 70 - 90 Gt auf die Böden entfallen. Für die mittleren Breiten werden SOC-Verluste durch Rodung von Wäldern und Umwandlung in Ackerland von 32 % (+20 %) in den obersten 29 cm (+14 cm) angegeben (POEPLAU et al. 2011), wobei ein neues Gleichgewicht, auf einem niedrigen Niveau, etwa 23 Jahre nach der Umwandlung erreicht werde.

2.1.2.1 Die organische Bodensubstanz (OBS)

Der organische Kohlenstoff ist Hauptbestandteil der organischen Bodensubstanz (OBS). Diese umfasst „alle in und auf dem Mineralboden befindlichen abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe und deren organische Umwandlungsprodukte“ (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 51) und wird häufig auch als Humus bezeichnet. Einige Autoren differenzieren zwischen den Begriffen, diese Diskussion wird hier allerdings nicht aufgegriffen und die Begriffe werden in der vorliegenden Arbeit synonym verwendet.

Die Umwandlung von Streustoffen, zu denen oberirdisch abgestorbenen Pflanzenteile sowie tote Wurzeln und Bodenorganismen zählen, zu Huminstoffen wird als Humifizierung bezeichnet.

Die organische Substanz enthält neben Kohlenstoff noch viele weitere Elemente, insbesondere auch Pflanzennährstoffe, was ihre Bedeutung für die Nährstoffversorgung von Böden erklärt. Der Kohlenstoffgehalt der organischen Substanz schwankt je nach Zusammensetzung zwischen ca. 40 und 70 %. Auf der Basis langjähriger Untersuchungen wird in Deutschland häufig mit einem mittleren C-Gehalt der OS von 58 % gearbeitet (KOLBE & ZIMMER 2015: 17), was dem Mittelwert von isolierten Huminsäuren entspricht (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 75) und woraus sich eine Umrechnung der C_{org} -Gehalte in Humusgehalte nach der folgenden Formel ergibt:

$$C_{org}\text{-Gehalt} \times 1,724 = \text{Humusgehalt}$$

Zur Vermeidung der Unsicherheit, die sich aus den Schwankungen der C-Gehalte der OS ergibt, wird in der wissenschaftlichen Literatur häufig nur der C_{org} -Gehalt angegeben. Im Zweifel ist aber, bei Angabe des Um-

rechnungsfaktors, eine Umrechnung jederzeit problemlos möglich. Wenn der Boden auch anorganischen Kohlenstoff (C_{inorg}) enthält, muss die Menge an C_{org} nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$C_{\text{org}} = C_{\text{t}} (\text{Gesamtkohlenstoff}) - C_{\text{inorg}}$$

Dies ist besonders bei pH-Werten ab 7 bzw. dem Einsatz von karbonathaltigen Düngern erforderlich.

Die durchschnittlichen relativen Nährstoffgehalte von Humus auf Ackerland im Vergleich zum Kohlenstoffgehalt ($C = 100\%$) betragen laut KOLBE & ZIMMER (2015: 56):

Stickstoff = 10 %

Phosphor = 1,4 %

Kalium = 0 %

Schwefel = 1,1 %

2.1.2.2 Bedeutung und Menge der organischen Substanz

Grundsätzlich basiert die große Bedeutung der OS im Boden auf verschiedenen physikalischen, chemischen und biologischen Aspekten bzw. Funktionen. Dazu zählen die Aggregation von Bodenpartikeln bzw. Aggregatstabilität, eine lockere Lagerung des Bodens, die Ausbildung eines Porensystems, die Wasserspeicherkapazität, die Kationenaustauschkapazität, die Bindung von Nähr- und Schadstoffen sowie die Bedeutung als Nahrungsquelle für Bodenorganismen (RICE 2005: 166 f.).

Dies hat zur Folge, dass der Erhalt von standorttypischen Gehalten an organischer Substanz bzw. Bodenkohlenstoff als zentral für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit sowie der landwirtschaftlichen Produktivität eines Standortes angesehen wird. Die C_{org} -Gehalte der Oberböden bzw. der Krume (ca. 0-30 cm) auf Ackerstandorten in Deutschland liegen normalerweise zwischen 0 und 2 - 2,5 % (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 62, KOLBE & ZIMMER 2015: 11). Dabei enthalten deutsche Ackerböden im Mittel 100 - 200 t Humus ha^{-1} (bzw. 58 - 116 t $C_{\text{org}} \text{ha}^{-1}$), wobei Schwarzerden und Kolluvisole aufgrund der höheren Humusgehalte im Unterboden auch noch wesentlich höhere Mengen enthalten können.

HEINEMEYER & GENSIOR (in HÜTTL et al. 2008: 186) geben für eine Gesamtfläche von ca. 125 000 km^2 mineralischer, ackerbaulich genutzter Böden in Deutschland einen C_{org} -Vorrat in der Krume (0-30 cm) von 989 Mt an, was einer Masse von 79 t C ha^{-1} entspricht.

Die Humusgehalte von Ackerböden sind dabei je nach Standort sehr variabel und das Ergebnis folgender Faktoren (nach KOLBE & ZIMMER 2015: 12):

- Geologisches Ausgangsmaterial der Bodenbildung
- Textur des Bodens
- Klima
- Grund- und Stauwasserstand
- Landnutzungsart
- Anbauverhältnis der Kulturarten (Fruchtfolge)
- Art und Intensität der Bewirtschaftung (Düngung, Bodenbearbeitung)

Es bestehen allerdings nach wie vor große Unsicherheiten in Bezug auf die Humusversorgung von landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland sowie die standorttypischen Humusgehalte. So formulieren HÜTTL et al. (2008) als zentrales Ergebnis ihrer Untersuchung sowie eines fachspezifisches Expertenworkshops einen „*dringenden Bedarf zu einer flächenhaften Erfassung der Humusgehalte (C_{org}) sowie weiterer Parameter, die den Humushaushalt (C_{org}/N_b , C_{org} -Vorräte) adäquat charakterisieren*“ (Zusammenfassung, ohne Seitenangabe). Dieser Bedarf ergibt sich sowohl aus Zielen der Treibhausreduktion als auch aus den Forderungen des Bundes-Bodenschutzgesetzes zum Erhalt standorttypischer Humusgehalte sowie im Vorgriff auf eine europäische Bodenrahmenrichtlinie.

Die größten Unsicherheiten bestehen in Bezug auf die C-Vorräte im Unterboden sowie die in diesem ablaufenden Prozesse und Bindungsmechanismen organischer Substanzen (HÜTTL et al. 2008: 72). Dies gilt, trotz relativ geringer C-Gehalte im Unterboden, aufgrund der Lagerungsdichten sowie der Mächtigkeit des Unterbodens auch für die C-Sequestrierungspotenziale sowie die relevanten Quellen organischer Substanzen.

2.1.2.3 Die Bestimmung von C-Gehalten

Die möglichst exakte Bestimmung der C-Gehalte von Ackerschlägen unterliegt insbesondere aufgrund von räumlicher und zeitlicher Variabilität dieser Gehalte erheblichen Schwierigkeiten (HÜTTL et al. 2008). Die räumliche Variabilität ist dabei insbesondere vom Ausgangsmaterial der Bodenbildung, dem Relief sowie den Bodenverhältnissen abhängig. So wurden auf einem heterogenen Schlag von 7 ha unter Praxisbedingungen Unterschiede von bis zu 0,7 %-Punkte C_{org} festgestellt (nach KÖRSCHENS 2010: 381). Der räumlichen Variabilität der C-Gehalte kann, bei relativ homogenen Bodenverhältnissen auf dem Untersuchungsschlag, durch eine hohe Zahl an Wiederholungen begegnet werden, sodass geringe Konfidenzintervalle erreicht werden, wobei dies mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Heterogene Flächen bzw. Schläge sollten hingegen möglichst in sinnvolle homogene Einheiten unterteilt werden, um flächenbezogene C-Gehalte verlässlich angeben zu können.

Zudem existiert eine hohe zeitliche Variabilität der C_{org} -Gehalte, die bis zu 0,2 %-Punkte C_{org} während der Vegetationszeit betragen kann (KÖRSCHENS 2010: 381). Auch im Verlauf der Jahre sind die Schwankungen erheblich und betragen auf verschiedenen Ackerstandorten in Deutschland ca. 0,15 %-Punkte C_{org} (ebd.).

Vor diesem Hintergrund sind Aussagen zur mittel- bis langfristigen Entwicklung von C_{org} -Gehalten von Ackerstandorten selbst bei relativ homogenen Bodenverhältnissen erst nach ca. 10 - 20 Jahren möglich und erfordern sowohl eine regelmäßige Bestimmung der C_{org} -Gehalte als auch eine starke Normierung bei der Vorgehensweise. Diese Voraussetzungen sind am ehesten bei der Auswertung von Dauerfeldversuchen gegeben, wie sie in der landwirtschaftlichen Forschung üblich sind (RICHTER et al. 2007). Zudem wird empfohlen, die Beprobungen zur Ermittlung der C-Gehalte stets im Frühjahr vor Beginn der Vegetationsperiode vor Ausbringung von organischen und mineralischen Düngemitteln sowie in möglichst geringen zeitlichen Abständen durchzuführen (HÜTTL et al. 2008).

Weiterhin zu beachten ist der Fehler im Rahmen der analytischen Bestimmung von C_{org} , welchen KÖRSCHENS (2010: 383) auf 10 - 20 % des Gesamtfehlers schätzt. Dies liegt zum einen am teilweisen Einbezug des Edaphons in die Analytik, weil es sich vor der Analyse kaum abtrennen lässt. Dieser Fehler beträgt aber selten mehr als 10 % (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 75). Hinzu kommt die Streuung der Messdaten selbst. Im Rahmen eines Ringversuches wurden Spannweiten der Messvariabilität von 0,1 - 0,31 % C_{org} ermittelt, die positiv mit den Gesamtgehalten korrelierten (KÖRSCHENS 2010: 383). Daher sollten aus Plausibilitätsgründen auch immer der N-Gehalt bestimmt und das C/N-Verhältnis berechnet werden.

2.1.2.4 C-Pools im Boden

Im Hinblick auf das Verständnis und die Modellierung des C-Umsatzes und -Kreislaufs im Boden wurden verschiedene Modelle vorgeschlagen, die verschiedenen Arten organischer Substanzen im Boden zu unterteilen bzw. zu klassifizieren. Für diese Klassen werden häufig die Begriffe Fraktionen oder Pools genutzt.

In der deutschen Bodenkunde wurde die organische Bodensubstanz, häufig auch als Huminstoffe bezeichnet, traditionell in drei chemische Fraktionen unterteilt, die Humine, Huminsäuren und Fulvosäuren. Dabei werden die Gruppen nach Farbe, C- und N-Gehalt, Molekulargewicht, den funktionellen Gruppen sowie der Löslichkeit in verschiedenen Extraktionsmitteln unterschieden.

Eine häufige (physikalische) Unterteilung wird nach der Dichte bzw. Korngröße in eine leichte, intermediäre und schwere Fraktion vorgenommen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 76). Die leichte Fraktion beinhaltet dabei zumeist v. a. die partikuläre organische Substanz (POM), die schwere Fraktion die organo-mineralischen Verbindungen.

Eine weitere Einteilung orientiert sich an der Umsetzbarkeit sowie Verweilzeit im Boden und unterscheidet eine labile, eine intermediäre und eine passive Fraktion (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 65). Die labile Fraktion hat eine Verweilzeit von wenigen Monaten bis zu einigen Jahren und macht ca. 1 – 5 % der OBS aus. Sie hat eine große Bedeutung für die kurzfristige Nährstoffversorgung der Böden. Die intermediäre Fraktion hat eine mittlere Verweildauer von 10 - 50 Jahren und ist für die mittel- bis langfristige Fruchtbarkeit der Böden verantwortlich. Sie spielt eine große Rolle bei der Aggregation im Boden und ist durch diese vor dem Abbau geschützt. Ihre Dynamik wird bei Ackerböden daher häufig mit Bewirtschaftungs- und Bodenbearbeitungsmaßnahmen in Verbindung gebracht. Die passive Fraktion hat mittlere Verweilzeiten von Hunderten bis Tausenden Jahren und wird teilweise als inerte Fraktion bezeichnet, welche nicht oder kaum abbaubar ist (ebd.).

PRECHTEL et al. (2009) schlagen eine Einteilung der OBS in funktionale Fraktionen bzw. Pools vor, welche eine spezifische Indikatorwirkung für den Kohlenstoffkreislauf im Boden haben und analytisch gut zu differenzieren sind:

- Mikrobielle Biomasse (C_{mik}) → aktiver Pool, große Bedeutung für den Nährstoffkreislauf; $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis als Indikator für Änderungen in der C-Dynamik.
- Nicht mineralisch gebundene Fraktion (leichte bzw. partikuläre Fraktion) → aktiver Pool, große Bedeutung für den Nährstoffkreislauf.
- Mineralisch gebundene Fraktion → passiver Pool, Bedeutung als Ionenpuffer und für die Bodenstruktur.
- Differenzierung der OBS nach Nah-Infrarot (NIR)- und Mittel-Infrarot (MIR)-Spektroskopie → Aussagen über physiko-chemische Eigenschaften bzw. Qualität der OBS, Bedeutung für alle Bodenfunktionen.

Im Hinblick auf die Fragestellungen der vorliegenden Untersuchung, welche sich mit Änderungen der C-Dynamik innerhalb einiger Monate bzw. Jahre befasst, sind die funktionalen Fraktionen der mikrobiellen Biomasse und der leichten bzw. partikulären Fraktion von besonderer Bedeutung. Neben der mikrobiellen Biomasse wurde daher die analytische Fraktion des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs (C_{hwl}) als leicht umsetzbare Fraktion gewählt, welche als sehr aussagekräftig in Bezug auf bewirtschaftungsbedingte Veränderungen der Humusdynamik gilt (HÜTTL et al. 2008). Dieses Vorgehen wurde von SCHULZ (2004) für drei unterschiedliche Standorte bzw. Bodentypen in Deutschland etabliert und in weiteren Studien (z. B. WEIGEL et al. 2011) bestätigt. Auch von anderen Autoren (LEINWEBER et al. 1995, SPARLING et al. 1998) wurde dieser Parameter bereits erfolgreich zur Beantwortung von Fragen zur C-Dynamik im Boden eingesetzt. SHI & MARSCHNER (2014) stellen zudem eine Beziehung zwischen den Fraktionen C_{mik} und C_{hwl} her. Neben den ermittelten Gehalten bzw. Massen der jeweiligen Fraktion ist häufig auch deren prozentualer Anteil am Gesamtkohlenstoff aufschlussreich im Hinblick auf Variantenvergleiche oder die Interpretation von Umsatzprozessen im Boden.

2.2 Landwirtschaftliche Bodenbearbeitungsverfahren und ihr Einfluss auf die Kohlenstoffdynamik des Bodens

2.2.1 Bodenbearbeitung in der Landwirtschaft

Die mechanische Bearbeitung des Bodens zur positiven Beeinflussung der physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse im Boden im Hinblick auf den Anbau von Nutzpflanzen gehört weltweit zum Kern der landwirtschaftlichen Praxis und ist im Grunde so alt wie die Landwirtschaft selbst.

Die Bodenbearbeitung dient dabei als Voraussetzung für die folgenden Ziele (DIEPENBROCK et al. 2012: 58):

- Gleichmäßige Aussaat in der erforderlichen Tiefe
- Rasches Keimen
- Möglichst vollständiger Aufgang der Saat
- Intensive Durchwurzelung

Neben der Herstellung des optimalen Bodengefüges zur Sicherstellung der genannten Ziele dient die Bodenbearbeitung zudem der mechanischen Unkrautbekämpfung, welche insbesondere in der konventionellen Landwirtschaft als wichtigste Alternative zur chemischen Unkrautbekämpfung mittels Herbiziden anzusehen ist.

Dabei werden folgende bodenmechanische Arbeitswirkungen unterschieden (DIEPENBROCK et al. 2012: 58):

- Wenden: Einbringen von Pflanzenresten und organischem Dünger, vorübergehende Beseitigung von Unkräutern und unerwünschten Nutzpflanzen; Herstellung einer störungsfreien („sauberen“) Bodenoberfläche
- Lockern: Beseitigung von Verdichtungen aus natürlicher Sackung sowie dem Befahren mit Maschinen und Transportfahrzeugen, Herstellung eines optimalen Gefügezustandes
- Mischen: Einarbeitung von organischem und mineralischem Dünger, Homogenisierung von Nährstoffkonzentrationen in der Krume
- Krümeln: Optimierung des Wasser-, Wärme- und Lufthaushaltes
- Einebnen: Begradigung der Bodenoberfläche zur gleichmäßigen Ablage des Saatgutes

Das wichtigste bzw. am weitesten verbreitete Bodenbearbeitungsgerät der Landwirtschaft ist der Pflug, welcher das traditionelle Bodenbearbeitungsgerät darstellt. Die Bodenbearbeitung mit dem Pflug wird daher in vielen wissenschaftlichen Untersuchungen als „Konventionelle Bodenbearbeitung“ (engl. Conventional Tillage, Abk. CT) bezeichnet.

Bei der konventionellen Bodenbearbeitung mit dem Scharpflug werden balkenförmige Bodenstreifen aus dem Bodenverband herausgeschnitten und gewendet, gelockert und gekrümelt wieder abgelegt. Die Schnittbreite der Pflugschare beträgt dabei 30 - 50 cm, die Bearbeitungstiefe kann frei gewählt werden, beträgt aber üblicherweise 20 – 30 cm. Das Resultat des Pflügens wird häufig als „Reiner Tisch“ bezeichnet (DIEPENBROCK et al. 2012: 69), da i. d. R. eine vollständige Einarbeitung von auf oder nahe der Bodenoberfläche gelegenen Stoffen (Erntereste, Düngemittel) erfolgt. Diese (Teil)Brache ist aufgrund der fehlenden Bodenbedeckung und des Heraufpflügens von wenig stabilem Boden sehr anfällig für Bodenverschlammung und Bodenerosion.

Aus Gründen des Bodenschutzes und der Einsparung von steigenden Energie- und Arbeitskosten wurden in vergangenen Jahrzehnten verschiedene pfluglose Bodenbearbeitungssysteme entwickelt, welche allgemein als „Konservierende Bodenbearbeitung“ (engl. Conservation Tillage oder Reduced Tillage, Abk. RT) oder Nichtwendende Bodenbearbeitung (KTBL 2015) bezeichnet werden. Am konsequentesten wird dieser Gedan-

ke bei der Direktsaat (engl. No Tillage, Abk. NT) umgesetzt, welche vollständig auf mechanische Bodenbearbeitungsverfahren verzichtet.

In der konservierenden Bodenbearbeitung (RT) kommen i.d.R. Geräte mit lockernder - mischer Wirkung zum Einsatz. Dazu gehören z. B. Scheibenegge und Grubber. Die Scheibenegge sorgt durch mehrere hintereinandergeschaltete Reihen von abrollenden Werkzeugen für eine intensive Durchmischung und das Einmulchen von Wurzel- und Ernterückständen sowie Düngemitteln. Daher kommt auch die häufig genutzte Bezeichnung Mulchsaat. Der Grubber arbeitet mit in den Boden eingreifenden Zinken in mehreren Reihen, welche ebenfalls mischend wirken und deren Eingriffs- bzw. Arbeitstiefe variiert werden kann. Dabei kann eine größere Arbeitstiefe als mit der Scheibenegge erzielt werden (DIEPENBROCK et al. 2012: 70 f.), weswegen der Grubber hauptsächlich bei der Stoppelbearbeitung sowie zur Stoppel- und Grundbodenbearbeitung zum Einsatz kommt.

Zudem kommen bei allen Bodenbearbeitungsverfahren z.T. Unterbodenlockerungsverfahren bzw. -geräte zum Einsatz, welche insbesondere durch die Bearbeitung entstandene Krümmenbasisverdichtungen beseitigen sollen (DIEPENBROCK et al. 2012: 74). Dabei kommen Geräte mit Zinken zum Einsatz, die Schwergrubbern ähnlich sind. Damit kann bis in Tiefen von 80 cm gelockert werden, wobei große Zugkräfte und trockene Bodenbedingungen vonnöten sind.

Beim System der Direktsaat wird keine Bodenbearbeitung durchgeführt. Es sind spezielle Direktsämaschinen im Einsatz, welche flache Saatschlitz öffnen, in denen das Saatgut abgelegt wird. Erntereste verbleiben komplett auf der Bodenoberfläche.

In der wissenschaftlichen Literatur ist die Terminologie zu den Bodenbearbeitungsverfahren nicht einheitlich. Dies liegt zum einen an der Vielzahl der gängigen und möglichen Bodenbearbeitungsgeräte nebst unterschiedlichen Eingriffstiefen und -intensitäten. Zum anderen handelt es sich um nicht einheitliche Begriffe für ähnliche Verfahren.

Trotz der normativen Konnotationen der Begriffe „konventionell“ und „konservierend“ werden sie aufgrund ihrer starken Verbreitung in der Literatur aus Gründen der Vergleichbarkeit auch im Rahmen dieser Untersuchung verwendet. Im Hinblick auf die beiden Untersuchungsstandorte und die dort praktizierten (Grund)Bodenbearbeitungsverfahren wird dabei i.d.R. von Varianten bzw. (Boden)Bearbeitungsvarianten gesprochen. Die genaue Bezeichnung derselben wird aus der jeweiligen Terminologie des Versuches übernommen (vgl. THIEL 2002, KELLER 2006, LFULG 2012).

Während die (intensive) Bodenbearbeitung den Nutzpflanzenbau positiv beeinflussen kann, sind mit ihr aufgrund des starken Eingriffs in das System Boden zahlreiche unerwünschte Nebeneffekte verbunden. Dazu zählen Bodenerosion, Bodenverdichtung, Beeinträchtigung des Bodenlebens sowie Nährstoffmobilisierung zu unerwünschten Zeitpunkten nebst Nährstoffaustrag (DIEPENBROCK et al. 2012: 78).

Rechtlich findet dieses Prinzip im Konzept der guten fachlichen Praxis (gFP), welches durch das BundesBodenSchutzGesetz (BBodSchG) von 1999 in § 17 konkretisiert wird, seinen Ausdruck. Dort ist festgelegt, dass

- „1. die Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung der Witterung grundsätzlich standortangepasst zu erfolgen hat,*
- 2. die Bodenstruktur erhalten oder verbessert wird,*
- 3. Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendrucks, so weit wie möglich vermieden werden,*
- 4. Bodenabträge durch eine standortangepasste Nutzung, insbesondere durch Berücksichtigung der Hangneigung, der Wasser- und Windverhältnisse sowie der Bodenbedeckung, möglichst vermieden werden,*
- 5. die naturbetonten Strukturelemente der Feldflur, insbesondere Hecken, Feldgehölze, Feldraine und*

Ackerterrassen, die zum Schutz des Bodens notwendig sind, erhalten werden,

6. die biologische Aktivität des Bodens durch entsprechende Fruchtfolgegestaltung erhalten oder gefördert wird und

7. der standorttypische Humusgehalt des Bodens, insbesondere durch eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz oder durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität erhalten wird.“

Im Rahmen des BBodSchG sowie in der Literatur zu den Auswirkungen der verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren werden folgende positive Effekte der konservierenden Bodenbearbeitung bzw. der Direktsaat im Gegensatz zum Pflugeinsatz genannt und diskutiert:

- Erhalt der Bodenstruktur (Aggregate, Porensystem) → verbesserte Infiltrationsleistung, geringere Erosionsanfälligkeit
- Schutz des Bodenlebens (insbesondere flach- und tiefgrabende Regenwürmer) → Verbesserung der Bodenstruktur, Umsatz der Erntesterne
- Vermeidung von Schadverdichtungen → bessere Durchwurzelbarkeit und Infiltrationskapazität des Bodens
- Erhalt bzw. Erhöhung der Humusvorräte im Boden → höhere Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität sowie Stabilität gegen Erosion

Die genannten positiven Effekte sind je nach Standort und Bewirtschaftungssystem unterschiedlich stark ausgeprägt (Holland 2004) sowie in der wissenschaftlichen Literatur nicht unumstritten. Während in Bezug auf die Punkte 1 - 3 jedoch ein relativ großer Konsens herrscht (LfL 2002, Tebrügge & Düring 1999), wobei in Einzelfällen bzw. Einzeljahren auch gegenteilige Ergebnisse erzielt wurden (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft 2011), ist Punkt 4 stark umstritten und steht daher im Zentrum der vorliegenden Untersuchung.

2.2.2 Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die C-Dynamik im Boden

In vielen Überblicksarbeiten und Metastudien zum Thema wird grundsätzlich eine Humusanreicherung als Folge konservierender Bodenbearbeitungs- bzw. Direktsaatverfahren postuliert (u.a. ALVAREZ 2005, ANGERS & ERIKSEN-HAMEL 2008, FREIBAUER et al. 2004, GOVAERTS et al. 2009, HARTEMINK & MCSWEENEY 2014, HUTCHINSON et al. 2007, KERN & JOHNSON 1993, LAL 2004, LORENZ & LAL 2012, PAUSTIAN et al. 1997, RASMUSSEN & COLLINS 1991, RICE 2005, STOCKMANN et al. 2013, ZHU et al. 2012).

Andere Autoren kommen hingegen nach Auswertung zahlreicher Langzeitversuche zu dem Ergebnis, dass eine Humusanreicherung bei nicht-wendenden Bearbeitungsverfahren eine Folge der unzureichenden Untersuchungsmethodik ist (VESTERDAL & LEIFELD 2007) und/oder tatsächlich keine C-Akkumulation stattfindet (u.a. BAKER et al. 2007, DOLAN et al. 2006, KOLBE 2009, LUO et al. 2010a, POWLSON et al. 2014).

In Bezug auf Deutschland wurde noch vor wenigen Jahren ein grundsätzlicher Mangel an (koordinierter) Erhebung und Auswertung von Daten zu landwirtschaftlich genutzten Böden angemahnt (PRECHTEL et al. 2009).

Die These der Humusanreicherung wurde und wird auch anhand vieler Einzelstudien und Langzeitversuche in verschiedenen Regionen der Welt überprüft. Dabei deuten die Ergebnisse in vielen Studien mit unterschiedlichen Untersuchungsmethoden und unter verschiedenen Umweltbedingungen darauf hin, dass es zu einer C-Anreicherung in RT- und NT-Systemen kommt (ANDRUSCHKEWITSCH et al. 2013, BALOTA et al. 2004, BOLINDER et al. 1999, CAMPBELL et al. 2005, CAMPBELL et al. 1995, CARTER 1992, CHEN et al. 2009, CHIVENGE et al. 2007, DENEFF et al. 2004, DIEKMANN & KOCH 2008, FRANZLUEBBERS & STUEDEMANN 2013, GÁL et al. 2007, JACOBS et al. 2009, JOSCHKO et al. 2012, KELLER 2006, LARNEY et al. 1997, LIU et al. 2014, MAZZONCINI et al. 2016, OMONODE et al. 2006, OORTS et al. 2007, PARIHAR et al. 2016, REICOSKY et al. 1999, SEYFAHRT et al. 1999, SIX et al. 2002, SOMMER et al. 2011, SPARGO et al. 2008, SUN et al. 2013, WEST & POST 2002, ZIBILSKE

et al. 2002). Teilweise wird die Bestätigung der These allerdings in Bezug auf einzelne Parameter wie Bodenart, Fruchtfolge oder Klimabedingungen differenziert (z. B. YANG & KAY 2001).

Dabei wird zum einen durchweg eine absolute und relative Humusanreicherung in der Oberkrume (ca. 0 – 10 cm) im Vergleich zur wendenden Bodenbearbeitung (CT) beobachtet. Diese Humusanreicherung wird in nahezu allen Arbeiten zum Thema beschrieben und ist zunächst eine logische Folge der geringeren Einmischtiefe bzw. -intensität der Ernterückstände bei RT/NT. Diese Anreicherung in der Oberkrume geht allerdings i.d.R. mit einer relativen Abreicherung in der Unterkrume (ca. 15 – 30 cm) im Vergleich zur wendenden Bearbeitung einher. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Bilanzierung der Kohlenstoffvorräte bis mindestens zur Bearbeitungs- bzw. Krumentiefe, wenn nicht sogar etwas darüber hinaus, notwendig und sinnvoll. Obwohl in Bezug auf diese Vorgehensweise wissenschaftlicher Konsens herrscht, wird sie auch weiterhin nicht in allen Untersuchungen zum Thema beachtet und umgesetzt, weswegen die Aussagekraft dieser Arbeiten stark begrenzt bleibt (z. B. LU & LIAO 2016)

Eine Reihe von Autoren kommt, bei Beachtung des letztgenannten Punktes, zu dem Ergebnis, dass es im Gesamtprofil zu keiner Kohlenstoffakkumulation bei RT/NT kommt (APPEL 2008 & 2011, DEEN et al. 2003, DIMASSI et al. 2013, DOLAN et al. 2006, FRANZLUEBBERS & ARSHAD 1996, HERMLE et al. 2008, POWLSON & JENKINSON 1981, KRAWUTSCHKE 2007 & 2009, SCHULZ et al. 2014, YANG et al. 2008a & 2008b).

In einzelnen Arbeiten werden die Ergebnisse so differenziert betrachtet, dass weder eine Ablehnung noch eine Annahme der These erfolgt. Häufig werden dabei unterschiedliche Ergebnisse für unterschiedliche Regionen (z. B. VANDENBYGAART et al. 2003 mit unterschiedlichen Ergebnissen je nach Region in Kanada) ermittelt oder es liegen unterschiedliche Ertragsentwicklungen (z. B. OGLE et al. 2012) zugrunde. Kommen im Rahmen der Untersuchungen weitere Prüffaktoren wie Fruchtfolge(wirkungen) oder unterschiedliche Düngung hinzu, werden häufig ebenfalls sehr differenzierte Ergebnisse erzielt (z. B. SÜMER & ZEITZ 2012, WRIGHT & HONS 2005).

Neben den bereits erwähnten methodischen Zweifeln, welche häufig auch die Kontroverse um das Konzept der äquivalenten Bodenmassen betreffen (s.u.), sind die gerade in NT-Systemen im Vergleich zur Bearbeitung mit dem Pflug häufig niedrigeren Erträge ein Hauptargument gegen die C-Akkumulation (z. B. KOLBE 2009). Dabei wird, insbesondere vor dem Hintergrund der Erkenntnisse aus der Humusbilanzierung, mit entsprechend geringerem C-Input aus Wurzeln und Ernteresten argumentiert, weswegen selbst bei geringerer Umsatzdynamik zu wenig Ausgangsmaterial für eine C-Akkumulation zur Verfügung stehe. Einzelne Autoren haben allerdings auch höhere Erträge (in Verbindung mit höheren C-Vorräten) im Rahmen von NT-Systemen gegenüber CT-Systemen ermittelt (LIU et al. 2014).

VIRTO et al. (2012) untersuchten in einer Metastudie die Auswirkungen unterschiedlicher Boden-, Klima- und Bewirtschaftungsparameter auf die Unterschiede im C-Vorrat zwischen CT- und NT-Systemen. Dabei wurden die Vorräte bis in eine Tiefe von 30 cm berücksichtigt. Im Mittel von 92 Studien erhöhte sich der C-Vorrat im NT-System gegenüber dem CT-System um 6,7 % bzw. 3,4 t ha⁻¹. Für Versuche, die bereits seit 15 Jahren differenziert bewirtschaftet werden, wurde sogar ein mittlerer Unterschied von 8,5 t ha⁻¹ berechnet. Die ermittelten Unterschiede korrelierten dabei nicht mit den Bodenartenklassen oder Klimaparametern der Standorte. Es wurde allerdings ein deutlicher Zusammenhang zum mittleren C-Input festgestellt: Lag dieser im NT-System genauso hoch oder gar höher als bei CT, kam es zu einer nennenswerten C-Anreicherung bei NT. Es wird daher geschlussfolgert, dass NT-Systeme besonders dort zu einer C-Akkumulation im Boden führen, wo diese im Vergleich zu CT-Systemen gleiche oder höhere Erträge und damit C-Inputs aufweisen. Allerdings konnten mit dem C-Input letztlich nur 30 % des Unterschiedes zwischen CT und NT statistisch erklärt werden, während die restliche Variation auf Ursachen zurückzuführen ist, die im Rahmen der Studie nicht geklärt werden konnten. Zudem sind auch die Bedingungen, unter denen in NT-Systemen gleiche oder höhere Erträge produziert werden, variabel und wissenschaftlich nicht ausreichend geklärt.

Ein weiteres, relativ junges Forschungsfeld, betrifft die Auswirkungen des Tiefpflügens (bis zu 100 cm Tiefe) auf die C-Dynamik und -Vorräte im Boden. ALCÁNTARA et al. (2016) konnten mehrere Jahrzehnte nach dem einmaligen Tiefpflügen auf mehreren lehmigen Standorten bis zu einer Tiefe von 100 cm um 10 t ha^{-1} höhere C-Vorräte und um ca. 1 t ha^{-1} höhere N-Vorräte im Vergleich zur konventionell gepflügten Vergleichsfläche feststellen. Dabei wiesen die C-Vorräte im Unterboden einen Anteil an den Gesamtvorräten von ca. 34 % in den konventionell gepflügten und 46 % in den tief gepflügten Parzellen aus.

Für die Erhöhung der C-Vorräte weisen ALCÁNTARA ET AL. (2016) zwei Wirkmechanismen aus: Zum einen kommt es zu einer Stabilisierung der organischen Substanz des ehemaligen Oberbodenmaterials im Unterboden. Nach 40 - 50 Jahren waren auf den lehmigen Standorten noch 47 - 60 % des eingebrachten organischen Kohlenstoffs vorhanden. Zum anderen weist das hochgepflügte Unterbodenmaterial aufgrund der geringen C-Gehalte ein erhöhtes C-Sequestrierungspotenzial auf. Dabei wurde eine mittlere C-Akkumulationsrate von $0,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ berechnet. Zugleich wurden auch nach 40 - 50 Jahren geringere C-Gehalte in dieser neuen Krume gegenüber jener der Referenzflächen festgestellt. Es hatten sich folglich noch kein neues C-Gleichgewicht bzw. keine standort- und bewirtschaftungstypischen Humusgehalte eingestellt.

2.2.3 Wirkmechanismen der C-Stabilisierung im Boden

In vielen Arbeiten zum Thema Kohlenstoffdynamik gehen die Untersuchungen über die reine Bilanzierung bzw. den Vergleich von Bearbeitungsvarianten hinaus. Es werden weitere Parameter erhoben, die Mechanismen der Stabilisierung von organischem Kohlenstoff im Boden sowie Erklärungsansätze für die ermittelten Unterschiede liefern sollen. In Bezug auf die Humusanreicherung bei RT/NT werden die folgenden Mechanismen und Wirkkomplexe vorgeschlagen bzw. untersucht (Übersicht: VON LÜTZOW et al. 2008, KÖGEL-KNABNER et al. 2008, SIX et al. 2002, STOCKMANN et al. 2013):

- Wie in zahlreichen Studien nachgewiesen wurde, bieten RT/NT-Systeme deutliche Vorteile im Hinblick auf die Vorbeugung von Erosion (SCHMIDT ET AL. 2002, NITZSCHE et al. 2002). Je höher der Bodenbedeckungsgrad der Bodenoberfläche, desto besser ist der (humusreiche) Oberboden vor Erosion geschützt. Weiterhin wirkt sich eine intakte Bodenstruktur, wie sie für RT/NT-Systeme beschrieben wird, positiv auf die Infiltrationskapazität des Oberbodens aus. Dies liegt zum einen am stärker ausgeprägten Porensystem, zum anderen an der stärkeren Aggregation des Bodens, welche eine Auswirkung höherer Humusgehalte an der Bodenoberfläche ist. Der Verschlämmung der Bodenoberfläche, wie sie insbesondere für schluffreiche Bodenarten typisch ist, wird dadurch vorgebeugt. Je nach Relief und Intensität der Umlagerung von humusreichem Oberbodenmaterial kommt es durch Erosion zu einem C-Verlust, der insbesondere die wendend bearbeiteten erosionsgefährdeten Standorte betrifft.
- Je intensiver die Bodenbearbeitung, desto stärker ist die Belüftung des Bodens und desto schneller ist die Erwärmung im Frühjahr zu Beginn der Wachstumsperiode aufgrund der geringeren Bodenbedeckung. Beides bewirkt eine höhere Umsatzdynamik der organischen Reste bzw. eine Mineralisierung organischer Substanz und damit unter dem Strich einen schnelleren Humusabbau, wie er für leichte Böden und warme Regionen charakteristisch ist. SCHINNER & SONNLEITNER (1996b: 67) gehen davon aus, dass der Umsatz von Ernterückständen in tieferen Bereichen der Krume aufgrund von stabileren Temperatur- und Feuchtebedingungen rascher abläuft als an der Oberfläche.
- Die Bodenbearbeitung hat Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Mikrobengemeinschaft im Boden. Häufig wurde dabei eine Förderung von Pilzen zu Lasten von Bakterien durch flache Bodenbearbeitung beobachtet. HEINZE (2009) hingegen wies in ihrer Untersuchung eine Förderung saprotropher Pilze durch den Pflugeinsatz nach. Auch Fragen zur Substratnutzungseffizienz der einzelnen Organismengruppen sowie de-

ren Auswirkung auf Umsatzparameter der mikrobiellen Biomasse sind wissenschaftlich noch nicht abschließend geklärt.

- Die Stabilisierung von OS im Boden findet u.a. durch die Bildung von organo-mineralischen Komplexen statt (LORENZ & LAL 2012), innerhalb derer die OS besser vor mikrobiellem Abbau geschützt ist, als wenn sie als freie OS im Boden vorliegt. In diesem Zusammenhang wird häufig auf den Tongehalt des Bodens als wichtigsten Parameter verwiesen, wobei hohe Tongehalte i.d.R. höhere Gehalte an OS zur Folge haben. Auch organo-metallische Verbindungen spielen bei der Stabilisierung von OS eine Rolle, diese scheint aber geringer zu sein als jene der Ton-Humus-Komplexe (PRONK et al. 2013).

Bis vor einiger Zeit galt die chemische Rekalzitranz als wichtigster Faktor für die Verweildauer von organischen Verbindungen im Boden. Dabei wird davon ausgegangen, dass bestimmte Arten von Zellverbindungen aus Gründen ihrer (chemischen) Struktur schwerer abbaubar sind als andere (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 57 f.). Dazu gehören insbesondere aromatische Pflanzeninhaltsstoffe wie Lignin oder Pilzmelanine sowie aus diesen aufgebaute organische Substanzen. In diesem Zusammenhang ebenfalls zu nennen ist pyrogener Kohlenstoff, welcher unter dem Oberbegriff „Black Carbon“ aktuell die Debatte um C-Sequestrierung im Boden geradezu beherrscht. MARSCHNER et al. (2008) kommen auf der Basis ihrer Untersuchung allerdings zu dem Schluss, dass die Stabilisierung von OS hauptsächlich über pyrogenes C sowie Organo-mineralische Komplexe stattfindet, wohingegen die chemische Rekalzitranz kaum eine Rolle spielt.

- In den letzten Jahren wurde der Stabilisierungsmechanismus der physikalischen Trennung zwischen Substrat und Zersetzer (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 60) intensiv untersucht und als Hauptmechanismus der C-Stabilisierung identifiziert. Dabei kommt es im Innern von Mikroaggregaten, welche bei geringer Bearbeitungsintensität wiederum von Meso- und insbesondere Makroaggregaten zusammengehalten werden, zu dieser räumlichen Trennung. Dabei entfalten die für Mikroorganismen häufig ungünstigen Feuchte- und Luftbedingungen in Mikroaggregaten eine hemmende Wirkung für den Abbau von OS (BALESDENT et al. 2000, BEARE et al. 1994, GOEBEL et al. 2005, GOEBEL et al. 2009, HUANG et al. 2010, JACOBS et al. 2010, LORENZ & LAL 2012, MORDHORST 2013, OORTS et al. 2007, PUGET et al. 1995 und 2000, SIX et al. 2000). Durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen, insbesondere mit dem Pflug, kommt es zu einer (Zer)Störung von Makroaggregaten, welche die in diesen enthaltenen Mikroaggregaten der Befeuchtung und Belüftung aussetzen und dadurch den mikrobiellen Abbau der enthaltenen OS befördern.
- SCHMIDT et al. (2011) beschreiben die OS-Dynamik im Boden als Ökosystemparameter, indem sie die hier aufgeführten Mechanismen zusammenfassen und die Interaktionen zwischen verschiedenen Wirkkomplexen betonen. Demnach müsse die Erforschung der OS-Dynamik ganzheitlich erfolgen und alle Wirkmechanismen berücksichtigen.

2.2.4 C-Sequestrierungspotenziale

Neben der Beschreibung der Wirkmechanismen der Stabilisierung und des Abbaus organischer Substanzen im Boden stellt sich sowohl im Hinblick auf die landwirtschaftliche Humusbilanzierung als auch im Hinblick auf die Sequestrierungspotenziale von klimawirksamen Gasen wie CO₂ und CH₄ die Frage der Quantifizierung. Dabei nennen KOLBE & ZIMMER (2015: 12), auf Basis der Auswertung von ca. 240 Dauerversuchen aus Mitteleuropa (KOLBE 2012), gewichtete Einflussfaktoren auf die Humusgehalte von Ackerböden:

- Klima/Witterung mit meistens über 50 % (höhere Umsatzraten bei höheren Temperaturen, geringere Umsatzraten bei höheren Niederschlägen; C_{org}- bzw. Humusgehalte in Dauerversuchen liegen in warmen Jahren i.d.R. niedriger als in kühlen)

- Eigenschaften des Bodens mit 20 - 30 % (i.d.R. höhere C-Gehalte bei größerem Feinbodenanteil aufgrund der Bildung von Ton-Humus-Komplexen)
- Maßnahmen der Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung) mit 5 – 30 %

In einer aktuellen Studie zu den C-Gehalten und -Vorräten in Nordrhein-Westfalen berichten STEINMANN et al. (2016) von einer mittleren Abnahme um $0,56 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ im Zeitraum zwischen 2005 und 2013. Diese Abnahme war unabhängig von der Bodenart und widerspricht den errechneten Zahlen der Humusbilanzierung für diesen Zeitraum. Sie wird von den Autoren als Spätfolge einer häufigen Praxis der Umwandlung von Grünland in Ackerland in den 1980er und 1990er Jahren interpretiert. Demnach habe sich häufig noch kein neues C-Gleichgewicht im Boden eingestellt, was ein weiteres Absinken der C-Vorräte zur Folge hat.

In Bezug auf ein neues Equilibrium der OS im Boden geben einige Autoren einen Zeitraum von 15 – 20 Jahren nach Bewirtschaftungsumstellung an (WEST & POST 2002). Nach POEPLAU et al. (2011) ist die Hauptveränderung nach 17 Jahren abgeschlossen, ein neues Equilibrium werde aber unter mitteleuropäischen Klima- und Bodenbedingungen ggf. erst nach ca. 100 Jahren erreicht.

Das Sequestrierungspotenzial von RT- bzw. NT-Systemen gegenüber CT-Systemen wird auf der Basis von Literaturangaben mit $0,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ angegeben (FREIBAUER et al. 2004). Die Akkumulation hängt stark von der Bewirtschaftung (C-Input über Wurzelmasse, Erntereste und organische Dünger) sowie der Bodenart und dem Klima ab. Dabei können tonreiche Böden in kühleren Klimaten einfacher und schneller C_{org} speichern. Die größten Effekte durch RT/NT wurden demnach bei der Kombination von relativ hohen C_{org} -Gehalten in Kombination mit relativ hohen Umsatzraten erzielt (z. B. Norddeutschland, Niederlande). Die Sequestrierung läuft dabei nicht linear ab, sondern ist, je nach Maßnahme, i.d.R. in den ersten Jahren am größten und erreicht nach 20 – 100 Jahren ein neues Equilibrium (FREIBAUER et al. 2004: 13 ff.). So wird das C-Sequestrierungspotenzial für Förderperioden von ca. 5 Jahren mit $0 - 0,8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ angegeben (FREIBAUER et al. 2004: 20).

Auch STOCKMANN et al. (2013: 93) geben für humides gemäßigttes Klima ein C-Sequestrierungspotenzial durch konservierende Bodenbearbeitung von $0,5 - 1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ an. MAZZONCINI et al. (2016) ermittelten im Rahmen der Auswertung eines Langzeitexperimentes in Italien mit einer Laufzeit von 28 Jahren eine mittlere C-Sequestrierungsrate des NT-Systems von $0,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$, bei allerdings um ca. 25 % höheren Erträgen und entsprechend höheren C-Inputs durch die Erntereste im Vergleich zum CT-System.

Nach einer aktuellen Studie liegt der C-Umsatzkoeffizient von RT um 37 % niedriger als jener von CT (LEGATO et al. 2015: 3560). Zudem müssen aber auch die veränderten Erträge, welche Veränderungen des C-Inputs bewirken, berücksichtigt werden. Diese liegen nach Ergebnissen der gleichen Studie für Mais in ganz Europa bei RT um 10 % niedriger als für CT und für Wintergetreide nördlich von 55° N (Norddeutschland) bei RT um 5 % niedriger als für CT (LEGATO et al. 2015: 3560). Das C-Sequestrierungspotenzial von RT-Systemen wird insgesamt mit $1 - 5 \text{ t C ha}^{-1}$ bis 2050 angegeben (LEGATO et al. 2015: 3561). In Kombination mit Strohinkorporierung wurde für ganz Europa ein C-Sequestrierungspotenzial von $0,5 \text{ Gt C}$ bis 2050 ermittelt, wobei die höchsten Raten nach ca. 5 Jahren der Implementierung mit $0,16 - 0,31 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ermittelt wurden (ebd.).

Nach Zahlen des KTBL (DÖHLER 2009: 189) können die Erträge bei NT- bzw. RT-Verfahren je nach Vorfrucht und aktueller Feldfrucht höher oder niedriger sein als bei CT. Dabei sind insbesondere bei Zuckerrübenanbau sowie beim Anbau von Weizen direkt nach Weizen um 10 - 15 % niedrigere Erträge für NT im Vergleich zu CT und RT zu verzeichnen. Folgt der Weizenanbau hingegen auf eine andere Vorfrucht (Zuckerrübe, Ackerbohne), werden sogar höhere Erträge erzielt.

Bei der Kohlenstoffbilanzierung der verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren müssen, neben der reinen C-Bilanz des Bodens, auch die C-Bilanzen der eingesetzten Produktionsmittel (Treibstoff, Energie, Düngemittel, etc.) mit berücksichtigt werden, um eine Bewertung im Hinblick auf die Sequestrierung von klimarelevantem CO_2 vorzunehmen (SCHLESINGER 2000). Zudem wird in Bezug auf die Klimawirksamkeit häufig ein

weiterer wichtiger (negativer) Effekt reduzierter Bodenbearbeitungsverfahren ins Spiel gebracht: So kommt es zu höheren NO_2 -Emissionen aufgrund stärkerer Denitrifizierung im stärker anaeroben Milieu, welche einen erheblichen Teil (ca. 50 - 60 %) der positiven Klimagasbilanz von RT/NT-Systemen wieder zunichtemachen (FREIBAUER et al. 2004: 14).

2.2.5 Auswirkungen des einmaligen bzw. periodischen Pflugeinsatzes in Systemen reduzierter Bodenbearbeitung

Eine wichtige praxisrelevante Fragestellung, welche auch zentral für die vorliegende Untersuchung ist, betrifft die C-Dynamik nach einer ein- oder mehrmaligen wendenden Bearbeitung von langjährig konservierend oder in Direktsaat bewirtschafteten Flächen. Der periodische Einsatz des Pfluges geschieht dabei häufig zum Zweck der Lockerung von Bodenverdichtungen sowie insbesondere aus phytosanitären Gründen zur Bekämpfung von Unkräutern sowie Schnecken und Mäusen, welche eine Folge der Akkumulation von Ernteresten an der Bodenoberfläche sein können (STOCKFISCH et al. 1999). Zudem können politisch-rechtliche Aspekte wie das Auslaufen von Förderperioden bei der Entscheidung für den Pflugeinsatz eine wichtige Rolle spielen. Diesbezüglich steht die wissenschaftliche These im Raum, dass C-Zugewinne unter RT/NT zeitlich begrenzt bleiben, wenn die Flächen, z. B. bei Förderung bzw. dem Auslaufen derselben, episodisch oder periodisch umgebrochen werden (LAL et al. 2001: 124; FREIBAUER et al. 2004: 16).

LAL et al. (2001: 663) formulieren dies als Forschungsfrage: „*While conservation tillage is useful, it is also important to know what happens to SOC sequestered when a long-term no-till field is tilled*“

Während zu den mittel- und langfristigen Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren sowie Fruchtfolgen und Düngemitteln auf die C-Dynamik sehr viele Untersuchungen und Daten vorliegen, wurden die Auswirkungen eines erneuten Umbruchs bisher nur vereinzelt untersucht. Dies liegt vermutlich nicht zuletzt daran, dass durch eine einmalige wendende Bearbeitung die weitere Verwendung langjähriger Versuchsfelder für Fragen zur reduzierten Bodenbearbeitung stark eingeschränkt würde.

In einer frühen Arbeit (PIERCE et al. 1994) wurden bereits 1986 und 1987 Teilschläge einer Fläche in Michigan (USA), die seit 1980 in Direktsaat bewirtschaftet worden waren, einmalig umgebrochen. Dabei wurden die Nährstoffe P und K sowie C_{org} innerhalb der obersten 20 cm des Bodens umverteilt, eine Stratifizierung bis 50 cm Tiefe blieb aber erhalten. Zudem wurde eine verstärkte N-Mineralisierung festgestellt. Bei einer Nachuntersuchung ca. 4 - 5 Jahre nach dem Umbruch konnte für die meisten untersuchten Parameter kein Unterschied zum NT-System festgestellt werden, wobei die Gehalte von C und N in der Oberkrume etwas geringer waren als beim nicht umgebrochenen NT-System. Zudem waren die C_{org} -Vorräte in den obersten 50 cm im Rahmen der Nachuntersuchung (1991) in allen Varianten um 3 - 5 t C ha⁻¹ geringer als zum Zeitpunkt der Originalmessung. Da die Beprobungen zum jeweils gleichen Zeitpunkt im Jahr sowie innerhalb der Fruchtfolge durchgeführt wurde, können diese Aspekte als Ursachen für die Schwankung ausgeschlossen werden. Wie in zahlreichen anderen Untersuchungen traten auch hier Schwankungen der C_{org} -Vorräte zwischen den Jahren auf, die nicht ohne weiteres aus der Bewirtschaftung oder der Witterung erklärt werden können. Diese Unterschiede erreichen dabei annähernd die Größenordnung des Unterschiedes zwischen den Bearbeitungsvarianten CT und NT von 7,1 t C ha⁻¹.

VANDENBYGAART & KAY (2004) berichten vom Umbruch einer 22 Jahre lang in Direktsaat bewirtschafteten Fläche in Ontario (Kanada), welche unmittelbar vor sowie drei Tage, sieben Monate und 18 Monate nach dem Umbruch beprobt wurde. Auch durch diesen Umbruch wurden die Stoffkonzentrationen in der Krume homogenisiert und die typische Stratifizierung aufgebrochen. Gleichwohl konnte auch 18 Monate nach dem Umbruch keine signifikante Veränderung der C-Massen festgestellt werden. Für den tonärmsten bzw. sandigsten Bereich der Untersuchungsfläche konnte allerdings ein Rückgang der C-Massen um 3 t ha⁻¹ festgestellt werden, welcher sich hauptsächlich in der Tiefe zwischen 15 und 30 cm zutrug. Dies entspricht im Vergleich zu

den Referenzflächen in etwa zwei Dritteln des über die Versuchsdauer von ca. 25 Jahren durch die Direktsaat im Vergleich zu CT akkumulierten Kohlenstoffs.

Beide genannten Untersuchungen fanden im Umfeld der Großen Seen Nordamerikas statt und damit in einer Klimazone, die jener Mitteleuropas vergleichbar ist, wenngleich mit im Vergleich zu Sachsen höheren jährlichen Niederschlagssummen sowie längeren bzw. kälteren Wintern.

Weitere Untersuchungen in Nordamerika (CAMPBELL et al. 1995, LARNEY et al. 1997) wurden einerseits in Regionen durchgeführt, deren Klima sich erheblich vom mitteleuropäischen unterscheidet, sodass die Übertragbarkeit der Ergebnisse fraglich ist. Zudem war die hier diskutierte Fragestellung nur ein untergeordneter Aspekt in diesen Untersuchungen bzw. die gewählten Beprobungstiefen reichen nach heutigem Wissensstand nicht aus, um eine abschließende Beantwortung der Frage zu gewährleisten.

In Deutschland wurde diese Fragestellung am Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ) in Göttingen untersucht (STOCKFISCH et al. 1999), wobei die Klima- und Bodeneigenschaften des Versuchsstandortes jenen der vorliegenden Untersuchung sehr ähnlich sind. Dabei wurden vor dem Umbruch für die obersten 50 cm des Bodens um ca. 5 t ha^{-1} höhere C-Massen für die etwa 20 Jahre flach konservierend (6 - 8 cm) bewirtschaftete Fläche (RT) im Vergleich zu CT (insgesamt ca. 65 t ha^{-1}) ermittelt. Die Stickstoffmassen lagen bei NT um ca. 1 t ha^{-1} höher als bei CT (insgesamt $6,8 \text{ t ha}^{-1}$). Während der Umbruch zunächst die Stratifizierung der OS bzw. der C-Gehalte aufhob, wurde bereits wenige Monate nach dem Umbruch im Verlauf eines relativ milden Winters die gesamte zusätzliche C-Masse mineralisiert. Als möglicher Grund für den schnellen Abbau wird die chemische und strukturelle Zusammensetzung der akkumulierten C-Massen genannt, welche größtenteils als freie OS (POM) vorliegen und dem labilen bzw. kurzfristig umsetzbaren C-Pool zuzurechnen sei.

In einer Folgeuntersuchung des IFZ (KOCH & STOCKFISCH 2006) wurden drei über 6 - 8 Jahre nichtwendend bearbeitete Teilflächen (nichtwendende Bearbeitung bis 30 cm Tiefe) einmalig gepflügt. Unmittelbar vor sowie an drei Termine bis max. 2,5 Jahre nach dem Umbruch wurden die C- und N-Massen bestimmt. Dabei wurden schon nach wenigen Monaten ein Rückgang der C-Massen um 2 % und ein Rückgang der N-Massen um 5 % im Bereich von 0 - 45 cm festgestellt. Zum letzten Beprobungstermin 1,5 - 2,5 Jahre nach dem Umbruch waren die Verluste im Vergleich zum Ausgangswert auf 6 % (C) bzw. 10 % (N) angestiegen.

In dieser letztgenannten Untersuchung konnten die Ergebnisse von STOCKFISCH et al. (1999) bestätigt werden, diese widersprechen allerdings den Ergebnissen der beiden Untersuchungen aus Nordamerika. Es herrscht also, ähnlich wie bei der Frage nach den Unterschieden der C-Dynamik zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten, auch im Hinblick auf die Auswirkung von Umbrüchen auf die C-Dynamik kein wissenschaftlicher Konsens.

Trotz dieser widersprüchlichen Ergebnisse sowie der insgesamt sehr begrenzten Anzahl an Untersuchungen besteht in Deutschland ein gewisser (wissenschaftlicher) Konsens, dass periodisches Pflügen im Abstand von i.d.R. fünf bis zehn Jahren die C-Sequestrierungseffekte konservierender Bodenbearbeitungsverfahren rückgängig macht (HÜTTL et al. 2008: 74).

2.2.6 Das Konzept der Bodenqualität

In Verbindung mit reduzierter Bodenbearbeitung wird häufig auch auf eine Verbesserung der Bodenqualität verwiesen (z. B. SPARGO et al. 2008). Der Begriff, der insbesondere im angloamerikanischen Raum seit den späten 1980er Jahren Verbreitung gefunden hat, verweist auf ein übergeordnetes Konzept der Bewertung von Böden, bei welchem die Aufrechterhaltung der Funktionen des Bodens, insbesondere der Bodenfruchtbarkeit im Hinblick auf landwirtschaftliche Produktion, im Zentrum steht (REEVES 1997). Häufig wird der Begriff auch mit dem Begriff bzw. Konzept der Nachhaltigkeit verknüpft (LEWANDOWSKI 1999). Der NRCS (Natural Resources Conservation Service) der USA definiert Bodenqualität im Jahr 2008 wie folgt (zitiert nach: SÁ & LAL 2009):

“the capacity of a specific kind of soil to function, within natural or managed ecosystem boundaries, to sustain plant and animal productivity, maintain or enhance water and air quality, and support human health and habitation”

Eine hohe Bodenqualität wird dabei i. d. R. mit den folgenden Eigenschaften in Verbindung gebracht (LEWANDOWSKI 1999: 1f):

- Hohe Humusgehalte sowie hohe biologische Aktivität
- Krümelige Bodenstruktur mit stabilen Aggregaten
- Gute Durchwurzelbarkeit
- Hohe Infiltrationskapazität
- Geringer Unkraut- und Schädlingsdruck

Diese Eigenschaften werden dabei als Folge von Bewirtschaftungsmaßnahmen bewertet. Als Maßnahmen zur Gewährleistung einer hohen Bodenqualität werden dabei die folgenden angesehen (LEWANDOWSKI 1999: 2):

- Hohe organische Düngung
- Vermeidung von häufigem Befahren der Fläche sowie von intensiver Bodenbearbeitung
- Möglichst permanente Bedeckung der Bodenoberfläche mit Pflanzenbestand oder Ernteresten
- Erhöhung der ökologischen Diversität durch Fruchtfolgen, Mischkulturen sowie Grünstreifen (Pufferzonen)

Dabei sind insbesondere die Maßnahmen 2 und 3 aus dieser Liste direkt mit Systemen der konservierenden Bodenbearbeitung bzw. Direktsaat verknüpft bzw. eine Folge derselben.

Zur Bewertung der Bodenqualität wurden verschiedene Indikatoren vorgeschlagen. Diese werden gemeinhin in die Bereiche chemische, physikalische und biologische Indikatoren unterteilt. Als besonders sensitiv für Bewirtschaftungseinflüsse bzw. -änderungen wurden dabei die folgenden Indikatoren identifiziert (LEWANDOWSKI 1999: 15):

- Partikuläre organische Substanz (POM) bzw. leichte umsetzbare organische Substanz
- Infiltrationskapazität
- Aggregatstabilität
- Mikrobielle Biomasse

Sowohl der chemische Indikator der leicht umsetzbaren organischen Substanz als kurzfristiger und der gesamten organischen Substanz als mittel- bis langfristiger Indikator als auch jener der mikrobiellen Biomasse kamen in der vorliegenden Untersuchung zum Einsatz.

Die konservierende Bodenbearbeitung bzw. Direktsaat stellt eine zentrale Bewirtschaftungsoption im Hinblick auf die Eigenschaften einer hohen Bodenqualität und auf die Maßnahmen, mit der diese zu erreichen sind, dar. Sie wird daher auch häufig als erste und wichtigste Option zur Verbesserung der Bodenqualität genannt (LEWANDOWSKI 1999: 41). Zudem finden sich viele der wichtigsten Indikatoren der Bodenqualität in den Untersuchungen zu den Auswirkungen von RT/NT-Systemen wieder.

In wissenschaftlicher Hinsicht bleibt das Konzept der Bodenqualität jedoch aufgrund seiner Breite schwer operationalisierbar. Zudem sind wissenschaftliche Untersuchungen häufig auf die Erhebung einzelner oder meh-

rerer Parameter in Abhängigkeit von konkreten Bewirtschaftungsmaßnahmen sowie auf die Erklärung und Interpretation dieser Ergebnisse ausgerichtet. Aussagen zur Bodenqualität hingegen haben letztlich v. a. bewertenden Charakter und sind daher häufig in politischen Kontexten anzusiedeln. Aus diesen Gründen wird in der vorliegenden Untersuchung das Konzept der Bodenqualität nicht verwendet, gleichwohl viele der erhobenen Parameter und Ergebnisse im Hinblick auf eine Ausweisung unterschiedlicher Bodenqualitäten herangezogen werden könnten.

2.2.7 Das Konzept des Stratifizierungsverhältnisses (Stratification ratio)

Ein weiteres, in der Literatur zur Untersuchung der C- Dynamik unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren häufig vorkommendes Konzept, ist das des Stratifizierungsverhältnisses (stratification ratio, SR). Es wird häufig auch als Indikator für Bodenqualität genannt (FRANZLUEBBERS 2002, SÁ & LAL 2009). Dabei wird davon ausgegangen, dass die Akkumulation von OS an der Bodenoberfläche und die daraus resultierende Stratifizierung der C-Gehalte als Funktion der Tiefe natürlichen Prozessen eher entspricht als die durch intensive Bodenbearbeitung stattfindende Homogenisierung von Stoffgehalten in der Krume. Die C-Anreicherung nahe der Oberfläche sei zudem mit positiven Effekten wie besserer Aggregation und Belüftung verbunden, welche die Bodenqualität erhöhen (FRANZLUEBBERS 2002). Im Gegensatz dazu führe die intensive Bodenbearbeitung (CT) zu einer Zunahme der Mineralisierung, Zerstörung von Aggregaten sowie Bodenerosion, welche sich negativ auf die Bodenqualität auswirken (ebd.).

Zudem wurde mit dem SR-Konzept auf Kritik eingegangen, die am Indikator C- bzw. Humus-Gehalte zur Bewertung der Bodenqualität aufkam. Dabei ging es insbesondere um die Frage, ob der C-Gehalt eines Bodens aussagekräftig in Bezug auf die Produktivität des Standortes sei (FRANZLUEBBERS 2002: 96). Unabhängig von den Gesamtgehalten bzw. -massen an C bzw. Humus drückt der neu eingeführte Indikator SR lediglich das Verhältnis der Masse an oberflächennaher OS zur Masse an OS in der jeweiligen Beprobungsschicht aus. Aufgrund der erwähnten Bedeutung relativ hoher C-Gehalte in der obersten Bodenschicht sind dabei höhere SR-Werte als positiv zu bewerten und entsprechen gewissermaßen naturnahen Verhältnissen.

In vielen Arbeiten wird dabei der C-Gehalt der Schicht 0 - 5 cm (FRANZLUEBBERS 2002, SÁ & LAL 2009) oder gar 0 - 2,5 cm (SPARGO et al. 2008) zu jenen der (bzw. einer) anderen Beprobungsschicht(en) ins Verhältnis gesetzt. Dabei werden für CT-Systeme SR-Werte von 1,1 - 1,8 für die Schicht 12,5 - 20 cm angegeben (FRANZLUEBBERS 2002: 98), wobei die SR-Werte der untersuchten Standorte mit abnehmenden jährlichen Niederschlägen, abnehmenden Durchschnittstemperaturen und zunehmenden C-Gehalten zunehmen. Für NT-Systeme sind die SR-Werte höher (2,1 - 3,4), wobei die Unterschiede zwischen den Systemen mit zunehmenden C-Gehalten der Standorte abnehmen. FRANZLUEBBERS (2002) schlägt daher einen SR-Wert von 2 als Richtwert vor, wobei Standorte mit SR-Werten > 2 eine gute Bodenqualität anzeigen.

SÁ & LAL (2009) konnten bei ihrer Untersuchung der C-Dynamik von landwirtschaftlichen Böden in Südbrasilien unter subtropischen Klimabedingungen nachweisen, dass ein signifikanter linearer Zusammenhang zwischen der zeitlichen Dynamik der C-Vorräte, der C-Sequestrierungsrate sowie den SR-Werten bestand. Zudem wurde eine lineare Korrelation zwischen der C-Sequestrierungsrate und bodenbiologischen Parametern festgestellt. Auf dieser Grundlage schlagen sie SR als Indikator für C-Sequestrierungsvorgänge vor, wobei sich die Sequestrierung auf die Schicht 0 - 10 cm bezieht.

Für CT (nach 22 Jahren) wurden im Rahmen dieser Untersuchung in den Schichten 5 - 10 / 10 - 20 / 20 - 40 cm SR-Werte für C_{org} von 1,12 / 1,23 / 1,51 ermittelt (SÁ & LAL 2009: 50). Für NT (nach 22 Jahren) liegen die entsprechenden SR-Werte für diese drei Schichten bei 1,76 / 2,13 / 2,14. Damit konnte der SR-Richtwert von 2 nach FRANZLUEBBERS (2002) in etwa bestätigt werden, zumal an diesem Standort aufgrund hoher durchschnittlicher Temperaturen und Niederschläge sowie niedriger C-Gehalte die Bedingungen für die Ausbildung von hohen SR-Werten nach FRANZLUEBBERS (2002) ungünstig sind. Für den Bereich natürlicher Vegetation wurden im Rahmen der Studie SR-Werte von 1,27 / 1,48 / 1,9 ermittelt, was diese Aussagen unter-

legt. Zudem konnten in allen Bearbeitungsvarianten eine Zunahme der SR-Werte mit der Tiefe festgestellt werden.

SPARGO et al. (2008) ermittelten unter ebenfalls subtropischen Klimabedingungen in Virginia (USA) für die Schichten 0 - 2,5 cm / 7,5 - 15 cm nach 10 Jahren NT-Bewirtschaftung SR-Werte von 2,6 - 3,8, wobei diese im Schnitt um $0,133 \text{ Jahr}^{-1}$ zunahmen. Dabei zeigten die gröbereren Bodenarten höhere SR-Werte als die feineren. Aufgrund der flachen Beprobungstiefe von 15 cm sind allerdings auch die Ergebnisse dieser Untersuchung im Hinblick auf die ermittelte C-Sequestrierungsrate (ca. $0,3 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$) sowie die Bedeutung der SR-Werte als Indikator für C-Sequestrierung nur unter Vorbehalt zu akzeptieren.

Die These der Validität der SR-Werte als Indikator für Bodenqualität bzw. die C-Dynamik im Boden wurden für einen Untersuchungsstandort in Bayern ebenfalls bestätigt (LEIFELD & KÖGEL-KNABNER 2005).

Das Konzept des Stratifizierungsverhältnisses ist in der wissenschaftlichen Untersuchung von Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf die C-Dynamik weit verbreitet und akzeptiert. Dabei werden höhere SR-Werte als Indikator für eine höhere Bodenqualität sowie eine voranschreitende C-Sequestrierung akzeptiert, allerdings in Abhängigkeit der Bodenart und des Klimas. Dabei ist die Indikatorwirkung für Aspekte wie eine verbesserte Bodenstruktur sowie weitere mit höheren oberflächennahen C-Gehalten verbundene pflanzenbauliche Vorteile unbestritten. Ob das SR-Konzept auch bei größeren Beprobungstiefen nebst Bilanzierung der C-Gesamtvorräte sowie in Bezug auf weitere bodenchemische und -biologische Parameter (C_{hwt} , C_{mik}) als verlässlicher Indikator für C-Sequestrierungsvorgänge anzusehen ist, bleibt eine offene Forschungsfrage. Die jeweiligen SR-Grenzwerte müssten dabei einer starken Differenzierung nach Klimaparametern, Bodenarten sowie Bewirtschaftungsparametern unterliegen.

2.3 Kennzahlen der Bodenbearbeitung und der Erträge in Sachsen und Deutschland

2.3.1 Kennzahlen für den Freistaat Sachsen

Nach Schätzungen wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2014 von den insgesamt 715 190 ha Ackerfläche in Sachsen ca. 50 % pfluglos bearbeitet wurden, wobei der Anteil in einzelnen Regionen des Landes (z. B. Vorerzgebirge und Erzgebirge) bei bis zu zwei Drittel (SÄCHSISCHER AGRARBERICHT 2015) bzw. bis zu 100 % der Ackerfläche liegen dürfte. Eine Förderung der dauerhaft pfluglosen Bearbeitung im Rahmen des Förderprogramms „Agrarumweltmaßnahmen und Waldmehrung“ (AuW) wurde im Jahr 2014 für 34,6 % der Ackerfläche Sachsens (ca. 250 000 ha) in Anspruch genommen (SÄCHSISCHER AGRARBERICHT 2015).

Die Förderung der pfluglosen Bewirtschaftung läuft dabei aktuell im Freistaat Sachsen im Rahmen der Richtlinie Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen (RL AUK) innerhalb des Entwicklungsprogramms für den ländlichen Raum (EPLR) mit Mitteln aus dem Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) auf Basis der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der EU, deren aktuelle Förderperiode sieben Jahre umfasst (2014 - 2020).

In diesem Rahmen wird eine Förderung von 80 € ha^{-1} für Streifensaat/Direktsaat sowie 100 € ha^{-1} für das Belassen von Stoppel- und Ernterückständen bis Mitte Februar des Folgejahres bei einer Umsetzungsverpflichtung über mindestens 5 Jahre gewährt, wobei im Gegensatz zur abgelaufenen AuW-Förderperiode eine Rotation der Fläche möglich ist.

Unabhängig vom Bodenbearbeitungssystem wurden zudem die Erträge einzelner Feldfrüchte erhoben. Die mittleren Getreideerträge (inkl. Mais) für das Land Sachsen (STATISTISCHES LANDESAMT DES FREISTAATES SACHSEN 2015) sahen für den Untersuchungszeitraum wie folgt aus:

2012: 66,3 dt ha⁻¹
2013: 63,6 dt ha⁻¹
2014: 80,7 dt ha⁻¹
2015: ca. 73 dt ha⁻¹

Für Zuckerrüben wurden folgende mittlere Erträge in Sachsen erzielt (STATISTISCHES LANDESAMT DES FREI-STAATES SACHSEN 2015):

2012: 683,2 dt ha⁻¹
2013: 588,1 dt ha⁻¹
2014: 845,7 dt ha⁻¹

2.3.2 Kennzahlen für die Bundesrepublik Deutschland

In Deutschland wurde im Wirtschaftsjahr 2009/2010 auf 38 % der Ackerfläche (4 469 300 ha) eine nichtwendende Form der Bodenbearbeitung angewendet, wobei 34 % der Betriebe zumindest teilweise und 12 % der Betriebe vollständig auf den Einsatz des Pfluges verzichteten (STATISTISCHES BUNDESAMT 2010). Der Einsatz nichtwendender Bodenbearbeitung stieg dabei mit zunehmender Betriebsgröße. Direktsaatverfahren kamen auf 146 300 ha und damit weniger als 1 % der Ackerfläche zum Einsatz. Aufgrund der Fördermaßnahmen sowie der Bestrebung vieler landwirtschaftlicher Betriebe, Produktionskosten (Arbeitszeit, Maschinen, Diesel) zu reduzieren, ist davon auszugehen, dass der Anteil der Betriebe bzw. Fläche mit nichtwendender Bodenbearbeitung seit der letzten Erhebung gestiegen ist. Die Ergebnisse der aktuellen Agrarstrukturerhebung 2016 liegen zum Zeitpunkt dieses Berichtes noch nicht vor.

2.4 Landwirtschaftliche Dauerversuchsflächen

Zahlreiche landwirtschaftliche Fragestellungen werden aufgrund der Mittel- und Langfristigkeit vieler insbesondere bodenphysikalischer und -chemischer Prozesse anhand von Dauerversuchsflächen untersucht. Dabei sind die Länge der Laufzeit des Versuches sowie die Versuchsgüte entscheidend für die Erzielung von statistisch absicherbaren Ergebnissen bzw. langfristigen Trends (KOLBE 2012: 18). Es kann unterschieden werden zwischen Dauerfeldversuchen, die i.d.R. von Einrichtungen der Wissenschaft betrieben werden und in eine große Anzahl relativ kleiner Parzellen unterteilt sind, auf welche die einzelnen Prüffaktoren (z. B. Bodenbearbeitung, Fruchtfolge, Düngung) so verteilt werden, dass eine statistische Auswertung mit Versuchswiederholungen ermöglicht wird. Zudem existieren Testflächen der landwirtschaftlichen Praxis, auf welchen einzelne Prüffaktoren auf meist relativ großen und daher heterogenen Parzellen unter praxisüblicher Bewirtschaftung umgesetzt und untersucht werden. Die Übergänge zwischen diesen beiden Versuchstypen sind dabei fließend und es existieren weder national noch international feste Vorgaben oder Regeln für die Anlage solcher Dauerversuche.

Zu den ältesten und wichtigsten landwirtschaftlichen Dauerversuchen zählt jener in Rothamsted in England, wo seit 1843 landwirtschaftliche Experimente durchgeführt werden (BBSRC 2016). In Deutschland zählt der Statische Düngungsversuch in Bad Lauchstädt mit ca. 40 ha Gesamtfläche zu den bekanntesten und wichtigsten Dauerfeldversuchen, nicht zuletzt aufgrund seiner Lage im Nordostdeutschen Schwarzerdegebiet, welches eine hohe Bodenfruchtbarkeit sowie eine damit verbundene hohe Produktivität des Bodens beherbergt (SCHÄDLER 2016).

2.4.1 Datenerhebung auf Dauerversuchsflächen

Bei der Auswertung solcher Dauerfeldversuche stellen sich in methodischer Hinsicht zahlreiche Herausforderungen. Diese betreffen zum einen die Anzahl der Einflussgrößen (Variablen), wobei zu den im Versuchsaufbau angelegten Prüffaktoren weitere Streuungsursachen wie Witterungs- und Klimaschwankungen bzw. -änderungen sowie Boden- und Reliefheterogenitäten zählen. Zum anderen ergeben sich zahlreiche methodische Probleme bei der Erhebung der Daten (ELLERT et al. 2008):

- Eine möglichst schonende Vorgehensweise bei der Beprobung, um den Versuch nicht zu stören (dies betrifft sowohl den Pflanzenbestand als auch den Boden)
- Festlegung und Markierung möglichst repräsentativer Beprobungspunkte und -zeitpunkte, gerade auch im Hinblick auf Zeitreihen bzw. Wiederholungsmessungen
- Parallele Erhebung möglichst vieler Einflussgrößen auf den jeweiligen Messparameter
- Festlegung der Anzahl an Feld- und Messwiederholungen
- Umrechnung / Übertragung von Punktdaten bzw. Stoffgehalten in die Tiefe und in die Fläche (Flächenmassen bzw. Vorräte)

Die Entnahme von Bodenproben erfolgt dabei meist mit einem Pürkhauer-Bohrstock, weil damit bis in landwirtschaftlich relevante Tiefen mit geringem Aufwand Proben entnommen werden können, ohne das durch die Öffnung von Profilgruben der Boden gestört wird. Zur Eliminierung von räumlichen Heterogenitäten sowie zur Erlangung von ausreichend Bodenmaterial (je nach Analytik) wird dabei häufig eine Mischprobe aus mehreren Einstichen gebildet.

Die Festlegung von Beprobungspunkten kann entweder nach bestimmten Kriterien wie der repräsentativen Abdeckung verschiedener Reliefeinheiten oder Bodeneinheiten, oder nach einem bestimmten (geometrischen) Raster erfolgen (ELLERT et al. 2008: 27). Teilweise kommen auch Verfahren der Zufallsermittlung von Beprobungspunkten zum Einsatz. Das Wiederfinden der Beprobungspunkte erfolgt heutzutage i. d. R. mittels GPS-Geräten, es können aber auch Markierungen auf dem Feld bzw. Abstände zu markanten Objekten bzw. den Rändern der Fläche genutzt werden. Dabei muss sichergestellt werden, dass nicht der exakt gleiche Punkt mehrmals beprobt wird, da dieser durch die vorhergehende Beprobung bereits gestört ist.

Ein Vergleich von unterschiedlichen Prüfgliedern, z. B. Bodenbearbeitungsvarianten, kann entweder über den Vergleich mehrerer Beprobungszeitpunkte nach Implementierung der differenzierten Bewirtschaftung erfolgen oder über den direkten Vergleich beider bzw. mehrerer Prüfglieder zum gleichen Zeitpunkt (ELLERT et al. 2001: 133). Im ersten Fall werden zwar absolute Veränderungen mit der Zeit, z. B. von Stoffvorräten, gemessen, diese können aber nicht ohne weiteres auf das entsprechende Prüfglied reduziert werden. Sie können auch andere bzw. weitere Ursachen haben, z. B. veränderte Produktivität aufgrund von Witterungseinflüssen. Im zweiten Fall können direkte Aussagen über die Unterschiede in den Stoffvorräten zwischen den Prüfgliedern abgeleitet werden. Die zeitliche Veränderung der Stoffvorräte, z. B. im Vergleich zum Versuchsbeginn, wird hingegen nicht erfasst. Nach IZZAURRALDE et al. (2001: 556) sind die Daten aus beiden Messkonzeptionen wertvoll für die Beantwortung von Fragen zur C-Sequestrierung im Boden. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund von Klimaveränderungen, welche zugleich als Ursache und Wirkung der C-Dynamik im Boden interpretiert werden können.

Die Erhebung zusätzlicher Einflussgrößen, insbesondere der Witterung sowie der Bewirtschaftung, erfolgt über entsprechende Klimastationen sowie die jeweiligen Bewirtschaftungsberichte. Wissenschaftliche Dauerfeldversuche weisen heutzutage meist eigene Klimastationen auf und erheben möglichst viele relevante Daten direkt. Für die Testflächen der landwirtschaftlichen Praxis kann i.d.R. auf Daten aus staatlichen Klimastationen zurückgegriffen werden, die sich in der Nähe der Fläche befinden und deren Daten frei verfügbar sind bzw.

angefragt werden können. Die Bewirtschaftungsdaten werden von den jeweiligen Flächenbewirtschaftern erhoben, wobei die Quantität und Qualität der Daten stark von diesen abhängig ist.

Die Anzahl der Feld- und Messwiederholungen sollte möglichst groß sein, um die statistische Aussagekraft der Ergebnisse zu optimieren. Dieser Forderung sind allerdings durch begrenzte Kapazitäten der Probenahme und Analyse Grenzen gesetzt. Beim Vergleich von zwei bzw. mehreren Varianten, z. B. der Bodenbearbeitung, wird häufig mit sog. paired samples (ELLERT et al. 2008: 29) gearbeitet. Dabei weisen die jeweiligen Paare (Beprobungspunkte) möglichst viele Gemeinsamkeiten auf und unterscheiden sich lediglich in Bezug auf den zu untersuchenden Prüffaktor (z. B. Bodenbearbeitung).

In Abhängigkeit von der Anzahl an Proben kann der kleinste ermittelbare Unterschied (Minimum detectable difference, MDD) zwischen zwei Probenkollektiven in Bezug auf den jeweiligen Parameter berechnet werden (SCHRUMPF et al. 2011). Die MDD ist der geringste Unterschied, welcher z. B. mit 80 % Zuverlässigkeit ($1 - \beta = 0,80$) und $\alpha = 0,05$ ermittelt werden kann. Dabei ist α das Signifikanzniveau und β die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers vom Typ II.

SCHRUMPF et al. (2011) ermittelten in ihrer europaweiten Studie die Anzahl von 100 Einzelproben (Bohrungen) als ausreichend, um Veränderungen der C-Gehalte bzw. -Vorräte im Boden in einem Zeitraum von 5 - 10 Jahren zuverlässig bestimmen zu können.

STEINMANN et al. (2016) nahmen zum Vergleich der Veränderung der C-Gehalte bzw. -Vorräte von 268 Standorten in Nordrhein-Westfalen nach 9 Jahren differenzierter Bewirtschaftung jeweils 10 Proben pro Standort, welche zu einer Mischproben zusammengefasst wurden.

Die MDD ist stark von der Heterogenität des jeweiligen Parameters in der Fläche bzw. Tiefe sowie vom Grad der Abhängigkeit des Messparameters vom jeweiligen Prüffaktor abhängig. So wurde von YANG et al. (2008) für den Einfluss der Bodenbearbeitung auf die C_{org} -Gehalte des Unterbodens (unterhalb des Pflugbereiches) bei einem Variationskoeffizienten der C-Gehalte von 15,5 % eine Zahl von 40 Proben ermittelt, die nötig sind, um signifikante Unterschiede zwischen mehreren Standorten auszuweisen. Bei höheren Variationskoeffizienten erreichen die nötigen Probenzahlen eine Größenordnung, welche im Rahmen der meisten Untersuchungen aus zeitlichen, personellen und finanziellen Gründen nicht zu leisten sind. Für die Krume konnte an drei Untersuchungsstandorten nur für die obersten beiden Beprobungsschichten (0 - 5 cm, 5 - 10 cm) die notwendige Anzahl an Proben genommen werden, um eine Signifikanz der Unterschiede zwischen den Varianten nach dem Konzept der MDD zu ermitteln (YANG et al. 2008). Anders ausgedrückt war bei einer relativ geringen Probenzahl (10 - 20) pro Variante der mittlere Unterschied zwischen den Varianten kleiner als die MDD und die ermittelten Unterschiede ließen sich nicht statistisch absichern.

Neben der Anzahl der Beprobungspunkte sowie der Anzahl der Proben pro Prüffaktor bzw. Parzelle sind die Beprobungstiefe, die Unterteilung der beprobten Tiefe in mehrere Schichten sowie die Vorgehensweise bei der Beprobung von entscheidender Bedeutung für die Aussagekraft der Ergebnisse.

So wurde in vielen frühen aber auch aktuellen Arbeiten zu Kohlenstoffhaushalt und -dynamik von Ackerböden, insbesondere in Nordamerika, nach der in der Landwirtschaft üblichen Praxis verfahren, welche auf die schnelle und mit geringem Aufwand verbundene Ermittlung von Nährstoffgehalten der (Ober)Krume für die Düngebedarfsermittlung ausgerichtet ist. Dabei wurden i.d.R. Proben bis zu einer Tiefe von max. 30 cm entnommen (VIRTO et al. 2012: 19), welche in eine oder zwei Schichten unterteilt auf ihre Gehalte an C_{org} und Nährstoffen untersucht wurden. Auf der Basis der ermittelten Gehalte wurden dann u.a. Vergleiche von Bodenbearbeitungsverfahren sowie die Berechnung von zeitlichen Dynamiken der C_{org} -Vorräte vorgenommen (z. B. MCCONKEY et al. 2012).

Diese Vorgehensweise geriet in die wissenschaftliche Kritik, weil sie

- den Unterboden als durchwurzelt und, je nach Bearbeitungstiefe, z.T. noch bearbeiteten Bereich des Bodens nicht mit einbezieht
- aufgrund der wenigen Unterteilungen eine tiefen- bzw. schichtdifferenzierte Auswertung der Stoffgehalte bzw. -vorräte nicht ermöglicht
- keine Erfassung der Trockenrohddichte (TRD) bzw. Lagerungsdichte des Bodens vornimmt, sodass die Stoffgehalte nicht in Vorräte umgerechnet werden können und die Vergleiche von Varianten sich aufgrund unterschiedlicher Lagerungsdichten nicht auf gleiche Bodenmassen beziehen

2.4.2 Das Konzept der äquivalenten Bodenmassen

Insbesondere der letztgenannte Kritikpunkt fand Ausdruck im Konzept der äquivalenten Bodenmassen (equivalent soil masses, ESM), welches ursprünglich von POWLSON & JENKINSON (1981) formuliert und später von ELLERT & BETTANY (1995) weiter ausgearbeitet wurde. Dabei weisen die letzteren Autoren daraufhin, dass neben der Erfassung der Trockenrohddichte auch ein Bezug der C-Vorräte auf die gleiche Bodenmasse vorgenommen werden muss, um eine Vergleichbarkeit zwischen Varianten herzustellen. Sie schlagen daher die folgende Vorgehensweise vor:

Auf der Basis der beprobten Tiefe bzw. Schichtdicke und der ermittelten Trockenrohddichte werden die jeweiligen Bodenmassen der Schichten berechnet. Die Masse der Schicht mit der größten Bodenmasse wird als Referenzmasse (100 %) gesetzt bzw. definiert. Für die andere(n) Variante(n) muss ein zusätzliches, unterhalb der Schicht gelegenes Bodenpaket in die Bestimmung der C-Vorräte mit einbezogen werden. Die Dicke dieser Zusatzschicht ergibt sich aus der zur Referenzmasse fehlenden Bodenmasse sowie der TRD der Zusatzschicht. Später (z. B. ELLERT et al. 2008) wurde eine insofern veränderte Vorgehensweise vorgeschlagen, als nunmehr die Masse der Bodenschicht mit der geringsten Bodenmasse als Referenzmasse definiert wird und die entsprechende Schichtdicke in den anderen Varianten abgezogen wird.

In den folgenden Jahren wurden zahlreiche kleinere Weiterentwicklung und Veränderungen an dieser Vorgehensweise vorgeschlagen bzw. vorgenommen. Dabei wurden z.B. die Ergebnisse verglichen, wenn die Referenzmasse sich auf die minimale oder maximale Bodenmasse der unterschiedlichen Varianten bezieht (LEE et al. 2009). Auch weitere Autoren (APPEL 2011, GIFFORD & RODERICK 2003, WENDT & HAUSER 2013, WUEST 2009) sowie ELLERT selbst (z.B. ELLERT et al. 2002, ELLERT et al. 2008) unterzogen die Methodik verschiedenen Überprüfungen und Weiterentwicklungen, welchen sowohl theoretische als auch praktische Aspekte zugrunde liegen. Im Kern wurde das Ergebnis der ursprünglichen Publikation aber bestätigt und es gehört daher mittlerweile zum guten methodischen Standard, C-Vorräte auf der Basis äquivalenter Bodenmassen (statt auf der Basis festgelegter Tiefen) zu berechnen.

Zudem hat es sich in den letzten Jahren durchgesetzt, die Vorräte bis in eine Tiefe, die unterhalb des Bearbeitungshorizontes liegt, zu bestimmen, also zumindest bis 40 cm, häufig sogar 50 oder 60 cm unter der Geländeoberfläche. Je mehr Einzelschichten dabei differenziert werden, desto feiner kann die Verteilung der Stoffgehalte bzw. -vorräte im Tiefenprofil aufgelöst werden. Auf der Basis dieser Verteilung können zudem weitere Parameter wie das Stratifizierungsverhältnis (s.o.) berechnet werden. Der Großteil der (v. a. älteren) Untersuchungen zu diesem Thema basiert aber noch auf ungenügenden Beprobungstiefen. So schreiben VIRTO et al. auf Basis ihrer Metastudie (92 Untersuchungen) im Jahr 2012: „*Studies providing data beyond this depth [30 cm; Anm. d. Verf.] could be of great value in this sense, and are scarce in the literature*“, wobei nur bis Ende 2009 publizierte Untersuchungen mit einer Mindestlaufzeit von fünf Jahren berücksichtigt wurden. Dies

unterstreicht die Langfristigkeit der Erhebung von C-Dynamiken sowie die Verzögerung, mit der methodische Weiterentwicklungen Eingang in die Daten finden.

JACOBS et al. (2015) untersuchten die C_{org} -Vorräte an fünf Standorten, u.a. Lüttewitz, bis in eine Tiefe von 45 cm. Auch aufgrund von nicht erklärbaren großen Unterschieden in den C_{org} -Gehalten bzw. -Vorräten im Unterboden zu unterschiedlichen Beprobungszeitpunkten schlagen sie eine einheitliche, für landwirtschaftliche Pflanzenproduktion relevante Beprobungstiefe von 60 cm vor.

Die Vorgehensweise nach dem Prinzip der äquivalenten Bodenmassen sowie einer ausreichenden Beprobungstiefe ist insbesondere für Vergleiche von Bodenbearbeitungsvarianten essentiell. Dies hat zum einen mit dem typischen Verteilungsmuster der OS und der Nährstoffe im Boden zu tun: Während diese in NT/RT-Systemen zu einer Akkumulation nahe der Oberfläche bzw. Stratifizierung als Funktion der Tiefe tendieren (s. o.), finden sich in CT-Systemen i.d.R. homogene Verteilungen dieser Stoffe in der Krume bzw. Bearbeitungsschicht. In Folge dessen kommt es bei zu flacher Beprobung zu einer Überschätzung der C_{org} - bzw. der Nährstoffe-Vorräte in den NT/RT-Systemen, wie BAKER et al. (2007) darlegen. APPEL (2011) schätzt auf der Grundlage einer Modellrechnung, dass dieser Fehler in Kombination mit einem Tiefen- statt Massebezug in einer Tiefe von ca. 15 - 20 cm sein Maximum erreicht und dabei u.U. über 10 t C ha^{-1} betragen kann. Zum anderen weisen intensiver und tiefer gelockerte Böden i.d.R. geringere Trockenrohdichten auf als nicht oder nur flach bearbeitete Böden. Dies hat zur Folge, dass das zu beprobende Bodenpaket bis in eine größere Tiefe reicht als bei den weniger intensiv gelockerten Böden. Ohne eine Korrektur nach dem Prinzip der äquivalenten Bodenmassen würden die C-Vorräte in den dichter lagernden Varianten daher überschätzt werden (APPEL & BAI 2015).

All diese Überlegungen gehen von der Annahme aus, dass die beprobten Bodenmassen über den Beprobungszeitraum zum überwiegenden Teil erhalten bleiben und lediglich eine Veränderung der Dichte stattfindet. Zeitliche Veränderungen der C_{org} -Vorräte beruhen dabei größtenteils auf biologisch-chemischen Vorgängen (Humifizierung, Mineralisierung) und nicht auf geomorphologischen. Bei erheblichen Umlagerungen von Bodenmaterial durch Erosionsprozesse müssen diese quantifiziert und in die Rechnung einbezogen werden, um insbesondere die zeitliche Veränderungsdynamik der C_{org} -Vorräte analysieren zu können (ELLERT et al. 2008: 36).

Ein weiteres methodisches Problem stellt sich, wenn die zu beprobenden Schichten substantielle Anteile an Grobboden ($> 2 \text{ mm}$) enthalten. Das Problem ergibt sich daraus, dass bei der Berechnung der äquivalenten Bodenmassen aus den ermittelten Trockenrohdichten die Grobbodenanteile mit einbezogen werden (sofern diese nicht über die Größe der verwendeten Stechzylinder hinausgehen). Bei der Ermittlung der Stoffkonzentrationen (z. B. C-Gehalt) wird hingegen nur der Feinboden ($< 2 \text{ mm}$) analysiert. Wird keine Korrektur bei der Berechnung der Stoffvorräte durchgeführt, ergibt sich ein Fehler, dessen Ausmaß proportional zum Anteil an Grobboden in der jeweiligen Beprobungsschicht bzw. dem beprobten Profil ist.

Nach einer Auswertung durch THROOP et al. (2012: 69) von 45 Artikeln, die sich mit der Berechnung von C-Vorräten in landwirtschaftlich genutzten Böden befassen, wird in 43 dieser Artikel bzw. Untersuchungen die Stechzylindermethode zur Ermittlung der Trockenrohdichte verwendet und in 32 dieser 43 keine Angabe zur Trennung von Fein- und Grobboden bei der Dichtebestimmung gemacht. In 8 von 43 Artikeln werden die Masse und das Volumen des Grobbodens bei der Berechnung abgezogen, wodurch sich alle Angaben inkl. der Stoffvorräte lediglich auf den Feinbodenanteil des Bodens beziehen. In diesem Sinne ermitteln z. B. BREULMANN et al. (2016) die Grobbodenanteile im Rahmen ihrer Untersuchungen im Grünland anhand von Eimerproben in der jeweiligen Tiefe bzw. Beprobungsschicht. Die ermittelte „echte Trockenrohdichte“ bzw. Masse des Feinbodens ergibt sich dann, in Anlehnung an DON et al. (2007), aus der Verrechnung der jeweiligen Massen und Volumina des Feinbodens und Grobbodens sowie einer mittleren Dichte der Grobbodenan-

teile von $2,6 \text{ g cm}^{-3}$ nach der Formel $\text{TRD (Feinboden)} = \text{Masse (Feinboden)} / \text{Volumen (Feinboden)}$. Nach THROOP et al. (2012) sollte hingegen am besten die Masse des Feinbodens zum Gesamtvolumen des Stechzylinders in Beziehung gesetzt werden, um flächen- bzw. volumenbezogene Stoffvorräte im Boden berechnen zu können. Dieses Vorgehen wird auch von ELLERT et al. (2001: 136) für die Berechnung der TRD in steinreichen Böden vorgeschlagen.

WALTER et al. (2016) untersuchen und vergleichen verschiedene Methoden zur exakten Bestimmung der Trockenrohddichte von Ackerböden, allerdings für vier Standorte bzw. Böden in Deutschland mit sehr geringen Grobbodenanteilen, sodass der Faktor Grobboden nicht beachtet wird.

LAL & KIMBLE (2001: 42) schlagen vor, neben der Korrektur der Trockenrohddichte, die Stoffgehalte (i. d. F. C-Gehalte) anhand der ermittelten Grobbodenanteile in effektive Stoffgehalte umzurechnen.

Idealerweise sollten die Trockenrohddichte, die Grobbodenanteile und die jeweiligen Stoffgehalte an der gleichen Probe ermittelt werden (ELLERT et al. 2001: 139). Dies ermöglicht sowohl die Korrektur der Stoffgehalte bzw. -vorräte anhand des Grobbodenanteils als auch die Korrektur der Trockenrohddichten ohne einen zusätzlichen Fehler durch Unterschiede in den Grobbodenanteilen.

3 Untersuchungsstandorte

Die beiden Untersuchungsstandorte Lüttewitz und Methau befinden sich im nördlichen Teil des Landkreises Mittelsachsen im Freistaat Sachsen. Es handelt sich um zwei Dauerversuchsflächen, auf denen jeweils seit 1992 die Auswirkungen unterschiedlicher Grundbodenbearbeitungsverfahren auf unterschiedliche Aspekte der landwirtschaftlichen bzw. ackerbaulichen Nutzung untersucht werden. Dazu zählen insbesondere Fragen der Vorbeugung von Erosionsereignissen sowie des Pflanzenertrages nebst damit zusammenhängender Teilaspekte wie der Bodenfruchtbarkeit, der Bodenfeuchte sowie der mechanischen bzw. chemischen Unkrautbekämpfung.

Der Fokus der vorliegenden Untersuchung liegt auf den Auswirkungen der unterschiedlichen Grundbodenbearbeitungsverfahren auf die Kohlenstoff- und Nährstoffdynamik. Zum besseren Verständnis der Vorgehensweise bei der Beprobung und der Auswertung der Daten werden beide Standorte im Hinblick auf ihre naturräumlichen Voraussetzungen und ihren Versuchsaufbau vorgestellt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auch auf der Herausarbeitung von Unterschieden zwischen beiden Standorten.

Beide Standorte liegen, nach der aktuellen Einteilung des LfULG, in der Agrarstrukturregion 3 „Mittelsächsisches Lössgebiet“ (LfULG 2012). Diese umfasst mit ca. 570 000 ha etwa 31 % der Landesfläche und weist einen Anteil von 63 % landwirtschaftlicher Fläche auf. Sie umfasst damit 38 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche Sachsens.

Der Jahresniederschlag für diese Region wird mit ca. 700 mm und leicht steigender Tendenz angegeben, die Jahresmitteltemperatur mit ca. 9°C und ebenfalls steigender Tendenz. Die Vegetationszeit umfasst ca. 220 Tage, in welcher die klimatische Wasserbilanz mit -175 mm (1991 - 2005) negativ ausfällt. Der mittlere Humusgehalt unter Ackerland wird mit 2,9 % angegeben (C_{org} : 1,68 %), die mittlere Hangneigung unter Ackerland mit 3,8 %. Die durchschnittliche Ackerzahl liegt bei 57.

3.1 Lüttewitz

Die Dauerversuchsfläche Lüttewitz, welche 1992 von der Südzucker AG angelegt und seitdem in nahezu unveränderter Form betrieben wird, liegt zwischen den drei Orten Lüttewitz / Petersberg, Prüfern und Markritz in der Lommatzcher Pflege, einer Subregion des Mittelsächsischen Lösshügellandes.

Die Lommatzscher Pflege ist, insbesondere aufgrund der fruchtbaren Böden („Dunkelbraune Parabraunerden“, MANNSFELD 2008) das leistungsfähigste Agrargebiet Sachsens und wird traditionell als „Kornkammer Sachsens“ bezeichnet. Der Untersuchungsschlag hat eine Gesamtfläche von ca. 30 ha und eine maximale Ausdehnung von ca. 1000 m von Nord nach Süd sowie von ca. 600 m von Ost nach West (Abbildung 1). Die Ackerzahl liegt bei 75 (TEIWES 2005).

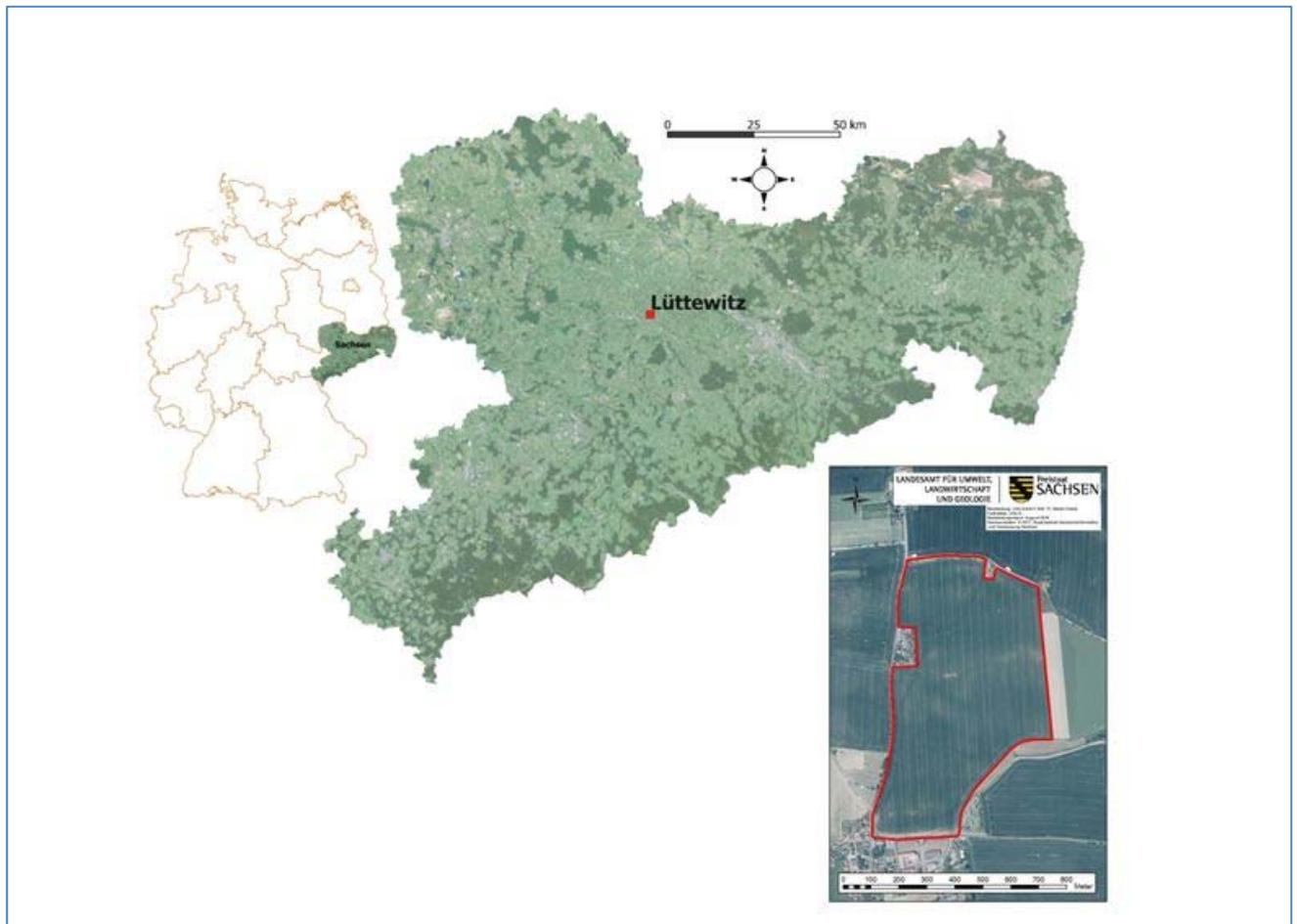


Abbildung 1: Lage des Untersuchungsstandortes Lüttewitz

3.1.1 Klima

Das Untersuchungsgebiet gehört zur feuchtgemäßigten Klimazone mit leicht kontinentalem Einfluss (warmen Sommern), welcher für Gebiete im Osten Deutschlands aufgrund der Lage im Lee der Mittelgebirge charakteristisch ist. Allgemein werden für die Region Eckdaten von 8,3 - 8,8° C als jährliche Durchschnittstemperatur sowie 600 - 700 mm Niederschlag als langjähriges Mittel angegeben (HAASE & MANNSFELD 2008). In Vorarbeiten zu dieser Untersuchung werden die langjährigen Mittel von Niederschlag und Temperatur mit 643 mm und 8,1° C (KELLER 2006, SCHMIDT ET AL. 2002) bzw. 607 mm und 9,2° C (THIEL 2010 für den Zeitraum 1993 bis 2007) angegeben. KOCH (2010) gibt für den Standort mit 572 mm Niederschlag und 8,6° C (Zeitraum: 1961 - 1990) gar noch niedrigere Werte an.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Messdaten der vom Auftraggeber betriebenen Klimastation in Nossen ausgewertet, für welche Daten seit April 1999 online verfügbar sind (FREISTAAT SACHSEN 2016) und welche ca. 9 km vom Untersuchungsschlag entfernt liegt. Basierend auf diesen Daten betragen die langjährigen Mittel (1999 bis 2015) von Niederschlag und Temperatur 698 mm und 9,5° C. Für den Untersuchungszeitraum von 2012 bis 2015 wurden Mittelwerte von 666 mm Jahr⁻¹ und 9,7° C errechnet. Dabei traten erhebliche Un-

terschiede zwischen den Einzeljahren auf, welche im Detail dem Klimadiagramm entnommen werden können (Abbildung 2).

Einige Besonderheiten sollen an dieser Stelle aufgrund ihrer Relevanz für die Auswertung dennoch hervorgehoben werden:

- Der Winter 2012 / 2013 war sehr kalt im Vergleich zum langjährigen Mittel, insbesondere die Monate Dezember bis März
- Im Frühjahr 2013 traten mehrere Starkniederschlagsereignisse ($> 25 \text{ mm Tag}^{-1}$) auf (insbesondere zwischen dem 30.05. und dem 03.06.). Die Monate Mai und Juni 2013 weisen mit zusammen ca. 330 mm Niederschlag etwa die Hälfte des mittleren Jahresniederschlages auf, wobei allein 192 mm auf den Zeitraum vom 25.5. bis 03.06. entfallen und weitere 70 mm auf den Zeitraum vom 20.06. bis 26.06.
- Die Winter 2013/2014 und 2014/2015 waren relativ warm und relativ niederschlagsarm im Vergleich zum langjährigen Mittel
- Der Herbst 2014 (September - November) sowie der Sommer 2015 (Juli / August) waren sehr warm im Vergleich zum langjährigen Mittel

3.1.2 Geologie

Die Region des Mittelsächsischen Lösshügellandes ist durch eine mächtige weichselzeitliche Lössbedeckung geprägt, welche in günstigen Reliefpositionen (Dellen) zusammen mit älteren Lössablagerungen Mächtigkeiten von bis zu 20 m erreichen kann (HAASE 2008). Dabei nimmt die Mächtigkeit der Lössbedeckung von der Lössrandstufe nach Süden sowie mit ansteigender Höhe über NN ab (WOLF 2009: 64). Der Löss in der Region um Lommatzsch hat eine typische Korngrößenverteilung von 5 - 6 % Sand (v.a. Feinsand), 75 – 80 % Schluff und 15 – 20 % Ton (MESZNER 2008). Lüttewitz liegt, nach älteren Einteilungen in Lössprovinzen (LIEBEROTH 1963), an der Grenze der Mulde-Lössprovinz zur Elbe-Lössprovinz, wobei letztere die größten Mächtigkeiten an kalkhaltigem Löss in Sachsen aufweist. Der Standort kann daher als repräsentativ für die mittelsächsischen Lössgebiete angesehen werden.

Das unter dem Löss liegende Grundgebirge, welches lediglich in Flusstälern sowie in stark erodierten Kuppen zum Vorschein kommt, ist insbesondere durch Schiefergesteine gekennzeichnet. Auf der Versuchsfläche sind dies im wesentlichen Grauwackenschiefer (TEIWES 1997), welche im zentralen Bereich der Fläche in einer Kuppenposition oberflächennah anzutreffen sind.

Die Relief- und Bodenentwicklung der Region und der Untersuchungsfläche ist stark von den Lössablagerungen geprägt.

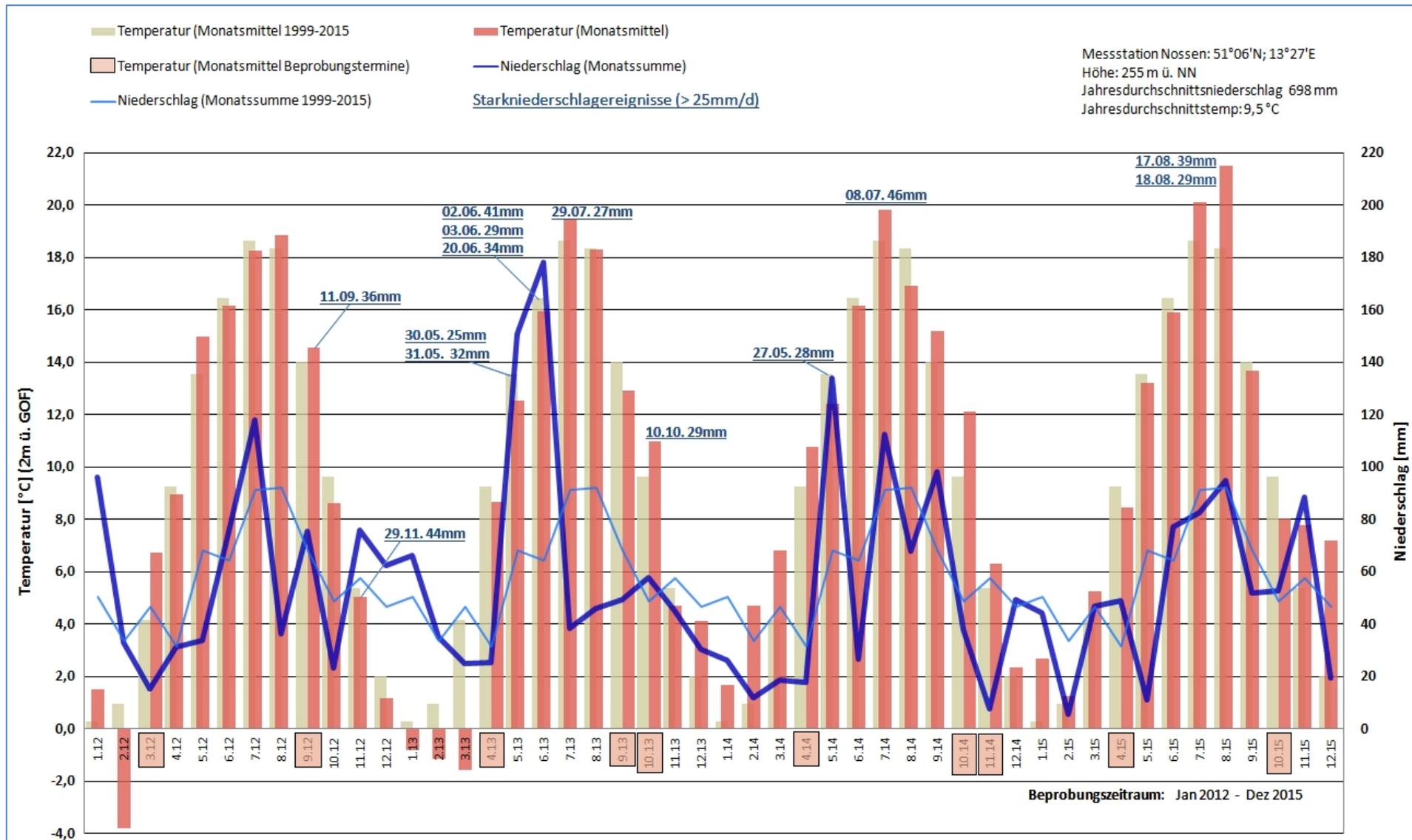


Abbildung 2: Witterung in der Region des Untersuchungsstandortes Lüttewitz im Untersuchungszeitraum 2012 bis 2015

(Datengrundlage: Daten der Klimastation Nossen des LfULG; eigene Darstellung)

3.1.3 Relief

Der Untersuchungsschlag umfasst Höhen von 250 - 280 m ü. NN (Abbildung 3). Dabei befinden sich die höchstgelegenen Flächenanteile im Norden und im Südwesten der Fläche sowie auf einer zentralen Kuppe. Eine Delle im Südosten der Fläche, welche das Quellgebiet des weiter östlich entspringenden Markritzer Baches darstellt, beherbergt die am niedrigsten gelegenen Flächenanteile. Die Fläche zählt zum Einzugsgebiet des Ketzerbaches.

Die maximalen Hangneigungen liegen bei ca. 15 % und finden sich im Hangbereich zwischen der zentralen Kuppe und der Delle im Südosten der Fläche. MESZNER (2008: 53) gibt für die Lössgebiete der Lommatzcher Pflege durchschnittliche Hangneigungen von 4 - 7° (ca. 7 - 12 %) an. Insofern kann der Untersuchungsschlag als repräsentativ für das Untersuchungsgebiet angesehen werden.

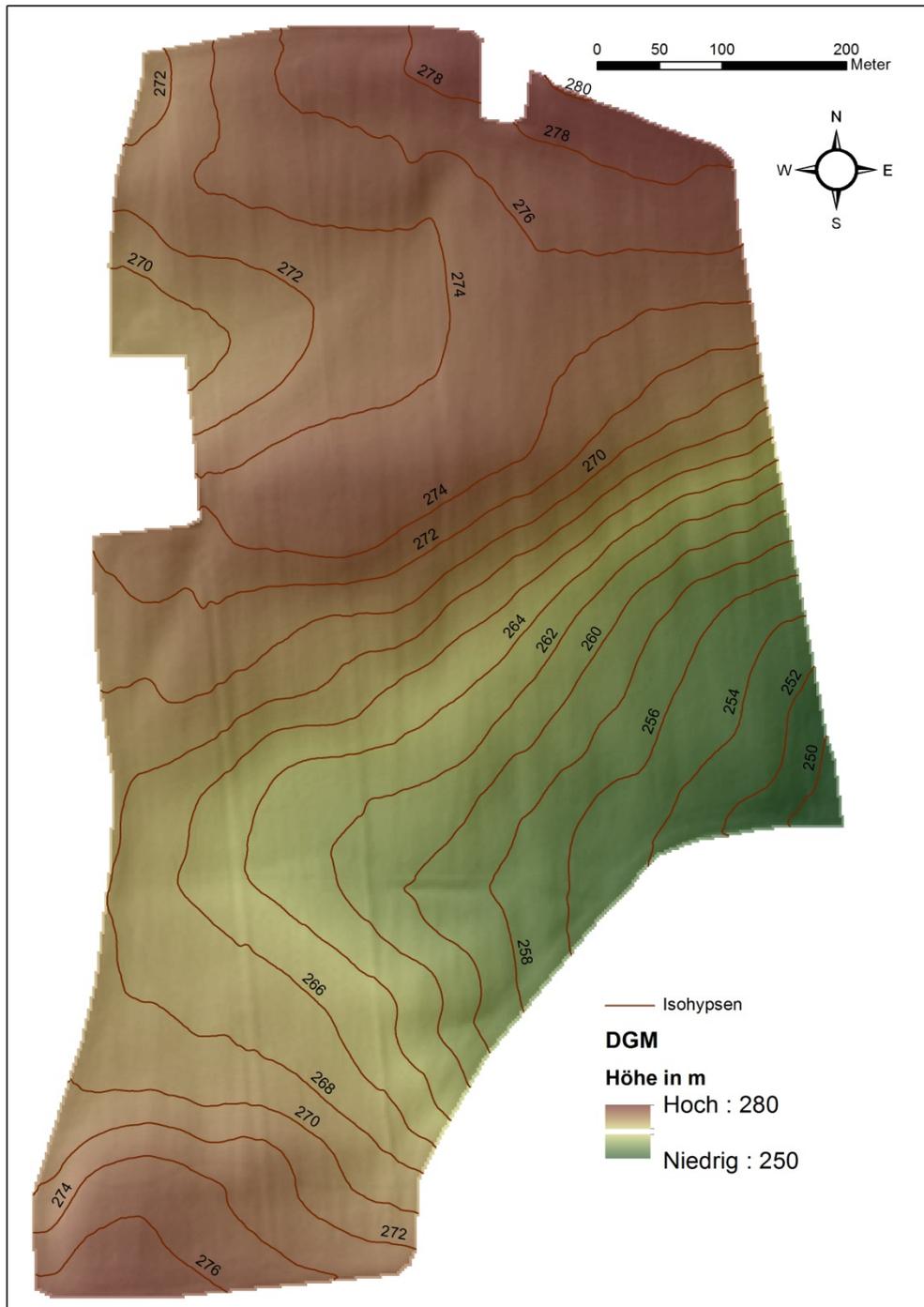


Abbildung 3: Digitales Höhenmodell der Untersuchungsfläche in Lüttewitz
(Datengrundlage: DGM2 GeoSN 2012, eigene Darstellung)

3.1.4 Böden

Das bodenbildende Substrat in der Untersuchungsregion ist Löss bzw. Lösslehm, aus welchem sich unter spätholozänen (feuchten) Klimabedingungen die für dieses Ausgangssubstrat typischen Parabraunerden und Fahlerden gebildet haben, teilweise mit Übergängen zum Pseudogley. Bis zum Spätatlantikum dominierte unter kontinentalen Klimabedingungen vermutlich die Bildung von Schwarzerden (MESZNER 2008: 33). Die Bodenprofile sind i.d.R., je nach Reliefposition, durch die lange und intensive agrarische Nutzung verkürzt bzw. kolluvial überdeckt (MESZNER 2008: 34). Daraus ergibt sich ein kleinräumiges Bodenmosaik, welches durch erhebliche Unterschiede in der Wasserhaltekapazität und Nährstoffversorgung gekennzeichnet ist.

Aufgrund der Auswaschung der Karbonate im humiden spätholozänen Klima wird allgemein für das Mittelsächsische Lösshügelland eine Karbonatfreiheit bis 1,5 - 2 m unter GOF angegeben (TEIWES 1997), wobei Untersuchungen auf dem Schlag eine Karbonatfreiheit bis mindestens 1 m unter GOF ergaben (TEIWES 1997, TEIWES 2005). MESZNER (2008: 34) gibt eine durchschnittliche Entkalkungstiefe von 1,6 m für die Lommatzcher Pflege an.

Nach BK 50 (LfULG 2012) sind auf der Versuchsfläche drei verschiedenen Bodentypen vertreten:

- Kolluvisol aus ungelagertem Schluff (Kolluvialschluff)
- Parabraunerde aus periglaziärem Schluff über periglaziärem Ton (Lösslehm)
- Pseudogley-Parabraunerde aus periglaziärem Schluff (Lösslehm)

Für die Untersuchungsfläche sind keine bodenkundliche Aufnahmen bzw. Profile durch das LfULG beschrieben.

Ein Vergleich der Bodenkarten nach LfULG (2012) und TEIWES (1997) (Abbildung 4) ergibt für die Karte von TEIWES eine stärkere räumliche und inhaltliche Differenzierung, welche insbesondere eine starke Korrelation der Bodentypen mit den Reliefmerkmalen aufweist. Vor dem Hintergrund eines zu erwartenden starken Einflusses von reliefabhängigen Prozessen der Verlagerung von Oberbodenmaterial auf die Gehalte bzw. Vorräte verschiedener Stoffe im Boden, wie ihn auch THIEL (2002: 66 ff.) bereits feststellte, kann diese stärkere Differenzierung für eine Auswertung der Beprobungspunkte nach Gruppen oder Clustern nützlich sein. Die Festlegung der Beprobungspunkte durch THIEL (2002) bzw. KELLER (2006) erfolgte dabei in der Weise, dass die verschiedenen Relief- und Bodentypen möglichst repräsentativ abgebildet werden.

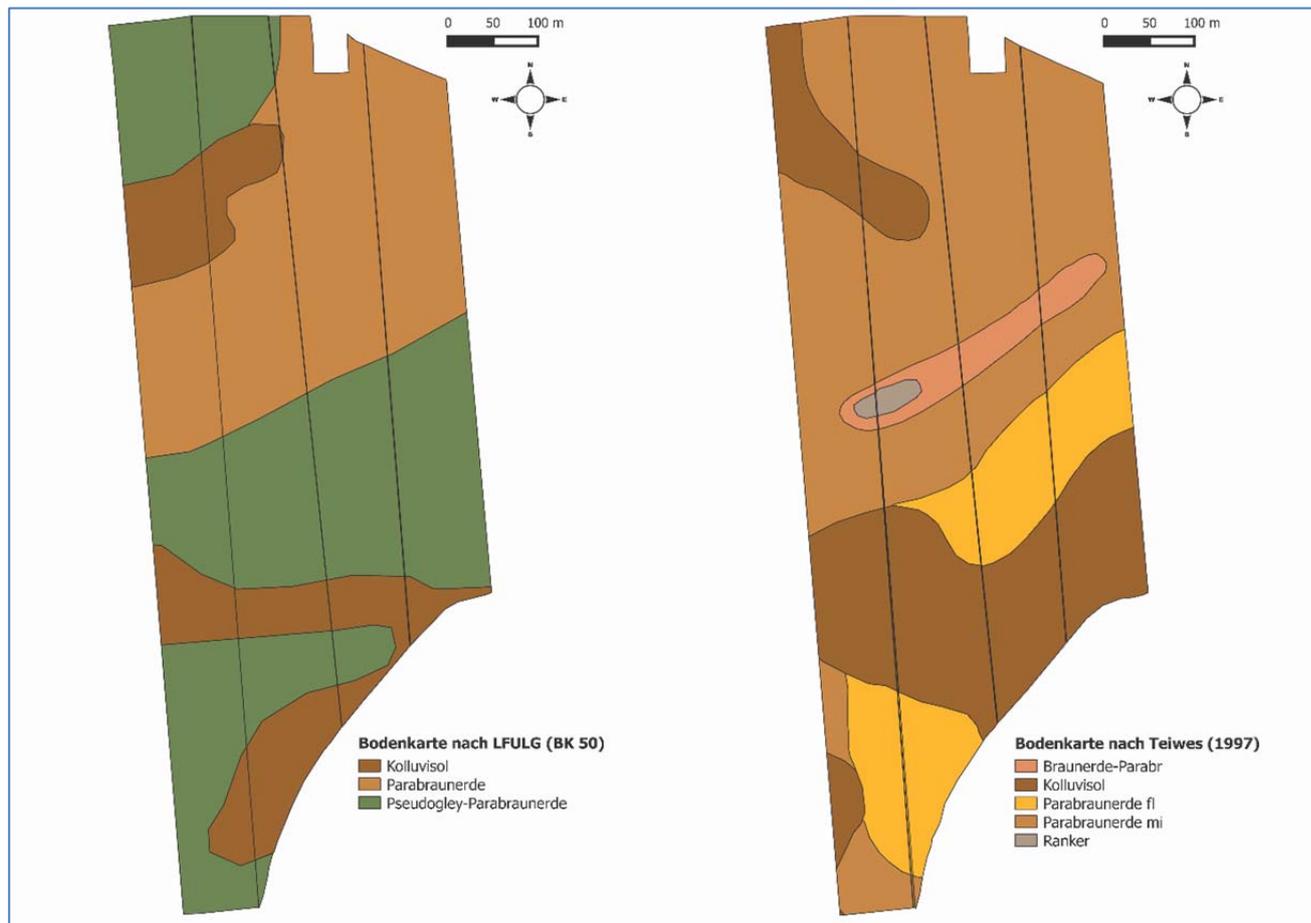


Abbildung 4: Bodenkarten der Untersuchungsfläche in Lüttewitz nach LfULG (2012) und Teiwes (1997)

Die dominierende Bodenart auf der Untersuchungsfläche ist nach TEIWES (1997) ein mittel toniger Schluff (Ut3) sowie teilweise, insbesondere im Unterboden, auch ein stark toniger Schluff (Ut4). Diese Bodenarten wurden mittels Fingerprobe von KELLER (2006) bestätigt. Diese Bodenarten können als typisch für landwirtschaftlich genutzte Parabraunerden aus Löss gelten, für welche das KTBL als Faustzahlen eine Textur mit 5 % Sand, 75 % Schluff und 20 % Ton angibt (DÖHLER 2009: 183).

Im einem kleinen Hangbereich südlich der zentralen Kuppe wurden zudem erhebliche Grobbodenanteile festgestellt, welche im Ap-Horizont aus 15 - 40 Masse-% Grus sowie 15 - 40 Masse-% kantigen Steinen und Blöcken bestehen (TEIWES 1997). Diese Grobbodenanteile steigen mit der Tiefe im Bodenprofil weiter an. Im Bereich der von TEIWES mit dem Bodentyp Braunerde-Parabraunerde klassifizierten Flächenteile, ebenfalls unmittelbar südlich der zentralen Kuppe gelegen, wurden erst ab einer Tiefe von ca. 50 cm unter GOF Grobbodenanteile festgestellt.

Aufgrund der geringen räumlichen Verbreitung dieser Grobbodenanteile wurden sie im Rahmen der vorliegenden Untersuchung bei der Berechnung der Stoffvorräte nicht berücksichtigt.

Die Böden der Untersuchungsfläche werden mit einer durchschnittlichen Bodenzahl von 75 nach Bodenschätzung bewertet (TEIWES 1997).

3.1.5 Bewirtschaftung

Der Untersuchungsschlag wurde bis 1992 einheitlich konventionell mit dem Pflug bearbeitet. 1992 wurden zu Untersuchungszwecken vier Nord-Süd-ausgerichtete Streifen mit unterschiedlichen Grundbodenbearbeitungsverfahren angelegt (Abbildung 5).

Von West nach Ost sind dies folgende Parzellen (mit Angabe der Fläche):

- Pflug (P) - 9,6 ha
- Direktsaat (D) - 8,2 ha
- Konservierend (Mulchsaat) (K) - 7,5 ha
- Konservierend Locker (KL) - 5,6 ha

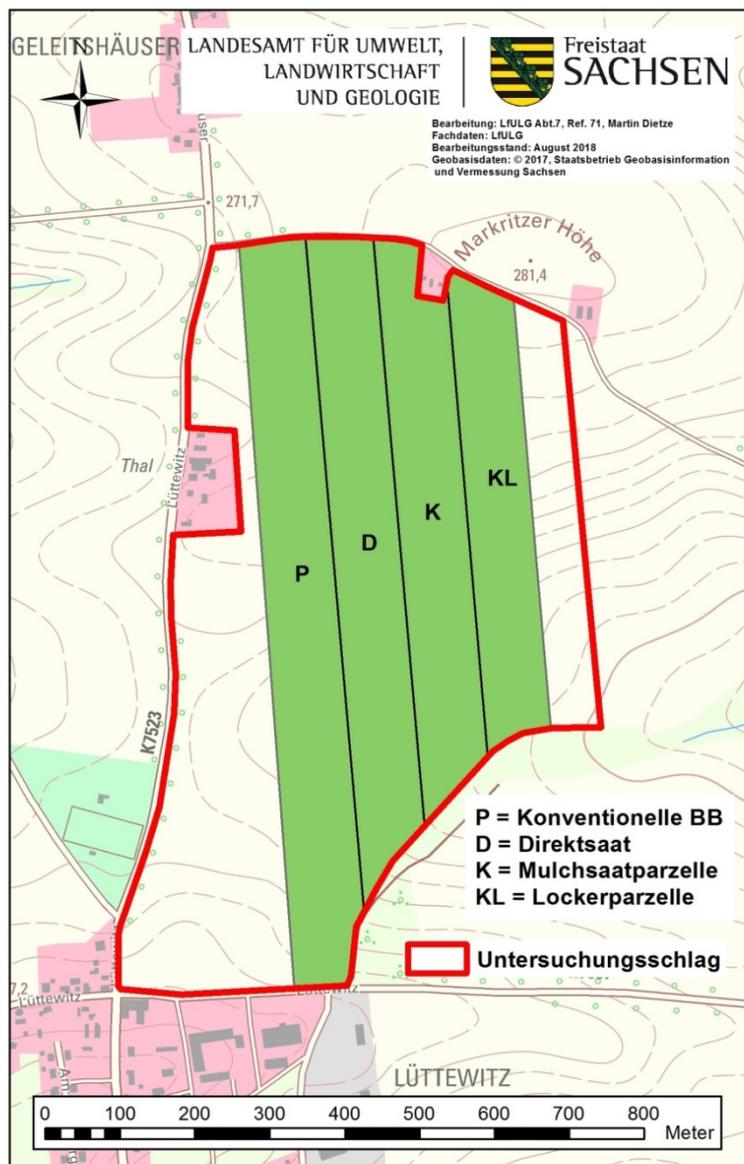


Abbildung 5: Lage der Bodenbearbeitungsparzellen auf dem Untersuchungsschlag Lüttewitz

Die Fruchtfolge ist seit 1999 Winterweizen (WW) - Winterweizen - Zuckerrübe (ZR), mit der Zwischenfrucht Ackersenf zwischen dem WW und der ZR. Alle Maßnahmen außer der Bodenbearbeitung, also Düngung, Unkrautbekämpfung etc., erfolgen für alle Parzellen gleich. Die für diese Untersuchung zentralen Bewirtschaftungsmaßnahmen (Kulturart, Bodenbearbeitung, Düngung, Aussaat- und Erntetermine sowie Erträge) sind für den Untersuchungszeitraum in Abbildung 8 dargestellt. Die Nebenprodukte bzw. Erntereste (Stroh, Zuckerrübenblatt) verbleiben in allen Varianten auf der Fläche.

In der Variante Pflug (P) findet eine regelmäßige (jährliche) Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug bis max. 30 cm Tiefe statt.

In der Variante Direktsaat (D) findet keine Grundbodenbearbeitung statt. Lediglich zur Aussaat der ZR (und damit alle drei Jahre) findet ein flaches Grubbern mit einem Köckerling Exaktgrubber bis ca. 4 cm Tiefe statt.

In der Variante Konservierend (K) findet eine regelmäßige (jährliche) Bodenbearbeitung mit dem Grubber bis max. 15 cm Tiefe statt.

In der Variante Konservierend Locker (KL) findet eine regelmäßige (jährliche) nichtwendende Bodenbearbeitung mit dem Grubber bis max. 25 cm Tiefe sowie eine periodische Tiefenlockerung mit dem Tiefenmeißel bis max. 40 cm Tiefe statt. Letztere Maßnahme wurde im Untersuchungszeitraum einmalig am 30.09.2015 durchgeführt.

Die Grenze zwischen den Bearbeitungsvarianten Pflug und Direktsaat kann i.d.R. nach der Ernte aufgrund des Bedeckungsgrades erkannt werden, wie in Abbildung 6 aus dem Herbst 2015 ersichtlich wird.



Abbildung 6: Grenze zwischen den Bearbeitungspartellen Pflug und Direktsaat im Herbst 2015
(Foto: Fabian Kirsten)

Auf der Basis der Feldbücher wurden die mittleren Erträge für den Zeitraum 2002-2015 für die beiden Fruchtarten Zuckerrübe (n = 5) und Winterweizen (n = 9), nach Bodenbearbeitungsvarianten differenziert, berechnet (Tabelle 1):

Tabelle 1: Mittlere absolute und relative Erträge am Standort Lüttewitz im Zeitraum 2002 bis 2015 (Datengrundlage: Bewirtschaftungsberichte Südzucker AG)

Fruchtart	Variante	mittlerer Ertrag [dt ha ⁻¹]	Differenz zu P [dt ha ⁻¹]	Ertrag [%] (P=100%)
ZR	P	761,65		100,0
	D	725,27	-36,38	95,2
	K	743,76	-17,89	97,7
	KL	681,33	-80,32	89,5
WW	P	89,28		100,0
	D	87,06	-2,21	97,5
	K	88,73	-0,55	99,4
	KL	84,62	-4,66	94,8

Erläuterungen – Tabelle 1: P: Pflug; D: Direktsaat; K: konservierend; KL: konservierend locker

Die Variante Pflug erzielte bei beiden Fruchtarten im Mittel die höchsten Erträge, die Variante KL die niedrigsten. Der Unterschied beträgt für die Zuckerrübe ca. 80 dt ha⁻¹, für Winterweizen ca. 5 dt ha⁻¹, was ca. 90 % (ZR) bzw. 95 % (WW) des Ertrages der Pflugparzelle entspricht. Die Variante K weist für beide Fruchtarten die zweithöchsten mittleren Erträge auf, welche um ca. 18 dt ha⁻¹ (ZR) bzw. 0,5 dt ha⁻¹ (WW) unter jenen der Pflugparzelle liegen. Die mittleren Erträge der Variante D liegen um ca. 36 dt ha⁻¹ (ZR) bzw. 2 dt ha⁻¹ (WW) unter jenen der Pflugparzelle. Die mitunter erheblichen Schwankungen der Erträge zwischen den Jahren sowie die jeweiligen Unterschiede zwischen den Parzellen sind dabei stark von der Witterung beeinflusst.

JACOBS et al. (2015: 4) geben als mittlere Erträge für den Zeitraum 1997 - 2001 folgende Werte an:

■ Winterweizen (n = 8, 85 % TM):

- P = 85 dt ha⁻¹
- D = 80 dt ha⁻¹
- K = 84 dt ha⁻¹

■ Zuckerrübe (n = 4, Frischmasse):

- P = 650 dt ha⁻¹
- D = 600 dt ha⁻¹
- K = 630 dt ha⁻¹

Die Erträge lagen folglich in den ersten Versuchsjahren (1997 bis 2001) etwas niedriger als im späteren Versuchsverlauf. Der mittlere Unterschied zwischen beiden Zeiträumen beträgt in allen Varianten ca. 5 dt ha⁻¹ für den Winterweizen und ca. 100 dt ha⁻¹ für die Zuckerrübe. An den relativen Ertragsunterschieden zwischen den Varianten haben sich hingegen nur minimale Veränderungen ergeben. Neben dem Einfluss der Witterung in den Einzeljahren spricht dies für eine bewirtschaftungsbedingte Erhöhung des Ertragsniveaus bzw. der Produktivität in allen (drei) Bodenbearbeitungsvarianten.

3.1.6 Erosionsproblematik

HAASE & MANNSFELD (2008: 138) geben für die Lommatzscher Pflege bzw. das Mittelsächsische Lösshügelland mit typischen Schlaggrößen von über 50 ha aufgrund der intensiven ackerbaulichen Nutzung in Kombina-

tion mit verschlammungs- und erosionsbegünstigenden Bodenarten eine hohe Erosionsanfälligkeit als Hauptrisikofaktor der Landnutzung an. Die aus bis zu 5 dm mächtigen Kolluvien sowie gekappten Profilen abgeleitete starke historische Erosionsdynamik, welche sich in der Gegenwart fortsetzt, führt zu einer hohen Überschwemmungshäufigkeit sowie starken Nährstoffeinträgen in die Vorfluter. Hinzu kommt die für die Region charakteristische Windoffenheit, welche eine lokal sehr ungleiche Feuchteanreicherung im Boden als Folge von Schneeverwehungen führt, aus welcher eine Verstärkung der Bodenerosion in der Auftauphase im Frühjahr resultieren kann (HAASE & MANNSFELD 2008: 140).

Die Mechanismen und Ursachen sowie die Verbreitung und Formen der Erosion in der Untersuchungsregion können z. B. bei WOLF (2009: 40 ff.) nachgelesen werden. Dieser beschreibt die landwirtschaftliche Bodenbearbeitung zunächst als Auslöser rezenter Erosionprozesse. Zugleich werden aber linienhafte Erosionsformen durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen verfüllt und dadurch, zumindest vorübergehend, beseitigt. Diese Formen tragen, solange sie noch verfüllbar sind, den Namen *Ephemeral Gully* (WOLF 2009: 47). Gleichwohl wird das erodierte Oberbodenmaterial durch Unterbodenmaterial ersetzt, was auf Dauer zu einer Kappung des kleinräumigen Oberflächenreliefs führt und an Oberhängen bzw. Kuppen zu nahezu komplett erodierten A/C-C-Profilen führen kann.

Auch auf der Untersuchungsfläche konnten zu mehreren Zeitpunkten während der Untersuchung flächen- und linienhafte Erosionsprozesse bzw. -formen beobachtet werden. Wie bei WOLF (2009) beschrieben schließt an eine linienhafte Erosionsform bei nachlassender Hangneigung bzw. Transportkapazität (häufig) ein Sedimentfächer an. Diese traten z.B. im Frühjahr 2012 im Bereich einer kleinen, nach Westen ausgerichteten Delle im Nordwesten der Fläche im Bereich der Pflugparzelle auf (Abbildung 7). Für diesen Bereich der Fläche hat bereits THIEL (2002: 71) linien- und flächenhafter Erosionsformen dokumentiert.



Abbildung 7: Schwemmfächer auf der Pflugparzelle im Frühjahr 2012 am Standort Lüttewitz
(Foto: Susann Förster)

WEGENER (2001: 51) berechnete mit dem Modell „Erosion 2D“ für die Pflugparzelle auf dem Untersuchungsschlag bei Zuckerrübenanbau für den Zeitraum Anfang Mai - Anfang September eines Referenzjahres einen Nettofeststoffaustrag von 10,3 t Boden ha⁻¹. In den anderen drei Bodenbearbeitungsvarianten fand hingegen kein nennenswerter Feststoffaustrag statt. Für ein Extremereignis mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von fünf Jahren wurde, ebenfalls mit Erosion 2D, ein Nettofeststoffaustrag aus der jeweiligen Parzelle von 5,1 t Boden ha⁻¹ für die Variante P ermittelt, gegenüber 0,23 t ha⁻¹ in der Variante KL, 0,19 t ha⁻¹ in der Variante K und 0,14 t ha⁻¹ in der Variante D.

Die Erosionsproblematik der Region sowie die Möglichkeiten der Prävention durch konservierende Bodenbearbeitungsverfahren konnten für Mittelsachsen in zahlreichen Studien nachgewiesen werden (MACHULLA & NITZSCHE 2008, NITZSCHE et al. 2002, SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2004, SCHMIDT ET AL. 2002). Die konservierende Bodenbearbeitung gilt daher auch weiterhin als eine zentrale Maßnahme zur Verhinderung von Erosion sowie des landwirtschaftlichen Boden- und Gewässerschutzes in Sachsen.

3.1.7 Ausgangsdaten

Für den Standort Lüttewitz existieren zahlreiche Bodendaten aus Voruntersuchungen. Dies sind zum einen Untersuchungen des Institutes für Zuckerrübenforschung (IfZ), welches den Dauerfeldversuch Lüttewitz seit Versuchsbeginn (1992) wissenschaftlich betreut. Zum anderen handelt es sich um Untersuchungen der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) bzw. in deren Nachfolge des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), i. d. R. in Kooperation mit wissenschaftlichen Einrichtungen. Hierbei sind insbesondere die Diplomarbeiten (Universität Leipzig, Institut für Geographie) von THIEL (2002) sowie KELLER (2006) sowie die daran anknüpfende Dissertation (Universität Halle, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften) von THIEL (2010) zu nennen.

Eine Vergleichbarkeit der genannten Datensätze untereinander sowie zu den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung ist nur eingeschränkt gegeben. Dies liegt zum einen an der jeweils unterschiedlichen Anzahl und Verortung der Beprobungspunkte auf der Fläche und zum anderen an den unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Beprobung selbst sowie der Auswertung (Beprobungstiefen, Labormethoden, Umrechnung von Gehalten in Vorräte bzw. Massen).

Im Folgenden werden die vorhandenen Daten in zumeist tabellarischer Form dar- und einige zentrale Ergebnisse herausgestellt. Dabei werden die Datenquelle, die Variante, die Beprobungstiefe bzw. -schicht, die Anzahl der Beprobungspunkte sowie die jeweiligen Gehalte bzw. Vorräte an Kohlen- und Stickstoff sowie der Makronährstoffe aufgeführt. Liegt keine Information vor, wird dies mit einem Fragezeichen gekennzeichnet. Eine ausführliche Diskussion sowie insbesondere ein Vergleich zu den eigenen Daten erfolgt im Kapitel Diskussion.

Mehrere Beprobungskampagnen wurden durch das IfZ in Göttingen durchgeführt. Die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse können zum großen Teil in JACOBS et al. (2015) bzw. KOCH (2010, unveröffentlicht) nachgelesen werden. Ergänzende Daten wurden mit freundlicher Genehmigung des IfZ für diesen Bericht zur Verfügung gestellt (Persönliche Mitteilung IfZ 2016).

Zunächst wurden im Jahr 1995 durch das IfZ innerhalb jeder der vier Bodenbearbeitungsparzellen (P, D, K, KL) vier repräsentative Messpunkte ausgewählt, an denen mittels Mischproben die bodenchemischen Parameter C_t, N_t, P (CAL) und K (CAL) in den Schichten 0-10 cm, 10-20 cm sowie 20-30 cm erhoben wurden. Bei der Berechnung der jeweiligen Stoffvorräte für C_{org} bzw. N_t erfolgte, neben der Verrechnung mit den ebenfalls erhobenen Trockenrohdichten, eine Korrektur auf eine einheitliche Bodenmasse. Dadurch wird ein direkter Vergleich zwischen den Varianten ermöglicht.

Für die Beprobung im Jahr 2005 wurde von TEIWES in den Parzellen P, D und K je ein repräsentatives Messfeld mit den Ausmaßen 40 m x 40 m ausgewiesen (TEIWES 2005). Die Messfelder wurden so ausgewählt,

dass die Bodeneigenschaften innerhalb bzw. zwischen den Messfeldern möglichst homogen sind, um eine von den Standortheterogenitäten unabhängige Vergleichbarkeit zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten zu gewährleisten. Je Messfeld wurden, neben der Trockenrohddichte, die Parameter C_t , N_t , pH-Wert, Carbonatgehalt sowie P (CAL), K (CAL) und Mg (CaCl_2) in den Schichten 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm und 30-45 cm bestimmt. Aus der Differenz von C_t und C_{anorg} (Karbonat) wurde der C_{org} -Gehalt berechnet. Die Mischproben bestanden aus drei Teilproben je Messfeld.

Im Jahr 2010 wurde eine weitere Beprobung durch das IfZ durchgeführt. Dabei wurden, aus Gründen der Vergleichbarkeit, sowohl die vier Messpunkte aus dem Jahr 1995 als auch die Messfelder aus dem Jahr 2005 mit der jeweiligen Methodik erneut beprobt. Für diesen Termin liegen allerdings keine Daten für die Nährstoffgehalte vor. Zudem wurde die Variante KL nicht berücksichtigt.

Alle nachfolgend aufgeführten Daten des IfZ können in Tabelle 2 und Tabelle 3 nachvollzogen werden. Im Rahmen der Beprobung 1995/1996 wurden am Standort Lüttewitz in der Tiefe 0-30 cm C_t -Gehalte zwischen 0,94 % (KL) und 1,01 % (D) ermittelt. Die N_t -Gehalte lagen bei 0,10 (P, K, KL) bzw. 0,11 % (D). Aus der Verrechnung mit der Trockenrohddichte sowie der Anpassung auf eine äquivalente Bodenmasse von ca. 4100 t ha^{-1} ergab sich eine C_t -Masse zwischen $39,1 \text{ (D)}$ und $41,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$. Die C_t -Masse der Variante P lag mit $40,4 \text{ t ha}^{-1}$ dazwischen, für die Variante KL wurden keine Vorräte berechnet. Die korrigierten bzw. bodenmasseäquivalenten N_t -Massen lagen bei 4,25 (P), 4,45 (D) sowie $4,12 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$. Die pflanzenverfügbaren Phosphorgehalte (CAL) lagen zwischen 13,7 (K) und $18,8 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ Boden (KL)}$ (Gehaltsklasse E), die pflanzenverfügbaren Kaliumgehalte (CAL) zwischen 9,7 (P) und $15 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ Boden (KL)}$ (Gehaltsklassen B und C).

Im Jahr 2010 wurden für die Gesamtfläche (gleiche Beprobungspunkte wie 1995/1996) und eine geringfügig höhere äquivalente Bodenmasse von 4170 t ha^{-1} C_{org} -Massen von 44,0 (P), 48,0 (D) und $48,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$ ermittelt. Die entsprechenden N_t -Massen lagen bei 5,22 (P), 5,72 (D) und $5,64 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$. Für das Bodenpaket bis 45 cm Tiefe bzw. eine äquivalenten Bodenmasse von 6440 t ha^{-1} wurden Vorräte von 66,3 (P), 55,9 (D) und $66,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$ ermittelt. Die entsprechenden N_t -Massen lagen bei 7,85 (P), 6,83 (D) und $7,75 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$. In diesem Fall führten ein vergleichsweise geringer ermittelter C_{org} -Gehalt von 0,34 % sowie N_t -Gehalt von 0,048 % im Unterboden (30-45 cm) der Variante D zu den gegenüber den anderen beiden Varianten im Gesamtprofil sehr niedrigen C_{org} - und N_t -Vorräten.

Bei der Beprobung der Messfelder im Jahr 2005 wurden für die Tiefe 0-30 cm bzw. eine äquivalente Bodenmasse von ca. 4200 t ha^{-1} C_{org} -Massen von 50,6 (P), 55,3 (D) bzw. $49,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$ ermittelt (Tabelle 3). Die entsprechenden N_t -Massen lagen bei 5,91 (P), 6,35 (D) und $5,88 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$. Wird der Unterboden bis 45 cm Tiefe mit einbezogen und werden die Stoffvorräte für die obersten $6550 \text{ t Boden ha}^{-1}$ berechnet, ergeben sich C_{org} -Massen von 66,6 (P), 70,0 (D) und $58,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$. Die entsprechenden N_t -Massen lagen bei 8,12 (P), 8,47 (D) und $7,44 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$. Die im Vergleich zu den Varianten P und D sehr geringen C_{org} -Vorräte im Unterboden der Varianten K ergeben sich durch einen ermittelten C_{org} -Gehalt von 0,38 % in dieser Schicht, im Vergleich zu 0,69 bzw. 0,68 % in den Varianten P und D.

Im Rahmen der erneuten Beprobung der Messfelder im Jahr 2010 wurden für das Bodenpaket bis 30 cm Tiefe bzw. eine äquivalente Bodenmasse von 4290 t ha^{-1} C_{org} -Massen von 45,6 (P), 48,3 (D) und $51,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$ ermittelt. Die entsprechenden N_t -Massen lagen bei 5,15 (P), 5,46 (D) und $6,03 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$. Für das Bodenpaket bis 45 cm Tiefe, welches eine äquivalenten Bodenmasse von 6420 t ha^{-1} umfasste, wurden C_{org} -Vorräte von 57,8 (P), 70,0 (D) und $67,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$ ermittelt. Die entsprechenden N_t -Vorräte lagen bei 6,70 (P), 7,56 (D) und $8,06 \text{ t ha}^{-1} \text{ (K)}$ (Tabelle 3).

Tabelle 2: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen des IfZ in den Jahren 1995/1996 sowie 2010 auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz

Probenahmetermin Beprobungsdesign	Variante	Tiefe	n	C _{org}	C _{org}	C _{org} korrigiert	N _t	N _t	N _t korrigiert	P (CAL)	K (CAL)
				[%]	[t ha ⁻¹]	[t ha ⁻¹]	[%]	[t ha ⁻¹]	[t ha ⁻¹]	[mg 100 g ⁻¹]	[mg 100 g ⁻¹]
1995/1996 Gesamtfläche Bodenmasse 4100 t ha ⁻¹	P	0-30	4	0,99	40,38	40,38	0,1	4,25	4,25	13,8	9,7
	D	0-30	4	1,01	43,77	39,11	0,11	4,68	4,45	15,7	12,2
	K	0-30	4	0,96	40,03	41,7	0,1	4,22	4,12	13,7	11
	KL	0-30	4	0,94			0,1			18,8	15
2010	P	0-10	4	1	14,07		0,119	1,67			
Gesamtfläche	D	0-10	4	1,44	20,13		0,168	2,35			
	K	0-10	4	1,34	19,4		0,152	2,21			
	P	10-20	4	1,07	15,11		0,127	1,79			
	D	10-20	4	1,04	15,64		0,128	1,92			
	K	10-20	4	1,15	16,69		0,129	1,87			
	P	20-30	4	1,09	14,77		0,13	1,75			
	D	20-30	4	0,88	12,86		0,103	1,51			
	K	20-30	4	0,88	13,4		0,108	1,66			
	P	30-45	4	0,99	22,38		0,116	2,64			
	D	30-45	4	0,34	7,7		0,048	1,1			
	K	30-45	4	0,76	17,66		0,09	2,09			
	Bodenmasse 4170 t ha ⁻¹	P	0-30	4		43,95	43,95		5,22	5,22	
D		0-30	4		48,63	48,04		5,79	5,72		
K		0-30	4		49,48	48,7		5,74	5,64		
Bodenmasse 6435 t ha ⁻¹	P	0-45	4		66,33	66,33		7,85	7,85		
	D	0-45	4		56,33	55,89		6,88	6,83		
	K	0-45	4		67,14	66,54		7,82	7,75		

Tabelle 3: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen des IfZ in den Jahren 2005 sowie 2010 auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz (Messfelder)

Probenahmetermin Beprobungsdesign	Variante	Tiefe	n	C _{org}	C _{org}	C _{org} korrigiert	N _t	N _t	N _t korrigiert	P (CAL)	K (CAL)	Mg (CaCl ₂)
				[%]	[t ha ⁻¹]	[t ha ⁻¹]	[%]	[t ha ⁻¹]	[t ha ⁻¹]	[mg 100 g ⁻¹]	[mg 100 g ⁻¹]	[mg 100 g ⁻¹]
2005	P	0-10	3	1,15	15,62		0,14	1,86		7,25	6,1	9,83
Messfelder Teiwes	D	0-10	3	1,61	23,18		0,17	2,52		8,05	11,59	8
	K	0-10	3	1,53	21,8		0,16	2,34		5,81	14,41	8,53
	P	10-20	3	1,21	17,01		0,14	2		7,53	7,4	9,83
	D	10-20	3	1,17	17,78		0,14	2,09		5,57	4,9	7,83
	K	10-20	3	1,04	16,04		0,13	1,97		3,84	5,21	9,17
	P	20-30	3	1,23	17,97		0,14	2,06		7,24	9,01	10,37
	D	20-30	3	1	15,15		0,12	1,85		5,19	3,14	9,7
	K	20-30	3	0,83	12,61		0,11	1,66		3,11	3,78	13,67
	P	30-45	3	0,69	16,04		0,1	2,21		4,58	4,67	10,37
	D	30-45	3	0,63	14,35		0,09	2,08		2,71	2,7	12,97
	K	30-45	3	0,38	8,9		0,07	1,52		1	4,48	20
	Bodenmasse 4222 t ha ⁻¹	P	0-30	3		50,61	50,61		5,91	5,91		
D		0-30	3		56,11	55,25		6,46	6,35			
K		0-30	3		50,44	49,7		5,98	5,88			
Bodenmasse 6546 t ha ⁻¹	P	0-45	3		66,64	66,64		8,12	8,12			
	D	0-45	3		70,46	69,97		8,53	8,47			
	K	0-45	3		59,34	58,86		7,5	7,44			

2010	P	0-10	3	1,04	15,14		0,117	1,72
Messfelder Teiwes	D	0-10	3	1,52	19,93		0,171	2,24
	K	0-10	3	1,5	22,82		0,174	2,64
	P	10-20	3	1,12	16,42		0,127	1,87
	D	10-20	3	1,01	14,69		0,113	1,65
	K	10-20	3	1,06	16,18		0,126	1,92
	P	20-30	3	1,04	14,05		0,116	1,56
	D	20-30	3	0,93	13,52		0,107	1,55
	K	20-30	3	0,86	12,98		0,104	1,57
	P	30-45	3	0,57	12,19		0,073	1,55
	D	30-45	3	0,98	21,96		0,095	2,14
	K	30-45	3	0,7	16,79		0,086	2,05
	Bodenmasse 4290 t ha ⁻¹	P	0-30	3		45,61	45,61	5,15
D		0-30	3		48,14	48,34	5,44	5,46
K		0-30	3		51,99	51,25	6,12	6,03
Bodenmasse 6420 t ha ⁻¹	P	0-45	3		57,79	57,79	6,7	6,7
	D	0-45	3		70,1	69,98	7,58	7,56
	K	0-45	3		68,78	67,79	8,18	8,06

Im Rahmen von Untersuchungen an der sächsischen LfL bzw. dem LfULG Sachsen wurden zunächst in den Jahren 1999-2001 Daten zu den C_t -Gehalten an sog. stationären Dauermessplätzen in den Tiefen 0-30 cm sowie 30-60 cm erhoben (THIEL 2002: 66), wobei die Werte der drei Jahre jeweils zu einem Mittelwert pro Parzelle zusammengefasst wurden. Diese Daten wurden von THIEL im Rahmen der Untersuchungen für seine Diplomarbeit durch eine flächenhafte Beprobung ergänzt, welche je Parzelle sieben (K, KL) bzw. acht (P, D) Beprobungspunkte umfasste. Dabei wurden die Tiefen 0-5 cm, 5-30 cm sowie 30-60 cm differenziert. Im Rahmen dieser Flächenbeprobung wurde neben dem Parameter C_t zusätzlich der Parameter N_t ermittelt. Die hier angegebenen C_t -Gehalte ergeben sich aus der Verrechnung der bei THIEL angegebenen Humusgehalte mit dem Faktor 1,724. Die Humusgehalte wurden von Thiel anhand der ebenfalls ermittelten Trockenrohdichten in Stoffvorräte umgerechnet. Eine Korrektur auf äquivalente Bodenmassen erfolgte nicht.

Für die Messungen an den stationären Dauermessplätzen der LfL liegen mittlere C_t -Gehalte für die obersten 30 cm in den vier Bodenbearbeitungsvarianten vor; diese wurde nicht mit Hilfe von Trockenrohdichten in Kohlenstoffmassen umgerechnet. Demnach weisen die Varianten P und KL mit jeweils 1,06 % etwas höhere Gehalte auf als die Variante K mit 1,03 % (Tabelle 4). Für die Variante D wurde mit 0,96 % der geringste C_t -Gehalt ermittelt. Für den Unterboden (30-60 cm) werden C_t -Gehalte zwischen 0,26 % (D) und 0,48 % (P) angegeben, die C_t -Gehalte in den Varianten K und KL liegen mit 0,39 bzw. 0,32 % dazwischen.

Im Rahmen der Flächenbeprobung von THIEL im Jahr 2002 wurde hingegen für die obersten 30 cm in der Variante P mit 0,98 % der niedrigste mittlere C_t -Gehalt ermittelt. Die Varianten D und KL wiesen nach eigener Berechnung mit 1,08 bzw. 1,09 % höhere C_t -Gehalte auf, während die höchsten mittleren C_t -Gehalte in der Variante K mit 1,15 % gemessen wurden (Tabelle 4). Für die Tiefe 0-60 cm wurden auf Basis der Daten von Thiel ebenfalls die niedrigsten mittleren C_t -Gehalte für die Variante P berechnet (0,83 %), die höchsten für die Variante K (0,99 %). Die C_t -Gehalte der Varianten D und KL nehmen mit 0,88 bzw. 0,92 % eine Mittelstellung ein. Die mittleren N_t -Gehalte liegen in den obersten 30 cm zwischen 0,15 % (P) und 0,18 % (K), im Bereich zwischen 30 und 60 cm zwischen 0,11 % (P, D und KL) und 0,13 % (K). Es finden sich keine Angaben über die sich aus den ermittelten Dichten ergebenden N_t -Massen (Tabelle 4).

Für die obersten 30 cm wurde auf Basis der Daten von THIEL (2002: 70) Kohlenstoffmassen zwischen 40,6 t ha⁻¹ (P) und 50,2 t ha⁻¹ (K) berechnet. Auch bei den C_t -Massen nehmen die Varianten D und KL mit rund 47 bzw. 45,8 t ha⁻¹ eine Mittelstellung ein. Erweitert man die Berechnung auf den Bereich zwischen 0 und 60 cm liegen die C_t -Massen zwischen 70,5 t ha⁻¹ (P) und 89,7 t ha⁻¹ (K). Auch für dieses Bodenpaket liegen die C_t -Massen in den Varianten D und KL mit 78,1 bzw. 81,8 t ha⁻¹ zwischen jenen der Varianten P und K (Tabelle 4).

KELLER (2006) führte die Untersuchungen von THIEL im Jahr 2005 fort. Dabei wurde die Anzahl der Beprobungspunkte je Parzelle erweitert und lag zwischen 10 (Variante K) und 14 (Variante P). Die vertikale Auflösung der Tiefenstufen war sehr hoch, es wurden die Tiefen 0-2,5 cm, 2,5-5cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm, 20-30 cm sowie >30 cm differenziert. Anhand der Mischproben wurden die Gehalte an C_t und N_t erhoben und diese, mittels der ebenfalls erhobenen Trockenrohdichten, in Stoffvorräte umgerechnet. Ein Bezug der ermittelten Stoffmassen auf gleiche bzw. äquivalente Bodenmassen wird von Keller zwar angekündigt und durchgeführt, es bleibt aber methodisch unklar, wie dieser konkret umgesetzt wurde. Zudem werden die Stoffvorräte im humosen Pflughorizont (Ap) zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten verglichen, wobei dessen spezifische untere Grenze anhand optischer Kriterien (v. a. Bodenfarbe) ausgemacht wurde.

Für die obersten 5000 t Boden ha⁻¹, was bei einer mittleren Trockenrohdichte von 1,5 g cm⁻³, einer Schichtdicke von 33,3 cm entspricht, gibt Keller für das Jahr 2005 mittlere C_t -Gehalte zwischen 0,86 % (P) und 0,93 % (K) an (Tabelle 5). Verrechnet mit den entsprechenden Trockenrohdichten liegen die C_t -Massen zwischen 42,8 t ha⁻¹ (P) und 46,3 t ha⁻¹ (K). Die Variante D und KL nehmen mit 45,5 t ha⁻¹ bzw. 43,6 t ha⁻¹ eine Mittelstellung ein. Die entsprechenden N_t -Gehalte liegen zwischen 0,109 % (P) und 0,115 % (K), die N_t -Massen zwischen 5,43 t ha⁻¹ (P) und 5,73 t ha⁻¹ (K). Auch bei N_t nehmen die Varianten D und KL sowohl für die Gehalte als auch die Massen eine Mittelstellung zwischen den Varianten P und K ein (Tabelle 5).

Tabelle 4: Kohlen- und Stickstoffgehalte sowie Kohlenstoffmassen in vier Bearbeitungsvarianten- Standort Lüttewitz für die Jahre 1999-2002 nach Daten von THIEL (2002)

Quelle/ Datengrundlage	Variante	Tiefe [cm]	AnzahlBeprobungspute(n)	C _t [%]	C _t [t ha ⁻¹]	N _t [%]	
LfL 1999-2001 stationäre Messplätze	P	0-30	?	1,06			
	D	0-30	?	0,96			
	K	0-30	?	1,03			
	KL	0-30	?	1,06			
	P	30-60	?	0,48			
	D	30-60	?	0,26			
	K	30-60	?	0,39			
	KL	30-60	?	0,32			
Thiel Frühjahr 2002 Flächenbeprobung	P	0-5	8	0,99	6,09	0,15	
	D	0-5	8	1,40	9,51	0,19	
	K	0-5	7	1,41	8,64	0,21	
	KL	0-5	7	1,21	6,90	0,18	
	P	5-30	8	0,98	34,51	0,15	
	D	5-30	8	1,01	37,47	0,15	
	K	5-30	7	1,10	41,59	0,17	
	KL	5-30	7	1,06	38,92	0,16	
	P	30-60	8	0,68	29,87	0,11	
	D	30-60	8	0,69	31,09	0,11	
	K	30-60	7	0,83	39,44	0,13	
	KL	30-60	7	0,76	35,96	0,11	
	Berechnung Kirsten	P	0-30	8	0,98	40,60	0,15
		D	0-30	8	1,08	46,98	0,16
		K	0-30	7	1,15	50,23	0,18
		KL	0-30	7	1,09	45,82	0,16
P		0-60	8	0,83	70,48	0,13	
D		0-60	8	0,88	78,07	0,13	
K		0-60	7	0,99	89,68	0,15	
KL		0-60	7	0,92	81,79	0,14	

Tabelle 5: Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte bzw. -massen in den obersten 5000 t Boden je Hektar in vier Bodenbearbeitungsvarianten am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2005 (nach KELLER 2005)

Variante	Bodenmasse	Anzahl Beprobungspunkte (n)	C _t	C _t	N _t	N _t
	[t ha ⁻¹]		[%]	[t ha ⁻¹]	[%]	[t ha ⁻¹]
P	5000	14	0,86	42,83	0,109	5,43
D	5000	12	0,91	45,53	0,113	5,67
K	5000	10	0,93	46,38	0,115	5,73
KL	5000	11	0,87	43,64	0,112	5,6

3.1.8 Einordnung des Standortes

Im Vergleich zu den Kennzahlen der Agrarstrukturregion Mittelsächsisches Lössgebiet (s.o.) weist der Standort Lüttewitz bei etwas niedrigeren Niederschlägen und gleichen mittleren Temperaturen höhere Hangneigungen auf. Der mittlere Humus- bzw. C_{org}-Gehalt liegt hingegen deutlich niedriger als in der Region. Gleichwohl ist die Ackerzahl mit 75 größer als die Vergleichszahl der Region.

Lüttewitz

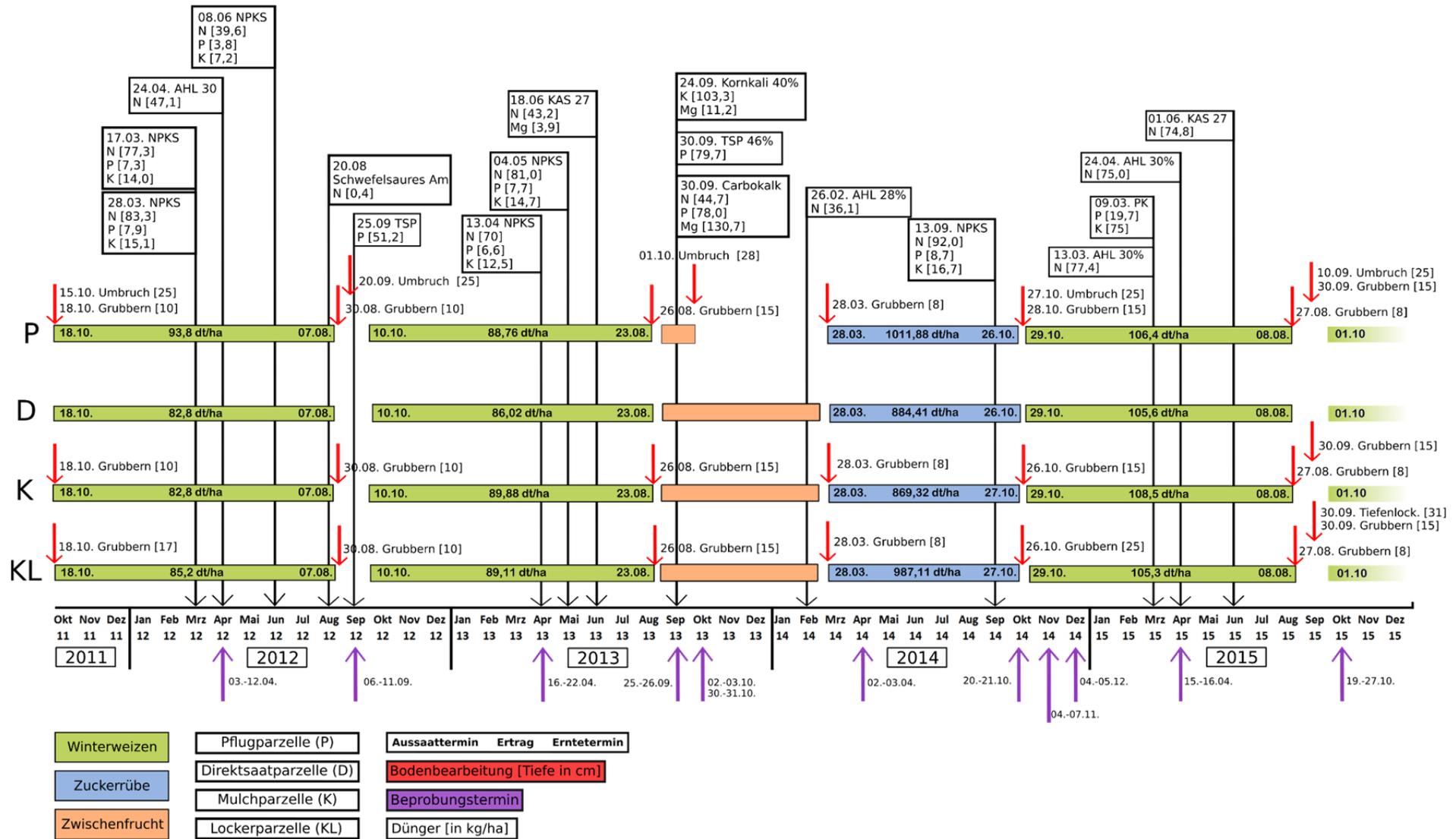


Abbildung 8: Bewirtschaftungsmaßnahmen auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz im Untersuchungszeitraum, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten

3.2 Methau

Die Dauerversuchsfläche Methau, welche 1992 vom LfULG angelegt wurde, liegt im Mulde-Lösshügelland an der Grenze zwischen dem Rochlitzer Muldeland und dem Mittweidaer Lössplateau (HAASE & MANNSFELD 2008: 142) südlich der Ortschaft Hermsdorf in der Gemeinde Zettlitz. Die in drei Teilschläge unterteilte Versuchsfläche hat eine Ausdehnung von ca. 100 x 160 m und umfasst damit eine Fläche von ca. 1,6 ha (Abbildung 9).

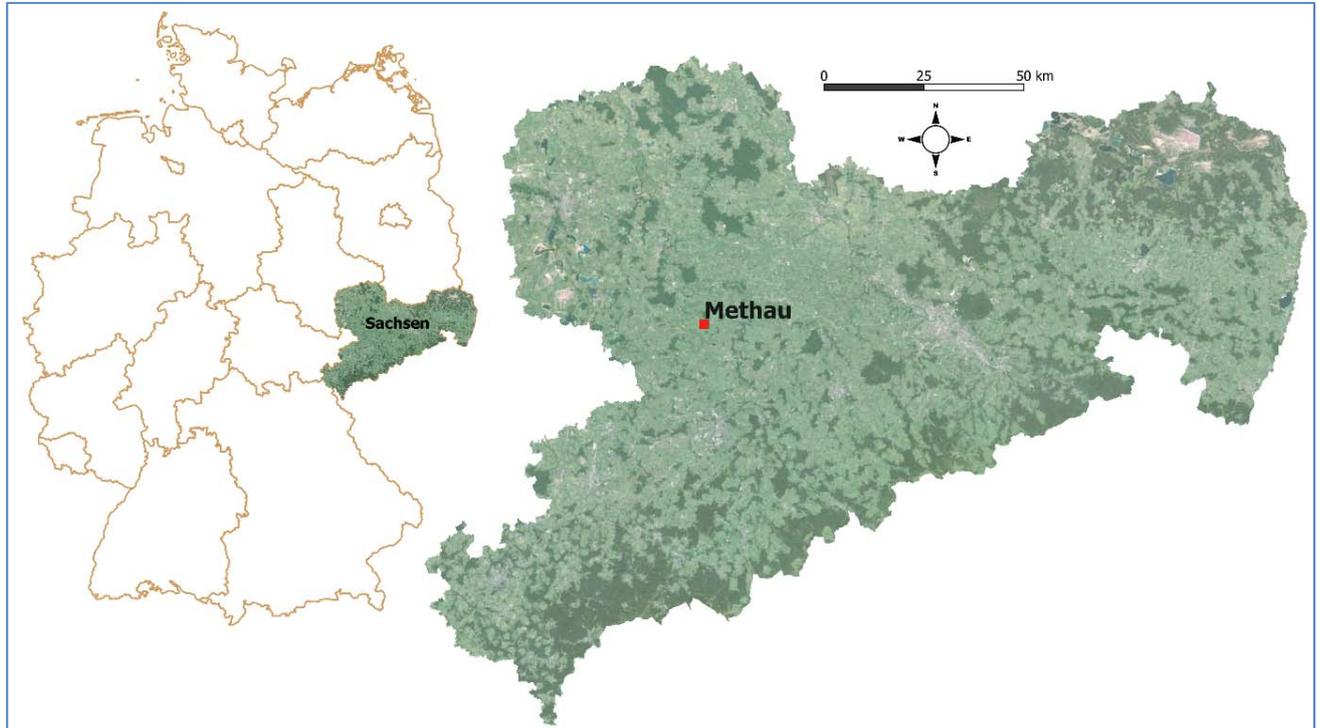


Abbildung 9: Lage des Untersuchungsstandortes Methau

3.2.1 Klima

Grundsätzlich weist der Standort Methau ähnliche Klimadaten auf wie der Standort Lüttewitz. Im Rahmen von Voruntersuchungen werden langjährige Jahresmittel von 690 mm Niederschlag und 8° C genannt (LFULG 2012). Zu Beginn des Versuches im Jahr 1992 wurde ein langjähriges Mittel von ca. 600 mm, basierend auf Daten der Versuchsstation Methau, angegeben (SCHMIDT 1993: 12).

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden Messdaten der vom Auftraggeber betriebenen Klimastation in Methau ausgewertet, für welche Daten seit Oktober 1993 online verfügbar sind (FREISTAAT SACHSEN 2016) und welche ca. 2 km vom Untersuchungsschlag entfernt liegt. Basierend auf diesen Daten betragen die langjährigen Mittel (1993 - 2015) von Niederschlag und Temperatur 682 mm und 9,2° C. Für den Untersuchungszeitraum von 2012 - 2015 wurden Jahresmittelwerte von 660 mm und 9,8° C errechnet. Dabei traten erhebliche Unterschiede zwischen den Einzeljahren auf, welche im Detail dem Klimadiagramm entnommen werden können (Abbildung 10). Auf Basis dieser Angaben scheint, im Vergleich zum langjährigen Mittel bis 1992, eine deutliche Zunahme der mittleren jährlichen Niederschlagssummen um 10-15 % vorzuliegen, welche vermutlich auch eine Veränderung der Umsatzdynamik im Boden zur Folge hat(te).

Die klimatisch relevanten Besonderheiten sind dabei ähnlich wie für den Standort Lüttewitz und werden daher hier nicht erneut aufgeführt.

3.2.2 Geologie

Das Grundgebirge südlich von Methau wird von einem variszischen Granulitkomplex gebildet, welcher von einem am Standort Methau anstehenden Mantel aus Gneisglimmerschiefer, Glimmerschiefer und Phyliten umgeben ist (HAASE & MANNSFELD 2008: 143). Dieser Mantel wird von känozoischen Lockersedimenten, insbesondere Löss und dessen Derivaten, bedeckt. Der Standort liegt in der Mulde-Lößprovinz nach LIEBEROTH (1963), welche durch geringe Mächtigkeiten von weichselzeitlichem kalkhaltigem Löss gegenüber der Elbe-Lössprovinz gekennzeichnet ist.

Auf den Hochflächen des Mulde-Lösshügellandes findet sich eine nahezu geschlossene Lössdecke mit einer Mächtigkeit von 2 - 5 m. In den aufgrund der Stauwirkung des Erzgebirges im Vergleich zum mittelsächsischen Lösshügelland feuchteren Bedingungen wurden die kalkigen Anteile des Lösses schneller ausgewaschen und es kam zu einer rascheren Veränderung desselben. Bei den heutigen Ausbildungen handelt es sich i.d.R. um Lössderivate bzw. Lösslehm. Diese entstammen, je nach Reliefposition, verschiedenen Ablagerungs- und Umwandlungsphasen, wobei neben der Bodenbildung auch Solifluktionsprozesse eine große Rolle spielten. An den Hängen haben, je nach Exposition und Lössmächtigkeit, periglaziale Prozesse sowie, je nach Nutzung, neuzeitliche Bodenerosion zu einer starken Überformung geführt.

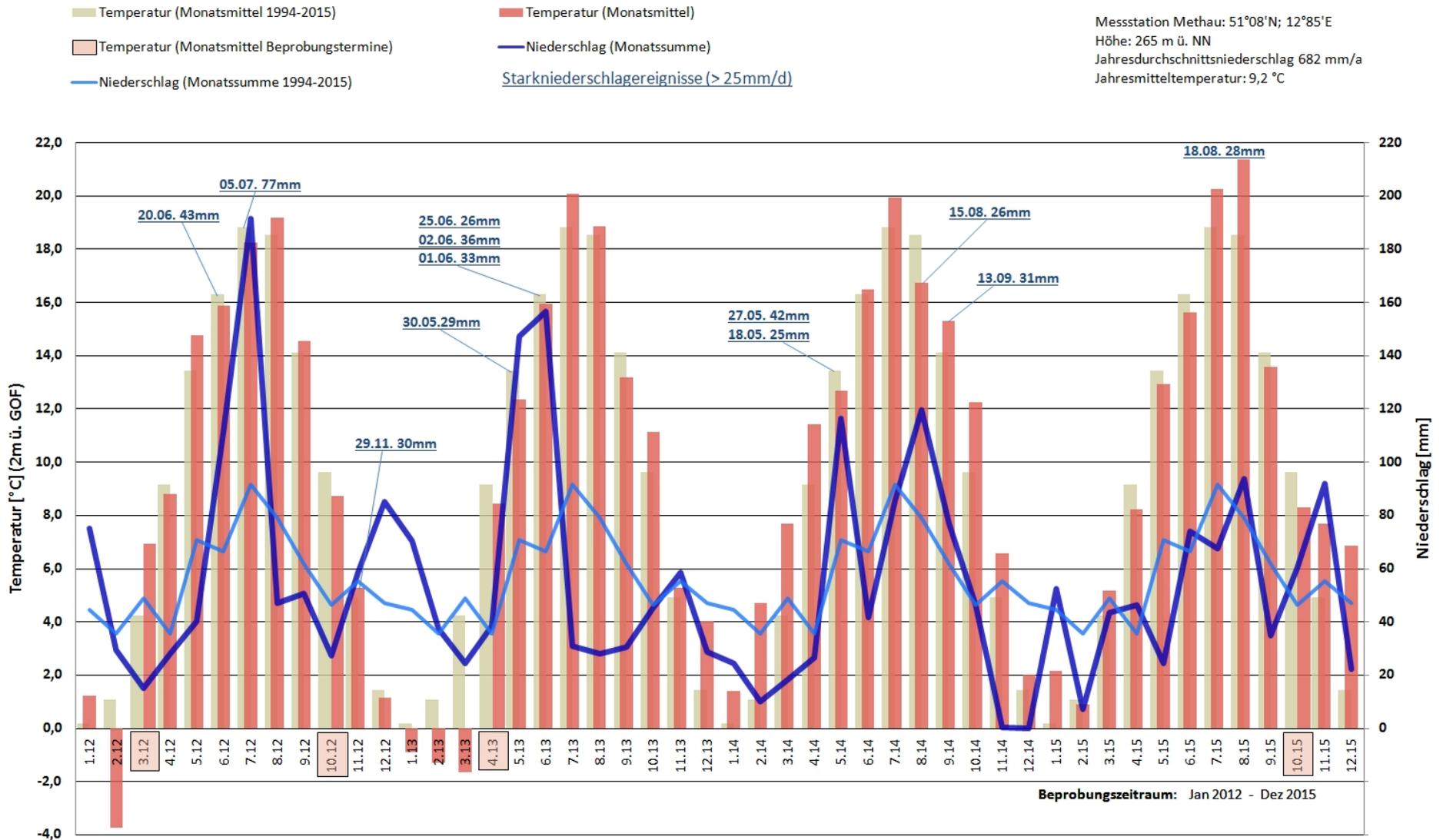


Abbildung 10: Witterung am Untersuchungsstandort Methau im Untersuchungszeitraum 2012 bis 2015

(Datengrundlage: Daten der Klimastation Methau des LfULG; eigene Darstellung)

3.2.3 Relief

Die Region des Mulde-Lösshügellandes ist durch flachwellig-hügelige Plateauflächen mit darin eingetieften Tälern der aus dem Erzgebirge stammenden Flüsse gekennzeichnet (HAASE & MANNSFELD 2008: 141f). Die Untersuchungsfläche selbst liegt auf einem nach Süden bis Südosten exponierten Hang (Abbildung 11), welcher die nördlich bzw. nordwestlich gelegene Hochfläche mit der südlich gelegenen Tiefenlinie verbindet. In dieser Letzteren verläuft ein kleiner Zufluss in den Aubach, welcher wenige Kilometer weiter westlich in die Zwickauer Mulde mündet. Die Untersuchungsfläche umfasst dabei sowohl den Kulminationsbereich des Hanges, den Bereich stärkster Hangneigung (max. 19 %) sowie den Hangfuß (SCHMIDT 1993). Es werden Höhen zwischen 270 und 290 m ü. NN erreicht.

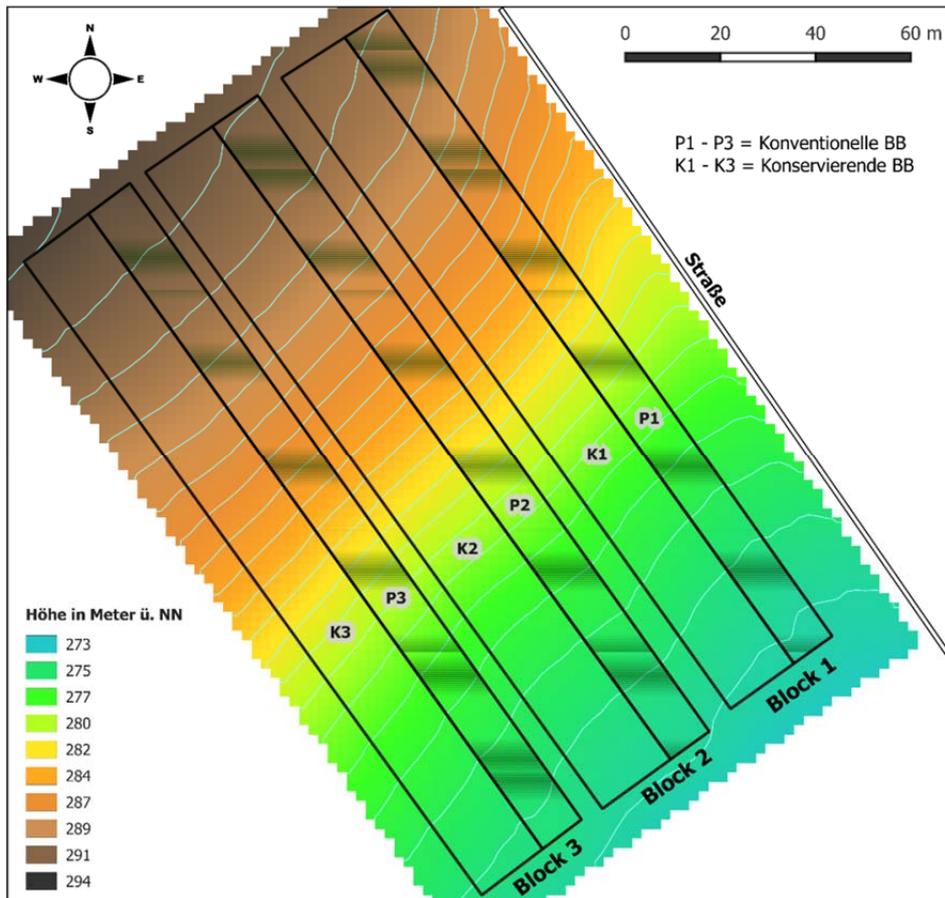


Abbildung 11: Digitales Höhenmodell der Untersuchungsfläche in Methau
(Datengrundlage: DGM2 GeoSN 2012, eigene Darstellung)

3.2.4 Böden

Wie in Lüttewitz sind die natürlichen Bodentypen des Untersuchungsraumes die Parabraunerde sowie als Resultat von Tonverlagerung und Verdichtungsphänomenen Stauwasserböden sowie in Tiefenlinien Grundwasserböden. Es treten auch Fahlerden auf (HAASE & MANNSFELD 2008: 146f).

Die BK 50 (LFULG 2012) weist für die Untersuchungsfläche die Bodenform der Pseudogley-Parabraunerde aus periglaziärem, Grus führendem Schluff mit Lösslehm und metamorphen Festgesteinen als Ausgangssubstraten aus.

Detaillierte Bodenansprachen im Rahmen von Voruntersuchungen (LFULG 2012, GUMPERT 2012) ergaben unterschiedliche Bodentypen für die Untersuchungsfläche, welche häufig durch geschichtete Profile gekennzeichnet sind. Neben der klassischen Parabraunerde bzw. Parabraunerde-Pseudogley wurden insbesondere auch Kolluvisole gefunden. Basierend auf den zwei beschriebenen Catenen sowie einer eigenen Bohr-

stocksondierung muss davon ausgegangen werden, dass die Mächtigkeiten der Bodenprofile sowie deren Aufbau bzw. Schichtung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung des Hanges sehr heterogen verlaufen. Abbildung 12 zeigt das Bodenprofil in einer Profilgrube am Mittelhang zwischen den Blöcken 2 und 3. Darauf sind deutlich ein homogener dunkelbrauner Ap-Horizont, ein darunter liegende hellerer (Al-Sw-)Horizont, ein etwas dunklerer und tonigerer (Bt-Sd-)Horizont sowie insbesondere der rötlich gefärbte Cv-Horizont (aus der Verwitterung des Phyllits) erkennbar.



Abbildung 12: Bodenprofilgrube der Catena 2 des LfULG zwischen den Blöcken 2 und 3 im Bereich der Probenahmepunkte am Standort Methau; (Foto: Susann Förster 2012)

Aus den Profilaufnahmen des Freistaates Sachsen zur Erstellung der Bodenkarte 1:50 000 (BK 50) wurde für den Standort Methau im Jahr 2003 ein Profil (P.261) im Mittelhangbereich beschrieben, welches sich im Bereich der Parzelle P3 befindet (s. Abbildung 11). Im Bereich bis 59 cm werden dabei folgende Horizonte ausgewiesen:

1. Ap bis 29 cm Tiefe (Bodenart Ut2, Gr2, X1, Herkunft: Lösslehm)
2. Al+Bt-Sdw bis 45 cm Tiefe (Bodenart Ut3, Gr2, Herkunft: Lösslehm)
3. Bt-Swd bis 59 cm Tiefe (Bodenart Sl2, Gr5, X2, Herkunft: Phyllit, Mittellage)

Die Bodenzahl der Untersuchungsfläche wird aktuell mit 65 angegeben (LfULG 2012), zu Beginn des Versuches wurde eine Bodenzahl von 70 und eine Ackerzahl von 63 ermittelt (SCHMIDT 1993: 5). Allerdings bestehen erhebliche Unterschiede je nach Reliefposition bzw. -merkmalen. Im Rahmen von Nachschätzungen auf Basis der Profilgruben wurden dabei Bodenzahlen zwischen 50 (Oberhang) und 80 (Hangfuß) erzielt (GUMPERT 2012). Die Angabe einer mittleren Bodenzahl für die gesamte Fläche erscheint aufgrund der erwähnten Heterogenität als schwierig.

Die dominierenden Feinbodenarten in der Krume sind Ut3 oder Ut4 (mittel- stark toniger Schluff). Im Mittelhangbereich, welcher im Rahmen der vorliegenden Untersuchung beprobt wurde, nehmen die Tongehalte (alle folgenden Werte als Mittelwerte aus Ober- und Unterhang nach LfULG 2012: 49) in der Krume von Block 1 (ca.21 %) zu Block 3 (ca. 18 - 19 %) nach Block 2 (ca. 17 %) ab. Der Schluffgehalt der Krume ist in

Block 2 mit 78 % am höchsten, gefolgt von Block 1 (ca. 72 %) und Block 3 (69 %). In Block 3 wurde der höchste Sandgehalt (ca. 12 %) ermittelt, gefolgt von den Blöcken 1 (6 %) und 2 (5 %). Zur besseren Übersicht sowie aufgrund der möglichen Relevanz für die Interpretation der Daten werden die Werte für den Mittelhang nochmal in einer Übersicht aufgeführt:

- Block 1: 21 % T, 72 % U, 6 % S
- Block 2: 17 % T, 78 % U, 5 % S
- Block 3: 19 % T, 69 % U, 12 % S

Bei den Profilbeschreibungen im Rahmen der Erstellung der BK 50 für den Freistaat Sachsen wurden allerdings für alle Profile auf bzw. neben der Untersuchungsfläche (BP177, BP178, P260, P261, P.262, P.263) für die Ap-Horizonte geringere Tongehalte ermittelt, sodass durchgängig die Feinbodenart Ut2 (8 - 12 Masse-% Ton) angegeben wird.

Der Anteil des Grobbodens (Skelett) variiert sehr stark auf der Untersuchungsfläche. Auf Basis der Profilgruben und der analysierten Catenen (LFULG 2012, GUMPERT 2012) ist am Mittelhang von 10 - 20 Vol. % Grobboden im Pflughorizont (Ap) auszugehen. Dieser Anteil nimmt dabei im Längsverlauf des Hanges von oben nach unten sowie im Querverlauf von Westen (Block 3) nach Osten (Block 1) merklich ab. Im darunter liegenden Horizont (Al-Sw bzw. Bt-Sw) sind die Grobbodenanteile in den Mittelhangprofilen geringer als jene des Ap-Horizontes. Je nach Lage der Horizont- bzw. Schichtungsgrenzen variieren diese zwischen 1 und >10%.

Die Böden der Untersuchungsfläche sind bis mindestens 1 m u. GOF karbonatfrei (LFULG 2012).

3.2.5 Bewirtschaftung

Die seit 1992 differenziert bewirtschaftete Dauerversuchsfläche ist in drei jeweils 27 m breite Blöcke unterteilt (Abbildung 11), wobei jeder der drei Blöcke wiederum in sich unterteilt ist: Je ein 9 m breiter Streifen wird konventionell mit dem Pflug bearbeitet (P1 - P3), je ein 18 m breiter Streifen wird (seit 2009) einheitlich konservierend mit dem Schwergrubber bearbeitet (K1 - K3). Von 1992 bis 2009 war dieser letztere Streifen nochmals in drei Varianten unterteilt (LFULG 2012), wobei alle drei Varianten nichtwendend bearbeitet wurden und daher der konservierenden Bodenbearbeitung zuzurechnen sind. Die Bearbeitung erfolgt grundsätzlich hangabwärts.

Seit 2009 rotiert die Fruchtfolge WW, WG, Mais (mit Zwischenfruchtanbau in der Variante Konservierend nach WG bzw. vor Mais) über die drei Blöcke (1992 bis 2009: ZR statt Mais). Die Nebenernteprodukte bzw. Erntereste verbleiben in allen Varianten auf der Fläche.

Eine Gleichbehandlung in Bezug auf Düngergaben, Unkrautbekämpfung sowie Aussaat- und Erntetermin ist innerhalb der Blöcke jeweils gegeben.

Die für diese Untersuchung zentralen Bewirtschaftungsmaßnahmen (Kulturart, Bodenbearbeitung, Düngung, Aussaat- und Erntetermine sowie Erträge) sind für den Untersuchungszeitraum für die drei Blöcke in der Abbildung 13, Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.

3.2.6 Ausgangsdaten

Bei Anlage des Versuches im Herbst des Jahres 1992 wurden, für die vier Hangabschnitte Kuppe, Oberhang, Unterhang und Hangfuß in den drei Tiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm verschiedene bodenchemische Parameter (mit n = 12 je Hangabschnitt) ermittelt (SCHMIDT 1993). Davon relevant für die vorliegende Untersuchung sind insbesondere die Parameter Humus bzw. C_{org}, N_t, ph-Wert sowie die pflanzenverfügbaren Gehalte der Makronährstoffe Phosphor, Kalium und Magnesium. Es erfolgte keine getrennte Untersuchung der in der Folge differenziert bearbeiteten Parzellen innerhalb der Blöcke, sodass spätere Variantenvergleiche (Pflug vs.

konservierend) sich je Block nur auf einen gemeinsamen Ausgangswert pro Parameter (und Hangabschnitt) beziehen können.

In Tabelle 6 sind die Humus/C_{org}- sowie N_t-Gehalte dargestellt. Die N_t-Gehalte liegen lediglich für Block 1 vor. Die angegebenen C_{org}-Gehalte wurden mit dem Faktor 1,724 aus den Humusgehalten errechnet.

Tabelle 6: Humus/C_{org}- sowie N_t-Gehalte der Versuchsfläche Methau im Herbst 1992 (Versuchsbeginn)

Block	Hangabschnitt	Tiefe	Humus [%]	C _{org} [%]	N _t [%]
1	Kuppe	0-30	1,8	1,04	0,08
	Oberhang	0-30	1,65	0,96	0,10
	Unterhang	0-30	1,9	1,10	0,10
	Hangfuß	0-30	2,2	1,28	0,10
	Kuppe	30-60	1,15	0,67	0,12
	Oberhang	30-60	0,65	0,38	0,09
	Unterhang	30-60	0,7	0,41	0,09
	Hangfuß	30-60	0,85	0,49	0,07
2	Kuppe	0-30	2,4	1,39	
	Oberhang	0-30	2,1	1,22	
	Unterhang	0-30	2,15	1,25	
	Hangfuß	0-30	1,95	1,13	
	Kuppe	30-60	1,65	0,96	
	Oberhang	30-60	0,6	0,35	
	Unterhang	30-60	0,65	0,38	
	Hangfuß	30-60	0,75	0,44	
3	Kuppe	0-30	2,1	1,22	
	Oberhang	0-30	2	1,16	
	Unterhang	0-30	1,8	1,04	
	Hangfuß	0-30	2,1	1,22	
	Kuppe	30-60	1,1	0,64	
	Oberhang	30-60	0,6	0,35	
	Unterhang	30-60	0,8	0,46	
	Hangfuß	30-60	0,9	0,52	

Die C_{org}-Gehalte liegen in der Krume (0-30 cm) in den drei Blöcken zwischen 0,96 und 1,39 %. Auffällig ist, dass die Gehalte in Block 2 in den Hangabschnitten Kuppe, Oberhang und Unterhang jeweils am höchsten sind, am Hangfuß jedoch am geringsten. Block 1 weist am in der Krume auf den oberen beiden Hangabschnitten die geringsten Gehalte auf (Tabelle 6).

Im Unterboden (30-60 cm) liegen die C_{org} -Gehalte in allen drei Blöcken im Hangabschnitt Kuppe erheblich höher als in den anderen Hangabschnitten, wobei diese in Block 2 nochmals deutlich höher liegen (0,96 %) als in den Blöcken 1 und 3 (0,67 bzw. 0,64 %) (Tabelle 6).

Die N_t -Gehalte in Block 1 liegen in der Krume durchgängig bei 0,10 %, lediglich im Hangabschnitt Kuppe mit 0,08 % etwas niedriger. Im Unterboden weist die Kuppe mit 0,12 % erheblich höhere N_t -Gehalte auf als die beiden zentralen Hangbereiche (0,09 %) sowie der Hangfuß (0,07 %).

Die pH-Werte liegen in allen Blöcken und Hangabschnitten bis in eine Tiefe von 60 cm bei ca. 6 (SCHMIDT 1993). Die pflanzenverfügbaren Phosphorgehalte (DL) liegen in den Blöcken 1 und 3 im Oberboden bei ca. $8 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$, im mittleren Block 2 bei ca. $12 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$. Für den Unterboden wurden für alle Blöcke Gehalte von ca. $2 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ermittelt. Die pflanzenverfügbaren Kaliumvorräte (DL) in der Krume liegen bei 14 – 20 $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$, wobei in Block 2 im Mittel etwas höhere Gehalte als in den Blöcken 1 und 3 ermittelt wurden. Die pflanzenverfügbaren Magnesiumgehalte liegen bei 8 - 15 $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$, wobei in Block 2, entgegen der Situation beim Phosphor und Kalium, etwas geringere Gehalte als in den Blöcken 1 und 3 ermittelt wurden.

Für das Profil 5 der Catena 2 am Standort Methau, welches im Exkursionsführer zur Exkursion der Bodenspezialisten (LfULG 2012: 40 f.) ausführlich beschrieben ist und sich am Mittelhang im Bereich der Beprobungspunkte dieser Untersuchung zwischen Block 2 und 3 befindet, werden folgende Analysedaten angegeben:

1. Ap-Horizont bis 25 cm: C_{org} 1,18 %; N_t 0,15 %; pH-Wert 5,7; P (CAL) $2,5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$; K (CAL) $5,4 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$; Mg (CaCl₂) $10,8 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$
2. Al-Sw-Horizont 25 - 50 cm: C_{org} 0,29 %; N_t 0,05 %; pH-Wert 6,0, P (CAL); P (CAL) $0,4 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$, K (CAL) $3,3 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$, Mg (CaCl₂) $12,5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$

3.2.7 Einordnung des Standortes

Der Standort Methau kann naturräumlich als bedingt typisch für das Mulde-Lösshügelland gelten.

Im Vergleich zu den Kennzahlen der Agrarstrukturregion Mittelsächsisches Lössgebiet (s.o.) weist er bei etwas niedrigeren Niederschlägen und gleichen mittleren Temperaturen deutlich höhere mittlere Hangneigungen auf. Der mittlere Humus- bzw. C_{org} -Gehalt liegt, wie in Lüttewitz, deutlich niedriger als in der Region. Die Ackerzahl liegt mit 63 nur geringfügig höher als die Vergleichszahl der Region.

Methau

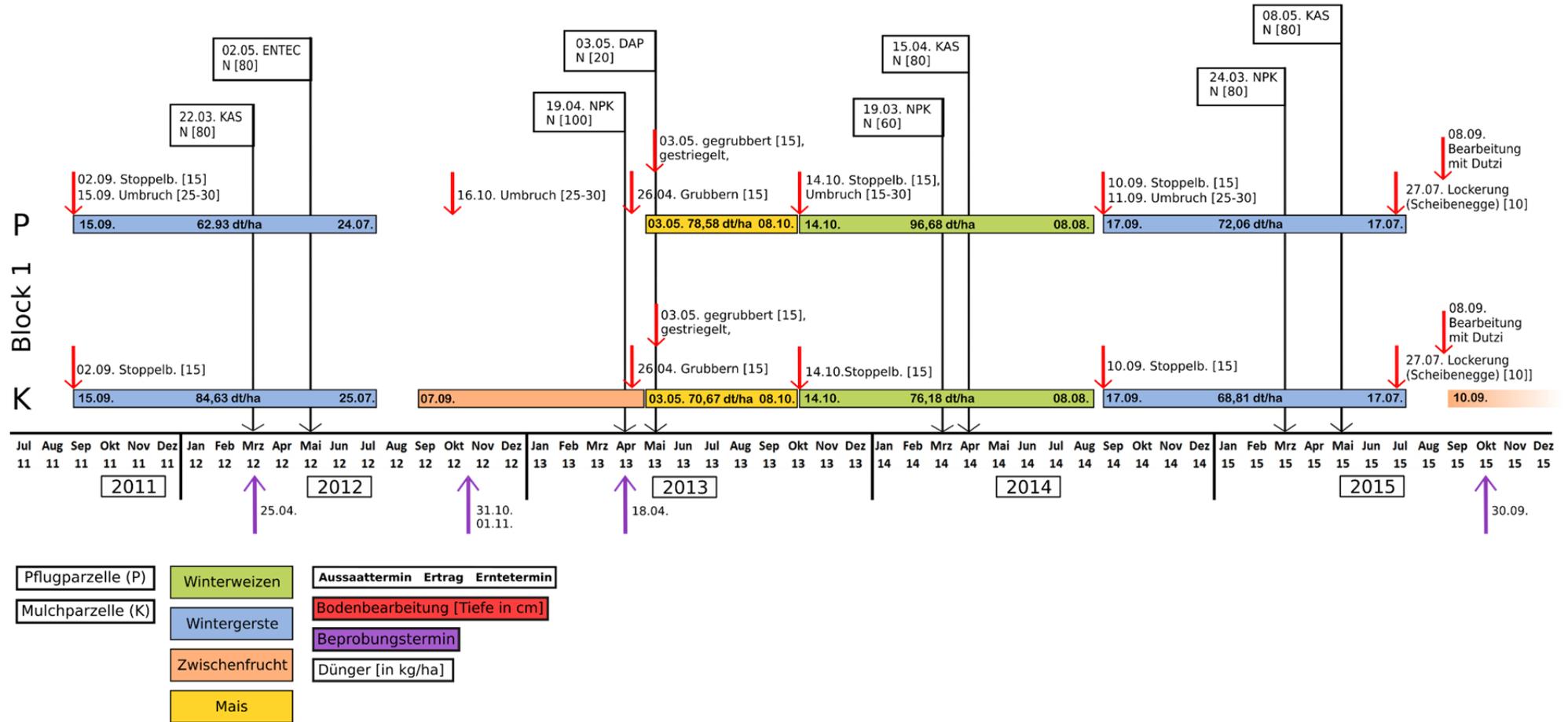


Abbildung 13: Bewirtschaftungsmaßnahmen im Block 1 der Untersuchungsfläche Methau im Untersuchungszeitraum, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten

Methau

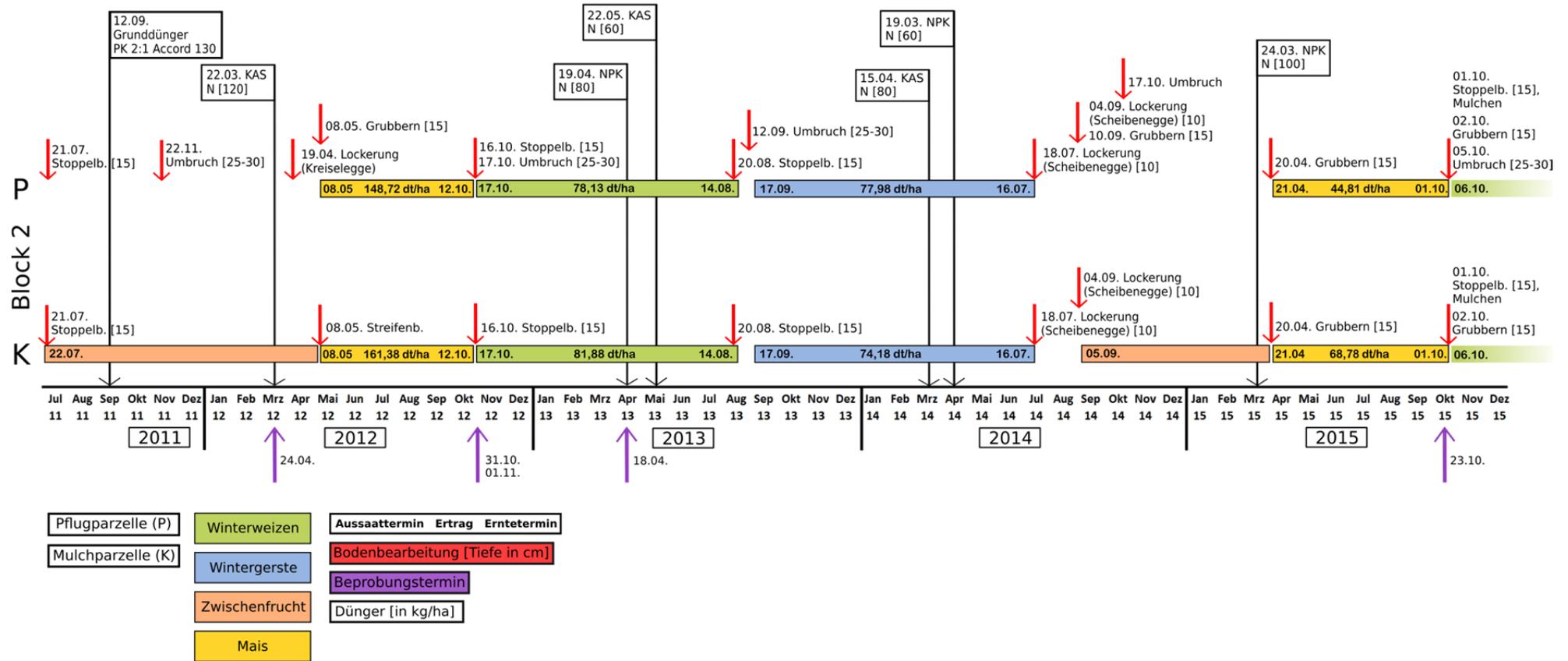


Abbildung 14: Bewirtschaftungsmaßnahmen im Block 2 der Untersuchungsfläche Methau im Untersuchungszeitraum, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten

Methau

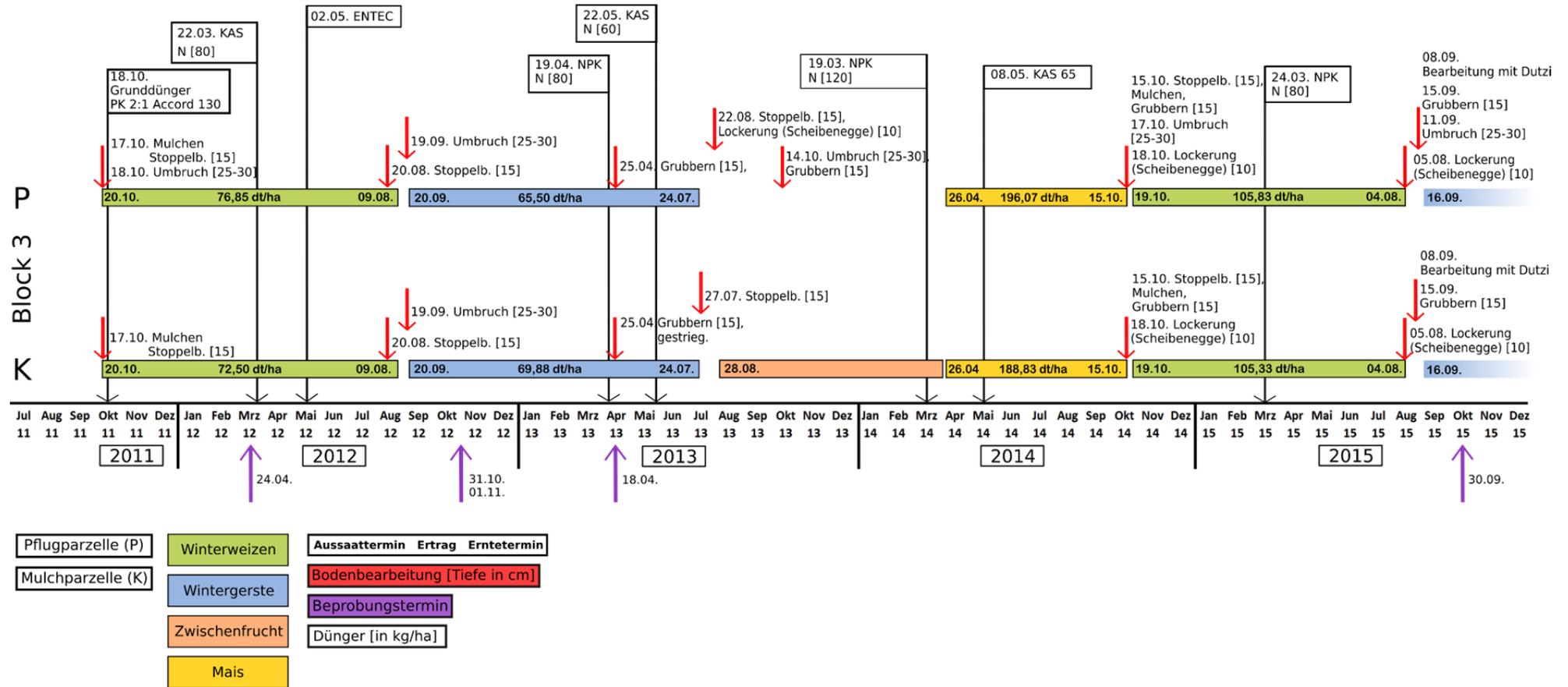


Abbildung 15: Bewirtschaftungsmaßnahmen im Block 3 der Untersuchungsfläche Methau im Untersuchungszeitraum, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten

4 Methodik

Die beiden Dauerversuchsflächen Lüttewitz und Methau wurden aufgrund ihres unterschiedlichen Aufbaus nach verschiedenen Schemata beprobt. Im Fokus stand dabei der direkte Vergleich der verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren im Hinblick auf die Kohlenstoff- und Nährstoffdynamik („Basisbeprobungen“). Hinzu kommt die Fragestellung der Kohlenstoff- und Nährstoffdynamik bei Pflugeinsatz nach langjähriger Direktsaat („Umbruchversuch“), welche lediglich am Standort Lüttewitz untersucht wurde.

4.1 Bodenprobenahme

4.1.1 Basisbeprobungen

Im Untersuchungszeitraum 2012 - 2015 wurden an den folgenden vier Terminen Basisbeprobungen an beiden Standorten durchgeführt:

- Frühjahr 2012
- Herbst 2012
- Frühjahr 2013
- Herbst 2015

Die genauen Beprobungstermine für beide Standorte können der jeweiligen Bewirtschaftungsübersicht entnommen werden.

Dazu wurden am Standort Lüttewitz je neun Beprobungspunkte pro Bodenbearbeitungsparzelle ($n = 9$) ausgewählt (Abbildung 16). Die Auswahl und Benennung der Punkte basieren auf den Arbeiten von THIEL (2002) und KELLER (2006) am gleichen Standort. Es wurden je neun Beprobungspunkte ausgewählt, welche aufgrund ihrer Lage im Relief sowie ihrer Bodeneigenschaften repräsentativ für die Parzelle sind. Die Beprobungspunkte liegen im zentralen und nördlichen Teil des Schlags. Die Delle im Süden bzw. Südosten der Fläche wurde vermieden, weil in den dortigen Kolluvien mit starker Akkumulation von kohlen- und nährstoffreichem Oberbodenmaterial zu rechnen ist. Dabei muss auch von einer nennenswerten Umlagerung von Oberbodenmaterial zwischen den Parzellen ausgegangen werden. Dieser Effekt würde direkte Auswirkungen der Bodenbearbeitung auf die Kohlen- und Nährstoffdynamik des Bodens vermutlich überprägen und damit die Untersuchungsergebnisse verfälschen.

Grundsätzlich stellt sich bei Untersuchungen auf Dauerversuchsflächen mit Großparzellen, welche praxisüblich bewirtschaftet werden, das Problem der Flächenrepräsentativität sowie der Messwiederholungen. Bei Parzellengrößen von 5 - 10 ha wie in Lüttewitz sind heterogene Relief- und Bodenverhältnisse innerhalb der Parzellen in den meisten Landschaften Mitteleuropas unvermeidlich. Auch zwischen den Parzellen gibt es landschaftsbedingte Unterschiede. Um diese Probleme auszugleichen, sollten die Parzellen so angelegt werden, dass sie die unterschiedlichen Relief- und Bodenverhältnisse möglichst gleich und flächenrepräsentativ abbilden. Das gleiche gilt für die Auswahl der Beprobungspunkte, welche aufgrund der Heterogenitäten innerhalb der Parzelle nicht als echte Messwiederholungen im statistischen Sinne aufgefasst werden können. So lag die mittlere Hangneigung der je neun Beprobungspunkte pro Parzelle in der Variante Pflug bei 5,34 %, in der Variante Direktsaat bei 3,99 %, in der Variante Konservierend bei 4,99 % und in der Variante KL bei 6,19. Der sehr hohe Wert in der Variante KL ist insbesondere durch die Beprobungspunkte KL5 (11,95 %) sowie KLZ2 und KLZ 3 (9,38 bzw. 9,37 %) bedingt.

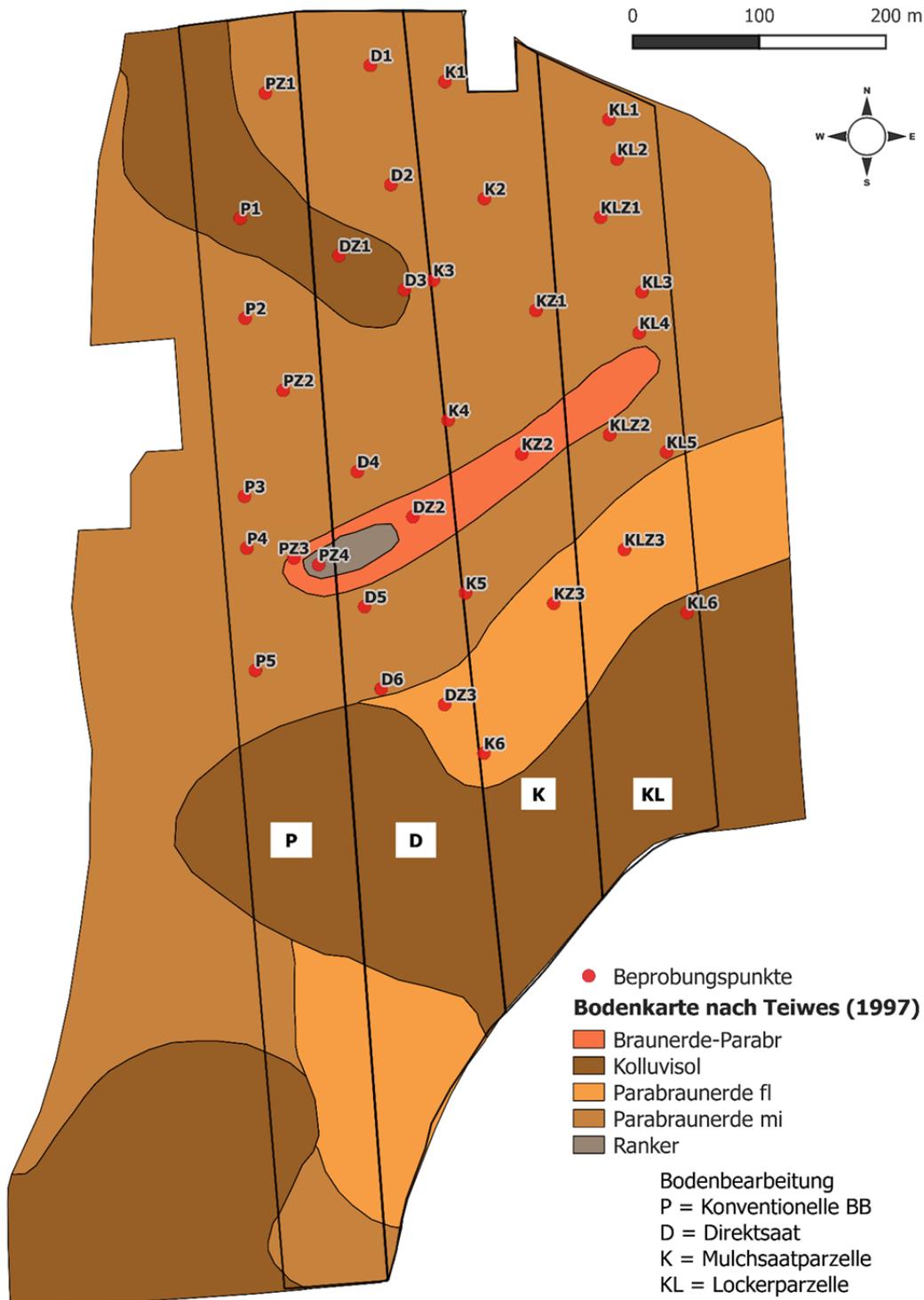


Abbildung 16: Räumliche Verteilung der Beprobungspunkte (Basisbeprobungen) auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Faktoren Boden(art) und Relief starken Einfluss auf die meisten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erhobenen Parameter haben. Während höhere Tongehalte i.d.R. zu einer Stabilisierung der OS beitragen, weisen Bereiche höherer Hangneigung ein erhöhtes Risiko für die Erosion von humus- und nährstoffreichem Oberbodenmaterial auf. Bei der Auswertung der Daten aufgrund der Heterogenität der Faktoren Bodenart und Relief mit relativ starken Streuungen der Messwerte der einzel-

nen Parameter innerhalb der Parzellen bzw. Bodenbearbeitungsvarianten zu rechnen. Gleichwohl wird, basierend auf der flächenrepräsentativen (nicht zufälligen) Auswahl der Beprobungspunkte die Vergleichbarkeit bestimmter deskriptiver statistischer Maße (arithmetisches Mittel, Median) für die Varianten postuliert und vorausgesetzt. Weiterführende statistische Analysen (z.B. Varianzanalysen) werden hingegen durch diese starken natürlichen Streuungen erschwert.

Auch am Standort Methau finden sich innerhalb der drei Blöcke bzw. sechs Parzellen sehr unterschiedliche Relief- und Bodenbedingungen. Dabei ist aufgrund der Lage am Hang mit starken Erosionseffekten am Hang bzw. im Kulminationsbereich sowie mit starken Akkumulationseffekten am Unterhang bzw. Hangfuß zu rechnen. Wie am Standort Lüttewitz ist davon auszugehen, dass die Auswirkungen von Erosion und Akkumulation die Ergebnisse des Variantenvergleichs stark überprägen können. In Absprache mit dem LfULG wurde die Lage der Beprobungspunkte am Mittelhang gewählt, wo die Hangneigungen zwischen 12 und 18% liegen. Folgt man den Ergebnissen von WOLF (2009) für die von ihm untersuchten Dellensysteme bei Lommatzsch, könnte der Mittelhang der Bereich mit den höchsten Erosionsraten sein, allerdings in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung und Bodenart.

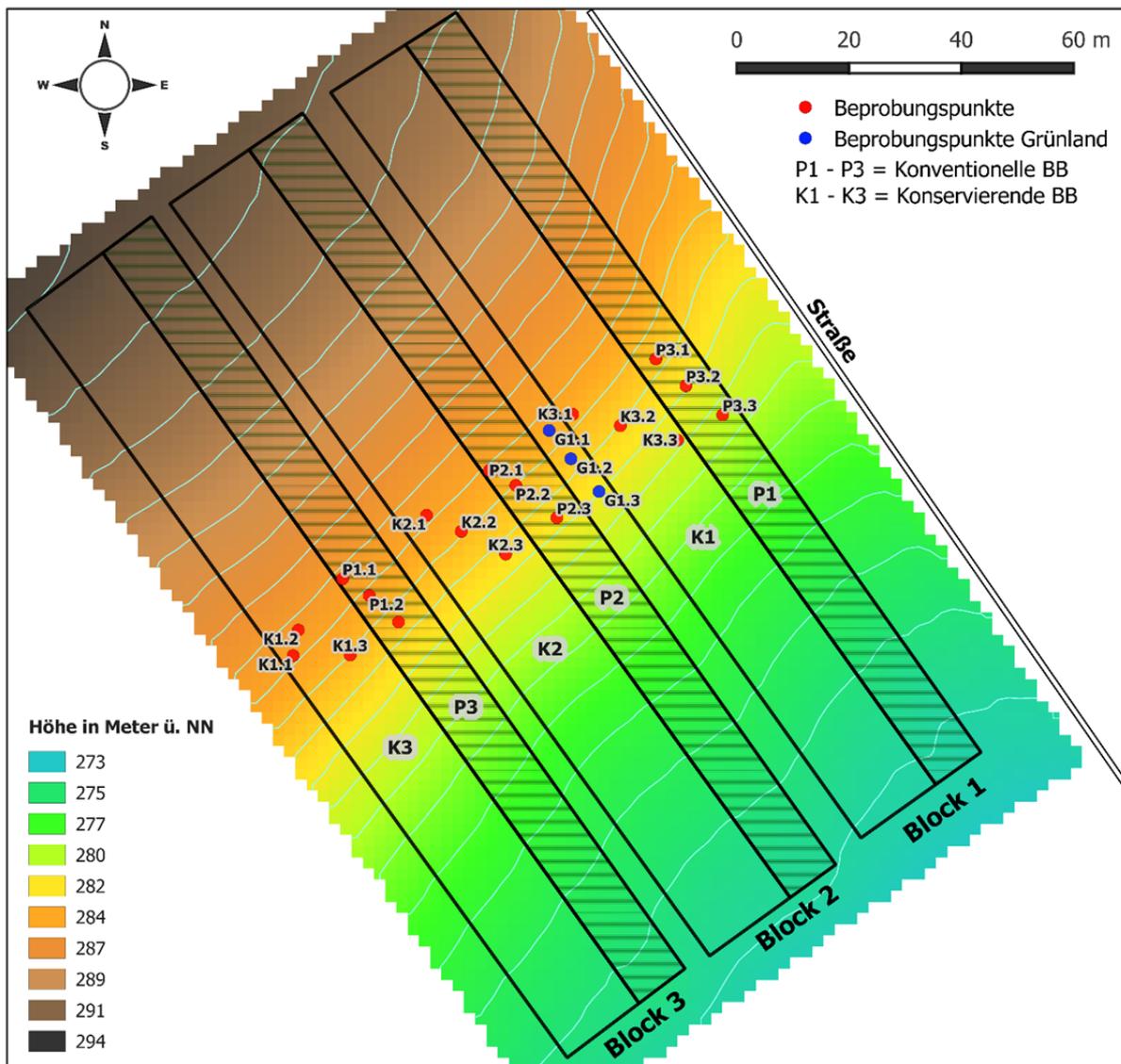


Abbildung 17: Räumliche Verteilung der Beprobungspunkte (Basisbeprobungen) auf der Untersuchungsfläche Methau; (Datengrundlage: DGM2 GeoSN 2012)

Für den Standort Methau wurden je drei diagonal versetzte Beprobungspunkte pro Parzelle ausgewählt ($n = 3$) (Abbildung 17), welche nur wenige Meter voneinander entfernt liegen. Zusätzlich wurden, ebenfalls am Mittelhang, drei Beprobungspunkte auf dem Grünlandstreifen zwischen den Blöcken 1 und 2 angelegt (G1 - G3). In Bezug auf das Relief kann also von annähernd homogenen Bedingungen in allen Parzellen ausgegangen werden.

Die Bodeneigenschaften auf der Untersuchungsfläche Methau variieren nicht nur, wie in Voruntersuchungen (GUMPERT 2012) anhand einer Catena zwischen den Blöcken 2 und 3 beschrieben, mit dem Hangverlauf, sondern auch quer zu diesem. Dies zeigen sowohl die Ergebnisse zur Korngrößenverteilung aus Vorarbeiten (LFULG 2012, s.o.) als auch eigene Feldbeobachtungen. Dies gilt insbesondere auch für die Grobbodenanteile (>2 mm), welche eine hohe kleinräumige Variabilität aufweisen. Ein direkter Vergleich der beiden Varianten innerhalb der drei Blöcke ist allerdings aufgrund des geringen räumlichen Abstandes von max. 20 m trotzdem möglich und sinnvoll. Ein direkter Vergleich der Blöcke hingegen ist sowohl aufgrund der Bodenheterogenität als auch der unterschiedlichen Bewirtschaftung in den einzelnen Jahren nur wenig aussagekräftig.

Um allgemeine Aussagen zum Variantenvergleich für den Standort zu treffen, werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung deskriptive statistische Maße (arithmetisches Mittel) der drei Parzellen pro Variante gebildet. Dadurch werden sowohl die unterschiedlichen Bodeneigenschaften als auch die Unterschiede in der Bewirtschaftung jeweils zu gleichen Teilen im Variantenvergleich berücksichtigt. Dies führt, wie am Standort Lüttewitz, zu relativ großen Streuungen innerhalb der Messwerte der einzelnen Parameter, wodurch die statistische Überprüfbarkeit der Ergebnisse (Varianzanalysen) erschwert wird.

Die Koordinaten der Beprobungspunkte in Methau wurden mit einem GPS-Gerät mit einer Genauigkeit von ca. 1 m eingemessen bzw. zu jeder Beprobung neu markiert. Eine Mehrfachbeprobung des exakt gleichen Punktes würde dabei zur Beprobung eines gestörten Profils führen. Daher wurde zu jedem der vier Beprobungstermine ein Abstand von 1 m zum markierten Beprobungspunkt in vier unterschiedliche Himmelsrichtungen gewählt (Abbildung 18). So wurde sichergestellt, dass trotz der genannten Ungenauigkeit bei der GPS-Positionsbestimmung jeweils ein ungestörtes Profil beprobt wurde.

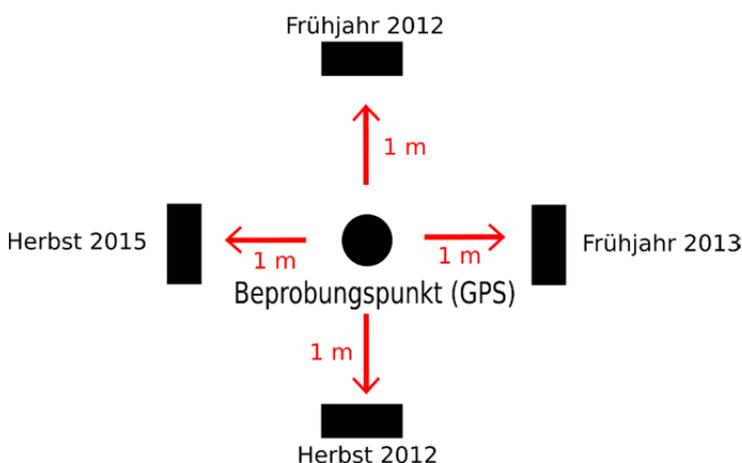


Abbildung 18: Beprobungsschema Basisbeprobungen auf der Untersuchungsfläche Methau

4.1.2 Umbruchversuch

Am Standort Lüttewitz wurden vom Herbst 2013 bis zum Frühjahr 2015 die Auswirkungen des erneuten ein- bzw. zweimaligen Umbruchs einer langjährigen Direktsaatfläche untersucht. Dies wird im Rahmen dieses Berichtes als Umbruchversuch bezeichnet.

Dabei wurden im Herbst 2013 innerhalb der Direktsaatparzelle an der Grenze zur Pflugparzelle drei 5,5 x 10 m große Pflugstreifen eingemessen und einmalig gepflügt (DP1 - DP3). Die Lage der Streifen wurde so gewählt, dass unterschiedliche Reliefformtypen (Tiefenbereich, Hang, Kulminationsbereich) repräsentiert sind (Abbildung 19). Die Breite von 5,5 m entspricht dabei in etwa zwei Pflugbreiten. Die Länge von 10 m wurde so gewählt, dass innerhalb des Streifens genug Raum zur Verfügung stand, um bei Vermeidung von Randbereichen mehrere Beprobungen durchführen zu können. Als Vergleich wurden zudem in räumlicher Nähe zu den drei Streifen jeweils drei Beprobungspunkte in der Pflugvariante (PU1 - PU3) sowie in der (unveränderten) Direktsaatvariante (DU1 - DU3) angelegt (Abbildung 19).

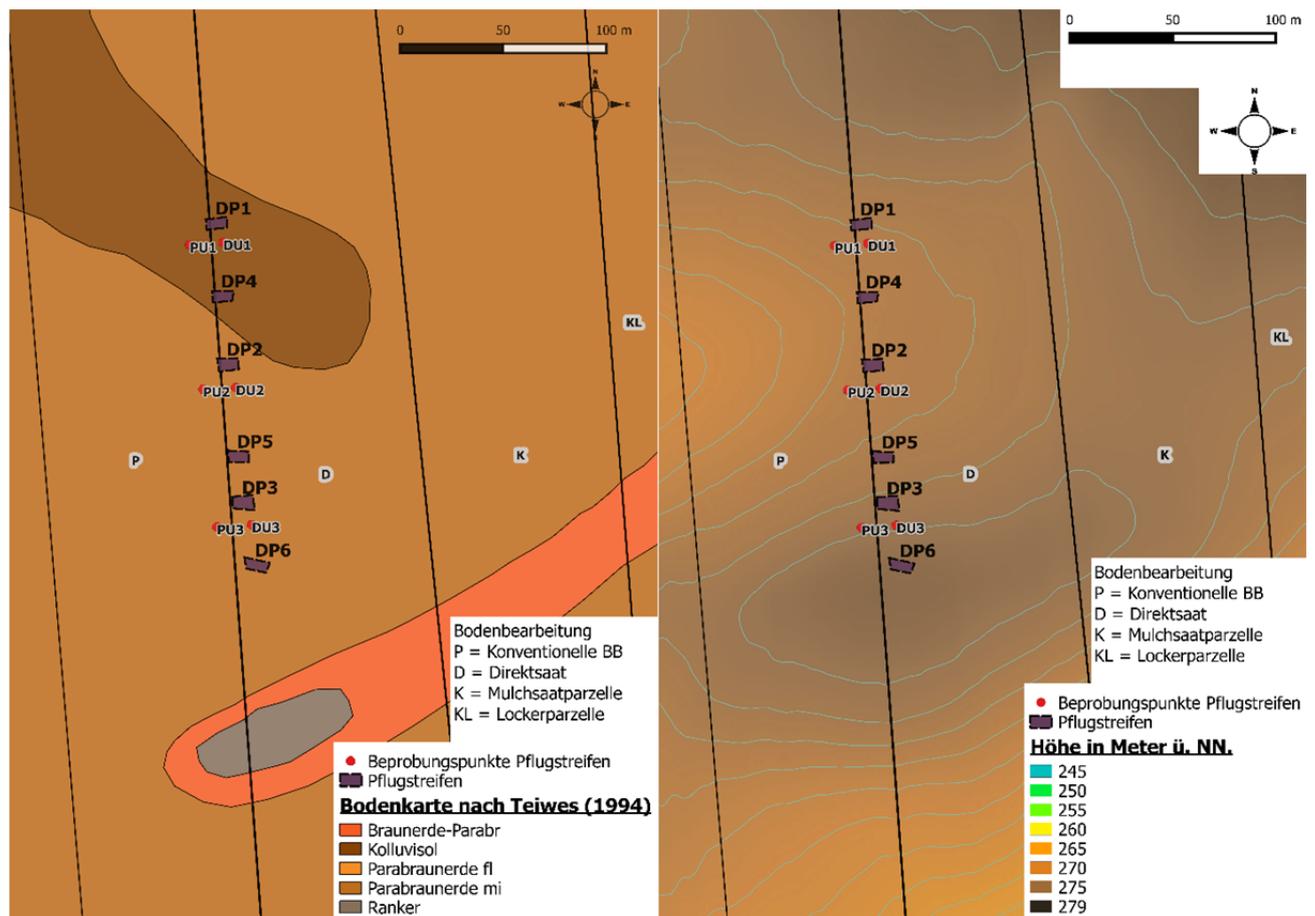


Abbildung 19: Lage der Pflugstreifen sowie Referenzpunkte (Umbruchversuch) auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz; (Datengrundlage: DGM2 GeoSN 2012)

Im Versuchsjahr 2013 wurden folgende Beprobungen (mit Beprobungstermin) in den Streifen DP1 - DP3 sowie an den Punkten PU1 - PU3 sowie DU1 - DU3 durchgeführt:

1. Herbst 2013: vor dem Umbruch (25./26.09.2013)
2. Herbst 2013: direkt nach dem Umbruch (02./03.10.2013)
3. Herbst 2013: 4 Wochen nach dem Umbruch (30./31.10.2013)
4. Frühjahr 2014: 6 Monate nach dem Umbruch (02./03.04.2014)

Die Variante Direktsaat bzw. die Punkte DU1 - DU3 wurden zum Termin „Herbst 2013 direkt nach dem Umbruch“ nicht beprobt. Da in dieser Variante keine Bodenbearbeitung stattfand, wurden innerhalb des kurzen Zeitraums von ca. einer Woche zum vorhergehenden Beprobungstermin nur sehr geringe Veränderungen im Boden erwartet.

Das Beprobungsschema (Abbildung 20) an den Punkten PU1 - PU3 sowie DU1 - DU3 sah dabei wie bei den Basisbeprobungen aus. Allerdings wurde der Abstand zum markierten Beprobungspunkt im Herbst 2013 mit jeder weiteren Beprobung jeweils um einen Meter erhöht (Abbildung 20).

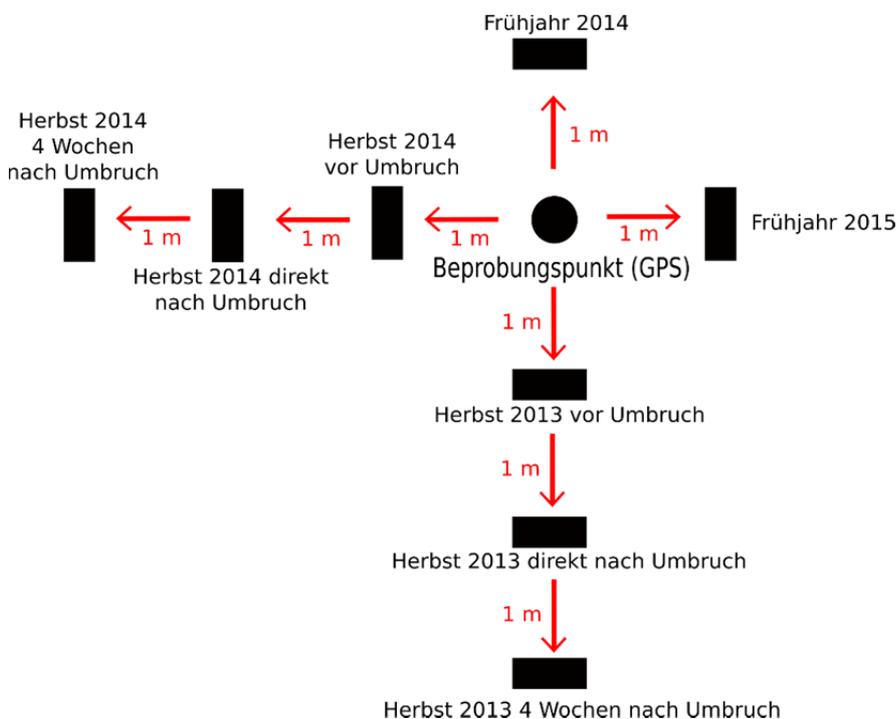


Abbildung 20: Beprobungsschema Referenzpunkte (Umbruchversuch) – Untersuchungsfläche Lüttenwitz

Innerhalb der Pflugstreifen (DP X) wurden jeweils drei Beprobungspunkte (DP X.1 - DP X.3) als Messwiederholungen angelegt (Abbildung 21). Dabei wurden bei der ersten Beprobung ca. 1 m vom (östlichen) Rand des Streifens drei Beprobungspunkte angelegt, bei der zweiten Beprobung ca. 2 vom östlichen Rand usw. Die beiden äußeren Beprobungspunkte hatten dabei jeweils ca. 1 m Abstand zum Rand des Pflugstreifens. Der Abstand zwischen den je drei Beprobungspunkten betrug ca. 1,5 m.

Im Herbst 2014 wurden, als Wiederholung des Umbruchversuches, drei weitere Pflugstreifen (DP4 - DP6) mit den gleichen räumlichen Maßen wie im Herbst 2013 markiert und neu angelegt (Abbildung 19). Auch die Lage dieser drei Pflugstreifen wurde so gewählt, dass die unterschiedlichen Relief-formtypen der Untersuchungsfläche repräsentiert sind.

Die Pflugstreifen DP1 - DP3 aus dem Herbst 2013 wurden im Herbst 2014 ein zweites Mal gepflügt. Da es sich im Jahr 2014 bei der Fruchtart um die Zuckerrübe handelt, folgten die Bodenbearbeitung sowie die Aussaat der Folgekultur (WW) unmittelbar auf die Ernte (26./27.10.).

Im zweiten Versuchsjahr wurden folgende Beprobungen (mit Beprobungstermin) in den Streifen DP1 - DP6 sowie an den Punkten PU1 - PU3 sowie DU1 - DU3 durchgeführt:

1. Herbst 2014: vor dem Umbruch (20./21.10.2014)
2. Herbst 2014: direkt nach dem Umbruch (04./07.11.2014)
3. Herbst 2014: 4 Wochen nach dem Umbruch (04./05.12.2014)
4. Frühjahr 2015: 6 Monate nach dem Umbruch (15./16.04.2015)

Zum Termin „Herbst 2014 vor dem Umbruch“ erfolgte aufgrund des dichten Zuckerrüben-Bestandes keine Beprobung des Unterbodens (Beprobungsschicht 5, s.u.).

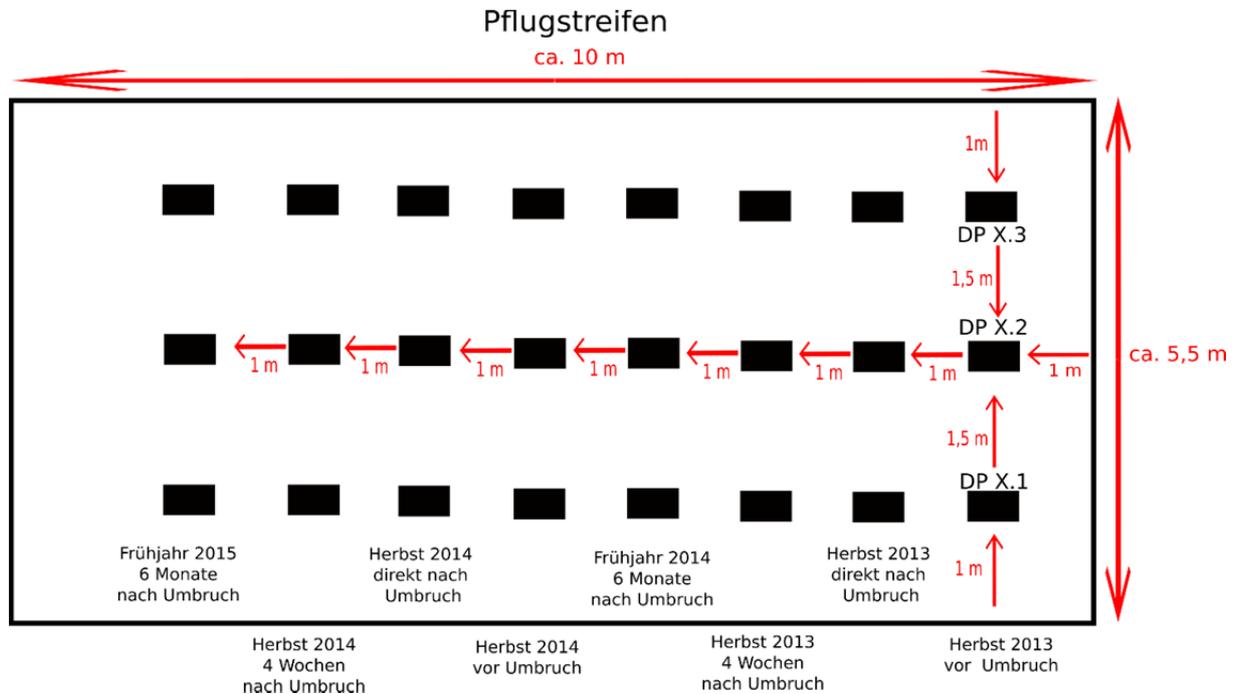


Abbildung 21: Beprobungsschema Pflugstreifen (Umbruchversuch) – Untersuchungsfläche Lüttewitz

Bei allen Beprobungen wurden fünf Schichten beprobt, deren Schichtumfang bzw. untere Grenze nach dem Prinzip äquivalenter Bodenmassen ermittelt wurde. Dazu wurden vorab die folgenden Bodenmassen für die fünf Schichten definiert:

1. 750 kg ha⁻¹
2. 750 kg ha⁻¹
3. 1500 kg ha⁻¹
4. 1500 kg ha⁻¹
5. 4500 kg ha⁻¹

Diese Bodenmassen entsprechen, bei einer idealtypischen TRD von 1,5 g cm⁻³ den folgenden Tiefen:

1. 0 - 5 cm
2. 5 - 10 cm
3. 10 - 20 cm
4. 20 - 30 cm
5. 30 - 60 cm

Um eine Beprobung und Auswertung nach dem Prinzip äquivalenter Bodenmassen zu gewährleisten, wurde unmittelbar vor jeder Mischprobenahme eine Bestimmung der Trockenrohichte durchgeführt. Die Bestim-

mung erfolgte mittels Stechzylindern mit einem Volumen von 100 cm^3 nach DIN 19 672-1. Dies geschah an drei Beprobungspunkten je Parzelle in zwei Tiefenstufen (0 - 10 cm und 20 - 30 cm) mit je drei Messwiederholungen pro Tiefe und Beprobungspunkt.

Die ermittelten Trockenrohdichten wurden für die einzelnen Bodenbearbeitungsvarianten nach dem folgenden Schema in Schichtumfänge bzw. (untere) Grenztiefen der Schichten übersetzt:

- P: Mittelwert aus TRD 0 - 10 und TRD 20 - 30 → Umfang/Tiefe Schichten 1 - 4
- D: Mittelwert aus TRD 0 - 10 und TRD 20 - 30 → Umfang/Tiefe Schichten 1 - 4
- K: TRD 0 - 10 → Umfang/Tiefe Schichten 1 - 2; TRD 20 - 30 → Umfang/Tiefe Schichten 3 - 4
- KL: TRD 0 - 10 → Umfang/Tiefe Schichten 1 - 3; TRD 20 - 30 → Umfang/Tiefe Schicht 4

Für Schicht 5 wurden mit der von KELLER (2005) ermittelten TRD von $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ für alle Varianten gearbeitet, wie sie für Lössböden typisch ist. Diese Werte konnten durch JACOBS et al. (2015: 5) bestätigt werden, welche für die Tiefe 30 - 45 cm Trockenrohdichten zwischen $1,53$ (Variante D) und $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ (Varianten P und K) ermittelten.

Für den Standort Methau wurde die gleiche Methodik angewandt, auch wenn aufgrund der Heterogenität der Fläche in Bezug auf die Grobbodenanteile eine Korrektur einzelner Proben in Bezug auf die ermittelte Trockenrohdichte nach dem Prinzip von THROOP et al. 2012 (s.o.) möglich gewesen wäre. Im Hinblick auf den Vergleich gleicher Bodenmassen, welche eben auch Grobbodenanteile beinhalten, statt gleicher Bodenvolumina, wurde die nachträgliche Korrektur der jeweiligen Stoffvorräte (s.u.) als sinnvoller angesehen als eine Korrektur der Trockenrohdichten.

Die Trockenrohdichten für die einzelnen Termine können dem Kapitel Ergebnisse entnommen werden.

Das folgende Beispiel soll die Vorgehensweise veranschaulichen:

Für die erste Beprobung im April 2012 ergaben sich für den Standort Lüttewitz aus den ermittelten TRD die aufgeführten unteren Grenzen (Grenztiefen) der jeweiligen Beprobungsschichten (Tabelle 7).

Eine Bestimmung der Trockenrohdichte sowie der Stoffgehalte nebst mikrobiellen Parametern an genau der gleichen Probe, wie von ELLERT et al. (2001: 139) vorgeschlagen, konnte in dieser Untersuchung nicht umgesetzt werden. Zum einen stand nicht für alle Beprobungen ein entsprechendes Tiefenbohrgerät mit Rammkernsonde zur Verfügung. Zum anderen konnte selbst bei Nutzung jener Rammkernsonde mit dem größten Volumen keine ausreichende Probenmenge je Beprobungsschicht erzielt werden, um alle geplanten Analysen daran durchzuführen. Nicht zuletzt hätten sich auch Widersprüche in der Probenverarbeitung (Trocknung vs. Kühlung) ergeben.

Bei den Mischprobenahmen wurde eine ca. 35 - 40 cm tiefe kleine Profilgrube ausgehoben. Die Schichten 1 - 4 wurden nach den zuvor ermittelten spezifischen Grenztiefen an der Profilwand beprobt. Eine Holzlatte auf der Bodenoberfläche diente dabei als Richtscheit zur Nivellierung derselben (Abbildung 22).

In aller Regel korrespondierte die variantenspezifische Untergrenze der vierten Beprobungsschicht mit der visuell deutlich erkennbaren Grenze zwischen der Krume und dem Unterboden (Abbildung 22). Dadurch konnte die korrekte Umsetzung der Vorgehensweise im Feld bestätigt werden, da bei langjährig ähnlicher Bearbeitungstiefe mit dem Pflug nebst Ausbildung einer entsprechenden Bearbeitungsgrenze in allen Varianten etwa gleiche Bodenmassen oberhalb dieser Grenze zu erwarten sind.

Tabelle 7: Trockenrohddichten sowie Grenztiefen der Beprobungsschichten im April 2012 auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz

Variante	P	D	K	KL
Beprobungsschicht		Trockenrohddichte (g cm⁻³)		
0 - 10 cm	1,38	1,49	1,44	1,33
20 - 30 cm	1,44	1,50	1,54	1,55
Unterboden	1,5	1,5	1,5	1,5
Grenztiefe Beprobung (in cm u. GOF)				
1 (750 t ha ⁻¹)	5,3	5,0	5,2	5,6
2 (750 t ha ⁻¹)	10,7	10,0	10,4	11,3
3 (1500 t ha ⁻¹)	21,3	20,1	20,2	22,5
4 (1500 t ha ⁻¹)	32,0	30,1	29,9	32,2
5 (4500 t ha ⁻¹)	62,0	60,1	59,9	62,2



Abbildung 22: Profilgrube während der Probenahme auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz
(Foto: Susann Förster 2012)

Schicht 5 wurde zu den meisten Beprobungsterminen mit Hilfe eines Pürkhauer-Bohrstocks oder einer hydraulisch betriebenen Rammkernsonde (Abbildung 23) beprobt. Zu einzelnen Terminen standen diese Hilfsmittel nicht zur Verfügung, sodass die Profilgruben bis ca. 65 - 70 cm Tiefe ausgehoben wurden und die Mischprobe von Schicht 5 ebenfalls an der Profilwand entnommen wurde.

Die Mischproben wurden noch im Feld in je zwei bis vier Teilproben unterteilt und in Polyethylen-Gefrierbeuteln ins Labor verbracht.



Abbildung 23: Unterbodenbeprobung mittels Rammkernsonde im April 2013 auf der Untersuchungsfläche Lüttewitz; (Foto: Ines Walter 2013)

Die Ergebnisse der Laboranalytik (s. u.), welche als Gehalte in Masse-% des Feinbodens vorliegen, können bei dieser Methodik mit der Masse der jeweils beprobten Schicht direkt in Stoffvorräte umgerechnet werden. Die Vorräte müssen, wie von manchen Autoren (z.B. CHEN et al. 2009) richtigerweise angemerkt, ggf. anhand der Grobbodenanteile korrigiert werden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit auf die Fläche wurde in dieser Untersuchung aber zunächst mit den direkten Messwerten gearbeitet, die einer idealisierten Feldsituation (ohne Skelettanteil) entsprechen, wie sie für den Standort Lüttewitz auch gegeben ist.

In einem zweiten Schritt werden, für den Standort Methau, die jeweiligen Vorräte mit verschiedenen Korrekturfaktoren für den Steingehalt berechnet. Dadurch können, bei bekannten Steingehalten für die unterschiedlichen Blöcke bzw. Parzellen und Hangbereiche, Aussagen zu den jeweiligen Stoffvorräten getroffen werden. Je nach Fragestellung können diese Aussagen mit dieser Vorgehensweise entweder kleinräumig differenziert

oder generalisiert werden. Eine direkte Übertragbarkeit von Punktmessungen in die Fläche erscheint für einen bodenkundlich so heterogenen Standort wie Methau wenig praktikabel und sinnvoll.

4.2 Probenverarbeitung

Die Teilproben zur Bestimmung der Parameter Bodenfeuchte und mineralischer Stickstoff wurde ab dem Zeitpunkt der Bodenprobenahme im Feld gekühlt. Sie wurden im Labor feldfrisch verarbeitet.

Die Teilproben zur Bestimmung der Parameter C_t , N_t , pH, P (CAL), K (CAL), Mg (CaCl_2), $C_{\text{hwl}}/N_{\text{hwl}}$ wurden im Labor luftgetrocknet. Stichproben ergaben, dass die Restfeuchte der Proben 1 - 2 % betrug. Die Proben wurden im trockenen Zustand auf 2 mm (Feinboden) gesiebt. Der Grobboden sowie gröbere organische Bestandteile (Stroh, Wurzeln, etc.) wurden ausgesiebt und verworfen.

Die Teilproben zur Bestimmung der Parameter C_{mik} und DHA wurden ab dem Zeitpunkt der Bodenprobenahme im Feld gekühlt. Sie wurden im Labor bis zur Verarbeitung bei -18°C tiefgefroren. Vor der Analytik wurden die Proben schonend aufgetaut (72 h bei 4°C) sowie zur Wiederherstellung der mikrobiellen Biomasse bzw. Aktivität inkubiert (7 Tage bei 22°C). Unmittelbar vor der Fumigation bzw. Extraktion wurden grobe organische Reste sowie der Grobboden entfernt. Die Fumigation bzw. Extraktion fand am naturfeuchten bzw. feldfrischen Proben statt, eine Nivellierung der Feuchte erfolgte nicht.

4.3 Laboranalytik

Die gesiebten Teilproben wurden im Labor der BfUL in Nossen auf die Parameter C_t , N_t , pH, P (CAL), K (CAL), Mg (CaCl_2), Bodenfeuchte und N_{min} untersucht. Die Messwerte bzw. Gehaltsangaben für C_t , N_t , P (CAL), K (CAL), Mg (CaCl_2) beziehen sich dabei jeweils auf den lufttrockenen Boden. Aufgrund der geringen Restfeuchte von 1 - 2 % erfolgte keine Bestimmung der probenspezifischen Restfeuchte nebst Korrektur der Werte.

Die Untersuchung der Parameter C_{mik} , DHA und $C_{\text{hwl}}/N_{\text{hwl}}$ wurde von Mitarbeitern des Instituts für Geographie der Universität Leipzig durchgeführt. Die Umrechnung der Werte auf die jeweilige Trockenmasse der Proben erfolgte anhand der in der BfUL ermittelten Werte für die Bodenfeuchte.

Die Untersuchung der Gesamtgehalte an Phosphor (P_t), Kalium (K_t) und Magnesium (Mg_t) wurde im Rahmen von Qualifikationsarbeiten (FÖRSTER 2012 und WANG 2012) von den beiden Bearbeiterinnen am Probenkollektiv dieser Untersuchung aus dem Frühjahr 2012 durchgeführt.

Es erfolgten im Rahmen dieser Untersuchung keine weiteren bodenphysikalischen Messungen, insbesondere keine Bestimmung der Korngrößen bzw. Bodenarten an den jeweiligen Proben. Für diese Daten wurden die entsprechenden Vorarbeiten (GUMPERT 2012, LFULG 2012, Teiwes 1997, THIEL 2010) herangezogen.

Es kamen folgende Labormethoden zum Einsatz:

- C_t/N_t : Trockene Verbrennung bei ca. 1000°C (nach DIN ISO 13878 für N_t bzw. DIN ISO 10694 für C_t) mit Vario MACRO Cube (Elementar) (bis Juni 2012 TrueSpec CN (Leco))
- pH: Bestimmung in 0,0125 M CaCl_2 -Lösung (nach VDLUFA Verbandsmethode A 5.1.1), Messung mit WTW pH197i, pH - Einstabmesskette A 162 (SI Analytics), in System MINILAB (Rohasys)

- P(CAL) & K(CAL): Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat-Laktat-Auszug (VDLUFA Verbandsmethode A 6.2.1.1), Messung an Continuous Flow Analysator (CFA) (SEAL AutoAnalyser 3)
- Mg(CaCl₂): Bestimmung von Magnesium im Calciumchlorid-Auszug (nach VDLUFA Verbandsmethode A 6.2.4.1), Messung an Continuous Flow Analysator (CFA) (Skalar SAN ++)
- Bodenfeuchte: Bestimmung des Wassergehaltes von Bodenproben mittels Gravimetrie (Trockenschrankmethode) (nach VDLUFA Verbandsmethode C 1.1.1)
- N_{min}: Bestimmung von mineralischem Stickstoff (Nitrat und Ammonium) in Bodenprofilen (N_{min}-Labormethode) mittels CaCl₂ (0,0125 M)-Extraktion (nach VDLUFA Verbandsmethode A 6.1.4.1), Messung an Continuous Flow Analysator (CFA) (Skalar SAN ++)
- C_{hwf}/N_{hwf}: Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff und Stickstoff (nach VDLUFA Verbandsmethode A 4.3.2); Extraktion in zweifacher Laborwiederholung; Messung der Extrakte am MultiNC (AnalytikJena)
- C_{mik}: Bestimmung des Biomasse-Kohlenstoffs mit der Fumigations-Extraktions-Methode (nach VANCE et al. 1987 bzw. DIN ISO 14240-2), Extraktion in dreifacher Laborwiederholung; Messung der Extrakte am MultiNC (AnalytikJena); Berechnung der Ergebnisse mit K_{ec}= 0,45
- DHA: Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität mit TTC (nach THALMANN 1968 bzw. DIN ISO 23753 - 1:2005) in dreifacher Laborwiederholung (Einwaage: 1 g Boden), photometrische Messung der Extrakte bei 485 nm mit UV/VIS-Spektrometer von AnalytikJena (bis 2013) bzw. mit DR 6000 (HachLange) (ab 2014)
- P_t, K_t und Mg_t: Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente (nach DIN ISO 11466), Messung mittels Inductively-Coupled-Plasma(ICP)-Optical-Emission-Spektrometry (OES) (Perkin Elmer Optima 7300 DV)

Alle angegebenen Gehalte und Massen beziehen sich in diesem Bericht jeweils auf das Feinmaterial (< 2 mm) des Bodens.

4.4 Datenkontrolle und -bearbeitung

Insgesamt wurden für diese Untersuchung 1915 Einzelproben bzw. Datensätze analysiert bzw. erhoben. Davon stammen 1495 vom Standort Lüttewitz und 420 vom Standort Methau.

Für die fehlende Werte von Schicht 5 zum Termin „Herbst 2014 vor Umbruch“ (Beprobung des Unterbodens aufgrund des ZR-Bestandes nicht möglich) wurden die Werte des nachfolgenden Termins „Herbst 2014 direkt nach Umbruch“ eingesetzt („Dummy“), damit die Bilanzen für das Gesamtprofil gerechnet werden konnten. Es wird davon ausgegangen, dass im nicht bearbeiteten Unterboden innerhalb von ca. einer Woche nur geringfügige Veränderungen stattfanden und die Werte somit Gültigkeit beanspruchen können.

Für den Termin „Herbst 2013 direkt nach Umbruch“ wurden in der Direktsaatvariante (DU1 - DU3) die Messwerte des Termins „Herbst 2013 vor Umbruch“ genutzt bzw. gesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund der nicht erfolgten Bodenbearbeitung innerhalb von ca. einer Woche zwischen den beiden Terminen nur sehr geringfügige Veränderungen im Boden auftraten, die den erheblichen Mehraufwand einer erneuten Beprobung und Analytik nicht rechtfertigten. Im Herbst 2014 wurde, aufgrund der höheren Eingriffsintensität bei der Zuckerrübenenernte, die Direktsaatvariante zu beiden Terminen (vor und direkt nach der Ernte bzw. dem Umbruch) beprobt.

Im Rahmen der Labormessungen der oben genannten Parameter kamen sowohl Boden- als auch Extraktionsstandards zum Einsatz. Dadurch wurden die Messungen im Hinblick auf die Höhe und Reproduzierbarkeit der Messwerte permanent überprüft.

Im Rahmen der Auswertung von Daten der Ringversuche des VDLUFA wurde eine laborübergreifende „Untere Grenze der Vergleichbarkeit“ von verschiedenen Parametern statistisch ermittelt (VDLUFA 2012: 11). Diese wird auch als (untere) „Bestimmungsgrenze unter Vergleichsbedingungen“ bezeichnet. Für die im Rahmen dieser Untersuchung erhobenen Parameter werden dabei die folgenden Werte angegeben:

- P(CAL): 2,2 mg 100 g⁻¹
- K(CAL): 3,0 mg 100 g⁻¹
- Mg(CaCl₂): 0,37 mg 100 g⁻¹
- N_i: 0,075 % TM
- Nitrat (CaCl₂): 1,4 mg kg⁻¹

Dabei werden folgende Regressionsgleichungen für die Berechnung der konzentrationsspezifischen erweiterten Messunsicherheit (U) angegeben:

- P(CAL): $U = 2 (0,32 + 0,0543 \times \text{gemessene P-Konzentration})$
- K(CAL): $U = 2 (0,43 + 0,0392 \times \text{gemessene K-Konzentration})$
- Mg(CaCl₂): $U = 2 (0,08 + 0,0498 \times \text{gemessene Mg-Konzentration})$
- C_{org} bzw. C_i: $U = 2 (0,05 + 0,0641 \times \text{gemessene C-Konzentration})$
- N_i: $U = 2 (0,011 + 0,0214 \times \text{gemessene N-Konzentration})$
- Nitrat (CaCl₂): $U = 2 (0,36 + 0,0446 \times \text{gemessene NO}_3\text{-Konzentration})$

Der jeweils vorangestellte Faktor 2 erweitert die einfach Messunsicherheit, welche dem errechneten Vergleichsvariationskoeffizienten entspricht, sodass diesem Maß der erweiterten Messunsicherheit zu etwa 95 % vertraut werden kann (VDLUFA 2012: 2). Die Messunsicherheit nimmt dabei prozentual mit steigenden Konzentrationsniveaus ab.

So ergibt sich für den Parameter C_{org} bei einem gemessenen Gehalt von 1,0 % eine erweiterte (absolute) Messunsicherheit von 0,2282 Gehalts-%. Dies entspricht 22,8 % des Messwertes. Für einen gemessenen C_{org}-Gehalt von 2 % liegt die erweiterte (absolute) Messunsicherheit bei 0,3564 Gehalts-%, was 17,3 % des Messwertes entspricht.

Für die durch die BfUL bereit gestellten Parameter pH, C_t, N_i, P (CAL) und K (CAL) wurde eine Fehleranalyse mittels Box-Whiskers-Plots für die einzelnen Varianten und Beprobungsschichten durchgeführt. Alle Ausreißer (Werte = 1,5 - 3facher Interquartilsabstand) und Extremwerte (Werte > 3facher Interquartilsabstand) wurden einer inhaltlichen Plausibilitätsprüfung unterzogen. In einzelnen Fällen konnten systematische Fehler wie das Vertauschen einzelner Proben bzw. Beprobungspunkte ausgemacht werden, die behoben wurden. War dies nicht der Fall, wurden die in Zweifel stehenden Proben einer Nachmessung unterzogen. Dies betraf für die

genannten Parameter 45 Einzelproben. Bei starker Abweichung zwischen den Werten der Originalmessung und der Nachmessung wurde eine zweite Nachmessung durchgeführt.

Bei geringer (prozentualer) Abweichung zwischen dem Wert der Originalmessung und jenem der Nachmessung wurde der Originalmesswert beibehalten. Nach einer zweiten Nachmessung wurde je nach Lage der drei Messpunkte i. d. R. der Mittelwert der beiden näher beieinander liegenden Messwerte gebildet.

Für die je drei Messwerte der Analytik zur mikrobiellen Biomasse (C_{mik}) (fumigierte und nicht fumigierte Proben) und zur Dehydrogenaseaktivität (DHA) wurden die Standardabweichung sowie der Variationskoeffizient (CV) berechnet. Lag der CV über 10 %, wurden diejenigen Werte als Ausreißer definiert, deren Differenz zum mittleren Messwert (Median) mehr als doppelt so groß war wie jene des dritten Messwertes zum Median.

Beispiel (Frühjahr 2015, Punkt PU1, Schicht 5, fumigierte Proben):

- Messwert 1: 42,08 mg l⁻¹
- Messwert 2: 38,19 mg l⁻¹
- Messwert 3: 27,29 mg l⁻¹
- SA: 7,67
- CV: 21,38 %
- Differenz Messwert 1 - Messwert 2 (Median): 3,89 mg l⁻¹
- Differenz Messwert 3 - Messwert 2 (Median): 10,9 mg l⁻¹
- $2 \times 3,89 \text{ mg l}^{-1} = 7,78 \text{ mg l}^{-1}$
- $7,78 \text{ mg l}^{-1} < 10,9 \text{ mg l}^{-1} \rightarrow$ Messwert 3 = Ausreißer

Als Ausreißer in diesem Sinne definierte Messwerte wurden eliminiert. Aus den verbleibenden zwei bzw. drei Messwerten wurde der arithmetische Mittelwert gebildet und dieser als Grundlage der weiteren Berechnung genutzt. Negative Messwerte wurden ebenfalls eliminiert, da sie nicht plausibel sind.

Für je zwei Messwerte der Analytik zum heißwasserlöslichen Kohlen- bzw. Stickstoff wurde die Differenz zwischen beiden Werten berechnet. Lag diese Differenz über 10 % des kleineren Messwertes wurde eine weitere (dritte) Laborwiederholung durchgeführt. Für die nun drei Messwerte wurde wie bei den Messwerten der mikrobiellen Analytik (s.o.) vorgegangen. Lag die Differenz unter 10 % des kleineren Messwertes, wurde der arithmetische Mittelwert aus beiden Messwerten gebildet und als Grundlage der weiteren Berechnung genutzt.

4.5 Statistische Datenanalyse

Für alle Daten wurde eine umfangreiche deskriptive Statistik erhoben, welche aus dem Stichprobenumfang n , der Wertespanne, dem arithmetischen Mittelwert (MW), dem Median (MN) und der Standardabweichung (SA) besteht. Diese Daten wurden nach Standorten, Blöcken (am Standort Methau) sowie Bearbeitungsvarianten und Terminen differenziert.

Für den Standort Methau wurden keine weiteren statistischen Test aus dem Bereich der schließenden Statistik durchgeführt, da der geringe Stichprobenumfang ($n = 3$) je Block und Variante zu gering ist, um die Voraussetzungen der Normalverteilung und Varianzhomogenität zu testen bzw. zu erfüllen. Der Vergleich von

Bodenbearbeitungsvarianten sowie Blöcken erfolgt über die arithmetischen Mittelwerte. Auch Zeitreihenanalysen wurden aufgrund der unterschiedlichen Beprobungszeitpunkte innerhalb der Fruchtfolge sowie des Kalenderjahres nicht durchgeführt.

Für beide Standorte wurde jeweils eine Korrelationsmatrix der untersuchten Parameter aufgestellt, in welcher der Stichprobenumfang, der Korrelationskoeffizient nach Pearson sowie das Signifikanzniveau angegeben sind.

Für die Basisbeprobungen am Standort Lüttewitz wurden für die Parameter C_t , N_t , P_t , K_t , sowie die Anteile von $P(\text{CAL})$ an P_t und von $K(\text{CAL})$ an K_t bei einem Stichprobenumfang von $n = 9$ je Termin und Variante bzw. $n = 36$ je Variante (für alle vier Termine) und gegebener Normalverteilung nach Shapiro-Wilk und Varianzhomogenität nach Levene einfaktorische Varianzanalysen durchgeführt. Wenn diese Signifikanzen von $p < 0,05$ aufwiesen, wurden Post-Hoc-Tests nach SCHEFFÉ mit $\alpha = 0,05$ durchgeführt, um zu überprüfen, zwischen welchen Bodenbearbeitungsvarianten die signifikanten Unterschiede auftraten und welche homogenen Untergruppen gebildet werden können.

Für die Ergebnisse des Umbruchversuches wurde genauso verfahren, wobei hierbei für die Parameter C_t , N_t , C_{hwl} , C_{mik} getestet wurde. Dabei wurden jeweils getrennt zunächst für alle acht Termine die Pflugstreifen DP1-DP3 sowie für die vier Termine ab Herbst 2014 für die Pflugstreifen DP4-DP6 gegenüber den Referenzvarianten P und D getestet.

Wenn über die deskriptive Statistik extreme Ausreißer identifiziert wurden, wurde diese aus den Hypothesentests ausgeschlossen, da sie i.d.R. zu einer Verletzung der Voraussetzungen der Normalverteilung und Varianzhomogenität führen. Eine gesonderte Besprechung dieser Extremwerte erfolgt im Rahmen der Fehlerdiskussion (Kapitel Diskussion).

Dies betrifft im Einzelnen folgende Datensätze der Untersuchungsfläche Lüttewitz:

- Beprobungspunkt P2, Frühjahr 2012, Beprobungsschicht 5 (C_t)
- Beprobungspunkt DP4.1, Frühjahr 2015, Beprobungsschicht 4 (C_t , C_{hwl})
- Beprobungspunkt DP1.2, Herbst 2013 direkt nach Umbruch, Beprobungsschicht 5 (C_{mik})
- Beprobungspunkte DP6.1, Herbst 2014 4 Wochen nach Umbruch, Beprobungsschicht 5 (C_{mik})

Die gesamte statistische Datenbearbeitung erfolgte mit der Software SPSS Statistics 23 von IBM.

5 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt getrennt für die einzelnen Parameter und innerhalb dieser immer zunächst für den Standort Lüttewitz (Basisbeprobungen und Umbruchversuch) und in der Folge für den Standort Methau. Am Ende des Kapitels werden die Korrelationen zwischen den zentralen bodenchemischen Parametern, nach Standorten getrennt, anhand von zwei Matrizen dargestellt.

Die Ergebnisse für den Standort Methau werden größtenteils nach Blöcken getrennt dargestellt, da sich diese insbesondere in Bezug auf die sonstige Bewirtschaftung (Kulturart, Düngung, etc.) als auch in Bezug auf den oberflächennahen Untergrund teilweise erheblich unterscheiden.

Die jeweiligen Stoffvorräte für den Standort Methau werden, wie bereits im Abschnitt zur Methodik dargelegt, zunächst jeweils auf einen idealisierten Boden bezogen, welcher lediglich Feinmaterial mit Korngrößen < 2 mm enthält. In einer Tabelle werden jeweils am Ende der Abschnitte die korrigierten Vorräte für verschiedene Grobbodenanteile bzw. Korrekturfaktoren von 5 - 50 % aufgeführt. Dabei wird zwischen der Krume (Beprobungsschicht 1 - 4) und dem Unterboden (Beprobungsschicht 5) differenziert. Eine weitere Differenzierung der Stoffvorräte nach Beprobungsschichten innerhalb der Krume, Parzellen oder Beprobungspunkten wäre anhand der spezifischen Grobbodenanteile möglich. Im Hinblick auf Aussagen bzgl. der Stoffvorräte auf der gesamten Untersuchungsfläche bzw. der Übertragbarkeit auf vergleichbare Standorte erscheint das gewählte Maß an Generalisierung aber sinnvoll. Dies gilt auch für den Vergleich zu anderen Untersuchungen zu diesem Thema, welche sich häufig auf den Krumenbereich (0 - 30 cm) beziehen.

Die Ergebnisse für die Parameter $Mg(CaCl_2)$ und Mg_t sowie N_{min} wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung mit erhoben, werden in diesem Bericht aber nicht dargestellt, da sie nicht im Zentrum der Untersuchung standen.

5.1 Trockenrohichte

Als Trockenroh- oder Lagerungsdichte (ρ_t) wird die Masse des bei 105° C getrockneten Bodens bezogen auf das Gesamtvolumen bezeichnet (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005: 126, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 163). Sie wird in $g\ cm^{-3}$ angegeben.

Im Rahmen landwirtschaftlicher Aktivitäten kommt es dabei sowohl zu Absenkungen der Bodenoberfläche (Zunahme von ρ_t), z. B. durch den Einsatz von schweren Maschine mit entsprechender Auflast, als auch zu Anhebungen derselben (Abnahme von ρ_t), z. B. durch Bodenbearbeitungs- bzw. Bodenlockerungsmaßnahmen oder lockernd wirkende Fruchtarten.

In der Bodenkunde wird die Trockenrohichte (TRD) in Deutschland üblicherweise in 5 Stufen eingeteilt (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005: 126):

- $< 1,2\ g\ cm^{-3} \rightarrow pt1$ (sehr gering)
- $1,2 - 1,4\ g\ cm^{-3} \rightarrow pt2$ (gering)
- $1,4 - 1,6\ g\ cm^{-3} \rightarrow pt3$ (mittel)
- $1,6 - 1,8\ g\ cm^{-3} \rightarrow pt4$ (hoch)
- $> 1,8\ g\ cm^{-3} \rightarrow pt5$ (sehr hoch)

Für die an den Untersuchungsstandorten vorliegenden Böden auf bzw. aus Lösslehm werden häufig Trockenrohdichten von ca. $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ angegeben. Im Rahmen von bodenphysikalischen Messungen auf der Untersuchungsfläche in Lüttewitz (TEIWES 2005) wurden in der Krume (bis 3,5 dm unter GOF) Trockenrohdichten in den Stufen pt2-3 ($1,2 - 1,6 \text{ g cm}^{-3}$) sowie im Unterboden in der Stufe pt3 ermittelt. Die größere Streuung in der Krume ist dabei im Wesentlichen ein Effekt der (differenzierten) Bodenbearbeitung sowie der Lage im Relief und des Bodentyps.

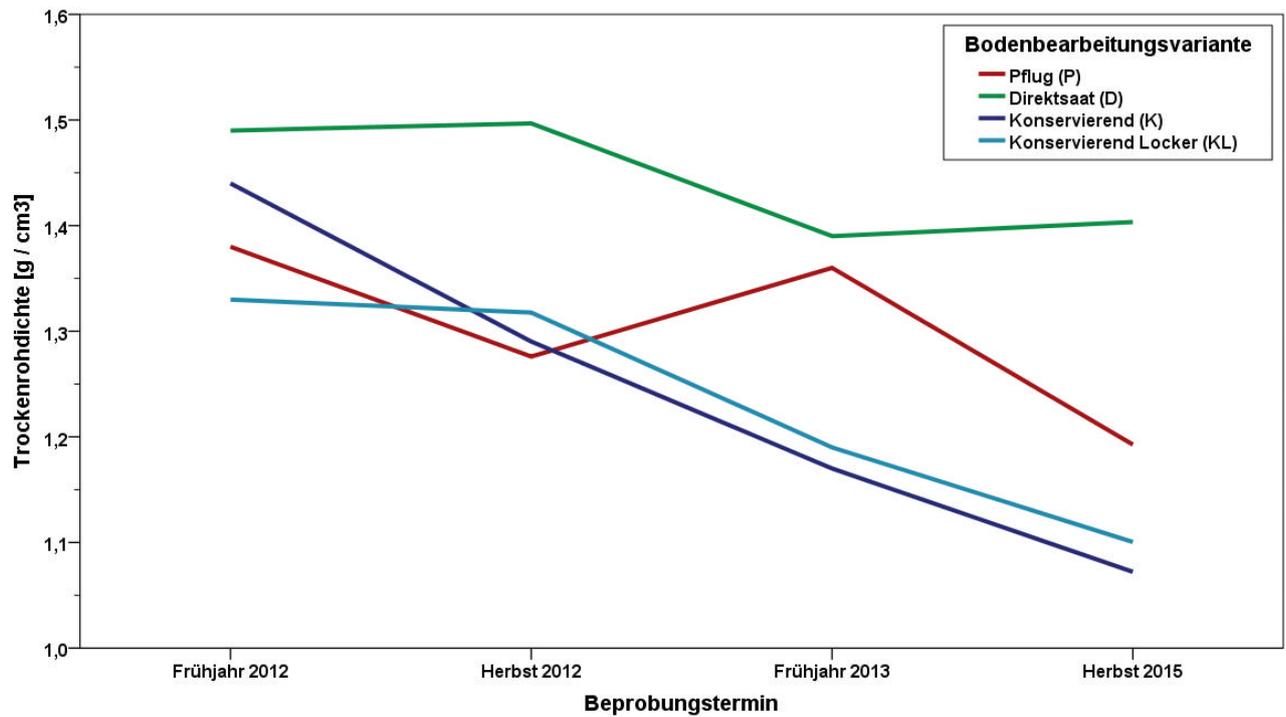
5.1.1 Lüttewitz

5.1.1.1 Basisbeprobungen

Die Trockenrohdichten in den oberen 10 cm des Bodenprofils unterscheiden sich erheblich zwischen den Varianten und den Terminen (Abbildung 24). Die Variante Direktsaat (D) weist dabei aufgrund der minimalen Bodenbearbeitung bzw. Lockerung durchgängig die höchste TRD aller Varianten auf. Sie liegt zu den beiden Terminen des Jahres 2012 bei ca. $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, im Frühjahr 2013 und Herbst 2015 etwas niedriger bei etwa $1,4 \text{ g cm}^{-3}$. Die Pflugvariante (P) weist zu den beiden Frühjahrsterminen jeweils eine etwas höhere TRD von ca. $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ auf, zu den Herbstterminen nach dem Umbruch bodenbearbeitungsbedingt eine geringere TRD von $1,3$ (Herbst 2012) bzw. $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ (Herbst 2015). Für die tiefengelockerte Variante KL wurden für beide Termine 2012 Werte zwischen $1,3$ und $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ ermittelt, für die Termine im Frühjahr 2013 mit $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ und für den Herbst 2015 mit $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ hingegen erheblich geringe Dichten. Die Variante Konservierend (K) schließlich zeigt ein Abnahmetendenz der TRD über alle Termine von $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ im Frühjahr 2012 bis zu $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ im Herbst 2015.

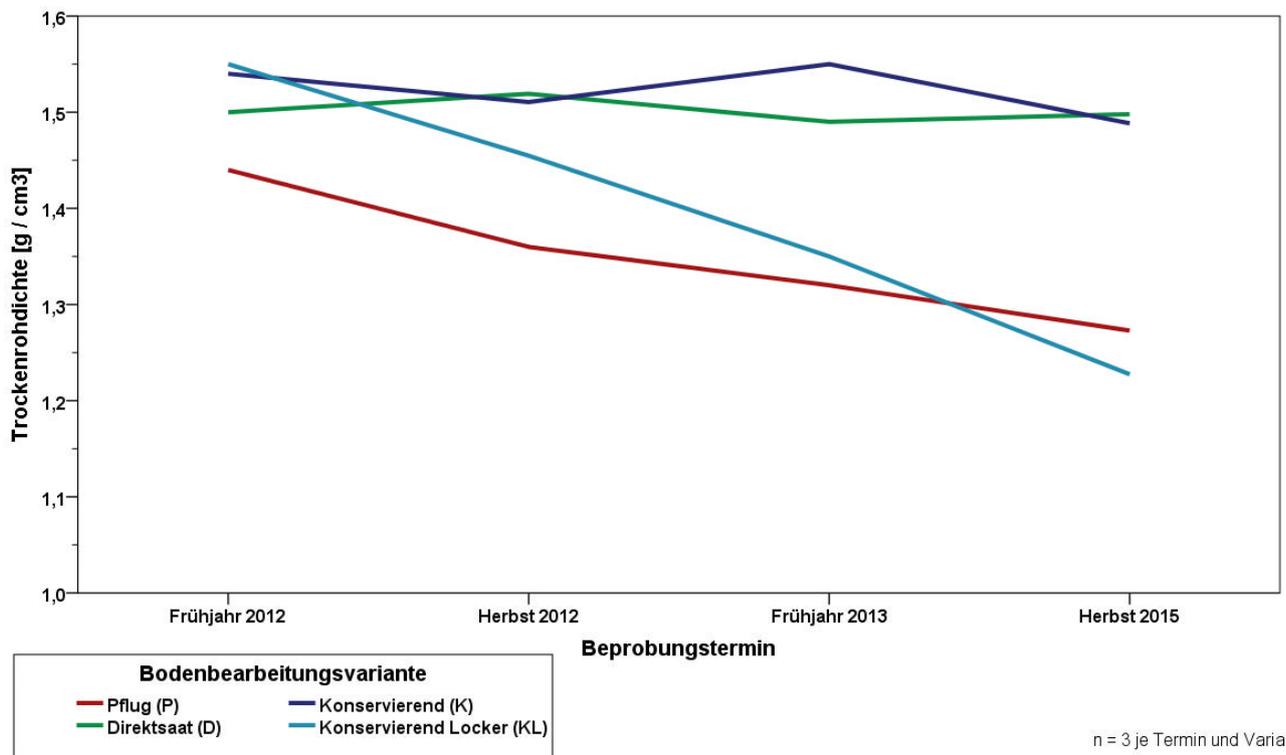
Für die bearbeiteten Varianten P, K und KL ist zu beachten, dass aufgrund der zeitlichen Nähe der beiden Herbstbeprobungen zu den Bodenbearbeitungsmaßnahmen (im Herbst 2012 ca. eine Woche vor der Beprobung, im Herbst 2015 ca. drei Wochen vor der Beprobung) die ermittelten Dichten lediglich eine Momentaufnahme darstellen. Es ist davon auszugehen, dass in der Folge durch Setzungs- und Verdichtungsprozesse wieder höhere Dichten vorlagen. Vor diesem Hintergrund liegen die für das Frühjahr 2013 ermittelten Dichten in den Varianten K und KL nicht im Erwartungsbereich. Vielmehr würde man erwarten, dass die Dichten zum Frühjahr ansteigen, wie es bei der Variante P der Fall ist. Möglicherweise handelt es sich um einen Effekt der ungewöhnlich kalten Witterung in den ersten Monaten des Jahres 2013, welche durch ein Auffrieren des oberflächennahen Untergrundes zu einer Lockerung desselben geführt hat. Dies wäre dann allerdings auch für die bearbeitete Variante P zu erwarten.

In der Tiefenstufe 20 - 30 cm sind die Schwankungen innerhalb der Varianten zwischen den Terminen geringer (Abbildung 25). Dies gilt insbesondere für die in dieser Tiefe nicht mehr bearbeiteten Varianten D und K. Für diese wurden über alle Termine stabile Werte zwischen $1,5$ und $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ ermittelt. Die Variante KL weist im Frühjahr 2012 ähnliche Werte auf, diese nehmen aber im Verlauf der Untersuchung stetig ab und im Herbst 2015 wurden Werte von $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ ermittelt, welche sogar unter jenen der Pflugvariante liegen. Letztere Variante zeigt ebenfalls eine stetige Abnahme der Dichten in dieser Tiefe, die aber weniger stark ausgeprägt ist als in der Variante KL. Sie weist dabei Werte von $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ (Frühjahr 2012) bis $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ (Herbst 2015) auf.



n = 3 je Termin und Variante

Abbildung 24: Mittlere Trockenrohddichten in der Oberkrume (0-10 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen der Basisbeprobungen



n = 3 je Termin und Variante

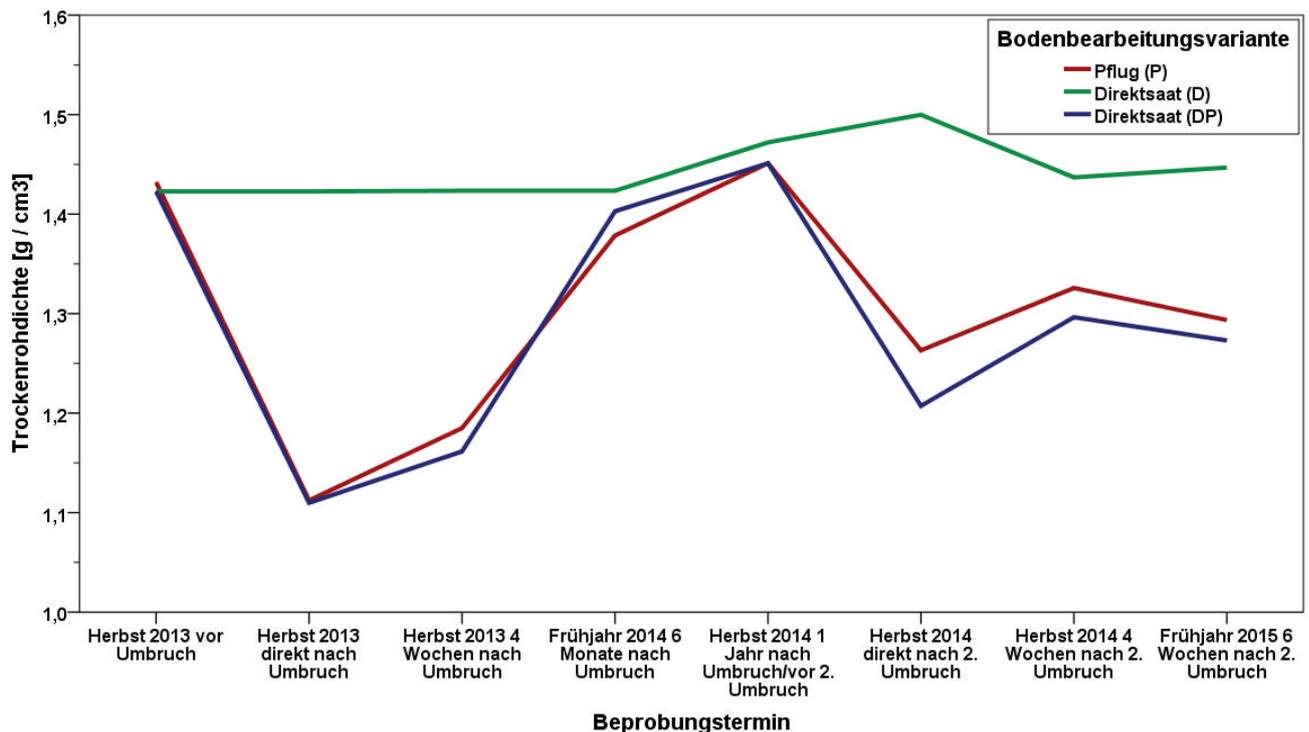
Abbildung 25: Mittlere Trockenrohddichten in der Unterkrume (20-30 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen der Basisbeprobungen

5.1.1.2 Umbruchversuch

Für die Schicht 0 - 10 cm wurden auch im Rahmen des Umbruchversuches für die Variante Direktsaat (D) relativ konstante Dichten von 1,4 - 1,5 g cm⁻³ ermittelt (Abbildung 26). Die Kurven der Dichten für die Varianten P und DP zeigen in dieser Schicht einen nahezu identischen Verlauf mit Anfangswerten von 1,45 g cm⁻³, welche durch den Umbruch auf ca. 1,1 g cm⁻³ reduziert werden. Im Verlauf des nächsten Jahres steigt die Dichte wieder auf 1,45 g cm⁻³ an, wird aber im Rahmen der Rübenernte und des Umbruchs im Herbst 2014 auf 1,2 - 1,25 g cm⁻³ reduziert. In der Folge steigt die TRD in beiden Varianten wieder leicht an.

In der Unterkrume (20 - 30 cm) hingegen unterscheiden sich die Variante P und DP deutlicher voneinander (Abbildung 27): Während in der Variante P relativ konstante Dichten zwischen 1,3 und 1,4 g cm⁻³ ermittelt wurden, reduziert der Umbruch im Herbst 2013 die Dichte in der Variante DP in dieser Schicht auf ca. 1,1 g cm⁻³. Bereits 4 Wochen nach dem Umbruch hat sich die Dichte aber wieder jener der Variante P angeglichen. Für das Frühjahr 2014, den Termin 4 Wochen nach dem 2. Umbruch sowie das Frühjahr 2015 wurden wiederum Werte ermittelt, die im Bereich der Variante D lagen, welche auch in dieser Tiefe konstante Dichten von 1,45 - 1,5 g cm⁻³ aufweist.

Die Schwankungen in der Variante DP in dieser Tiefe sind ein Hinweis darauf, dass nach ein- bzw. zweimaligem Pflügen (noch) keine homogenen (Dichte-)Verhältnisse in der Krume vorliegen. Zudem geht der zweite Umbruch im Herbst 2014 weder in der Variante P noch in der Variante DP mit einer Verringerung der Dichte in dieser Tiefe einher, wie es zu erwarten wäre. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass vergleichsweise flach gepflügt und eine Durchmischung nur bis ca. 20 cm unter GOF durchgeführt wurde.



n = 3 je Termin und Variante

Abbildung 26: Mittlere Trockenrohichten in der Oberkrume (0-10 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

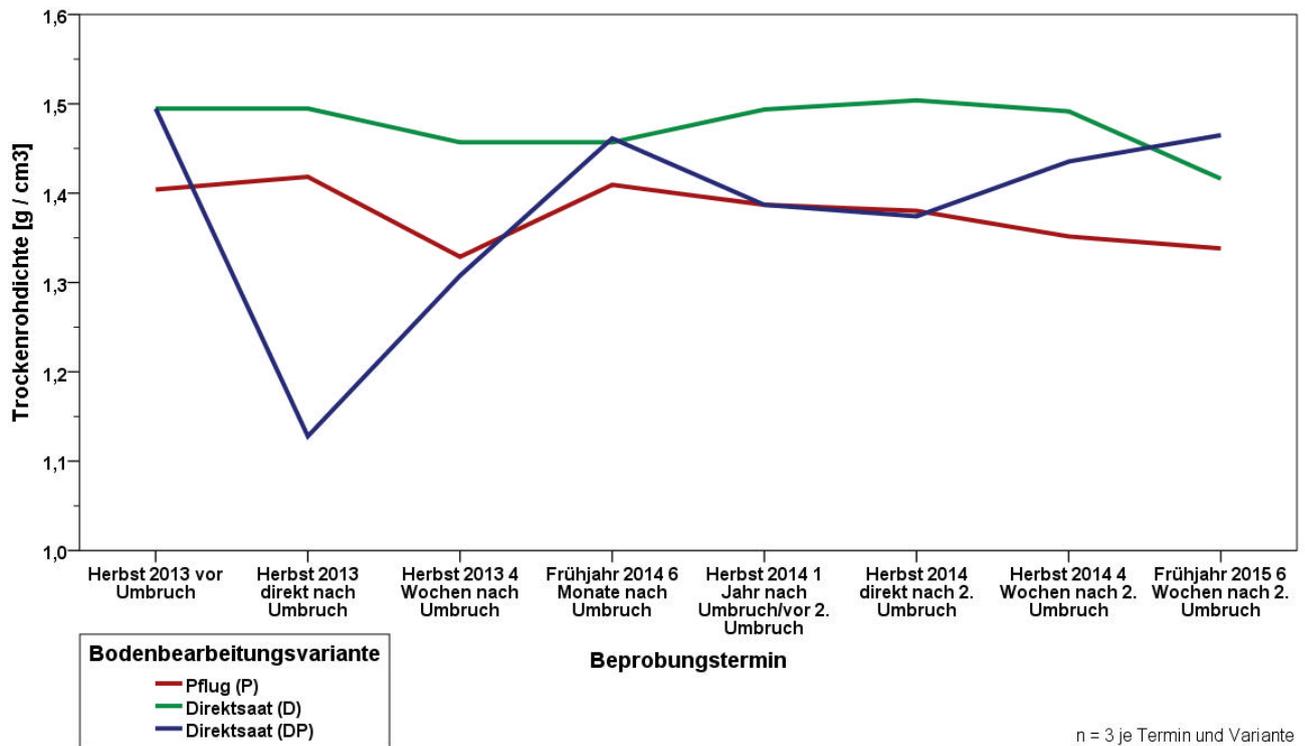


Abbildung 27: Mittlere Trockenrohddichten in der Unterkrume (20-30 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

5.1.1.3 Unterboden

Die TRD des Unterbodens (> 30 cm) wurde einmalig im Frühjahr 2015 ermittelt. Da dieser Teil des Profils nicht von der Bodenbearbeitung erfasst wird, ist davon auszugehen, dass die ermittelten Werte über längere Zeiträume stabil sind und somit für alle Beprobungstermine Gültigkeit haben.

Für alle drei Varianten (P, D, DP) wurde ein Wert von $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ ermittelt. Die Bodenbearbeitung hat also keinen oder nur sehr geringen Einfluss auf die TRD des Unterbodens. Zudem wurde der Wert von $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, mit dem für die vorangegangenen Beprobungen zur Berechnung der Schichtgrenzen gearbeitet wurde, mit einer Abweichung von $0,05 \text{ g cm}^{-3}$ bestätigt. Diese Abweichung entspricht einem Dreißigstel des zugrunde gelegten Bodenpakets, was bei einer Bodenmasse von 4500 t ha^{-1} und der Dichte von $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ einer Abweichung von 1 cm entspricht.

5.1.2 Methau

Für diesen Standort liegen nur wenige Vergleichswerte aus Voruntersuchungen für die Trockenrohddichte vor. Aufgrund der Feinbodenart (Ut4) und der landwirtschaftlichen Bodennutzung ist jedoch grundsätzlich von einem ähnlichen Wertebereich wie am Standort Lüttewitz auszugehen. Für das Profil P.261, welches als Leitbodenprofil für die Erstellung der BK 50 im Jahr 2003 am Mittelhang im Bereich der Pflugparzelle in Block 3 aufgenommen wurde (Datengrundlage: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Stand August 2016), wird für den Ap-Horizont bis 27 cm Tiefe eine effektive Lagerungsdichte von $1,3 - 1,6 \text{ g cm}^{-3}$ angegeben, bei einer Feinbodenart Ut2. Im darunter befindlichen Al+Bt-Sw-Horizont wurde als Feinbodenart Ut3 sowie eine effektive Lagerungsdichte von $1,6-1,8 \text{ g cm}^{-3}$ festgestellt. Aus weiteren eigenen und fremden Voruntersuchungen (GUMPERT 2012) wird aber deutlich, dass die Bodenarten sowie die Lagerungsdichten auf der Fläche sehr heterogen verteilt sind. Dies gilt insbesondere auch für die Grobbodenanteile, welche mit der Tiefe sowie im Längs- und Querverlauf des Hanges stark variieren. Der Grobboden wurde, bis auf größere

Steine, bei der Entnahme der Stechzylinder mit erfasst und sorgt aufgrund seines hohen spezifischen Gewichtes für eine Erhöhung der TRD-Werte. Eine Korrektur der Werte (z.B. im Sinne von THROOP et al. 2012) fand nicht statt, da der Grobboden als integraler Bestandteil des Bodens und folglich die ermittelte Lagerungsdichte als Zustandsparameter desselben aufgefasst wird.

Aufgrund der Heterogenität des Standortes wurde, wie bei den anderen Parametern, die Dichte für jeden der drei Streifen sowie beide Bodenbearbeitungsvarianten (P, K) innerhalb derselben separat ermittelt. Dabei wurde, wie am Standort Lüttewitz, die Dichte unmittelbar vor jeder Mischprobenahme in dreifacher Feldwiederholung in zwei Tiefen (0 - 10 cm, 20 - 30 cm) mit jeweils drei Messwiederholungen, ermittelt.

Im Herbst 2012 konnten im straßennahen Block 1 in der Variante Pflug keine Stechzylinder entnommen werden. Es wurden zur Berechnung der Beprobungstiefen die Dichten von $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ für die Schicht 0 – 10 cm und $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ für die Schicht 20 - 30 cm angenommen. Diese Werte sind vor dem Hintergrund der zwei Wochen zuvor erfolgten Bodenbearbeitung realistisch und liegen in der Größenordnung der für die Blöcke 2 und 3 für diese Variante ermittelten Trockenrohdichten.

Die Dichte im Grünlandstreifen (G) wurde lediglich zu den Terminen im Frühjahr 2013 und im Herbst 2015 ermittelt.

5.1.2.1 Oberkrume (0 - 10 cm)

Für die obere Krume (0 - 10 cm u. GOF) ergibt sich in der Variante Pflug (P) für die drei Blöcke ein relativ einheitliches Bild (Abbildung 28): So liegen die Dichten in allen drei Blöcken im Frühjahr 2012 bei $1,4 - 1,5 \text{ g cm}^{-3}$. Sie sinken zum Termin im Herbst 2012 deutlich ab, was auf die vorausgegangene Bodenbearbeitung (Umbbruch) zurückzuführen ist. Dieser liegt in den Blöcken 1 (straßennah) und 2 (Mitte) ca. 2 Wochen vor der Probenahme, in Block 3 (straßenfern) ca. 6 Wochen vor Probenahme. Die TRD wird durch diese Maßnahme jeweils auf ca. $1,2 - 1,3 \text{ g cm}^{-3}$ reduziert, wobei der Unterschied zwischen beiden Terminen im Block 2 am geringsten ausfällt. Zum Frühjahr 2013 steigen die Dichten der Variante P in allen drei Blöcken wieder deutlich an und erreichen in etwa die Werte des Frühjahrs 2012. Im Herbst 2015 wurden für die Blöcke 2 und 3 Werte zwischen $1,2$ und $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ ermittelt, die wiederum auf eine kurz vor der Beprobung durchgeführte intensive Bodenbearbeitung zurückzuführen ist. Diese war zum Beprobungszeitpunkt in Block 1 (straßennah) noch nicht durchgeführt worden, was die vergleichsweise hohe TRD von ca. $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ erklärt.

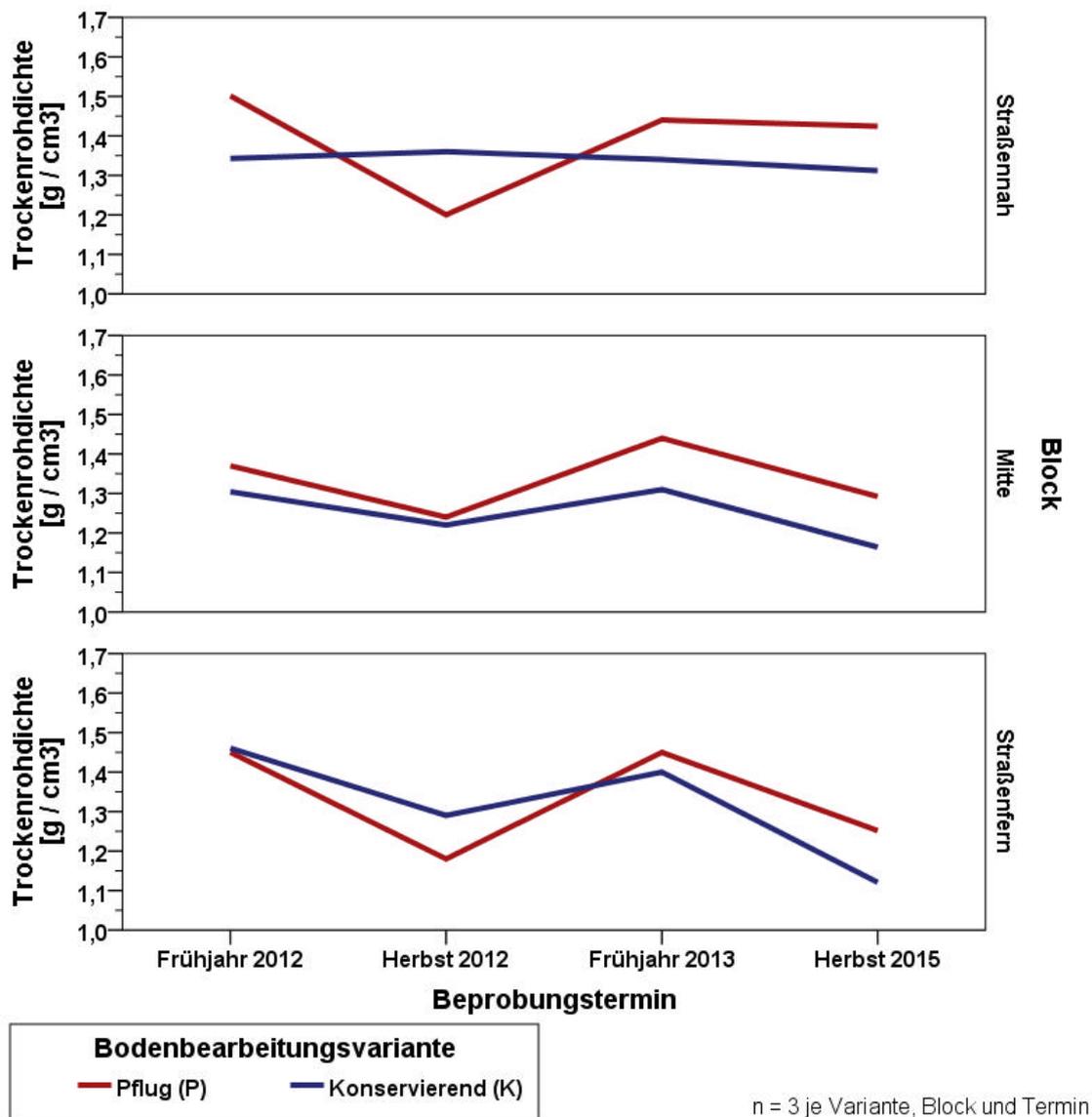


Abbildung 28: Mittlere Trockenrohddichten in der Oberkrume (0-10 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau

Die Schwankungen der TRD in der oberen Krume sind in der Variante Konservierend (K) nicht so stark ausgeprägt wie in der Variante P. So wurde für den straßennahen Block 1 eine für alle Termine nahezu konstante TRD von $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ ermittelt. Im mittleren Block 2 ist hingegen eine bodenbearbeitungsbedingte leichte Verringerung von $1,3$ auf $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ vom Frühjahr zum Herbst 2012 zu verzeichnen. Diese liegt, analog zur Variante P, im Frühjahr 2013 wieder etwas höher, um schließlich im Herbst 2015 ca. drei Wochen nach der Bodenbearbeitung erneut Werte von ca. $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ anzunehmen. Ähnlich verhält es sich in Block 3, wobei die für das Jahr 2012 ermittelten Werte mit $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ (Frühjahr) und $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ (Herbst) höher liegen als jene von Block 2. Auch in Block 3 wiederholt sich aber das bekannte Muster der Erhöhung der TRD zum Frühjahr 2013 und des Rückgangs zum Herbst 2015, welcher mit einem Mittelwert von $1,15 \text{ g cm}^{-3}$ (zwei Wochen nach der Bodenbearbeitung) besonders stark ausfällt.

Für die Oberkrume ist also in beiden Varianten, mit Ausnahme der Variante K im Block 1, ein typisches Muster von niedrigen ($1,2 - 1,3 \text{ g cm}^{-3}$) Trockenrohddichten im Herbst kurze Zeit nach der Bodenbearbeitung und höhe-

ren TRD im Frühjahr erkennbar. Dabei sind die Schwankungen zwischen den Terminen in der Variante P normalerweise etwas stärker ausgeprägt als in der Variante K.

5.1.2.2 Unterkrume (20 - 30 cm)

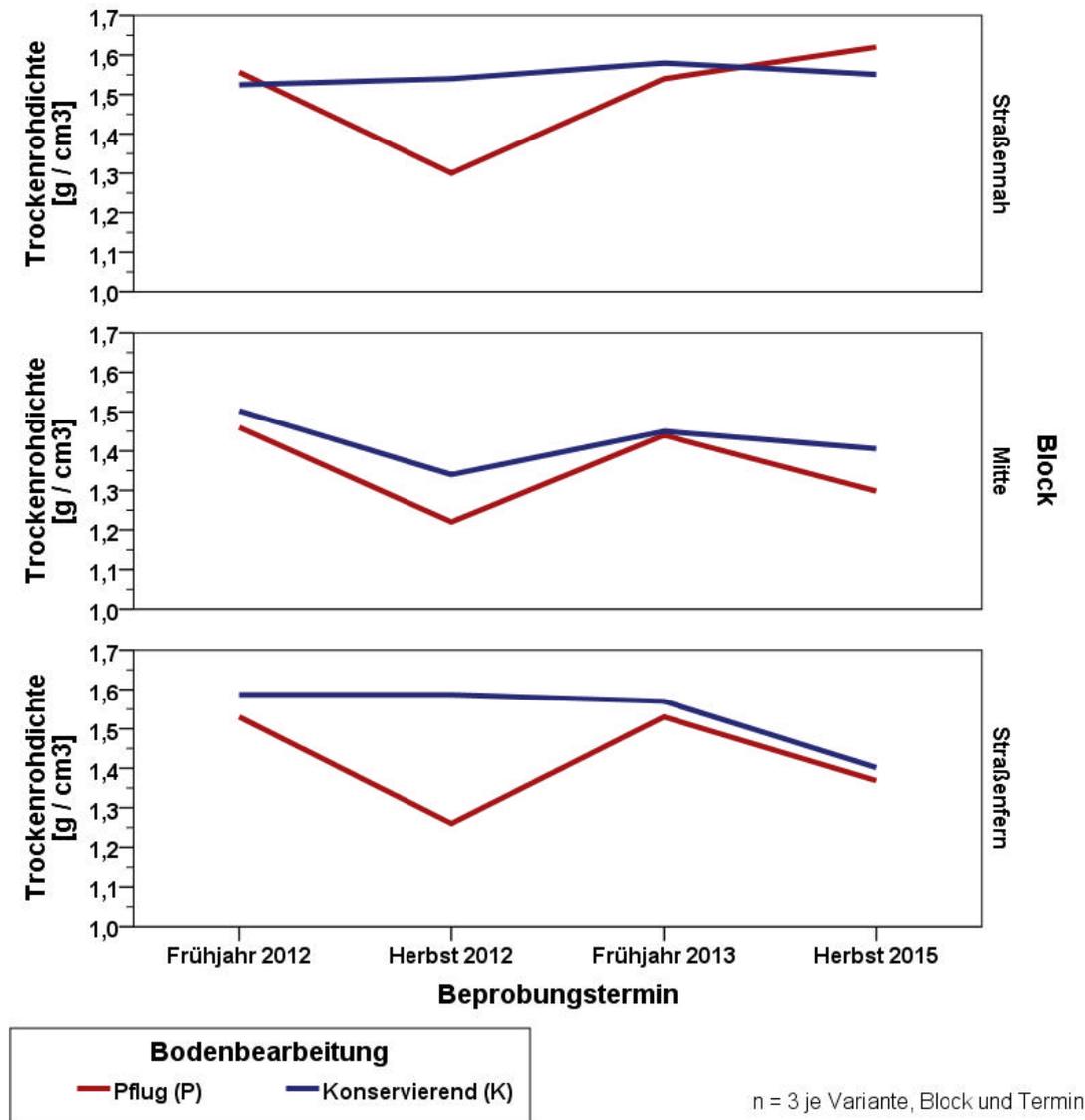


Abbildung 29: Mittlere Trockenrohddichten in der Unterkrume (20-30 cm), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau

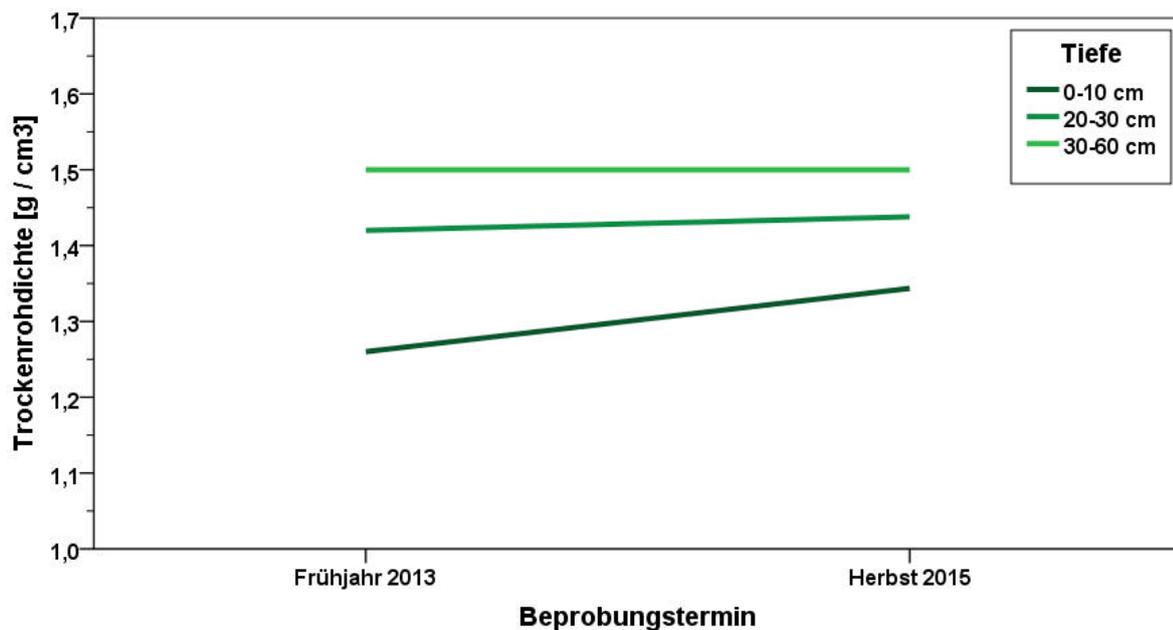
In der Unterkrume (20 - 30 cm u. GOF) ergibt sich für die Variante P ein ähnliches Bild (Abbildung 29) wie in der Oberkrume. So liegen die Trockenrohddichten zu den Frühjahrsterminen in allen drei Blöcken bei 1,45 - 1,55 g cm⁻³ und nehmen zu den Herbstterminen aufgrund der Bodenbearbeitungsmaßnahmen auf 1,2 - 1,3 g cm⁻³ ab. Eine Ausnahme hiervon bildet der straßennahe Block 1 im Herbst 2015 mit einem Wert von 1,65 g cm⁻³, was auf die zum Beprobungszeitpunkt noch nicht erfolgte Bodenbearbeitung zurückzuführen ist.

In der Variante Konservierend (K) wurde für die Unterkrume Dichten zwischen 1,4 und 1,6 g cm⁻³ ermittelt, bei wesentlich geringeren saisonalen Schwankungen als in der Varianten P. Dies ist auf die in dieser Variante flachere Bodenbearbeitung zurückzuführen, welche die Unterkrume normalerweise nicht erreicht. Für die

Termine Herbst 2012 im Block 2 ($1,35 \text{ g cm}^{-3}$) sowie Herbst 2015 im Block 3 ($1,4 \text{ g cm}^{-3}$) wurde dennoch jeweils ein deutlicher Rückgang der TRD im Vergleich zum vorherigen Termin ermittelt. Dies lässt darauf schließen, dass die Bodenbearbeitung zu diesen Terminen auch Teile der Unterkrume mit erfasst hat.

5.1.2.3 Grünland

Die mittleren Trockenrohdichten im Grünland am Standort Methau (Abbildung 30) weisen für die Oberkrume (0-10 cm) im Herbst 2015 etwas höhere Werte ($1,35 \text{ g cm}^{-3}$) als im Frühjahr 2013 ($1,25 \text{ g cm}^{-3}$) auf. Die sehr lockere Lagerung im Frühjahr 2013 könnte, ähnlich wie in den Varianten K und KL in Lüttewitz (s.o.) ein Effekt des strengen Winters sein, welcher durch ein Ge- und Auffrieren der obersten Bodenschicht zu einer Lockerung derselben geführt hat. In der Unterkrume (20-30 cm) bzw. im Unterboden ($> 30 \text{ cm}$) hingegen liegen die Trockenrohdichten im Grünland stabil bei $1,45$ bzw. $1,5 \text{ g cm}^{-3}$.



n = 3 je Variante und Termin

Abbildung 30: Mittlere Trockenrohdichten in drei Tiefenstufen an zwei Beprobungsterminen in der Variante Grünland am Standort Methau

5.2 Kohlenstoff

Der organisch gebundene Kohlenstoff (C_{org}) im Boden ist ein Hauptbestandteil der organischen Bodensubstanz (Humus) und wird in aller Regel stellvertretend für diese als zentraler Parameter in Untersuchungen zu vielfältigen bodenkundlichen und landwirtschaftlichen Fragestellungen verwendet. Die organische Bodensubstanz hat einen großen Anteil an wichtigen Funktionen im bzw. des Bodens wie Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität, Schadstofffilter, Gefügebildung sowie Widerstandsfähigkeit gegen Erosion. Dadurch ist der Humus für biologische Prozesse im bzw. auf dem Boden im Allgemeinen und landwirtschaftliche Produktion im Speziellen von zentraler Bedeutung.

Die landwirtschaftlich genutzten Böden in Sachsen sind grundsätzlich tiefgründig entkalkt. Für beide Untersuchungsstandorte konnte dies im Rahmen zahlreicher vorangegangener Untersuchungen belegt werden (LFULG 2012, TEIWES 1997, THIEL 2010).

Aufgrund der regelmäßigen Ausbringung von carbonathaltigem Dünger (Carbokalk) in Lüttewitz kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass der ermittelte Kohlenstoffgehalt zu einzelnen Terminen bzw. in einzelnen Proben Anteile von anorganischen Kohlenstoff (C_{anorg}) enthält. Dies gilt insbesondere für die beiden Beprobungstermine nach dem Umbruch im Herbst 2013, welche unmittelbar auf die Ausbringung von ca. 128 dt Carbokalk ha^{-1} am 30.09.2013 folgten, sowie für den Termin im Frühjahr 2014 am Standort Lüttewitz. Bei einem Kalziumkarbonatgehalt (CaCO_3) von 45 - 55 % (WASNER 2009: 24) entspricht dies ca. 690 - 840 kg C_{anorg} ha^{-1} , was etwa 1 % der C-Gesamtvorräte im beprobten Bodenpaket (9000 t ha^{-1}) entspricht. Konsequenterweise wird in diesem Bericht daher für den Standort Lüttewitz der Summenparameter Gesamtkohlenstoff (C_t) verwendet, welcher sich aus C_{org} und C_{anorg} zusammensetzt. In aller Regel ist dabei allerdings $C_t = C_{\text{org}}$. Für den Standort Methau wird grundsätzlich $C_t = C_{\text{org}}$ angenommen.

Zur Umrechnung von C_{org} in Humus wird in Deutschland häufig die Formel $C_{\text{org}} [\%] \times 1,724 = \text{Humus} [\%]$ verwendet. Da die Kohlenstoffanteile an der organischen Substanz aber Schwankungen unterliegen, wird im wissenschaftlichen Rahmen i.d.R. mit der Angabe des organischen Kohlenstoffgehaltes gearbeitet. Dies gewährleistet auch die direkte Vergleichbarkeit zu anderen Arbeiten, unabhängig von möglichen Umrechnungsfaktoren.

Die Gehalte an organischer Substanz bzw. der Humusgehalt können nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (AG BODEN 2005) in Humusgehaltsstufen (HGS) eingeteilt werden. Diese wurden hier mit dem Faktor 1,724 in C_{org} -Gehalte umgerechnet, um sie auf die C-Messwerte beziehen zu können. Bei Torfen und Auflagehumus (H6 und H7) wird hingegen der Umrechnungsfaktor 2 verwendet (AG BODEN 2005: 111). Die Humusgehaltsstufen H1 - H7 untergliedern sich demnach wie folgt (KOLBE & ZIMMER 2015: 11):

■ H1 (Sehr schwach humos)	< 1 % Humus (< 0,58 % C_{org})
■ H2 (schwach humos)	1 - 2 % Humus (0,58 - 1,15 % C_{org})
■ H3 (mittel humos)	2 - 4 % Humus (1,16 - 2,31 % C_{org})
■ H4 (stark humos)	4 - 8 % Humus (2,32 - 4,63 % C_{org})
■ H5 (sehr stark humos)	8 - 15 % Humus (4,64 - 8,69 % C_{org})

■ H6 (extrem humos, anmoorig) 15 - 30 % Humus (8,7 - 15 % C_{org}, Faktor 2)

■ H7 (organisch) > 30 % Humus (> 15 % C_{org}, Faktor 2)

Ackerstandorte liegen in Deutschland i.d.R. in den HGS H1 - H3, Grünlandstandorte in den HGS H4 und H5 (KOLBE & ZIMMER 2015: 11).

5.2.1 Lüttewitz

Die Kohlenstoffgehalte der Pflugvariante zeigen in den oberen vier Beprobungsschichten über alle 12 Beprobungstermine (n = 59) eine sehr homogene Verteilung (Abbildung 31). Die Mittelwerte (MW) und Mediane (MN) der drei obersten Schichten liegen zwischen 1,0 und 1,1 % bei einer Standardabweichung (SA) von jeweils 0,15 %. Schicht 4 weist geringfügig niedrigere Werte von 0,9 - 1,0 % auf (mit einer höheren SA von 0,21 %). Alle vier Schichten liegen damit in der Humusgehaltsstufe (HGS) H2 (schwach humos). Die fünfte Schicht (Unterboden) unterscheidet sich deutlich von den darüber liegenden mit einem Mittelwert von 0,33 % bzw. einem Median von 0,30 %. Sie liegt in der HGS H1 (sehr schwach humos). Diese homogene Verteilung in der Krume ist das Ergebnis der langjährigen wendenden und mischenden Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug.

Die Kohlenstoffgehalte der Direktsaatvariante zeigen im Gegensatz zur Pflugvariante über die 12 Termine (n = 60) eine deutliche Stratifizierung (Abbildung 32). Die oberste Schicht 1 weist mit einem Mittelwert von 1,96 % (MN 1,95 %) die höchsten Gehalte auf. Der Mittelwert der Schicht 2 liegt mit 1,48 % (MN 1,47 %) deutlich darunter. Beide Schichten liegen in der HGS H3 (mittel humos). Zudem ist auffällig, dass in den obersten beiden Schichten der Direktsaatvariante die Schwankungen zwischen den Messwerten (Beprobungspunkte bzw. Termine) deutlich größer sind als in den darunter liegenden Schichten bzw. als in der Pflugvariante. So ist die Standardabweichung der obersten Schicht 0,28 %, jene der Schicht 2 0,21 %. Die Schicht 3 liegt mit einem Mittelwert von 0,99 % und einem Median von 0,98 (SA 0,13 %) in der Größenordnung der Pflugvariante. Schicht 4 liegt mit einem Mittelwert von 0,85 % (MN 0,84 %, SA 0,13%) unterhalb des Wertes der Pflugvariante. Damit liegen Schicht 3 und 4 in der HGS H2. Schicht 5 liegt mit einem Mittelwert von 0,40 % (MN 0,39 %, SA 0,14 %) etwas höher als in der Pflugvariante, gleichwohl in der HGS H1. Diese mit der Tiefe stratifizierte Verteilung ist das Ergebnis des langjährigen Verzichtes auf Grundbodenbearbeitung, welches zu einer Konzentration des organischen Kohlenstoffs in den obersten Beprobungsschichten geführt hat.

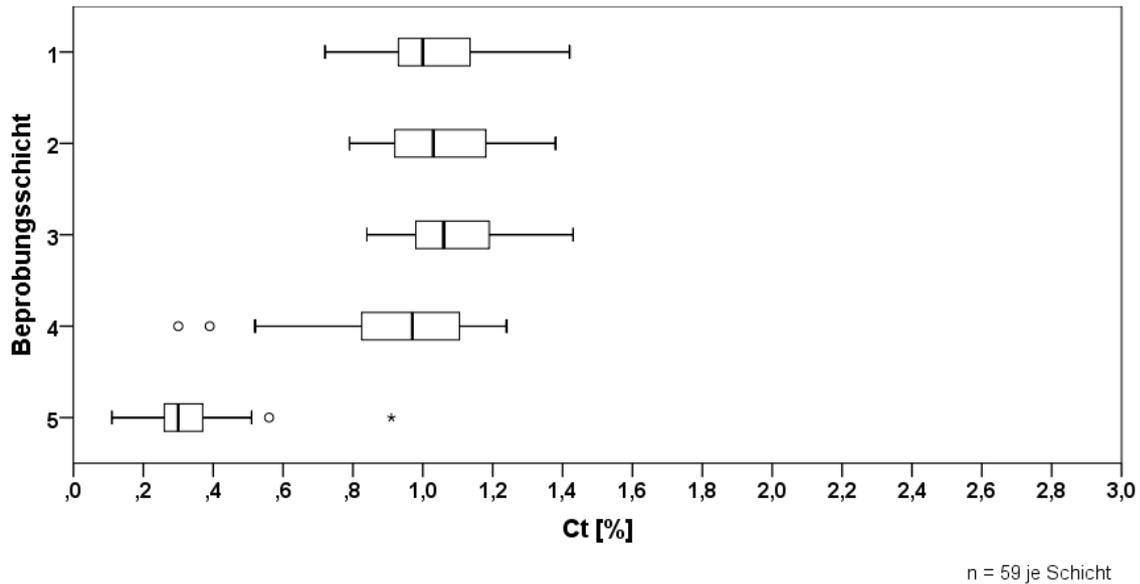


Abbildung 31: Kohlenstoffgehalte der Variante Pflug in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine, Beprobungsschichten s. Kapitel 4.1)

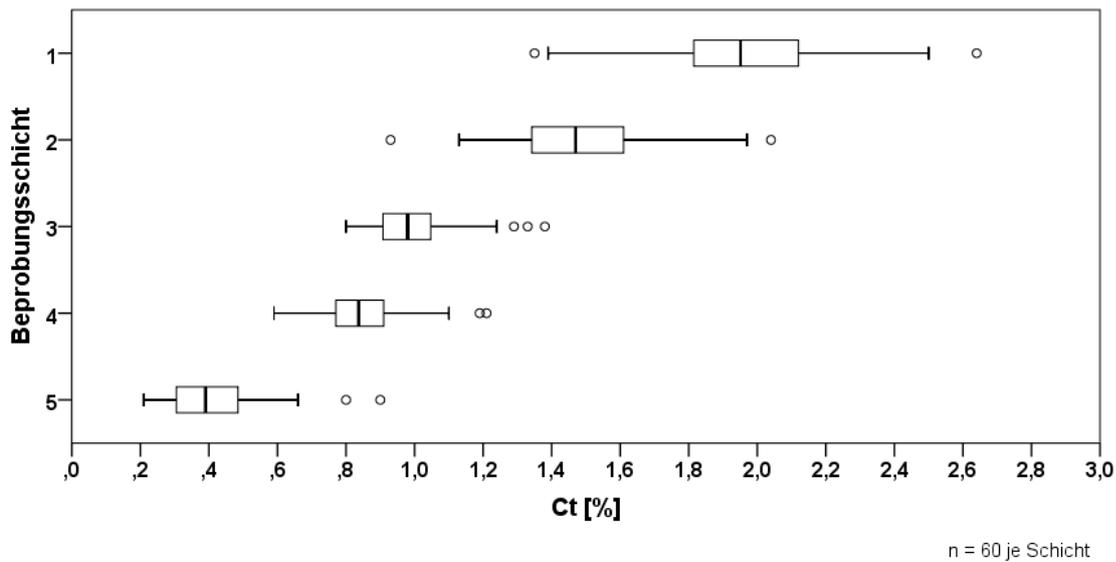


Abbildung 32: Kohlenstoffgehalte der Variante Direktsaat in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine, Beprobungsschichten s. Kapitel 4.1)

Die Kohlenstoffgehalte der Variante Konservierend über alle 4 Termine (n = 36) zeigen eine Verteilung, welche jener der Direktsaatvariante ähnelt (Abbildung 33).

Allerdings liegen die Gehalte der Schichten 1 (MW 1,67 %, MN 1,67 %, SA 0,27 %) und 2 (MW 1,54 %, MN 1,52 %, SA 0,19 %) etwas enger beieinander, mit allerdings ähnlich großen Schwankungen wie in der Direktsaat. Beide Schichten liegen damit in der HGS H3. Die C_t -Gehalte in den Schichten 3 (MW 1,05 %, MN 1,06 %, SA 0,10 %) und 4 (MW 0,85 %, MN 0,85 %, SA 0,13 %) ähneln ebenfalls der Direktsaatvariante sehr

stark und liegen wie bei dieser in der HGS H2. Die Schicht 5 liegt mit einem mittleren C_t - Gehalt von 0,38 % (MN 0,34 %, SA 0,12 %) in der HGS H1. Wie in der Direktsaatvariante ist die stratifizierte Verteilung das Ergebnis einer nur geringen Bodenbearbeitungsintensität bis max. 15 cm Tiefe. Diese erklärt die starke Ähnlichkeit der C_t -Gehalte in den obersten beiden Schichten im Vergleich mit der Direktsaatvariante.

Die Kohlenstoffgehalte der Variante Konservierend Locker (Abbildung 34) über die 4 Beprobungstermine (n = 36) liegen in den obersten beiden Schichten zwischen jenen der Pflugvarianten und jenen der Variante Konservierend: Schicht 1 (MW 1,36 %, MN 1,36 %, SA 0,18 %) und Schicht 2 (MW 1,33 %, MN 1,34 %, SA 0,16 %) liegen noch in der HGS H3, wohingegen die Werte der Schichten 3 (MW 1,06 %, MN 1,08 %, SA 0,14 %) und 4 (MW 0,71 %, MN 0,67 %, SA 0,18 %) der HGS H2 zuzurechnen sind. In Schicht 5 (MW 0,32 %, MN 0,32 %, SA 0,09%) finden sich die für den Unterboden typischen Werte, die der HGS H1 entsprechen.

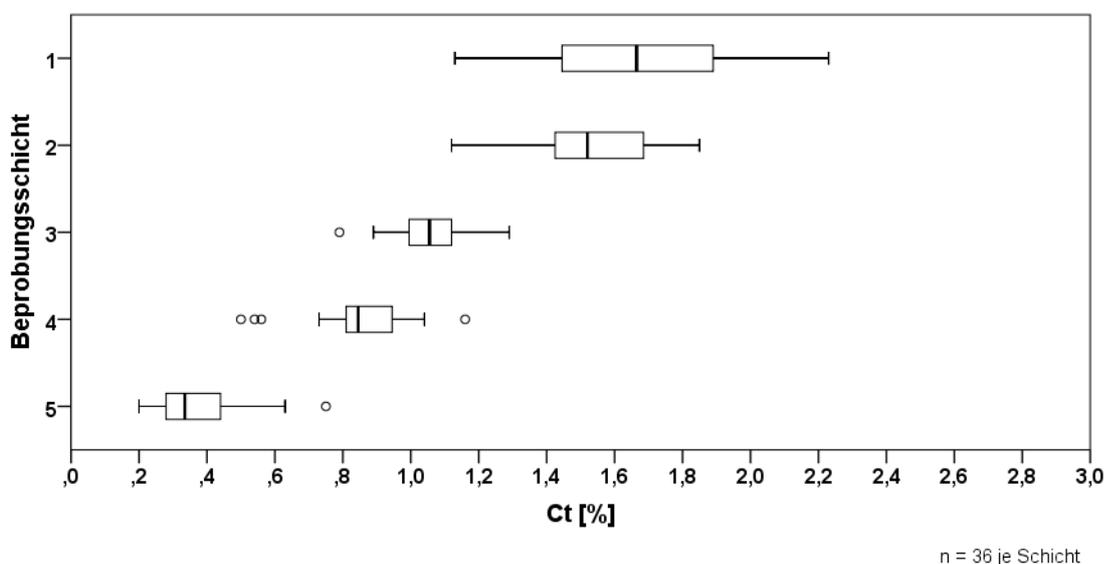


Abbildung 33: Kohlenstoffgehalte der Variante Konservierend in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine, Beprobungsschichten s. Kapitel 4.1)

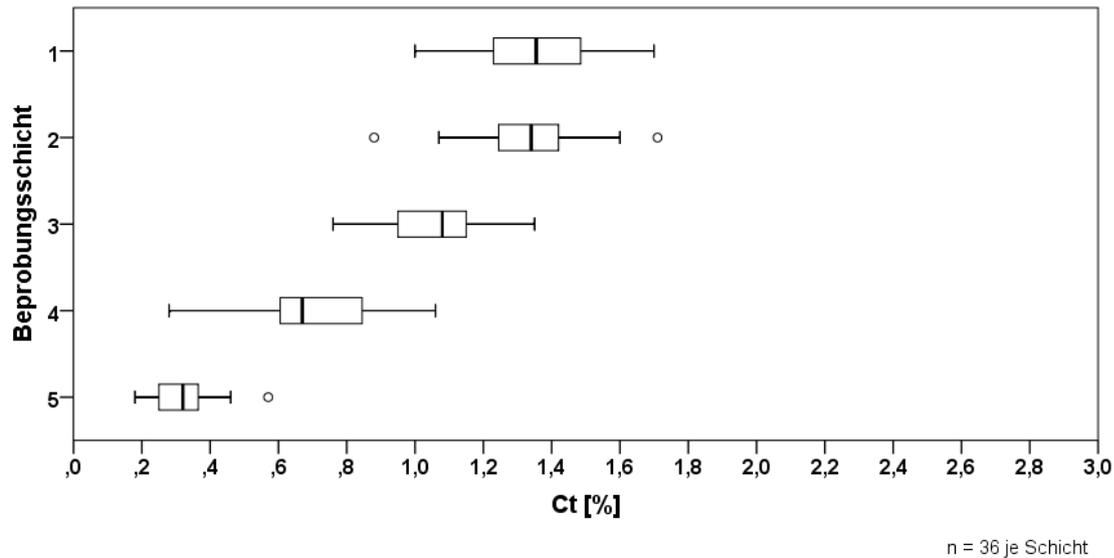
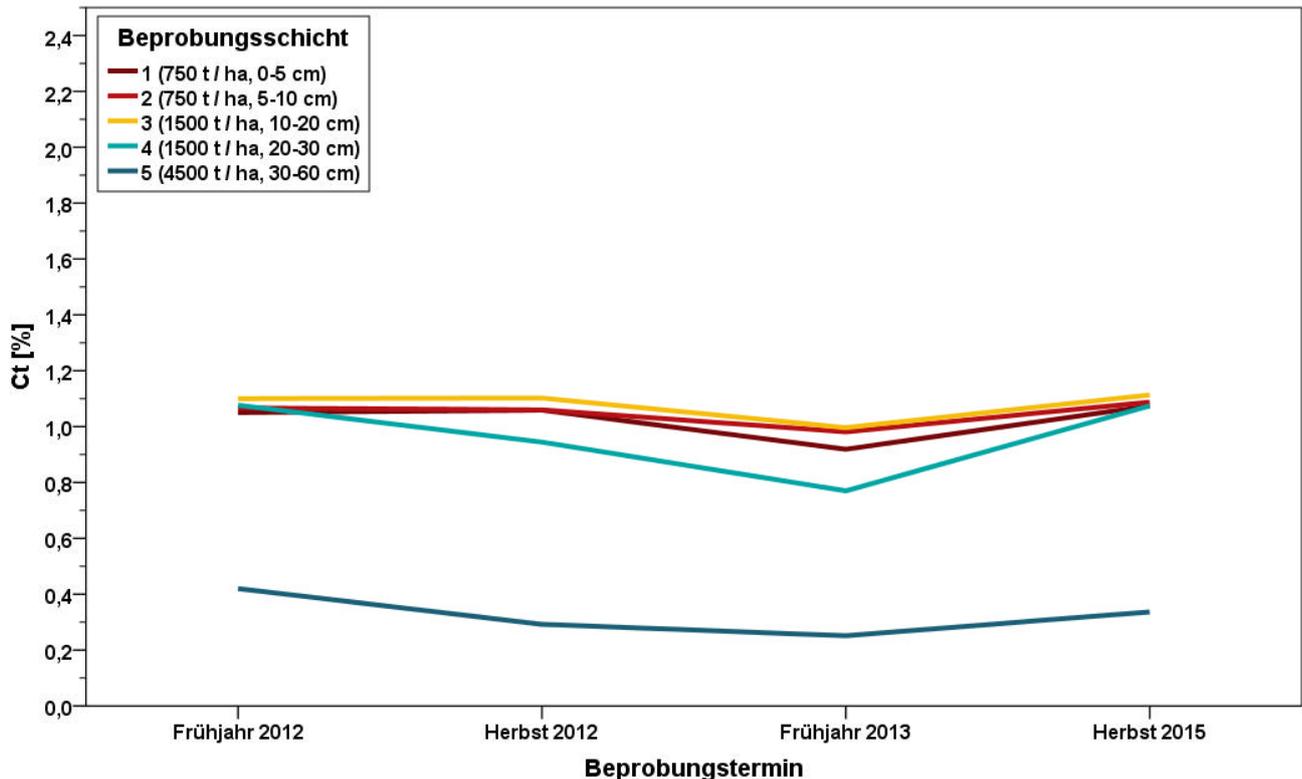


Abbildung 34: Kohlenstoffgehalte der Variante Konservierend Locker in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine, Beprobungsschichten s. Kapitel 4.1)

5.2.1.1 Basisbeprobungen

Der Vergleich der mittleren Kohlenstoffgehalte in den fünf Beprobungsschichten im Verlauf der Basisbeprobungstermine (Abbildung 35) zeigt für die Pflugvariante die größten Schwankungen in der Schicht 4. Während die Gehalte der obersten drei Schichten recht konstant bei 1,0 - 1,2 % liegen, sinkt der C_t -Gehalte der Schicht 4 zum Frühjahr 2013 auf ca. 0,8 % ab, steigt allerdings zum Herbst 2015 wieder an und liegt zu diesem Zeitpunkt auf dem gleichen Niveau wie die Beprobungsschichten 1 - 3. Die Schwankungen in der Schicht 5 sind zwar prozentual relativ groß, bei absoluten Werten zwischen 0,2 und 0,4 % aber insgesamt vergleichsweise gering. Nichtsdestotrotz haben diese Schwankungen aufgrund der großen Bodenmasse der Schicht (4500 t ha^{-1}) erhebliche Auswirkungen auf die daraus resultierenden Kohlenstoffmassen.



n = 9 je Schicht

Abbildung 35: Mittlere Kohlenstoffgehalte von fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten an den vier Basisbeprobungsterminen in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz

Im Gegensatz zur Pflugvariante sind die Schwankungen der mittleren C_t -Gehalte der einzelnen Beprobungsschichten in der Direktsaatvariante in den oberen beiden Schichten am stärksten ausgeprägt (Abbildung 36). Die Mittelwerte schwanken im Bereich von ca. 1,7 - 2,3 % (Schicht 1) bzw. 1,3 - 1,7 % (Schicht 2). Die höchsten C_t -Gehalte wurden dabei im Frühjahr 2012 und im Herbst 2015 ermittelt, die geringsten im Frühjahr 2013. Die absoluten Schwankungen der unteren drei Schichten sind hingegen sehr gering und liegen bei maximal 0,1 % im Untersuchungszeitraum.

Es zeigt sich zudem, dass die fünf Beprobungsschichten in der Direktsaat zu allen Beprobungsterminen eine durchgängig stratifizierte Verteilung der C_t -Gehalte aufweisen, jede Beprobungsschicht also zu jedem Termin einen höheren C_t -Gehalt aufwies als die direkt darunter liegende Schicht.

Die Variante K (Abbildung 37) weist für die ersten drei Termine ähnliche Werte auf wie die Variante D, sodass die C_t -Gehalte der fünf Beprobungsschichten ebenfalls durchgängig stratifiziert sind. Auffällig ist die Abnahme des mittleren C_t -Gehaltes insbesondere in der obersten Schicht von ca. 2 % auf ca. 1,5 % innerhalb eines Jahres (Frühjahr 2012 bis Frühjahr 2013), auch in der Schicht 2 wird in diesem Zeitraum eine leichte Abnahme (ca. 1,7 % auf ca. 1,4 %) sichtbar. Nach weiteren 2,5 Jahren liegen die Werte im Herbst 2015 allerdings wieder etwas höher, wobei die Trendlinien durch die Mittelwerte aufgrund des langen Zeitraumes zwischen den Beprobungsterminen nicht als durchgängige lineare Trends in den jeweiligen Schichten interpretiert werden sollten. Auffällig ist, dass Schicht 1 zum letzten Beprobungstermin geringfügig geringere mittlere Gehalte aufweist als Schicht 2. Die Erklärung hierfür liegt vermutlich in der ca. 3 Wochen vor der Beprobung durchgeführten Bodenbearbeitung bis ca. 15 cm Tiefe. Die Schichten 3, 4 und 5 zeigen in der Variante K kaum

Schwankungen der C_T -Gehalte zwischen den Terminen, wobei diese mit Werten von ca. 1,1 % (Schicht 3), 0,8 - 0,9 % (Schicht 4) sowie 0,3 - 0,4 % (Schicht 5) ebenfalls eine deutliche Stratifizierung bzw. Abnahme mit der Tiefe aufweisen.

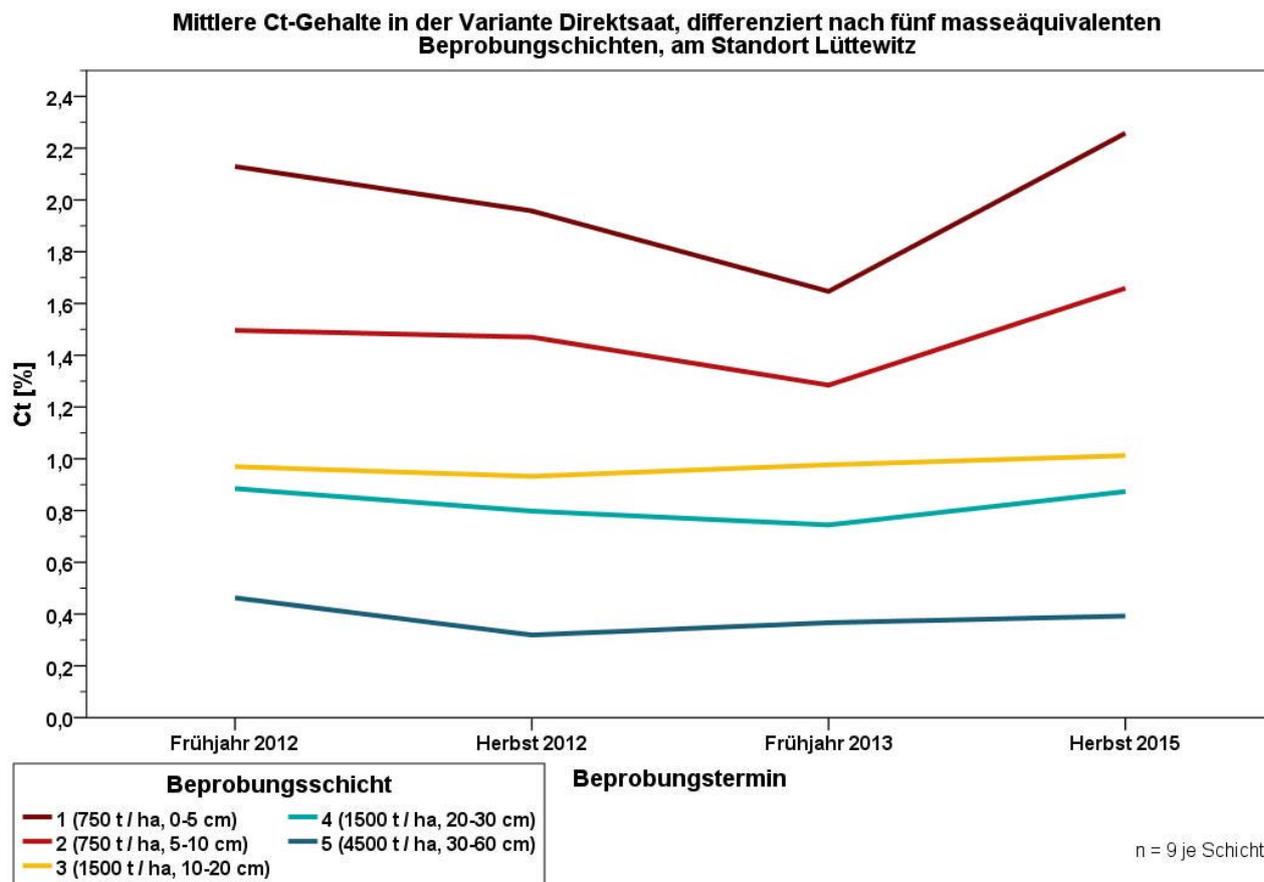
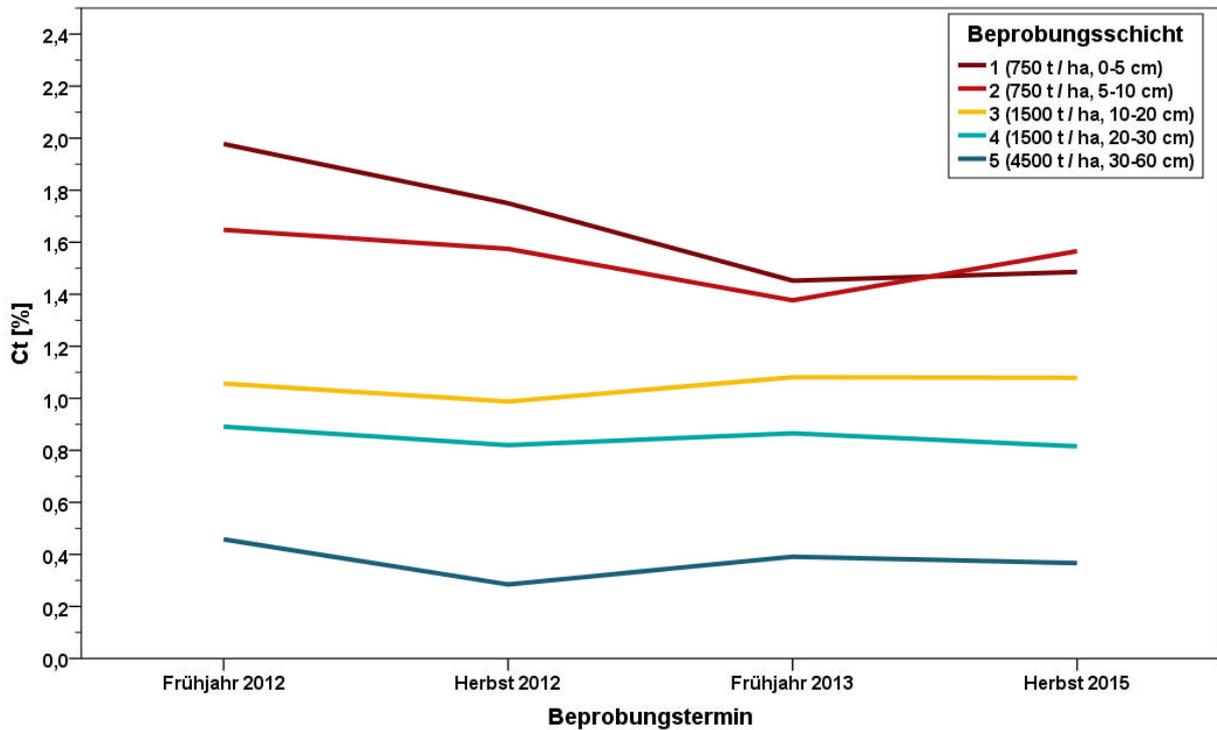


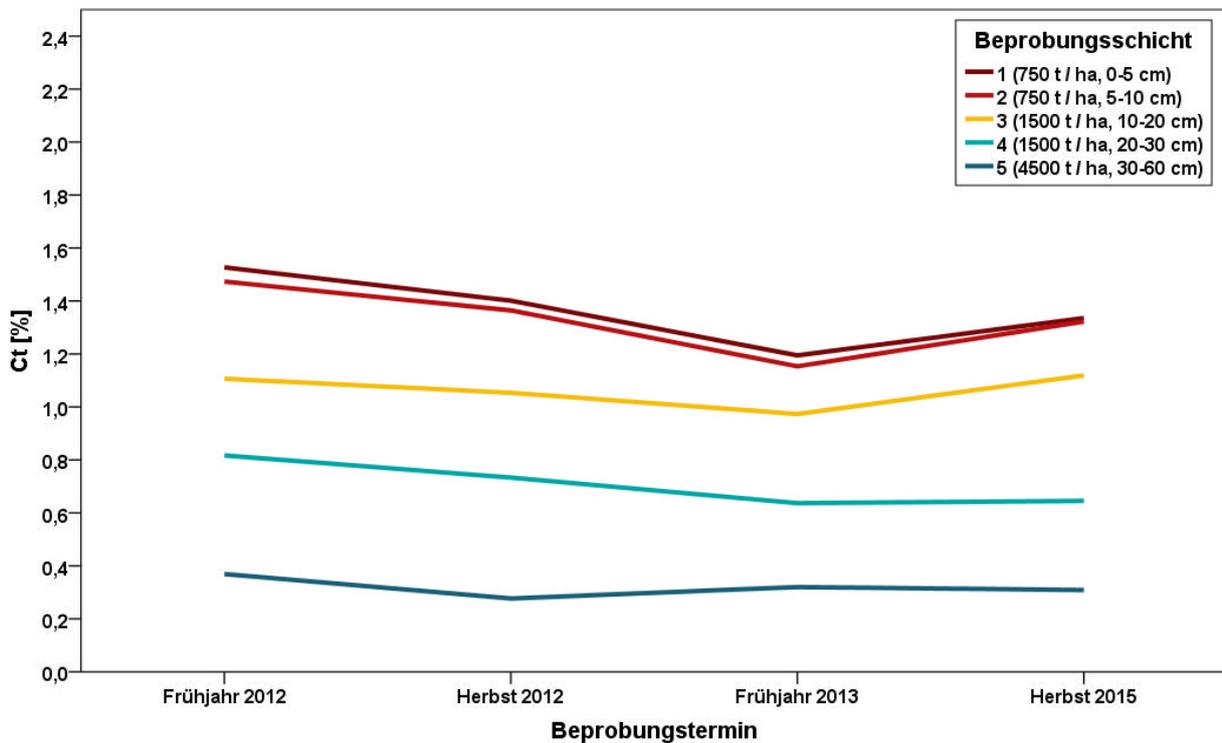
Abbildung 36: Mittlere Kohlenstoffgehalte von fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten an den vier Basisbeprobungsterminen in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz

Auch in der Variante Konservierend Locker (KL) (Abbildung 38) zeigt sich der deutliche Abnahmetrend der mittleren C_T -Gehalte vom Frühjahr 2012 bis zum Frühjahr 2013 in den oberen beiden Beprobungsschichten. Der absolute Unterschied in den C_T -Gehalten zwischen den Varianten ist dabei gering und die C_T -Gehalte nehmen in beiden Schichten von ca. 1,5 % auf ca. 1,2 % ab. Auch hier lässt sich über den langen Zeitraum ohne Probenahme bis zum Herbst 2015 eine leichte Zunahme auf ca. 1,3 % feststellen. Die Schichten 3, 4 und 5 zeigen in der Variante KL kaum Schwankungen zwischen den Terminen und sind deutlich stratifiziert mit Werten von ca. 1,1 % (Schicht 3), 0,7 - 0,8 % (Schicht 4) sowie 0,3 % (Schicht 5).



n = 9 je Schicht

Abbildung 37: Mittlere Kohlenstoffgehalte von fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten an den vier Basisbeprobungsterminen in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz



n = 9 je Schicht

Abbildung 38: Mittlere Ct-Gehalte von fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten an den vier Basisbeprobungsterminen in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz

In Tabelle 8 sind die mittleren C_t -Gehalte im Mittel aller Beprobungstermine für die vier Bodenbearbeitungsvarianten angegeben. Sowohl in der Krume mit 1,02 bzw. 1,04 % als auch im Gesamtprofil mit 0,67 bzw. 0,68 % weisen die Varianten P und KL annähernd gleiche C_t -Gehalte auf. Dies gilt ebenso für die Varianten D und K mit C_t -Gehalten von 1,19 bzw. 1,17 % in der Krume sowie 0,80 bzw. 0,77 % im Gesamtprofil.

Tabelle 8: Mittlere Kohlenstoffgehalte über alle Basisbeprobungstermine in fünf Beprobungsschichten und vier Bodenbearbeitungsvarianten am Standort Lüttewitz

Variante	P	D	K	KL
Beprobungsschicht	C_t [Masse-%]			
1. (750 t ha ⁻¹ / 0-5 cm)	1,02	1,96	1,67	1,36
2. (750 t ha ⁻¹ / 5-10 cm)	1,05	1,48	1,54	1,33
3. (1500 t ha ⁻¹ / 10-20 cm)	1,08	0,99	1,05	1,06
4. (1500 t ha ⁻¹ / 20-30 cm)	0,93	0,85	0,85	0,71
Mittelwert Krume (4500 t ha ⁻¹ / 0-30)	1,02	1,19	1,17	1,04
5. (4500 t ha ⁻¹ / 30-60 cm)	0,33	0,41	0,38	0,32
Mittelwert Gesamtprofil (9000 t ha ⁻¹ / 0-60 cm)	0,67	0,80	0,77	0,68

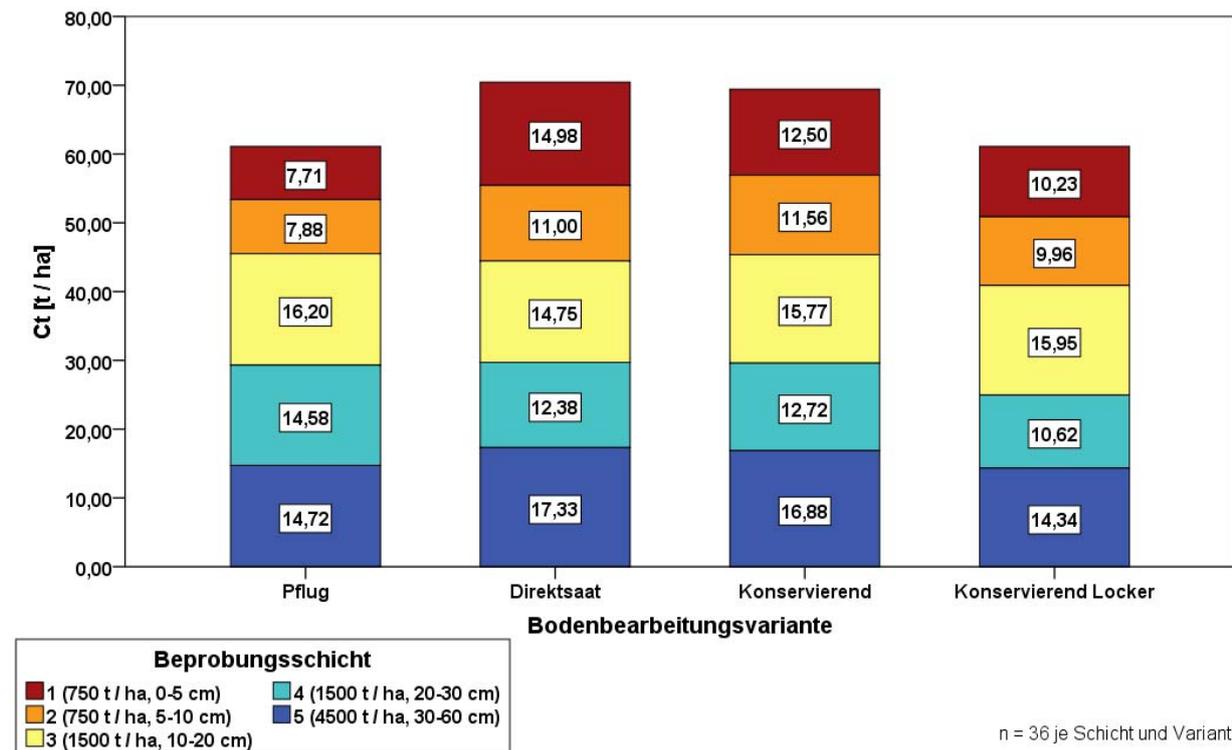


Abbildung 39: Mittlere Kohlenstoffvorräte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten am Standort Lüttewitz (4 Basisbeprobungstermine)

Aufgrund der unterschiedlichen Verteilungsmuster im Bodenprofil (homogenisiert vs. stratifiziert) sowie Schwankungen der Gehalte in den Schichten werden für Vergleiche zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten die jeweiligen C_t -Massen bzw. -Vorräte berechnet. Diese Vorräte (je Beprobungspunkt) ergeben sich aus der Addition der C_t -Massen der fünf Schichten, welche sich aus den ermittelten C_t -Gehalten und der jeweiligen Bodenmasse errechnet. Im Mittel der vier Varianten bzw. Basisbeprobungen ($n = 36$) ergeben sich dabei die folgenden C_t -Massen (Abbildung 39):

Die Varianten Direktsaat und Konservierend weisen ähnliche große mittlere C_t -Massen auf, die bei ca. $70 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$ liegen. Mit $61 - 62 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$ liegen die Varianten Pflug und Konservierend Locker ca. 10 % darunter. Auffällig ist dabei, dass Varianten D und K in der Schicht 5 (Unterboden) um ca. $2 - 3 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$ höhere C_t -Massen aufweisen als die Varianten P und KL, was etwa einem Drittel des Gesamtunterschieds entspricht.

Aufgrund der starken Schwankungen der C_t -Massen zwischen den Probenahmeterminen, welche bereits beim Vergleich der C_t -Gehalte der einzelnen Beprobungsschichten erkennbar waren (s.o.), wurden die mittleren C_t -Gesamtmassen der vier Varianten im Verlauf der Termine ($n = 9$ pro Termin) miteinander verglichen (Abbildung 40).

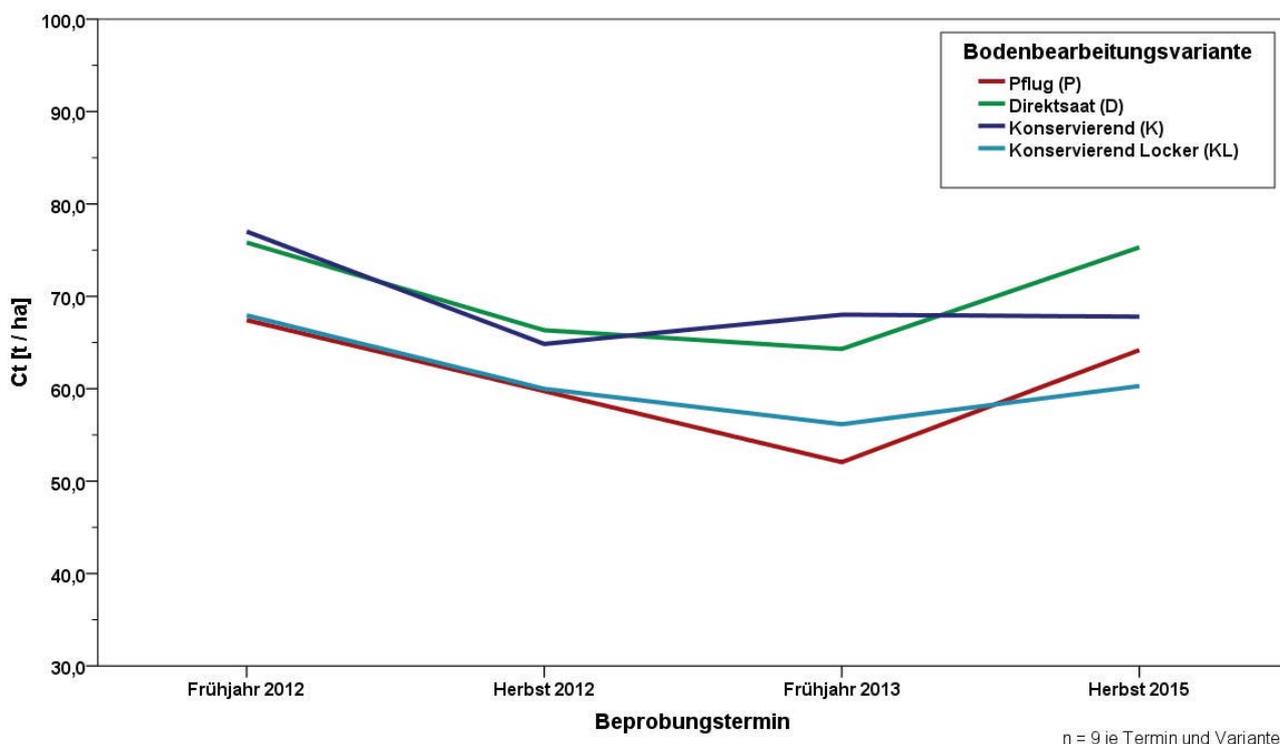


Abbildung 40: Mittlere Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Basisbeprobungsterminen am Standort Lüttewitz

Dabei wird deutlich, dass einerseits auch bei dieser Darstellungs- und Betrachtungsweise sowohl die Varianten D und K als auch die Varianten P und KL jeweils über alle Termine in einer Größenordnung hinsichtlich des C_t -Gehaltes liegen. Dies gilt für den Herbst 2015 allerdings nur mit Einschränkung, hier ist die Reihenfolge der Varianten $D > K > P > KL$, mit relativ gleichmäßigem Abstand zwischen den Varianten von jeweils etwa $3 - 5 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$. Andererseits fällt auf, dass sich für die Varianten P und D ein nahezu paralleler zeitlicher Verlauf abzeichnet, welcher durch eine starke kontinuierliche Abnahme um jeweils etwa $15 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$ vom Frühjahr

2012 über den Herbst 2012 zum Frühjahr 2013 gekennzeichnet ist. Zum Herbst 2015 steigen die Gesamtmassen dann aber wieder deutlich an und erreichen nahezu das Niveau aus dem Frühjahr 2012 (D: 66 - 67 t C_t ha⁻¹; P: 66 - 68 t C_t ha⁻¹). Der absolute Unterschied zwischen beiden Varianten bleibt dabei über alle Termine etwa gleich und liegt bei ca. 10 t C_t ha⁻¹.

Die mittleren C_t-Massen der Varianten K und KL liegen zum Zeitpunkt der ersten beiden Beprobungen jeweils wie beschrieben auf dem Niveau der Varianten D (K) bzw. P (KL), zeigen aber zum Frühjahr 2013 eine wesentlich geringere Abnahmetendenz (KL) bzw. nehmen sogar leicht zu (K). Daraus resultierend fällt auch die Zunahme zum Herbst 2015 nur gering aus (KL) bzw. stellt sich gar ein leichte Abnahme ein (K).

Ein wichtiges Kriterium für die Aussagekraft und Zuverlässigkeit dieser Daten stellt die Streuung der Einzelwerte (n = 9) innerhalb der Varianten und Termine dar (Abbildung 41).

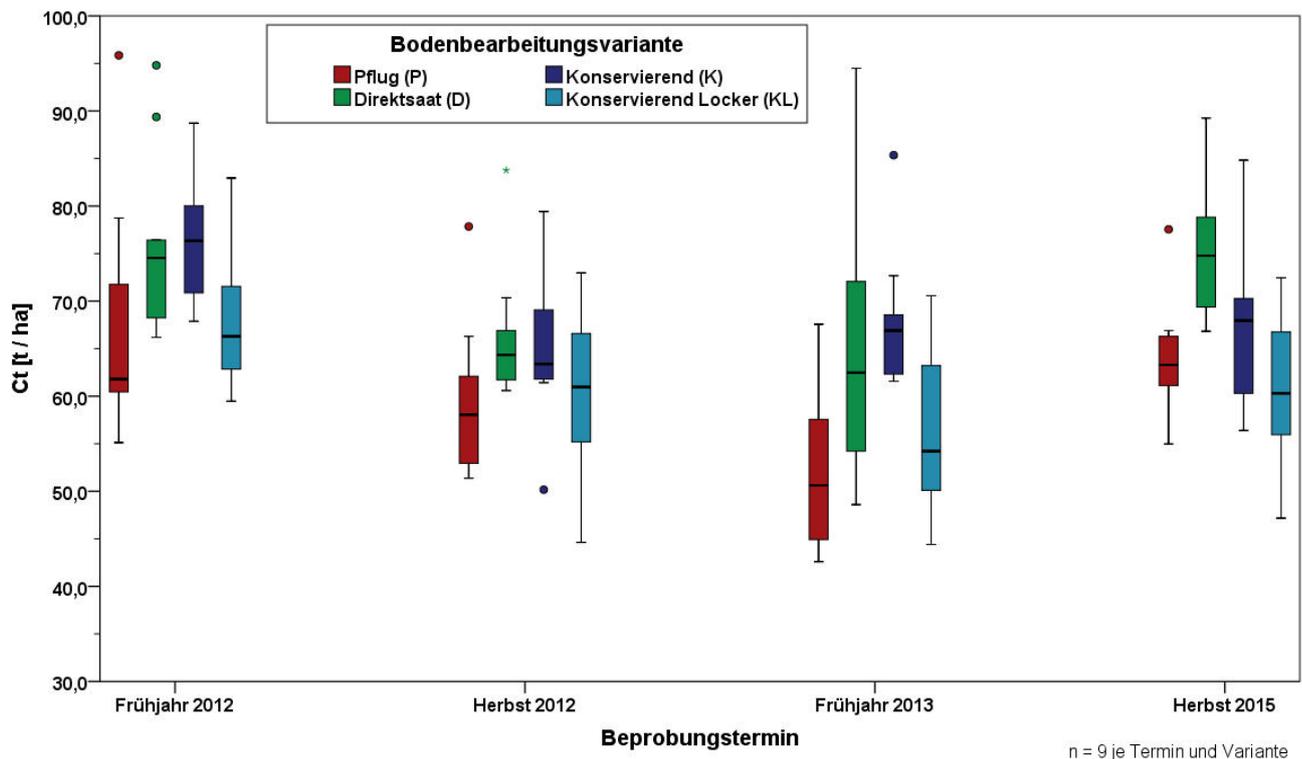


Abbildung 41: Streuung der Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Basisbeprobungsterminen am Standort Lüttewitz

Es wird deutlich, dass die Streuung innerhalb der Varianten und Termine erheblich ist und teilweise größer als die mittleren Unterschiede zwischen den Varianten. Dies gilt grundsätzlich für alle vier Varianten, wobei das Ausmaß der Streuung je nach Termin von Variante zu Variante stark schwankt. Diese Streuung resultiert hauptsächlich aus der Relief- und Bodenheterogenität des Untersuchungsschlages, welche bereits im Kapitel „Untersuchungsstandorte“ dargelegt wurde. An dieser Stelle bleibt festzuhalten, dass aufgrund der Schwankungen innerhalb der Varianten (Feldheterogenität) und zwischen den Jahren die Interpretation von mittleren Gehalten bzw. Massen über alle Beprobungspunkte bzw. über mehrere Jahre nur eingeschränkt sinnvoll ist. Vielmehr müssen die Beprobungspunkte weiter untergliedert (geclustert) werden, um weitere Ursachen der Streuung (z. B. Hangneigung, Exposition, etc.) sichtbar zu machen.

Die Varianzanalyse mit Post-Hoc-Test nach SCHEFFÉ ergab, bei einzelner Betrachtung der vier Beprobungstermine ($n = 9$ je Variante), signifikante Mittelwertunterschiede der C_t -Gesamtmassen für die Varianten P und K zum Termin Frühjahr 2013 sowie für die Varianten P und D sowie D und KL für den Termin Herbst 2015. Wird die Varianzanalyse für alle vier Termine zusammen durchgeführt ($n = 36$ für die Varianten D, K und KL, $n = 34$ für Variante P), ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen den Varianten P und D bzw. K, D und KL sowie K und KL (Tabelle 9). Die statistisch homogenen Untergruppen P und KL sowie D und K weisen dabei jeweils sehr ähnliche Mittelwerte auf, wie bereits aus Abbildung 39 ersichtlich wurde. Die Matrix der Signifikanzen für den Post-Hoc-Test nach SCHEFFÉ sieht dabei wie folgt aus:

Tabelle 9: Matrix der Signifikanzen zwischen Kohlenstoffvorräten der vier Bodenbearbeitungsvarianten über vier Basisbeprobungstermine aus Post-Hoc-Test nach Scheffé

Variante	P	D	K	KL
P		0	0,001	0,978
D	0		0,976	0,001
K	0,001	0,976		0,005
KL	0,978	0,001	0,005	

5.2.1.1.1 Stratifizierungsverhältnisse

Die Stratifizierungsverhältnisse (SR) der drei Beprobungsschichten des Oberbodens bzw. der Krume, die Schichten 2 - 4, sind für die vier Bodenbearbeitungsvarianten in Abbildung 42 dargestellt.

In der Variante Pflug (P) liegen diese, aufgrund der Homogenisierung, für alle drei Schichten und alle vier Termine bei ca. 1. Lediglich Schicht 4 weist zum Frühjahr 2013 ein etwas höheres Stratifizierungsverhältnis auf. Dies ist vermutlich auf die im Herbst 2012 eingemischten Erntereste des Winterweizens zurückzuführen, welche eine leichte (relative) Akkumulation von C_{org} in dieser Schicht zur Folge hatten.

In der Variante Direktsaat (D) liegt das SR der Schicht 2 konstant bei 1,3 - 1,5, wodurch die stabilen Verhältnisse in der Oberkrume in dieser Variante zum Ausdruck kommen. Der SR-Wert von Schicht 3 liegt zu beiden Terminen im Jahr 2012 bei über 2, sinkt zum Frühjahr 2013 allerdings deutlich auf ca. 1,7 ab. Im Herbst 2015 liegt das SR dieser Schicht wieder auf dem Niveau des Jahres 2012. Schicht 4 weist zu allen Terminen die höchsten SR-Werte in dieser Variante auf. Sie liegen durchgängig bei ca. 2,5, wobei auch für diese Schicht im Frühjahr 2013 der geringste Wert ermittelt wurde.

In der Variante Konservierend (K) weist Schicht 2 sehr stabile SR - Werte von ca. 1,2 über alle vier Termine auf. Für Schicht 3 wurden für die beiden Termine des Jahres 2012 SR - Werte von 1,8 - 1,9 ermittelt, welche allerdings zum Frühjahr 2013 auf 1,5 sinken. Auch im Herbst 2015 lag das SR dieser Schicht bei ca. 1,5. Schicht 4 weist auch in dieser Variante zu allen Terminen die höchsten SR - Werte auf. Diese liegen im Jahr 2012 bei 2,2 - 2,3, sinken danach aber, analog zu Schicht 3, auf ca. 1,7 ab und liegen auch im Herbst 2015 nur geringfügig höher (1,8). In dieser Variante hat im Verlauf des Winters 2012/2013 eine deutliche relative Abreicherung von C_t der Unterkrume (10 - 30 cm) im Vergleich zur Oberkrume stattgefunden. Im Gegensatz zur Variante D sind die SR-Werte zum Herbst 2015 allerdings nicht wieder auf das Niveau des Jahres 2012 angestiegen.

Die SR-Werte von Schicht 2 lagen in der Variante Konservierend Locker (KL) über alle 4 Termine bei ca. 1,1. Auch in Schicht 3 gab es, bei SR-Werten von 1,2 - 1,4 nur geringe Schwankungen, wobei eine leichte Abnahme zum Frühjahr 2013 zu verzeichnen ist. Die SR-Werte von Schicht 4 lagen vom Frühjahr 2012 bis zum Frühjahr 2013 bei ca. 1,8 und stiegen zum Herbst 2015 auf ca. 2,0 an. In dieser Variante macht sich die Ab-

nahme der C_t -Massen zum Herbst 2012 und zum Frühjahr 2013 im Gegensatz zu den Variante D und K kaum in den SR-Werten der Schichten 3 und 4 bemerkbar.

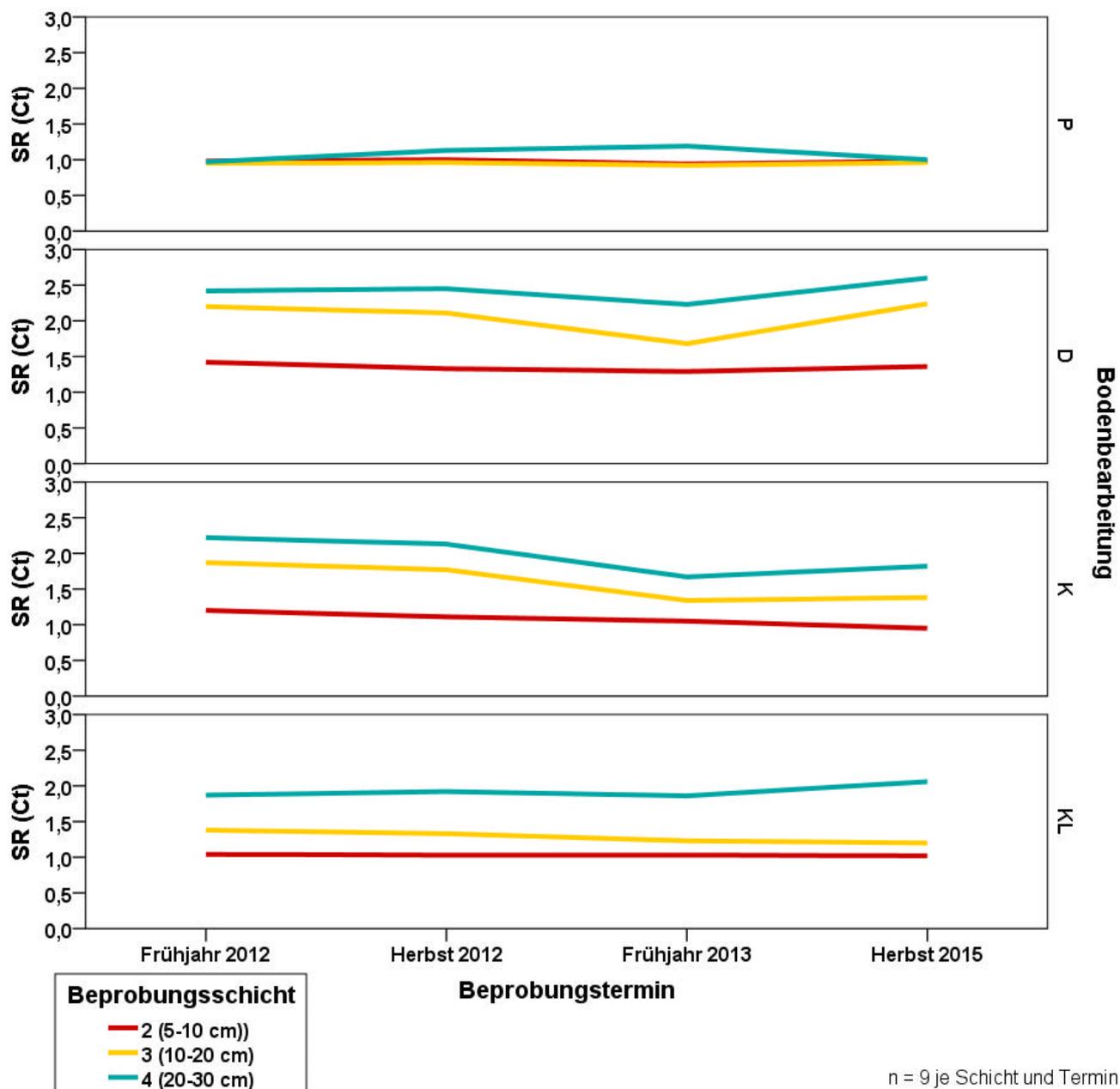


Abbildung 42: Mittlere Stratifizierungsverhältnisse (SR) der Kohlenstoffgehalte der Krume differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Basisbeprobungsterminen am Standort Lüttewitz

5.2.1.1.2 Einfluss der Hangneigung

Aufgrund des zu vermutenden Einflusses der Hangneigungen durch Erosion bzw. Akkumulation von Oberbodenmaterial an den einzelnen Beprobungspunkten auf die Kohlenstoffmassen wurden diese, jeweils als Mittelwert der vier Termine und nach Bearbeitungsvarianten differenziert, als Punktdiagramm dargestellt (Abbildung 43).

Die Hangneigungen liegen insgesamt zwischen 1 und 12 %, wobei ein Großteil der Punkte im Bereich zwischen 2 und 10 % liegt. Dabei ist zunächst keine klare Verteilung der C_T -Massen nach Hangneigungen bzw. Bodenbearbeitungsvarianten erkennbar. Bei höheren Hangneigungen treten allerdings erwartungsgemäß etwas niedrigere C_T -Massen auf, diese liegen bei Hangneigungswerten > 6 % nicht über 70 t ha^{-1} . Drei der Punkte mit den höchsten Hangneigungen befinden sich in der Variante KL, was ein möglicher Grund für die niedrigeren mittleren C_T -Massen in dieser Variante sein könnte (s.o.), insbesondere im Vergleich zur Variante D, in welcher der Punkt mit höchsten Hangneigung bei 7,25 % liegt.

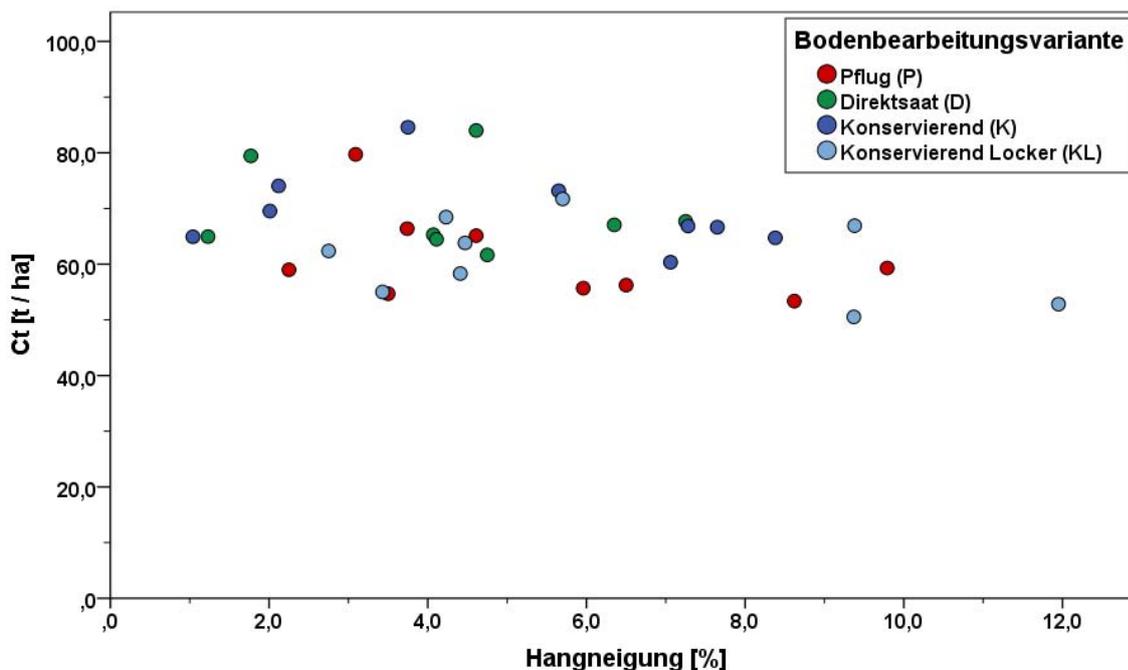


Abbildung 43: Gesamtkohlenstoffvorräte in Abhängigkeit von der Hangneigung und Bodenbearbeitungsvariante im Mittel der vier Basisbeprobungstermine am Standort Lüttewitz

Auf Basis der Hangneigungsklassen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (AG BODEN 2005) wurden die Beprobungspunkte in die Hangneigungsklassen N0 - N3 eingeteilt (Abbildung 44). Für die vier Basisbeprobungstermine lagen für die Hangneigungsklasse N0 (0 - 2 %) 24 C_T -Werte, für die Klasse N1 (2-3,5 %) 20 C_T -Werte, für die Klasse N2 (3,5 - 9 %) 84 C_T -Werte und für die Klassen N3 (>9 %) 23 C_T -Werte vor.

Innerhalb der Hangneigungsklassen treten dabei erheblich Streuungen der ermittelten C_T -Massen auf. Für die Klasse N0 wurde ein Mittelwert von $72,2 \text{ t C ha}^{-1}$ ermittelt, für die Klasse N1 ein Mittelwert von $64,0 \text{ t C ha}^{-1}$, für die Klasse N2 ein Mittelwert von $66,1 \text{ t C ha}^{-1}$ und für die Klasse N3 ein Mittelwert von $60,2 \text{ t C ha}^{-1}$. Bei gegebener Normalverteilung nach SHAPIRO-WILK sowie Varianzhomogenität nach LEVENE ergab die Varianzanalyse nebst Post-Hoc-Test nach SCHEFFÉ signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Hangneigungsklassen N0 und N3.

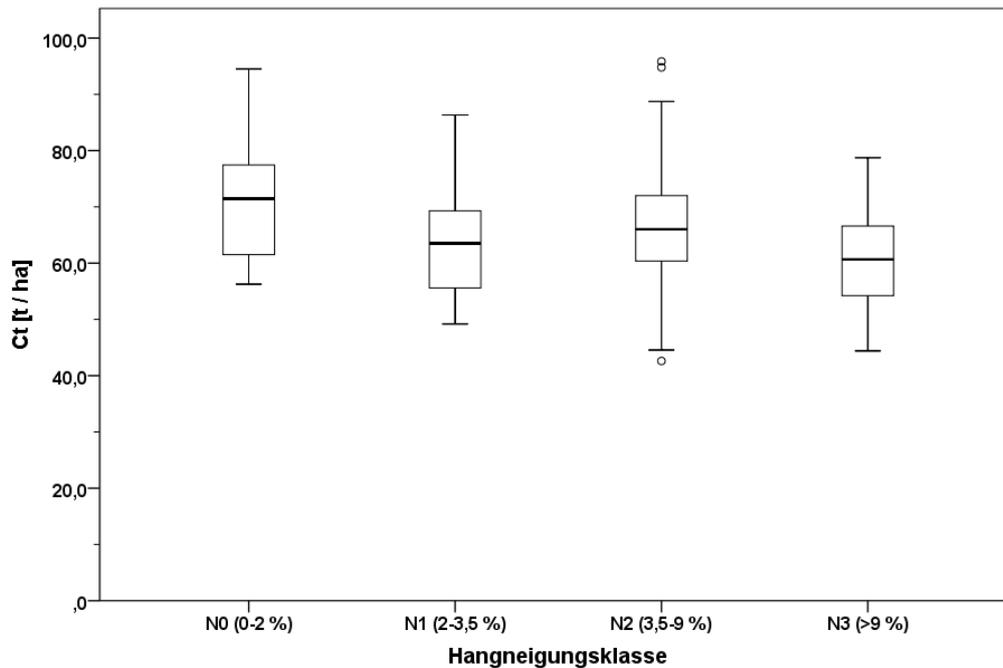


Abbildung 44: Streuung der Gesamtkohlenstoffvorräte in vier Hangneigungsklassen im Mittel der vier Basisbeprobungstermine am Standort Lüttewitz

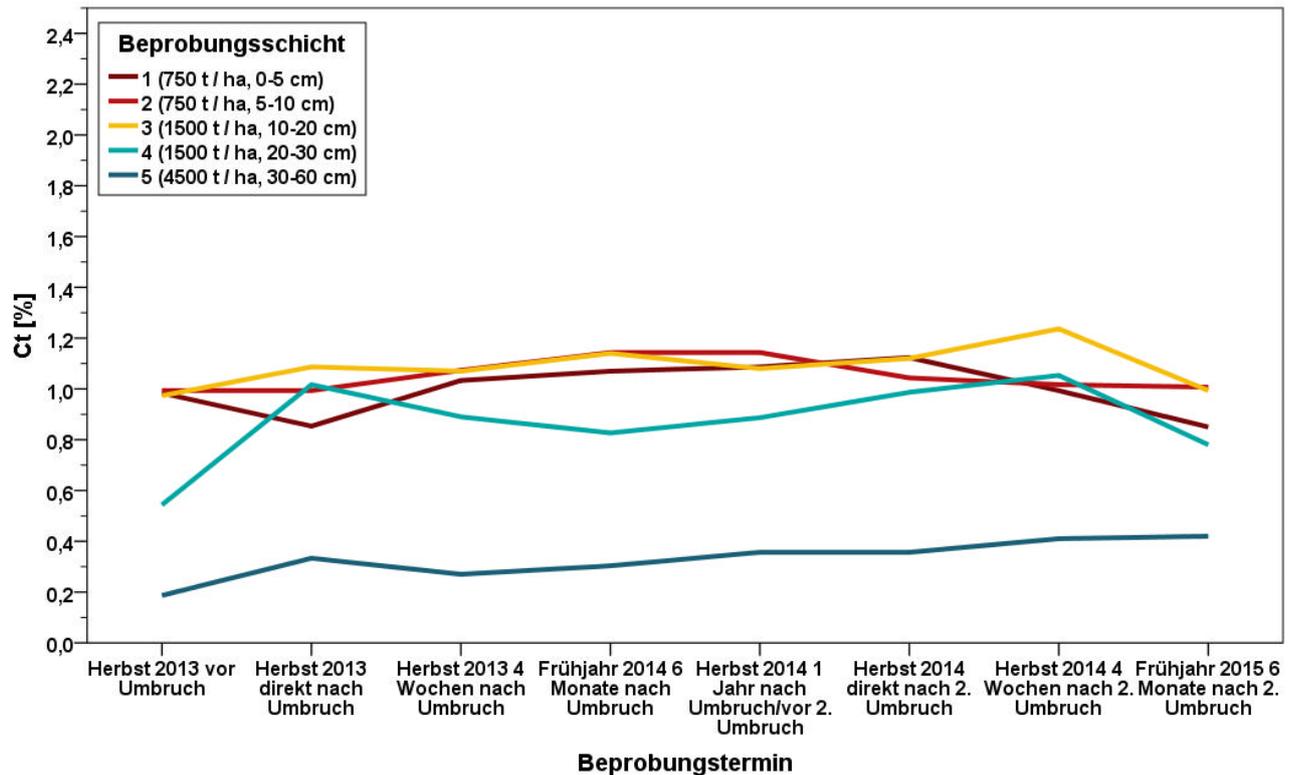
5.2.1.2 Umbruchversuch

Vergleicht man zunächst die C_T -Gehalte der fünf Beprobungsschichten in den drei Varianten über alle acht Beprobungstermine zeigt sich die erwartete Verteilung:

Die Variante Pflug (P) weist im Mittel ($n = 3$) in den obersten 4 Beprobungsschichten durchgängig C_T -Gehalte zwischen 0,8 und 1,2 % auf (Abbildung 45).

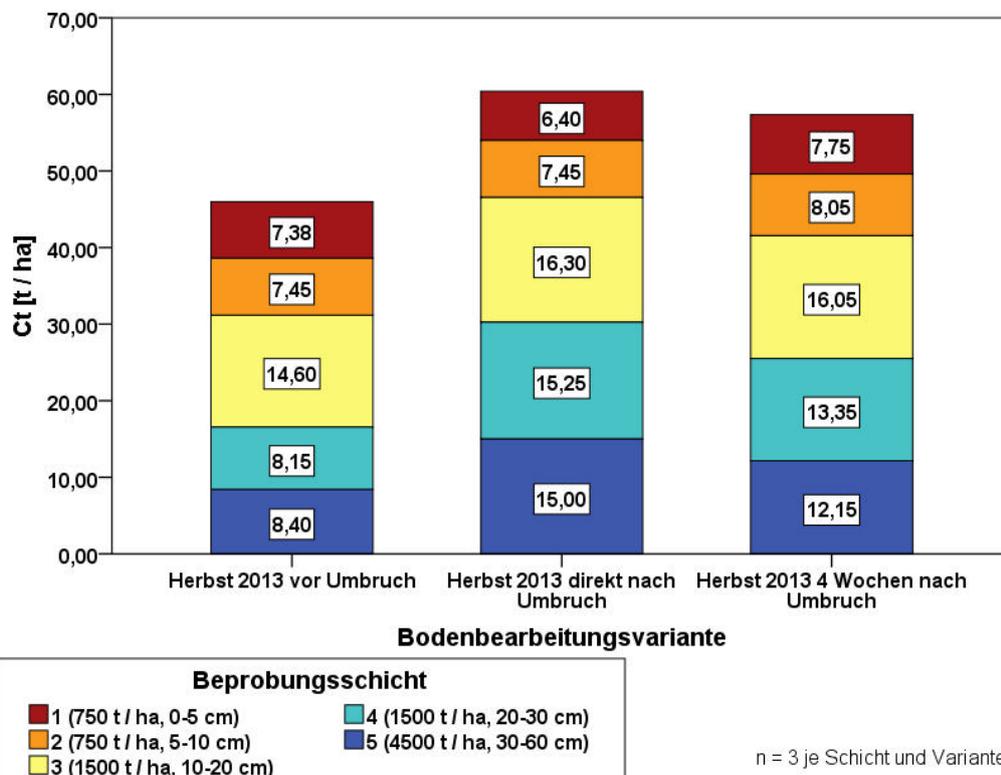
Auffällig ist eine starke Zunahme des C_T -Gehaltes (von ca. 0,5 % auf 1,0 %) in der Schicht 4 im Herbst 2013 vom Termin direkt vor dem Umbruch zum Termin direkt nach dem Umbruch, zwischen denen ca. eine Woche liegt. Es handelt sich offensichtlich um eine bodenbearbeitungsbedingte Umverteilung von organischem Material in die Unterkrume, welche allerdings nicht mit einer entsprechenden Abnahme der ermittelten Gehalte für die Oberkrume einhergeht. Ein Blick in die Einzeldaten zeigt für den Termin vor Umbruch Messwerte von 0,59 % (PU1), 0,30 % (PU2) und 0,74 % (PU3).

Es bleibt zunächst unklar, warum zu diesem Termin drei für diese Bodenbearbeitungsvariante und Beprobungsschicht untypisch niedrige Werte ermittelt wurden, wobei insbesondere der Wert für den Punkt PU2 als Ausreißer anzusehen ist. Nach dem Umbruch wurde hingegen die für diesen Bearbeitungsstatus (kurz nach Umbruch) typische homogene Verteilung mit den höchsten Gehalten in den Schichten 3 und 4 erzielt. Auch die Schicht 5, welche bei einer Pflugtiefe von max. 30 cm von der Bearbeitung ausgenommen sein sollte, zeigt fast eine Verdopplung der mittleren C_T -Gehalte und damit auch -Massen. Während sich die Veränderungen der C_T -Gehalte und -Massen in den oberen drei Schichten über beide Termine in etwa die Waage halten, wurde für die Schichten 4 und 5 zusammen eine C_T -Zunahme um ca. $13,5 \text{ t ha}^{-1}$ ermittelt (Abbildung 46). Aufgrund dieser Überlegungen scheint der große Sprung in den Gehalten der Schichten 4 und 5 sowie der sich daraus ergebenden Gesamtmassen für den ersten Termin vor Umbruch (s.u.) eher das Resultat einer Beprobungs- bzw. Messungenauigkeit denn einer tatsächlichen kurzfristigen Änderung der Kohlenstoffgehalte bzw. -massen zu sein.



n = 3 je Schicht

Abbildung 45: Mittlere Kohlenstoffgehalte in der Variante Pflug (PU) im Verlauf der acht Beprobungstermine, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz



n = 3 je Schicht und Variante

Abbildung 46: Mittlere Kohlenstoffvorräte differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz im Herbst 2013

Im weiteren Verlauf der Beprobungstermine gibt es nur noch geringe Schwankungen der C_t -Gehalte in den Beprobungsschichten, lediglich zum letzten Beprobungstermin im Frühjahr 2015 zeigen insbesondere die Schichten 1, 3 und 4 eine deutliche Abnahme im Vergleich zum Herbst/Winter 2014 (Abbildung 45). Dies hängt möglicherweise mit der raschen Umsetzung und Mineralisierung der stickstoffreichen Blätter und Wurzeln der Zuckerrübe zusammen.

Die Variante Direktsaat (D) zeigt auch während des Umbruchversuches eine Verteilung der C_t -Gehalte, wie sie bereits im Rahmen der Basisbeprobungen festgestellt wurde (Abbildung 47):

Die fünf Beprobungsschichten weisen eine durchgehende Stratifizierung bei sehr hohen C_t -gehalten in den Schichten 1 und 2 auf. Auffällig ist, im Verlauf der Termin, ein starker Anstieg der C_t -Gehalte vom Herbst/Winter 2013 zum Frühjahr 2014. Dieser Anstieg betrifft alle fünf Beprobungsschichten, wobei er in den Schichten 1 (um ca. 0,4 %) und 2 (um ca. 0,5 %) am deutlichsten ausfällt. In den anderen drei Schichten steigen die Gehalte um jeweils ca. 0,1 - 0,2 %. Dieser Anstieg kann womöglich mit dem relativ warmen und trockenen Winter 2013/2014 erklärt werden, welcher zu einer vergleichsweise raschen Umwandlung bzw. Humifizierung organischer Reste (Stroh, Wurzeln, etc.) sowohl an der Oberfläche als auch im Boden geführt hat. Sollte dies die Ursache des Anstieges sein, bleibt allerdings fraglich, warum die Gehalte der Variante Pflug keinen solchen Anstieg zum Frühjahr 2014 aufweisen (Abbildung 45).

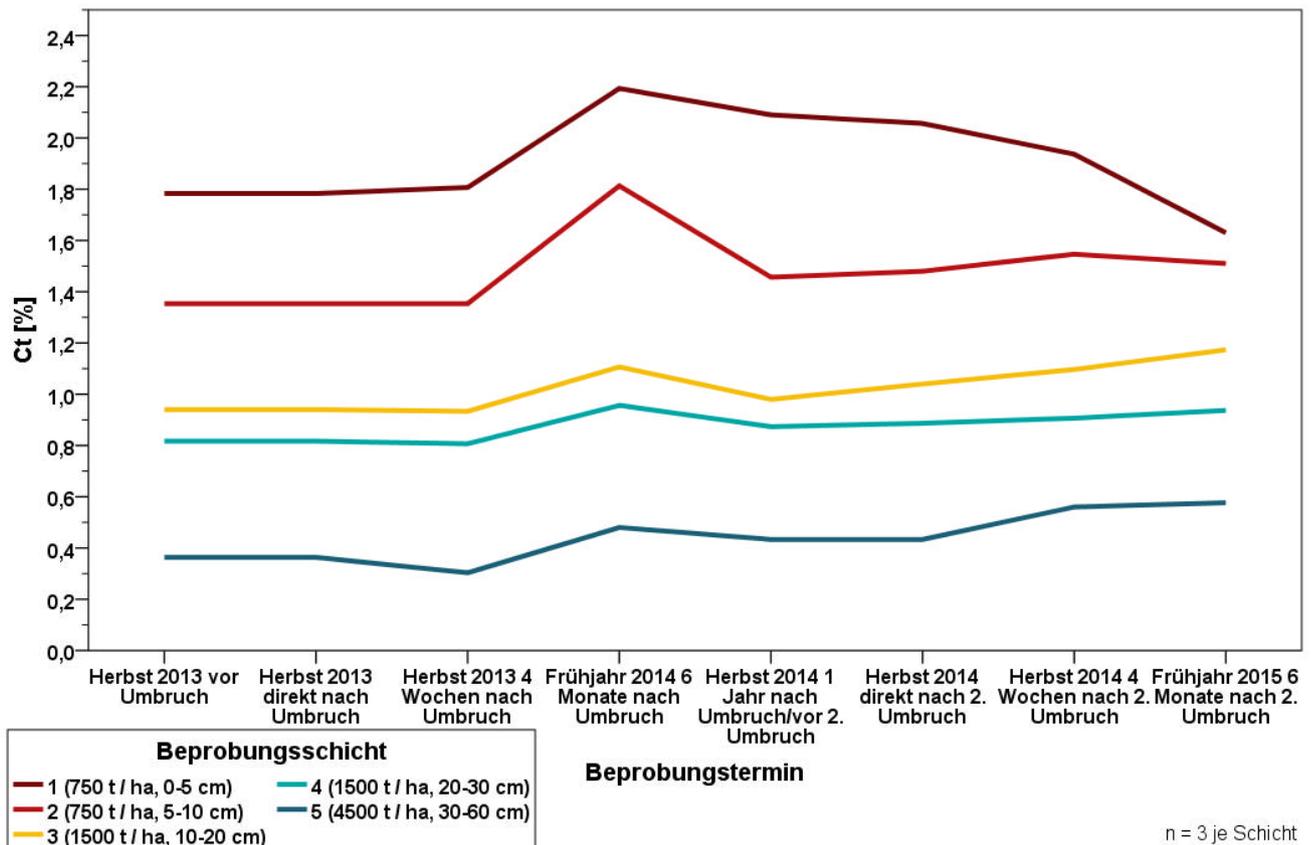
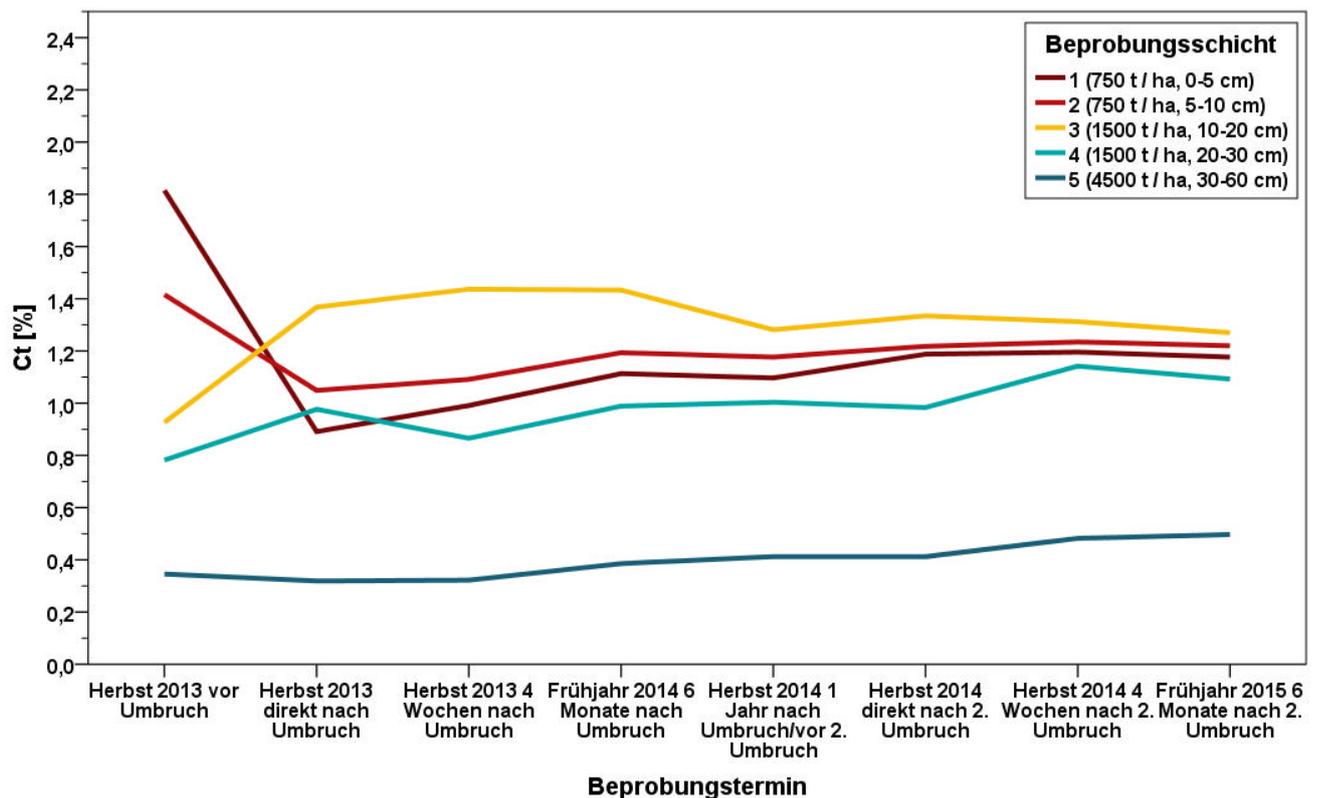


Abbildung 47: Mittlere Kohlenstoffgehalte in der Variante Direktsaat (DU) im Verlauf der acht Beprobungstermine, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz

Die Variante Direktsaat gepflügt (DP) mit den drei Streifen DP1 - DP3 zeigt in den mittleren C_t -Gehalten ($n = 9$) den Übergang von der stratifizierten Verteilung der Direktsaat zur homogenisierten Verteilung der Pflugvariante (Abbildung 48). Nachdem die C_t -Gehalte insbesondere in der Schicht 3 direkt nach dem ersten Umbruch mit ca. 1,4 % noch deutlich über jenen der Schichten 1, 2 und 4 liegen, nähern sich diese im Verlauf des Jahres 2014 einander an. Spätestens nach dem 2. Umbruch im Herbst 2014, welcher im Gegensatz zum ersten Umbruch kaum kurzfristige Veränderungen der C_t -Gehalte in der Krume bewirkte, haben sich die Gehalte in den Schichten 1 - 4 einander auf ca. 0,2 % angenähert und liegen allesamt zwischen 1,1 und 1,3 %. Die Unterbodenschicht 5 zeigt im Verlauf des Versuches einen kontinuierlichen, aber sehr langsamen Anstieg der mittleren C_t -Gehalte um insgesamt ca. 0,1 %.



$n = 3$ je Schicht

Abbildung 48: Mittlere Kohlenstoffgehalte in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) im Verlauf der acht Beprobungstermine, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz

Vergleicht man die mittleren Gesamtmassen des Kohlenstoffs zwischen den drei Varianten ergibt sich die folgende Situation (Abbildung 49):

Die C_t -Gehalte der Varianten D und DP liegen zu allen drei Terminen im Herbst 2013 sehr eng beieinander bei ca. $65 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$. Zum Frühjahr 2014 ergibt sich ein erheblicher Anstieg in beiden Varianten, der in der Variante D, wie bereits im Rahmen der Einzelgehälter diskutiert, deutlich stärker ausfällt (auf über $80 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$). In der Variante DP fällt dieser Anstieg auf ca. $70 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$ wesentlich moderater aus. Zum Herbst 2014 nähern sich beide Varianten einander wieder bis auf ca. $5 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$ an, zeigen aber zum Winter 2014 bzw. Frühjahr 2015 eine leichte kontinuierliche Zunahmetendenz, sodass im Frühjahr 2015 C_t -Gesamtmassen von ca. $80 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$ (D) bzw. $75 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$ (DP) ermittelt wurden.

Die Variante Pflug (P) weist über alle Termine deutlich geringere C_t -Gesamtmassen auf als die anderen Varianten. Der Unterschied zu den Varianten DP bzw. D beträgt dabei zu den meisten Terminen zwischen 5 und 10 t C_t ha^{-1} , mit Ausnahme des Termins vor dem Umbruch sowie des letzten Termins im Frühjahr 2015. Der erste Termin wurde bereits im Rahmen der Darstellung der Gehalte der einzelnen Schichten diskutiert und stellt vermutlich aufgrund eines Fehlers einen Sonderfall dar. Die Umrechnung in Gesamtmassen unterstreicht diese Interpretation, da eine Veränderung der C_t -Massen um ca. 15 t ha^{-1} innerhalb einer Woche faktisch unmöglich ist. Ob die deutliche Abnahme der C_t -Massen um fast 10 t C_t ha^{-1} zum Frühjahr 2015 tatsächlich vollständig aus dem verstärkten Abbau der Zuckerrübenreste erklärt werden kann, erscheint ebenfalls sehr fraglich.

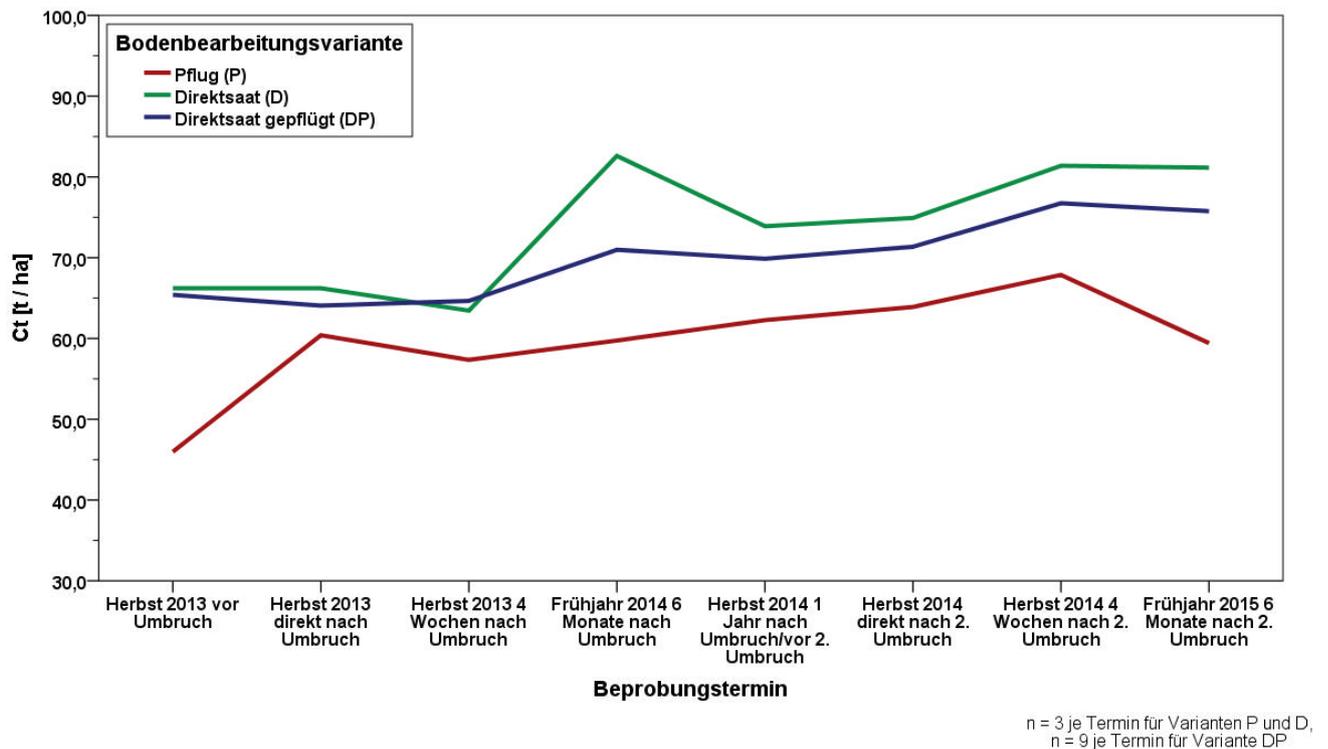


Abbildung 49: Mittlere Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass trotz einzelner großer Schwankungen, die je nach Fall diskutiert und interpretiert werden müssen, ein kontinuierlicher Unterschied zwischen den C_t -Massen der drei Varianten besteht. Dabei weist die Variante D durchgängig die größten C_t -Massen auf, gefolgt von der Variante DP, welche eine Art Mittelstellung einnimmt. Es besteht zu allen Terminen ein deutlicher Unterschied zwischen den Varianten DP und P.

Die Varianzanalyse mit Post-Hoc-Test nach SCHEFFÉ ergibt in Bezug auf die C_t -Gesamtmassen für alle acht Beprobungstermine einen signifikanten Unterschied der Mittelwerte. Dabei wird nach SCHEFFÉ die homogene Untergruppe (Signifikanz = 0,255) der Varianten D ($n = 24$, $MW = 73,7$ t ha^{-1}) und DP (DP1-3, $n = 72$, $MW = 69,9$ t ha^{-1}) in Abgrenzung zur Variante P ($n = 24$, $MW = 59,6$ t ha^{-1}) gebildet.

Für die Wiederholung des Versuches im Jahr 2014/2015 (4 Termine) kann dieses Ergebnis bestätigt werden. Die Variante P (n = 12) weist einen Mittelwert von 63,4 t ha⁻¹ auf, die Variante D (n = 12) einen Mittelwert von 77,8 t ha⁻¹. Für die Pflugstreifen DP4 - DP6 (n=35) liegt der Mittelwert der C_T-Massen bei 74,4 t ha⁻¹. Mit einer Signifikanz von 0,468 wird dabei nach SCHEFFÉ die homogene Untergruppe D und DP gebildet.

Im Rahmen der Analyse der Streuungen (Abbildung 50) zeigt sich, dass diese insbesondere für die Variante P sowie für das Frühjahr 2014 in allen drei Varianten sehr groß sind. Offensichtlich hängen die C_T-Massen im Allgemeinen sowie die Umsetzungsdynamik im Winter im Speziellen sehr stark von der jeweiligen Reliefposition und Exposition der Beprobungspunkte ab. Daher erfolgt an dieser Stelle eine streifen- bzw. reliefpositionsbasierte Darstellung der Ergebnisse. Insgesamt bleibt jedoch festzuhalten, dass zum Großteil der Termine, gerade auch im zweiten Versuchsjahr (2014/2015), die Werte der Variante DP deutlich größere Überschneidungen zum Wertebereich der Variante D als zu jedem der Variante P aufweisen.

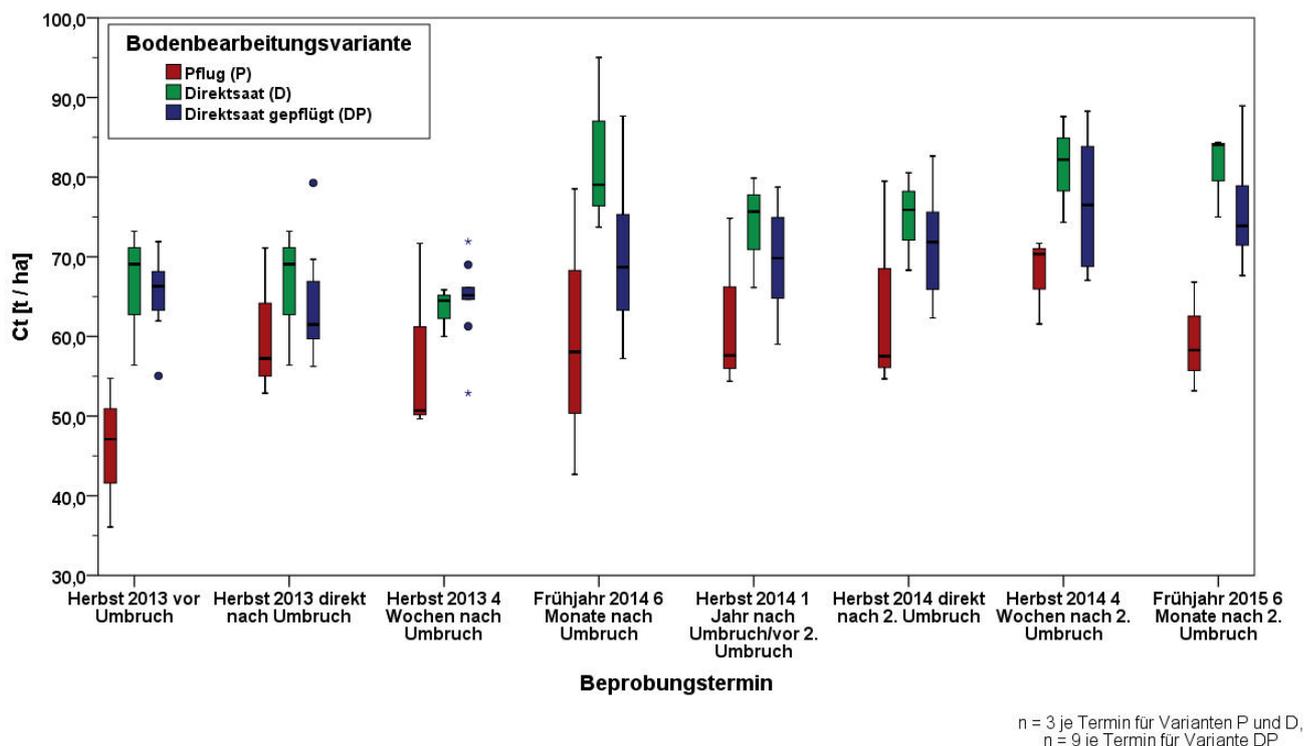


Abbildung 50: Streuungen der Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz

5.2.1.2.1 Reliefabhängigkeit der C-Vorräte

Wie bereits dargelegt, zeigen die Daten sowohl im Rahmen des Umbruchversuches als auch der Basisbeprobungen große Streuungen innerhalb des Schrages (Feldheterogenität). Eine wichtige Einflussgröße in diesem Zusammenhang ist erfahrungsgemäß die Lage im Relief, welche wiederum starken Einfluss auf die Erwärmung und Durchfeuchtung und damit die Umsatzdynamik im Boden hat. Zudem ist die Hangneigung maßgeblich für Erosionsprozesse, die u.a. zur Verlagerung von humusreichem Oberbodenmaterial führen. Daher werden in der Folge zunächst die Pflugstreifen DP1 - DP6 im Verlauf des Umbruchversuches einzeln betrachtet und dabei jeweils mit den in der gleichen Reliefposition gelegenen Referenzpunkten der Pflug- bzw. Direktsaatvariante verglichen.

Anhand der modellierten Abflussbahnen sowie der interpolierten räumlichen Verteilung der C_T -Gesamtvorräte (Abbildung 51) lassen sich die Positionen der Pflugstreifen sowie Referenzpunkte vorab charakterisieren. So liegt der Streifen DP1 in einer Delle mit überdurchschnittlichen C_T -Vorräten am oberen Ende einer kleinen Abflussbahn. Der Streifen DP2 befindet sich im Bereich durchschnittlicher C_T -Vorräte und wird ebenfalls von einer potentiellen Abflussbahn geschnitten. DP3 liegt in einem Bereich leicht unterdurchschnittlicher C_T -Vorräte und aufgrund der Position am Oberhang nicht in der Nähe einer Abflussbahn.

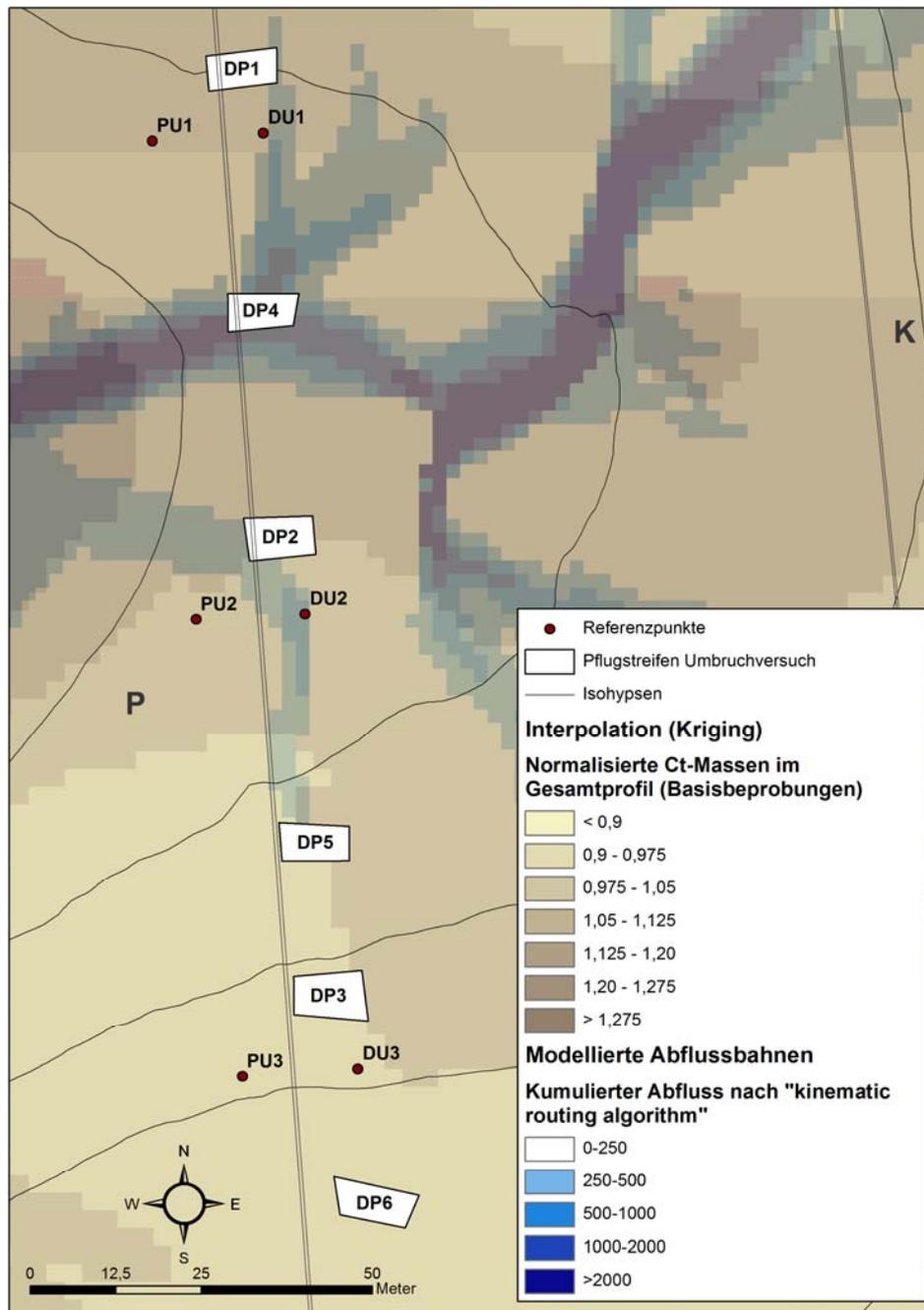


Abbildung 51: Lage der Pflugstreifen DP1 - DP6 und der Referenzpunkte (PU, DU) in Bezug auf die modellierten Abflussbahnen sowie die räumliche Verteilung der normalisierten Kohlenstoffvorräte am Standort Lüttewitz

Der erste im Herbst 2014 angelegte Streifen DP4 befindet sich ebenfalls in der nördlich gelegenen Delle mit überdurchschnittlichen C_T -Vorräten und dort genau im Zentrum der zentralen nach Westen ausgerichteten

Abflussbahn. Für diesen Pflugstreifen sind daher die stärksten Effekte von Erosions- und Akkumulationsprozessen zu erwarten, insbesondere aufgrund der Situation nach Anbau der Zuckerrübe, bei der durch den späten Aussaattermin der Folgefrucht Winterweizen die Bodenbedeckung bis zum Frühjahr sehr gering ist. Der Streifen DP5 liegt im Bereich leicht unterdurchschnittlicher C_T -Vorräte am Mittelhang im Bereich des Beginns einer potentiellen Abflussbahn. Für den Streifen DP6 sind aufgrund der Lage auf der zentralen Kuppe unterdurchschnittliche C_T -Vorräte zu erwarten.

Die Referenzpunkte PU1 und DU1 liegen in der Delle im Bereich überdurchschnittlicher C_T -Vorräte. An den Referenzpunkte PU2 und DU2 im Hangbereich sind in etwa durchschnittliche C_T -Vorräte zu erwarten, wohingegen für die Punkte PU3 und DU3 im Kuppenbereich unterdurchschnittliche C_T -Vorräte zu erwarten sind. Für die Punkte DU1 und DU2 ist aufgrund der Nähe zu den potentiellen Abflussbahnen ggf. mit dem Einfluss von Erosion zu rechnen.

In der Reliefposition Delle (Pflugstreifen DP1 sowie Referenzpunkte PU1 und DU1)(Abbildung 51) sind die C_T -Massen insgesamt in allen Varianten hoch (Abbildung 52), was mit der Akkumulation von humusreichem Oberbodenmaterial erklärt werden kann. Auffällig ist, dass die Unterschiede zwischen den Varianten sehr gering sind, die Schwankungen zwischen den Terminen hingegen recht groß. Mit der Ausnahme des ersten Termins (Diskussion siehe oben) und der letzten beiden Termine liegt die Pflugvariante auf dem Niveau der anderen beiden Varianten, teilweise sogar leicht darüber. Die stärkere Differenzierung im Winter/Frühjahr 2014/2015 hängt möglicherweise mit der speziellen Situation nach dem Anbau der Zuckerrübe zusammen, welche eine rascher abbaubare, stickstoffreiche Streu liefert und, im Gegensatz zum Getreide, eine deutlich geringere Bodenbedeckung (insbesondere auch in der Variante D bzw. DP) zur Folge hat.

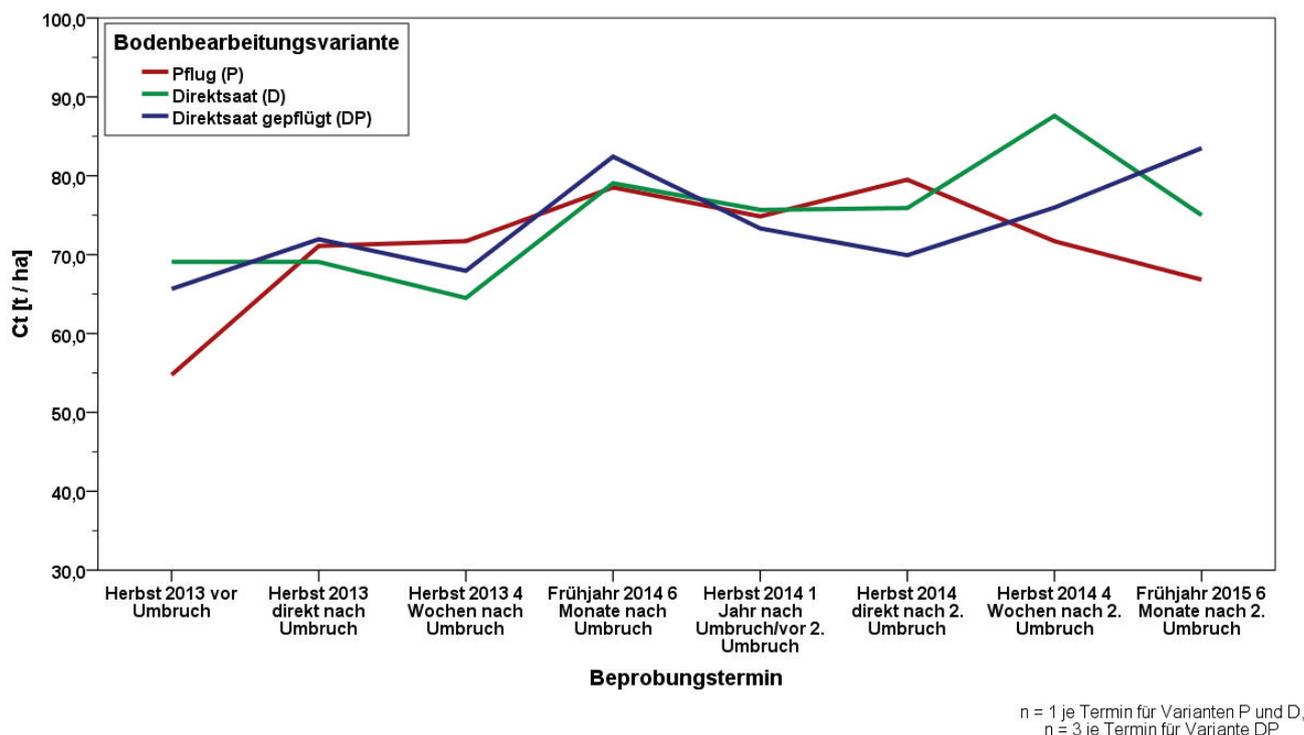


Abbildung 52: Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP1 am Standort Lüttenwitz (Abbildung 51)

Der ebenfalls in der Delle im Bereich der potentiellen Abflussbahn gelegene Streifen DP4 (Abbildung 53) zeigt ein sehr ähnliches Bild wie der Streifen DP1 mit C_t -Massen zwischen 75 und 80 $t\ ha^{-1}$ in der Variante DP. Diese sinken im Winter 2014 zunächst, wie in der Variante P, etwas ab, steigen allerdings zum Frühjahr 2015 analog zum Streifen DP1 deutlich an und sind damit größer als jene der Variante D. Der starke Anstieg der C_t -Vorräte in den Pflugstreifen DP1 und DP4 ist vermutlich als Effekt der oberflächlichen Akkumulation von Bodenmaterial zu deuten.

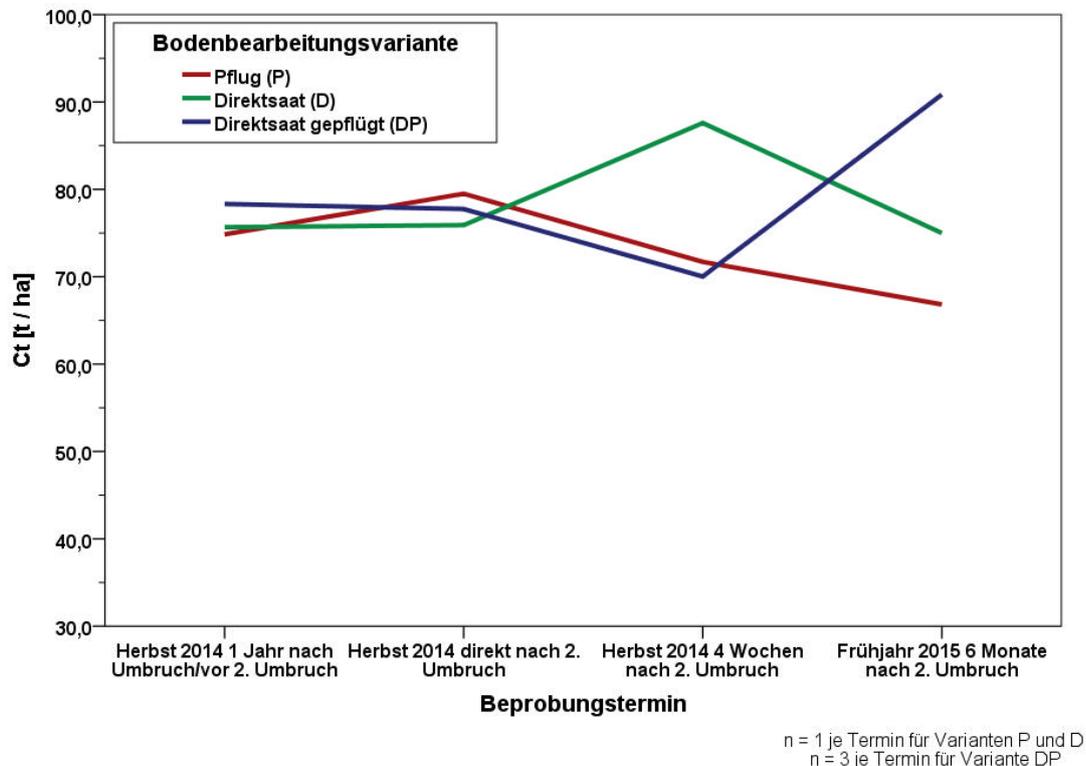


Abbildung 53: Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP4 am Standort Lüttenwitz

Der Pflugstreifen DP2 sowie die Referenzpunkte PU2 (P) und DU2 (D) (Abbildung 51) repräsentieren den Reliefabschnitt Unterhang. In diesem sind die Unterschiede sowohl zwischen den Varianten als auch den Terminen sehr stark ausgeprägt. Zudem liegen die C_t -Massen im Herbst 2013 insbesondere in der Variante P als auch in den Varianten D und DP niedriger als jene im Reliefbereich Delle/Abflussbahn. Bereits vor Beginn des Experimentes lagen die C-Vorräte in den drei Varianten in sehr unterschiedlichen Bereich, was die Heterogenitäten in Bezug auf die C-Verteilung in diesem Bereich des Schlages unterstreicht (Abbildung 54).

Am Streifen DP2 (Abbildung 54) kann in allen drei Varianten eine generelle Zunahme der C_t -Massen vom Herbst 2013 zum Herbst 2014 festgestellt werden. Allerdings liegt im Frühjahr 2014 eine Extremsituation vor, bei der am Beprobungspunkt DU2 mit ca. 95 $t\ C_t\ ha^{-1}$ sehr große und am Beprobungspunkt PU2 mit ca. 45 $t\ C_t\ ha^{-1}$ sehr geringe Kohlenstoffmassen ermittelt wurden. Für den Punkt DU2 ist aufgrund der höheren C_t -Gehalte in allen Beprobungsschichten gegenüber dem letzten Termin im Herbst 2013 anzunehmen, dass bei der Beprobung im Frühjahr 2014 ein Akkumulationsbereich beprobt wurde. Es handelt sich demnach nicht um einen Bearbeitungs- bzw. Umsatzeffekt, sondern um einen auf Abtragsprozessen basierenden Effekt.

Zudem wurde für die Varianten DP und P eine starke Abnahme der C_t -Massen um jeweils ca. 15 t ha^{-1} vom Herbst 2014 zum Frühjahr 2015 ermittelt (Abbildung 54). Diese Abnahme ist durch eine gleichmäßige Abnahme der C_t -Gehalte in allen 5 Beprobungsschichten gekennzeichnet. Neben möglichen Abtragungsprozessen in den oberen Beprobungsschichten ist es hier im Verlauf des vergleichsweise milden Winters 2014/2015 aber vermutlich auch zu einer verstärkten Mineralisierung von Humus gekommen.

Grundsätzlich nimmt die Variante DP in dieser Reliefposition eine Mittelstellung zwischen den Varianten P und D ein.

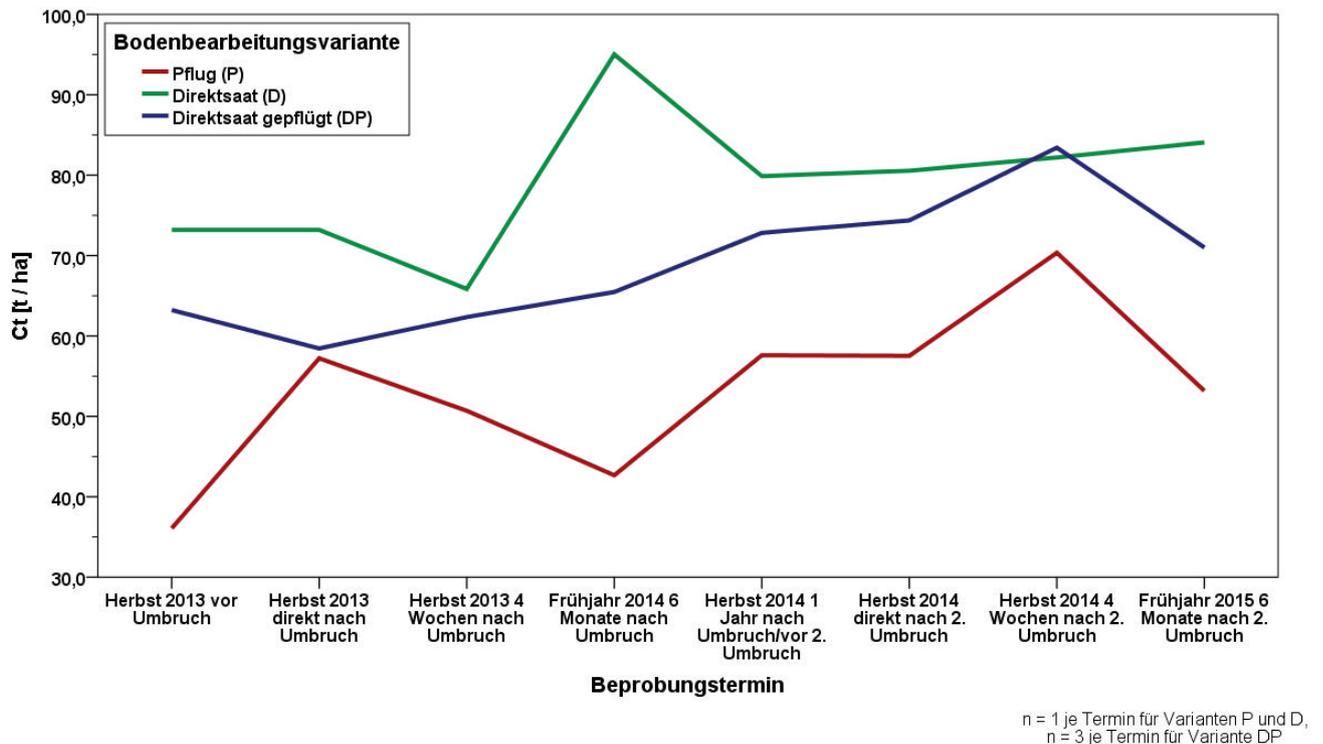


Abbildung 54: Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP2 am Standort Lüttenwitz

Diese Mittelstellung bestätigt sich am Pflugstreifen DP5 im zweiten Versuchsjahr (Abbildung 55). Der Unterschied zu den anderen Varianten beträgt dabei je nach Variante und Termin zwischen 5 und $10 \text{ t C}_t \text{ ha}^{-1}$. Die Abnahme der C_t -Massen zum Frühjahr 2015 fällt im Pflugstreifen DP5 nicht ganz so deutlich aus wie im Streifen DP2 bzw. am Punkt PU2 (s.o.). Grundsätzlich zeigen die Varianten DP und P einen ähnlichen zeitlichen Verlauf der C-Vorräte, wohingegen diese in der Variante D sehr stabil sind.

Der Reliefbereich Hang/Oberhang wird durch die Pflugstreifen DP3 und DP6 sowie die zugehörigen Referenzpunkte PU3 (P) und DU3 (D) repräsentiert.

Die für den Pflugstreifen DP3 und damit den Bereich stärkster Hangneigung ermittelten C_t -Massen sind in allen Varianten auffallend niedrig (Abbildung 56): Die Variante P weist eine leichte Zunahmetendenz im Versuchsverlauf bei C_t -Massen zwischen 50 und 60 t ha^{-1} auf. Die C_t -Massen der Varianten D und DP liegen, von kleineren Ausreißern abgesehen, in etwa in der gleichen Größenordnung und zeigen ebenfalls eine leichte

Zunahmetendenz im Verlauf des Versuches. Die Variante DP zeigt dabei die stabilsten Werte und nimmt ab dem 2. Termin (nach Umbruch) recht kontinuierlich von ca. 62 auf 72 t C_t ha⁻¹ zu. Die Variante D zeigt die stärkste Zunahme (ca. 55 t C_t ha⁻¹ auf ca. 85 t C_t ha⁻¹). Bis auf die letzten beiden Termine liegen aber auch in dieser Variante die ermittelten C_t-Massen unter jenen der anderen Reliefpositionen.

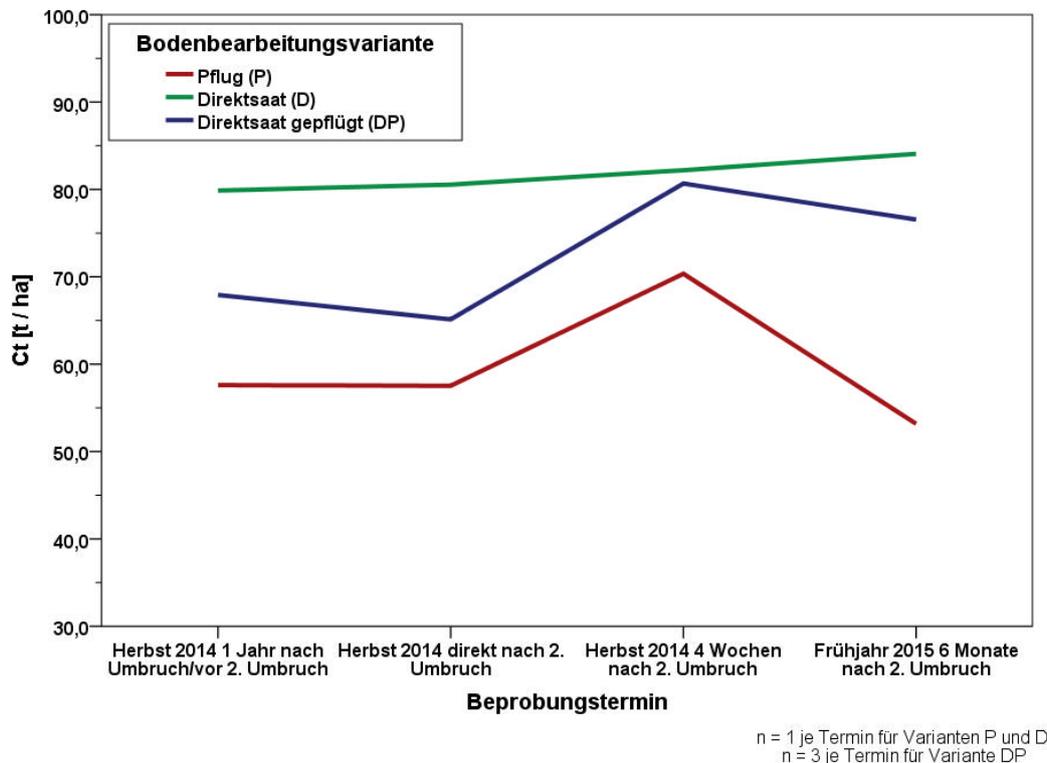
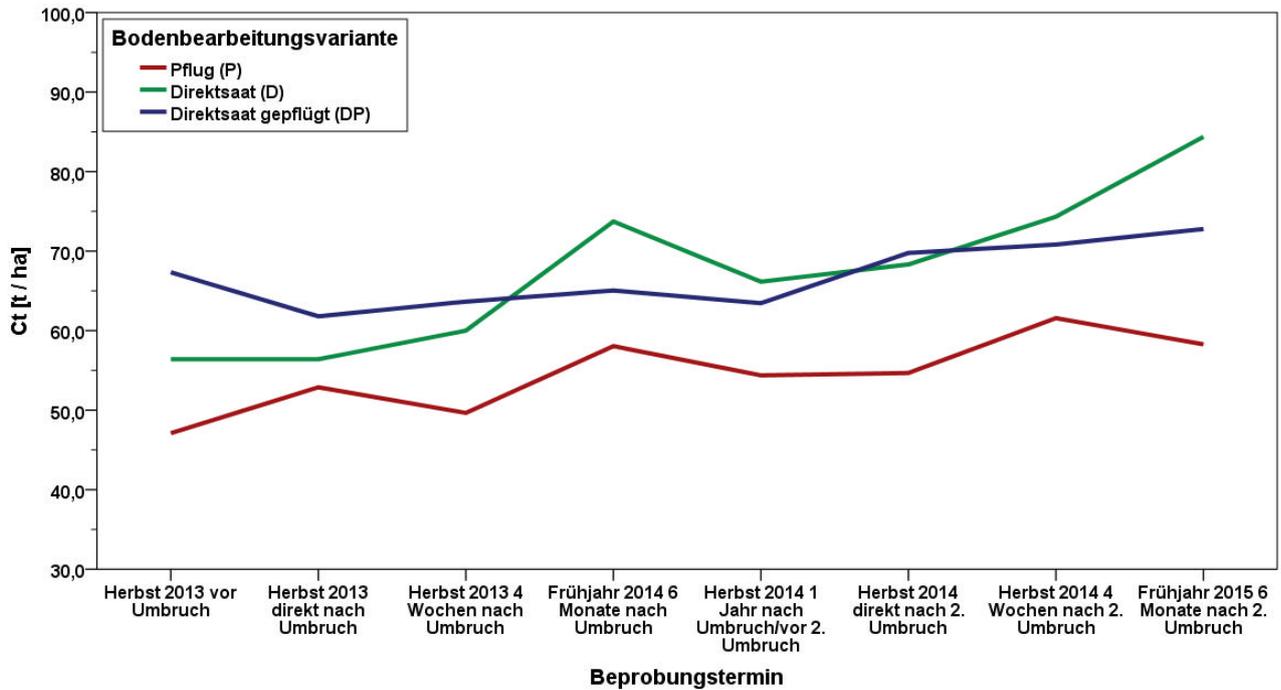


Abbildung 55: Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP5 am Standort Lüttewitz



n = 1 je Termin für Varianten P und D,
n = 3 je Termin für Variante DP

Abbildung 56: Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP3 am Standort Lüttewitz

Am Pflugstreifen DP6 am Oberhang im Übergang zur Kuppe wird dieses Ergebnis bestätigt (Abbildung 57). Hier weist die Variante DP ebenfalls sehr stabile und von ca. 70 auf 75 t C_t ha⁻¹ leicht ansteigende C_t-Massen auf. Dabei sind die Unterschiede zur Variante D deutlich geringer als jene zur Variante P.

In diesem Bereich sind die Unterschiede zwischen den Varianten DP und D gering. Möglicherweise hängt dies auch mit den insbesondere im Sommer recht trockenen Verhältnisse in diesem Reliefbereich zusammen, der einen mikrobiellen Humusabbau erschwert bzw. verhindert. Auch die Unterschiede zwischen den Varianten D und P sind in diesem Bereich am stärksten ausgeprägt.

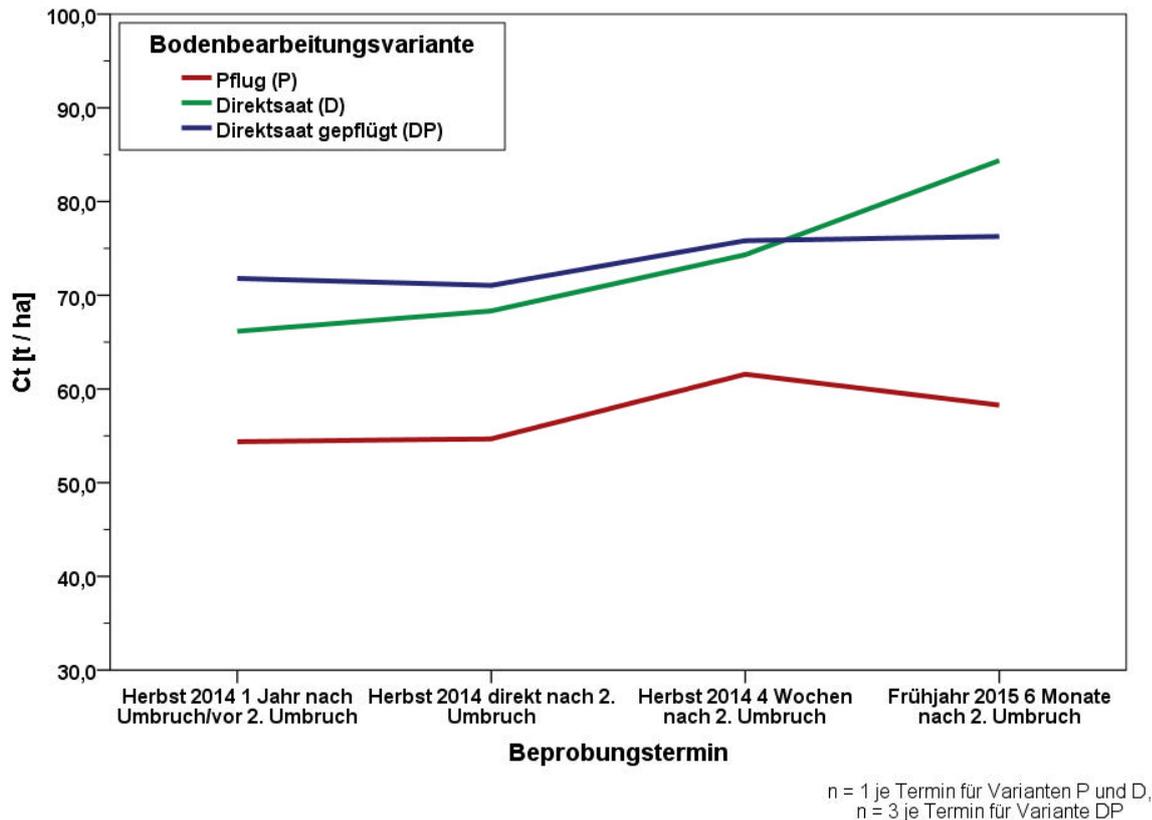
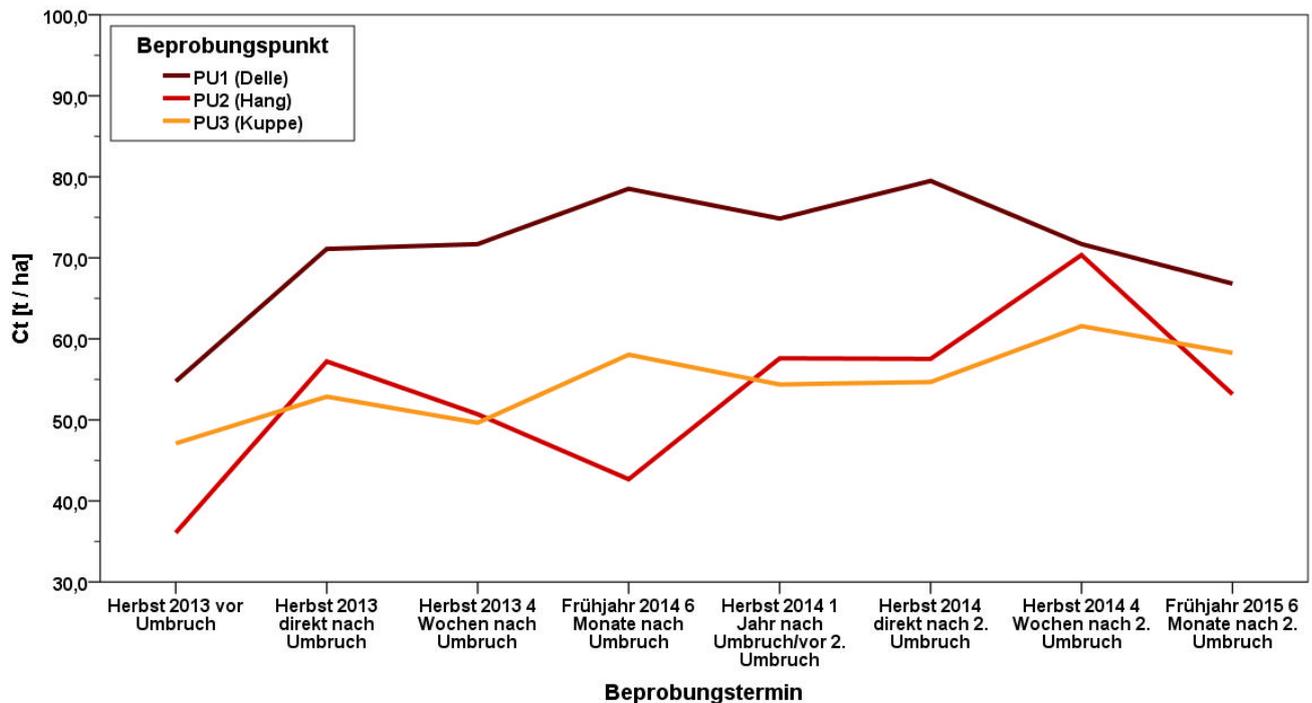


Abbildung 57: Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen am Pflugstreifen DP6 am Standort Lüttewitz

In den Abbildung 58 bis 60 sind die C-Vorräte innerhalb der Bodenbearbeitungsvarianten im Vergleich der Reliefpositionen dargestellt.

In der Variante Pflug (Abbildung 58) weist der Beprobungspunkt PU1 in der Delle zu allen Beprobungsterminen die höchsten Vorräte auf. Die Schwankungen zwischen den Terminen sind dabei relativ gering (Ausnahme: starker Anstieg direkt nach dem ersten Umbruch). Am Beprobungspunkt PU2 (Hang) treten die größten Schwankungen zwischen den Terminen auf. Markant sind dabei insbesondere die Abnahmen der C-Vorräte jeweils zum Frühjahrstermin. Die C-Vorräte am Punkt PU3 (Kuppe) unterliegen wesentlich geringeren Schwankungen und zeigen eine leichte Zunahmetendenz im Verlauf des Umbruchversuches. Der Unterschied zur Reliefposition Delle beträgt dabei zu allen Terminen zwischen 10 und 20 t C ha⁻¹.

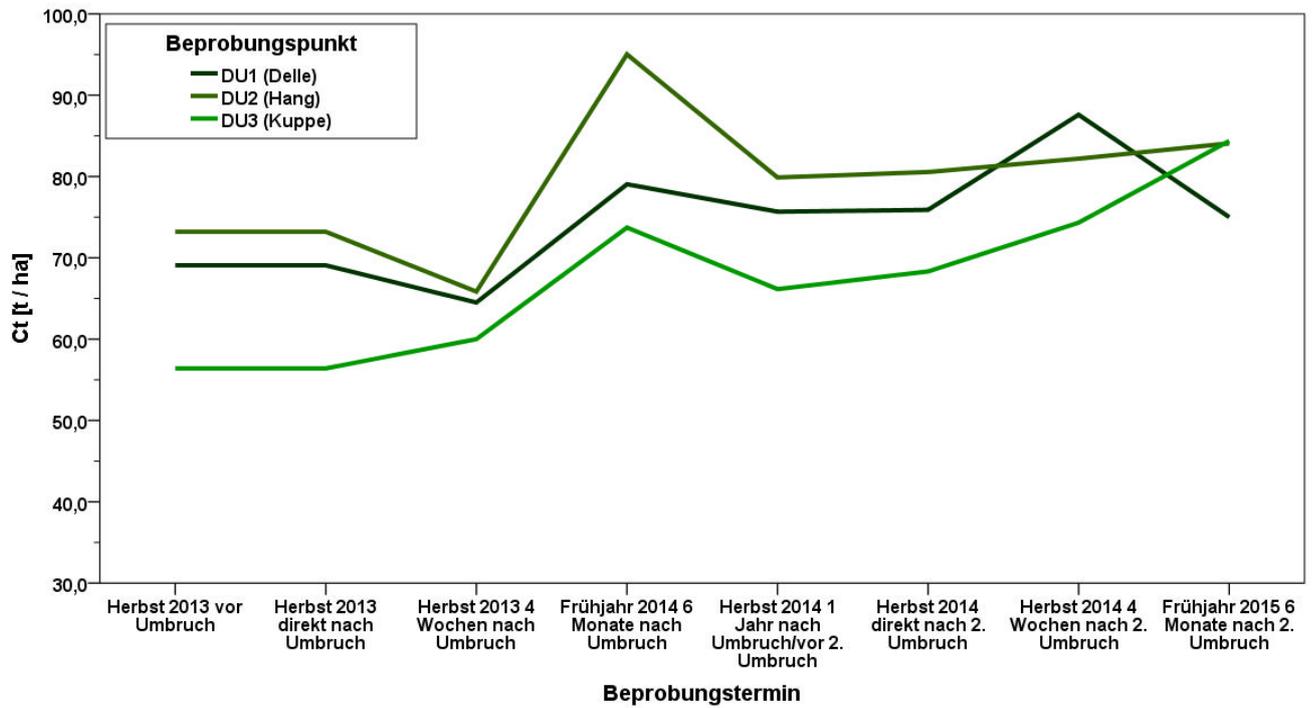
Die C-Vorräte in der Variante Direktsaat zeigen in allen Reliefpositionen einen ähnlichen zeitlichen Verlauf (Abbildung 59). Dabei weist der Beprobungspunkt DU2 (Hang) zu fast allen Zeitpunkten die höchsten C-Vorräte auf (Ausnahme: Herbst 2014, 4 Wochen nach dem Umbruch). Markant ist die deutliche Zunahme der C-Vorräte zum Frühjahr 2014 in allen drei Reliefpositionen nebst Abnahme im weiteren Verlauf des Jahres 2014. Nachdem am Beprobungspunkt DU3 in der Reliefposition Kuppe zunächst um ca. 10 - 15 t ha⁻¹ geringere C-Vorräte ermittelt wurden, nehmen diese im Versuchszeitraum nahezu kontinuierlich zu und liegen im Frühjahr 2015 in der gleichen Größenordnung wie an den anderen beiden Beprobungspunkten.



n = 1 je Termin und Punkt

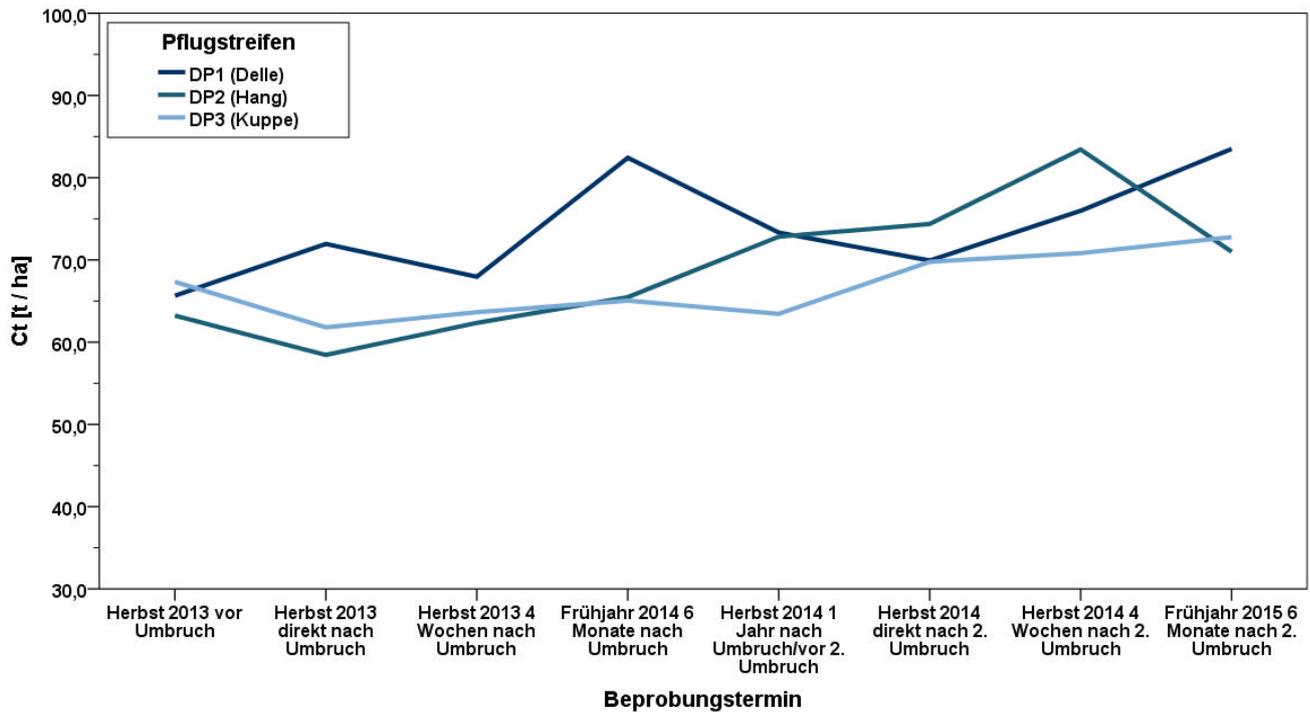
Abbildung 58: Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) in der Bearbeitungsvariante Pflug (PU) differenziert nach Reliefposition und Beprobungstermin am Standort Lüttenwitz

In der Variante Direktsaat gepflügt (DP) mit den zwei Umbrüchen im Herbst 2013 und im Herbst 2014 sind die C-Vorräte in den drei Reliefpositionen zu Beginn nahezu gleich (Abbildung 60). Zum Frühjahr 2014 bleiben die Vorräte an den Reliefpositionen Hang und Kuppe nahezu gleich, in der Delle (DP1) hingegen wurde eine erhebliche Zunahme festgestellt. Diese Dynamik kehrt sich im Verlauf des Jahres 2014 allerdings um, es kommt zu einer Zunahme der C-Vorräte in den Pflugstreifen DP2 und DP3 (Hang und Kuppe) und zu einer Abnahme derselben in der Delle (DP1). Zum Frühjahr 2015 wurde eine erneute Zunahme in der Delle festgestellt, wodurch hier um ca. 10 t ha^{-1} höhere C-Vorräte ermittelt wurden als an den anderen beiden Reliefpositionen.



n = 1 je Termin und Punkt

Abbildung 59: Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) in der Bearbeitungsvariante Direktsaat (DU) differenziert nach Reliefposition und Beprobungstermin am Standort Lüt-tewitz



n = 3 je Termin und Streifen

Abbildung 60: Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) in der Bearbeitungsvariante Direktsaat gepflügt (DP) differenziert nach Reliefposition und Beprobungstermin am Standort Lüttewitz

5.2.1.2.2 Stratifizierungsverhältnisse

In Abbildung 61 sind die Stratifizierungsverhältnisse (SR) der drei Varianten im Verlauf des Umbruchversuches dargestellt.

In der Variante Pflug (P) liegen diese in den Schichten 2 und 3 im gesamten Untersuchungszeitraum konstant bei ca. 1. Schicht 4 hingegen weist unmittelbar vor dem Umbruch im Herbst 2013 einen SR-Wert von 1,8 auf, was Ausdruck der relativen Akkumulation von (humifizierten) Ernteresten ist. Da die Einarbeitung der Erntereste des Jahres 2013 erst ca. einen Monat vor dem Beprobungstermin und nur bis in eine Tiefe von ca. 15 cm erfolgte, handelt es sich vermutlich um organisches Material aus dem Jahr 2012, welches im Herbst 2012 in diese Schicht eingearbeitet wurde. Nach einer Homogenisierung der C_t -Gehalte und damit auch SR-Werte durch den Umbruch im Herbst 2013 kommt es zum Jahr 2014 erneut zu einer leichten relativen Akkumulation von C_t in Schicht 4, was in SR-Werten von 1,2 - 1,3 zum Ausdruck kommt. Der Umbruch im Herbst 2014 führt zu einer erneuten Homogenisierung der SR-Werte in der Krume.

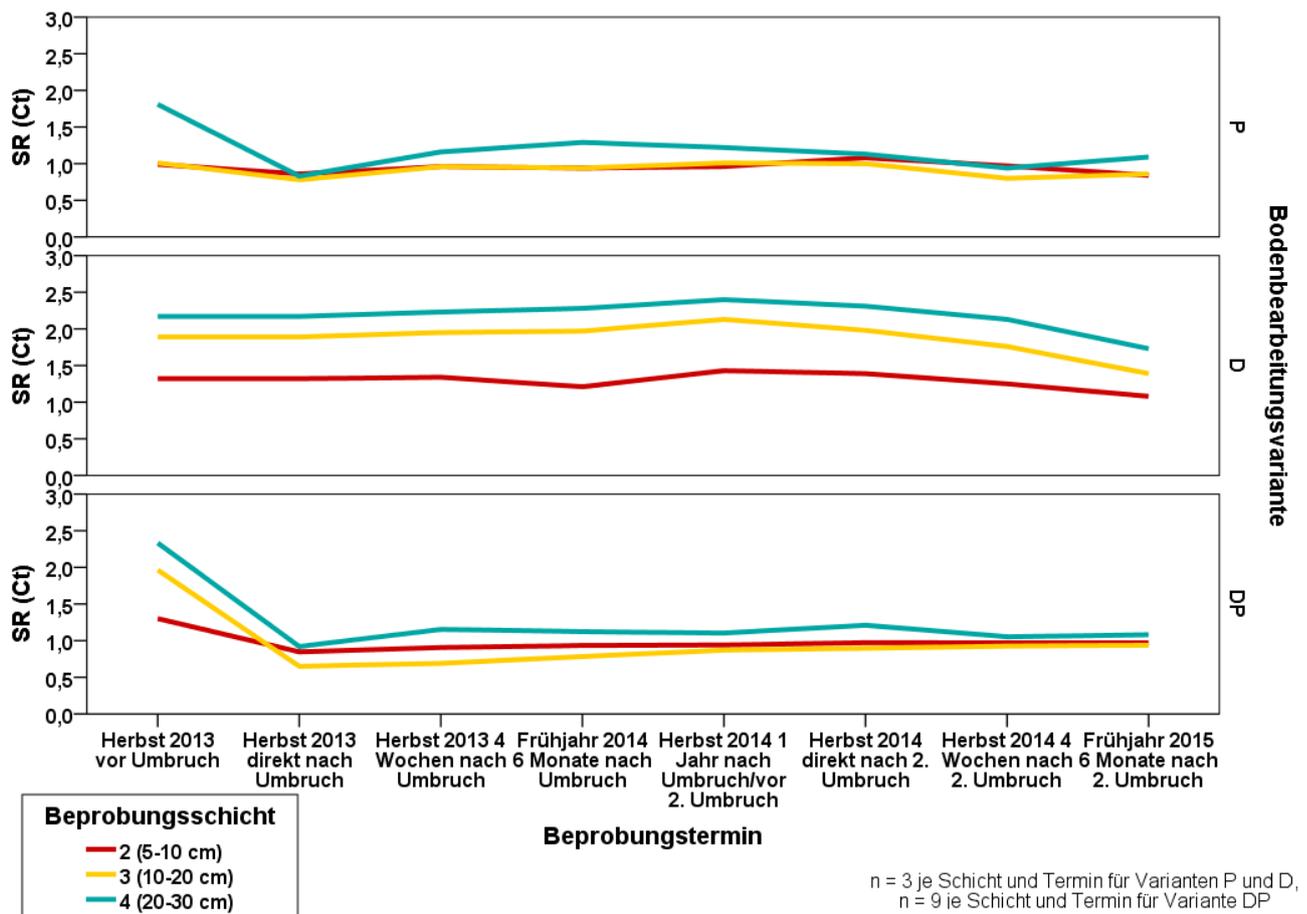


Abbildung 61: Mittlere Stratifizierungsverhältnisse (SR) der Ct-Gehalte in der Krume differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungstermine im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz

In der Variante Direktsaat (D) liegen die SR-Werte von Schicht 2 zu allen Terminen zwischen 1,1 und 1,4, wobei der niedrigste Wert im Frühjahr 2015 ermittelt wurde (Abbildung 61). In Schicht 3 liegen die SR-Werte im Herbst 2013 zunächst bei 1,8 - 1,9, steigen zum Frühjahr 2014 auf 2,0 und zum Herbst 2014 auf einen Wert über 2 an. In der Folge sinken die SR-Werte dieser Schicht kontinuierlich ab und erreichen im Frühjahr 2015 mit 1,4 ihren niedrigsten Wert. In Schicht 4 liegen die SR-Werte relativ konstant bei 2,2 - 2,4, erreichen aber ebenfalls im Frühjahr 2015 mit 1,7 ihren niedrigsten Wert. Die sinkenden SR-Werte der Schichten 3 und 4 zum Herbst 2014 und Frühjahr 2015 sind vermutlich auf den Anbau und insbesondere die Ernte der Zuckerrübe im Jahr 2014 zurückzuführen. So kam es vermutlich einerseits zu einer erhöhten Mineralisierung organischer Substanz in der Oberkrume, welche auch in den sinkenden C_t -Gehalten (Abbildung 47) in den Schichten 1 und 2 zum Ausdruck kommt. Andererseits stellt die Ernte der Zuckerrübe einen relativ starken mechanischen Eingriff in den Oberboden dar, welcher zu einer leichten Homogenisierung der C_t -Gehalte in der Oberkrume führt.

In der Variante Direktsaat gepflügt (DP) werden die SR-Werte der drei Beprobungsschichten 2 - 3, welche vor dem Umbruch auf dem Niveau der Variante D liegen, stark homogenisiert. Allerdings sinkt der SR-Wert von Schicht 3 zunächst auf einen Wert unter 1, enthält also mehr C_t als die oberste Beprobungsschicht. In der Folge kommt es allerdings zu einer sukzessiven Angleichung der SR-Werte in den drei Schichten zum Wert 1,0, wobei Schicht 4 zu allen Terminen die höchsten SR-Werte aufweist. Der zweite Umbruch im Herbst 2014 ist anhand der SR-Werte nicht erkennbar.

5.2.1.3 Synthese Lüttewitz

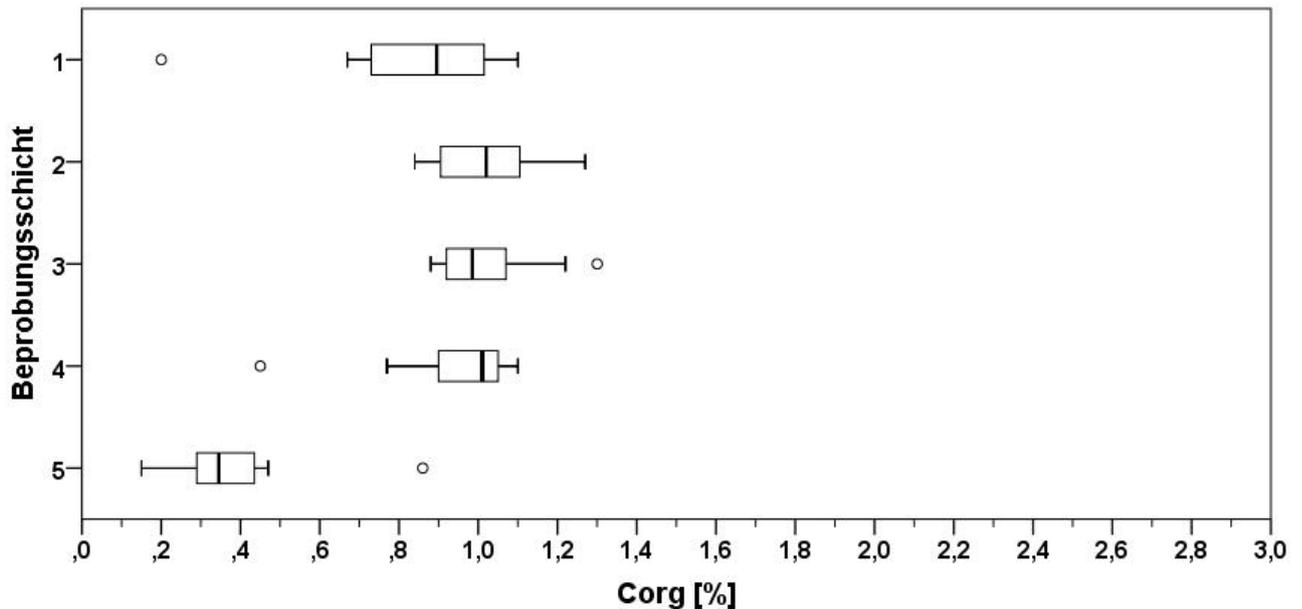
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Reliefpositionen sowohl im Hinblick auf die Höhe der C_t -Massen als auch im Hinblick auf die Unterschiede zwischen den Varianten deutlich voneinander unterscheiden. Dabei weisen die niedrig gelegenen Reliefpositionen (Dellen) die größten C_t -Massen und die geringsten Unterschiede zwischen den Varianten auf. Der Unterhang nimmt eine Mittelposition ein, im stärker geneigten Oberhang sind die C_t -Massen insbesondere in der Variante P deutlich geringer als in den anderen Varianten (und Reliefpositionen). Allerdings sind die Unterschiede zwischen den Varianten D und DP am Unterhang am stärksten ausgeprägt, wohingegen sie am Oberhang nur sehr gering ausfallen. Die veränderte Bodenbearbeitung scheint hier also keinen starken kurzfristigen Effekt auf die Erosion von oberflächennahem humusreichem Material zu haben.

In Bezug auf den Variantenvergleich (Basisbeprobungen) lässt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Varianten P und KL auf der einen und D und K auf der anderen Seite feststellen. Dabei weisen die erstgenannten mittlere C_t -Massen von ca. 60 t ha^{-1} auf, was exakt den für den Standort Methau ermittelten C_t -Massen der Varianten P und K entspricht (s.u.). Die mittleren C_t -Vorräte der Varianten D und K hingegen liegen um ca. 10 t ha^{-1} höher. Dies gilt sowohl für den Mittelwert über alle Termine als auch, mit kleinen Schwankungen, für jeden einzelnen der vier Basisbeprobungstermine. Allerdings ist, ebenso wie in Methau, ein starker Witterungseffekt erkennbar, der die C_t -Massen in allen Varianten im Verlauf des Jahres 2012 bzw. über den Winter 2012/2013 erheblich sinken lässt. Trotz dieser starken Effekte der Witterung und der Bodenbeschaffenheit lässt sich am Standort Lüttewitz ein deutlicher bodenbearbeitungsbedingter Effekt auf die C_t -Vorräte feststellen.

5.2.2 Methau

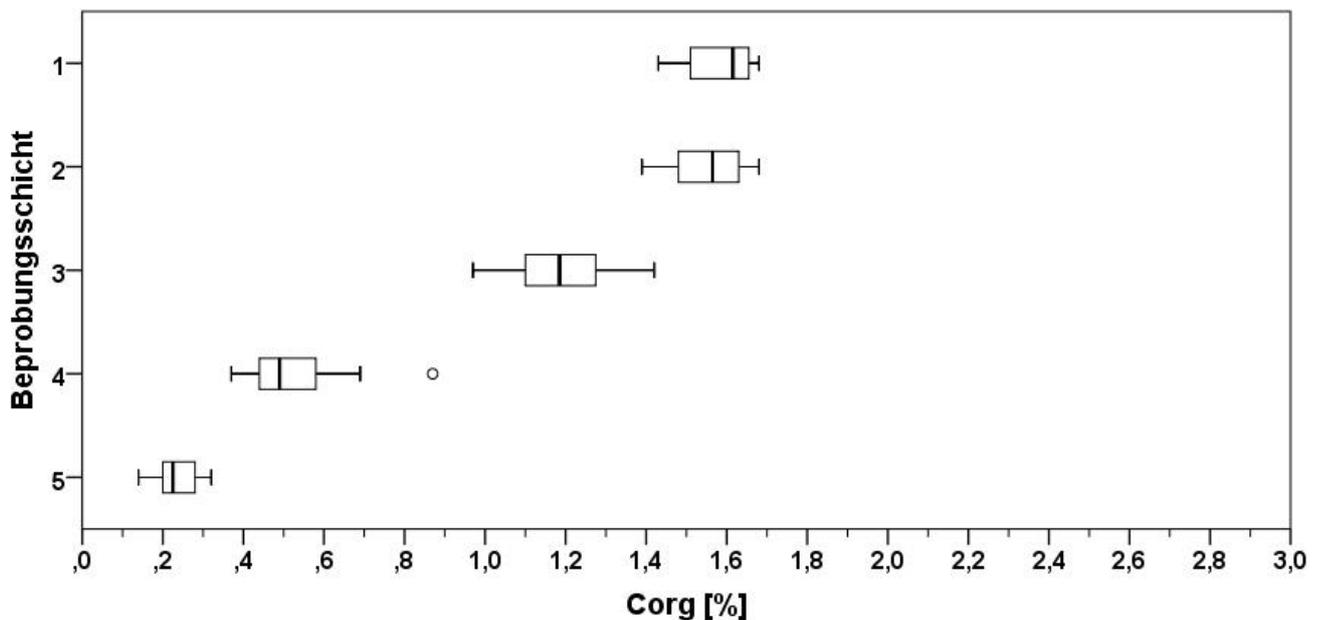
5.2.2.1 Block 1

Die C_t -Gehalte der Variante Pflug (P) im Block 1 sind über alle vier Termine in den obersten vier Beprobungsschichten recht homogen verteilt (Abbildung 62). Der Zentralwertebereich liegt dabei um 1 %, die Schichten 2 und 3 zeigen leicht höhere Werte (MW jeweils 1,02 %, MN 1,02 bzw. 0,99 %) als die Schichten 1 und 4 (MW 0,84 bzw. 0,95 %, MN 0,90 bzw. 1,01 %). Die Standardabweichung ist in Schicht 1 mit 0,25 % deutlich größer als in den anderen 3 Schichten (0,13-0,18 %). Alle vier Schichten liegen in der HGS H2 (schwach humos). Die Schicht 5 weist mit einem Mittelwert von 0,38 % und einem Median von 0,35 % (SA: 0,18) deutlich geringere Gehalte auf und liegt damit in der HGS H1 (sehr schwach humos).



n = 12 je Schicht

Abbildung 62: Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Pflug im Block 1 (straßennah) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)



n = 12 je Schicht

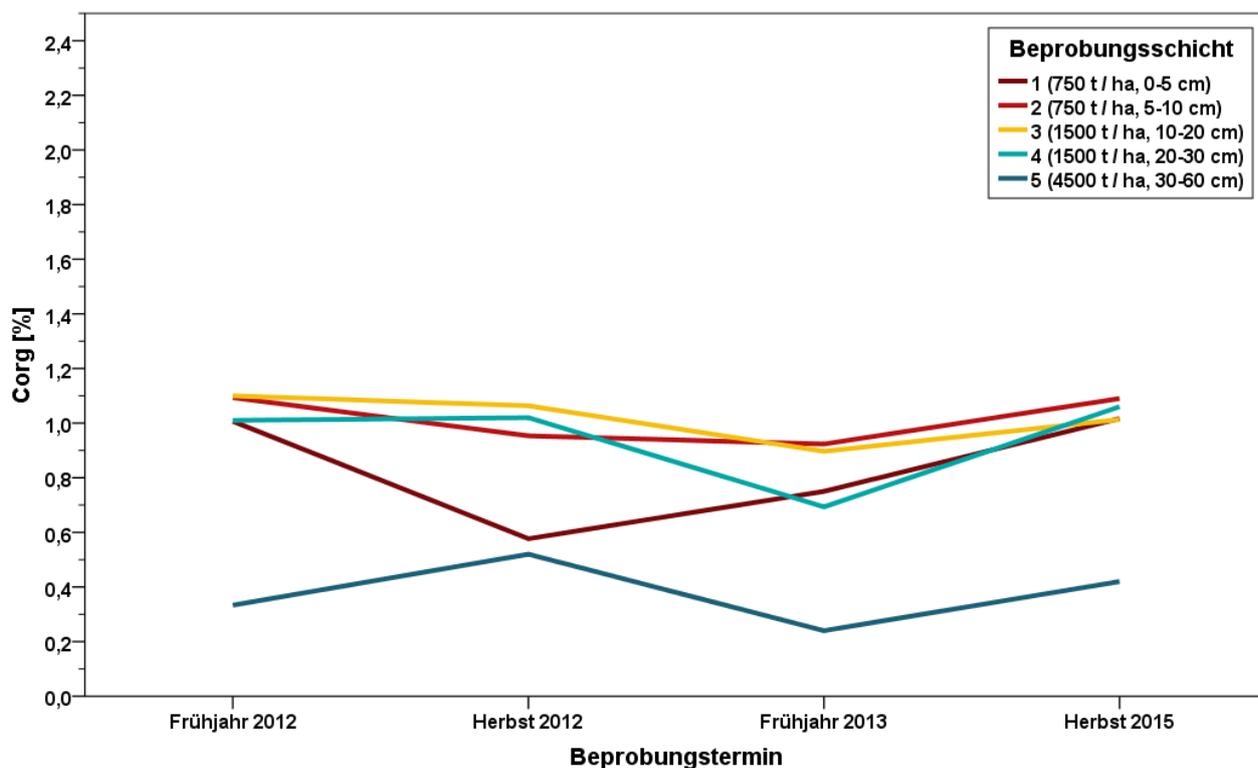
Abbildung 63: Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Konservierend im Block 1 (straßennah) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)

In der Variante Konservierend (K) im Block 1 liegen die C_T -Gehalte der oberen beiden Beprobungsschichten deutlich über jenen der Pflugvariante (Abbildung 62). Schicht 1 (MW 1,58 %, MN 1,62 %, SA 0,09 %) und Schicht 2 (MW 1,55 %, MN 1,57 %, SA 0,10 %) liegen damit in der HGS H3 (mittel humos). Schicht 3 (MW 1,19 %, MN 1,19 %, SA 0,14%) nimmt eine Mittelposition ein und weist leicht höhere Gehalte als die oberen Schichten der Variante P auf, wodurch sie am unteren Rand der HGS H3 liegt. Schicht 4 hingegen weist mit

niedrigen Gehalten (MW 0,53 %, MN 0,52 %, SA 0,14 %, HGS H1) darauf hin, dass die Bodenbearbeitung diese Schicht i.d.R. nicht mehr erfasst und kein oder nur wenig (organisches) Material von der Bodenoberfläche eingearbeitet wird. Dies gilt ebenso für Schicht 5 (MW 0,23 %, MN 0,23 %, SA 0,06 %, HGS 1), deren Gehalte deutlich unter jenen des Unterbodens der Variante P liegen.

Der zeitliche Verlauf der Veränderung der mittleren Gehalte der einzelnen Schichten (Abbildung 64) zeigt für die Variante P im Block 1 ebenfalls ein relativ homogenes Bild. Auffällig ist die starke Abnahme des C_T -Gehaltes in der obersten Beprobungsschicht vom Frühjahr zum Herbst 2012 von ca. 1,0 auf 0,6 %. Diese Abnahme geht einher mit einer Zunahme des Gehaltes im Unterboden von ca. 0,3 auf ca. 0,5 %. Diese Gehaltsveränderungen lassen sich mit recht großer Sicherheit mit dem Umbruch, welcher ca. zwei Wochen vor dem Beprobungstermin durchgeführt wurde, erklären. Offensichtlich wurde dabei so tief gepflügt, dass zumindest in Teilen der Parzelle auch der Unterboden aufgearbeitet wurde bzw. Oberbodenmaterial in diesen eingebracht wurde. Dies deckt sich mit Feldbeobachtungen zum Beprobungstermin, im Rahmen derer helles bzw. rötliches Unterbodenmaterial an der Bodenoberfläche erkennbar war.

Zum Frühjahr 2013 nehmen die C_T -Gehalte im Unterboden aber wieder ab und jene in der obersten Schicht steigen auf das Niveau der übrigen Krume (ca. 0,8 - 1,0 %) an. Eine deutliche Abnahme der C_T -Gehalte von ca. 1,0 auf 0,7 % wurde in diesem Zeitraum für Schicht 4 ermittelt. Nach dem langen Zeitraum ohne Beprobung liegen die Gehalte der oberen vier Schichten im Herbst 2015 sehr eng beieinander (1,0 - 1,1 %).

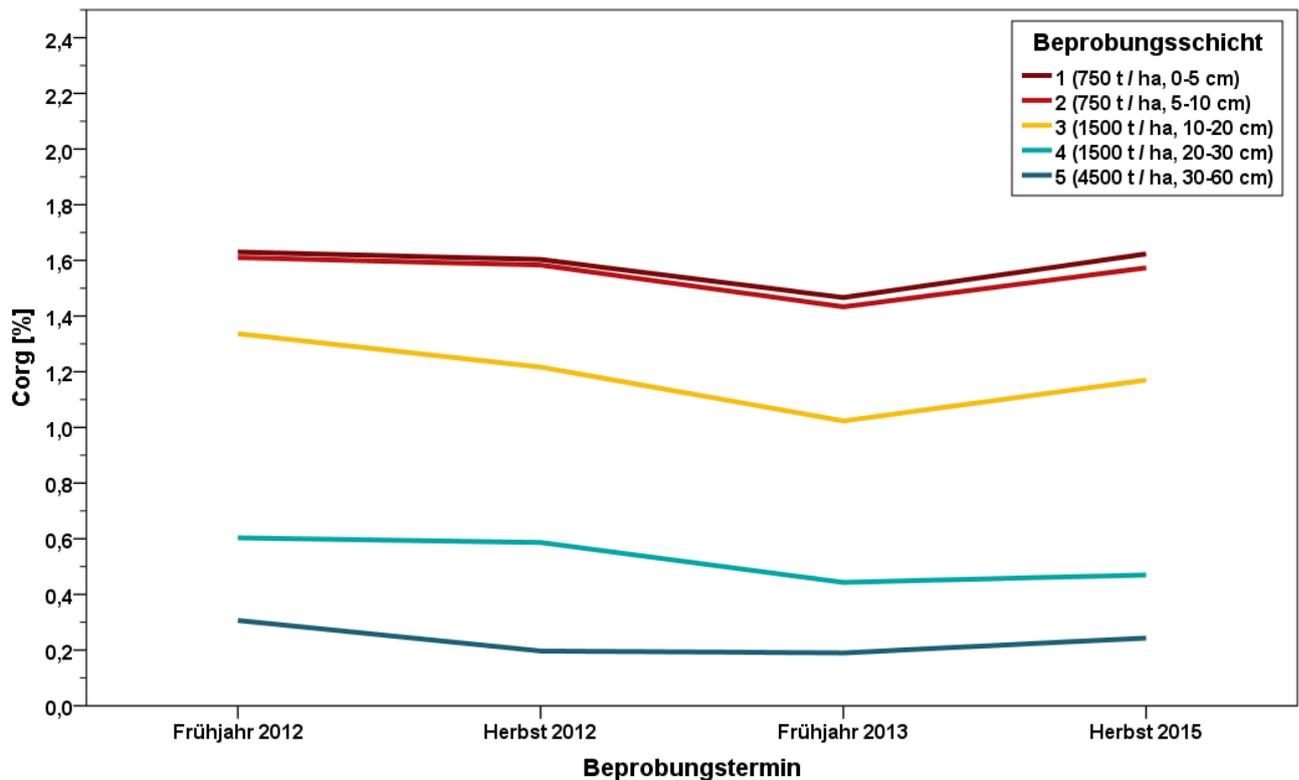


n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 64: Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 1 (straßennah) am Standort Methau

Für die Variante K (Abbildung 65) zeigt sich, dass die C_T -Gehalte in den fünf Beprobungsschichten über alle vier Termine durchgängig stratifiziert sind. Allerdings weisen die oberen beiden Schichten jeweils nahezu identische C_T -Gehalte um 1,6 % auf, der Unterschied liegt dabei im Bereich der Messungenauigkeit. Die geringsten C_T -Gehalte wurden dabei im Frühjahr 2013 ermittelt. Dies gilt ebenso für Schicht 3, in welcher der C_T -

Gehalt von 1,35 % (Frühjahr 2012) auf 1,05 % (Frühjahr 2013) sinkt und im Herbst 2015 bei ca. 1,2 % liegt. Die unteren beiden Schichten weisen, im Unterschied zur Variante P, nur geringe Schwankungen der C_T -Gehalte zwischen den Terminen auf.



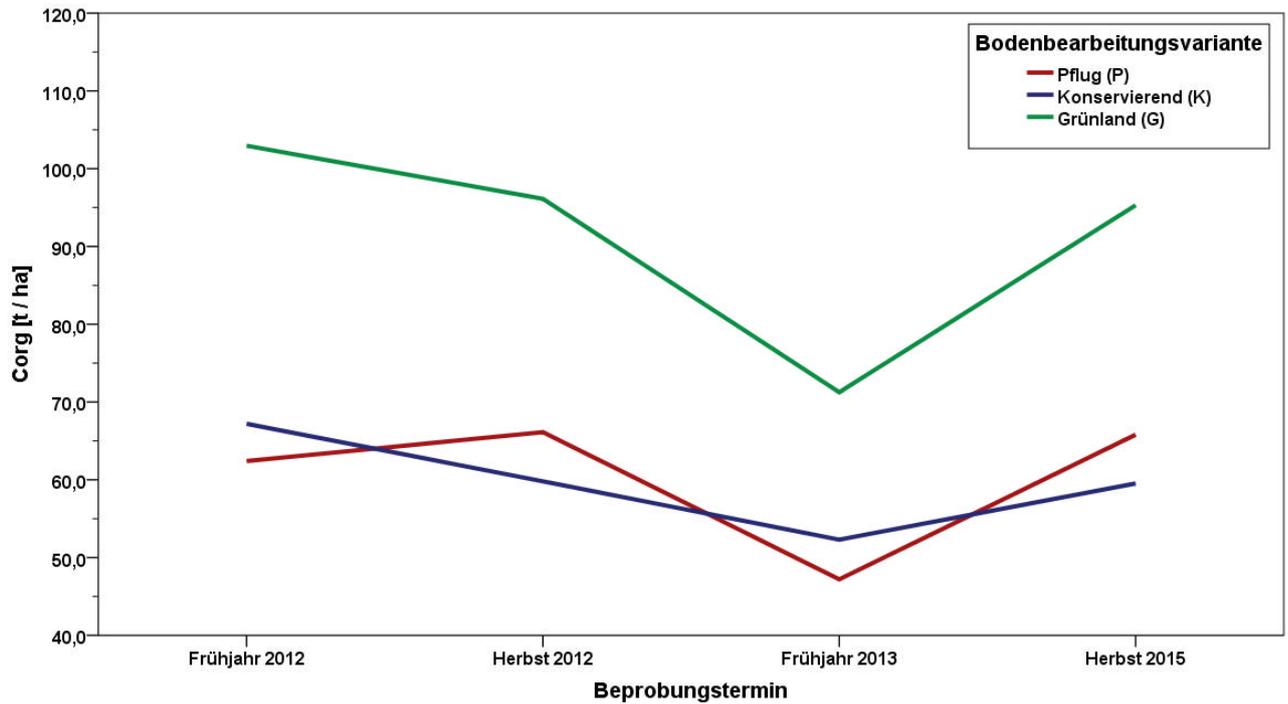
n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 65: Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 1 (straßennah) am Standort Methau

Vergleicht man abschließend die C_T -Massen in den beiden Parzellen im Block 1 (sowie im Grünland zum Vergleich) über die vier Termine (Abbildung 66) so ergibt sich kein klares Bild in Bezug auf den Variantenvergleich. Zu den beiden Frühjahrsterminen wurde für die Variante K ein etwas höherer Kohlenstoffvorrat ermittelt, zu den beiden Herbstterminen für die Variante P. Die C_T -Massen schwanken dabei insgesamt zwischen ca. 45 und 70 t ha⁻¹. In der Variante G hingegen liegen sie zwischen 70 und über 100 t ha⁻¹. Auffällig ist die starke Abnahme der C_T -Massen zum Frühjahr 2013 in allen drei Varianten. Dabei liegen die ermittelten Massen jeweils um etwa 20 - 30 % niedriger als im Frühjahr 2012 in der gleichen Variante. Die Unterschiede im Verlauf der Kurven in den Varianten P und K lässt sich möglicherweise aus dem Zwischenfruchtanbau erklären, welcher nur in der Variante K erfolgte.

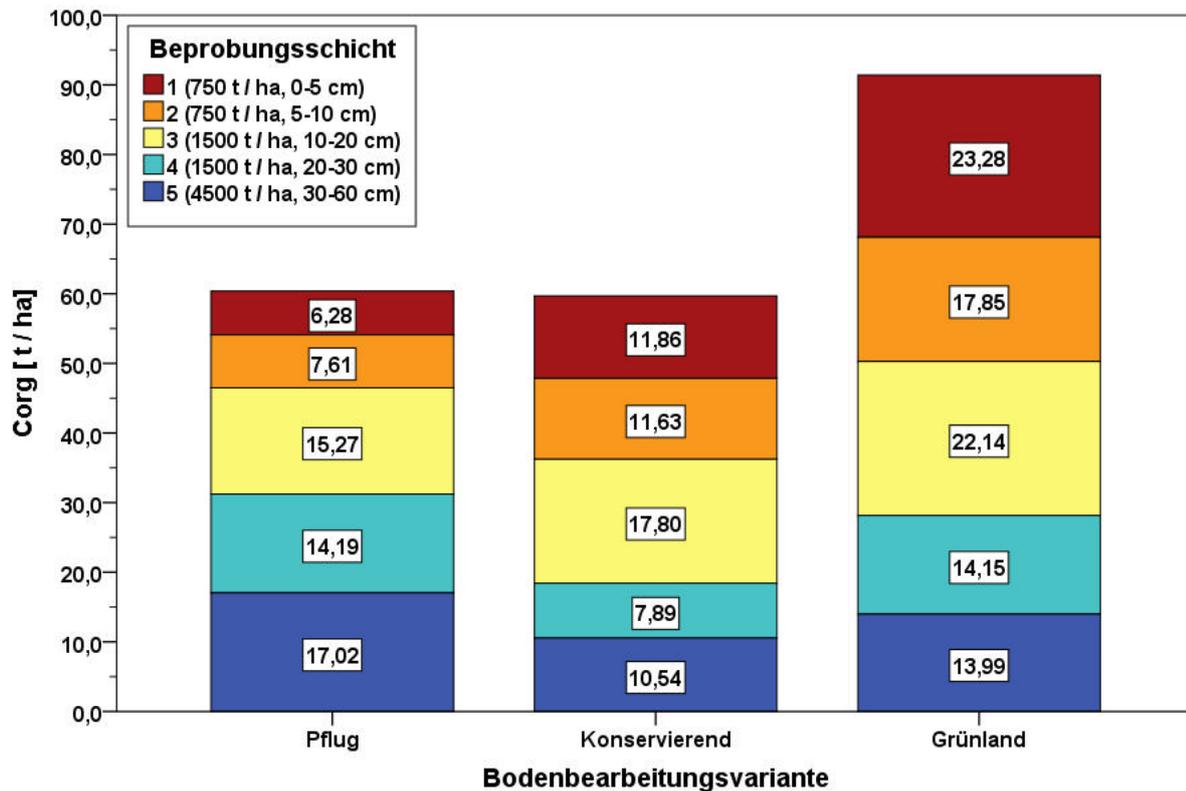
Der Mittelwert der C_T -Massen über alle vier Termine (Abbildung 67) ist für die Varianten P und K somit nahezu identisch. Er beträgt jeweils ca. 60 t C_T ha⁻¹. Die Verteilung auf die fünf Beprobungsschichten ist dabei allerdings bodenbearbeitungsbedingt sehr unterschiedlich. Auffällig ist, wie bereits erwähnt, dass für den Unterboden der Variante P, welcher eigentlich nicht mehr von der Bodenbearbeitung erfasst werden sollte, im Mittel um ca. 6,5 t ha⁻¹ höhere C_T -Vorräte ermittelt wurden als für den Unterboden der Variante K. Die Variante G nimmt in Bezug auf den Unterboden eine Mittelstellung ein. In Schicht 4 liegen die C_T -Massen der Variante G

in der gleichen Größenordnung wie in der Variante P, in den oberen drei Schichten liegen diese jeweils deutlich über den Massen in den anderen beiden Varianten. Die mittleren C_T -Gesamtmassen liegen mit über 90 t ha^{-1} etwa 50 % über jenen der bewirtschafteten Varianten.



N = 3 je Variante und Termin

Abbildung 66: Mittlere Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 1 (straßennah) am Standort Methau



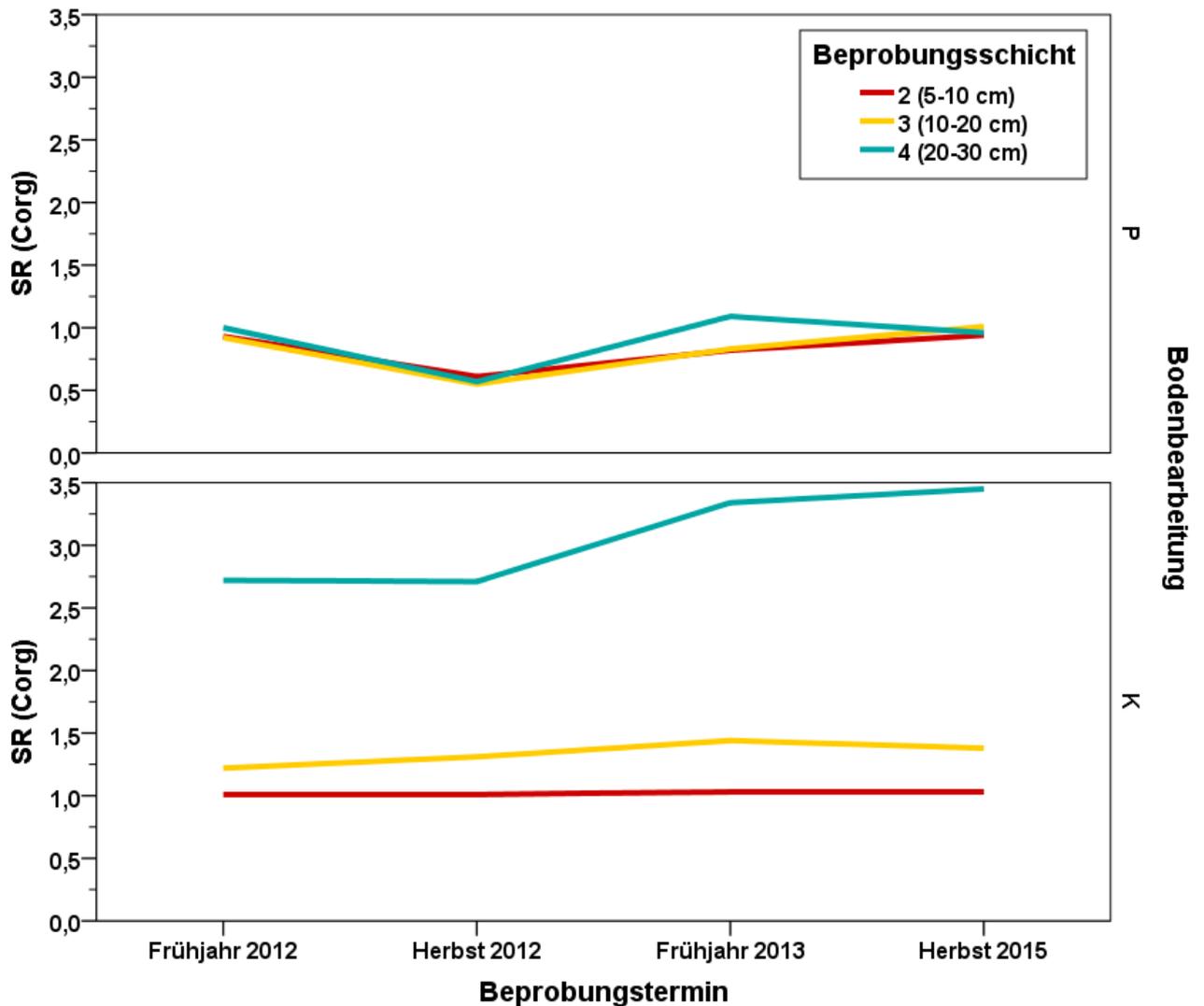
n = 12 je Variante und Schicht

Abbildung 67: Mittlere Kohlenstoffvorräte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und drei Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 1 (straßennah) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)

In Abbildung 68 sind die mittleren Stratifizierungsverhältnisse der C_t -Gehalte der Schichten 2 - 4 dargestellt. In der Variante Pflug (P) liegen diese im Frühjahr 2012 in allen drei Schichten bei ca. 1,0 und sinken zum Herbst 2012 auf 0,6 - 0,7 in allen drei Schichten, was als Auswirkung der ca. zwei Wochen vor dem Beprobungstermin durchgeführten wendenden Bodenbearbeitung zu deuten ist, welche die Erntereste der Wintergerste in die Unterkrume einmischte. Zum Frühjahr 2013 wurde ein Anstieg der SR-Werte für alle drei Schichten ermittelt, wobei dieser in Schicht 4 mit einem SR-Wert von 1,1 am deutlichsten ausfällt. Im Herbst 2015 lagen die SR-Werte aller drei Schichten wiederum bei 1,0, obwohl die letzte wendende Bodenbearbeitung bis ca. 30 cm Tiefe mehr als ein Jahr vor dem Beprobungstermin durchgeführt worden war.

In der Variante Konservierend (K) liegen die SR-Werte der Schicht 2 zu allen Terminen sehr konstant bei 1,0, jene der Schicht 3 bei 1,2 - 1,3. Größeren Schwankungen unterliegen lediglich die SR-Werte von Schicht 4, welche von 2,7 im Frühjahr und Herbst 2012 auf 3,3 im Frühjahr 2013 zunehmen. Für den Herbst 2015 wurde für diese Schicht ein SR-Wert von 3,4 ermittelt.

Die höheren SR-Werte der Schicht 4 in beiden Varianten im Frühjahr 2013 zeigen eine relative Abreicherung von C_t in dieser Schicht gegenüber der Oberkrume an. Eine mögliche Erklärung könnte das hydrothermale Regime im Boden liefern. Es scheint allerdings zweifelhaft, ob der zwischen November 2012 und März 2013 recht konstante mittlere Unterschied in der Bodentemperatur in den Tiefen 5 cm und 20 cm von ca. 0,6° C (nach Temperaturdaten der Klimastation Methau des LfULG) ausreicht, um diese Abreicherung über höhere Mineralisierungsraten zu erklären.

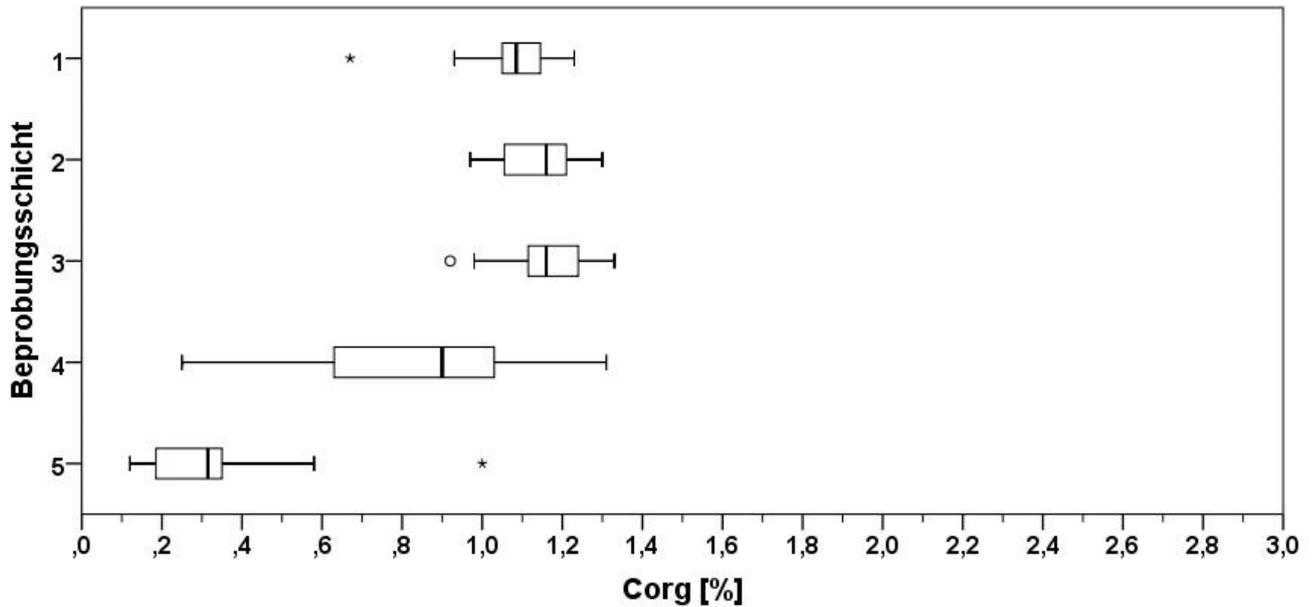


n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 68: Mittlere Stratifizierungsverhältnisse der Kohlenstoffgehalte in der Krume, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 1 (straßennah) am Standort Methau

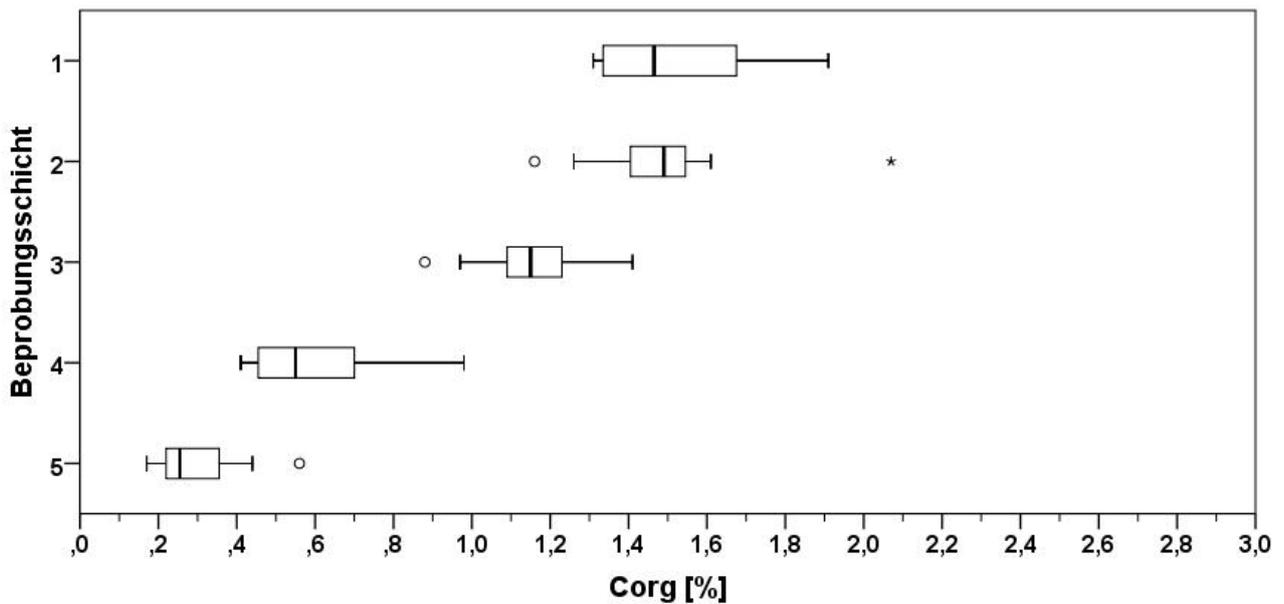
5.2.2.2 Block 2

Die C_r -Gehalte der Variante Pflug (P) im Block 2 (in der Mitte gelegene Untersuchungsparzelle) (Abbildung 69) liegen etwas höher als jene im Block 1. Dies betrifft insbesondere die Beprobungsschichten 1 (MW 1,07 %, MN 1,09 %, SA 0,15 %, HGS H2), 2 (MW 1,14 %, MN 1,16 %, SA 0,10 %, HGS H2) und 3 (MW 1,16 %, MN 1,16 %, SA 0,12 %, HGS H3). Schicht 4 (MW 0,83 %, MN 0,90 %, SA 0,31 %, HGS H2) fällt durch ihre extrem große Streuung auf, welche vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass diese Schicht nur teilweise im Rahmen der Bodenbearbeitung mit humusreichem Oberbodenmaterial angereichert wurde. Dafür sprechen auch die Werte von Schicht 5 (MW 0,34 %, MN 0,32 %, SA 0,24 %, HGS 1), welche ebenfalls eine für diese Schicht ungewöhnlich hohe Streuung aufweisen.



n = 12 je Schicht

Abbildung 69: Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Pflug im Block 2 (Mitte) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)



n = 12 je Schicht

Abbildung 70: Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Konservierend im Block 2 (Mitte) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)

Auch im Block 2 weist die Variante Konservierend (K) (Abbildung 70) erheblich höhere C_t -Gehalte in den Schichten 1 (MW 1,52 %, MN 1,47 %, SA 0,22 %, HGS H3) und 2 (MW 1,49 %, MN 1,49 %, SA 0,22 %, HGS H3) auf als die Variante P. Sie liegen allerdings geringfügig niedriger als jene der Variante K im Block 1. Schicht 3 (MW 1,16 %, MN 1,15 %, SA 0,14 %, HGS H2/3) hingegen weist nahezu identische Werte zu jenen der Variante K im Block 1 sowie zur Variante P in diesem Block auf. Schicht 4 (MW 0,59 %, MN 0,55 %, SA 0,17 %, HGS H2) sowie Schicht 5 (MW 0,30 %, MN 0,26 %, SA 0,11 %, HGS H1) hingegen haben niedrigere

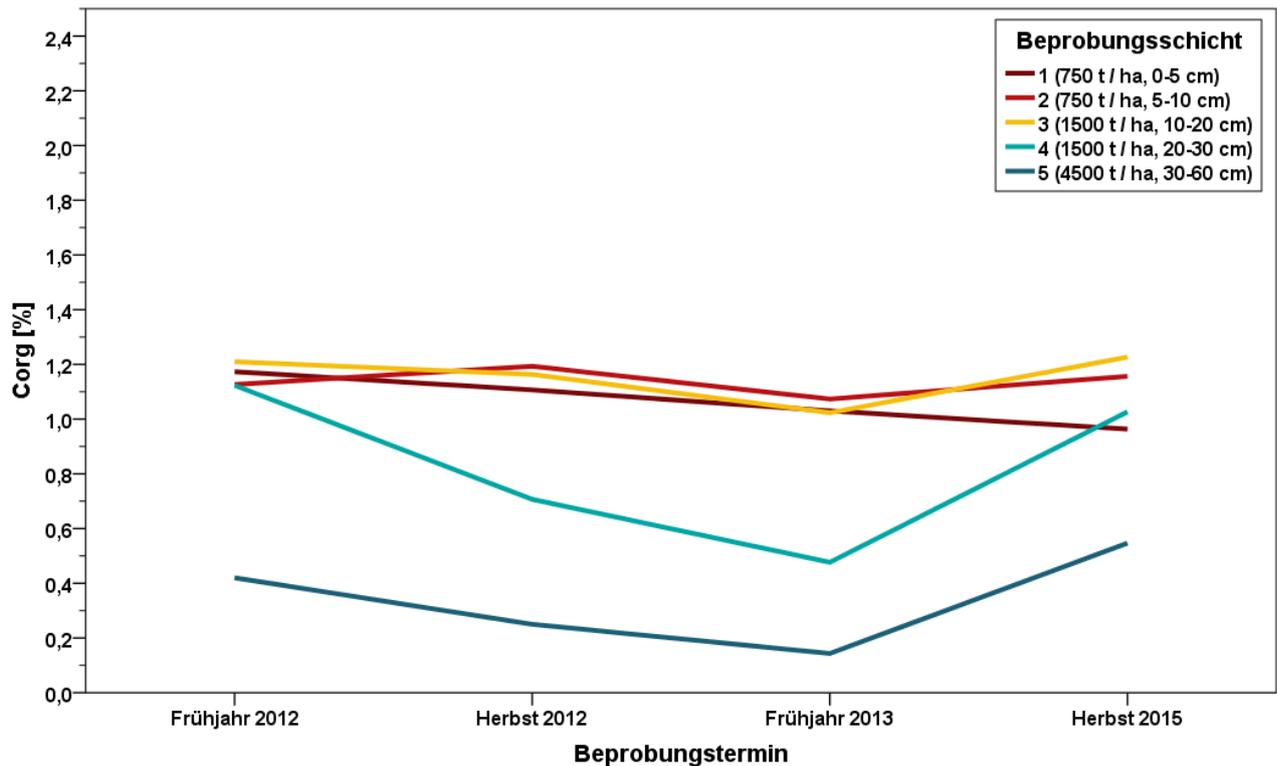
C_t-Gehalte als die entsprechenden Schichten der Variante P im gleichen Block aber höhere als jene der Variante K in Block 1.

Die Variante P zeigt über alle vier Beprobungstermine in den oberen drei Schichten sehr stabile C_t-Gehalte zwischen 1,0 und 1,2 % (Abbildung 71), was bereits an den geringen Streuungen in den Boxplots zu erkennen ist. Lediglich die C_t-Gehalt der obersten Schicht zeigt eine geringe aber kontinuierliche Abnahmetendenz und liegt im Herbst 2015 um ca. 0,2 % unterhalb der Schichten 2 und 3. Schicht 4 weist zu Beginn der Untersuchung im Frühjahr 2012 ähnlich hohe C_t-Gehalte auf wie die oberen 3 Schichten, diese nehmen aber zum Herbst 2012 (ca. 0,7 %) und weiter zum Frühjahr 2013 (ca. 0,5 %) erheblich ab. Im Herbst 2015 liegen die C_t-Gehalte wieder auf dem Niveau der Schichten 1 - 3.

Vor den Beprobungsterminen Herbst 2012 und Frühjahr 2013, während derer der Untersuchungsschlag mit Winterweizen bestellt war, lag ein Umbruchtermin. Dieser fand ca. zwei Wochen vor der Beprobung im Herbst 2012 statt. Offensichtlich wurde im Rahmen dieses Umbruchs nicht in dem Maße humusreiches Oberbodenmaterial in die Unterkrume (Schicht 4) eingearbeitet, dass die Gehalte dieser Schicht auf das Niveau der Oberkrume angehoben wurden. Weitere Mineralisierung im Verlauf des Winters führte vermutlich zu den sehr niedrigen Gehalten im Frühjahr 2013.

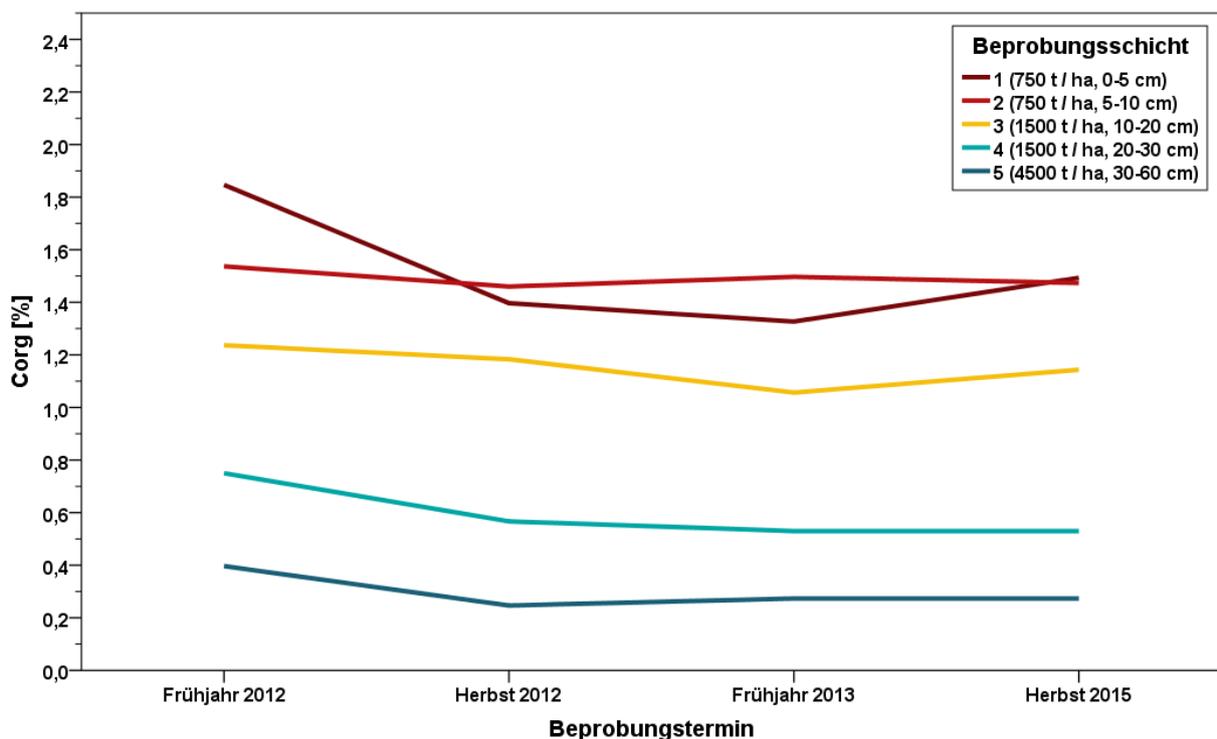
In der Beprobungsschicht 5 nehmen die C_t-Gehalte über die ersten drei Termine ebenfalls leicht ab, liegen im Herbst 2015 allerdings auf einem höheren Niveau. Offensichtlich wurde im Rahmen der Umbrüche im Herbst 2013, Herbst 2014 und Herbst 2015 diese Schicht mit humusreichem Oberbodenmaterial angereichert.

Für die Variante K im Block 2 (Abbildung 72) wurde grundsätzlich eine Stratifizierung der C_t-Gehalte in den Beprobungsschichten über alle Termine ermittelt. Eine Ausnahme bilden allerdings die oberen beiden Schichten, denn die C_t-Gehalte der Schicht 2 liegen im Herbst 2012 und Frühjahr 2013 leicht höher als jene der Schicht 1. Dabei sind die Schwankungen innerhalb der Schichten im Verlauf der Termine sehr gering, lediglich Schicht 1 zeigt eine recht deutliche Gehaltsabnahme im Verlauf des Jahres 2012 von ca. 1,85 % auf 1,4 %. Im Herbst 2015 liegen die C_t-Gehalte von Schicht 1 und Schicht 2 jeweils bei ca. 1,5 %. Auch die Schichten 3 - 5 weisen eine Abnahmetendenz der C_t-Gehalte im Verlauf des Jahres 2012 sowie zum Frühjahr 2013 auf, diese ist aber vergleichsweise gering. Insgesamt weist die Variante K im Block 2 die stabilsten C_t-Gehalte aller Parzellen auf.



n = 3 je Schicht und Termin

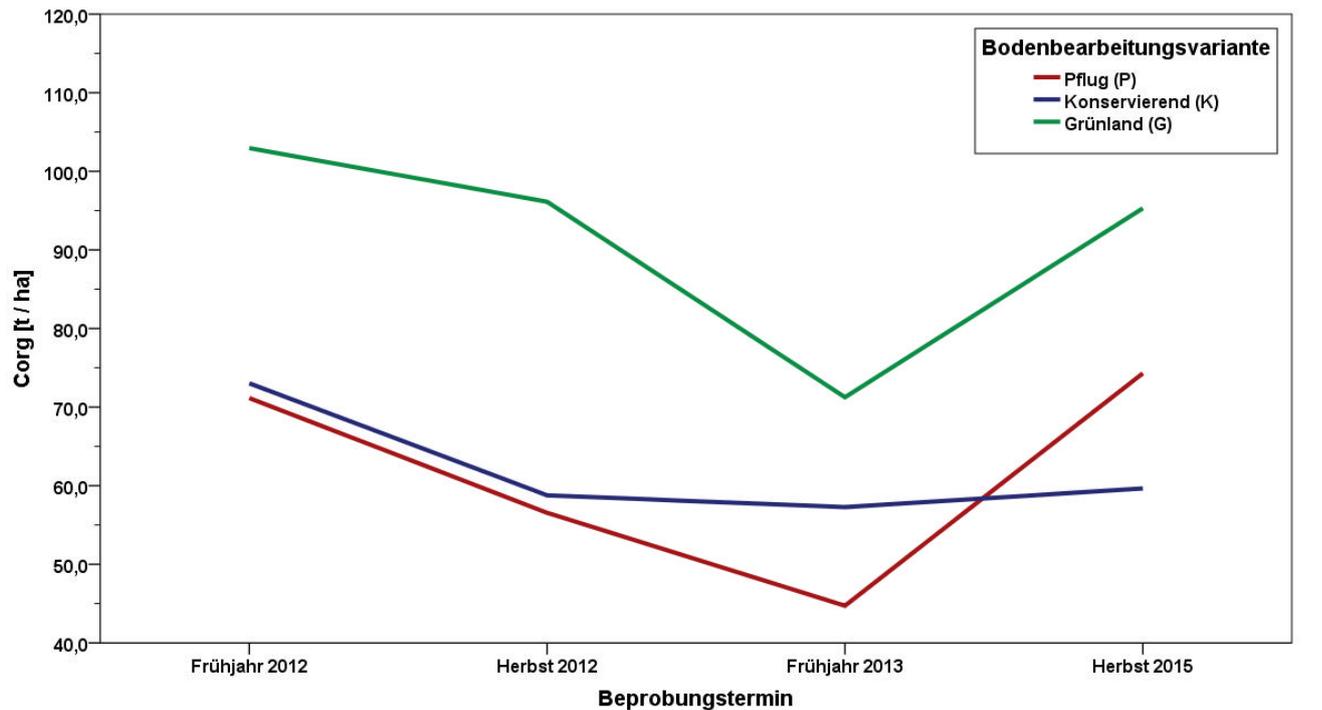
Abbildung 71: Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 2 (Mitte) am Standort Methau



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 72: Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 2 (Mitte) am Standort Methau

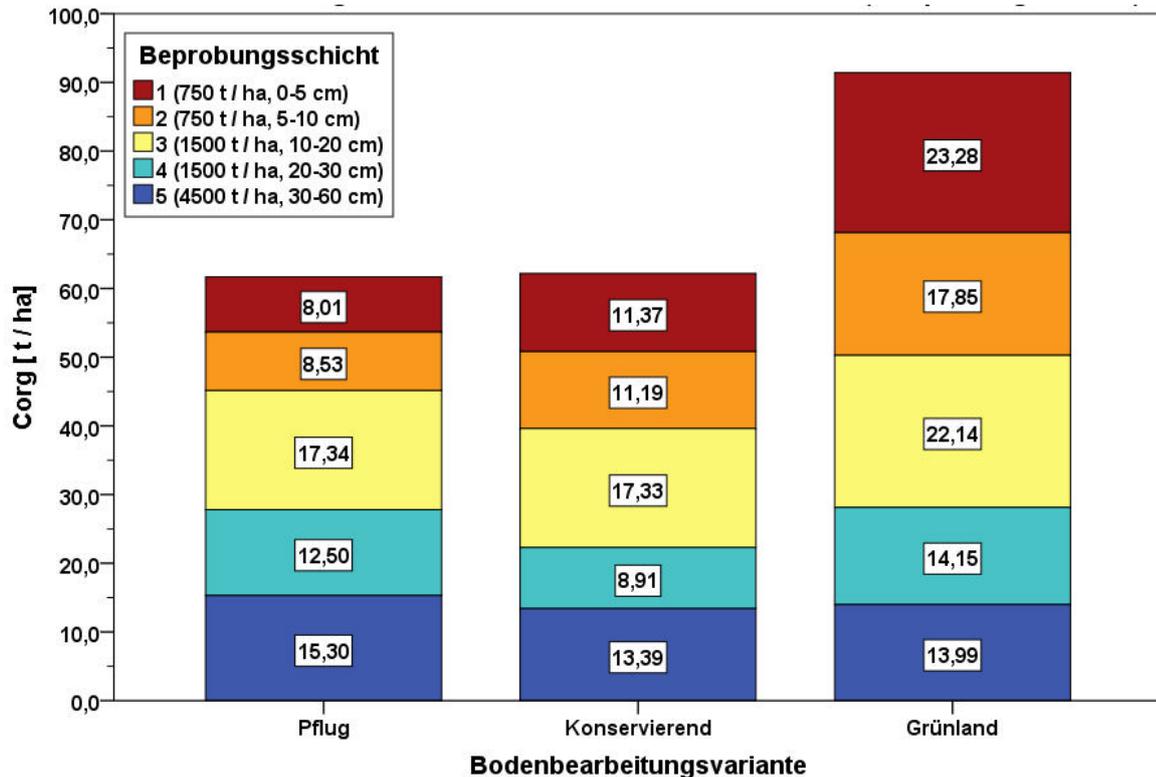
Vergleicht man die C_t -Massen der zwei bzw. drei Varianten im zeitlichen Verlauf über die vier Beprobungstermine (Abbildung 73) ergibt sich, wie im Block 1, eine grundsätzliche Abnahmetendenz vom Frühjahr 2012 bis zum Frühjahr 2013 in allen Varianten. Allerdings fällt diese, insbesondere in der Variante K für den Winter 2012/2013 deutlich geringer aus als in den anderen Varianten. Die Variante K weist daher insbesondere im Frühjahr 2013 mit ca. 57 t C_t ha⁻¹ erheblich größere Vorräte auf als die Variante P (ca. 44 t C_t ha⁻¹). Zu beiden Terminen im Jahr 2012 wurden hingegen nur geringfügig höhere C_t -Massen im Rahmen dieses Variantenvergleichs ermittelt. Auffällig ist zudem, dass sich dieses Verhältnis im Herbst 2015 umkehrt. Während die C_t -Massen in der Variante K nahezu stabil geblieben sind, sind sie in der Variante P auf ca. 75 t C_t ha⁻¹ angestiegen. Die Variante G weist, wie schon im Vergleich zu Block 1, an allen Terminen erheblich größere C_t -Massen auf. Im zeitlichen Verlauf zeigt sich eine nahezu parallele Entwicklung zur Variante P.



N = 3 je Variante und Termin

Abbildung 73: Mittlere Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 2 (Mitte) am Standort Methau

Im Mittel der vier Termine weisen die Varianten P und K, ähnlich wie im Block 1, nahezu identische C_t -Massen auf (Abbildung 74), welche ca. 60 t C_t ha⁻¹ betragen. Dabei sind die Massen bodenbearbeitungsbedingt in der Variante K in den oberen beiden Schichten größer, in der Schicht 3 nahezu identisch und in den unteren beiden Schichten in der Variante P größer. Der Unterschied in Schicht 5 ist allerdings wesentlich weniger stark ausgeprägt als in Block 1.

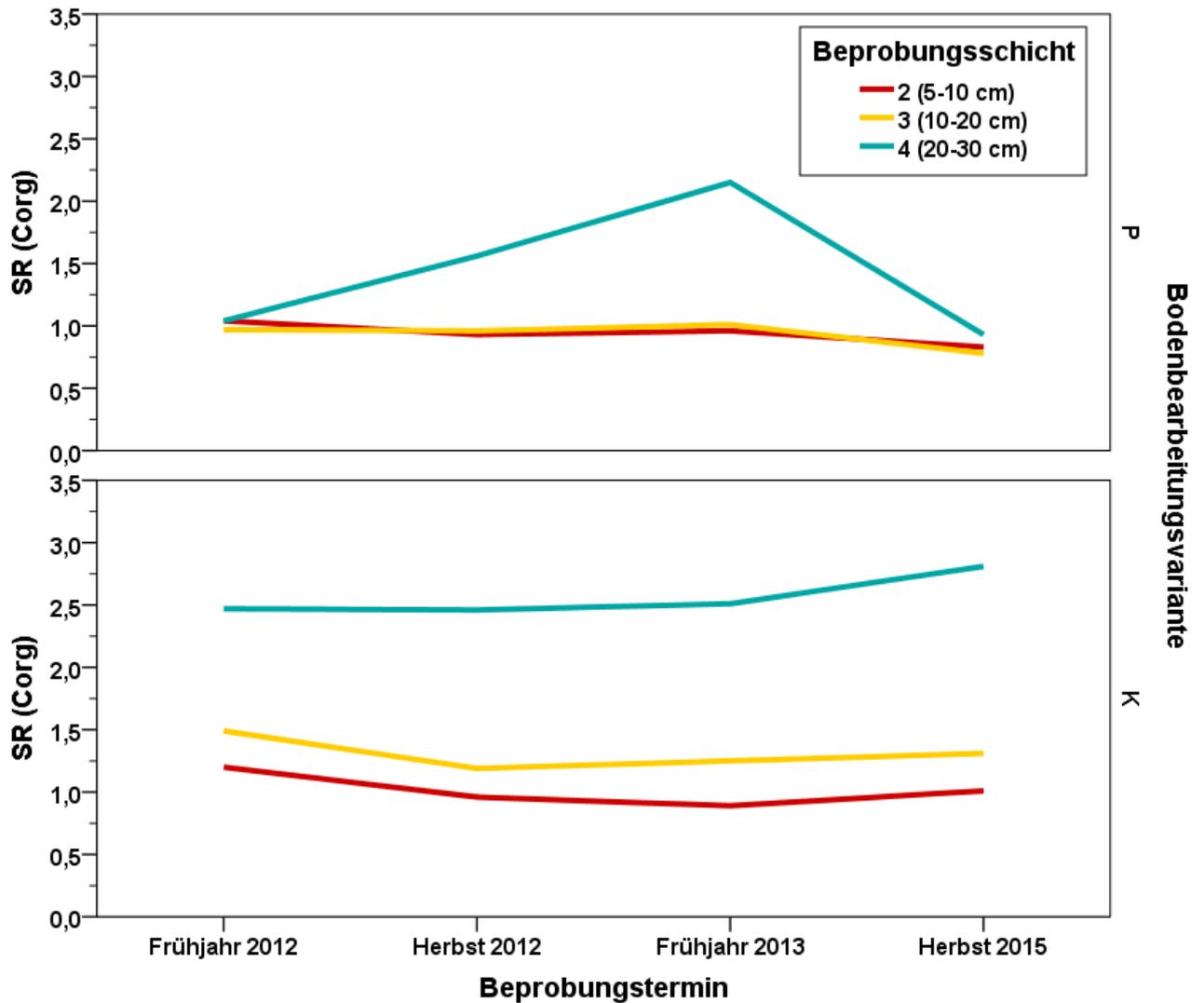


n = 12 je Variante und Schicht

Abbildung 74: Mittlere Kohlenstoffvorräte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und drei Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 2 (Mitte) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)

Die Stratifizierungsverhältnisse der C_T -Gehalte (Abbildung 75) liegen in der Variante Pflug (P) im Frühjahr 2012 in allen drei Schichten (2 - 4) bei 1,0. Während die SR-Werte aber in den Schichten 2 und 3 zu den folgenden Beprobungsterminen leicht abnehmen, steigen sie in Schicht 4 zunächst auf 1,5 (Herbst 2012) und später auf 2,1 (Frühjahr 2013) an. Im Herbst 2015 wurde für Schicht 4 ein SR-Wert von 0,9 ermittelt. Auch in diesem Block kommt es in der Variante P also zu einer relativen C_T -Abreicherung in Schicht 4 im Frühjahr 2013, welche vermutlich auf eine verstärkte Mineralisierung in dieser Schicht zurückzuführen ist, was bereits anhand der sinkenden C_T -Gehalte dieser Schicht deutlich wurde (s.o.).

In der Variante Konservierend (K) liegen die SR-Werte von Schicht 2 konstant bei 1,0 - 1,2, jene der Schicht 3 bei 1,25 - 1,5. In Schicht 4 ist eine Zunahme der SR-Werte über alle Beprobungstermine zu verzeichnen. Liegen diese im Jahr 2012 bei 2,5, steigen sie zum Frühjahr 2013 leicht auf 2,6 an. Im Herbst 2015 wurde ein mittlerer SR-Wert von 2,8 für diese Schicht ermittelt.



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 75: Mittlere Stratifizierungsverhältnisse der Kohlenstoffgehalte in der Krume, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 2 (Mitte) am Standort Methau

5.2.2.3 Block 3

Auch für Block 3 ergibt sich in der Variante Pflug (P) ein homogenes Bild für die oberen drei Schichten (Abbildung 76), wobei die C_t -Gehalte eher im Bereich jener der Variante P im Block 1 als im Block 2 liegen. Auch hier weisen Schicht 2 (MW 1,07 %, MN 1,06 %, SA 0,09 %, HGS H2) und Schicht 3 (MW 1,09 %, MN 1,06 %, SA 0,08 %, HGS H2) leicht höhere C_t -Gehalte auf als Schicht 1 (MW 1,04 %, MN 1,01 %, SA 0,15 %, HGS H2). Schicht 4 zeigt auch in Block 3 eine sehr große Streuung sowie ähnliche Werte (MW 0,66 %, MN 0,57 %, SA 0,29 %, HGS 1/2) wie diese Schicht im Block 2. Schicht 5 (MW 0,24 %, MN 0,22 %, SA 0,12 %, HGS H1) hingegen zeigt zwar eine relativ große Streuung, die Werte liegen aber ca. 0,1 % niedriger als in den entsprechenden Schichten in den Blöcken 1 und 2.

Die oberen zwei Schichten der Variante Konservierend (K) weisen im Block 3 die insgesamt höchsten C_t -Gehalte des Standortes auf (Abbildung 77): Schicht 1 (MW 1,71 %, MN 1,76 %, SA 0,16 %, HGS H3) und Schicht 2 (MW 1,65 %, MN 1,69 %, SA 0,23 %, HGS H3) weisen allerdings im Gegensatz zur den entspre-

chenden Schichten in Block 1 und 2 (Ausnahme: Schicht 1, Block 2) sehr starke Streuungen der C_T -Gehalte auf. Die C_T -Gehalte von Schicht 3 (MW 1,13 %, MN 1,15 %, SA 0,13 %, HGS 2) liegen in der gleichen Größenordnung wie in den anderen Blöcken in dieser Variante, wohingegen Schicht 4 (MW 0,44 %, MN 0,45 %, SA 0,12 %, HGS 1) sehr niedrige C_T -Gehalte aufweist. Vermutlich lässt sich dieses Muster so erklären, dass die bodenbearbeitungsbedingte Umverteilung im Block 3 weniger stark zum Tragen kam als in den Blöcken 1 und 2. Während im Unterboden aufgrund der in diesem Block deutlich höheren Grobbodenanteile deutlich weniger C gespeichert wird, kommt es zu einer verstärkten Anreicherung in der Oberkrume. Die Werte der Schicht 5 (MW 0,24 %, MN 0,22 %, SA 0,08 %, HGS H1) hingegen liegen im gleichen Bereich wie jene der entsprechenden Schichten der Blöcke 1 und 2.

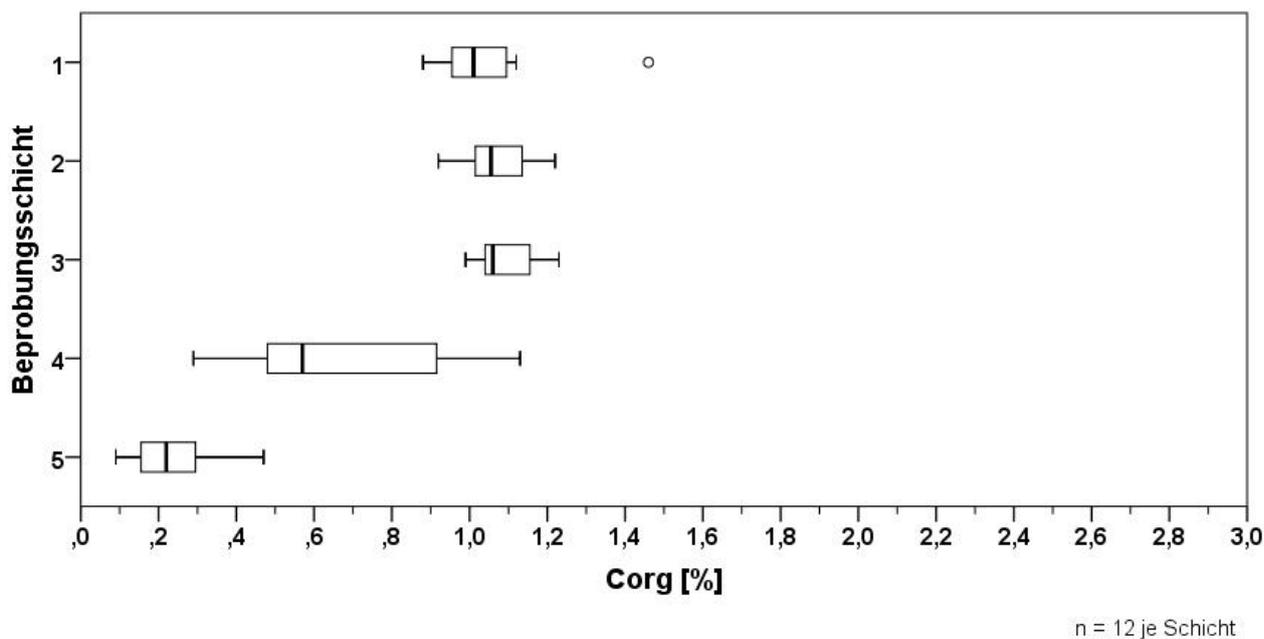


Abbildung 76: Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Pflug im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)

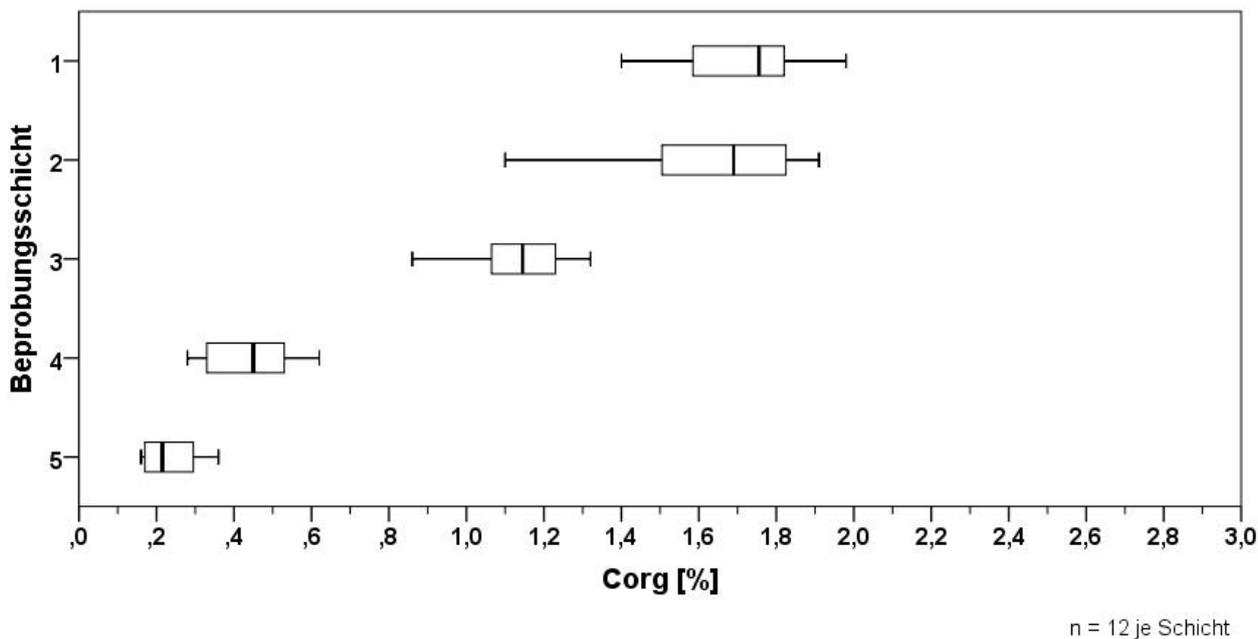
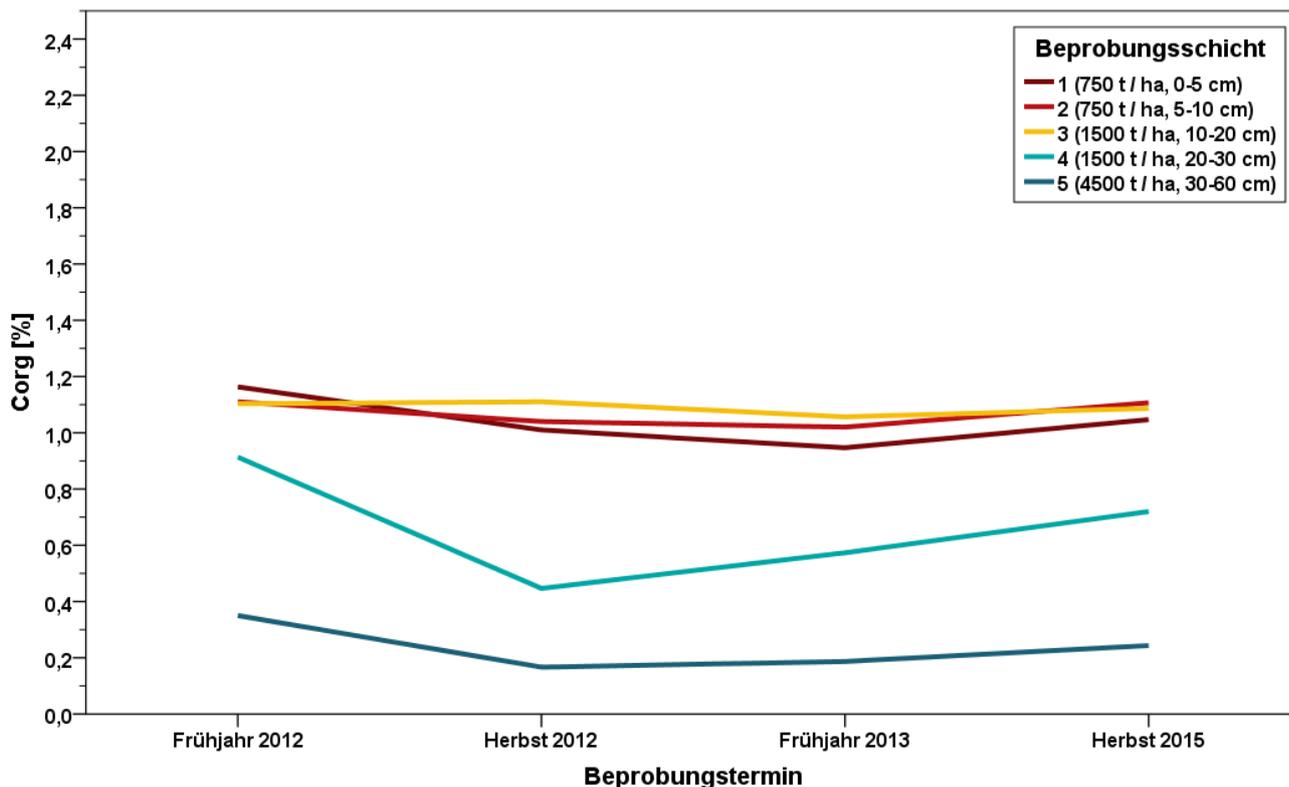


Abbildung 77: Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Konservierend im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)

Die mittleren C_T -Gehalte der oberen drei Schichten in der Variante P im Block 3 (Abbildung 78) weisen kaum Schwankungen über die Beprobungstermine auf und liegen durchgängig zwischen 1,0 und 1,2 %. Eine leichte Abnahmetendenz ist, wie in den anderen beiden Blöcken, in der obersten Schicht im Verlauf des Jahres 2012 bzw. zum Frühjahr 2013 zu erkennen. Analog zu Block 2 nimmt der C_T -Gehalt der Schicht 4 von ca. 0,9 % im Frühjahr 2012 auf ca. 0,45 % im Herbst 2012 ab, steigt danach allerdings wieder leicht an. Im Herbst 2015 lag der C_T -Gehalt allerdings nicht auf dem Niveau der anderen drei Schichten, sondern mit ca. 0,75 % deutlich darunter. Schicht 5 zeigt ebenfalls eine leichte Abnahme zum Herbst 2012, danach stabilisieren sich die C_T -Gehalte allerdings bzw. steigen wieder leicht an.

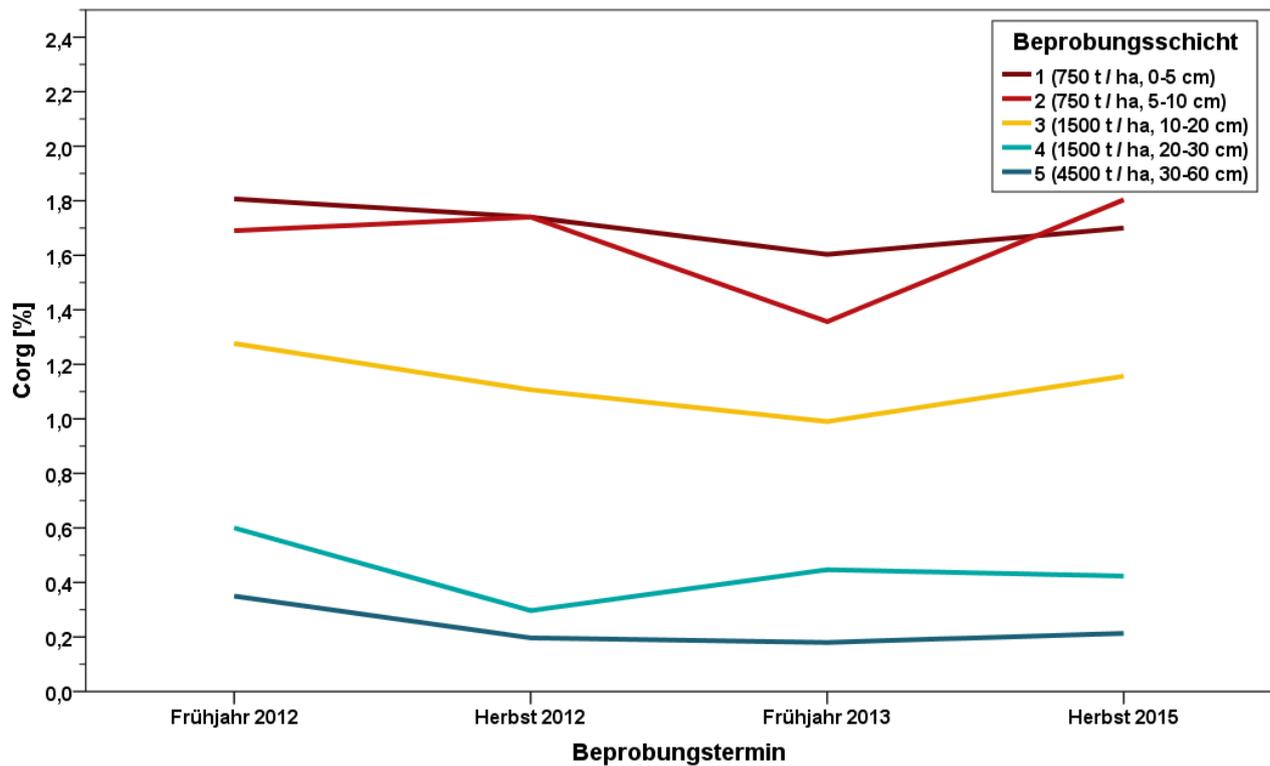


n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 78: Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau

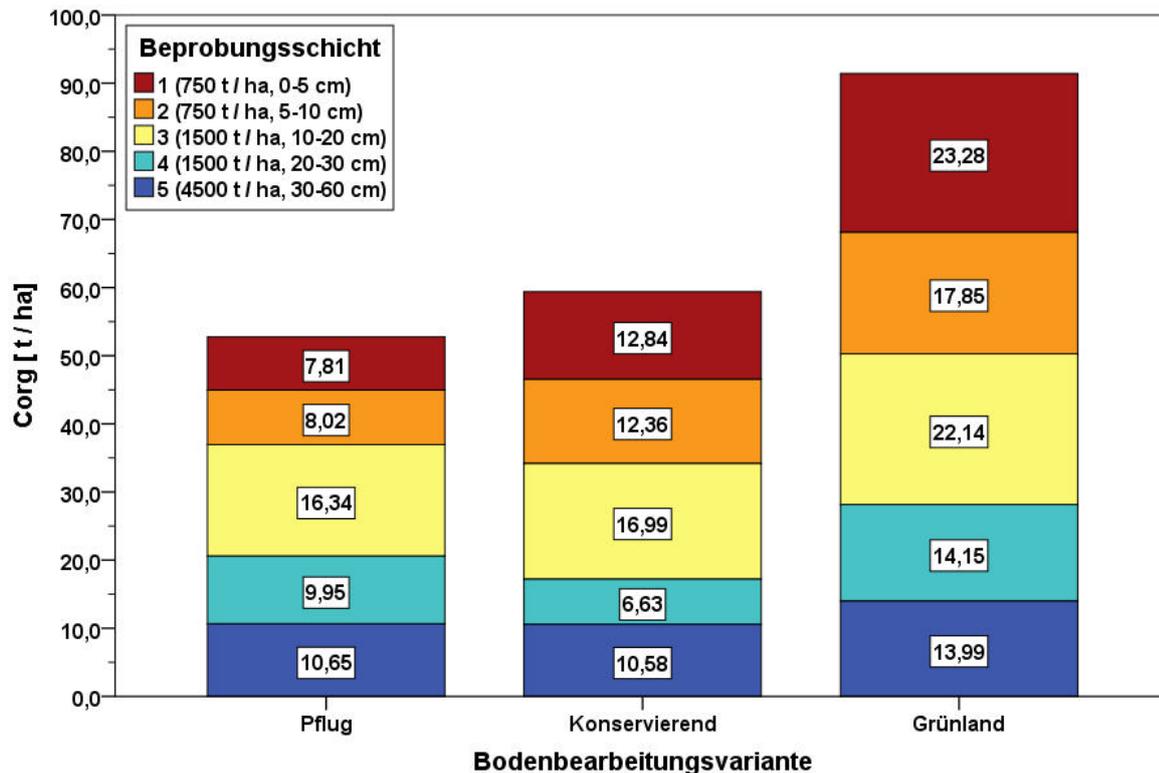
In der Variante K (Abbildung 79) weisen Schicht 1 und 2 durchgängig hohe C_T -Gehalte von 1,6 - 1,8 % auf, mit der Ausnahme vom Frühjahr 2013 (Schicht 2: ca. 1,4 %). Schicht 3 zeigt eine leichte Abnahme der C_T -Gehalte zum Herbst 2012 und weiter zum Frühjahr 2013 von 1,3 % auf 1,0 %. Die C_T -Gehalte in den Schichten 4 und 5 liegen deutlich darunter und sind relativ stabil, mit einer leichten Abnahmetendenz im Verlauf des Jahres 2012 in beiden Schichten.

Vergleicht man die mittleren C_T -Massen der vier Termine (Abbildung 80), zeigt sich auch in Block 3 die grundsätzliche Abnahmetendenz vom Frühjahr 2012 über den Herbst 2012 zum Frühjahr 2013. Allerdings steigen die ermittelten C_T -Massen in der Variante P vom Herbst 2012 zum Frühjahr 2013 leicht an. Im Unterschied zu den anderen beiden Blöcken weist die Variante K im Block 3 zu allen Terminen um 5 - 10 t ha⁻¹ größere C_T -Vorräte auf als die Variante P. Auffällig ist, dass die Schwankungen, insbesondere der Variante P, in diesem Block etwas geringer ausfallen als in den anderen Blöcken.



n = 3 je Schicht und Termin

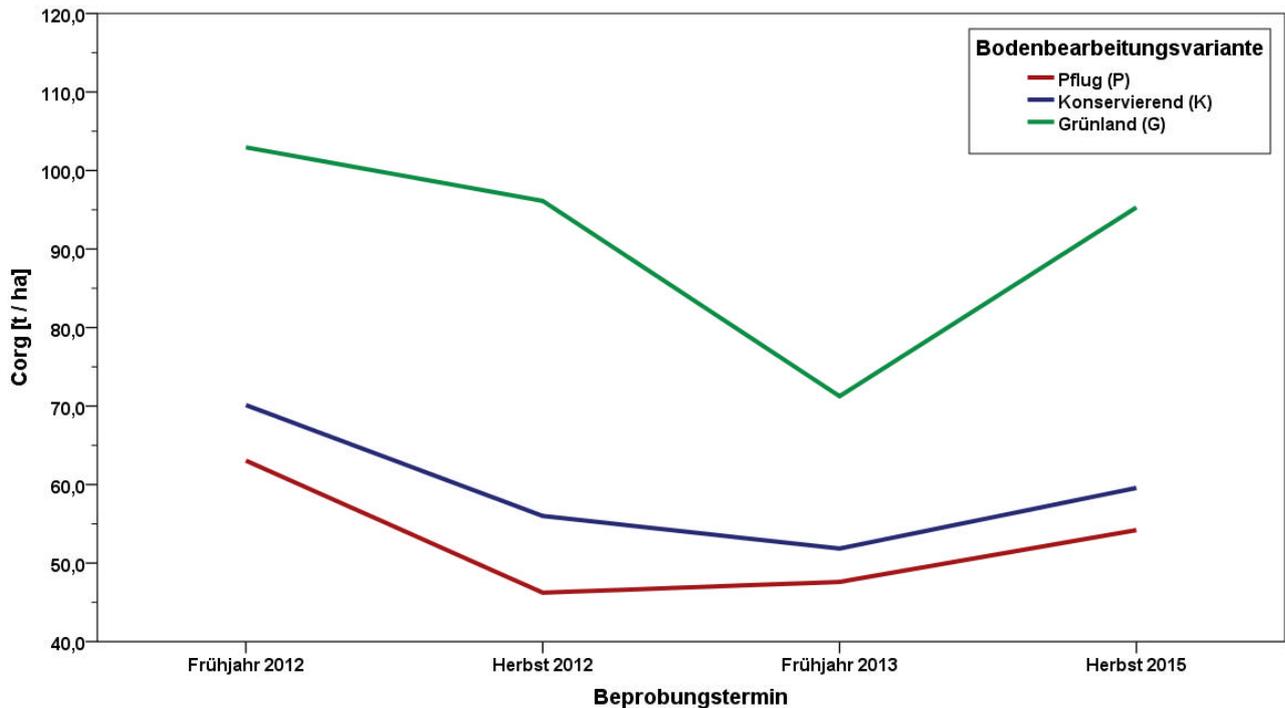
Abbildung 79: Mittlere Kohlenstoffgehalte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und vier Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau



n = 12 je Variante und Schicht

Abbildung 80: Mittlere Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau

Die Mittelwerte über alle vier Termine (0) bestätigen dieses Ergebnis, wobei die C_t -Massen der Variante K wie in den anderen Blöcken bei ca. 60 t ha^{-1} liegen. Die Variante P hingegen liegt mit ca. $53 \text{ t C}_t \text{ ha}^{-1}$ deutlich darunter. Es ist auffällig, dass die um ca. 7 t ha^{-1} geringeren C_t -Massen im Vergleich zur Variante K im gleichen Block fast ausschließlich aufgrund der Schichten 1, 2 und 4 (Differenzen: 5, 4 bzw. 3 t C ha^{-1}) zustande kommen. Im Vergleich zur Variante P in den Blöcken 1 und 2 hingegen finden sich die Unterschiede zu den Blöcken 1 und 2 insbesondere in den Schichten 4 und 5. Es liegt also beim Vergleich der Varianten und Blöcke vermutlich eine Mischung aus Effekten der Bewirtschaftung bzw. Bearbeitung (z.B. geringere Einmischung von Ernteresten) und Effekten der Beschaffenheit des Untergrundes bzw. der geringeren Mächtigkeit des Bodens und der Krume vor.

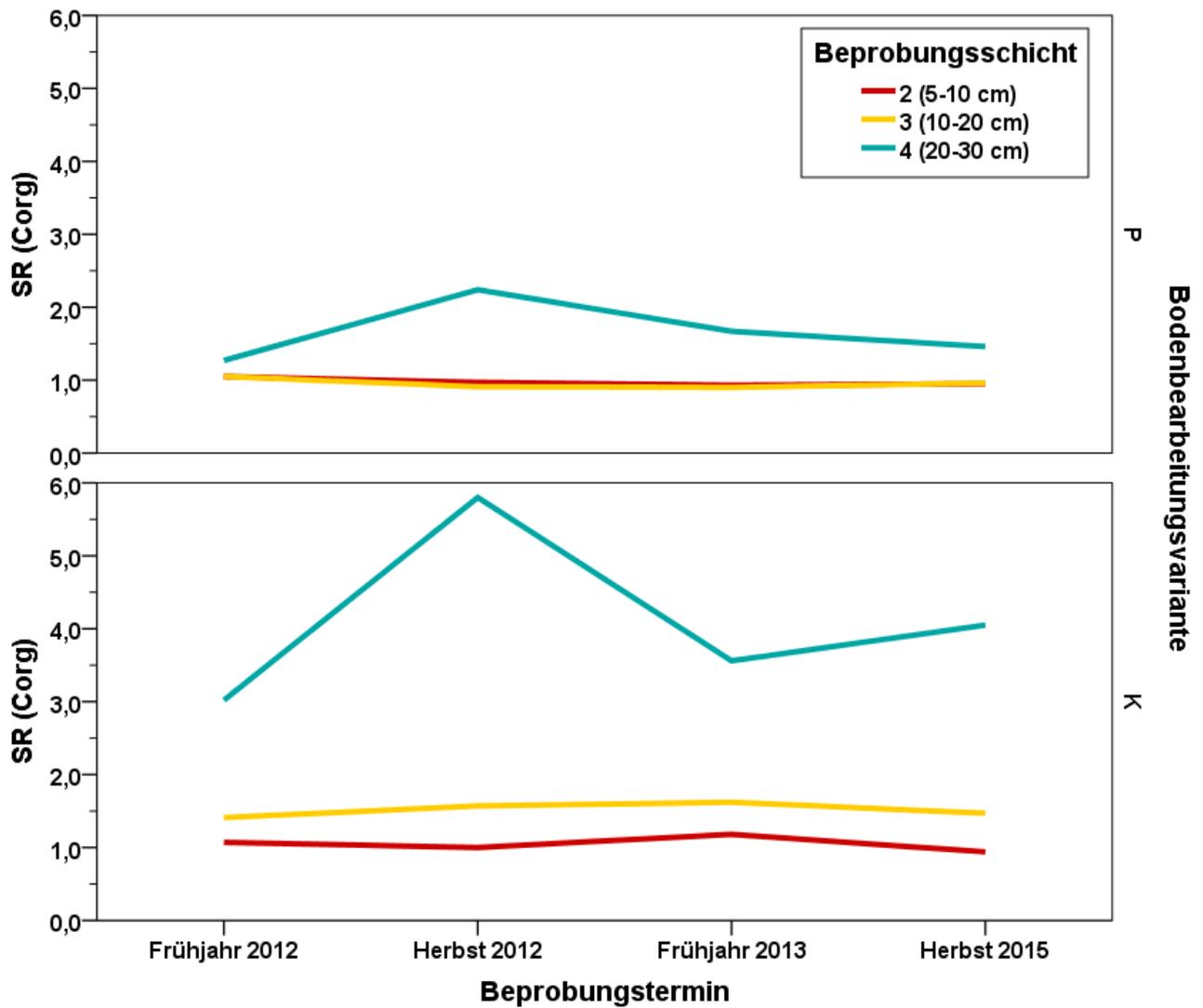


N = 3 je Variante und Termin

Abbildung 81: Mittlere Kohlenstoffvorräte, differenziert nach fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten und drei Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau (vier Beprobungstermine)

In Block 3 liegen die Stratifizierungsverhältnisse der Schichten 2 und 3 in der Variante Pflug (P) zu allen Beprobungsterminen bei 1,0 (Abbildung 82, veränderte Skalierung). Es liegen also sehr homogene C_T -Gehalte vor. Die SR-Werte von Schicht 4 liegen im Frühjahr 2012 bei 1,2 und steigen zum Herbst 2012 auf 2,3. Zum Frühjahr 2013 sinkt der SR-Wert auf 1,6, im Herbst 2015 liegt er bei 1,5. Auch in diesem Block weist also Schicht 4, in welche ein Großteil der Erntereste im Rahmen der Bodenbearbeitung eingemischt wird, die stärksten Schwankungen der C_T -Gehalte im Vergleich zur Oberkrume auf.

In der Variante Konservierend (K) liegen die SR-Werte von Schicht 2 über alle Termine bei 1,0 - 1,1, Schicht 3 weist etwas höhere SR-Werte auf (1,4 - 1,6), welche aber ebenfalls im Untersuchungszeitraum recht konstant waren. Extreme Schwankungen wurden allerdings für die SR-Werte von Schicht 4 ermittelt: Lagen diese im Frühjahr 2012 zunächst bei 3,0, stiegen sie zum Herbst 2012 auf 5,9 und nahmen zum folgenden Frühjahr (2013) auf 3,6 ab. Im Herbst 2015 lag der SR-Wert dieser Schicht bei 4,1. Sowohl die im Vergleich zu den anderen Blöcken sehr hohen SR-Werte von Schicht 4 als auch die großen zeitlichen Schwankungen sind auffällig und vermutlich auf Besonderheiten des Bodens zurückzuführen. Die Variante K in Block 3 bildet die westlichste der 6 Parzellen und weist eine geringmächtige Krume auf, unter welcher bereits in 25 – 30 cm Tiefe erste Grobbodenanteile aus dem anstehenden Gestein zum Vorschein kommen. Zudem liegt der Sandanteil im Block 3 (straßenfern) mit 12 % deutlich höher als in den anderen Blöcken. Dies hat zur Folge, dass die mittleren C_T -Gehalte von Schicht 4 sehr niedrig sind (s.o.), was wiederum sehr hohe SR-Werte zur Folge hat. Da in den Jahren 2012 und 2013 Winterweizen bzw. Wintergerste in Block angebaut wurde, sind die geringen C_T -Gehalte bzw. hohe SR-Werte vermutlich nicht als Effekt einer humuszehrenden Fruchtart wie Mais innerhalb der Fruchtfolge zu interpretieren.

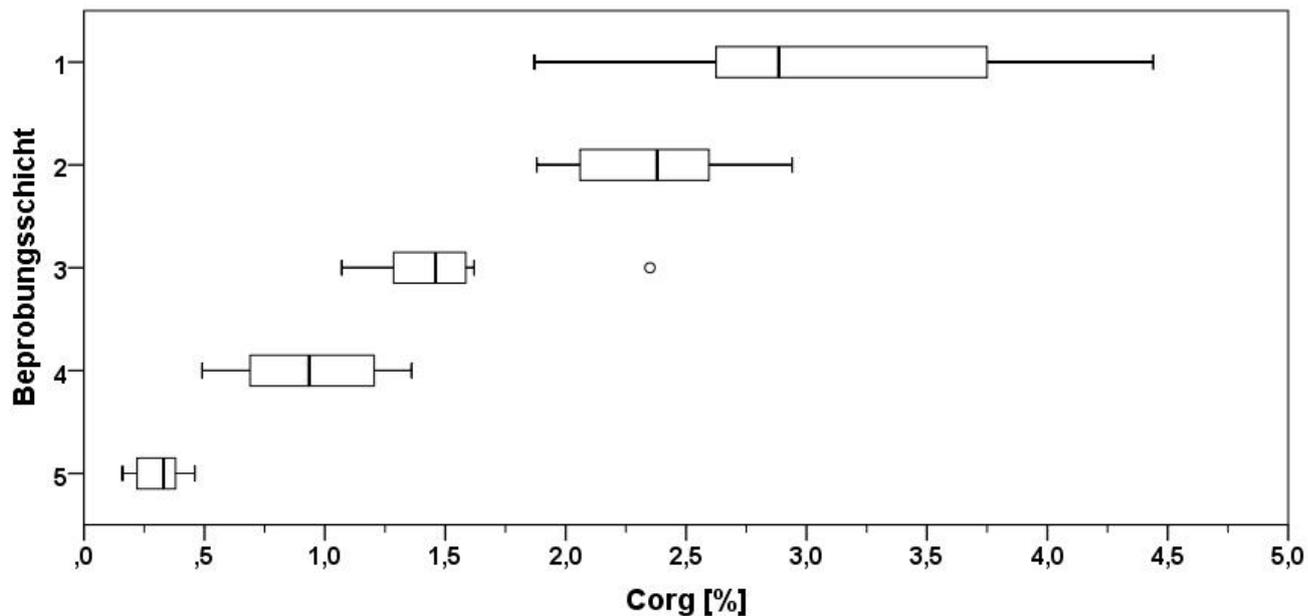


n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 82: Mittlere Stratifizierungsverhältnisse der Ct-Gehalte in der Krume, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 3 (straßenfern) am Standort Methau

5.2.2.4 Grünland

In Bezug auf die C_T -Gehalte nimmt die Variante Grünland (G) eine Sonderstellung ein (Abbildung 83, veränderte Skalierung). So liegen die C_T -Gehalte in den oberen Schichten sehr hoch: Schicht 1 (MW 3,1 %, MN 2,89 %, SA 0,77 %, HGS H4) und Schicht 2 (MW 2,38 %, MN 2,38 %, SA 0,35 %, HGS H4) liegen, bei allerdings extrem großen Streuungen, als einzige beprobte Schichten in der Humusgehaltsstufe H4. Die Streuungen sind möglicherweise auf die Vorgehensweise bei der Beprobung zurückzuführen, da speziell im Grünland aufgrund des permanenten Bewuchses und der starken Durchwurzelung die saubere Trennung von Boden- und Pflanzenmaterial bei der Entnahme der Mischprobe häufig schwierig war. Die Schichten 3 (MW 1,48 %, MN 1,46 %, SA 0,33 %, HGS H3) und 4 (MW 0,94 %, MN 0,94 %, SA 0,30 %, HGS H2) weisen ebenfalls noch vergleichsweise hohe Werte auf, die über jenen der bewirtschafteten Varianten liegen (Ausnahmen: Schicht 4, Variante P, Block 1 und 2), aber auch hohe Streuungen zeigen. Lediglich im Unterboden (Schicht 5) (MW 0,31 %, MN 0,33 %, SA 0,10 %, HGS 1) sind die Unterschiede zu den bewirtschafteten Parzellen bzw. Blöcken in Bezug auf die Gehalte und die Streuungen sehr gering.

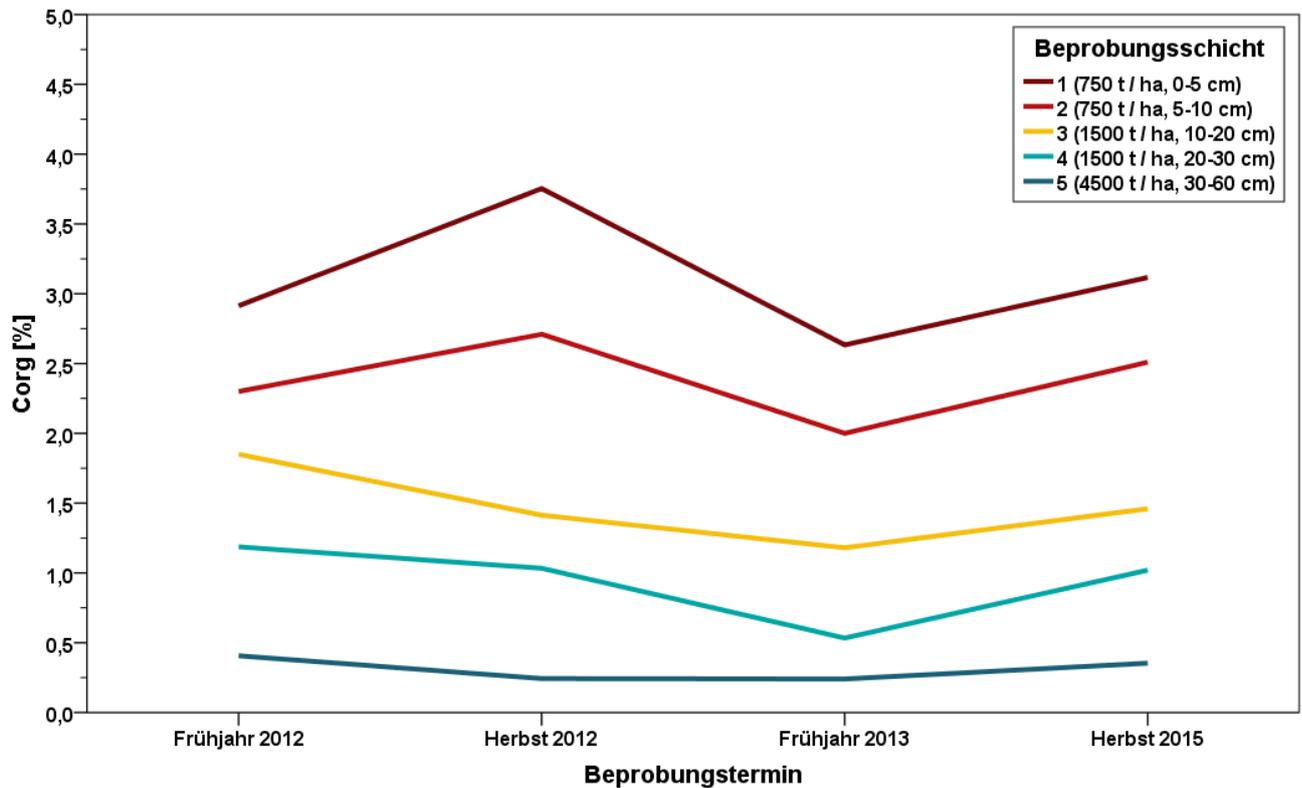


n = 12 je Schicht

Abbildung 83: Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Grünland am Standort Methau (vier Beprobungstermine)

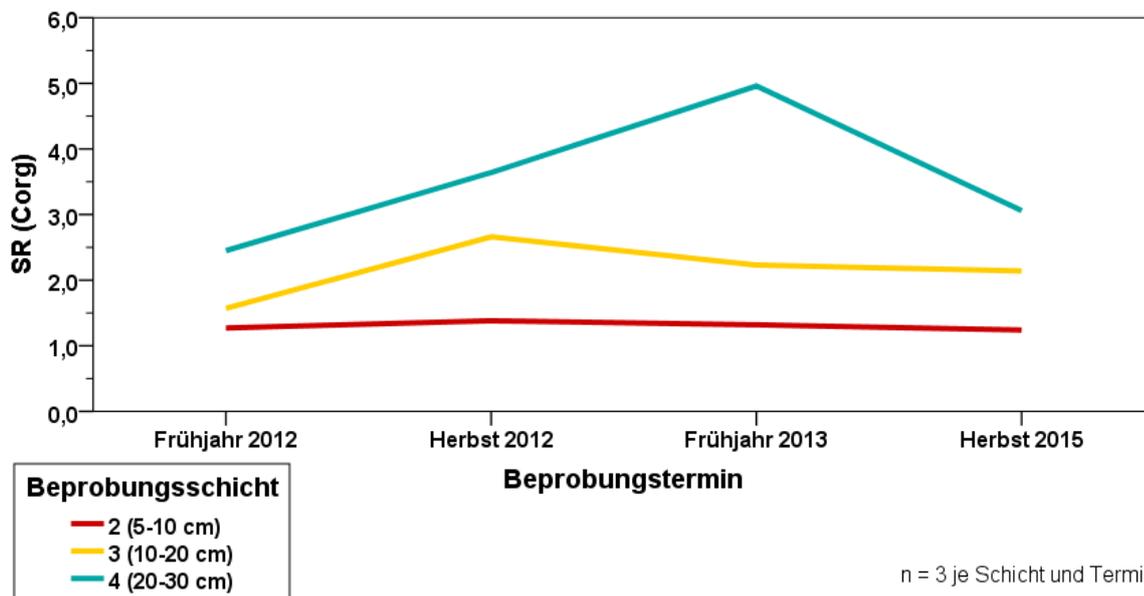
Die Entwicklung der mittleren C_T -Gehalte in der Variante Grünland (G) (Abbildung 84, andere Skalierung) dient als Referenz für eine naturnahe oder bewirtschaftungsfreie bzw. -unabhängige Dynamik. Zunächst ist die durchgängige deutliche Stratifizierung der Beprobungsschichten als Funktion der Tiefe über alle vier Termine erkennbar. Während allerdings die Schichten 1 und 2 vom Frühjahr zum Herbst 2012 eine deutliche Zunahme der C_T -Gehalte erfahren, nehmen diese in den unteren 3 Schichten leicht ab. Diese Abnahme setzt sich zum Frühjahr 2013 fort, erfasst über den Winter 2012/2013 allerdings auch die oberen beiden Schichten. Im Herbst 2015 liegen die C_T -Gehalte in den unteren drei Schichten in etwa auf dem Niveau aus dem Herbst 2012, die oberen beiden Schichten liegen darunter.

In Abbildung 85 sind die Stratifizierungsverhältnisse der Schicht 2 - 4 im Grünland dargestellt. Die SR-Werte von Schicht 2 liegen dabei zu allen vier Terminen bei 1,2 - 1,3. Die SR-Werte von Schicht 3 nehmen von 1,5 im Frühjahr 2012 auf 2,7 im Herbst 2012 zu, sinken zum Frühjahr 2013 aber wieder auf 2,2 ab. Im Herbst 2015 wurde ein SR-Wert von 2,1 in Schicht 3 ermittelt. Auch im Grünland weist Schicht 4 die höchsten SR-Werte auf. Diese nehmen vom Frühjahr 2012 (2,4) zum Herbst 2012 (3,6) und weiter zum Frühjahr 2013 (5,0) kontinuierlich zu. Im Herbst 2015 lag der SR-Wert von Schicht 4 bei 3,0. Während die Zunahme der SR-Werte der Schichten 3 und 4 zum Herbst 2012 stark vom steigenden C_T -Gehalt von Schicht 1 (s.o.) geprägt ist, ist der weitere Anstieg des SR-Wertes von Schicht 4 zum Frühjahr 2013 hauptsächlich ein Effekt des deutlich geringeren C_T -Gehaltes in dieser Schicht. Dies deutet auf eine verstärkte Mineralisierung im Verlauf des Winters 2012/13 hin.



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 84: Kohlenstoffgehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten der Variante Grünland am Standort Methau (vier Beprobungstermine)



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 85: Mittlere Stratifizierungsverhältnisse der Kohlenstoffgehalte in der Krume der Variante Grünland, differenziert nach Beprobungsterminen, am Standort Methau

5.2.2.5 Korrekturfaktor Grobboden

Wie bereits dargelegt, wurden die Kohlenstoffvorräte jeweils für einen Feinbodenanteil von 100 % berechnet. Insbesondere am Standort Methau finden sich aber erheblich Grobbodenanteile, weswegen eine Korrektur der Vorräte nötig ist.

In Tabelle 10 sind die jeweiligen berechneten C_t -Massen für die Krume (Schichten 1-4), den Unterboden (Schicht 5) sowie das gesamte beprobte Bodenprofil (Schichten 1-5) bei unterschiedlichen Grobbodenanteilen dargestellt. Die Berechnungsgrundlage (Skelettanteil = 0 %) bilden die ermittelten Gesamtvorräte für die einzelnen Blöcke bzw. Varianten (s.o.). Je nach ermitteltem oder geschätztem Grobboden- bzw. Skelettanteil für den jeweiligen Hangabschnitt bzw. die jeweilige Parzelle können die korrigierten Kohlenstoffvorräte der Tabelle entnommen werden. So müssten beispielsweise die C_t -Vorräte in der Krume der Variante P in Block 1 bei einem mittleren Skelettanteil von 10 % von $43,4 \text{ t ha}^{-1}$ auf $39,0 \text{ t ha}^{-1}$ korrigiert werden.

5.2.2.6 Synthese Methau

Trotz etwas unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Dynamiken innerhalb bzw. zwischen den Blöcken lässt sich zusammenfassend sagen, dass sich die Varianten P und K innerhalb der Blöcke in Bezug auf die C_t -Massen nur wenig unterscheiden.

Die Mittelwerte der vier Beprobungstermine liegen in allen Varianten bzw. Blöcken bei ca. $60 \text{ t } C_t \text{ ha}^{-1}$, mit Ausnahme der Variante P in Block 3. Aufgrund der geringmächtigen Krume sowie der höheren Sand- und Grobbodenanteile in Block 3 sind die C_t -Gehalte in den Schichten 4 und 5 sowohl im Vergleich zu den anderen Blöcken als auch im Vergleich zur Oberkrume relativ niedrig. Während dies in der Variante P durch die Bodenbearbeitung teilweise kompensiert wird, sind die C_t -Gehalte der Variante K ein Beleg für die starke Abhängigkeit der C-Dynamik von der Bodenbeschaffenheit.

Die ermittelten C_t -Massen müssen, je nach Block und Hangabschnitt, anhand der Grobbodenanteile korrigiert werden. Dies gilt insbesondere für Block 3, welcher die höchsten Grobbodenanteile aufweist. Ein Vergleich der Varianten am Standort Methau muss, selbst innerhalb der relativ kleinen Blöcke, den Faktor der sehr kleinräumigen Bodenheterogenität mit einbeziehen. Insbesondere am Oberhang bzw. im Block 3 sind bei Grobbodenanteilen von bis zu 20 Masse-% in der Krume sowie bis zu 50 Masse-% im Unterboden erhebliche Korrekturen der ermittelten C_t -Vorräte angemessen.

Die Variante G weist im Mittel C_t -Massen über 90 t ha^{-1} auf und damit ca. 50 % mehr als die bewirtschafteten Varianten. Sie zeigt aber einen ähnlichen zeitlichen Verlauf der C_t -Gehalte und -Massen, welcher durch eine deutliche Abnahme im Verlauf des Jahres 2012 und über den Winter 2012/2013 gekennzeichnet ist. Dieser Verlauf ist daher vermutlich ein Effekt der Witterung.

Nach Analyse der vorliegenden Daten bewirkt die unterschiedliche Bodenbearbeitung am Standort Methau keine mittel- und langfristige Differenzierung der C_t -Massen. Deutliche Effekte können für diesen Standort hingegen durch (extreme) Witterungsverhältnisse und die Bodenbeschaffenheit begründet werden.

Hinzuweisen ist auf die i. d. R. höheren C-Gehalte in den obersten Bodenschichten von 0 – 10 cm Bodentiefe bei konservierender Bodenbearbeitung. Die höheren C-Gehalte und die damit verbundene höhere Strukturstabilität bewirken die erosionsmindernde Wirkung pflugloser Bodenbearbeitung.

Tabelle 10: Nach potentiellen Skelettanteilen korrigierte Kohlenstoffvorräte innerhalb der einzelnen Blöcke und Bodenbearbeitungsparzellen am Standort Methau

Beprobungsschicht	Skelettanteil	Block 1		Grünland	Block 2		Block 3	
		P	K	G	P	K	P	K
		Masse-%		Kohlenstoffvorräte [t ha ⁻¹]				
1-4 (4500 t / ha)	0	43,4	49,2	77,4	46,4	48,8	42,1	48,8
5 (4500 t / ha)	0	17,0	10,5	14,0	15,3	13,4	10,7	10,6
1-5 (9000 t / ha)	0	60,4	59,7	91,4	61,7	62,2	52,8	59,4
1-4 (4500 t / ha)	5	41,2	46,7	73,5	44,1	46,4	40,0	46,4
5 (4500 t / ha)	5	16,2	10,0	13,3	14,5	12,7	10,1	10,1
1-5 (9000 t / ha)	5	57,4	56,7	86,8	58,6	59,1	50,1	56,4
1-4 (4500 t / ha)	10	39,0	44,3	69,7	41,7	43,9	37,9	43,9
5 (4500 t / ha)	10	15,3	9,5	12,6	13,8	12,1	9,6	9,5
1-5 (9000 t / ha)	10	54,3	53,7	82,3	55,5	56,0	47,5	53,5
1-4 (4500 t / ha)	15	36,8	41,8	65,8	39,4	41,5	35,8	41,5
5 (4500 t / ha)	15	14,5	9,0	11,9	13,0	11,4	9,1	9,0
1-5 (9000 t / ha)	15	51,3	50,8	77,7	52,4	52,9	44,9	50,5
1-4 (4500 t / ha)	20	34,7	39,3	61,9	37,1	39,0	33,7	39,1
5 (4500 t / ha)	20	13,6	8,4	11,2	12,2	10,7	8,5	8,5
1-5 (9000 t / ha)	20	48,3	47,8	73,1	49,3	49,8	42,2	47,5
1-4 (4500 t / ha)	30	30,3	34,4	54,2	32,5	34,2	29,5	34,2
5 (4500 t / ha)	30	11,9	7,4	9,8	10,7	9,4	7,5	7,4
1-5 (9000 t / ha)	30	42,3	41,8	64,0	43,2	43,5	36,9	41,6
1-4 (4500 t / ha)	50	21,7	24,6	38,7	23,2	24,4	21,1	24,4
5 (4500 t / ha)	50	8,5	5,3	7,0	7,7	6,7	5,3	5,3
1-5 (9000 t / ha)	50	30,2	29,9	45,7	30,8	31,1	26,4	29,7

5.3 Stickstoff

Die ermittelten Werte für die Gesamtgehalte bzw. -vorräte an Stickstoff (N_t = organischer und anorganischer Stickstoff) stehen funktionell und analytisch in enger Beziehung zu jenen des (organischen) Kohlenstoffs. Analytisch insofern, als die beiden Parameter an derselben Teilprobe im Rahmen desselben Messvorganges bestimmt werden. Auf die funktionalen Beziehungen wird im Abschnitt „C/N-Verhältnis“ näher eingegangen.

Grundsätzlich liegt Stickstoff in Oberböden meist zu mehr als 90 % in organischer Form vor (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 305). Ausnahmen hiervon bilden Böden, die durch hohe N-Applikationen (anorganischer Stickstoff) geprägt sind.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung können die ermittelten Massen an anorganischem Stickstoff (N_{\min}) vom Gesamtstickstoff (N_t) abgezogen werden, um die Massen an organischem Stickstoff zu berechnen. Im Allgemeinen wird für mineralische Böden im gemäßigt-humiden Klima von N_t -Gehalten von 0,1 - 0,2 % im Ap-Horizont ausgegangen, was bei einer mittleren Lagerungsdichte von $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ Vorräten von $4,5 - 9 \text{ t ha}^{-1}$ in den oberen 30 cm entspricht (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 305). Vom KTBL werden als Faustzahl für Parabraunerden aus Löss für den Ap-Horizont Stickstoffvorräte von $5 - 6 \text{ t ha}^{-1}$ genannt (DÖHLER 2009: 183).

5.3.1 Lüttewitz

Die Stickstoffgehalte in der Variante Pflug (P) zeigen eine recht homogene Verteilung in den oberen drei Beprobungsschichten mit Zentralwertebereichen von 0,13 - 0,15 % (Abbildung 86). Der Zentralwertebereich der N_t -Gehalte in Schicht 4 liegt mit 0,11 - 0,14 % geringfügig niedriger, jener der Schicht 5 hingegen deutlich darunter (0,06 - 0,07 %).

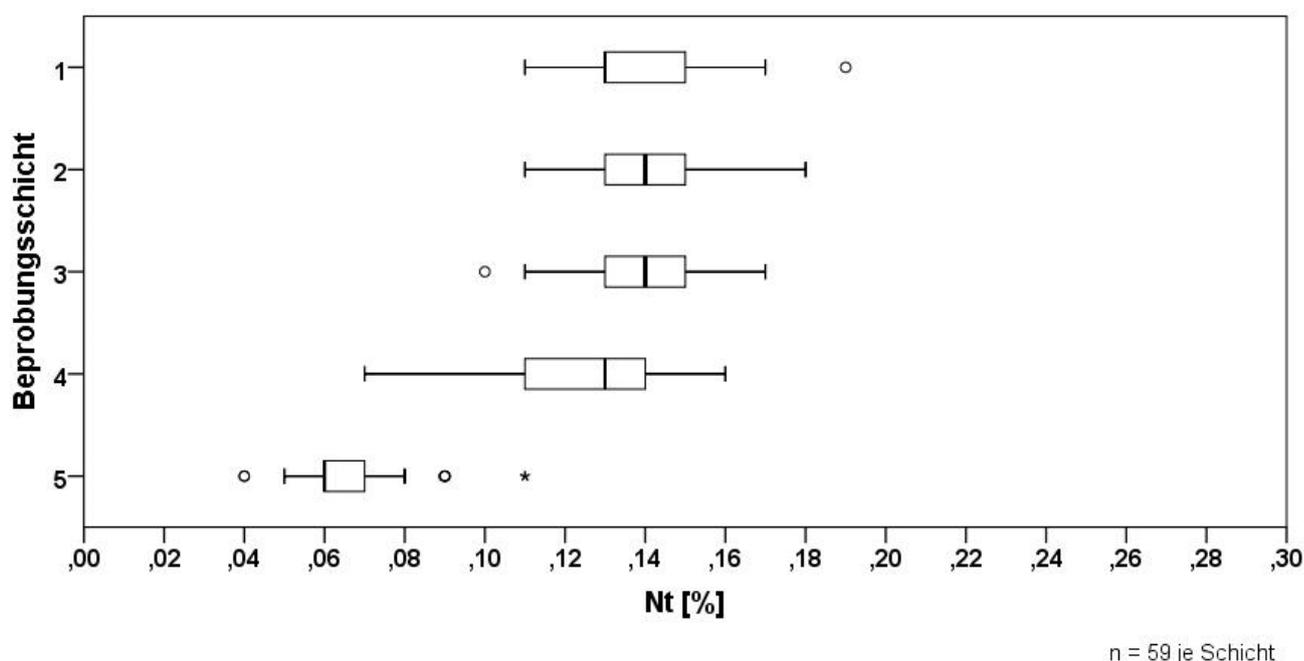
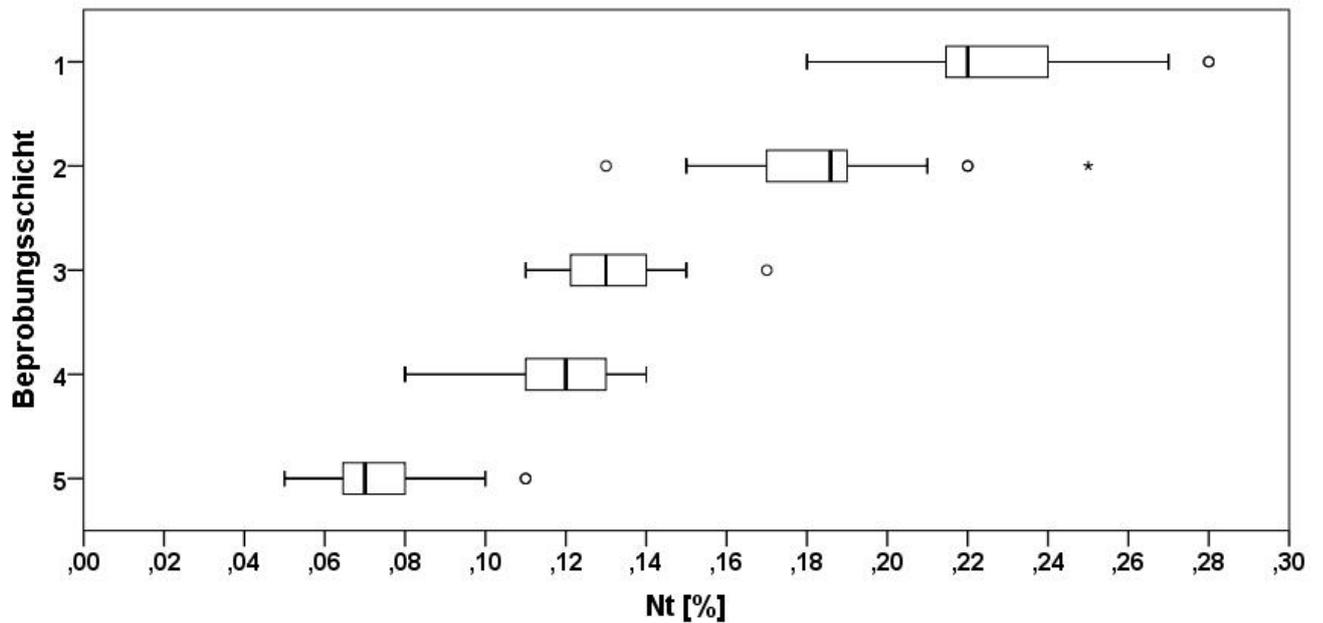


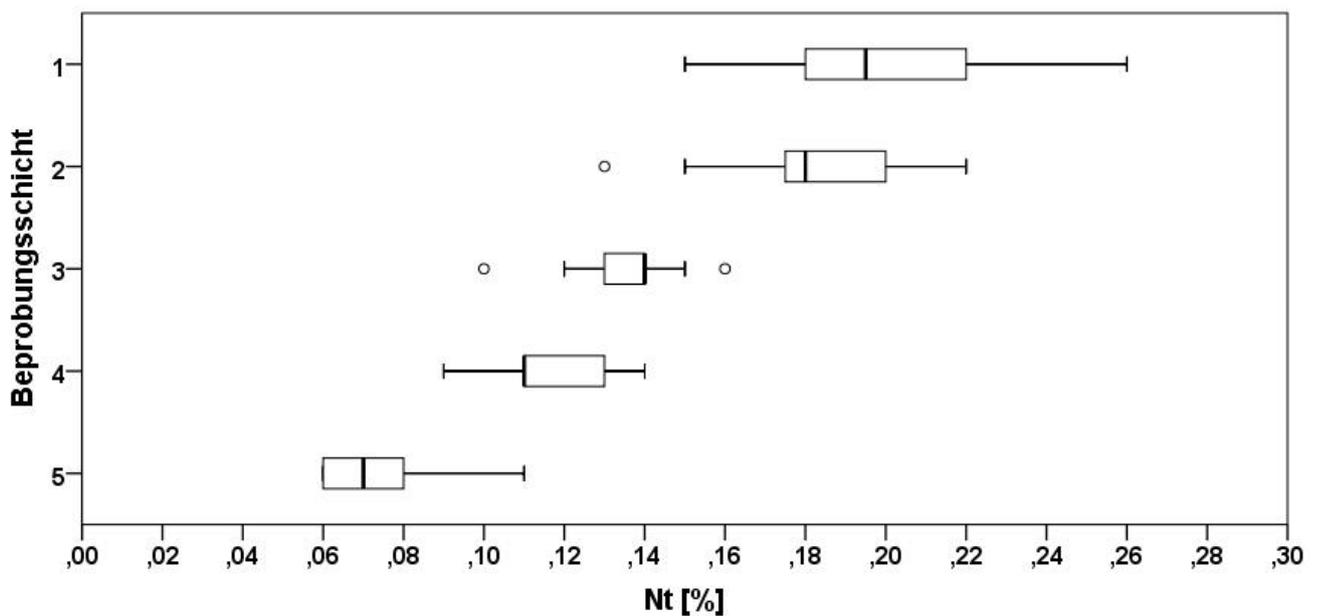
Abbildung 86: Stickstoffgehalte der Variante Pflug in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine)

In der Variante Direktsaat (D) zeigt sich die typische stratifizierte Verteilung der als Funktion der Tiefe abnehmenden Stickstoffgehalte (Abbildung 87). Die schichtinterne Streuung ist dabei in der Schicht 1 mit einem Zentralwertebereich von 0,22 - 0,24 % am größten. Die Gehalte der Schicht 2 liegen bei einem ZWB von 0,17 - 0,19 % wie jene der Schicht 1 höher als im Oberboden der Pflugvariante. Die Schichten 3 - 5 weisen hingegen mit ZWB von 0,12 - 0,14 % (3), 0,11 - 0,13 % (4) sowie 0,6 - 0,8 % (5) N_t -Gehalte auf, die jenen der Pflugvariante entsprechen (Abbildung 86)..



n = 60 je Schicht

Abbildung 87: Stickstoffgehalte der Variante Direktsaat in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine)



n = 36 je Schicht

Abbildung 88: Stickstoffgehalte der Variante Konservierend in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine)

Auch in der Variante K liegen die Stickstoffgehalte in den Schichten 1 und 2 über jenen der Pflugvariante mit ZWB von 0,18 - 0,22 % (1) bzw. 0,17 - 0,20 % (2) (Abbildung 88). Sie ähneln damit den N_t -Gehalten der Variante D, welche allerdings in der Schicht 1 noch etwas höhere N_t -Gehalte aufweist. Die Streuungen in der obersten Schicht sind in der Variante K allerdings noch größere als in der Direktsaatvariante. Die geringsten Streuungen weist in dieser Variante die Schicht 3 mit einem ZWB von 0,13 - 0,14 % auf. Die Schichten 4

(ZWB 0,11 - 0,13 %) und 5 (ZWB 0,06 - 0,08 %) weisen N_t -Gehalte auf, die jenen der anderen beiden Varianten in den gleichen Schichten sehr ähnlich sind.

Auch in der Variante Konservierend Locker (KL) zeigt sich noch eine leicht stratifizierte Verteilung in Bezug auf die Stickstoffgehalte (Abbildung 89), allerdings ist diese weniger stark ausgeprägt als in den Varianten D und K. So liegt der ZWB der Schicht 1 bei 0,16 - 0,19 %, jener der Schicht 2 bei 0,16 - 0,18 %. Schicht 3, die ebenfalls von der Bodenbearbeitung erfasst wird, weist mit einem ZWB von 0,13 - 0,15 % für die Schicht typische N_t -Gehalte auf. Schicht 4 mit einem ZWB von 0,09 - 0,14 % zeigt eine für diese Schicht große Streuung mit N_t -gehalten (MW: 0,10 %, MN 0,11 %), die etwas niedriger liegen als in den anderen Varianten in der gleichen Schicht. Schicht 5 mit einem ZWB von 0,06 - 0,07 % hingegen zeigt die typische Verteilung für diese Schicht.

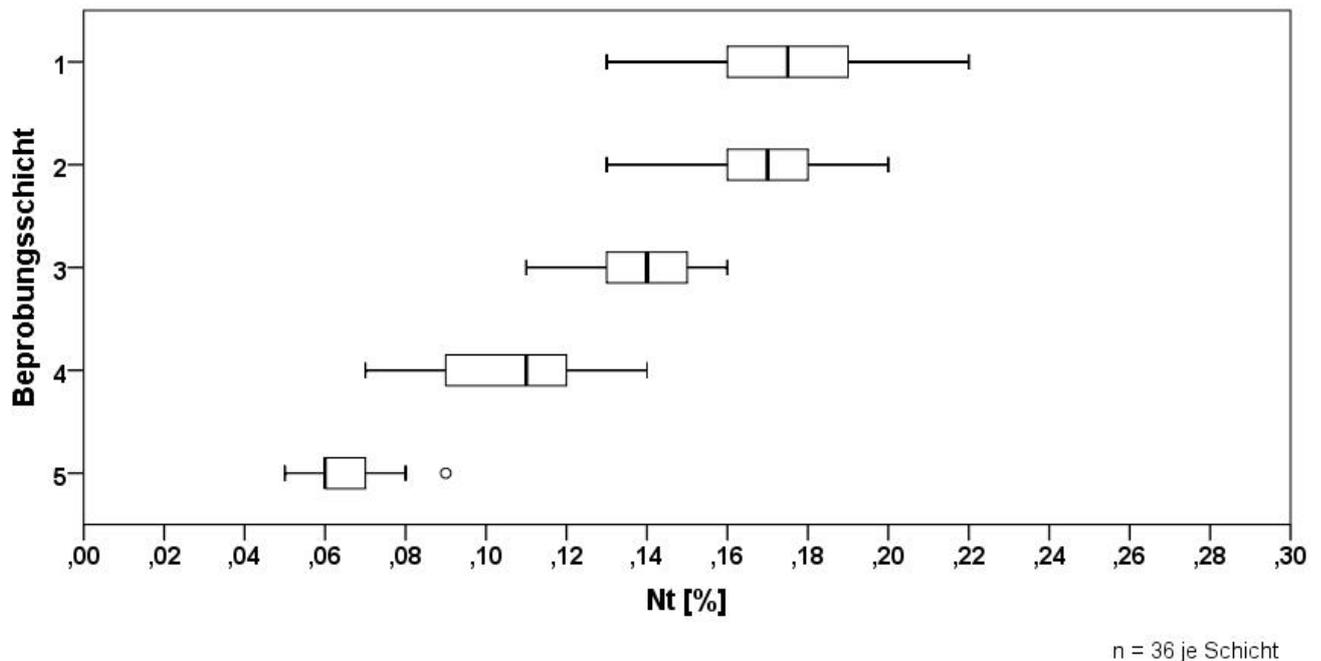


Abbildung 89: Stickstoffgehalte der Variante Konservierend Locker in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine)

5.3.1.1 Basisbeprobungen

Vergleicht man die mittleren Stickstoffmassen der vier Varianten über die vier Basisbeprobungstermine ergibt sich, ähnlich wie beim Kohlenstoff, ein zweigeteiltes Bild (Abbildung 90). Die Varianten P und KL weisen mit jeweils etwa 9 t N ha^{-1} gleich große Massen auf. Die Stickstoffmassen der Varianten D und K liegen mit etwa 10 t ha^{-1} um ca. 10 % über jenen der anderen beiden Varianten, was dem prozentualen Unterschied zwischen den Varianten, der für die Kohlenstoffmassen bestimmt wurde, entspricht. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind dabei hauptsächlich durch Gehaltsunterschiede in den Schichten 1, 2 und 5 verursacht (bei Variante KL auch Schicht 4). Insgesamt liegen die N_t -Gehalte bzw. -Massen mit ca. $6 - 7 \text{ t ha}^{-1}$ in der Krume (Schichten 1 - 4) in dem in der Literatur (s.o.) angegebenen Bereich.

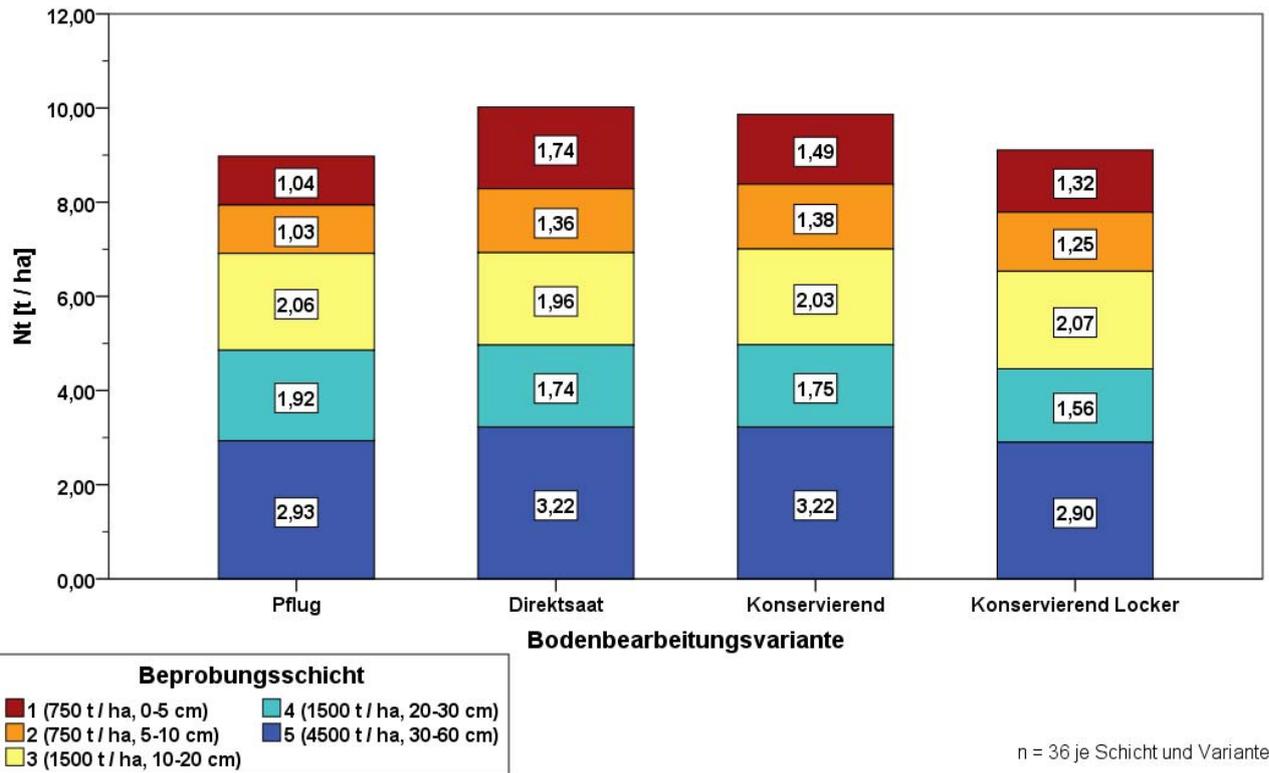


Abbildung 90: Mittlere Stickstoffvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (4 Basisbeprobungstermine)

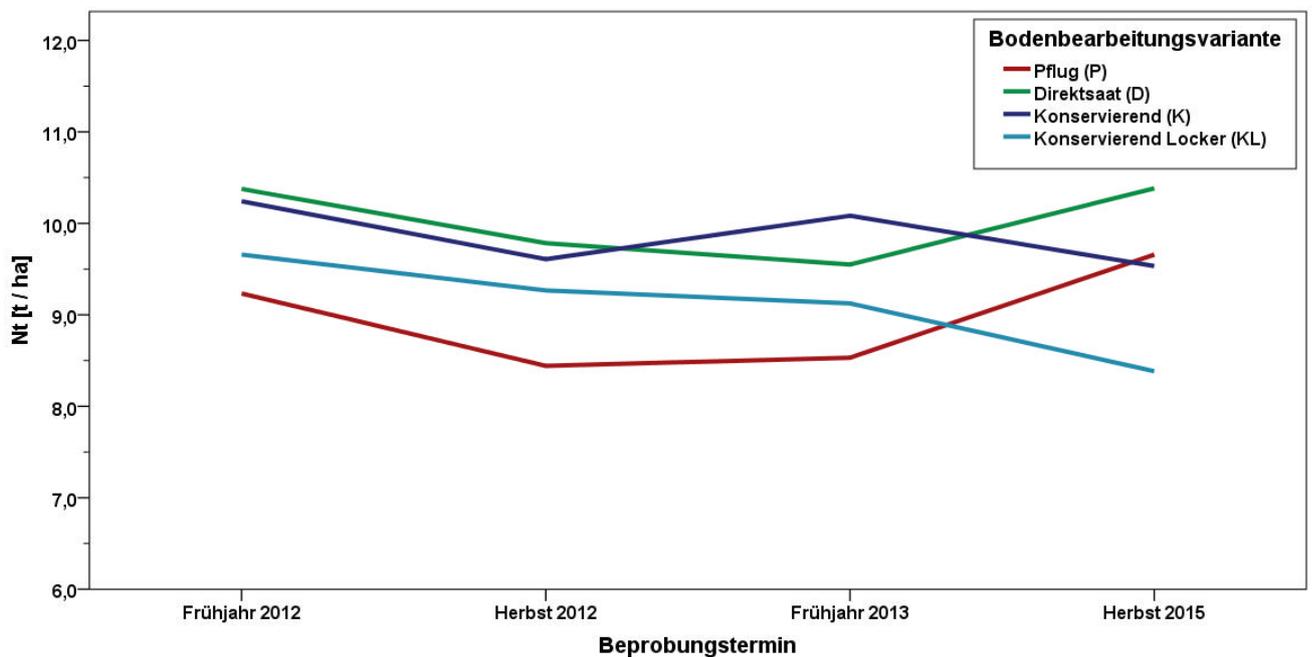


Abbildung 91: Mittlere Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Basisbeprobungsterminen am Standort Lüttewitz

Vergleicht man die mittleren Stickstoffvorräte im Verlauf der vier Beprobungstermine so ergibt sich zu beiden Terminen im Jahr 2012 die Reihenfolge D > K > KL > P (Abbildung 91). Im Frühjahr 2013 hingegen weist die Variante K die größten N_t-Massen auf. Starke Veränderungen in dieser Abfolge ergeben sich zum Herbst 2015, wobei zwischen diesen beiden letzten Beprobungsterminen insgesamt ca. 30 Monate liegen. Für diesen Zeitraum wurde für die Varianten D und P ein deutlicher Anstieg der mittleren Stickstoffmassen ermittelt, für die Varianten K und KL hingegen eine deutliche Abnahme.

Zum besseren Verständnis dieser Dynamik wurden die ermittelten Werte zusätzlich als Boxplots dargestellt (Abbildung 92). Dabei wird ersichtlich, dass die ermittelten Stickstoffmassen in allen Varianten zu den einzelnen Terminen erhebliche Streuungen innerhalb der Parzellen aufweisen.

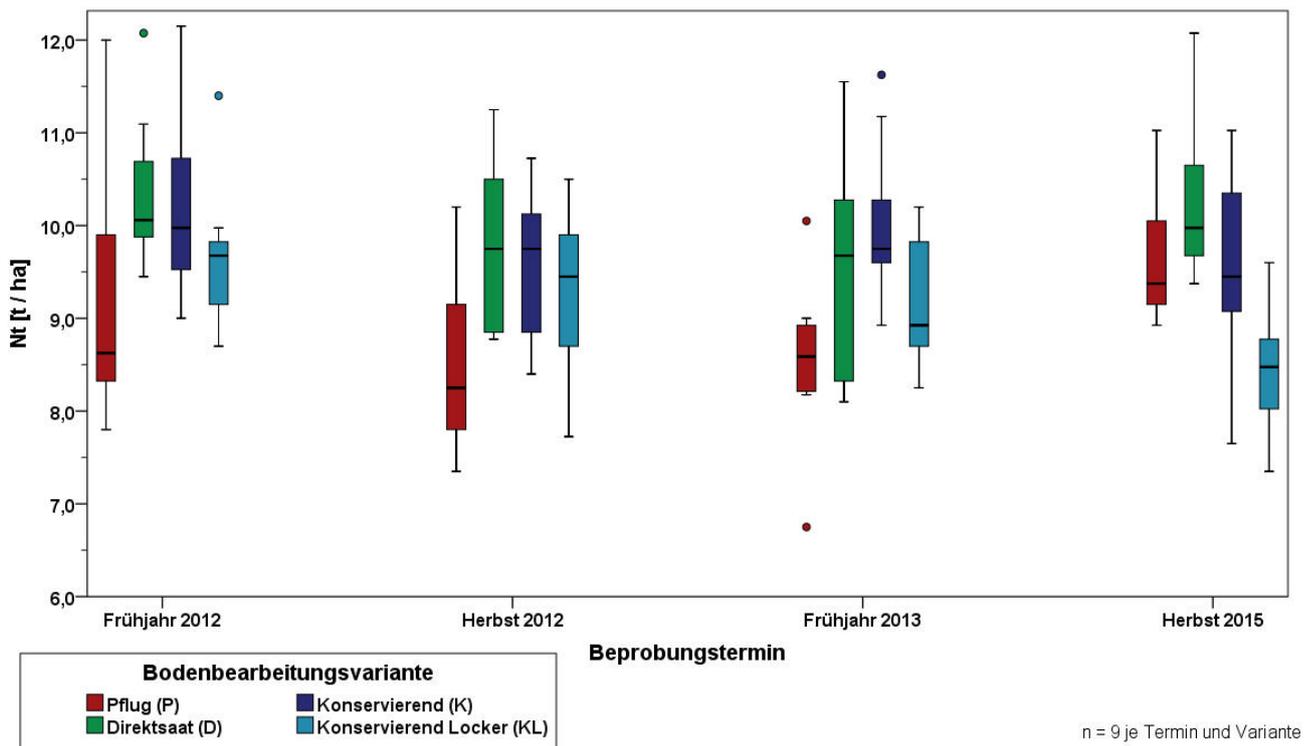


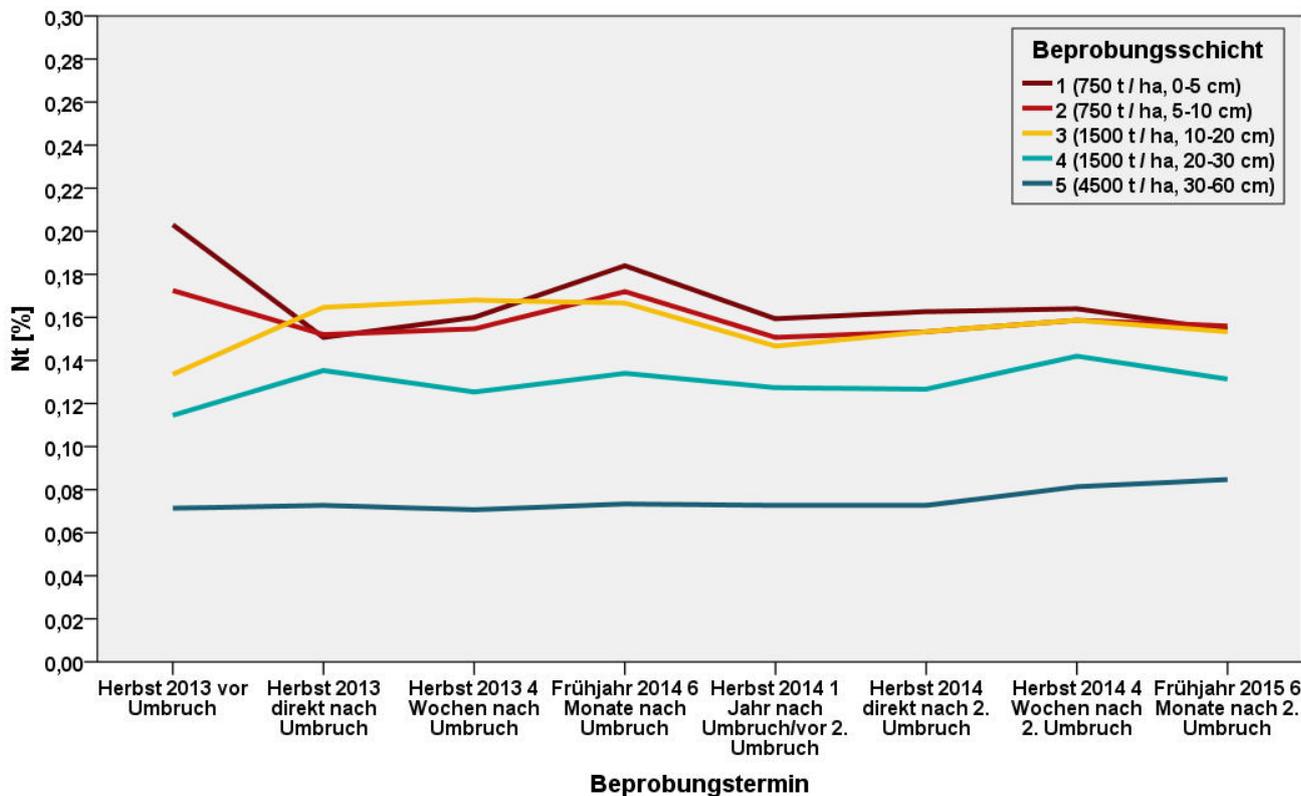
Abbildung 92: Streuung der Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Basisbeprobungsterminen am Standort Lüttewitz

Bei gegebener Normalverteilung nach SHAPIRO-WILK und Varianzhomogenität nach LEVENE der N_t-Massen innerhalb der Varianten über alle vier Basisbeprobungstermine wurden signifikante Mittelwertunterschiede ermittelt. Dabei wurden im Post-Hoc-Test nach SCHEFFÉ die homogenen Untergruppen P und KL (Signifikanz = 0,958) und D und K (Signifikanz = 0,93) gebildet.

5.3.1.2 Umbruchversuch

Die mittleren Stickstoffgehalte der Variante Direktsaat gepflügt (DP) (Abbildung 93) entwickeln sich im Verlauf des Umbruchversuches ähnlich wie die Kohlenstoffgehalte: Nach der ursprünglich stratifizierte Situation zu Beginn des Versuchs wird durch den Umbruch eine Homogenisierung der N_t-Gehalte in der Krume herbeige-

führt. Allerdings gilt dies in vollem Umfang nur für die Beprobungsschichten 1 - 3, die Gehalte der Schicht 4 liegen zu allen Terminen um 0,02 - 0,03 % unter jenen der oberen drei Schichten. Wie in den Varianten P und D (s.o.) kommt es auch in der Variante DP in den oberen 4 Schichten zu einem Anstieg der N_t -Gehalte zum Frühjahr 2014, welche in der Folge aber wieder absinken. Der 2. Umbruch im Herbst 2014 ist, ebenfalls analog zum Kohlenstoff, anhand der Stickstoffgehalte der einzelnen Beprobungsschichten nicht erkennbar.



n = 9 je Schicht und Termin

Abbildung 93: Mittlere N_t -Gehalte in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) im Verlauf der 8 Beprobungstermine, differenziert nach 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz

Vergleicht man die mittleren Stickstoffmassen der drei Bearbeitungsvarianten im Verlauf der Termine (Abbildung 94) so ist zunächst deutlich erkennbar, dass die Varianten D und DP einen parallelen zeitlichen Verlauf der Stickstoffmassen aufweisen. Dabei sind die N_t -Massen zunächst in beiden Varianten annähernd gleich groß und in der Variante DP ab dem Frühjahr 2014 durchgängig um ca. $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ geringer sind als in der Variante D. Allgemein steigen die N_t -Massen in beiden Varianten zunächst zum Frühjahr 2014 und danach insbesondere zum Winter 2014/2015 bzw. zum Frühjahr 2015 deutlich an. Der Schwankungsbereich liegt dabei insgesamt zwischen 10 und 11 t ha^{-1} .

Die Variante P weist insgesamt deutlich geringere N_t -Massen (ca. $8,5 - 9,5 \text{ t ha}^{-1}$) sowie größere Schwankungen auf als die anderen beiden Varianten. Der starke Anstieg im Herbst 2013 von Termin vor dem Umbruch zum Termin nach dem Umbruch geht allerdings vermutlich auf einen Fehler zurück, welcher bereits im Rahmen der Darstellung der Kohlenstoffdynamik auftrat und diskutiert wurde. Analog zum Kohlenstoff wurde auch beim Stickstoff ein im Gegensatz zu den Varianten D und DP sehr deutlicher Rückgang der N_t -Massen vom Herbst 2014 zum Frühjahr 2015 ermittelt. Unabhängig von diesen Schwankungen ist, ähnlich wie es die Ergebnisse der Basisbeprobungen zeigen, ein durchgängiger und relativ stabiler Unterschied in den Stickstoff-

massen von ca. 1 - 1,5 t ha⁻¹ zwischen der Variante P und den Varianten D und DP erkennbar, welcher mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Bodenbearbeitung zurückzuführen ist.

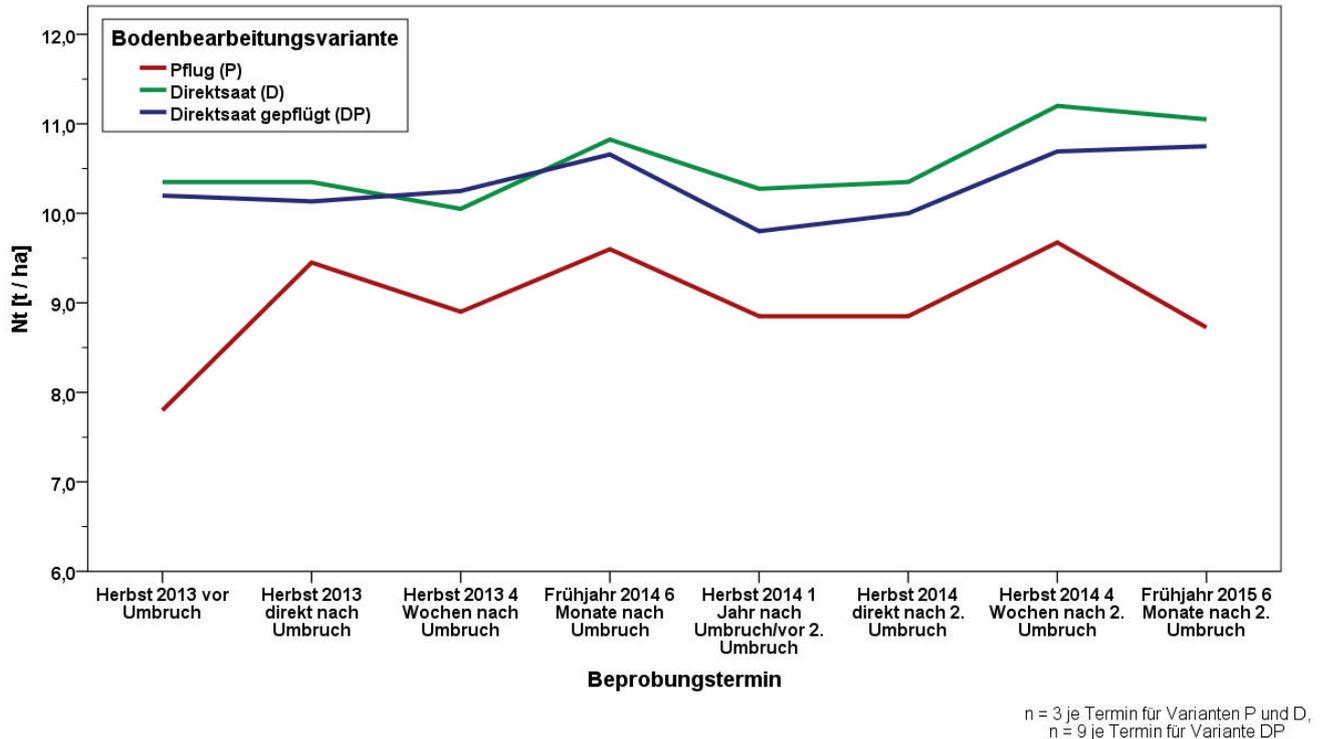


Abbildung 94: Mittlere Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz

Bei gegebener Normalverteilung nach SHAPIRO-WILK und Varianzhomogenität nach LEVENE der N_t-Massen innerhalb der Varianten über alle acht Termine wurden signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Varianten ermittelt. Dabei wurden im Post-Hoc-Test nach SCHEFFÉ die homogenen Untergruppen P (MW = 8,98 t ha⁻¹) sowie D (MW = 10,56 t ha⁻¹) und DP (10,31 t ha⁻¹) gebildet (Signifikanz = 0,511).

Die Versuchswiederholung (DP4-6) im Jahr 2014/2015 bestätigte dieses Ergebnis. Auch im Rahmen dieser vier Beprobungstermine wurden die homogenen Untergruppen P (MW = 9,03 t ha⁻¹) sowie D (MW = 10,72 t ha⁻¹) und DP (MW = 10,43 t ha⁻¹) gebildet (Signifikanz = 0,688).

5.3.2 Methau

Die Stickstoff-Gesamtgehalte in der Variante Pflug (P) zeigen in allen drei Blöcken eine bodenbearbeitungsbedingte homogenisierte Verteilung in der Krume (Schichten 1 - 4) (Abbildung 95). Dabei liegen die Zentralwertebereiche zwischen 0,10 und 0,15 % (MW: 0,117 - 0,138 %). Eine Ausnahme bildet Schicht 4 im straßenfernen Block 3, welche eine vergleichsweise starke Streuung der Werte zwischen 0,06 und 0,13 % (MW: 0,093 %) aufweist.

Auch in Block 2 liegt der N_t-Gehalt in Schicht 4 etwas niedriger (MW: 0,107 %) als in den Schichten 1 - 3. Dies weist darauf hin, dass es sich um einen Übergangsbereich zum Unterboden handelt, welcher nur teilweise von der wendenden Bodenbearbeitung erfasst und mit der Oberkrume homogenisiert wird. Auch im Unterboden (Schicht 5) weisen die Blöcke 2 und 3 mit einem Wertebereich von 0,04 - 0,07 % (MW: 0,053 - 0,063 %) etwas geringere N_t-Gehalte auf als Block 1 (0,05 - 0,11 %, MW 0,070 %). Wie bei anderen Parametern kommt in

diesen Werten zum Ausdruck, dass, insbesondere im Block 1, der Unterboden von der Bodenbearbeitung erfasst und humus- bzw. stickstoffreiches Oberbodenmaterial eingearbeitet wurde.

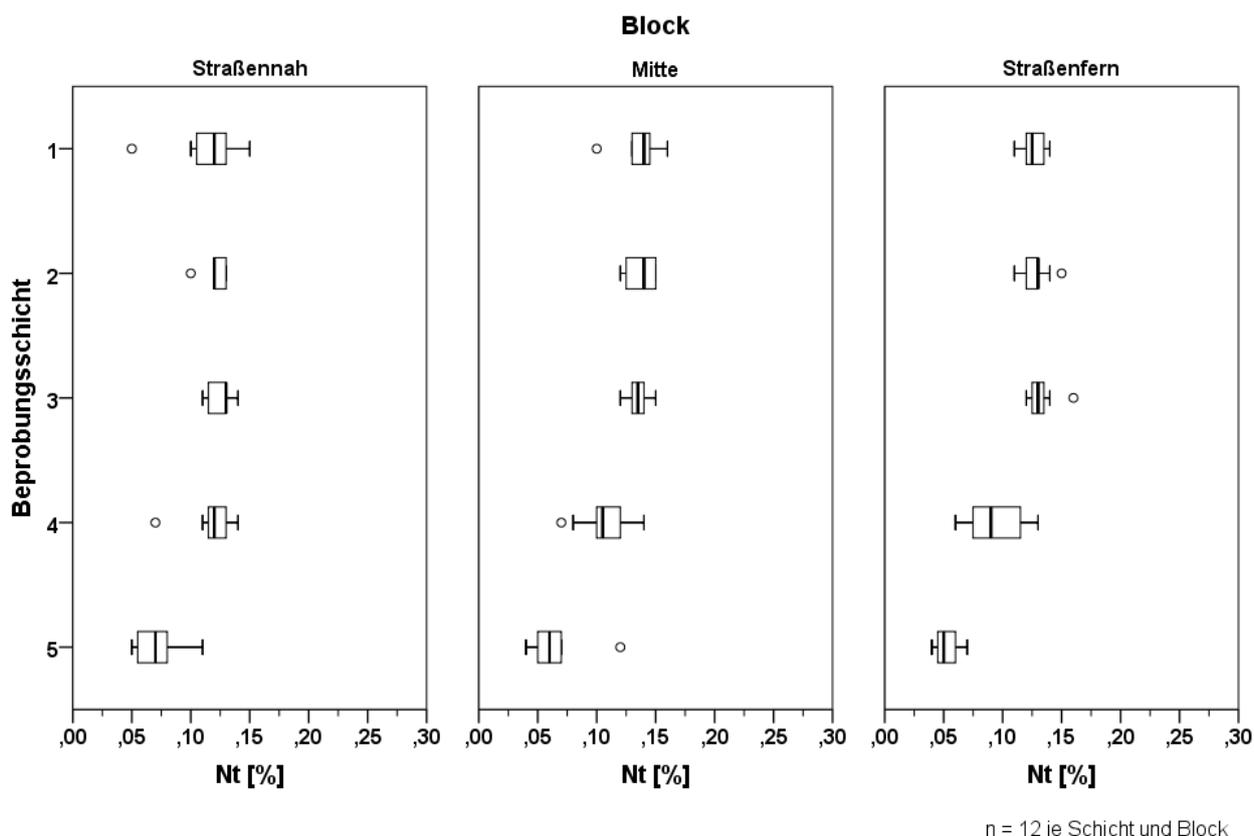


Abbildung 95: Stickstoffgehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach 3 Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau (4 Beprobungstermine)

In der Variante Konservierend (K) sind die N_T -Gehalte in einer tiefenstratifizierten Form ausgeprägt (Abbildung 96). So liegen diese in Schicht 1 zwischen 0,15 und 0,22 % (MW: 0,175 - 0,190 %) und damit deutlich höher als jene der Variante P. Ähnliches gilt für Schicht 2 bei Werten zwischen 0,14 und 0,20 % (MW: 0,168 - 0,179 %). Schicht 3 mit Werten zwischen 0,10 bis 0,17 % (MW: 0,128 - 0,138 %) liegt hingegen auf einem Niveau mit der Variante P, Schicht 4 mit Werten von 0,05 - 0,12 % (MW: 0,075 - 0,092 %) unter der Vergleichsschicht der Variante P. Im Unterboden (Schicht 5) wurden N_T -Gehalte zwischen 0,04 - 0,08 % (MW: 0,053 - 0,062 %) ermittelt. Dabei sind die Streuungen innerhalb der Schichten 4 und 5 wesentlich geringer als in der Variante P. Zudem weist Schicht 5 in der Variante K im Block 1 die geringsten mittleren N_T -Gehalte auf, im Gegensatz zur Variante P, für welche in Schicht 5 in diesem Block die höchsten N_T -Gehalte ermittelt wurden.

Die Variante Grünland (G) weist in den oberen beiden Schichten sehr hohe N_T -Gehalte und zugleich große Streuungen auf (Abbildung 97). So liegen die Werte in Schicht 1 zwischen 0,2 und 0,41 % bei einem Mittelwert von 0,322 % und in Schicht 2 bei 0,21 - 0,32 % (MW: 0,253 %). Schicht 3 ähnelt bei einer Wertespanne von 0,13 - 0,19 % (MW: 0,158 %) den Schichten 2 bzw. 3 in der Variante K, Schicht 4 (0,08 - 0,16 %, MW 0,116 %) hingegen eher den Schichten der Krume in der Variante P. Im Unterboden dieser Variante liegen die N_T -Gehalte auf dem gleichen Niveau wie in den Varianten P und K.

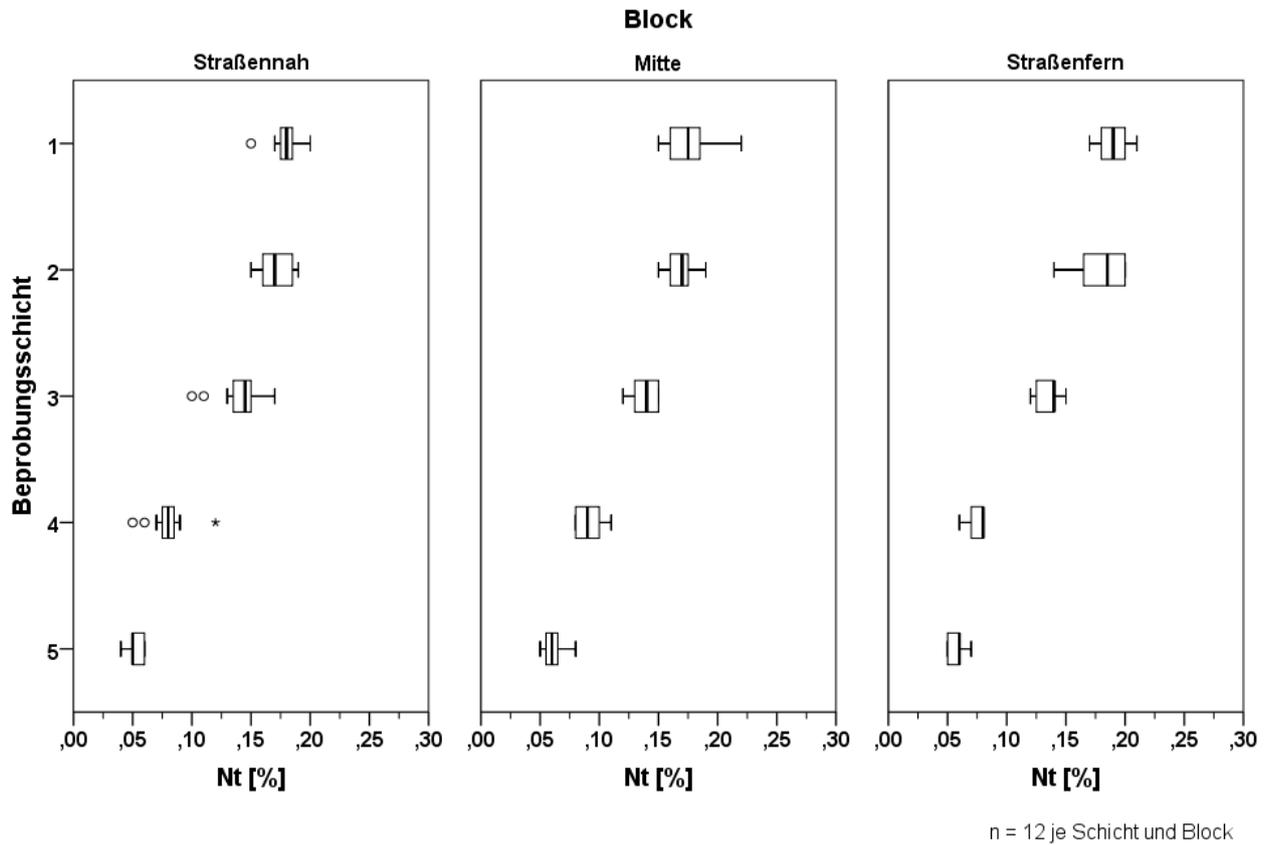


Abbildung 96: Stickstoffgehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach 3 Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau (4 Beprobungstermine)

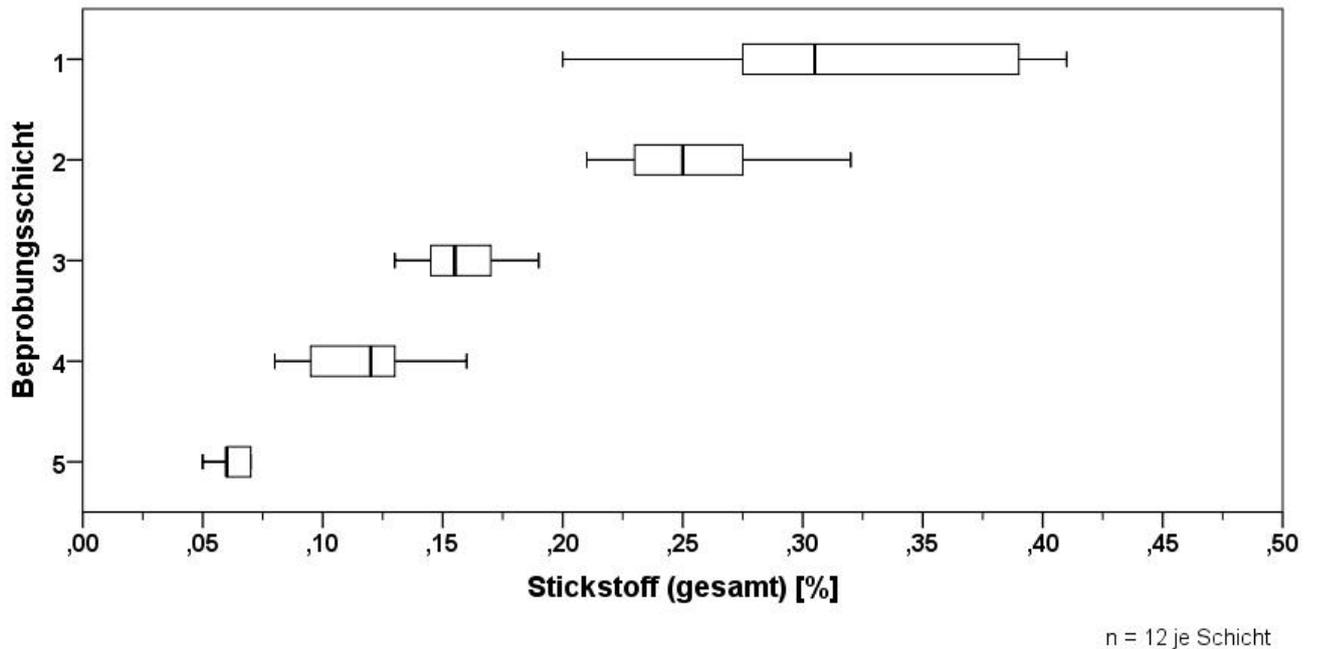
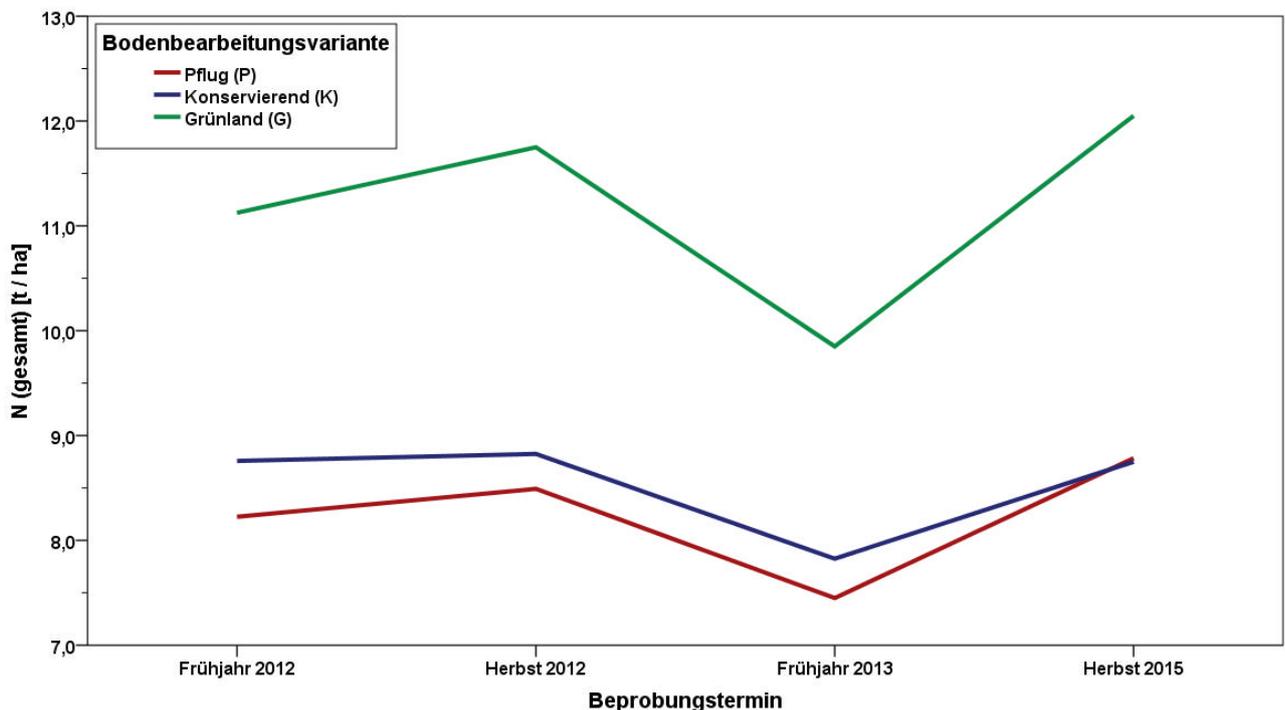


Abbildung 97: Stickstoffgehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau (4 Beprobungstermine)

Vergleicht man die mittleren Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden ha⁻¹) zwischen allen drei Varianten (Mittelwerte der drei Blöcke für Varianten P und K), sind die Unterschiede zwischen den Varianten P und K relativ gering im Vergleich zur Variante G (Abbildung 98).

Dabei weist die Variante K zu den ersten drei Terminen mit 8,7 (Frühjahr 2012), 8,8 (Herbst 2012) und 7,8 t ha⁻¹ (Frühjahr 2013) jeweils um etwa 0,5 t ha⁻¹ größere N_t-Vorräte auf als die Variante P. Im Herbst 2015 lagen die ermittelten N_t-Massen in beiden Varianten bei 8,7 t ha⁻¹ und damit auf dem Niveau der Variante K zu Beginn der Untersuchung. Die N_t-Massen in der Variante G liegen zu allen Terminen deutlich über jenen der bewirtschafteten Varianten, unterliegen aber den gleichen zeitlichen Schwankungen: Ein Anstieg von ca. 11,1 t ha⁻¹ im Frühjahr 2012 auf 11,7 t ha⁻¹ im Herbst 2012, gefolgt von einem starken Rückgang bis zum Frühjahr 2013 (9,8 t ha⁻¹) sowie einem starken Anstieg bis zum Herbst 2015 (12 t ha⁻¹). Dieser annähernd parallele Verlauf der drei Varianten weist darauf hin, dass diese Schwankungen nicht primär bodenbearbeitungs- bzw. bewirtschaftungs- sondern vielmehr jahreszeitlich bzw. witterungsbedingt sind.



n = 3 je Variante und Termin

Abbildung 98: Mittlere Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvariante und Beprobungstermin, am Standort Methau

Zum besseren Vergleich der Bewirtschaftungseinflüsse wurden die N_t-Gesamtmassen in den Varianten P und K nach Blöcken aufgeschlüsselt (Abbildung 99, andere Skalierung).

Dabei zeigen die beiden Varianten in den drei Blöcken relativ ähnliche zeitliche Verläufe: Im straßenfernen Block 3 weist die Variante K zu allen vier Terminen gleichmäßig größere N_t-Massen auf als die Variante P. In diesem Block sind die Schwankungen zwischen den Terminen insgesamt am schwächsten ausgebildet. Im mittleren Block 2 zeigt sich zunächst ein ähnlicher Verlauf wie in Block 3, allerdings weist die Variante P in diesem Block zunächst einen starken Rückgang der N_t-Massen zum Frühjahr 2013 und schließlich eine starke Zunahme derselben zum Herbst 2015 auf. Dadurch weist sie zum letzten Termin mit Vorräten von mehr als 9,5 t ha⁻¹ deutlich größere N_t-Massen auf als die Variante K. In Block 1 (straßennah) weist die Variante P im

Gegensatz zu den anderen Blöcken zu den Terminen Herbst 2012, Frühjahr 2013 und Herbst 2015 größere N_T -Massen auf als die Variante K.

Aufgrund der geringen Stichprobenzahl pro Block und Variante ($n = 3$) können diese blockweisen Vergleiche bereits durch einzelne Proben bzw. Messwerte stark beeinflusst und ggf. verfälscht werden. Die unterschiedlichen zeitlichen Entwicklungen der N_T -Massen in den drei Blöcken sind dabei zunächst Ausdruck der unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten in Kombination mit unterschiedlicher Bewirtschaftung. Der abschließende Variantenvergleich bzw. die Bilanzierung scheint aber, auch aufgrund der geringen Anzahl an Beprobungsterminen ($n = 4$), im Rahmen einer Mittelwertbildung über die drei Blöcke und vier Beprobungstermine am sinnvollsten zu sein (Abbildung 98). Dies wird durch den parallelen Verlauf der Kurven mit jener der unbewirtschafteten Grünlandfläche bestätigt.

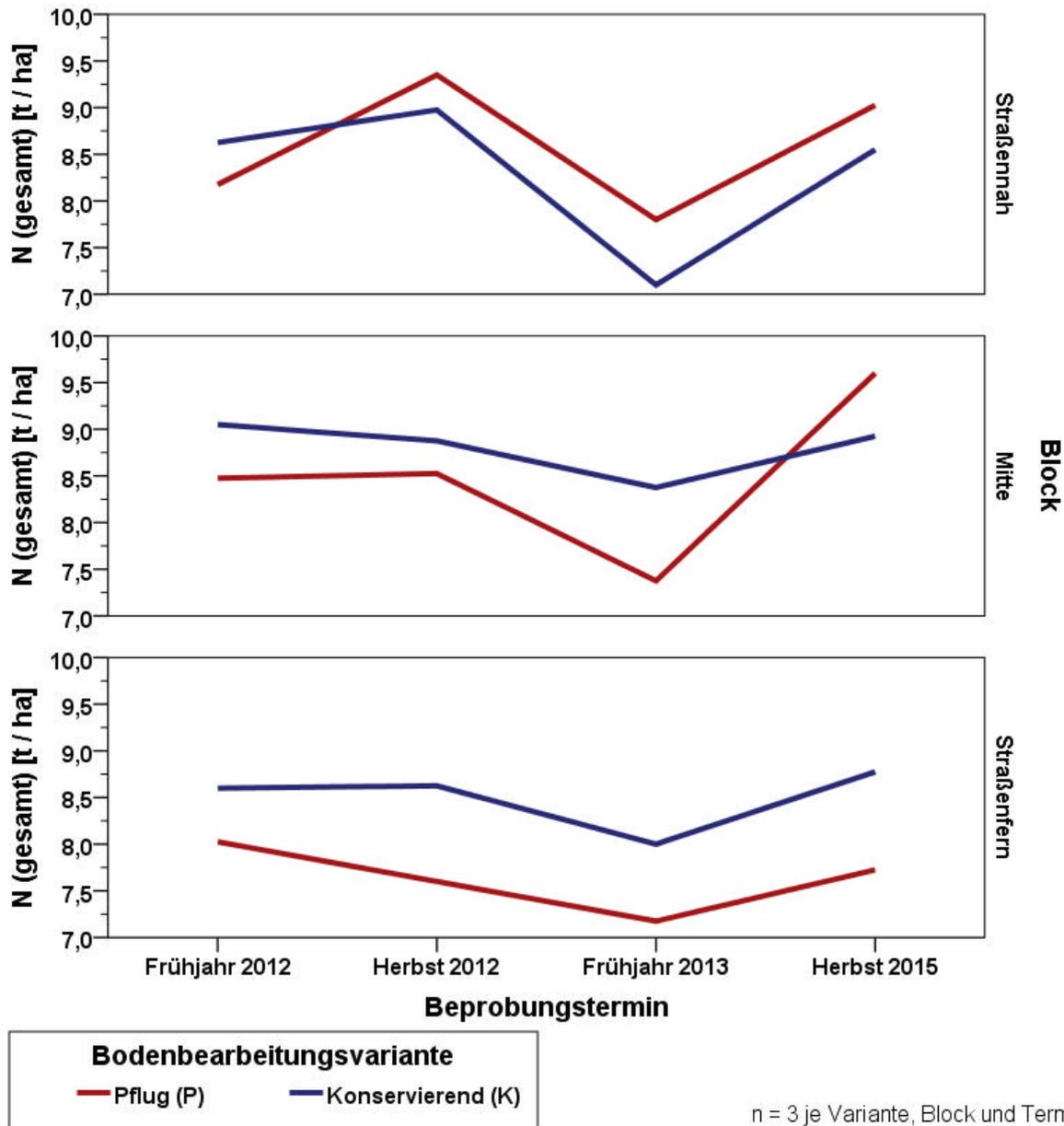


Abbildung 99: Mittlere Stickstoffvorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Blöcken, Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Methau

In Abbildung 100 ist erkennbar, dass die mittleren Stickstoffvorräte (ohne Korrekturen für die jeweiligen Grob- bodenanteile) in allen drei Blöcken und beiden Varianten in der Krume zwischen 5 und 6 t ha⁻¹ liegen und im Gesamtprofil zwischen 8 und 9 t ha⁻¹. Eine Ausnahme bildet die Variante P im straßenfernen Block 3, für welche im Gesamtprofil etwas geringere Stickstoffvorräte von 7,63 t ha⁻¹ ermittelt wurden. In den Blöcken 2 (Mitte) und 3 (straßenfern) weist dabei die Variante K im Vergleich die höheren mittleren Gesamtmassen auf, im straßennahen Block 1 hingegen die Variante P.

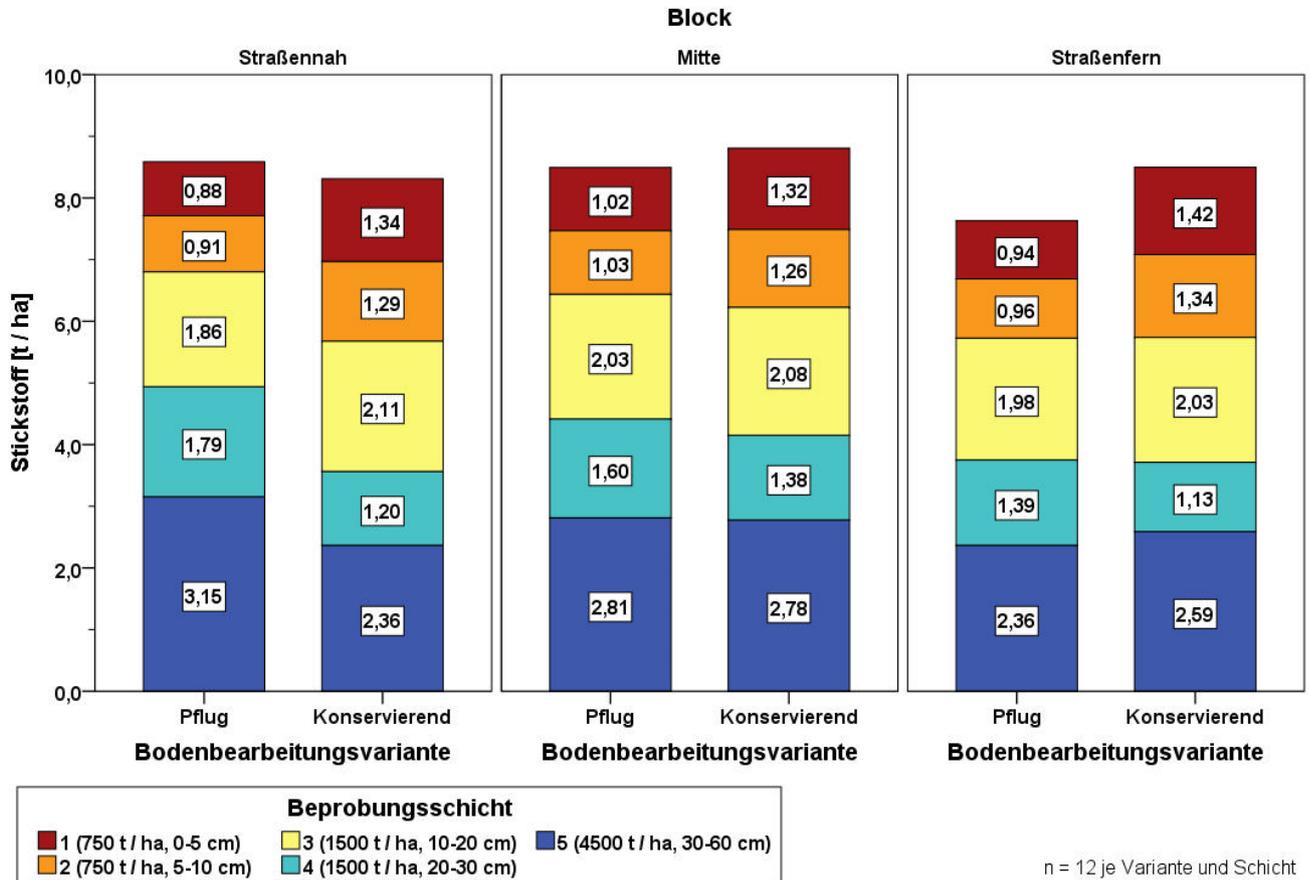


Abbildung 100: Mittlere Stickstoffvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken und Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Methau (4 Beprobungstermine)

In der Variante Grünland (Abbildung 101) liegen die ermittelten mittleren Gesamtmassen hingegen bei 8,42 t ha⁻¹ in der Krume sowie 11,2 t ha⁻¹ im Gesamtprofil.

Im Vergleich zu den mittleren Kohlenstoffvorräten entspricht der Unterschied von ca. 10 % zwischen den beiden Varianten P und K in Block 3 (straßenfern) dem relativen Unterschied beim Kohlenstoff. In den Blöcken 1 und 2 hingegen, welche bei den Kohlenstoffvorräten fast exakt gleiche mittlere Werte aufweisen, unterscheiden sich die Ergebnisse für die Stickstoffvorräte von diesen.

Das Grünland weist um ca. 30-40 % höhere mittlere N_T-Vorräte auf als die bewirtschafteten Varianten. Dies ist ein geringerer relativer Unterschied als beim Kohlenstoff mit ca. 50 % höheren Vorräten im Grünland.

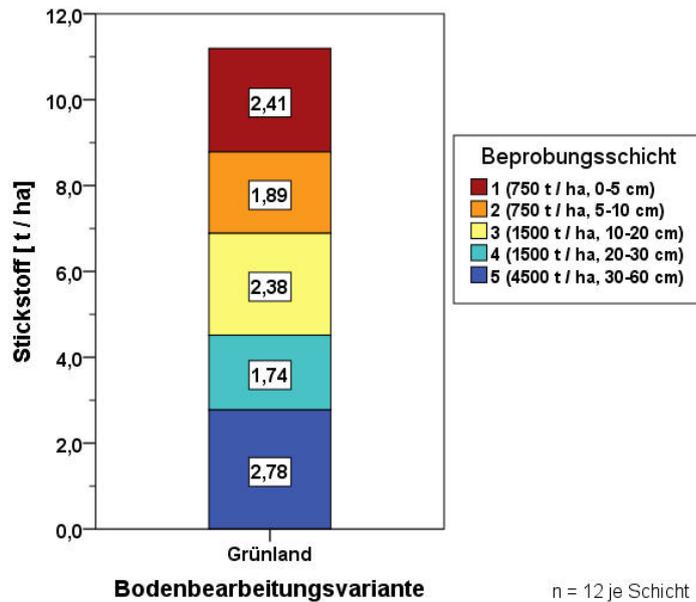


Abbildung 101: Mittlere Stickstoffvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau (4 Beprobungstermine)

5.3.2.1 Korrekturfaktor Grobboden

In Tabelle 11 sind die jeweiligen berechneten N_t -Massen für die Krume (Schichten 1-4), den Unterboden (Schicht 5) sowie das gesamte beprobte Bodenprofil (Schichten 1-5) bei unterschiedlichen Grobbodenanteilen dargestellt. Die Berechnungsgrundlage (Skelettanteil = 0 %) bilden die ermittelten Gesamtvorräte (s.o.).

Tabelle 11: Nach potentiellen Skelettanteilen korrigierte Stickstoffvorräte innerhalb der einzelnen Blöcke und Bodenbearbeitungspartellen am Standort Methau

Beprobungsschicht	Skelettanteil	Block 1		Grünland	Block 2		Block 3	
		P	K	G	P	K	P	K
Masse-%		Stickstoffvorräte [t ha ⁻¹]						
1-4 (4500 t / ha)	0	5,44	5,94	8,42	5,68	6,04	5,27	5,92
5 (4500 t / ha)	0	3,15	2,36	2,78	2,81	2,78	2,36	2,59
1-5 (9000 t / ha)	0	8,59	8,30	11,20	8,49	8,82	7,63	8,51
1-4 (4500 t / ha)	5	5,17	5,64	8,00	5,40	5,74	5,01	5,62
5 (4500 t / ha)	5	2,99	2,24	2,64	2,67	2,64	2,24	2,46
1-5 (9000 t / ha)	5	8,16	7,89	10,64	8,07	8,38	7,25	8,08
1-4 (4500 t / ha)	10	4,90	5,35	7,58	5,11	5,44	4,74	5,33
5 (4500 t / ha)	10	2,84	2,12	2,50	2,53	2,50	2,12	2,33
1-5 (9000 t / ha)	10	7,73	7,47	10,08	7,64	7,94	6,87	7,66
1-4 (4500 t / ha)	15	4,62	5,05	7,16	4,83	5,13	4,48	5,03
5 (4500 t / ha)	15	2,68	2,01	2,36	2,39	2,36	2,01	2,20
1-5 (9000 t / ha)	15	7,30	7,06	9,52	7,22	7,50	6,49	7,23
1-4 (4500 t / ha)	20	4,35	4,75	6,74	4,54	4,83	4,22	4,74
5 (4500 t / ha)	20	2,52	1,89	2,22	2,25	2,22	1,89	2,07
1-5 (9000 t / ha)	20	6,87	6,64	8,96	6,79	7,06	6,10	6,81
1-4 (4500 t / ha)	30	3,81	4,16	5,89	3,98	4,23	3,69	4,14
5 (4500 t / ha)	30	2,21	1,65	1,95	1,97	1,95	1,65	1,81
1-5 (9000 t / ha)	30	6,01	5,81	7,84	5,94	6,17	5,34	5,96
1-4 (4500 t / ha)	50	2,72	2,97	4,21	2,84	3,02	2,64	2,96
5 (4500 t / ha)	50	1,58	1,18	1,39	1,41	1,39	1,18	1,30
1-5 (9000 t / ha)	50	4,30	4,15	5,60	4,25	4,41	3,82	4,26

5.4 C/N-Verhältnis

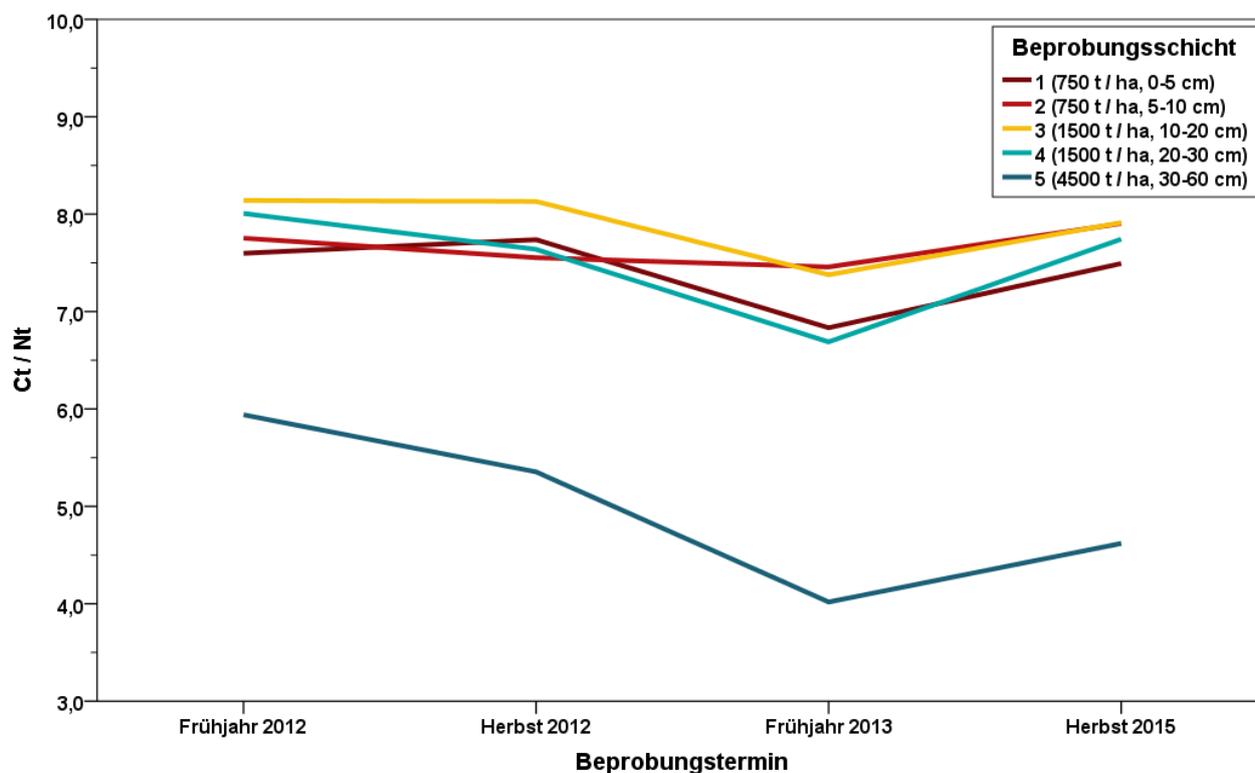
Das C/N- bzw. C_{org}/N_t - Verhältnis von Böden wird häufig als Maß für die Umsatzbedingungen bzw. -geschwindigkeiten der organischen Substanz und somit die Aktivität der Bodenorganismen herangezogen. Ein C/N - Verhältnis um 10 wird dabei als typisch für Ap - Horizonte ertragreicher Böden angegeben (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 306). Böden mit engeren C/N - Verhältnissen (< 10) gelten als aktive bzw. hochaktive Böden, da sie einen höheren Anteil an (mikrobieller) Biomasse aufweisen, die sehr stickstoff-

reich ist. Weitere C/N - Verhältnisse (> 10) hingegen sind typisch für Böden mit hohen Gehalten an unersetzter Pflanzenmasse, z. B. Podsole.

5.4.1 Lüttewitz

5.4.1.1 Basisbeprobungen

Die mittleren C/N - Verhältnisse der oberen vier Beprobungsschichten weisen in der Variante Pflug (P) Werte zwischen 6,5 und 8,5 auf und haben eine weitestgehend parallele zeitliche Dynamik (Abbildung 102). So sind die C/N - Verhältnisse dieser Schichten im Frühjahr und Herbst 2012 annähernd gleich, wobei Schicht 3 mit etwas über 8 das höchste Verhältnis aufweist. In den Schichten 1, 3 und 4 nehmen die C/N - Verhältnisse zum Frühjahr 2013 ab, in der Schicht 2 bleibt es bei ca. 7,5 stabil. Im Herbst 2015 weisen alle vier Schichten wieder höhere C/N - Verhältnisse auf als im Frühjahr 2013. Das C/N - Verhältnis von Schicht 5 liegt zu allen Beprobungsterminen deutlich niedriger als jene der anderen Schichten. Die zeitliche Dynamik ist dabei aber ähnlich: Einer leichten Abnahme von ca. 6 (Frühjahr 2012) auf 5,5 zum Herbst 2012 folgt eine starke Abnahme zum Frühjahr 2013 (4,0). Zum Herbst 2015 liegt das C/N - Verhältnis wieder etwas höher (ca. 4,6).



n = 9 je Schicht und Termin

Abbildung 102: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz

Die C/N - Verhältnisse der fünf Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat (D) sind als Funktion der Tiefe stratifiziert, wie es in dieser Variante auch für die Stoffgehalte typisch ist (Abbildung 103). So weist Schicht 1 zu allen vier Terminen die höchsten C/N - Verhältnisse auf, welche zwischen 8,0 im Frühjahr 2013 und 9,2 im Herbst 2015 schwanken. Die C/N - Verhältnisse von Schicht 2 weisen weniger Schwankungen auf und liegen zu allen Terminen mit Werten zwischen 7,7 und 8,2 zwischen jenen der Schichten 1 und 3 (7,5 - 7,7). Wiederrum niedriger liegen die Verhältnisse in Schicht 4 (6,8 - 7,5) sowie in Schicht 5 (4,7 - 6,0).

Auffällig ist, bei ansonsten recht stabilen Verhältnissen in allen Schichten, die starke Abnahme des C/N - Verhältnisses in Schicht 5 vom Frühjahr zum Herbst 2012. Diese ergibt sich aus der Abnahme des mittleren Kohlenstoffgehaltes von ca. 0,5 auf ca. 0,3 %, welche nicht mit einer Abnahme des Stickstoffgehaltes in der gleichen Größenordnung einhergeht, wodurch sich eine starke Veränderung des C/N - Verhältnisses ergibt. Diese Dynamik könnte ihre Ursache in einem Abbau organischer Substanz (Wurzelnrückstände, etc.) im Unterboden über die Vegetationsperiode haben. Aufgrund der in dieser Schicht geringen absoluten Gehalte an C und N könnte ein Teil der Erklärung aber auch in Unschärfen der Datenerhebung (Beprobung, Analytik) begründet liegen.

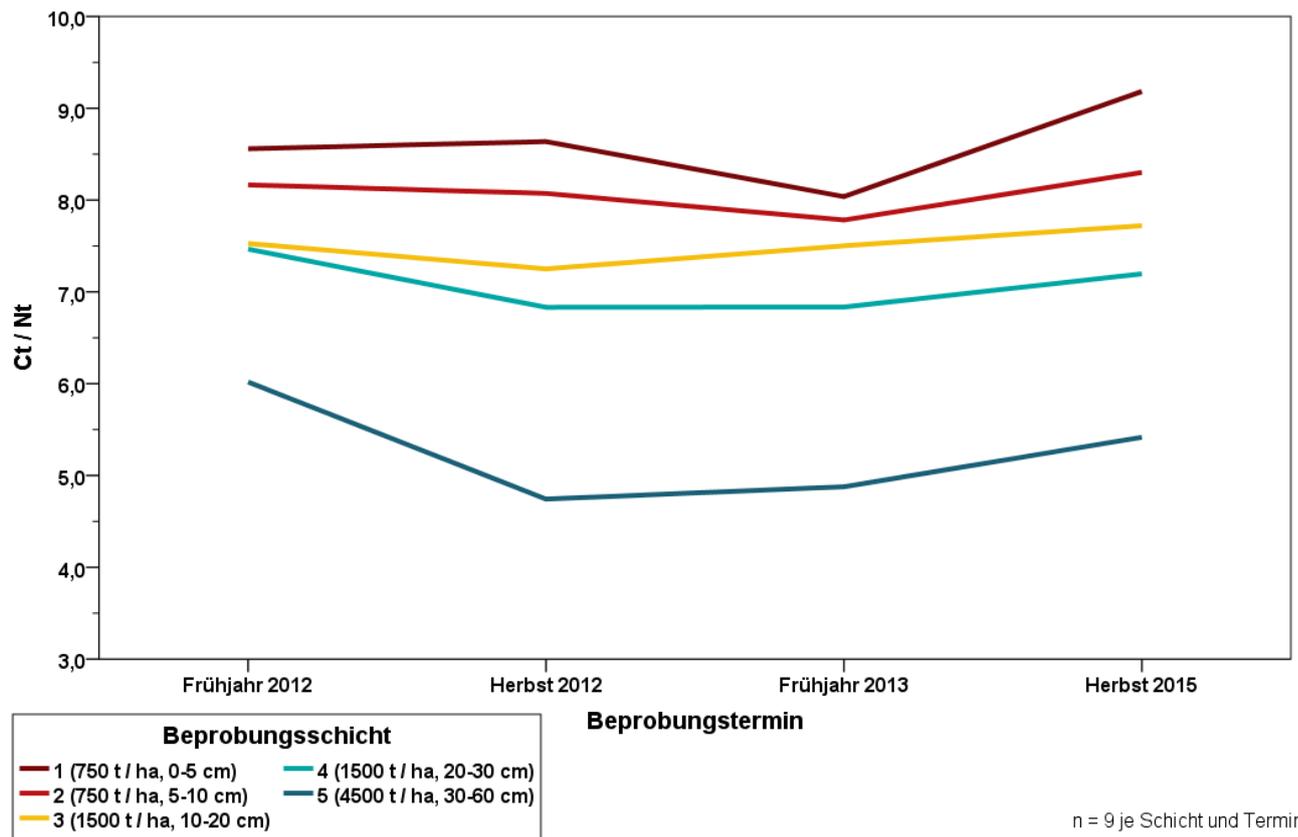


Abbildung 103: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz

Die mittleren C/N - Verhältnisse der Variante Konservierend (K) sind ebenfalls in den fünf Beprobungsschichten als Funktion der Tiefe stratifiziert, allerdings mit stärkeren Schwankungen als in der Variante D. Für die oberen beiden Beprobungsschichten wurden annähernd gleiche Werte bzw. eine paralleler Verlauf (Abbildung 104) mit Werten zwischen 7,7 und 8,7 ermittelt. Wie in den Varianten P und D ist zum Frühjahr 2013 eine Abnahme des C/N - Verhältnisses zu verzeichnen. Die Schichten 3 und 4 weisen in dieser Variante geringere C/N - Verhältnisse von 7,2 - 8,2 (3) bzw. 7,0 - 7,8 (4) auf. Auffällig ist dabei, dass im Gegensatz den oberen Schichten bzw. anderen Varianten in diesen Schichten ein Anstieg des C/N - Verhältnisses zum Frühjahr 2013 ermittelt wurde. Dies gilt ebenso für die Schicht 5, welche in dieser Variante ebenfalls deutlich niedrigere C/N - Verhältnisse (4,3 - 6,3) als die anderen Schichten aufweist. Auch in dieser Variante wurde für Schicht 5 die bereits diskutierte deutliche Abnahme des C/N - Verhältnisses vom Frühjahr zum Herbst 2012 ermittelt.

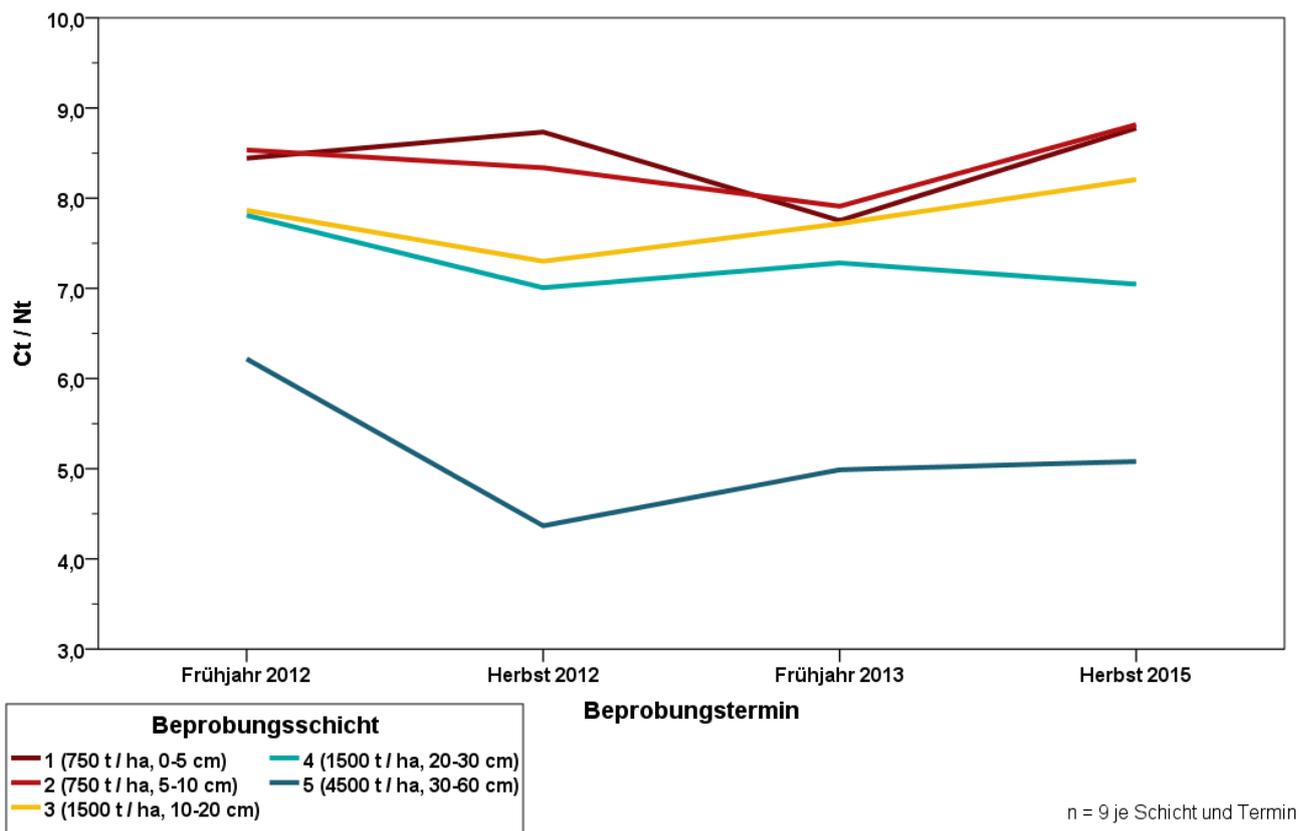


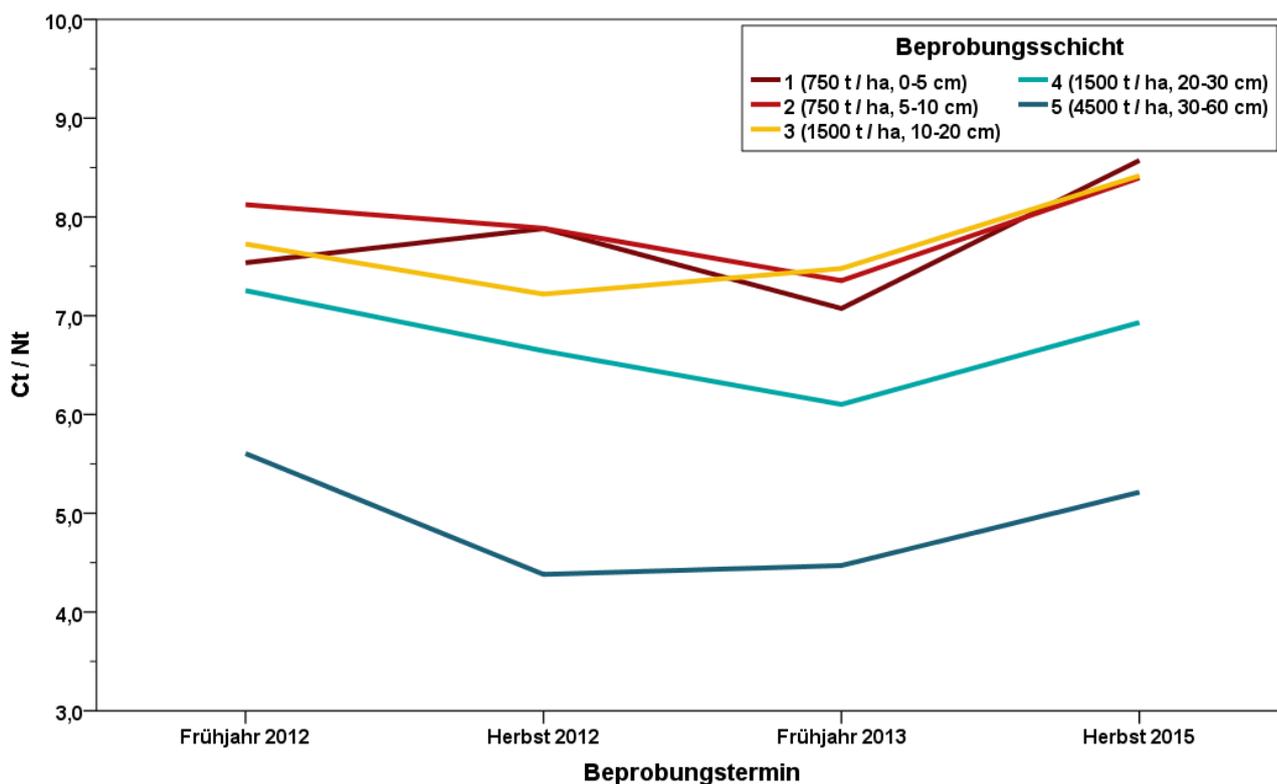
Abbildung 104: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz

Anhand der relativ homogenen mittleren C/N - Verhältnisse der oberen drei Schichten in der Variante Konservierend Locker (KL) (Abbildung 105) zeigt sich die tiefergehende Bodenbearbeitung im Vergleich zur Variante K. Die drei Schichten weisen bei Werten zwischen 7,0 und 8,5 einen relativ parallelen zeitlichen Verlauf der C/N - Verhältnisse auf, welcher insbesondere durch einen deutlichen Anstieg zum Herbst 2015 gekennzeichnet ist. Schicht 4 zeigt bei C/N - Verhältnissen von 6,2 bis 7,2 einen ähnlichen zeitlichen Verlauf derselben. Auch in dieser Varianten liegen die mittleren C/N -Verhältnisse der Schicht 5 mit Werten zwischen 4,4 und 5,6 deutlich niedriger als jene der anderen Schichten, der zeitliche Verlauf entspricht jenem der anderen Varianten.

Insgesamt liegen die mittleren C/N - Verhältnisse aller fünf Beprobungsschichten zu allen Zeitpunkten in allen Varianten unterhalb des in der Literatur angegebenen typischen Wertes für Ap-Horizonte von 10,0 und die Böden am Standort können damit als hochaktiv gelten. Dies ist vermutlich größtenteils auf die mineralische Stickstoffdüngung zurückzuführen, die zu sehr guten Umsatzbedingungen im Boden führt.

Die C/N - Verhältnisse der oberen vier Beprobungsschichten sind in diesem Sinne, je nach Termin, als ein Ergebnis der Bodenbearbeitung sowie der Einmischung von Mineraldüngern und Erntereste zu interpretieren. Je nach Bodenbearbeitungsintensität und -tiefe kommt es dabei auch zu einer regelmäßigen Homogenisierung der C/N - Verhältnisse. Die engen C/N - Verhältnisse im Unterboden (Schicht 5) sind vermutlich weniger ein Effekt der Stickstoffverfügbarkeit sondern vielmehr geringen Humus- bzw. Kohlenstoffmassen. Die durchgehend höheren C/N - Verhältnisse im Frühjahr 2012 könnten einen Effekt der Fruchtfolge darstellen, welche durch den Anbau der tiefwurzelnden Zuckerrübe im Jahr 2011 größere Mengen Kohlenstoff in Form von Wur-

zelerückständen und -exsudaten in den Unterboden einbrachte. In diesem Sinne könnte auch der Anstieg zum Herbst 2015 interpretiert werden, wobei dieser Termin ca. ein Jahr nach der letzten Rübenernte liegt.



n = 9 je Schicht und Termin

Abbildung 105: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz

5.4.1.2 Umbruchversuch

Vergleicht man die mittleren C/N - Verhältnisse der drei Varianten im Verlauf des Umbruchversuches, so lassen sich bis auf die Termine im Frühjahr 2014 und Frühjahr 2015 kaum Unterschiede zwischen den Varianten feststellen (Abbildung 106).

Liegen die C/N - Verhältnisse im Herbst 2013 in allen drei Varianten noch einheitlich bei ca. 6,5, zeigen sich im Frühjahr 2014 deutlich differenzierte Verhältnisse von ca. 7,6 (D), 6,6 (DP) und 6,1 (P). Im Herbst haben sich die Verhältnisse in den drei Varianten einander wieder angeglichen, liegen allerdings mit Werten von ca. 7,2 - 7,3 auf einem höheren Niveau als im Herbst 2013. Zum Frühjahr 2015 kommt es erneut zu einer leichten Differenzierung der C/N - Verhältnisse in der gleichen Reihenfolge wie im Frühjahr 2014 (D > DP > P), die Unterschiede sind allerdings wesentlich weniger stark ausgeprägt.

Die Ausdifferenzierung der C/N - Verhältnisse jeweils zum Frühjahr könnte als Indiz für unterschiedliche bodenbearbeitungsbedingte Umsatzdynamiken über den Winter bzw. zum Beginn der Vegetationsperiode sprechen. Diese gleichen sich aber im Verlauf der Vegetationsperiode bis zum Herbst wieder aus bzw. an.

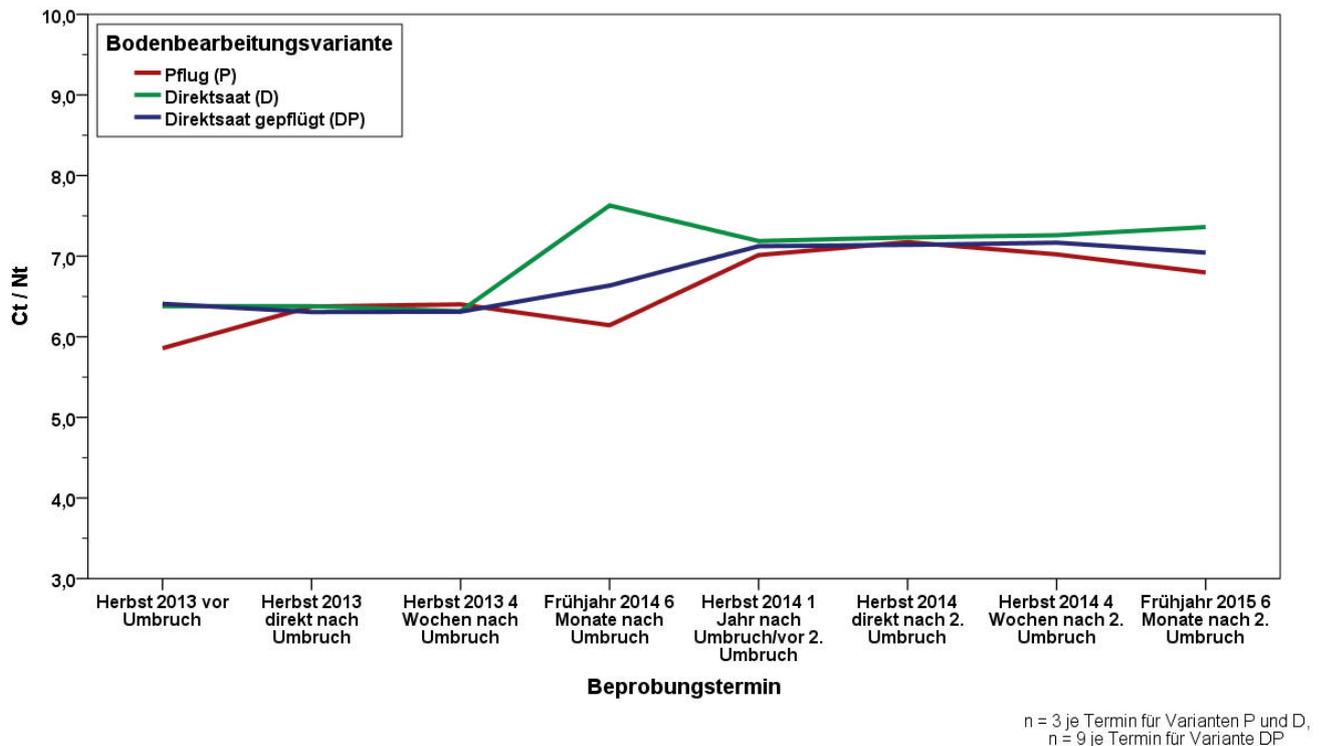


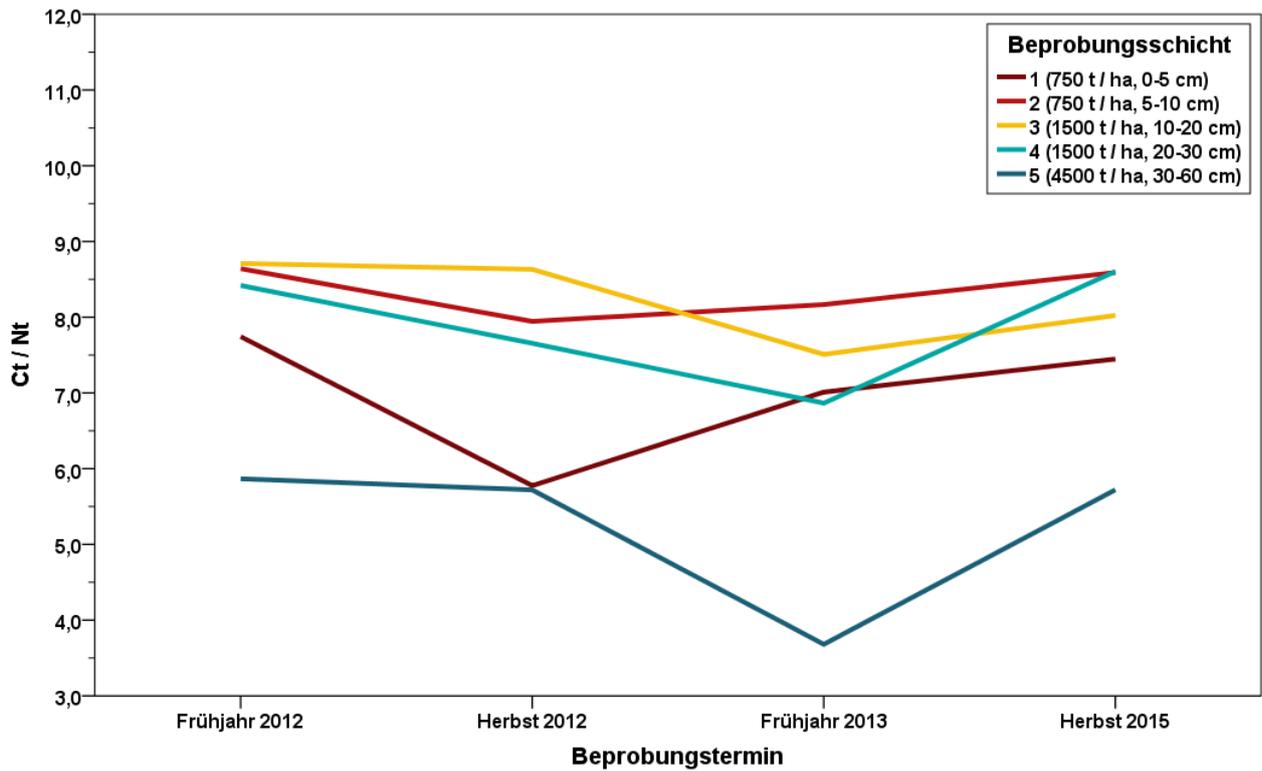
Abbildung 106: Mittlere C/N-Verhältnisse im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Rahmen des Umbruchversuches am Standort Lüttewitz

5.4.2 Methau

5.4.2.1 Block 1

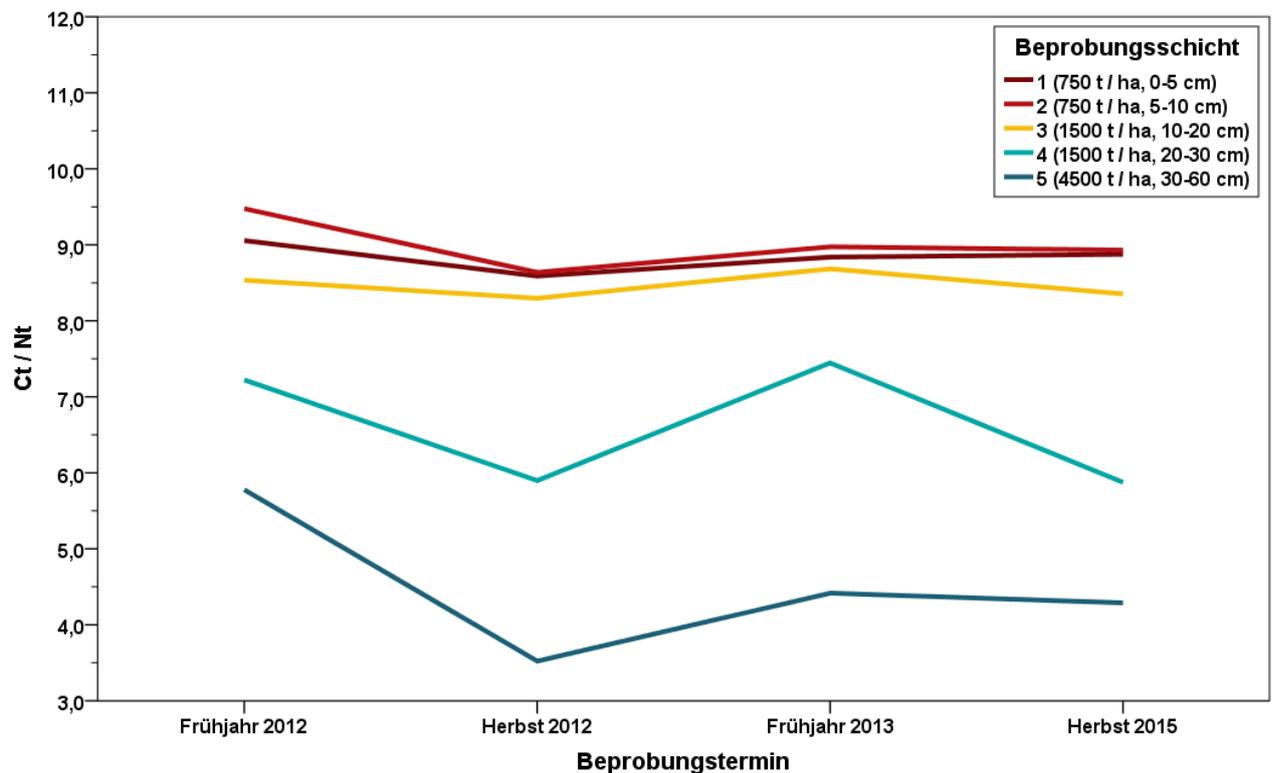
Die mittleren C/N - Verhältnisse in den 5 Beprobungsschichten in der Variante Pflug (P) im Block 1 ist in Abbildung 107 dargestellt. Diese liegen zu Beginn der Untersuchung im Frühjahr 2012 bei 8 - 9 in der Krume (Schicht 1 - 4). Zum Herbst 2012 hat sich das Verhältnis insbesondere in Schicht 1 deutlich verengt und liegt bei 6. Für die nachfolgenden Termine im Frühjahr 2013 und Herbst 2015 wurden für die Krume C/N - Verhältnisse zwischen 7,5 und 8,5 ermittelt mit relativ geringen Unterschieden zwischen den Schichten. In Schicht 5 (Unterboden) liegt das Verhältnis an beiden Terminen im Jahr 2012 bei ca. 6 und verengt sich zum Frühjahr 2013 auf 4. Im Herbst 2015 liegt es wieder bei 6.

In der Variante Konservierend (K) im gleichen Block (Abbildung 108), welche bis auf die Bodenbearbeitung gleich bewirtschaftet wird wie die Variante P, liegen die C/N - Verhältnisse in den oberen drei Schichten im gesamten Untersuchungszeitraum sehr stabil bei 8,5 - 9,0 (Ausnahme: Schicht 2, Frühjahr 2012: 9,5). Größere Schwankungen treten nur in den Schichten 4 und 5 auf. Dabei fällt auf, dass das Verhältnis sich jeweils zu den Herbstterminen verengt und in Schicht 4 Werte um 6 bzw. in Schicht 5 Werte zwischen 3,5 und 4,0 erreicht. Für die Frühjahrstermine wurden hingegen jeweils weitere C/N - Verhältnisse ermittelt (Schicht 4: 7,5; Schicht 5: 5,5 - 6,0). Eine Ausnahme hiervon bildet Schicht 5 im Frühjahr 2013, in welchem ein den Herbstterminen vergleichbarer Wert von 4,5 ermittelt wurde.



n = 3 je Schicht und Termin

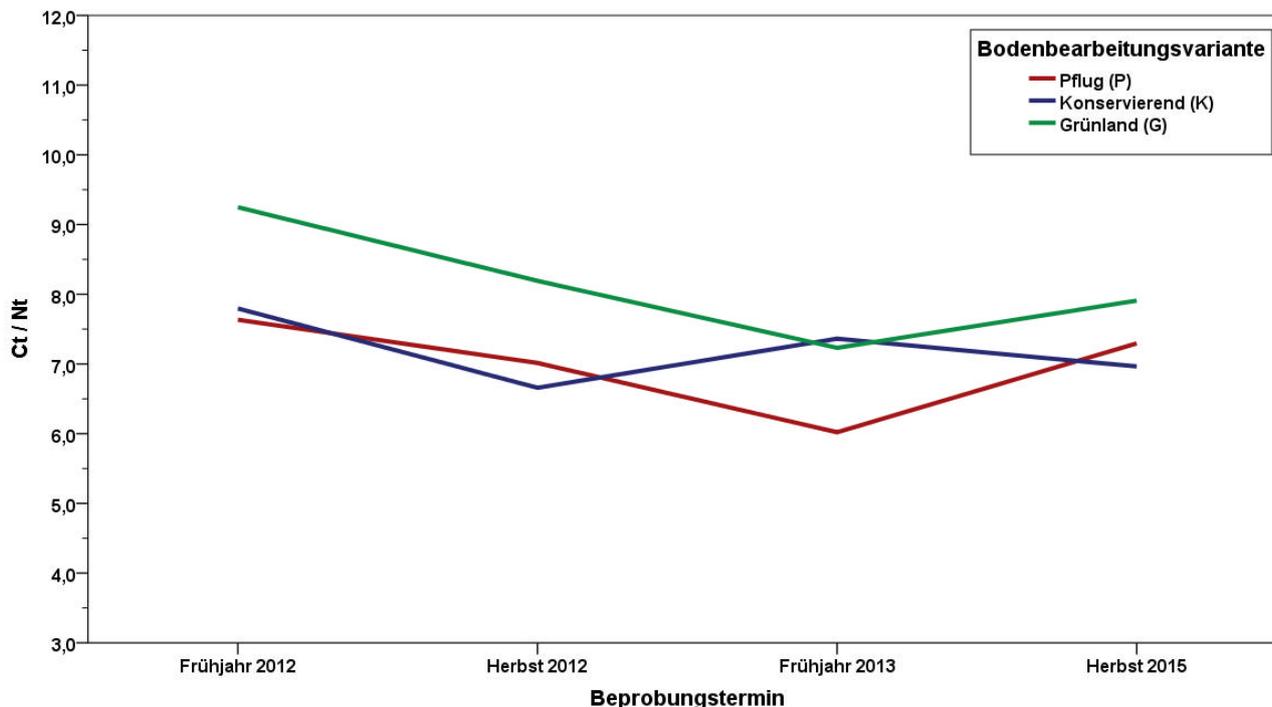
Abbildung 107: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 1 am Standort Methau



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 108: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 1 am Standort Methau

Zudem wurde das mittlere C/N - Verhältnis für das Gesamtprofil im Vergleich zur Variante Grünland (G) berechnet (Abbildung 109). Dabei weisen die beiden bewirtschafteten Varianten im Frühjahr 2012 Werte von 7,5 bis 8,0 auf, im Gegensatz zu einem Wert von 9,25 im Grünland. Alle drei Variante zeigen eine starke Verengung des C/N - Verhältnisses zum Herbst 2012 und, mit Ausnahme der Variante K, auch weiter zum Frühjahr 2013. Dabei werden im Frühjahr 2013 Werte von 6,0 (P) bzw. 7,2 - 7,3 (G, K) erreicht. Im Herbst 2015 liegt in den Varianten P und G wieder ein weiteres C/N - Verhältnis vor, mit Werten von 7,25 (P) bzw. 8 (G). Wie bereits im Herbst 2012 weist die Variante K zu diesem Termin das engste Verhältnis auf (7,0).



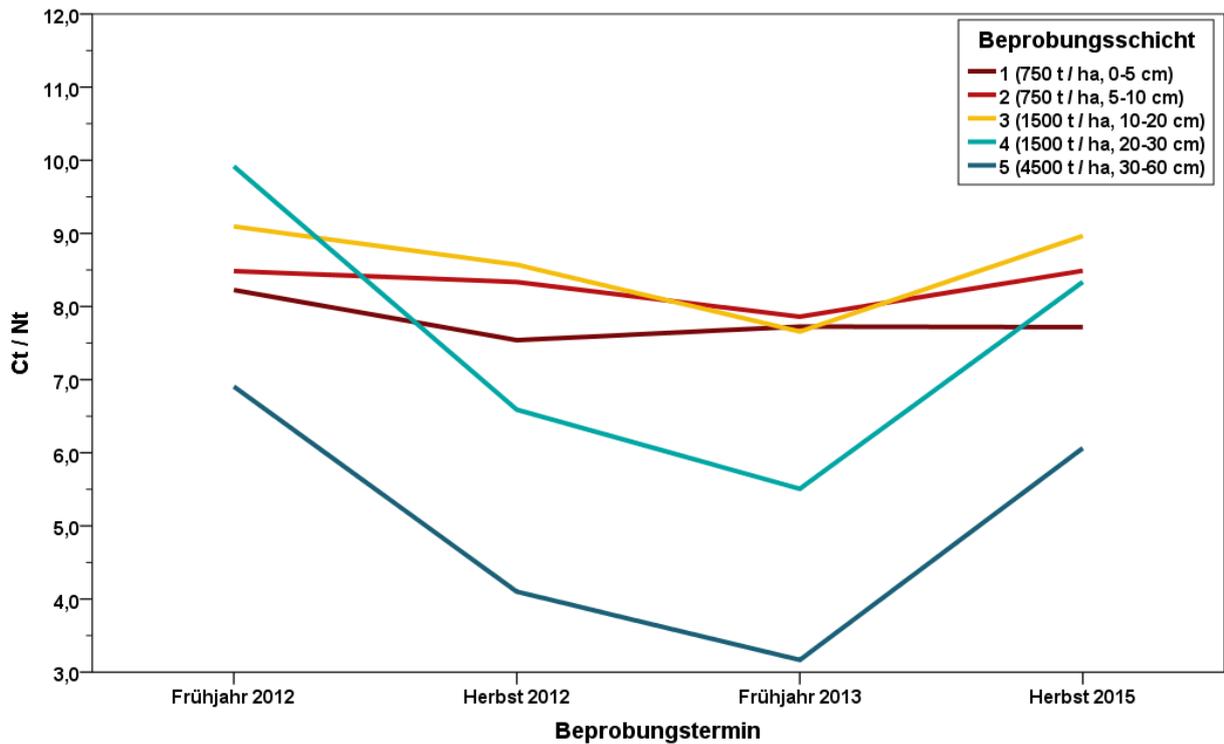
N = 3 je Variante und Termin

Abbildung 109: Mittleres C/N-Verhältnis im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 1 am Standort Methau

5.4.2.2 Block 2

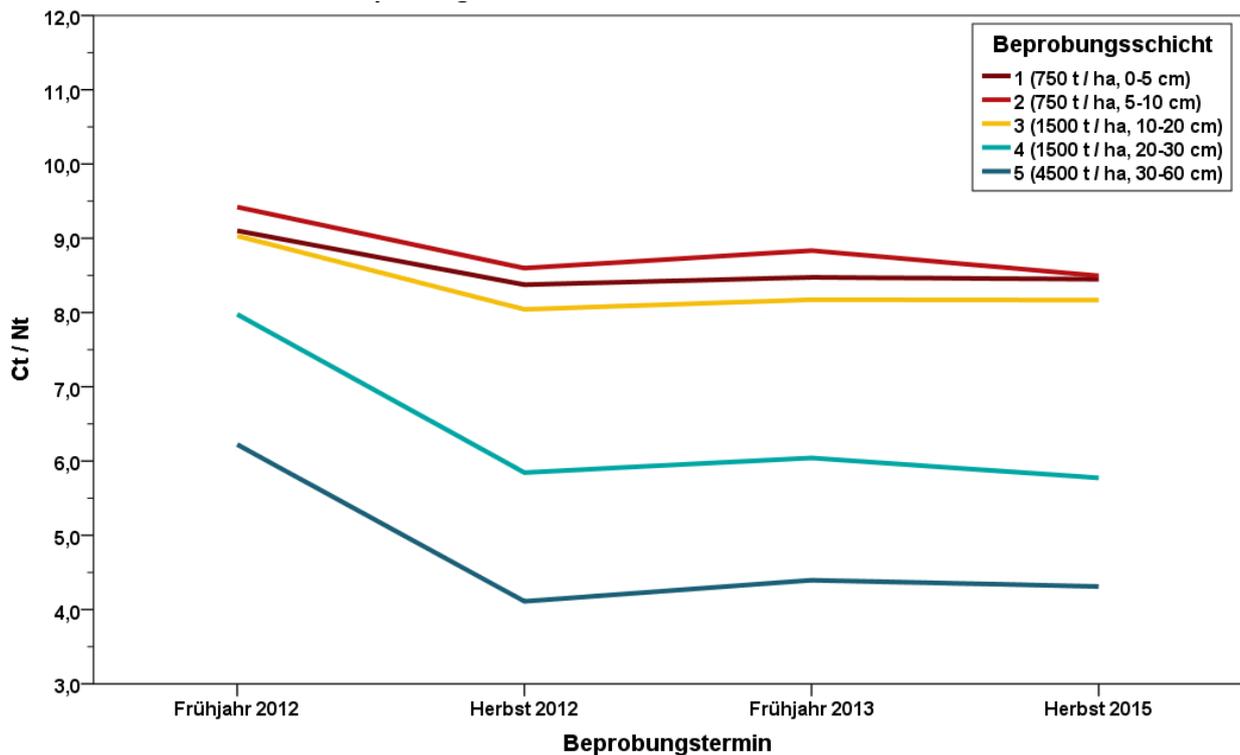
Die C/N - Verhältnisse in der Variante Pflug (P) im Block 2 liegen in den oberen beiden Schichten über den Untersuchungszeitraum relativ stabil bei 7,5 - 8,5 (Abbildung 110). Auch in Schicht 3 sind die zeitlichen Schwankungen relativ gering, wobei für das Frühjahr 2012 und den Herbst 2015 Werte über 9,0 ermittelt wurden, für das Frühjahr 2013 hingegen ein Wert von 7,5. Die erkennbar größten Schwankungen traten in den Schichten 4 und 5, in welchen sich die Verhältnisse von 10,0 (Schicht 4) bzw. 7,0 (Schicht 5) im Verlauf des Jahres 2012 sowie weiter bis zum Frühjahr 2013 auf 5,5 (Schicht 4) bzw. 3,1 (Schicht 5) verengten. Im Herbst 2015 lagen sie hingegen nur geringfügig niedriger als zu Beginn der Untersuchung (Schicht 4: 8,5; Schicht 5: 6,1).

In der Variante Konservierend (K) in diesem Block (Abbildung 111) weisen die Schichten 1 - 3, ähnlich wie in Block 1, ebenfalls kaum Schwankungen im Verlauf der Termine und stabile Werte von 8,0 - 9,0 auf. Allerdings liegen diese im Frühjahr 2012 etwas höher (9,0 - 9,5) und es kommt zu einer leichten Abnahme im Verlauf des Jahres 2012. Deutlich stärker ausgeprägt ist diese Abnahme in den Schichten 4 und 5, von ca. 8,0 (Schicht 4) bzw. 6,1 (Schicht 5) auf 6,0 bzw. 4,0. Zu den nachfolgenden Terminen sind die C/N - Verhältnisse in diesen Schichten auf diesem Niveau stabil.



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 110: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 2 am Standort Methau

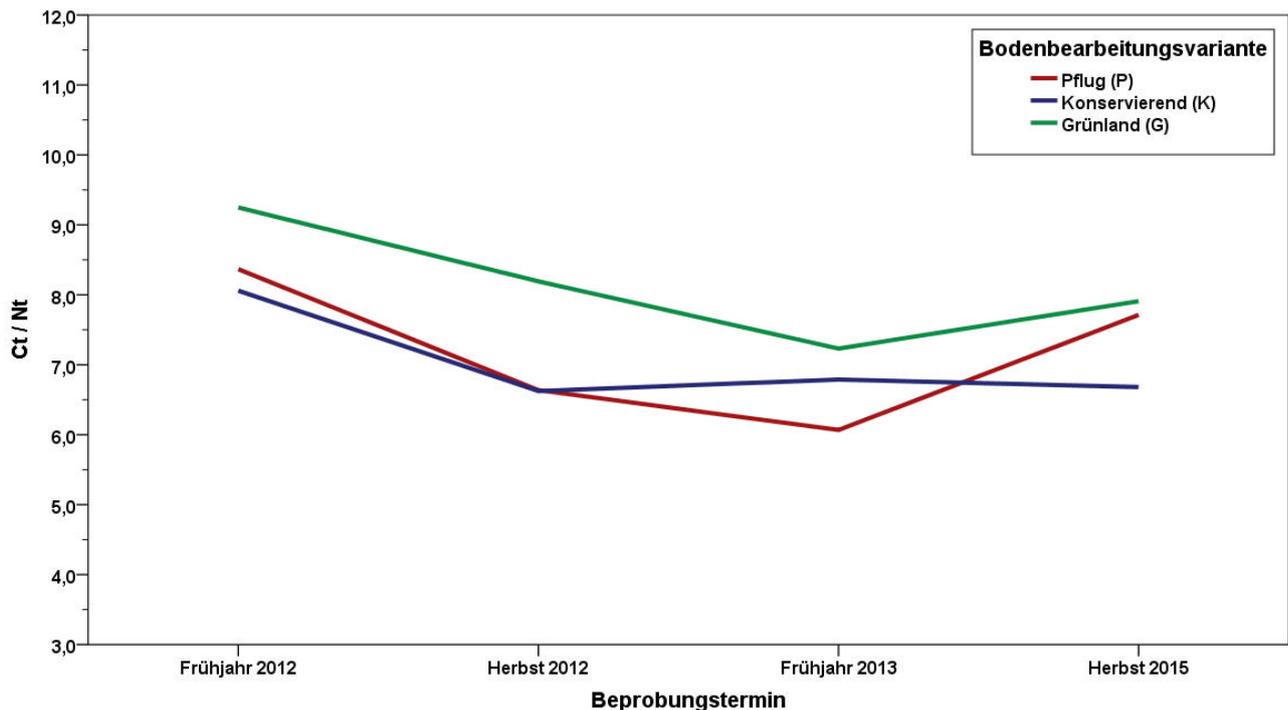


n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 111: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 2 am Standort Methau

Bei den für das Gesamtprofil ermittelten C/N - Verhältnissen (Abbildung 112) unterscheidet sich Block 2 von Block 1 insofern, als der Anstieg vom Herbst 2012 zum Frühjahr 2013 in der Variante K weniger stark ausgeprägt ist und im Frühjahr 2013 mit einem Wert von 6,8 zwischen den Varianten P und G liegt. Weiterhin ergibt sich für den Herbst 2015 ein deutlich größerer Unterschied zwischen der Variante P (7,7) und der Variante K (6,7) als in Block 1.

Diese starke Einengung des C/N - Verhältnisses im Verlauf des Jahres 2012 könnte in diesem Block mit der Kulturart Mais zusammenhängen, welche als sog. Humuszehrer zu einer verstärkten Mineralisierung organischer Substanz beigetragen hat. Zu klären ist, warum dieser Effekt nach den vorliegenden Ergebnissen insbesondere in den Schichten 4 und 5 zum Tragen kam. Weiterhin ist einschränkend zu diesem Erklärungsansatz zu erwähnen, dass auch im Grünland sowie in den anderen Blöcken C - Verluste samt einer Einengung des C/N - Verhältnisses ermittelt wurden.

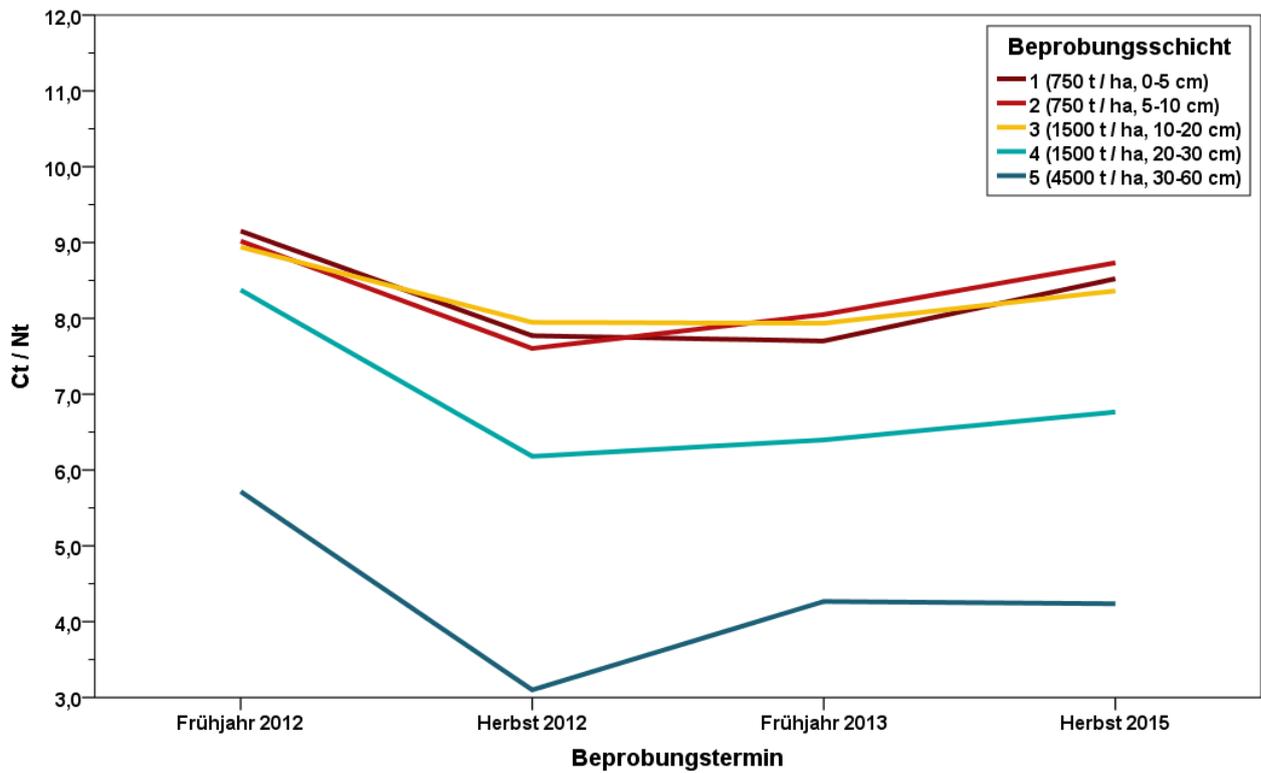


N = 3 je Variante und Termin

Abbildung 112: Mittleres C/N-Verhältnis im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 2 am Standort Methau

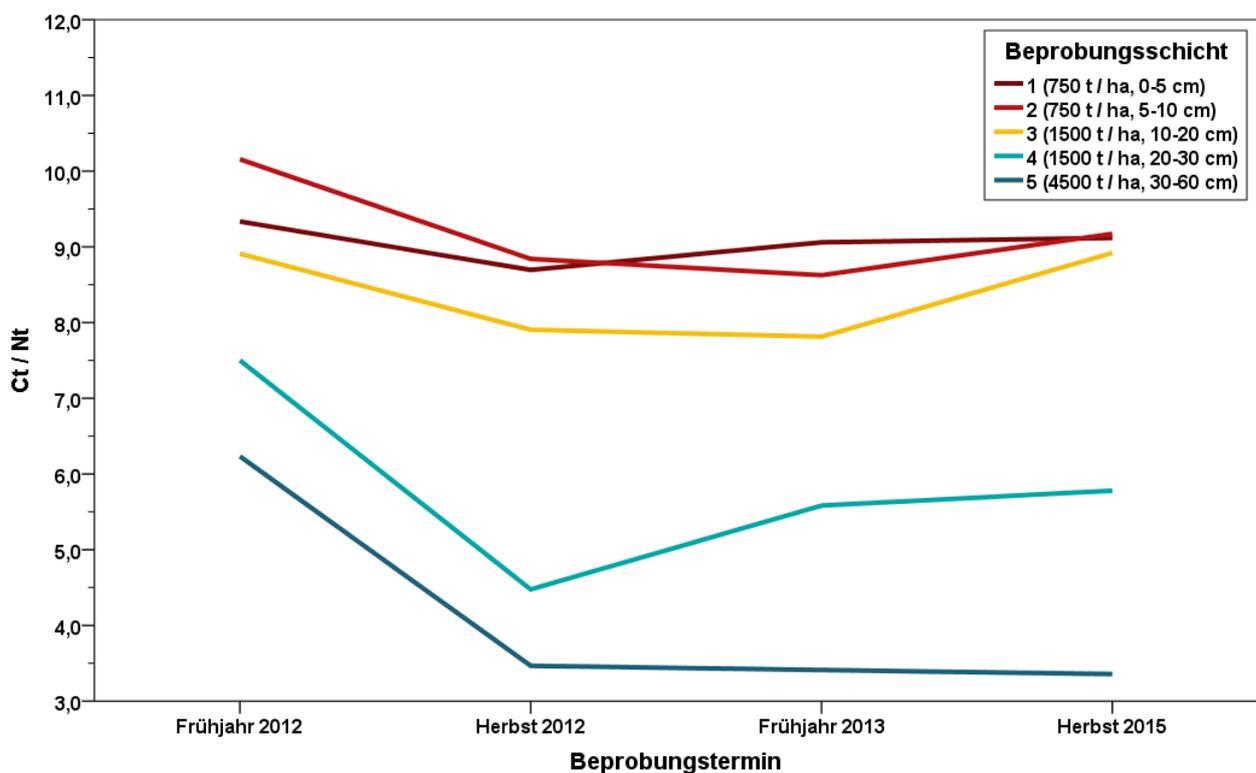
5.4.2.3 Block 3

Im Block 3 weisen die C/N - Verhältnisse der oberen drei Beprobungsschichten in der Variante Pflug (P) (Abbildung 113) ähnlich wie in den anderen beiden Blöcken zu allen Terminen kaum Unterschiede zueinander auf, wobei ein zeitlicher Verlauf mit einer leichten Abnahme vom Frühjahr 2012 (9,0) zum Herbst 2012 (8,0) sowie im weiteren Verlauf ein leichter Anstieg erkennbar ist. Im Herbst 2015 liegen sie in allen drei Schichten bei ca. 8,5. In den Schichten 4 und 5 wurde, wiederum analog zu den anderen Blöcken, eine deutliche Abnahme vom Frühjahr zum Herbst 2012 ermittelt, gefolgt von einem leichten Anstieg bzw. einer Stabilisierung der Werte im weiteren Verlauf der Untersuchungen. Trotz der wendenden Bodenbearbeitung mit dem Pflug bis ca. 25 - 30 cm (Schicht 4) liegen die C/N - Verhältnisse in dieser Tiefe zu allen Terminen um den Wert 1 - 2 niedriger als in der Oberkrume (Schichten 1 - 3).



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 113: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug im Block 3 am Standort Methau

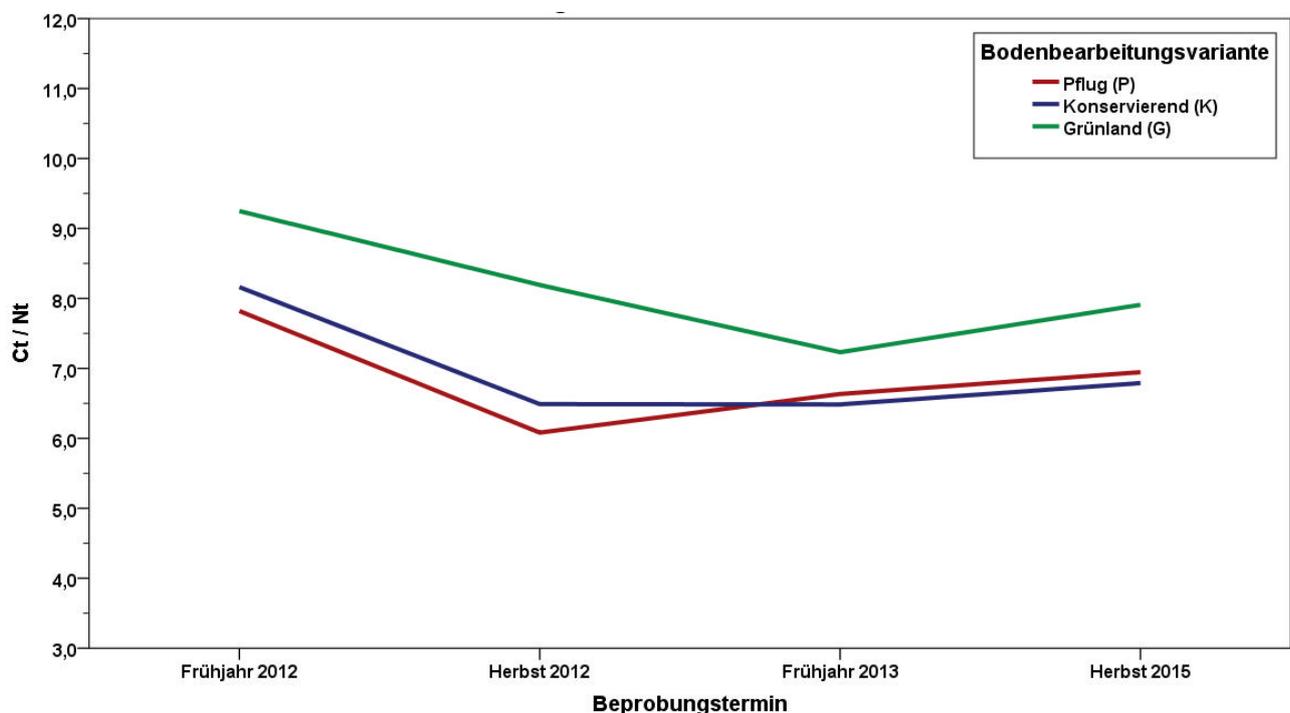


n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 114: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Konservierend im Block 3 am Standort Methau

In der Variante Konservierend (K) in diesem Block weist Schicht 3 zu allen Terminen etwas geringere C/N - Verhältnisse als die Schichten 1 und 2 (Abbildung 114), wobei dieser Unterschied deutlicher ausgeprägt ist als in den anderen beiden Blöcken. Wie in den anderen Varianten und Blöcken verengt sich das Verhältnis in allen Schichten vom Frühjahr zum Herbst 2012, wobei diese Entwicklung in den Schichten 4 und 5 am stärksten ausgeprägt ist. Dabei weist Schicht 5 in dieser Variante bzw. diesem Block mit Werten von 3,5 für die Termine Herbst 2012 - Herbst 2015 die insgesamt geringsten C/N - Verhältnisse auf. In den anderen Schichten steigen diese nach dem Herbst 2012 wieder leicht an, erreichen allerdings nur in den Schichten 1 und 3 das Niveau aus dem Frühjahr 2012.

Für die mittleren C/N - Verhältnisse im Gesamtprofil ergibt sich in Block 3 (Abbildung 115) eine etwas andere Dynamik als in den anderen Blöcken. So weisen die beiden bewirtschafteten Varianten im Herbst 2012 sehr enge Verhältnisse von 6,5 (K) bzw. 6,0 (P) auf, welche sich aber in beiden Varianten bereits vom Herbst 2012 zum Frühjahr 2013 wieder weiten und sowohl im Frühjahr 2013 als auch im Herbst 2015 dicht beieinander liegen. Die sehr analoge Entwicklung weist darauf hin, dass diese Dynamik hauptsächlich ein Effekt der Kulturarten (2012: WW; 2013: WG) und der Düngung und weniger der Bodenbearbeitung ist.

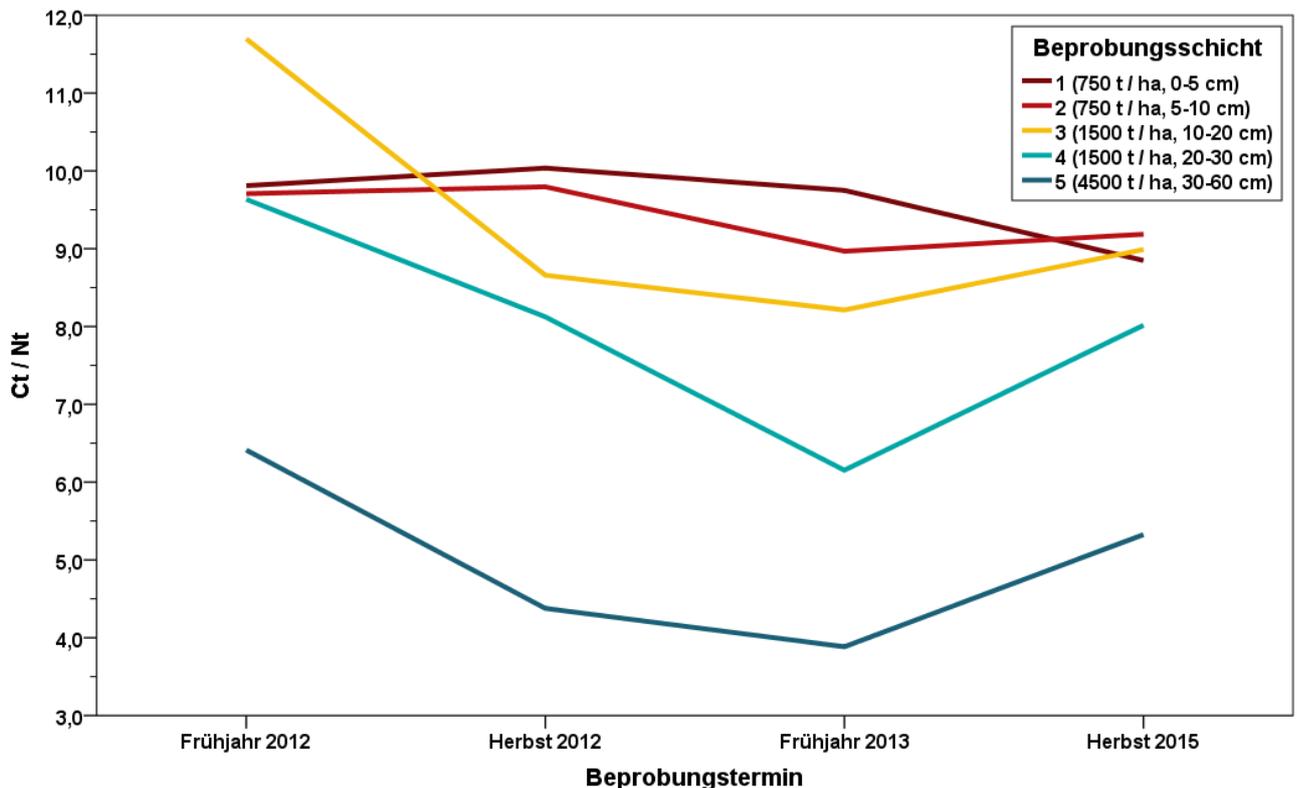


N = 3 je Variante und Termin

Abbildung 115: Mittleres C/N-Verhältnis im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, im Block 3 am Standort Methau

5.4.2.4 Grünland

Im Grünland weisen die Schichten 1 und 2 relativ stabile C/N - Verhältnisse von 9,0 - 10,0 auf (Abbildung 116). Für das Frühjahr 2012 wurde für Schicht 3 mit 11,7 das höchste C/N - Verhältnis aller Schichten und Varianten ermittelt, welches aber zu den nachfolgenden drei Terminen auf einem relativ stabilen Wert von 8,5 - 9,0 liegt. Auch in dieser Variante sind in den Schichten 4 und 5 deutliche Verengungen der C/N - Verhältnisse im Verlauf des Jahres 2012 und weiter zum Frühjahr 2013 ermittelt worden, wobei diese im Frühjahr 2013 bei ca. 6 (Schicht 4) bzw. 4 (Schicht 5) liegen. Bis zum Herbst 2015 haben sich diese auf Werte von ca. 8 (Schicht 4) bzw. 5 (Schicht 5) geweitet.



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 116: C/N-Verhältnisse in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Grünland am Standort Methau

5.5 pH-Wert

Der pH - Wert gibt den negativen dekadischen Logarithmus der Wasserstoffionen - Aktivität im Boden an und ist damit ein Maß für die Bodenacidität. Er steht mit vielen Eigenschaften und Funktionen der Böden in enger Verbindung und ist, auch aufgrund seiner einfachen Messbarkeit, eine der wichtigsten und am häufigsten verfügbaren Bodenkenngrößen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 129).

In humiden Klimaten dominiert natürlicherweise ein langsamer Prozess der Versauerung des Bodens als Folge der Auswaschung von Basen. Dieser Versauerung, die durch landwirtschaftliche Nutzung nebst Ernteentzügen häufig noch beschleunigt wird, kann durch die Zufuhr von basischen Stoffen (Kalkung) entgegengewirkt werden, was je nach pH - Wert und Menge des Kalkdüngers zu einer erheblichen (kurz- und mittelfristigen) Ertragsverbesserung führen kann.

Im Rahmen der Umsetzung der Düngeverordnung (LFULG 2007) wurden dabei im Freistaat Sachsen fünf Gehaltsklassen (A - E) mit den folgenden Grenzen definiert (für Ackerland mit Humusgehalte < 4 % und die Bodenart Lehm):

- A: pH < 5,3
- B: pH 5,3 - 6,2
- C: pH 6,3 - 7,0
- D: pH 7,1 - 7,4
- E: pH > 7,4

5.5.1 Lüttewitz

Dem natürlichen und bewirtschaftungsbedingten Prozess der Bodenversauerung wird in Lüttewitz durch regelmäßiges Kalken mit Carbokalk zur Aussaat Zuckerrübe entgegengewirkt. Im Untersuchungszeitraum fand eine solche Kalkung am 30.09.2013 statt, dabei wurden ca. 128 dt ha⁻¹ ausgebracht, was bei einem CaO - Gehalt von 26 - 32 % (WASNER 2009: 24) einer CaO - Masse von ca. 35-40 dt ha⁻¹ entspricht.

Die pH-Werte der Variante Pflug (P) (Abbildung 117) liegen in allen fünf Beprobungsschichten über alle Termine im Bereich zwischen 6,3 und 7,5 und damit in den GHK C und D. Die Schwankungen innerhalb der Schichten sind dabei in der obersten Schicht am größten. Aufgrund der Durchmischung im Rahmen der Bodenbearbeitung kann aber allgemein von homogenen und für das Pflanzenwachstum und die Nährstoffversorgung optimalen Verhältnissen in der Krume bzw. in den oberen 9000 t ha⁻¹ Boden gesprochen werden.

In der Variante Direktsaat (D) (Abbildung 118) sind die Streuungen innerhalb der Beprobungsschichten geringer als in der Variante P. Die Werte schwanken insgesamt zwischen 6,6 und 7,6. Zudem hat sich eine leichte Stratifizierung ausgebildet, welche mit der Tiefe leicht abnehmende pH - Werte zur Folge hat. Damit liegen die meisten Werte in den oberen drei Schichten noch in der GHK D, jene der Schichten 4 und 5 bereits in der GHK C.

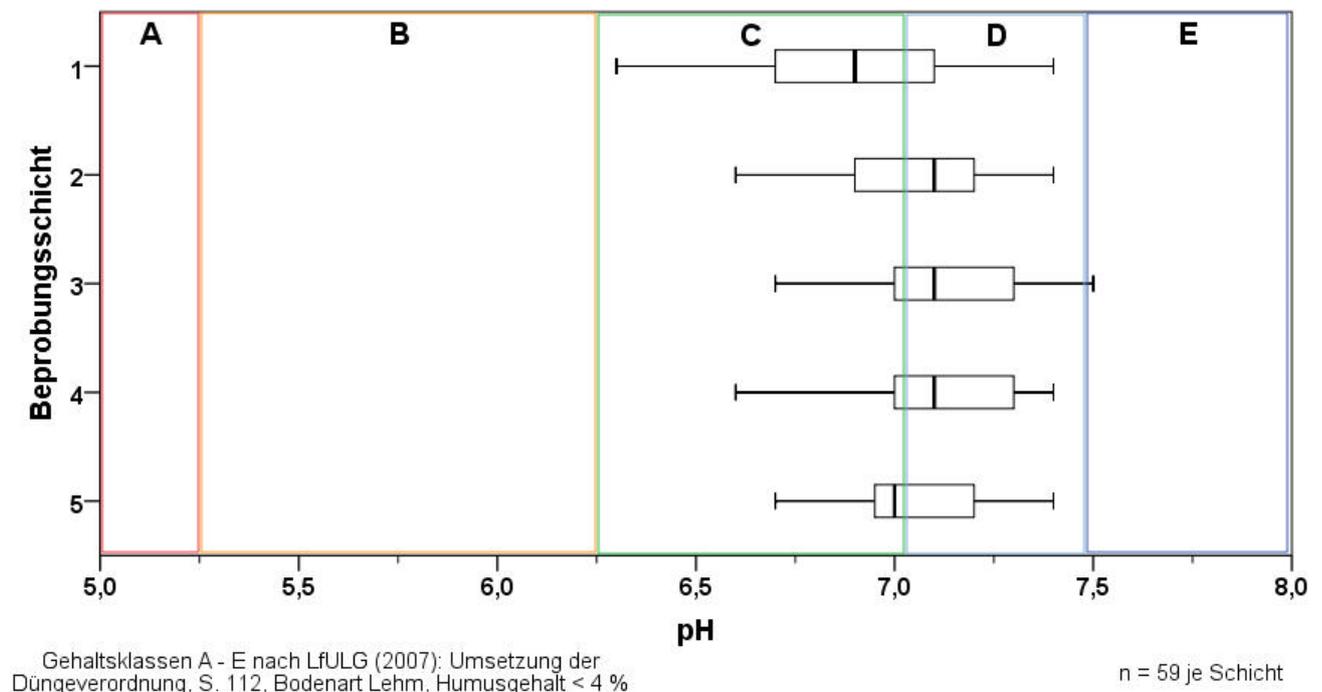
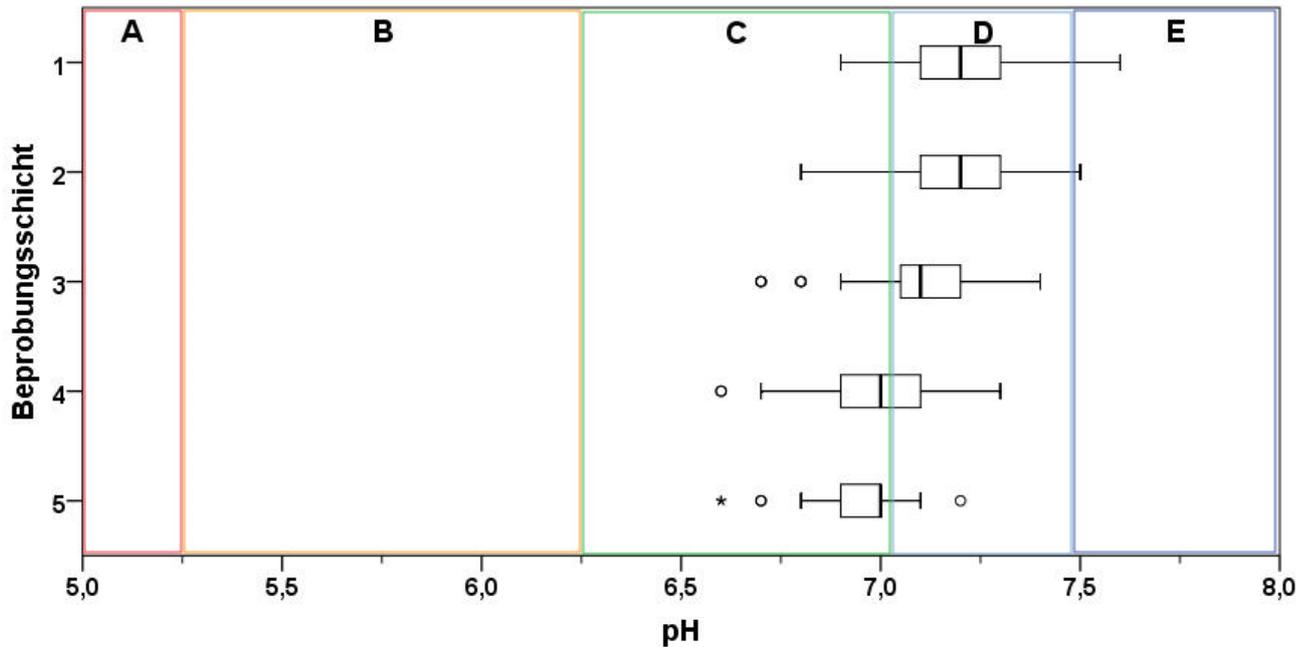


Abbildung 117: pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine)

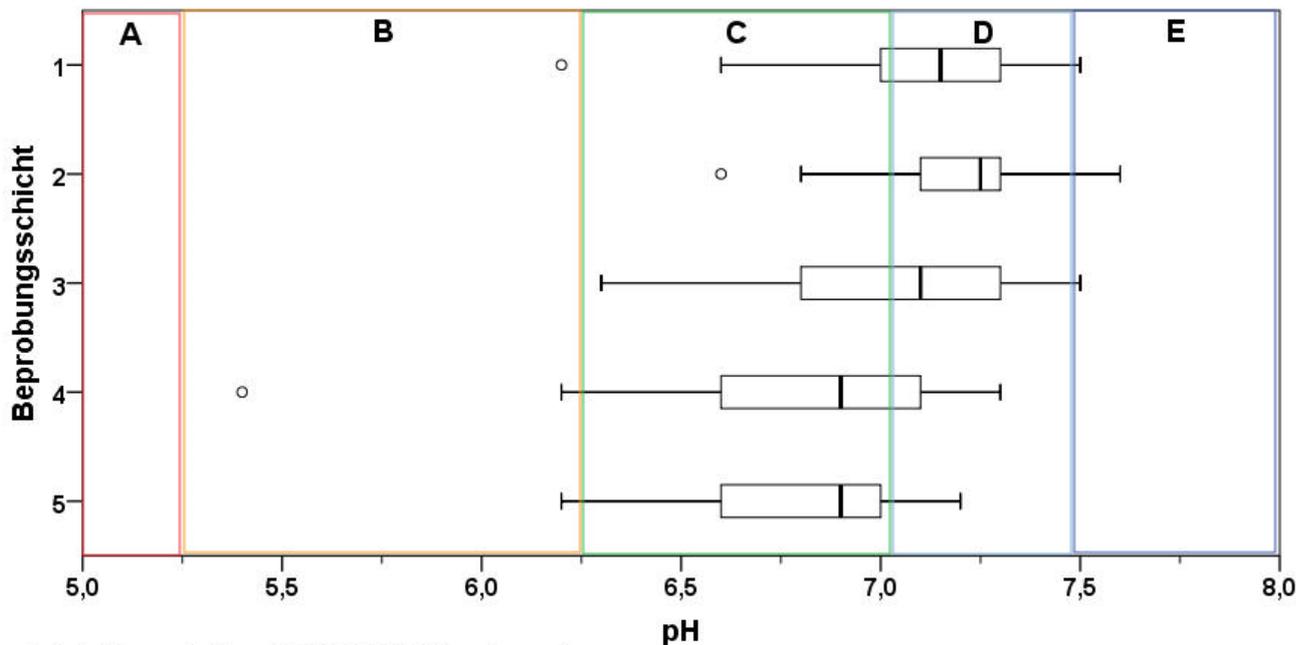


Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 60 je Schicht

Abbildung 118: pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine)

Die Werte der Variante Konservierend (K) wiederum weisen erneut größere Schwankungen auf und liegen zwischen 6,2 und 7,6 (Abbildung 119). Auch hier ist noch eine leichte Stratifizierung erkennbar, wobei nur noch die Schichten 1 und 2 hauptsächlich in der GHK D zu finden sind, die Schicht 3 hingegen etwa zu gleichen Teilen in den GHK C und D verortet ist. Die Schichten 4 und 5 liegen, wie in der Variante D, in der GHK C, wobei einige sehr niedrige Messwerte bereits den Bereich der GHK B erreichen.

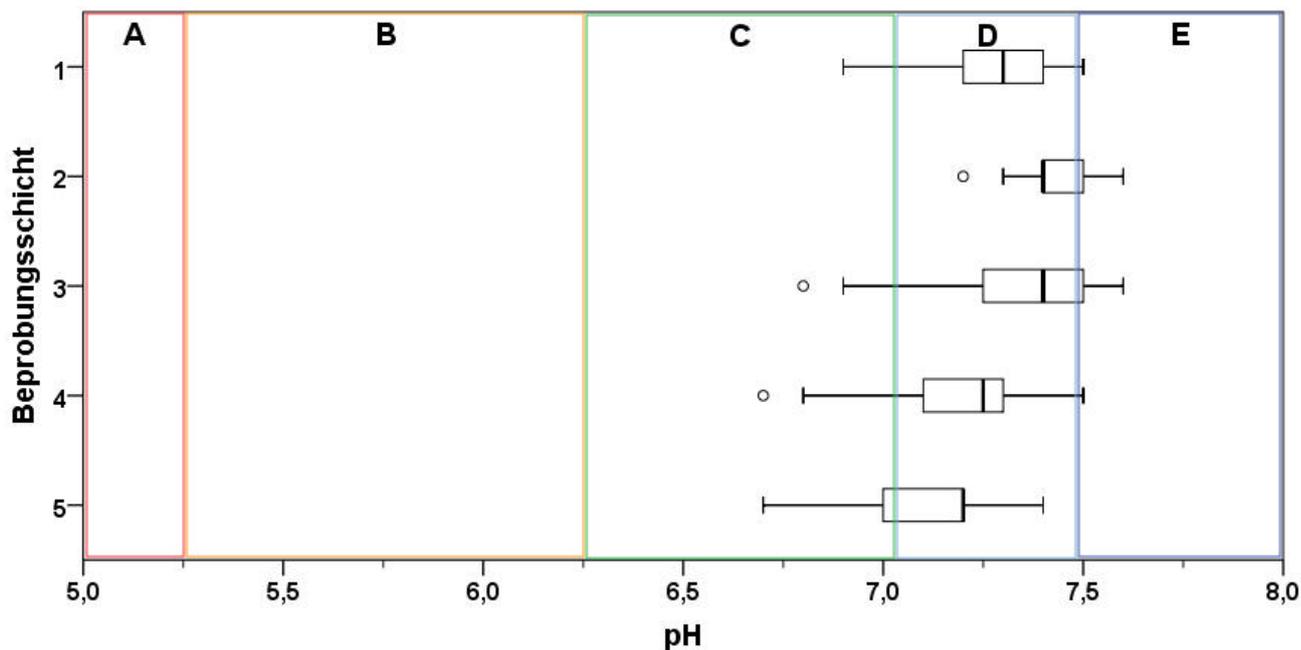


Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 36 je Schicht

Abbildung 119: pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine)

Vergleichsweise hohe pH - Werte für alle Beprobungsschichten wurden in der Variante Konservierend Locker (KL) ermittelt (Abbildung 120). Sie schwanken zwischen 6,7 und 7,6. Dabei liegen alle Schichten mit ihrem Zentralwertebereich in der GHK D zwischen pH - Werten von 7,0 und 7,5. Die Schwankungen innerhalb der Beprobungsschichten sind geringer als in den anderen beiden Varianten mit Bodenbearbeitung (P und K) und gleichen jenen der Variante D.



Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 36 je Schicht

Abbildung 120: pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine)

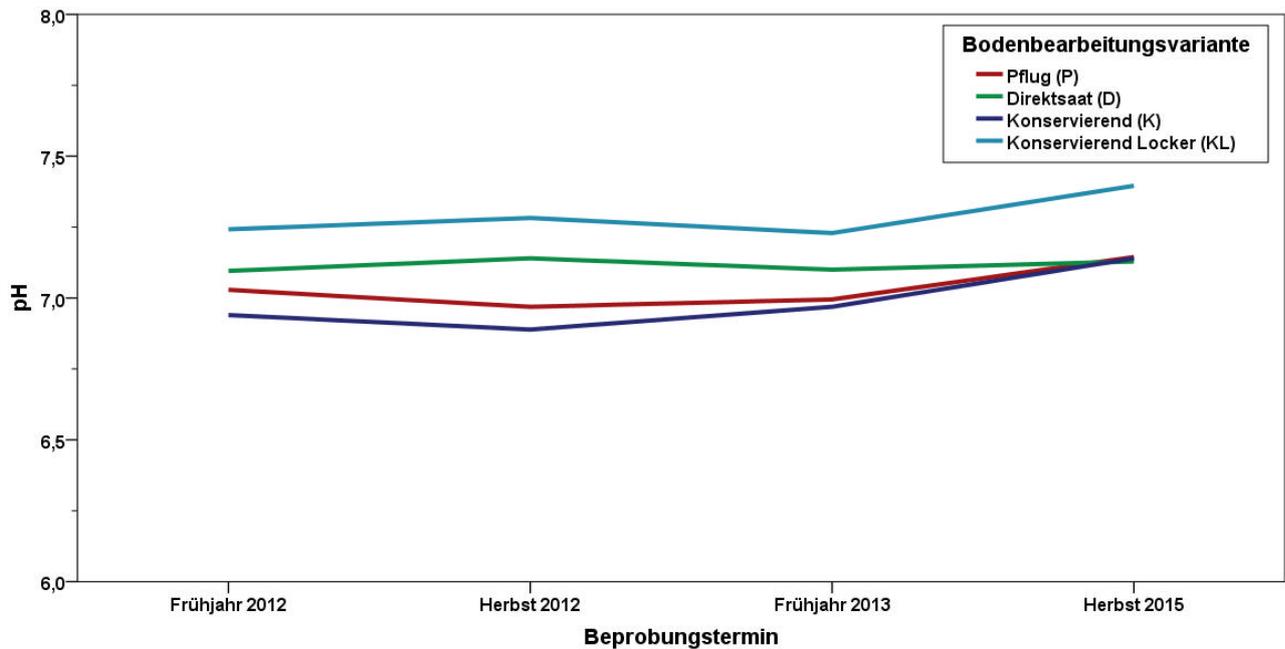
5.5.1.1 Basisbeprobungen

Beim Vergleich der mittleren pH - Werte aller vier Varianten im Verlauf der vier Beprobungstermine liegt die Variante KL zu allen Termine um 0,1 - 0,3 pH über den anderen Varianten (Abbildung 121). Zu den ersten drei Terminen gilt dies in ähnlicher Weise für die Variante D, die etwas höhere pH - Werte als die Varianten P und KL aufweist. Im Herbst 2015 sind die pH - Werte der Varianten P, D und K auf einem einheitlichen Niveau (ca. 7,1).

5.5.1.2 Umbruchversuch

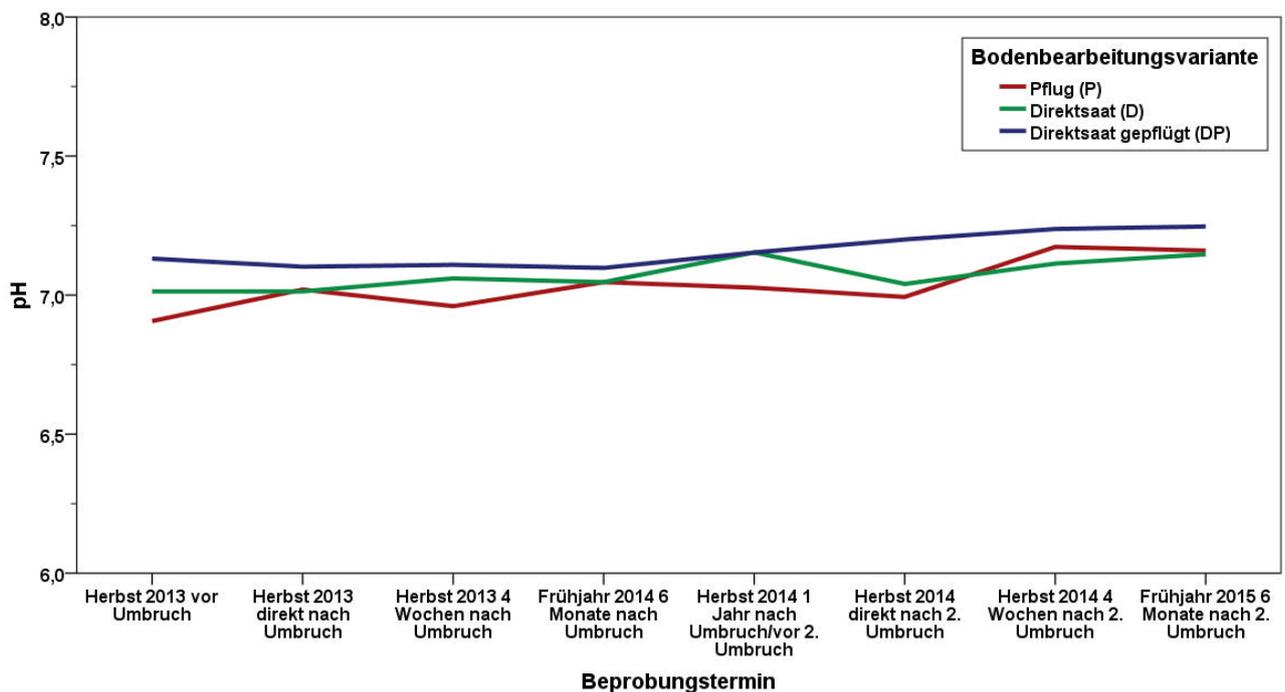
Die Kalkung mit ca. 35 - 40 dt CaO ha⁻¹ erfolgte unmittelbar zwischen der ersten und zweiten Beprobung im Herbst 2013 im Rahmen des Umbruchs. In Abbildung 122 ist erkennbar, dass die mittleren pH-Werte in der Folge leicht ansteigen, was als Effekt der Kalkung interpretiert werden kann. Carbokalk hat zwar aufgrund seiner größeren Oberfläche im Vergleich zu herkömmlichen kohlensauen Kalken eine sehr hohe Reaktivität (WASNER 2009: 24f) und ist daher schnell wirksam. Gleichwohl sind die Effekte der Kalkung auch ca. 18 Monate nach derselben anhand der Bodenanalytik nachweisbar.

Die Unterschiede zwischen den Varianten P, D und DP sind insgesamt sehr gering und liegen im Bereich der Messgenauigkeit. Grundsätzlich werden mittlere pH - Werte von ca. 7,0 - 7,2 erreicht.



n = 9 je Termin und Variante

Abbildung 121: Mittlere pH-Werte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen der Basisbeprobungen



n = 3 je Termin für Varianten P und D,
n = 9 je Termin für Variante DP

Abbildung 122: Mittlere pH-Werte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

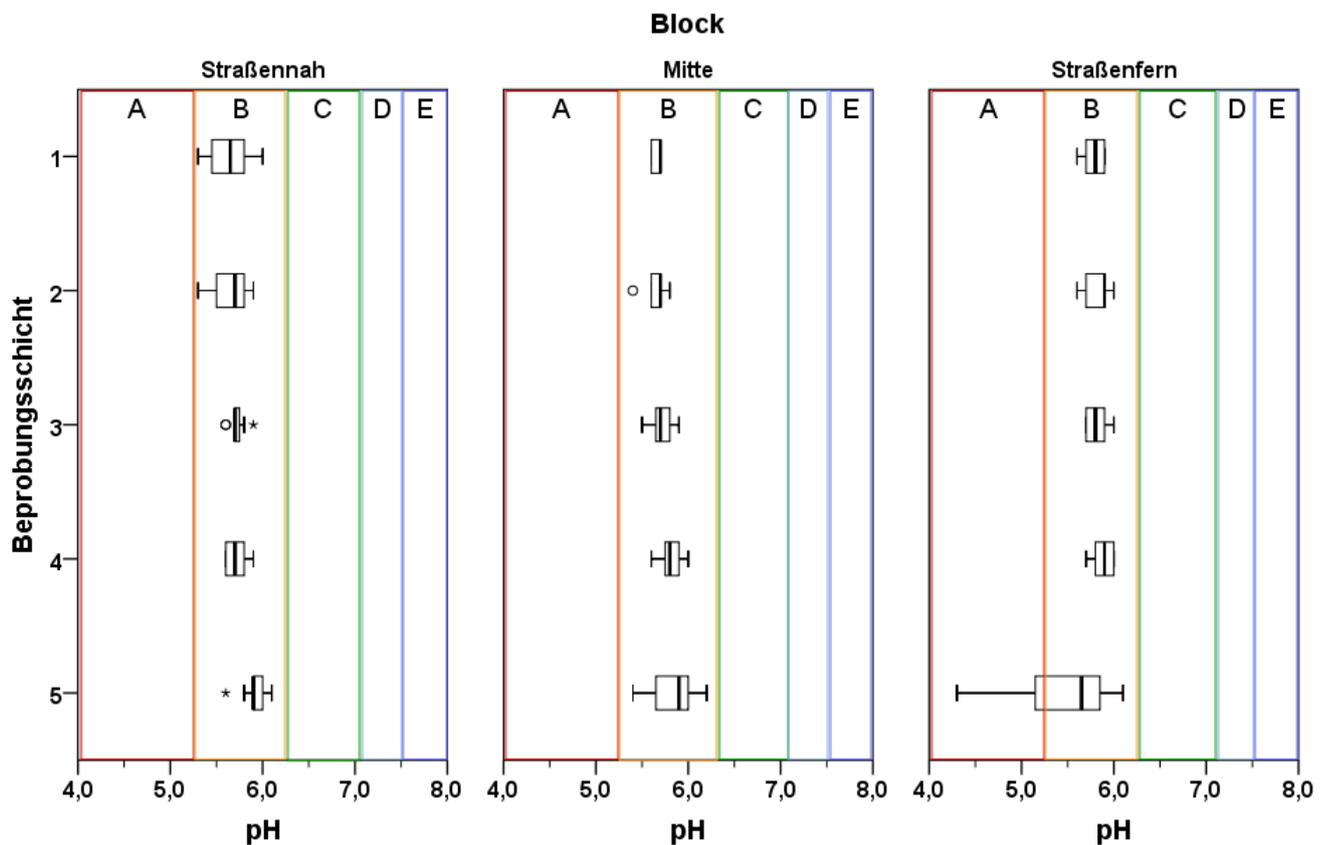
5.5.2 Methau

In Voruntersuchungen zum Standort bzw. auf der Untersuchungsfläche (LfULG 2012: 21ff) wurden die pH-Werte der Oberböden am Mittelhang mit 6,5 - 6,7 angegeben. Aus der Quelle ist nicht ersichtlich, zu welchem Zeitpunkt die entsprechenden Bodenproben entnommen wurden.

In Nachfolgeuntersuchungen im Rahmen einer Qualifikationsarbeit (GUMPERT 2012), die in den Zeitraum der vorliegenden Untersuchung fallen, wurden die pH - Werte erneut bestimmt. Diese werden für die im Grünlandstreifen angelegten Profile am Mittelhang mit 5,6 - 5,7 für den Ap-Horizont (bis 25 - 30 cm u. GOF) sowie 6,0 - 6,1 für den darunterliegenden Horizont (Al - Sw bzw. Sw - M bis 50 bzw. 55 cm u. GOF) angegeben (LfULG 2012: 40ff, GUMPERT 2012: 33ff). Für die noch tiefer liegenden Horizonte des Unterbodens, welche nicht Teil der vorliegenden Untersuchung sind, werden Werte zwischen 4,0 und 4,5 angegeben.

5.5.2.1 Variante Pflug

Die pH-Werte in der Variante Pflug (P) zeigen für die drei Blöcke ein sehr ähnliches Bild (Abbildung 123). So liegen sie, bodenbearbeitungsbedingt weitestgehend homogenisiert, in den Schichten 1 - 4 zwischen 5,3 und 6,1 und damit vollständig innerhalb der GHK B. Dies gilt für die Blöcke 1 (straßennah) und 2 (Mitte) auch für den Unterboden (Schicht 5). Im straßenfernen Block 3 liegen die pH - Werte etwas niedriger und weisen mit einem Zentralwertebereich zwischen 5,2 und 5,8 sowie einer insgesamt deutlich größeren Streuung als in den anderen Schichten und Blöcken teilweise bereits in der GHK A.



Gehaltsklassen A - E nach LfUJL (2007): Umsetzung der Düngerverordnung, S. 112; Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 12 je Schicht und Block

Abbildung 123: pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau

5.5.2.2 Variante Konservierend

In der Variante Konservierend (K) kommt aufgrund der weniger tiefgreifenden Bodenbearbeitung und damit geringeren Homogenisierung in der Krume der bewirtschaftungsbedingte Versauerungsprozess stärker zum Ausdruck (Abbildung 124). So liegen die pH - Werte in den Schichten 1 und 2 in den Blöcken 1 und 2 mit Zentralwertebereichen zwischen 5,3 und 5,6 am unteren Rand der GHK B, einzelne Messwerte in diesen Schichten liegen bereits innerhalb der GHK A. Die pH - Werte nehmen in diesen Blöcken als Funktion der Tiefe leicht zu und erreichen in den Schichten 4 und 5 mit Zentralwertebereichen zwischen 5,8 und 6,3 bereits den unteren Rand der GHK C. Diese Zunahme der pH - Werte als Funktion der Tiefe findet sich auch im straßenfernen Block 3, allerdings liegen in diesem die Werte in den Schichten 1 - 3 insgesamt etwas höher als in den anderen Schichten.

Wie in der Variante P wurden auch in dieser Variante im Unterboden von Block 3 hohe Streuungen und mitunter auffallend niedrige pH - Werte gemessen, die in der GHK A liegen.

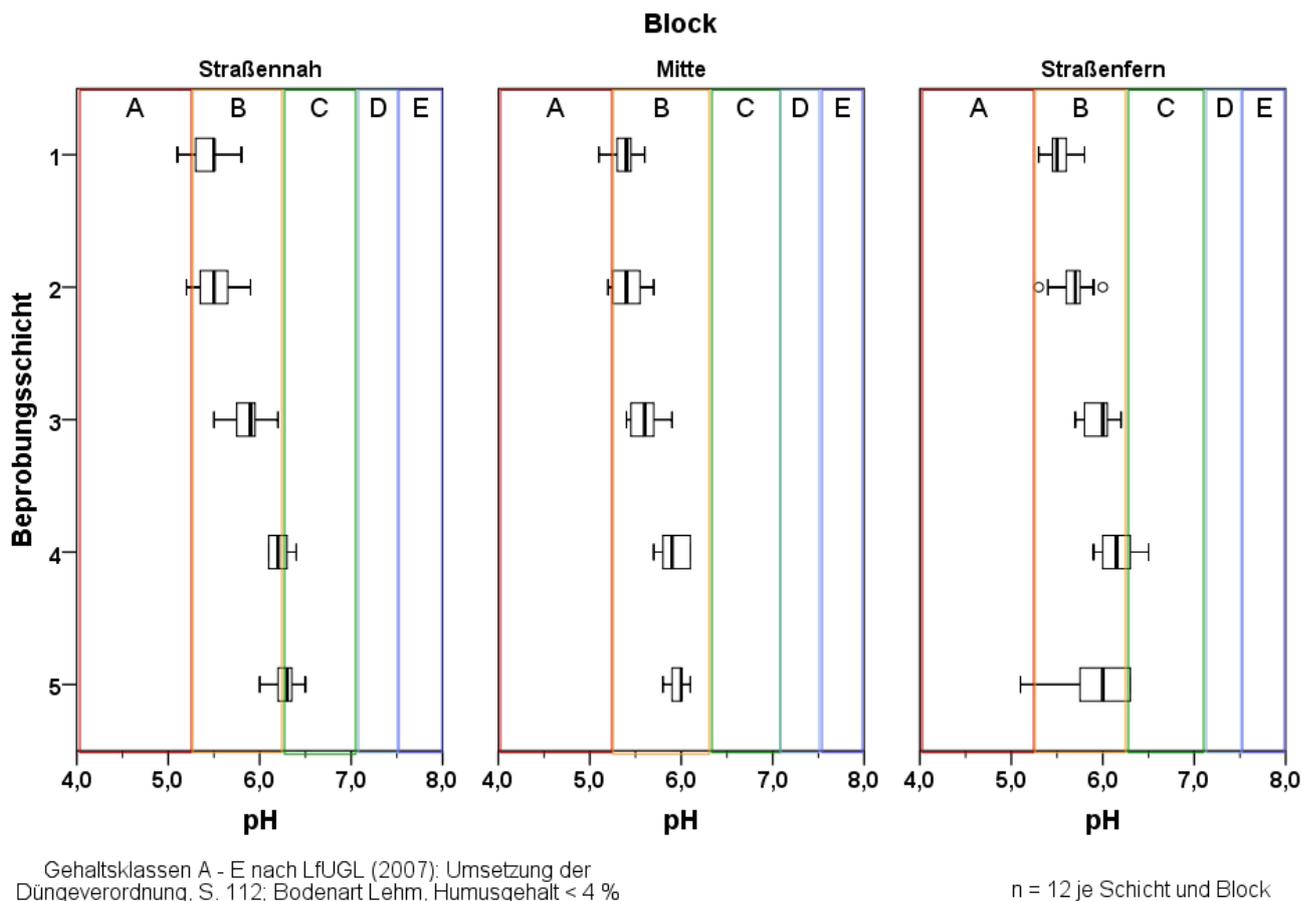


Abbildung 124: pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau

5.5.2.3 Variante Grünland

In der Variante Grünland, welche bis 1992, also bis ca. 20 Jahre vor Beginn der vorliegenden Untersuchung, in ackerbaulicher Nutzung war, sind die pH - Werte in den fünf Schichten (Abbildung 125) jenen der Variante K sehr ähnlich. Sie liegen in den oberen beiden Schichten bei einem Zentralwertebereich von 5,3 - 5,6 in der GHK B, mit einzelnen niedrigeren Messwerten in der GHK A. Die pH - Werte von Schicht 3 weisen die größte Streuung aller Schichten in dieser Variante auf und liegen zum überwiegenden Teil in der GHK B. Für die

Schichten 4 und 5 wurden hingegen fast durchgängig deutlich höhere Werte (6,1 - 6,4) ermittelt, welche am Übergang der GHK B und C liegen.

Trotz der vor ca. 20 Jahren eingestellten ackerbaulichen Nutzung haben sich die pH - Werte in der Krume bzw. im Oberboden im Grünland (noch) nicht wieder auf das standorttypische Niveau von ca. 6 - 6,5 angeglichen. Die großen Streuungen in Schicht 3 weisen darauf hin, dass diese räumlich und zeitlich einen Übergang zwischen dem Ober- und Unterboden bzw. der Ackerbau- und Grünlandnutzung darstellt.

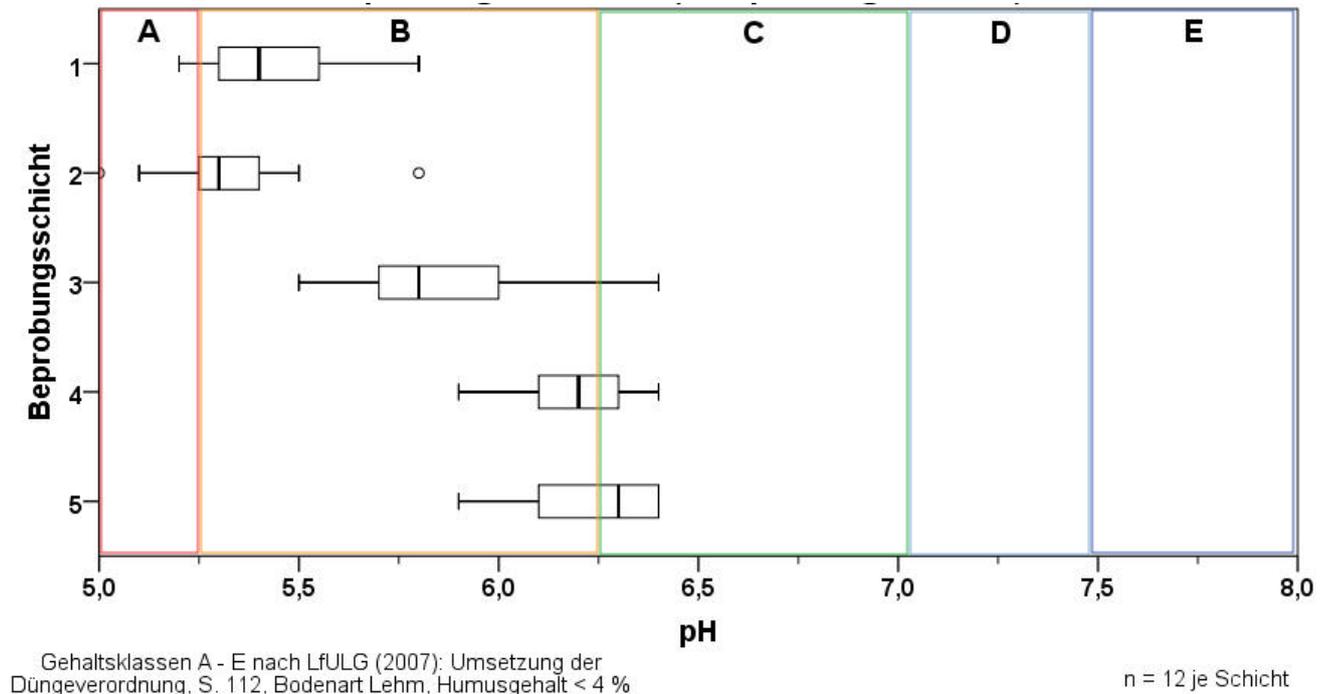


Abbildung 125: pH-Werte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau

5.6 Heißwasserlöslicher Kohlenstoff

Der heißwasserlösliche Kohlenstoff (C_{hwl}) bildet eine sehr leicht umsetzbare analytische Fraktion des labilen Kohlenstoff-Pools, welche mit dem Extraktionsmittel Wasser an natürliche Verhältnisse anknüpft und Veränderungen im Versorgungszustand des Bodens frühzeitig sichtbar macht (KÖRSCHENS & SCHULZ 1999: 29). Er bildet eine chemisch relativ undefinierte Fraktion der organischen Bodensubstanz und besteht aus Teilen der mikrobiellen Biomasse, einfachen organischen Verbindungen sowie durch Wasser hydrolysierbaren und depolymerisierbaren Verbindungen (KÖRSCHENS & SCHULZ 1999: 29). Dabei besteht häufig ein starker positiver Zusammenhang zum Gehalt an mikrobieller Biomasse (C_{mik}), zum Stickstoffgehalt (N_i) sowie zum organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) (WEIGEL et al. 2011, GHANI et al. 2003, SPARLING et al. 1998, SHI & MARSCHNER 2014).

C_{hwl} ist stark bewirtschaftungs- als auch standortabhängig, was durch den im Gegensatz zum organischen Gesamtkohlenstoff schwachen Zusammenhang zum Tongehalt des Bodens zum Ausdruck kommt. Organische und mineralische Düngergaben erhöhen i.d.R. die Gehalte an C_{hwl} (KÖRSCHENS & SCHULZ 1999: 37). Dabei dient diese Fraktion einerseits direkt als Nährsubstrat für die mikrobielle Biomasse und sorgt andererseits für eine bodenbiologisch gesteuerte Nachlieferung organisch gebundener Nährstoffe. Aufgrund dieser

Eigenschaften wurde vielfach vorgeschlagen, den Parameter C_{hwl} als Indikator für Bodenqualität heranzuziehen (z. B. GHANI ET AL. 2003).

International existieren verschiedene Methoden zur Extraktion des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs. In der vorliegenden Untersuchung wurde die in Deutschland übliche VDLUFA-Methode (A 4.3.2) nach SCHULZ (1990) angewandt. Die Extraktion erfolgt dabei über 1 h bei 100° C und dem Mischungsverhältnis 1 Teil Boden: 5 Teile Wasser.

Basierend auf der Auswertung von Dauerfeldversuchen (KÖRSCHENS & SCHULZ 1999) wurde die folgende Klassifikation von Böden anhand ihres Gehaltes an leicht umsetzbarer organischer Substanz bzw. C_{hwl} (bei Jahresniederschlägen von 400 - 800 mm und Jahresdurchschnittstemperaturen von 6 - 10° C) vorgeschlagen:

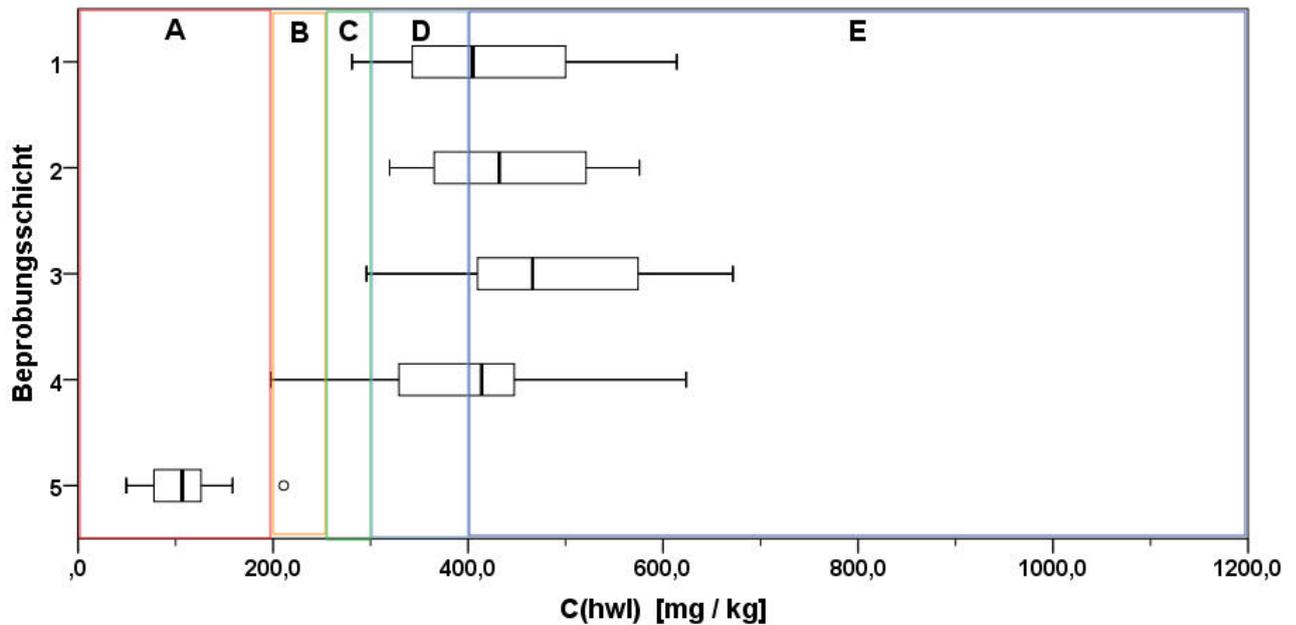
- $< 200 \text{ mg kg}^{-1}$ → Gehaltsklasse A
- $200 - 250 \text{ mg kg}^{-1}$ → Gehaltsklasse B
- $250 - 300 \text{ mg kg}^{-1}$ → Gehaltsklasse C
- $300 - 400 \text{ mg kg}^{-1}$ → Gehaltsklasse D
- $> 400 \text{ mg kg}^{-1}$ → Gehaltsklasse E

5.6.1 Lüttewitz

Der heißwasserlösliche Kohlenstoff (C_{hwl}) wurde für den Standort Lüttewitz im Frühjahr und Herbst 2012 (Basisbeprobungen) für jeweils drei Beprobungspunkte pro Bodenbearbeitungsvariante in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten ermittelt.

Im Rahmen des Umbruchsversuches wurde C_{hwl} für alle Beprobungspunkte bzw. Proben analysiert.

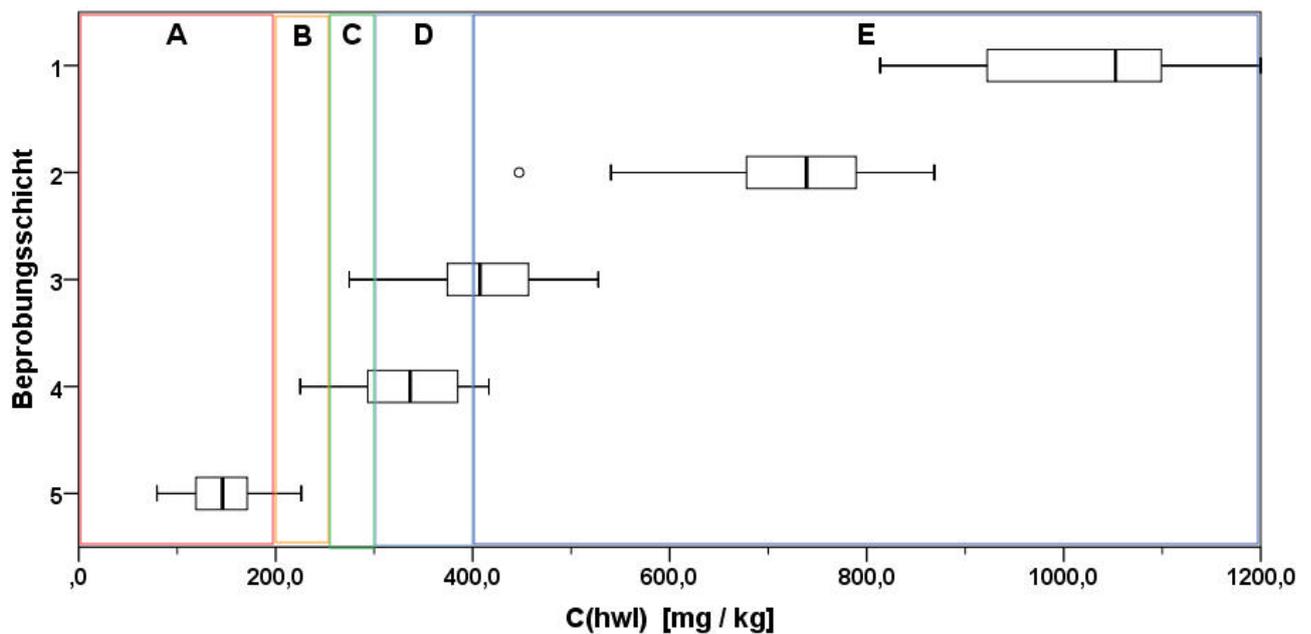
Die C_{hwl} -Gehalte in der Krume (Schicht 1 - 4) liegen in der Variante Pflug (P) über alle Termine mit Zentralwertebereichen (ZWB) zwischen 340 und 580 mg kg^{-1} in den Gehaltsklassen D und E (Abbildung 126). Die C_{hwl} -Gehalte sind dabei, wie für diese Bodenbearbeitungsvariante typisch, innerhalb der Krume relativ homogen, wobei Schicht 3 die höchsten und Schicht 4 die niedrigsten C_{hwl} -Gehalte aufweist. Die Streuungen innerhalb der Schichten sind dabei durchweg hoch. Schicht 5 liegt mit einem ZWB zwischen 80 und 120 mg kg^{-1} in der GHK A. Die absolute Streuung innerhalb dieser Schicht ist dabei wesentlich geringer als in den anderen Schichten.



Gehaltsklassen A - E nach Körschens & Schulz (1999)

n = 30 je Schicht

Abbildung 126: C_{hwl} -Gehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz (10 Beprobungstermine)



Gehaltsklassen A - E nach Körschens & Schulz (1999)

n = 30 je Schicht

Abbildung 127: C_{hwl} -Gehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz (10 Beprobungstermine)

In der Variante Direktsaat (D) (Abbildung 127) ergibt sich die typische tiefenstratifizierte Verteilung auch für die C_{hwl} -Gehalte: Die ZWB von Schicht 1 ($920 - 1100 \text{ mg kg}^{-1}$) und Schicht 2 ($680 - 780 \text{ mg kg}^{-1}$) liegen dabei deutlich über jenen der Variante P und vollständig innerhalb der GHK E. Schicht 3 (ZWB $370 - 450 \text{ mg kg}^{-1}$,

GHK D/E) ähnelt im Wertebereich der Krume der Variante P, Schicht 4 (ZWB 290 - 380 mg kg⁻¹, GHK C/D) weist geringere Werte als diese auf. Mit einem ZWB zwischen 120 und 170 mg kg⁻¹ liegen die C_{hwf}-Gehalte in Schicht 5 der Variante D etwas höher als jene der Pflugvariante, gleichwohl in der GHK A. Für beide Varianten kann man insgesamt von einer sehr guten Versorgung mit C_{hwf} in der Krume sprechen, die Werte in den Schichten 1 - 4 liegen fast ausschließlich in den GHK D und E.

Bei der Auswertung der Ergebnisse für die Varianten K und KL ist zu beachten, dass der heißwasserlösliche Kohlenstoff für diese Varianten lediglich an zwei Terminen (Frühjahr 2012 und Herbst 2012) für Proben von jeweils drei Beprobungspunkten analysiert wurde (insgesamt n = 6).

Die C_{hwf}-Gehalte in der Variante K (Abbildung 128) liegen in den oberen beiden Schichten in einer ähnlichen Größenordnung wie in der Variante D und damit vollständig in der Gehaltsklasse E. Schicht 3 liegt mit C_{hwf}-Gehalten um 400 mg kg⁻¹ an der Grenze der Gehaltsklassen D und E, Schicht 4 weist eine relativ breite Streuung (ZWB 220 - 370 mg kg⁻¹) über die GHK B - D auf. Die Gehalte in Schicht 5 liegen wie in den anderen Varianten bei Werten um 100 mg kg⁻¹ und damit in der GHK A. Auch in der Variante KL (Abbildung 129) zeigt sich eine ähnliche Verteilung, allerdings liegen die C_{hwf}-Gehalte bodenbearbeitungsbedingt in den Schichten 1 und 2 etwas niedriger und in Schicht 3 etwas höher als in der Variante K.

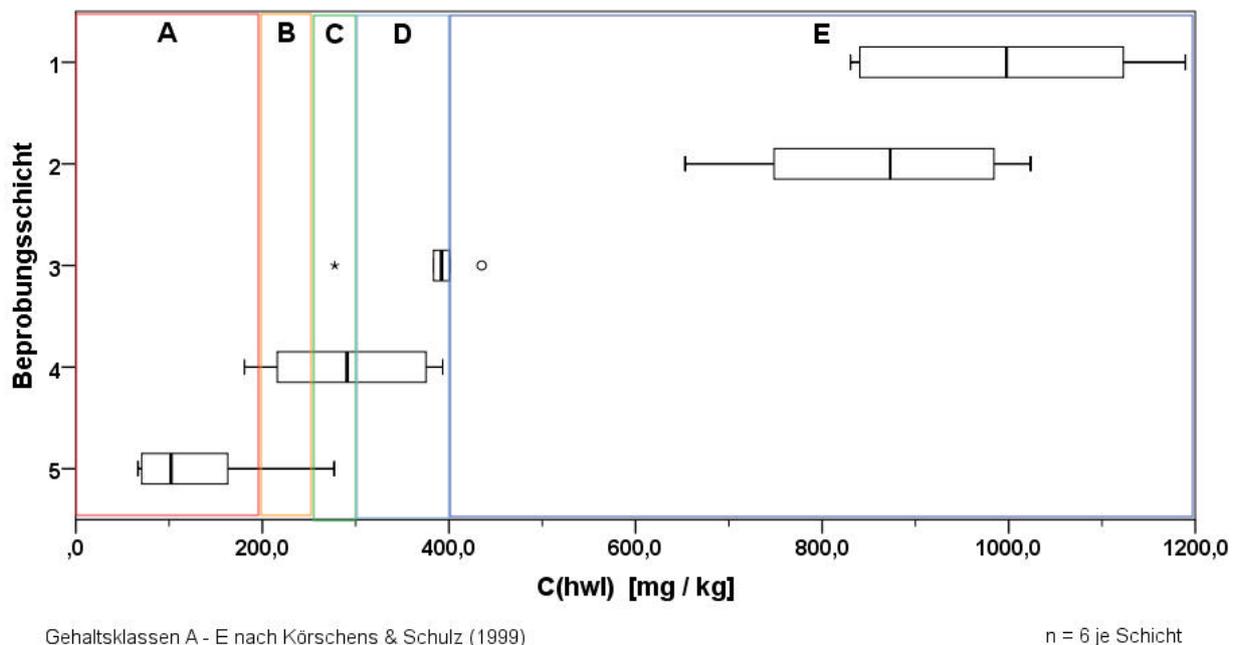
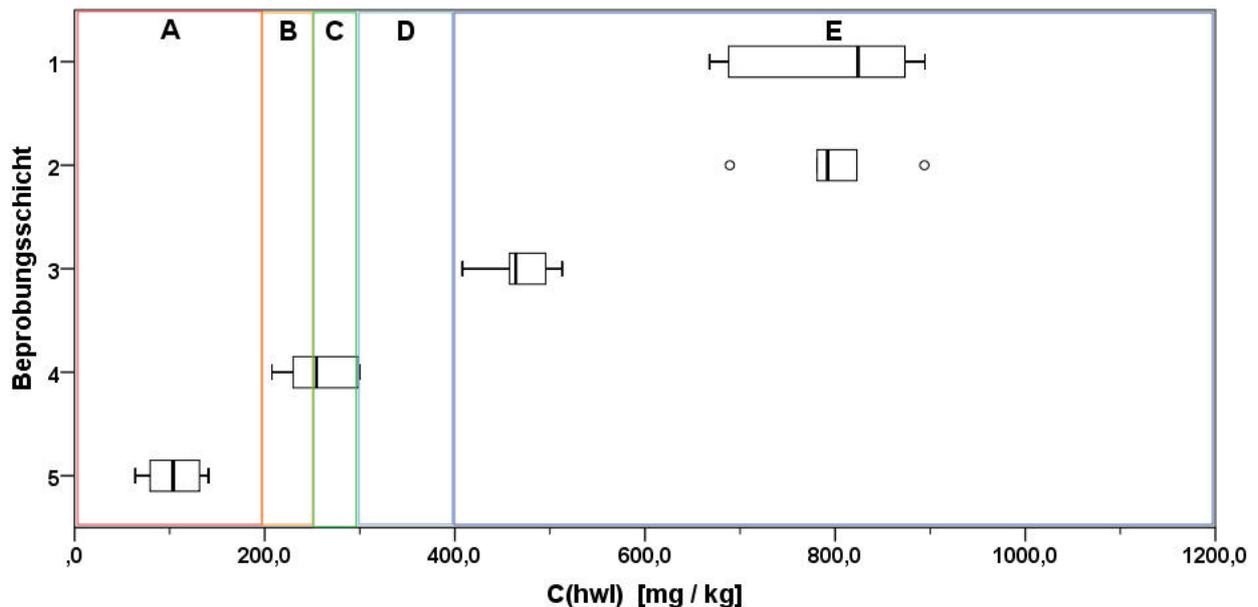


Abbildung 128: C_{hwf}-Gehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine)



Gehaltsklassen A - E nach Korschens & Schulz (1999)

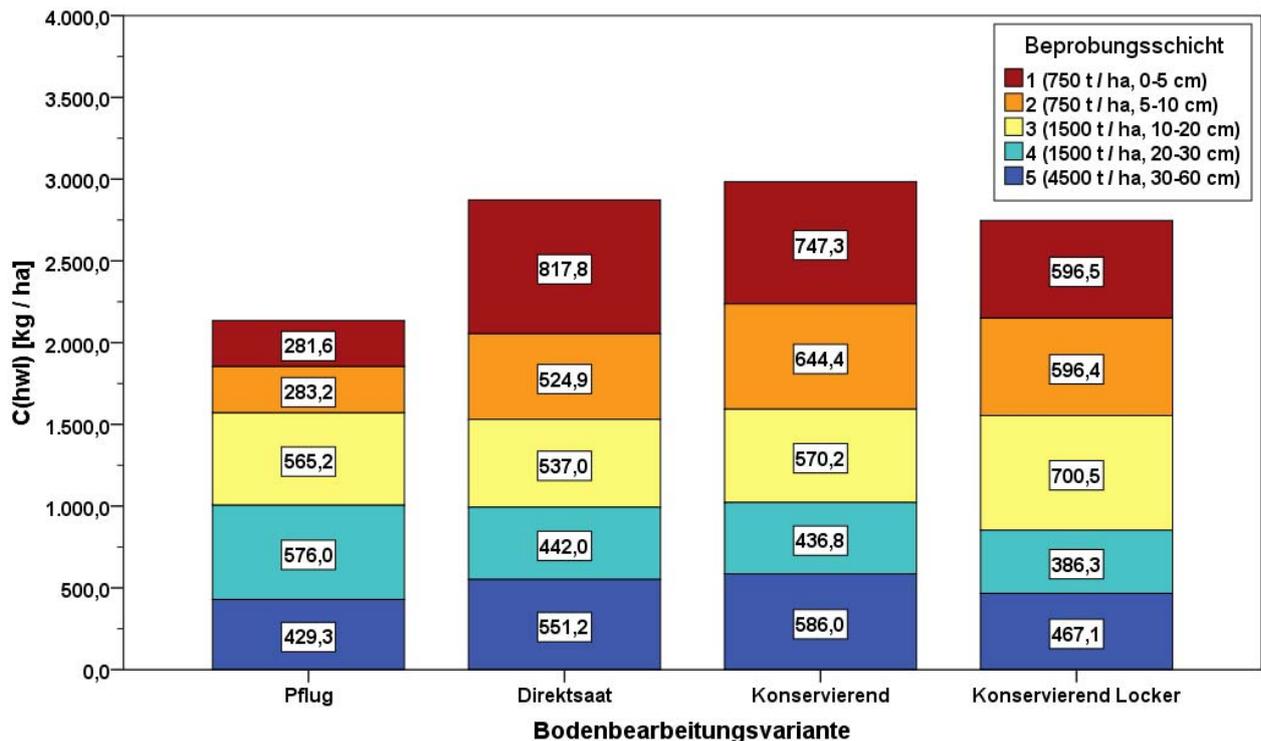
n = 6 je Schicht

Abbildung 129: C_{hwl} -Gehalte in fünf masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine)

5.6.1.1 Basisbeprobungen

Vergleicht man die nach Beprobungsschichten differenzierten mittleren C_{hwl} -Massen zwischen den Varianten im Jahr 2012 (Abbildung 130) zeigen sich große Unterschiede zwischen diesen: Die Varianten K (3000 kg ha^{-1}), D (2900 kg ha^{-1}) und KL (2750 kg ha^{-1}) weisen erheblich größere C_{hwl} -Gesamtmassen auf als die Variante P (2100 kg ha^{-1}). Diese Unterschiede werden im Wesentlichen durch die Unterschiede in den Schichten 1 und 2 bedingt. In Schicht 3 sind die C_{hwl} -Massen in den Varianten P, D und K annähernd gleich, lediglich die Variante KL weist hier etwas größere C_{hwl} -Massen auf. Die Variante P hingegen weist in Schicht 4, welche nur in dieser Variante Teil der Bodenbearbeitung ist, die höchsten C_{hwl} -Massen, wobei die Unterschiede jene der oberen drei Schichten nicht ausgleichen. Die Variante D und K weisen in Schicht 5 etwas höhere C_{hwl} -Massen auf als die Varianten P und KL, wobei die Gründe hierfür zunächst unklar bleiben. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden in diese Bilanz auch für die Varianten P und D lediglich die Daten der 2 Beprobungstermine des Jahres 2012 einbezogen. Die Aussagekraft dieses Vergleiches ist aufgrund der geringen Stichprobenzahl ($n = 6$) relativ begrenzt.

Aufgrund der geringen Stichprobenzahl ($n = 6$) je Variante sind Mittelwertvergleich der C_{hwl} -Gesamtmassen per Varianzanalyse nur bedingt aussagekräftig. Bei gegebener Normalverteilung innerhalb der Varianten nach SHAPIRO-WILK sowie Varianzhomogenität nach LEVENE konnten signifikante Unterschiede zwischen den Varianten P und D bzw. P und K festgestellt werden. Dabei werden nach SCHEFFÉ die homogenen Untergruppe P und KL sowie D, K und KL gebildet. In Bezug auf die Gesamtmassen der leicht löslichen bzw. umsetzbaren Kohlenstofffraktion ergeben sich also, trotz geringer Stichprobenzahl, signifikante Mittelwertunterschiede zwischen der Variante P und den konservierenden Varianten D, K und KL.

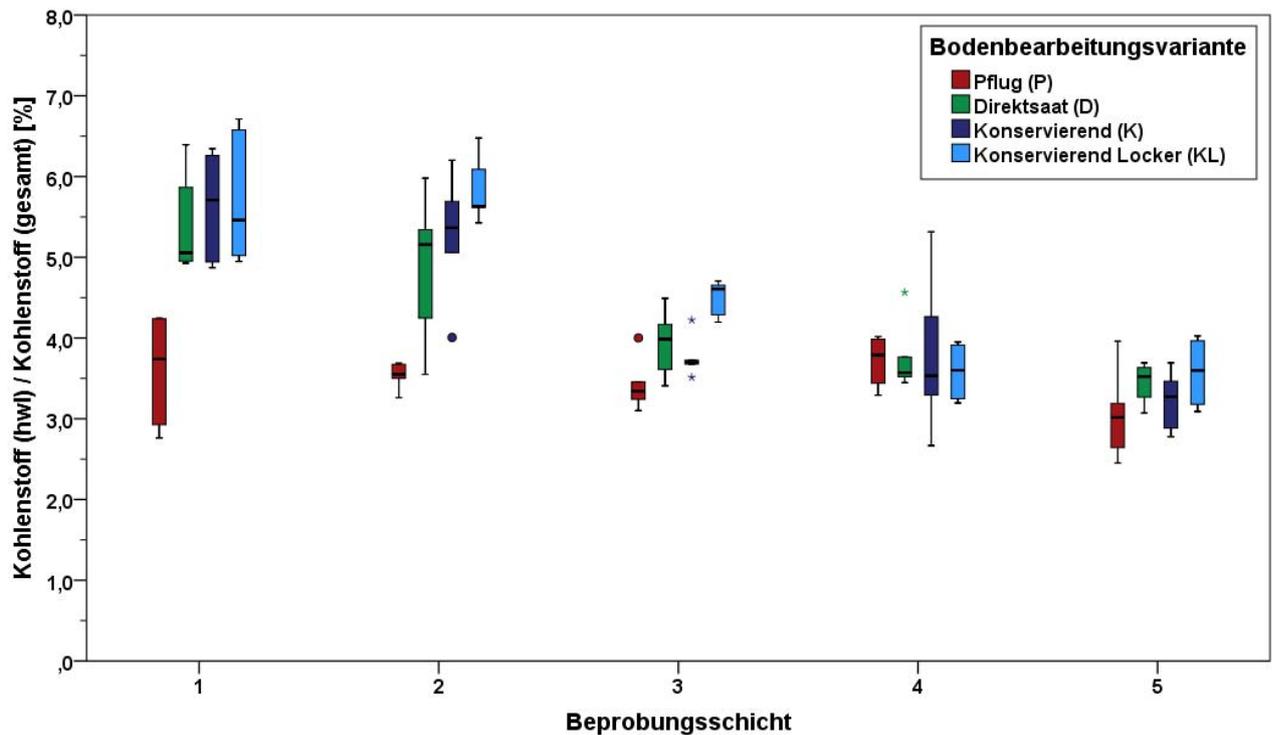


n = 6 je Schicht und Variante

Abbildung 130: Mittlere Chwl-Vorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012)

Aufschlussreich ist zudem der schichtendifferenzierte Vergleich der prozentuale Anteile von C_{hwl} am Gesamtkohlenstoff (Abbildung 131). Diese liegen in den Varianten D, K und KL in Schicht 1 bei 5 - 6,5 % und damit deutlich über jenen der Variante P (3 - 4 %). Für Schicht 2 gelten ähnliche Werte, wobei die Anteile der Variante D etwas niedriger liegen als in Schicht 1. Die Anteile der Variante P weisen in den Schichten 2 und 3 bei sehr geringen Streuungen Werte um 3,5 % auf. In Schicht 3 haben sich die Anteile in den anderen Varianten diesen Werten stark angenähert, in den Schichten 4 und 5 lassen sich bei mittleren Streuungen und Werten zwischen 3 und 4 % kaum Unterschiede zwischen den Varianten feststellen.

Es bleibt festzuhalten, dass sich die Unterschiede zwischen den Varianten beim heißwasserlöslichen Kohlenstoff hauptsächlich auf die oberen beiden Schichten ($1500 \text{ t Boden ha}^{-1}$) beziehen. In diesen weisen die Varianten D, K und KL nicht nur deutlich höhere C_{hwl} -Massen auf, sondern diese bilden auch einen erheblich höheren Anteil an den gesamten (organischen) Kohlenstoffvorräten.



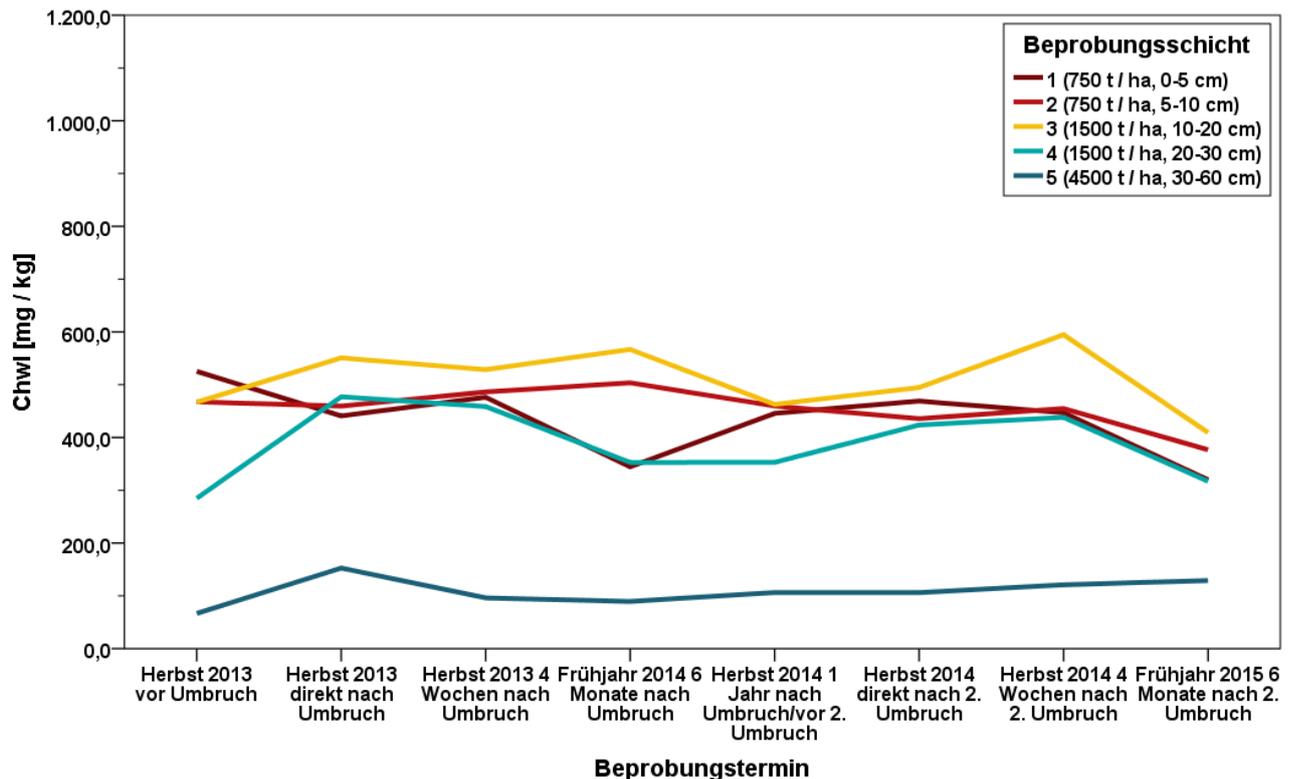
n = 6 je Schicht und Variante

Abbildung 131: Anteile von C_{hwl} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012)

5.6.1.2 Umbruchversuch

Die C_{hwl} -Gehalte in der Variante Pflug (P) zeigen im Verlauf des Umbruchversuches eine für diese Variante typische Verteilung (Abbildung 132): Nach einer vor dem ersten Umbruch leicht tiefenstratifizierten Situation mit Gehalten um 500 mg kg^{-1} in den Schichten 1 - 3 und ca. 300 mg kg^{-1} in Schicht 4 verringern sich durch den Umbruch die Gehalte in Schicht 1, während jene der Schichten 3 und insbesondere 4 durch das Einmischen von Ernteresten deutlich angehoben werden. Vom Termin 4 Wochen nach dem Umbruch zum Frühjahr 2014 verringern sich die C_{hwl} -Gehalte insbesondere in den Schichten 1 und 4 auf ca. 350 mg kg^{-1} . Zum Herbst 2014 steigen diese aber wieder an, sodass direkt nach dem 2. Umbruch die C_{hwl} -Gehalte in den vier oberen Schichten bei ca. 400 mg kg^{-1} liegen. Zum Termin 4 Wochen nach 2. Umbruch nehmen lediglich die C_{hwl} -Gehalte in Schicht 3 deutlich auf ca. 600 mg kg^{-1} zu. Zum Frühjahr 2015 nehmen die C_{hwl} -Gehalte in allen 4 Schichten der Krume hingegen deutlich auf ca. 400 mg kg^{-1} ab.

Schicht 5 zeigt im Versuchszeitraum kaum Schwankungen der C_{hwl} -Gehalte, lediglich zum Termin direkt nach dem ersten Umbruch gibt es eine leichte Erhöhung, die vermutlich auf die Einarbeitung von Oberbodenmaterial durch die Bodenbearbeitung zurückgeführt werden kann.



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 132: Mittlere C_{hwl} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug (PU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Die C_{hwl} -Gehalte der Variante Direktsaat (D) zeigen über den gesamten Versuchszeitraum eine tiefenstratifizierte Verteilung (Abbildung 133). Die Schwankungen innerhalb der Schichten sind dabei vergleichsweise gering. Schicht 1 weist fast durchgängig C_{hwl} -Gehalte zwischen 1000 und 1100 mg kg⁻¹ auf. Eine Abnahme der C_{hwl} -Gehalte erfolgt dabei jeweils zum Frühjahr, wobei die Abnahme auf ca. 850 mg kg⁻¹ zum Frühjahr 2015 den insgesamt niedrigsten C_{hwl} -Gehalt dieser Schicht zur Folge hat. In den anderen vier Schichten sind die Schwankungen so gering, dass sie bei der geringen Anzahl an Feldwiederholungen (n = 3) und der zugrunde liegenden Genauigkeit der Labormethode im natürlichen Schwankungsbereich liegen. Während die Werte von Schicht 2 (700 - 800 mg kg⁻¹) deutlich über jenen der gleichen Schicht in der Pflugvariante liegt, gleichen die Schicht 3 - 5 in ihren Gehalten den entsprechenden Schichten der Pflugvariante, wenngleich mit deutlich geringeren zeitlichen Schwankungen.

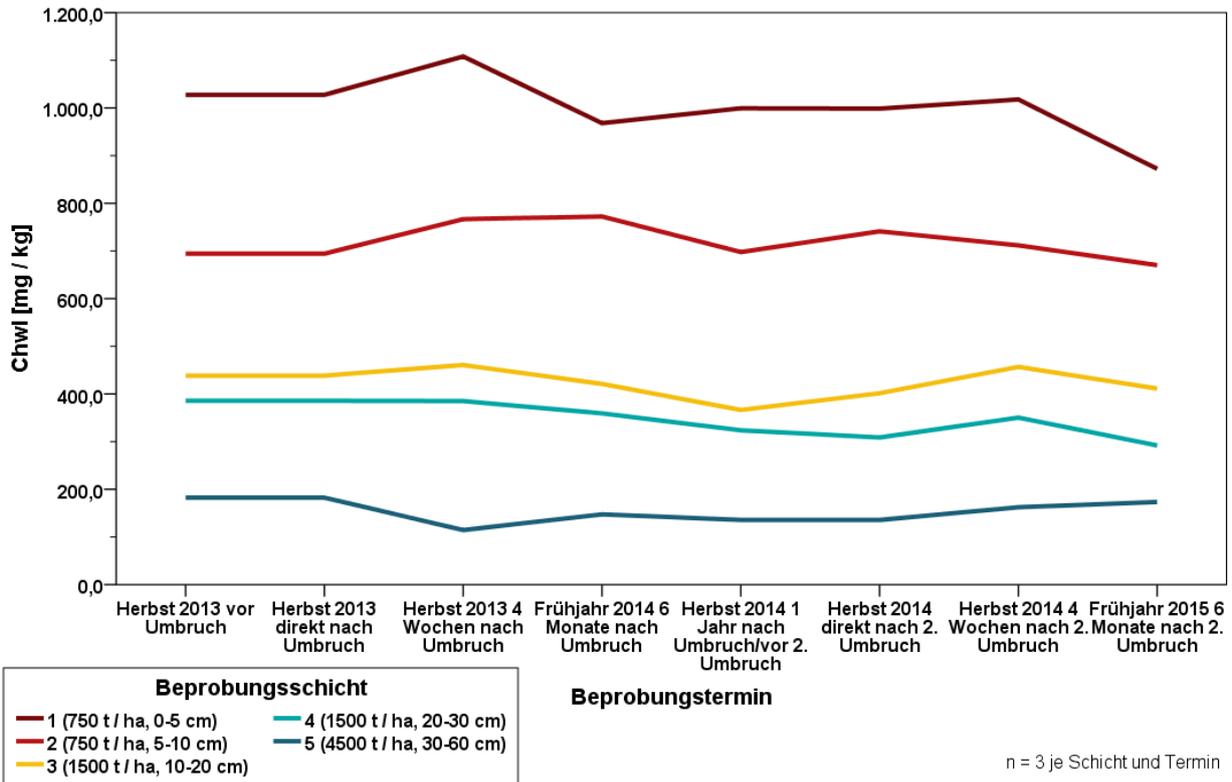


Abbildung 133: Mittlere C_{hwI} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat (DU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

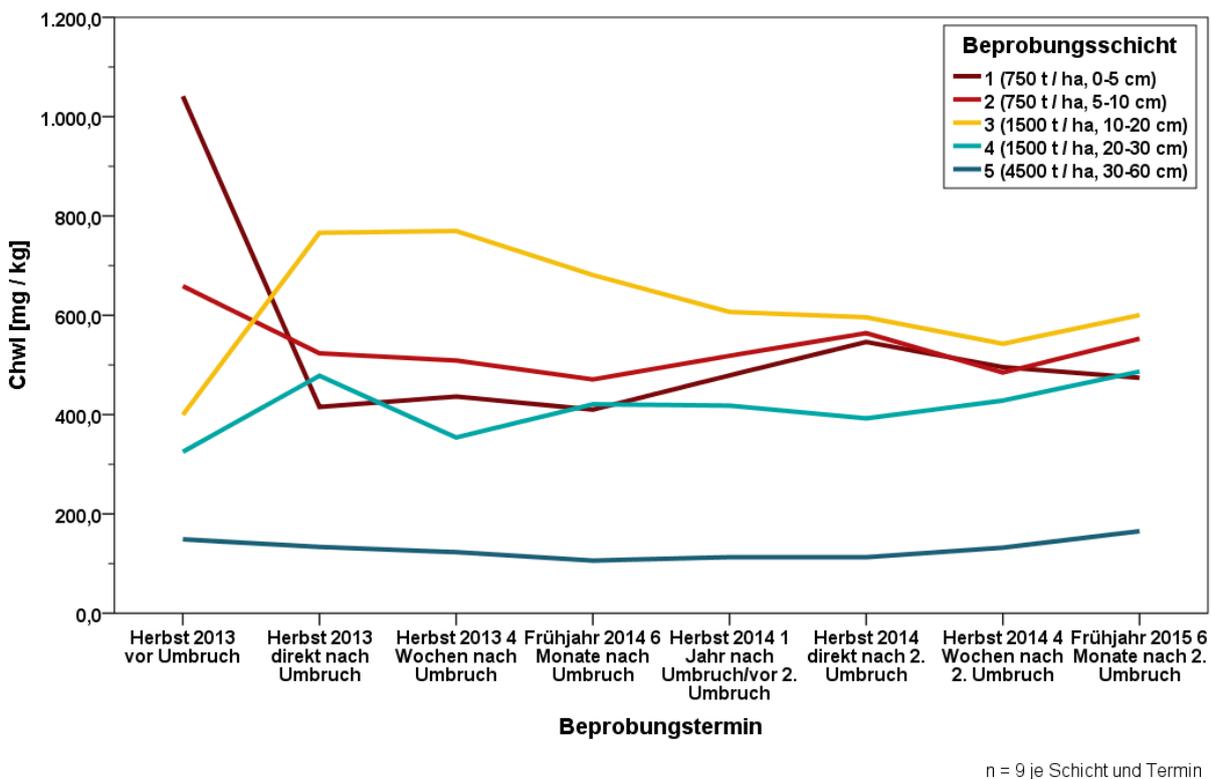


Abbildung 134: Mittlere C_{hwI} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

In der Variante Direktsaat gepflügt (DP) wird die tiefenstratifizierte Ausgangssituation der C_{hwl} -Gehalte durch dem Umbruch quasi umgekehrt (Abbildung 134): Direkt nach dem 1. Umbruch weist Schicht 3 mit Werten von ca. 800 mg kg^{-1} die höchsten C_{hwl} -Gehalte auf und Schicht 1 mit 400 mg kg^{-1} die geringsten. Während sich die Schichten 1, 2 und 4 bis zum Frühjahr 2014 in ihren C_{hwl} -Gehalten ($400 - 500 \text{ mg kg}^{-1}$) stark angeglichen haben, weist Schicht 3 bis zum Herbst 2014 (vor Umbruch) die mit Abstand höchsten C_{hwl} -Gehalte auf, wobei sich diese zum Herbst 2014 verringern und damit jenen der anderen Schichten angleichen. Der 2. Umbruch im Herbst 2014 hat offenbar die Schichten 1, 2 und 3 homogenisiert, sodass diese C_{hwl} -Gehalte relativ ähnliche Gehalte um 600 mg kg^{-1} aufweisen. Schicht 4 hingegen scheint von der Bodenbearbeitung nicht erfasst worden zu sein und weist stabile Werte um 400 mg kg^{-1} auf. Zum Frühjahr 2015 nehmen die C_{hwl} -Gehalte der Schicht 1, wie in den anderen Varianten, ab. In den Schichten 2, 3 und 4 hingegen ist zum Frühjahr 2015 eine Zunahme ermittelt worden.

Auch in dieser Variante unterliegt Schicht 5 kaum zeitlichen Schwankungen und weist C_{hwl} -Gehalte von $100 - 200 \text{ mg kg}^{-1}$ auf.

Die Gesamtmassen an C_{hwl} liegen im Vergleich der Varianten zu allen Beprobungsterminen mit Ausnahme des Frühljahrs 2015 in der Reihenfolge $D > DP > P$ (Abbildung 135). Sie liegen dabei in der Variante D mit C_{hwl} -Massen zwischen 3000 und 3300 kg ha^{-1} jeweils um einige hundert Kilo über jenen der Variante DP ($2800 - 3200 \text{ kg ha}^{-1}$). Eine Ausnahme bildet das Frühjahr 2015, in welchem sich das Verhältnis durch eine starke Zunahme in der Variante DP und eine starke Abnahme in der Variante D umkehrt. Die Variante P weist zu allen Termine die geringsten C_{hwl} -Gesamtmassen auf. Insbesondere für die beiden Termine im Herbst 2013 vor Umbruch und im Frühjahr 2015 wurden mit jeweils ca. 2200 kg ha^{-1} sehr geringe C_{hwl} -Gesamtmassen ermittelt. Zu allen anderen Terminen beträgt der Unterschied zur Variante DP jeweils wenige hundert kg ha^{-1} .

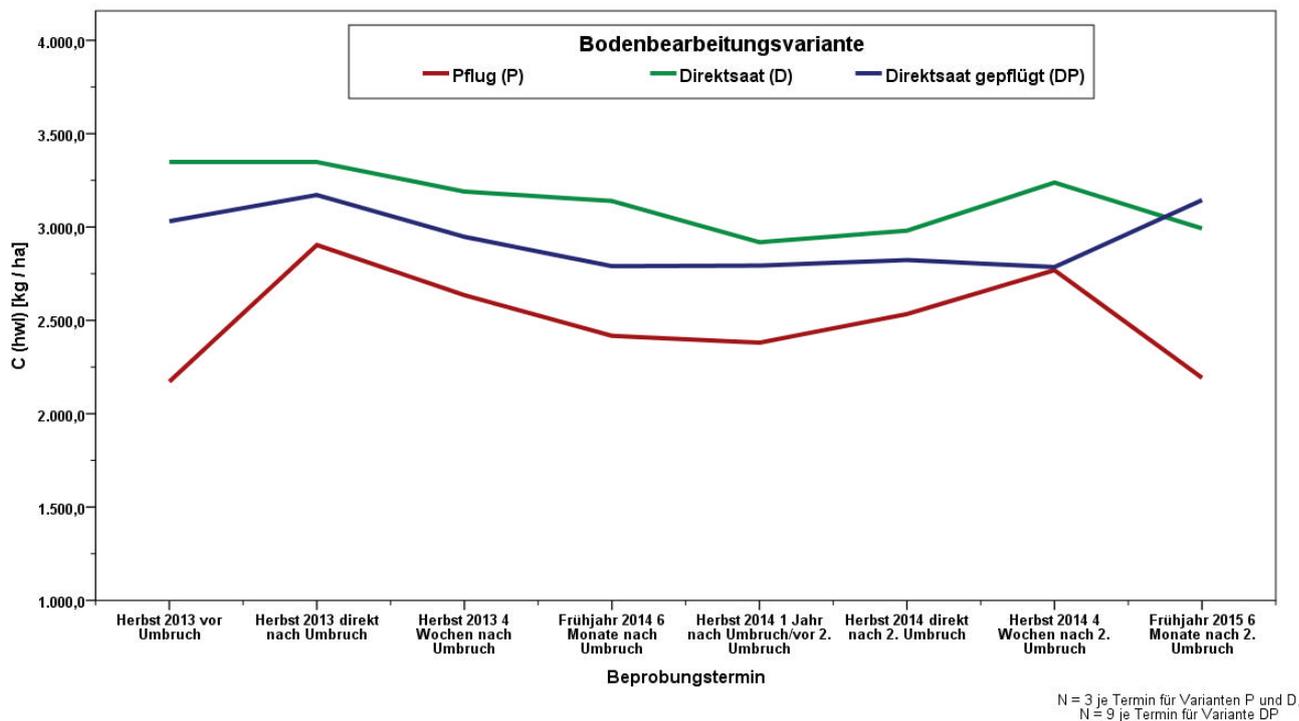


Abbildung 135: C_{hwl} -Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Betrachtet man zusätzlich die Streuungen der C_{hwl} -Massen innerhalb der Termine und Varianten (Abbildung 136) wird deutlich, dass diese in der Variante P bereits direkt nach dem 1. Umbruch, in der Variante DP hingegen erst 4 Wochen nach diesem deutlich zunehmen. Trotz dieser größeren Streuungen ist aber bis zum Frühjahr 2014 nur eine sehr geringe Überschneidung des Zentralwertebereichs zwischen den Varianten P und DP erkennbar. Dies ändert sich zu den Terminen im Herbst 2014 (2. Umbruch), zu welchen diese Varianten ähnliche Wertebereiche aufweisen und sich in diesen recht klar von der Variante D unterscheiden. Insbesondere in der Variante DP sind die Streuungen vom Termin 4 Wochen nach dem ersten Umbruch im Herbst 2013 bis zum Termin direkt nach dem 2. Umbruch sehr groß, was für eine starke und zugleich stark (räumlich) differenzierte Umsatzdynamik in dieser Variante spricht.

Erstaunlich ist zudem, dass die Angleichung der Werte in den Varianten P und DP vom Herbst 2014 zum Frühjahr 2015 eine Umkehr erfahren hat und damit zum Ende des Versuches die Ausgangssituation aus dem Herbst 2013 fast exakt wiederhergestellt ist.

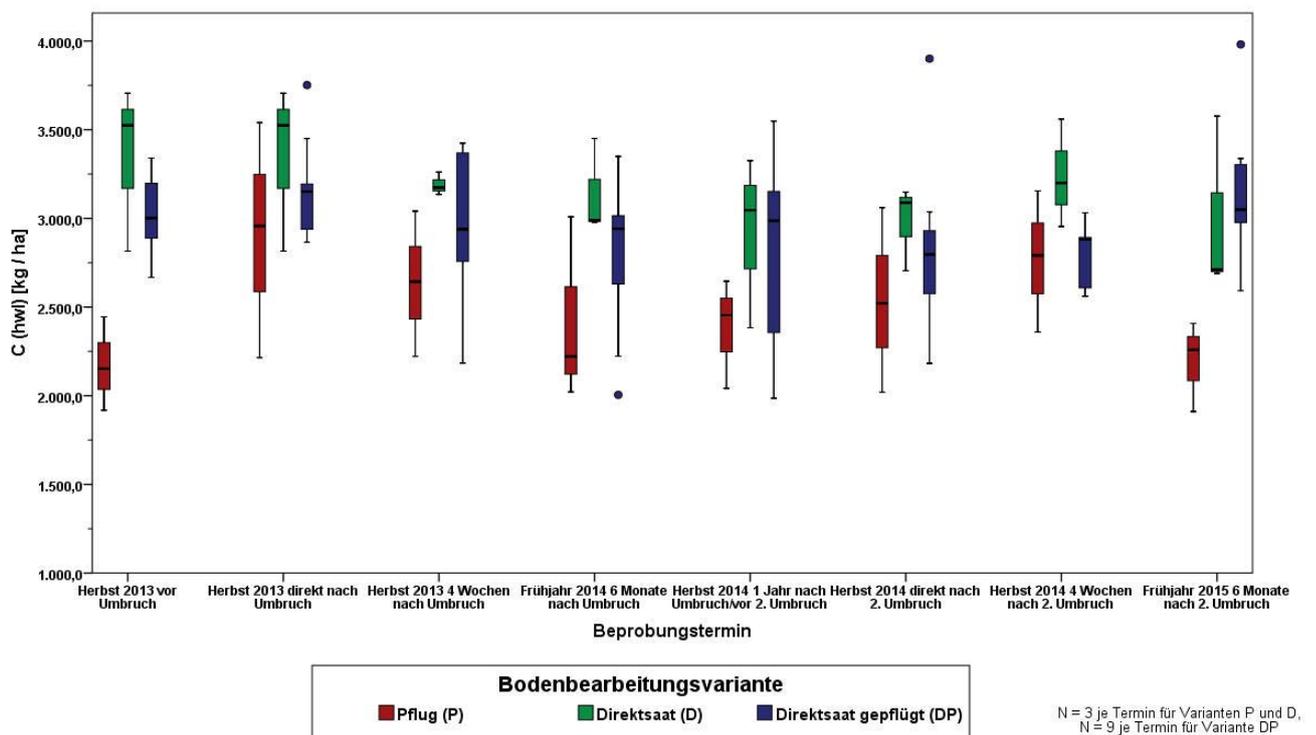


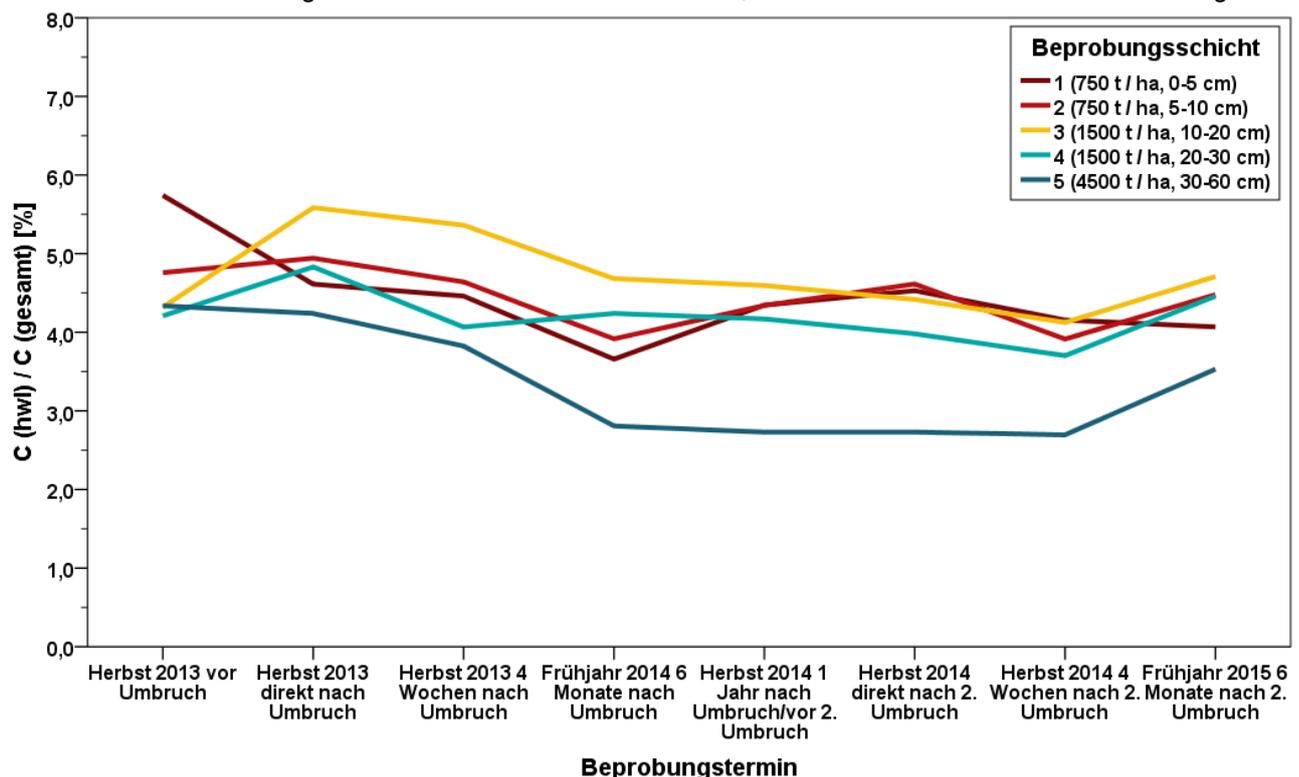
Abbildung 136: Streuung der C_{hwl} -Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Die Varianzanalyse der C_{hwl} -Gesamtmassen über alle acht Beprobungstermine wurde für die Varianten P mit $n = 24$, D mit $n = 24$ und DP mit $n = 72$ (DP1-3) durchgeführt. Bei gegebener Normalverteilung innerhalb der Varianten nach SHAPIRO-WILK und Varianzhomogenität nach LEVENE konnten signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Diese traten zwischen den Varianten P und D sowie P und DP auf. Nach SCHEFFÉ wurden die zwei homogenen Untergruppen D ($MW = 3144 \text{ kg ha}^{-1}$) und DP ($MW = 2936 \text{ kg ha}^{-1}$) sowie P ($MW = 2500 \text{ kg ha}^{-1}$) gebildet (Signifikanz = 0,133). In Bezug auf die Massen an leicht umsetzbarem Kohlenstoff bleibt also der signifikante Unterschied zwischen den Varianten P und D trotz des ein- bzw. zweimaligen Umbruchs (= DP) erhalten.

Für die Versuchswiederholung im Jahr 2014/2015 (DP4-6, n = 35) konnte dieses Ergebnis bestätigt werden. In diesem Fall gab es signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Varianten P (n = 12, MW 2469 kg ha⁻¹) und D (n = 12, MW = 3032 kg ha⁻¹) sowie P und DP (n = 35, MW = 2760 kg ha⁻¹). Die Varianten D und DP bilden nach SCHEFFÉ eine homogene Untergruppe (Signifikanz = 0,468).

Für die Variante Direktsaat gepflügt (DP1-3) wurde zudem der Anteil des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs an den Kohlenstoff-Gesamtvorräten, nach Beprobungsschichten differenziert, berechnet (Abbildung 137). Diese Anteile liegen zu Beginn des Umbruchversuches bei ca. 4 % (Schichten 3 - 5) bis 6 % (Schicht 1). Analog zu den C_{hwl}-Gehalten kommt es auch bei den C_{hwl}-Anteilen am Gesamtvorrat durch den Umbruch zu einer Umkehr der Verhältnisse, sodass bei den folgenden Terminen Schicht 3 mit Werten zwischen 5,5 und 4,5 % die höchsten C_{hwl}-Anteile aufweist und die Schichten 1 und 2 im Frühjahr 2014 die geringsten. Grundsätzlich nehmen die C_{hwl}-Anteile vom Herbst 2013 zum Frühjahr 2014 in allen Schichten ab (inkl. Schicht 5), mit Ausnahme von Schicht 4. Im Verlauf des Jahres 2014 und nicht zuletzt bedingt durch den 2. Umbruch im Herbst 2014 kommt es zu einer Angleichung der C_{hwl}-Anteile in den Schichten 1 - 4 mit Werten von ca. 4 - 4,5 %. Zum Frühjahr 2015 nehmen die C_{hwl}-Anteile in den Schichten 2 - 5 deutlich zu, lediglich in Schicht 1 setzte sich der Abnahmetrend aus dem Herbst 2014 fort.

Zum Ende des Versuches lagen die C_{hwl}-Anteile in den Schichten 1 und 5 deutlich niedriger als zu Beginn des Versuches im Herbst 2013, jene der Schicht 2 in etwa auf dem gleichen Niveau und jene der Schichten 3 und 4 über dem Ausgangsniveau. Bei der Entwicklung der C_{hwl}-Anteile über diese ca. 18 Monate handelt es sich vermutlich um einen gemischten Effekt aus der Jahreszeit, der Kulturart und der Bodenbearbeitung.



n = 9 je Schicht und Termin

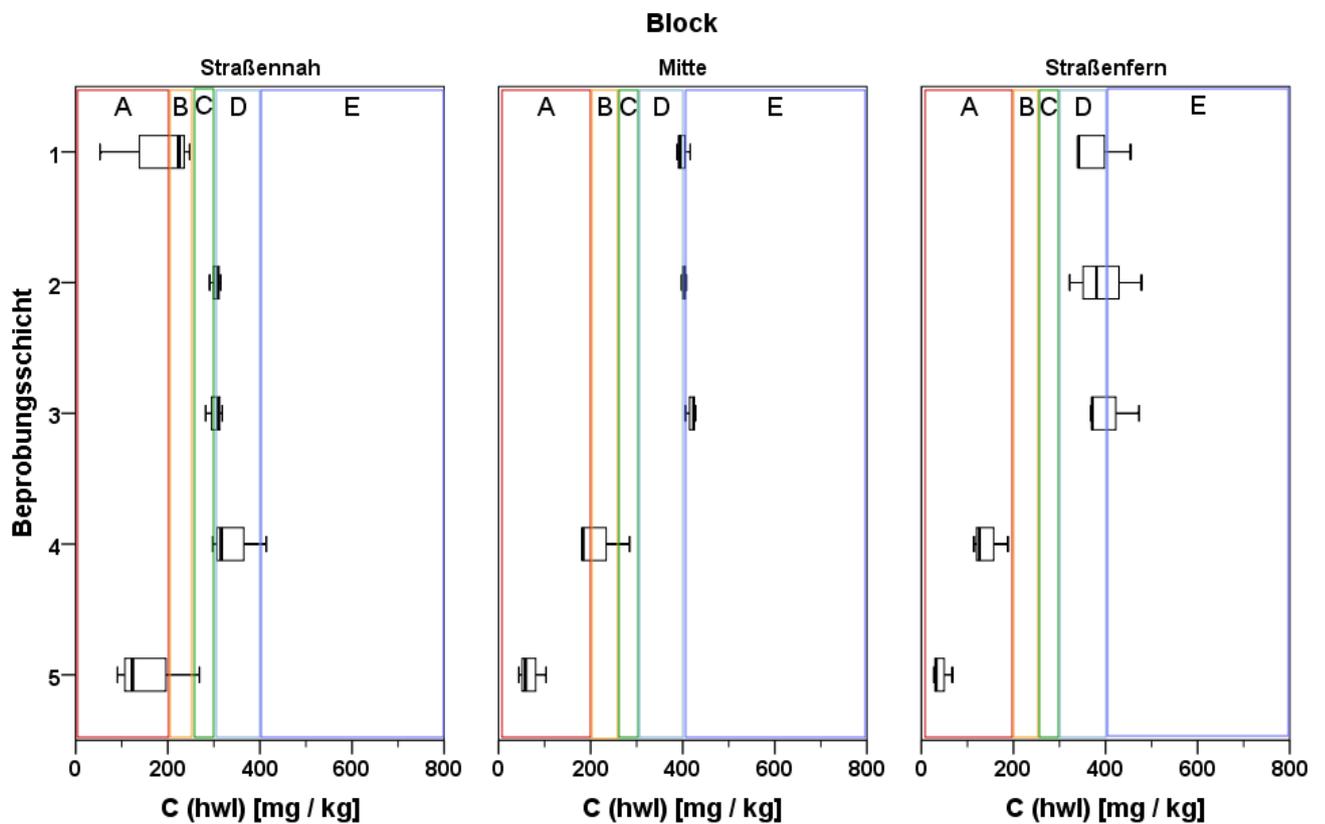
Abbildung 137: Mittlere Anteile von C_{hwl} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

5.6.2 Methau

Die Gehalte an heißwasserlöslichem Kohlenstoff (C_{hwl}) wurde für den Standort Methau nur für die Proben des Termins Herbst 2012 ermittelt und bilden somit sehr spezifisch die Situation zum Zeitpunkt der Beprobung ab. Die Ergebnisse fanden bereits Eingang in eine Masterarbeit (SEIDEL 2013) und werden hier im Hinblick auf die Fragestellung der vorliegenden Untersuchung erneut dargestellt und interpretiert.

In der Variante Pflug (P) liegen die C_{hwl} -Gehalte im straßenfernen Block 3 (ca. 6 Wochen nach Umbruch, Kulturart Wintergerste) in den oberen drei Schichten zwischen 350 und 450 $mg\ kg^{-1}$ und damit an der Grenze der GHK D und E (Abbildung 138). In den tieferen Schichten 4 und 5 sind die C_{hwl} -Gehalte wesentlich geringer (100 – 200 bzw. 0 - 50 $mg\ kg^{-1}$) und liegen in der GHK A.

Eine ähnliche Verteilung zeigt sich in Block 2 (Mitte, Kulturart Winterweizen), allerdings liegen die C_{hwl} -Gehalte in den Schichten 1 - 3 mit sehr geringer Streuung bei ca. 400 $mg\ kg^{-1}$. Diese sehr homogene Verteilung ist vermutlich ein Ergebnis des ca. zwei Wochen vor der Probenahme durchgeführten Umbruchs. Auch in diesem Block liegen die C_{hwl} -Gehalte der Schichten 4 (180 - 280 $mg\ kg^{-1}$, GHK A/B) und 5 (60 – 100 $mg\ kg^{-1}$, GHK A) niedriger als jene der Schichten 1 - 3.



Gehaltsklassen A - E nach Körschen & Schulz (1999)

n = 3 je Schicht und Block

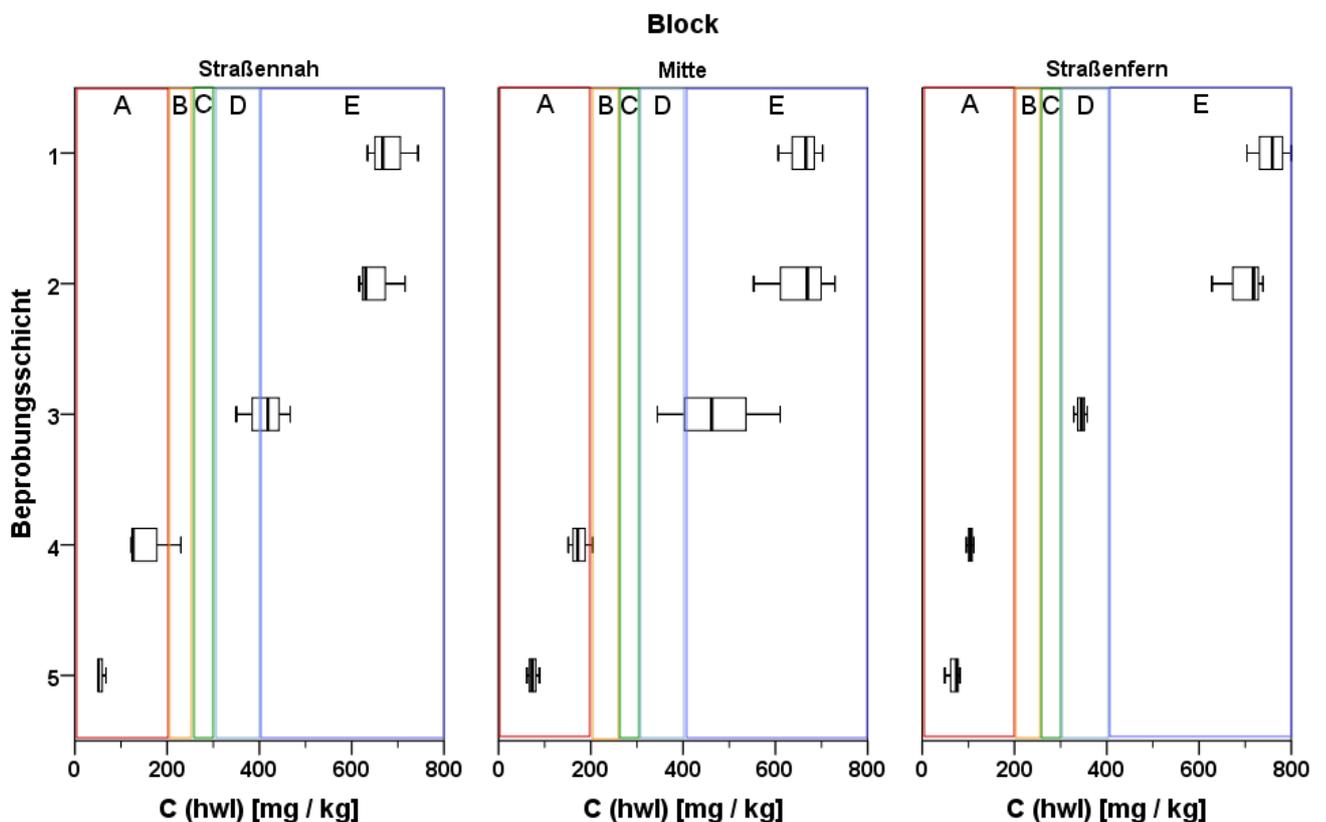
Abbildung 138: C_{hwl} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau im Herbst 2012

Im straßennahen Block 1 (Brache), der ebenfalls ca. zwei Wochen vor dem Beprobungstermin umgebrochen wurde, liegen die C_{hwl} -Gehalte in den oberen drei Schichten deutlich niedriger als in den anderen Varianten. Insbesondere Schicht 1 mit 50 - 250 $mg\ kg^{-1}$ (GHK A/B) hebt sich deutlich von den anderen Blöcken ab. In den Schichten 2 und 3 liegen die Werte mit jeweils ca. 280 - 320 $mg\ kg^{-1}$ (GHK C/D) ca. 100 $mg\ kg^{-1}$ unter jenen der jeweiligen Schicht in den anderen Blöcken. Ebenfalls auffällig ist Schicht 4, welche mit Gehalten

zwischen 300 und 410 mg kg⁻¹ (GHK D) im Vergleich zu den anderen Blöcken deutlich höhere Werte aufweist. Dies gilt bei Werten zwischen 90 und 270 mg kg⁻¹ (GHK A - C) auch für Schicht 5.

Diese Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Verteilung der C_{hwil}-Gehalte können nicht einheitlich mit der Bodenbearbeitung erklärt werden, da sich die Tiefenverteilung vom straßennahen Block 1 deutlich von jenen der Blöcken 2 und 3 (straßenfern) unterscheidet. Dementgegen lag der Umbruchtermin in den Blöcken 1 und 2 jeweils ca. 2 Wochen vor der Probenahme, in Block 3 hingegen ca. 6 Wochen. Allerdings wurde die Variante P von Block 1 nach Ernte der Vorfrucht (Wintergerste, ca. drei Monate vor der Probenahme) in Brache belassen, wohingegen in den Blöcken 2 und 3 nur jeweils wenige Tage bzw. Wochen zwischen der Ernte der Vorfrucht und der nachfolgenden Aussaat vergingen. Möglicherweise hat diese längere Brachezeit in Kombination mit einem im Vergleich zum 20jährigen Mittel trockenen Spätsommer bzw. Herbst (August bis Oktober 2012 mit 125 mm vs. 187 mm im langjährigen Mittel) negative Auswirkungen auf die Gehalte an leicht umsetzbarem Kohlenstoff.

In der Variante Konservierend (K) sind die Unterschiede in den C_{hwil}-Gehalten zwischen den Blöcken weniger stark ausgeprägt (Abbildung 139). Diese liegen in allen drei Blöcken in den Schichten 1 und 2 mit Werten zwischen 600 und 800 mg kg⁻¹ in der GHK E. Schicht 3 stellt in dieser Variante bodenbearbeitungstechnisch die Grenze zwischen bearbeiteten und nicht bearbeiteten Schichten dar. In dieser weist der straßenferne Block 3 bei sehr geringen Streuungen Werte um 350 mg kg⁻¹ (GHK D) auf, Block 1 hingegen mit Werten zwischen 350 und 470 mg kg⁻¹ (GHK D/E) etwas höhere C_{hwil}-Gehalte bei etwas höherer Streuung. Die höchsten C_{hwil}-Gehalte und zugleich größten Streuungen wurden mit Werten von 340 - 610 mg kg⁻¹ (GHK D/E) für Block 2 ermittelt. Die C_{hwil}-Gehalte der Schichten 4 und 5 liegen mit Werten von 100 - 230 mg kg⁻¹ (Schicht 4) bzw. 50 - 90 mg kg⁻¹ (Schicht 5) in der GHK A und damit in einem ähnlichen Bereich wie in der Variante P.

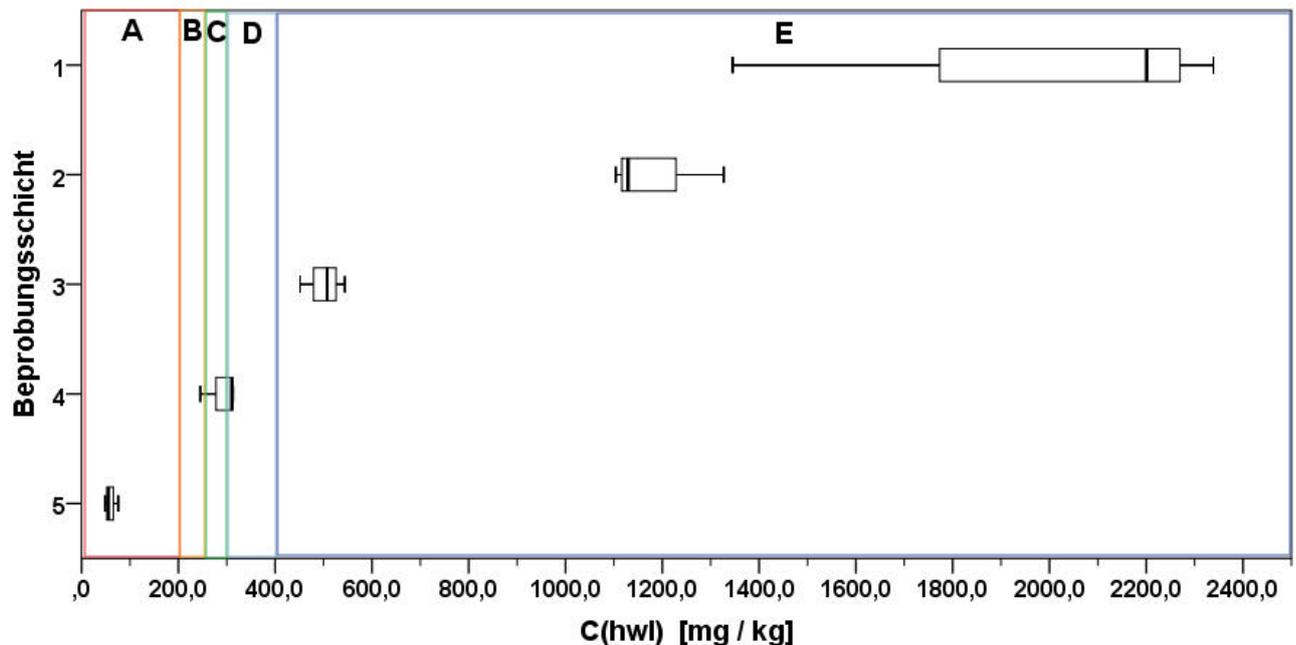


Gehaltsklassen A - E nach Körschen & Schulz (1999)

n = 3 je Schicht und Block

Abbildung 139: C_{hwil}-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau im Herbst 2012

Die C_{hwl} -Gehalte der Variante Grünland (G) liegen in den Schichten 1 und 2 deutlich höher als jene der bewirtschafteten Varianten (Abbildung 140, andere Skalierung). So weist Schicht 1 C_{hwl} -Gehalte zwischen 1350 und 2350 mg kg^{-1} (GHK E) und Schicht 2 Gehalte zwischen 1100 und 1330 mg kg^{-1} (GHK E) auf. Die sehr hohen Werte gehen dabei mit sehr großen Streuungen einher. Die C_{hwl} -Gehalte von Schicht 3 liegen mit 450 - 550 mg kg^{-1} (GHK E) in der Größenordnung dieser Schicht in den bewirtschafteten Varianten, jene von Schicht mit 250 - 310 mg kg^{-1} (GHK C/D) hingegen höher als in der Vergleichsschicht der Varianten P und K. In Schicht 5 liegen die Gehalte in der Variante G auf dem gleichen Niveau (50 - 80 mg kg^{-1}) wie die anderen Varianten in den ackerbaulich genutzten Versuchsblöcken.



Gehaltsklassen A - E nach Körschens & Schulz (1999)

n = 3 je Schicht

Abbildung 140: C_{hwl} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Herbst 2012

Berechnet man die Gesamtmassen an C_{hwl} für das beprobte Bodenpaket (9000 t ha^{-1}) (Abbildung 141) so zeigt sich für Block 1 kein deutlicher Unterschied zwischen den Varianten P und K. Beide weisen C_{hwl} -Massen von ca. $2000 - 2500 \text{ kg ha}^{-1}$ auf. In den Blöcken 2 und 3 hingegen weist die Variante K jeweils leicht höhere C_{hwl} -Massen auf als die Variante P, wobei der mittlere Unterschied jeweils ca. 500 kg ha^{-1} beträgt. Variante G weist mit C_{hwl} -Massen zwischen 3500 und 4300 kg ha^{-1} fast doppelt so hohe Werte auf wie die bewirtschafteten Varianten.

Schlüsselt man die jeweiligen mittleren Gesamtmassen nach Beprobungsschichten auf, ergibt sich ein differenzierteres Bild (Abbildung 142). So enthält die Variante Konservierend in den Schichten 1 - 3 in allen drei Blöcken größere C_{hwl} -Massen als die Variante Pflug (Ausnahme: Schicht 3 im straßenfernen Block 3). In Schicht 4, in welche bei der Pflugvariante regelmäßig frische Erntesterste eingearbeitet werden, weist hingegen in allen drei Blöcken die Variante P die größeren C_{hwl} -Massen auf.

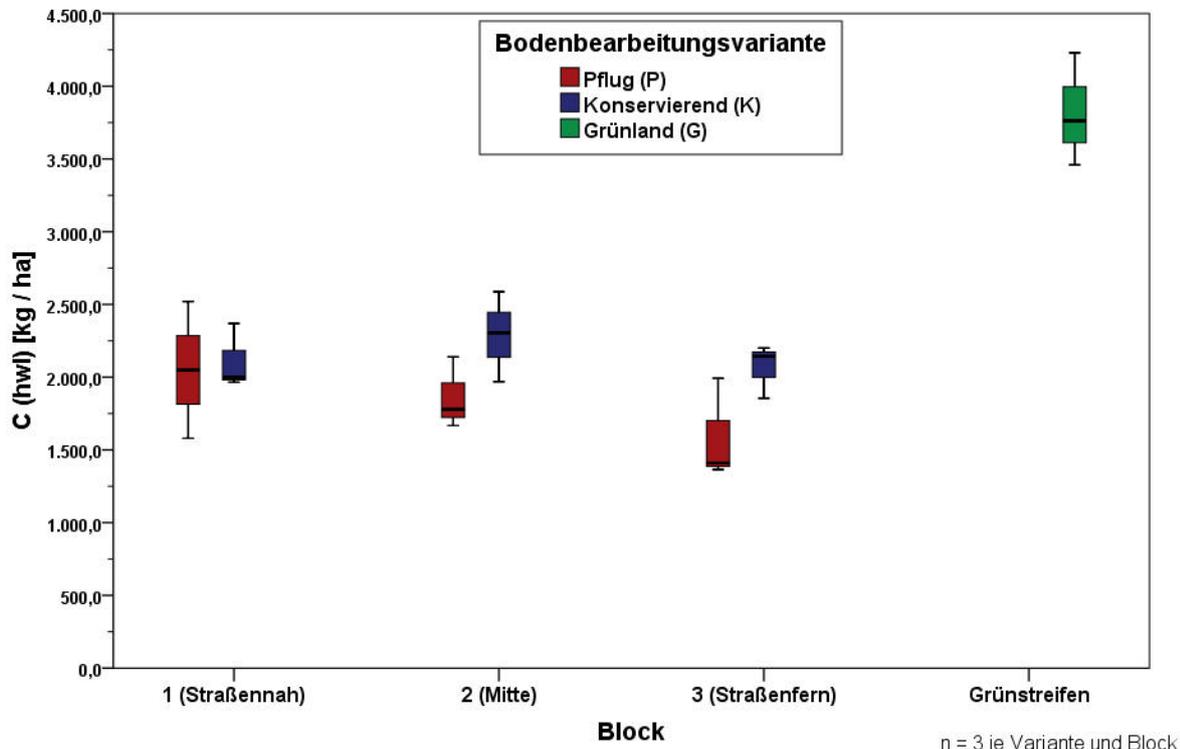


Abbildung 141: Streuungen der Chwl-Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Herbst 2012

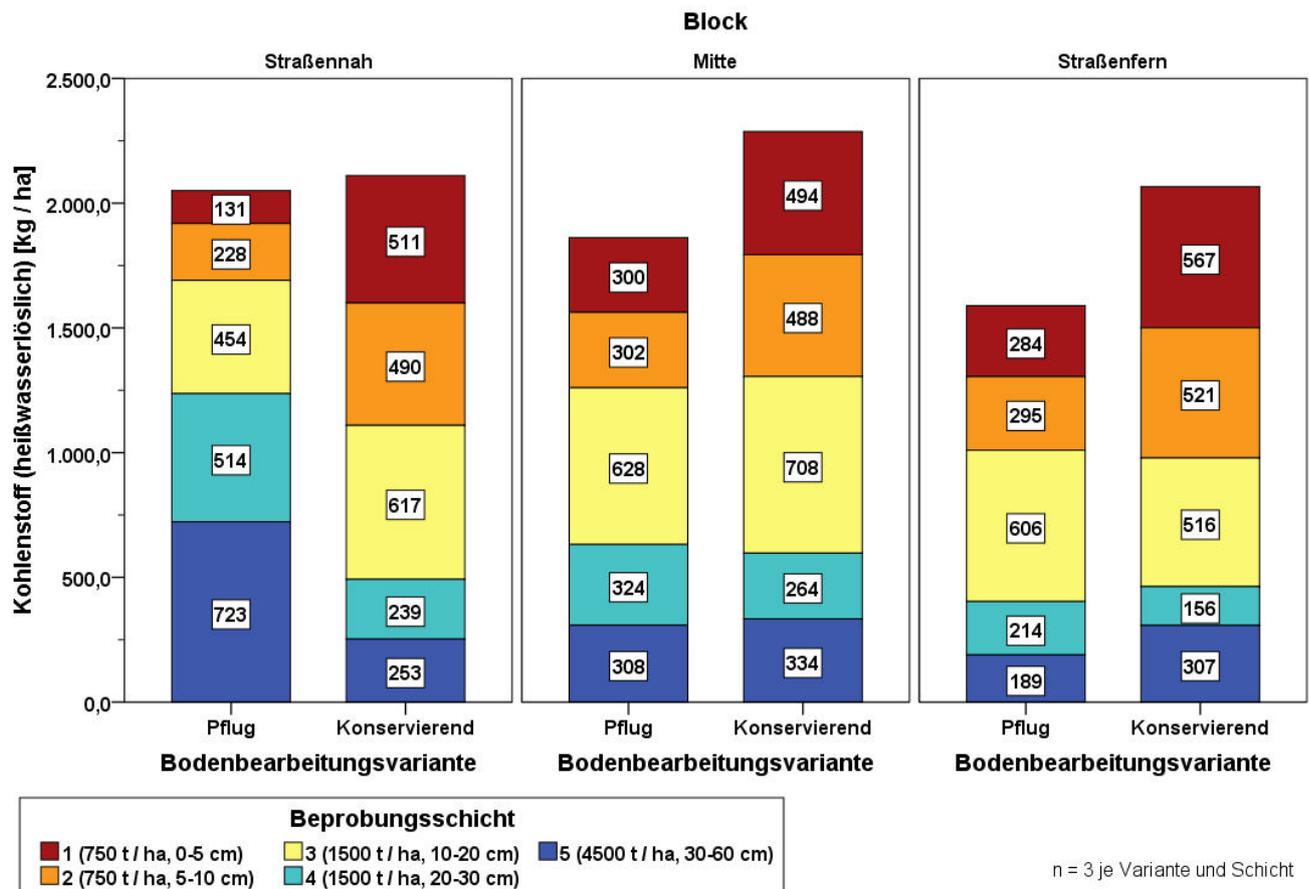
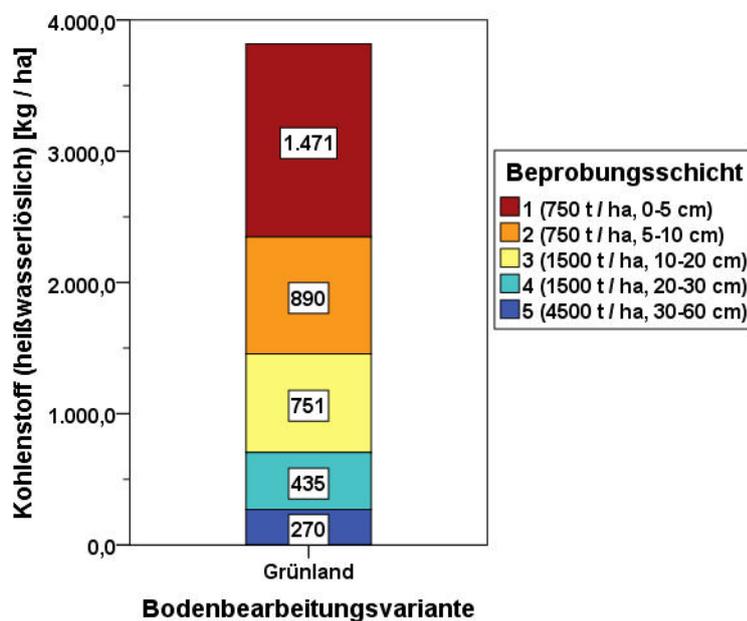


Abbildung 142: Mittlere C_{hwl} -Vorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Herbst 2012

Eine Besonderheit in Bezug auf die C_{hwl} -Massen stellt Schicht 5 dar. Während im mittleren Block 2 beide Varianten in etwa gleich große Vorräte aufweisen, liegen sie im straßenfernen Block 3 in der Variante K deutlich höher als in der Pflugvariante. Im straßennahen Block 1 hingegen weist die Pflugvariante Vorräte von 723 kg ha^{-1} auf, was in etwa dreimal so viel ist wie die Variante K im gleichen Block (253 kg ha^{-1}) und auch im Vergleich zum Unterboden in den anderen Blöcken die mit Abstand größten Vorräte darstellt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass beim Umbruchtermin, welcher ca. zwei Wochen vor der Probenahme lag, erheblich Anteile von humusreichem Oberbodenmaterial bis in den Unterboden eingepflügt wurden. Dies erklärt auch die sehr geringen C_{hwl} -Massen in Schicht 1 der Variante P im Block 1.

In der Variante Grünland (Abbildung 143) wurden bei mittleren Gesamtmassen von ca. 3800 kg ha^{-1} insbesondere in den Schichten 1 und 2 erheblich größere C_{hwl} -Massen ermittelt als für die bewirtschafteten Varianten. Diese beiden Schichten zusammen enthalten mit 2350 kg ha^{-1} bereits mehr C_{hwl} als die Gesamtprofile der bewirtschafteten Varianten. Für die Schichten 3-5 wurden hingegen C_{hwl} -Massen in der gleichen Größenordnung ermittelt wie für die Varianten P und K.



n = 3 je Schicht

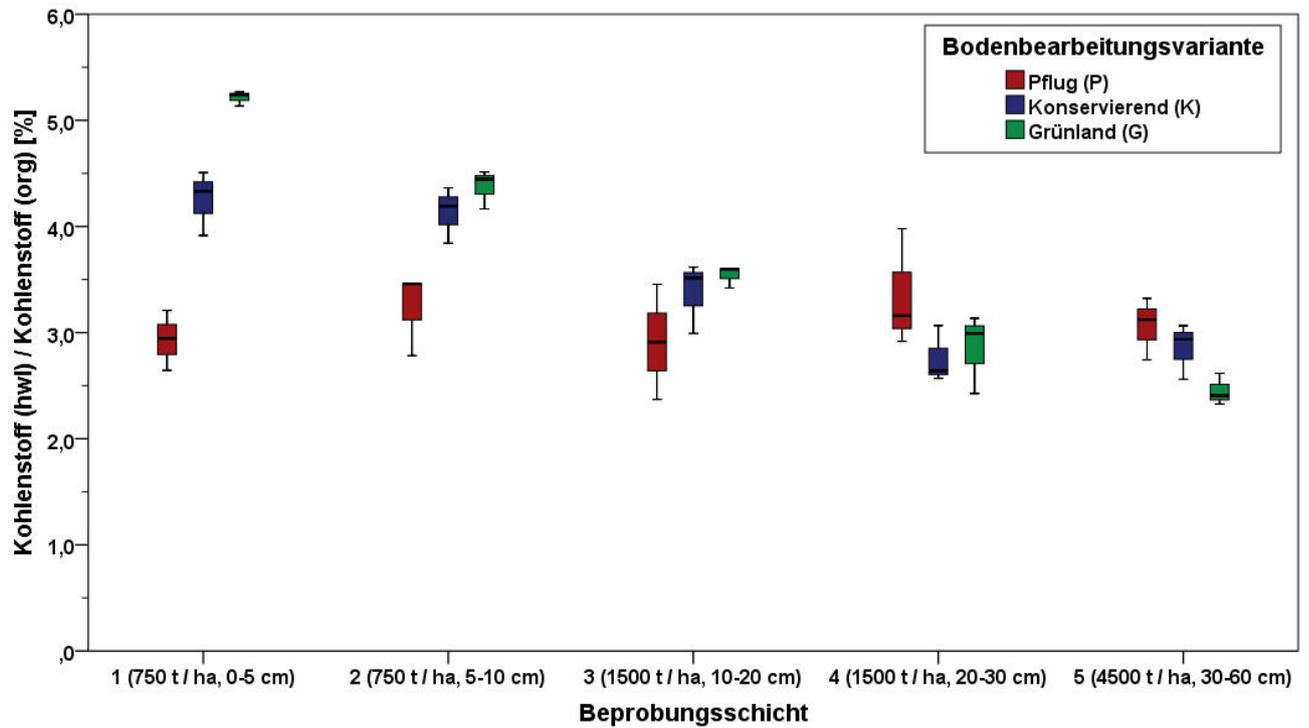
Abbildung 143: Mittlere C_{hwl} -Vorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Herbst 2012

Die C_{hwl} -Gesamtvorräte wurden, wie bereits für den Kohlen- und Stickstoff, auf einen idealisierten Boden ohne Grobbodenanteile bezogen. Die korrigierten Vorräte für unterschiedliche Grobbodenanteile können Tabelle 12 entnommen werden.

Die jeweiligen Anteile von C_{hwl} an den Kohlenstoff-Gesamtmassen in den fünf Beprobungsschichten sind in Abbildung 144 für Block 1 dargestellt. Dabei fällt auf, dass sich diese zwischen den Varianten insbesondere in den Schichten 1 und 2 unterscheiden. So weist die Variante P in Schicht 1 einen Anteil von ca. 3 % auf, im Gegensatz zu den Varianten K (4 - 4,5 %) und G (5 - 5,5 %). In Schicht 2 liegen die Anteile bei 3 - 3,5 % (P) bzw. 4 - 4,5 % (K und G). In Schicht 3 liegen die Anteile in der Variante P nur noch geringfügig niedriger als in den Varianten K und G, in den Schichten 4 und 5 kehrt sich das Verhältnis sogar um. In diesen drei Schichten liegen die Anteile in allen drei Varianten zwischen 2,5 und 3,5 %.

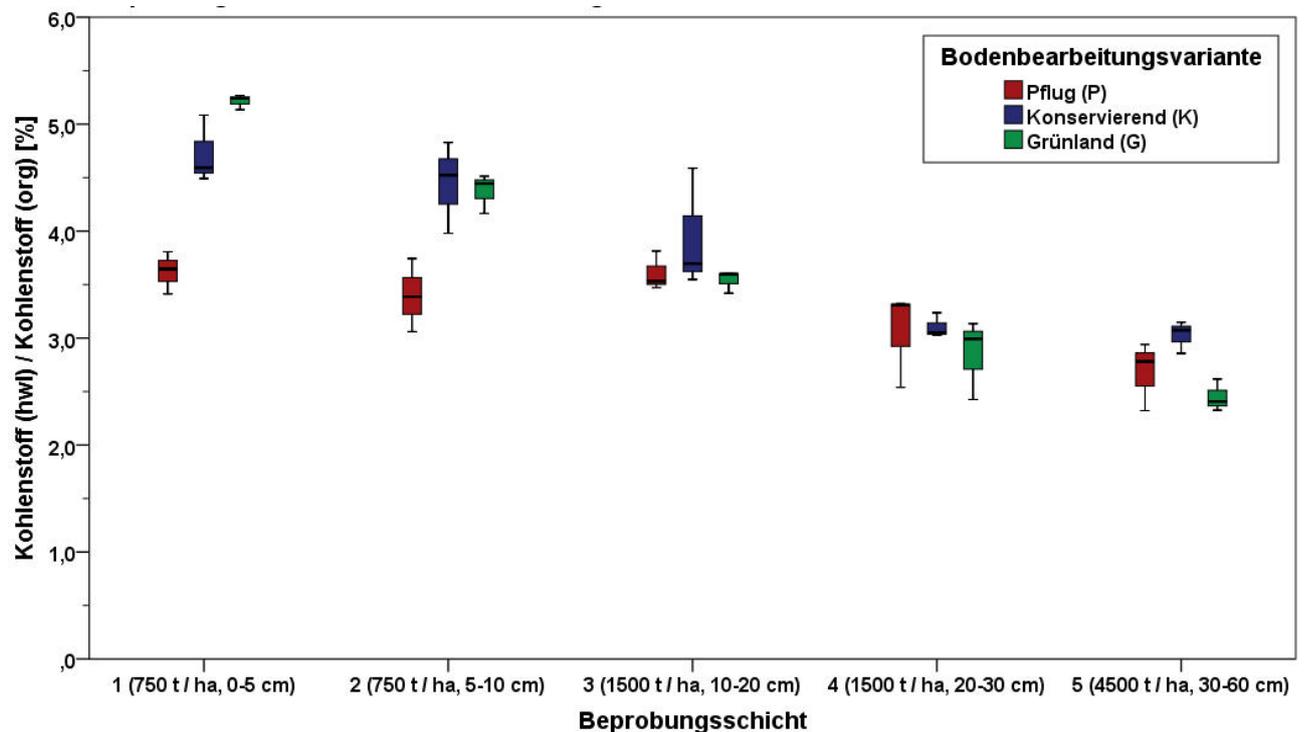
Tabelle 12: Nach potentiellen Skelettanteilen korrigierte heißwasserlösliche Kohlenstoffvorräte innerhalb der einzelnen Blöcke und Bodenbearbeitungsparzellen am Standort Methau im Herbst 2012

Beprobungsschicht	Skelettanteil Masse-%	Block 1		Grünland	Block 2		Block 3	
		P	K	G	P	K	P	K
		Heißwasserlösliche Kohlenstoffvorräte [kg ha ⁻¹]						
1-4 (4500 t / ha)	0	1327	1857	3547	1554	1954	1399	1760
5 (4500 t / ha)	0	723	253	270	308	334	189	307
1-5 (9000 t / ha)	0	2050	2110	3817	1862	2288	1588	2067
1-4 (4500 t / ha)	5	1261	1764	3370	1476	1856	1329	1672
5 (4500 t / ha)	5	687	240	257	293	317	180	292
1-5 (9000 t / ha)	5	1948	2005	3626	1769	2174	1509	1964
1-4 (4500 t / ha)	10	1194	1671	3192	1399	1759	1259	1584
5 (4500 t / ha)	10	651	228	243	277	301	170	276
1-5 (9000 t / ha)	10	1845	1899	3435	1676	2059	1429	1860
1-4 (4500 t / ha)	15	1128	1578	3015	1321	1661	1189	1496
5 (4500 t / ha)	15	615	215	230	262	284	161	261
1-5 (9000 t / ha)	15	1743	1794	3244	1583	1945	1350	1757
1-4 (4500 t / ha)	20	1062	1486	2838	1243	1563	1119	1408
5 (4500 t / ha)	20	578	202	216	246	267	151	246
1-5 (9000 t / ha)	20	1640	1688	3054	1490	1830	1270	1654
1-4 (4500 t / ha)	30	929	1300	2483	1088	1368	979	1232
5 (4500 t / ha)	30	506	177	189	216	234	132	215
1-5 (9000 t / ha)	30	1435	1477	2672	1303	1602	1112	1447
1-4 (4500 t / ha)	50	664	929	1774	777	977	700	880
5 (4500 t / ha)	50	362	127	135	154	167	95	154
1-5 (9000 t / ha)	50	1025	1055	1909	931	1144	794	1034



n = 3 je Schicht und Variante

Abbildung 144: Anteile von C_{hwl} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 1 am Standort Methau im Herbst 2012



n = 3 je Schicht und Variante

Abbildung 145: Anteile von C_{hwl} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 2 am Standort Methau im Herbst 2012

Abbildung 145 zeigt die jeweiligen Anteile in den fünf Beprobungsschichten für Block 2. Dabei sind das Verteilungsmuster sowie die Unterschiede zwischen den Varianten ähnlich wie in Block 1. Allerdings liegen die Anteile in der Variante P mit Werten um 3,5 % in den Schichten 1 - 3 etwas höher als in Block 1. Dies gilt auch für die Anteile der Variante K in den Schichten 1 - 3. In den Schichten 4 und 5 ergeben sich keine großen Unterschiede in den Anteilen zwischen den Blöcken 1 und 2.

In Block 3 liegen die C_{hwl} -Anteile am Gesamtkohlenstoff in der Variante K über die fünf Beprobungsschichten deutlich enger beieinander als in den anderen Blöcken (Abbildung 146), wobei die Anteile mit 3 - 3,2 % in Schicht 3 am geringsten sind. Da die Variante P in den einzelnen Schichten ähnliche Anteile wie in Block 2 aufweist, sind in diesem Block die Anteile der Variante K und P in Schicht 2 annähernd gleich hoch (3,5 - 4 %). Zudem sind, im Gegensatz zu den anderen Blöcken, in Schicht 3 die Anteile der Variante P höher als jene der Variante K, in den Schichten 4 und 5 hingegen jene der Variante K höher als jene der Variante P.

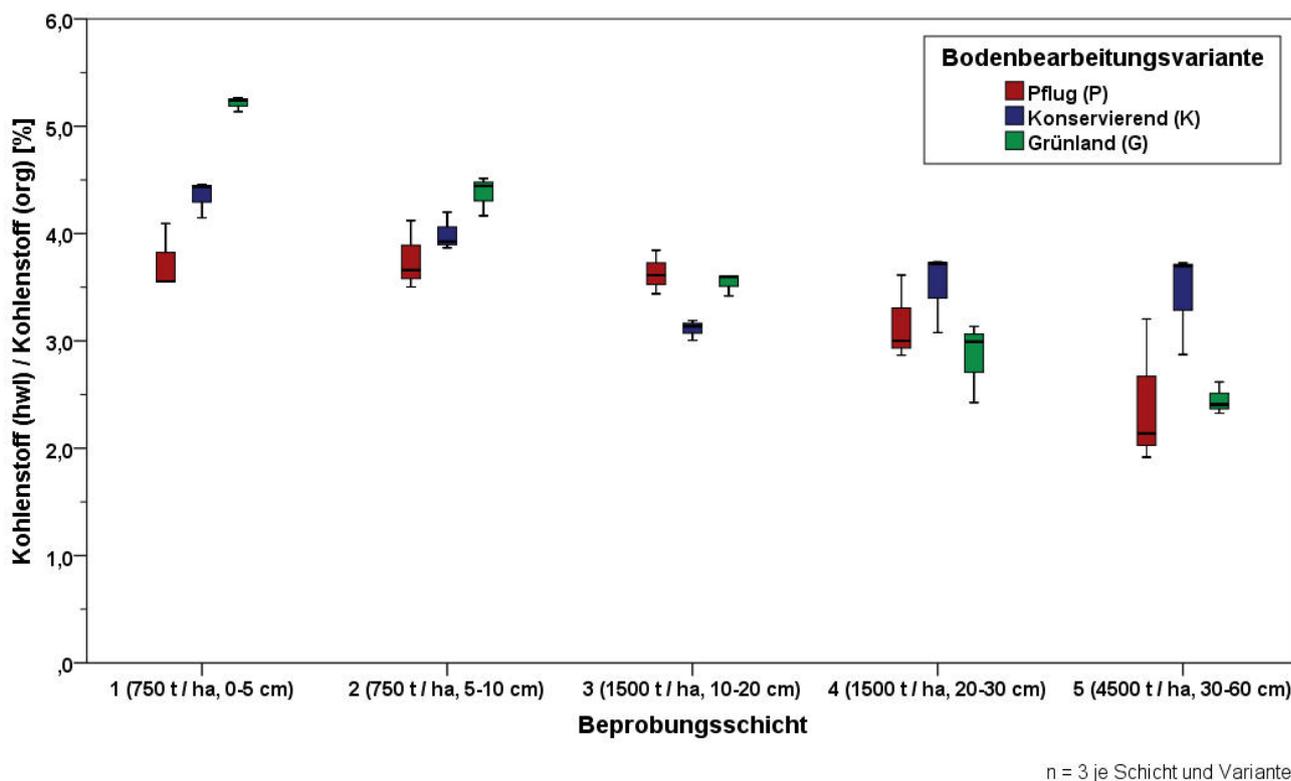


Abbildung 146: Anteile von C_{hwl} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, im Block 3 am Standort Methau im Herbst 2012

Die Anteile entsprechen im Mittel der drei Blöcke in der Variante P insgesamt in etwa den Werten (3 – 4 %), die für diese Variante am Standort Lüttewitz ermittelt wurden. In der Variante K liegen die Werte hingegen insbesondere in den Schichten 1 und 2 mit Werten von 4 - 5 % etwas niedriger als jene der gleichen Variante in Lüttewitz (5 – 6 %). Zu beachten ist bei diesem Vergleich allerdings, dass die Werte in Lüttewitz im Frühjahr und Herbst 2012 erhoben wurden, in Methau hingegen nur für den Herbst 2012.

5.7 Mikrobielle Biomasse

Die mikrobielle Biomasse bzw. der mikrobielle Biomassekohlenstoff (C_{mik}) ist ein in der Bodenökologie gebräuchlicher Indikator für die Umsatzbedingungen im Boden und wird definiert als jener Anteil organischer Substanz im Boden, der aus lebenden Mikroorganismen besteht (ALEF 1993).

C_{mik} wird gemeinhin in mg C kg^{-1} Boden angegeben und umfasst normalerweise ca. 1 – 4 % des gesamten organischen Kohlenstoffs (C_{org}) im Boden (BROOKES 2001: 133). Die mikrobielle Biomasse dient als Quelle und Senke für wichtige Nährstoffe im Boden (Stickstoff, Phosphor und Schwefel). Die Menge an C_{mik} unterliegt dabei starken (saisonalen) Schwankungen und wird kurz- und mittelfristig von den Witterungsbedingungen (hydrothermales Regime) sowie verschiedenen Bewirtschaftungsmaßnahmen wie der Bodenbearbeitung und dem Umgang mit Ernterückständen stark beeinflusst (ALVAREZ et al. 1998: 767; BROOKES 2001).

In Bezug auf Unterschiede in der Bodenbearbeitung wird häufig eine Anreicherung von C_{mik} in den oberflächennahen (humusreichen) Bereichen der konservierend oder in Direktsaat bearbeiteten Böden im Vergleich zur wendenden Bodenbearbeitung beobachtet. Im Rahmen entsprechender wissenschaftlicher Untersuchungen wird C_{mik} als „nützlicher und sensitiver biologischer Indikator für bodenbearbeitungsbedingte Änderungen“ (ALVAREZ et al. 1998, nach CARTER 1986; POWLSON & JENKINSON: 1987; ANDERSON & DOMSCH: 1989) angesehen. Zudem können weitere bodenökologische Indikatoren aus C_{mik} abgeleitet werden, insbesondere das Massenverhältnis des mikrobiellen Kohlenstoffs zum Gesamtkohlenstoff:

„Da die mikrobielle Biomasse ein sehr sensibler Indikator für Veränderungen von Prozessen im Boden ist und schneller darauf reagiert als der organische Gesamtkohlenstoff, gilt das $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis als ein guter Kennwert für die biologische Aktivität und die C-Anreicherung (SPARLING, 1997).“ (TISCHER 2006)

„This $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ ratio could be developed to a site-specific baseline value for different soil systems and could be used as a stability indicator for quick recognition of an environmental change.“ (ANDERSON 2003: 291)

Trotz der starken räumlichen und zeitlichen Streuung von C_{mik} , die im Verlauf eines Jahres einen 1,5- bis 3-fachen Unterschied zwischen ihren Maximum- und Minimumwerten aufweisen können (MACHULLA et al. 2001: 551), wurde vielfach versucht, die C_{mik} -Massen der oberen 30 cm eines Bodens (bei Ackerböden: Krumme) in Klassen einzuteilen. MACHULLA et al. (2001) schlagen dabei folgende C_{mik} Klassen mit an die Bodenkundliche Kartieranleitung (KA) angelehnten Benennungen vor:

■ $C_{\text{mik}} < 200 \text{ kg ha}^{-1}$	sehr gering
■ $C_{\text{mik}} 200 - 400 \text{ kg ha}^{-1}$	gering
■ $C_{\text{mik}} 400 - 800 \text{ kg ha}^{-1}$	mäßig
■ $C_{\text{mik}} 800 - 1600 \text{ kg ha}^{-1}$	mittel
■ $C_{\text{mik}} 1600 - 3200 \text{ kg ha}^{-1}$	hoch
■ $C_{\text{mik}} > 3200 \text{ kg ha}^{-1}$	sehr hoch

Für Grünlandstandorte werden C_{mik} -Werte angegeben, die das Zwei- bis Dreifache der Werte für Ackerland betragen (JÖRGENSEN 1995, ALVAREZ et al. 1998: 769).

Das $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis kann nach SOMMER et al. (2002) in die folgenden Klassen eingeteilt werden:

■ $< 0,1 \%$	sehr gering
■ $0,1 \% - 0,4 \%$	gering

■ 0,5 % - 1,8 %	mittel
■ 1,9 % - 3,5 %	hoch
■ > 3,5 %	sehr hoch

Nach ANDERSON (2003: 289) liegt das $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis unter Wald und Acker bei neutralen pH-Werten i.d.R. zwischen 2,0 und 4,4 %, je nach Nährstoffstatus und Bodenbearbeitung, was den Klassen „hoch“ und „sehr hoch“ nach Sommer entspricht.

Bei der im Rahmen dieser Untersuchung angewandten Chloroform(C)-Fumigations(F)-Extraktions(E)-Methode (VANCE et al. (1987), DIN ISO 14240-2) wird die gesamte extrahierbare Biomasse aus frisch abgetöteten Mikroorganismen (auch im Ruhezustand) bestimmt. Die Berechnung erfolgte mit einem K_{EC} -Faktor von 0,45.

Aufgrund der Neuinbetriebnahme des Analysators im Jahr 2012 nebst anfänglichen Problemen bei der Messung aufgrund der hohen Salzkonzentration im Extrakt, traten bei den für die vorliegende Arbeit durchgeführten Analysen erhebliche Schwankungen der Messwerte in Bezug auf die drei Laborwiederholungen auf. Auch bei Wiederholungs- bzw. Nachmessungen traten teilweise erhebliche Unterschiede zur Originalmessung auf. Insgesamt ist daher von einer erheblichen Messunsicherheit für die im Rahmen der Basisbeprobungen analysierten Proben aus dem Jahr 2012 (Lüttewitz und Methau) auszugehen.

Die Analyse der Proben aus dem Umbruchversuch erfolgte auf Basis einer Messroutine mit vorheriger Verdünnung (1:4) der Extrakte, wodurch deutlich stabilere Messwerte produziert wurden und diese daher als zuverlässig angesehen werden können.

5.7.1 Lüttewitz

Der mikrobielle Kohlenstoff wurde für den Standort Lüttewitz im Frühjahr und Herbst 2012 (Basisbeprobungen) für jeweils drei Beprobungspunkte pro Bodenbearbeitungsvariante ermittelt.

Im Rahmen des Umbruchversuches wurde C_{mik} für alle Beprobungspunkte bzw. Proben analysiert.

5.7.1.1 Basisbeprobungen

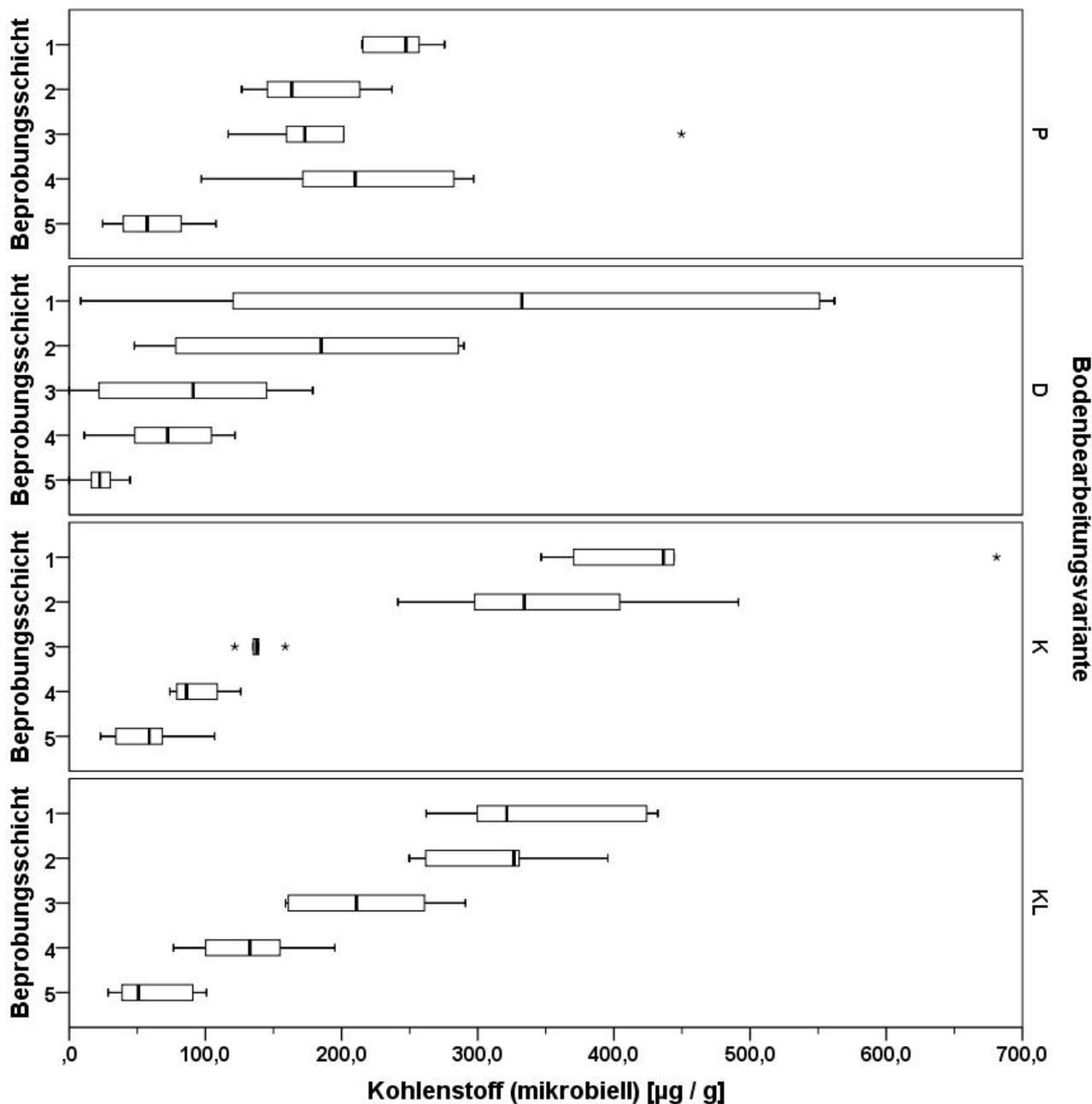
Die Gehalte an C_{mik} liegen in der Variante P im Jahr 2012 (Abbildung 147) in der Krume (Schicht 1 - 4) bei 100 – 300 $\mu\text{g g}^{-1}$, mit der größten Streuung in Schicht 4. In Schicht 1 sind die Gehalte mit 200 – 300 $\mu\text{g g}^{-1}$ am höchsten. Die Gehalte im Unterboden (Schicht 5) liegen bei 20 - 100 $\mu\text{g g}^{-1}$.

In der Variante D treten, insbesondere in Schicht 1, aber auch in Schicht 2 und 3, wesentlich größere Streuungen der Werte auf, mit Maximalgehalten von 550 $\mu\text{g g}^{-1}$ in Schicht 1 (MN: 350 $\mu\text{g g}^{-1}$). In Schicht 4 liegen die Gehalte in dieser Variante, ähnlich wie in Schicht 5 der Variante P, bei 20 - 100 $\mu\text{g g}^{-1}$, in Schicht 5 bei 0 - 50 $\mu\text{g g}^{-1}$.

Für die Schichten 1 und 2 der Variante K wurden mit Werten von 350 - 450 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Schicht 1) bzw. 250 - 500 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Schicht 2) ebenfalls sehr hohe C_{mik} -Gehalte ermittelt. Die Schichten 3, 4 und 5 hingegen weisen bei recht geringen Streuungen sehr niedrige Gehalte von max. 150 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Schicht 3) auf.

In der Variante KL ergibt sich bei den C_{mik} -Gehalten ein klassisch tiefenstratifiziertes Bild, wobei sich die Wertebereiche der benachbarten Beprobungsschichten jeweils überlappen. In den Schichten 1 und 2 werden da-

bei ähnliche Gehalte wie in der Variante K erreicht, Schicht 3 liegt im Wertebereich der Krume der Variante P (150 - 300 $\mu\text{g g}^{-1}$). Auch für Schicht 4 wurden noch Maximalgehalte von 200 $\mu\text{g g}^{-1}$ ermittelt, Schicht 5 liegt im gleichen Wertebereich bis max. 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ wie in den Varianten P und K.



n = 6 je Schicht

Abbildung 147: C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012)

Die mittleren C_{mik} -Massen an den beiden Beprobungsterminen im Jahr 2012 für das Gesamtprofil von 9000 t Boden ha^{-1} (Abbildung 148) liegen in den Varianten Pflug und Konservierend bei ca. 1200 kg ha^{-1} und in der Variante Konservierend Locker bei ca. 1300 kg ha^{-1} . Mit C_{mik} -Massen von ca. 950 (P, K) bis 1000 (KL) kg ha^{-1} in den oberen vier Schichten (Krume) liegen sie in der Gehaltsklasse 4 (mittel) nach MACHULLA et al. (2001).

Während die C_{mik} -Massen dabei in Schicht 5 in allen drei Varianten in der gleichen Größenordnung liegen, sind diese in Schicht 1 in der Variante K am größten (340 kg ha^{-1}), gefolgt von der Variante KL (258 kg ha^{-1}) und der Variante P (182 kg ha^{-1}). In Schicht 2 weisen die Variante K und KL etwa gleich große C_{mik} -Massen von ca. 250 kg ha^{-1} auf, in der Variante P sind diese hingegen deutlich geringer (131 kg ha^{-1}). In Schicht 3 liegen die C_{mik} -Massen in den Varianten P und K mit jeweils etwa 320 kg ha^{-1} über jenen der Variante K (208 kg ha^{-1}). Schicht 4, in welche lediglich in der Variante Pflug Erntereste und Oberbodenmaterial eingearbeitet wird, weist folgerichtig in eben dieser Variante die höchsten C_{mik} -Massen auf (317 kg ha^{-1}), gefolgt von den Varianten KL (198 kg ha^{-1}) und K (140 kg ha^{-1}).

In der Variante D wurden für das Gesamtprofil mit ca. 700 kg ha^{-1} deutlich geringere C_{mik} -Gesamtmassen ermittelt als für die anderen Varianten. Mit ca. 600 kg ha^{-1} in der Krume liegt diese Variante in der Gehaltsstufe 3 (mäßig) nach MACHULLA et al. (2001). Während die C_{mik} -Massen in Schicht 1 mit 238 kg ha^{-1} etwa auf dem Niveau der Variante KL liegen und in Schicht 2 mit 134 kg ha^{-1} auf jenem der Variante P, sind sie in den Schichten 3 - 5 die jeweils geringsten aller Varianten.

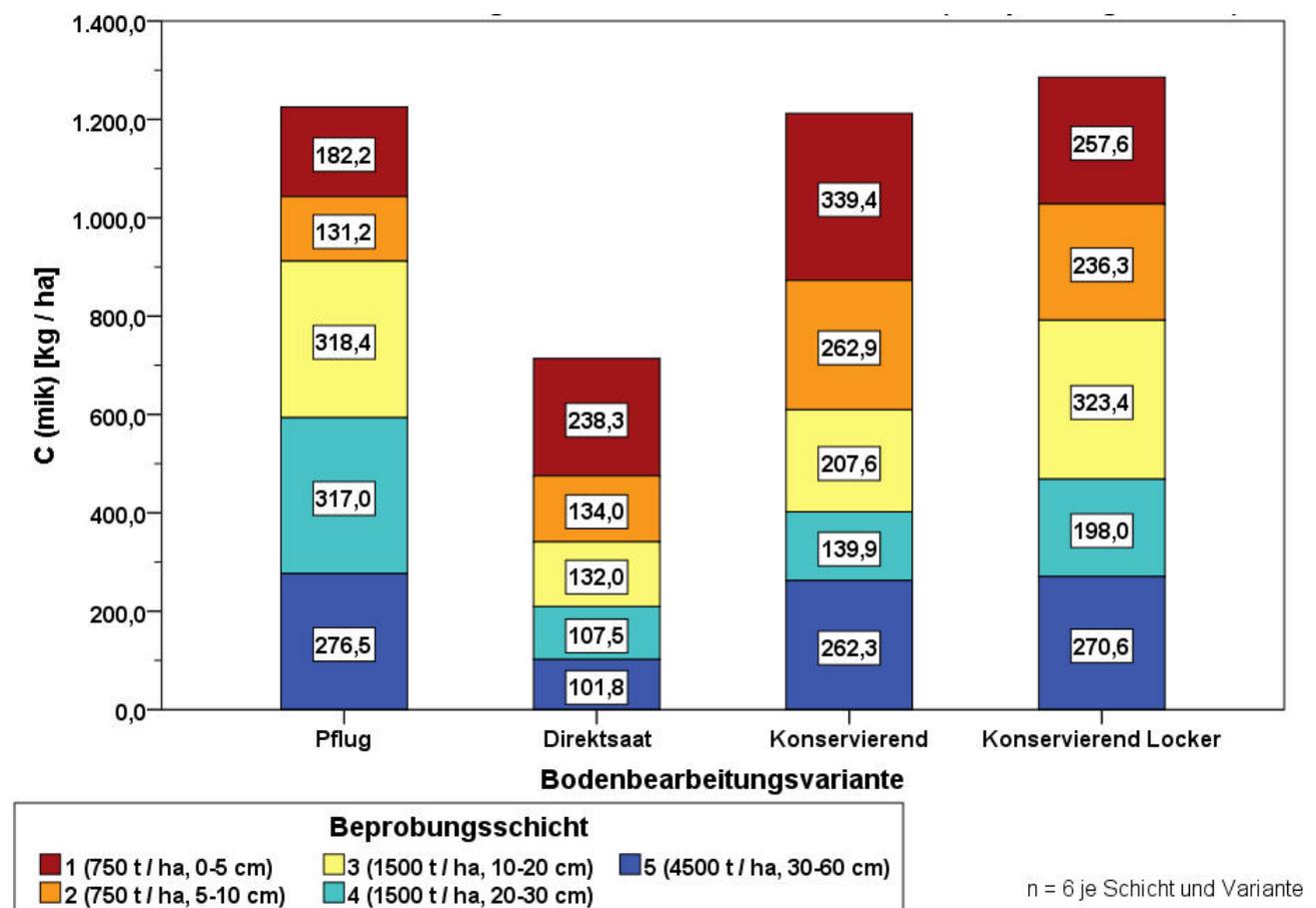
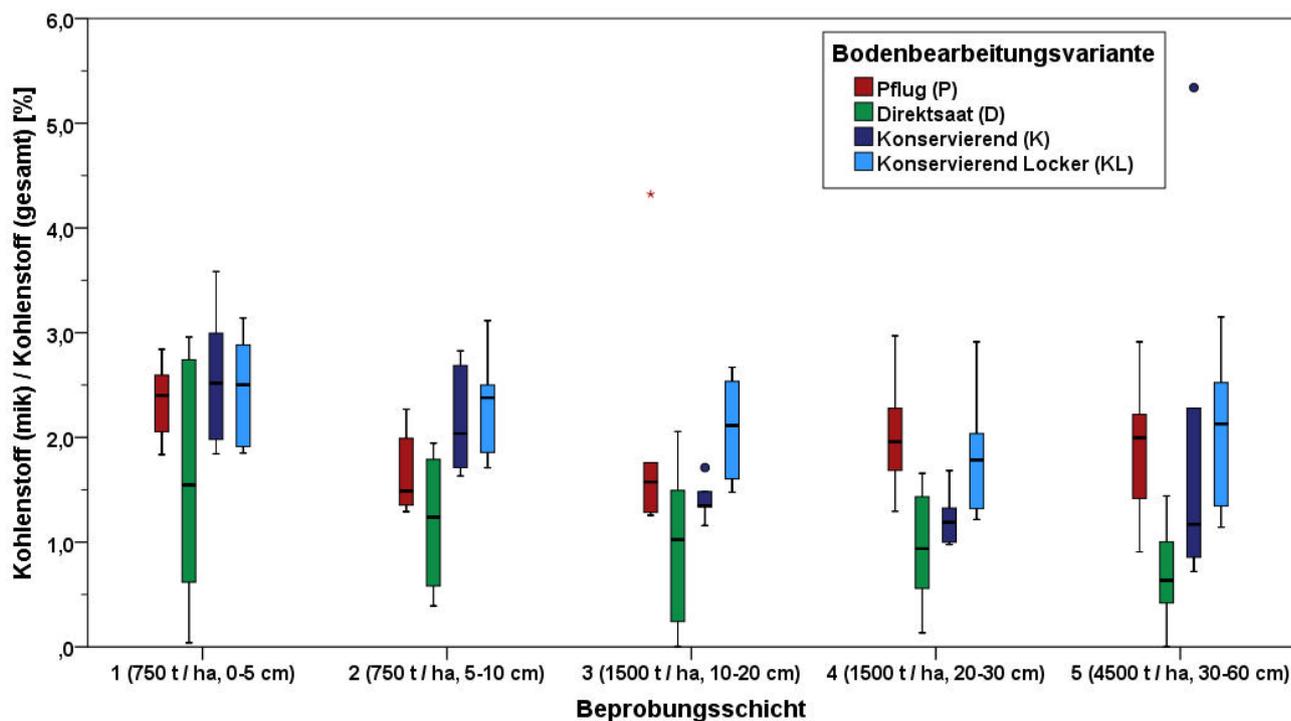


Abbildung 148: Mittlere C_{mik} -Massen in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012)

Die Berechnung der Anteile des mikrobiellen Kohlenstoffs am Gesamtkohlenstoff in den vier Bearbeitungsvarianten und fünf Tiefenstufen (Abbildung 149) liefert für die Varianten P, K und KL Anteile von 1 – 3 % in allen Schichten (Ausnahme: Variante KL in Schicht 5 bis zu 0,5 %). Am höchsten sind die Anteile dabei in Schicht 1

mit 2 – 3 %, in den Varianten K und KL werden diese Werte auch in Schicht 2 sowie in der Variante KL in Schicht 3 erreicht. Grundsätzlich nehmen die Anteile in den Variante K und KL aber mit der Tiefe ab. In den Varianten P und KL werden allerdings auch in Schicht 4 noch Anteile von bis zu 3 % erreicht. In Schicht 5, die grundsätzlich vergleichsweise geringe C_{mik} - und C_{t} -Gehalte bzw. -Massen aufweist, werden für diese drei Varianten Anteile von bis zu 3 % ermittelt.

Die Anteile von C_{mik} an C_{t} liegen in der Variante D in allen Schichten unter jenen der anderen Varianten und weisen, insbesondere in den Schichten 1 - 3, sehr hohe Streuungen auf. So werden in Schicht 1 Anteile von 0 - 3 % erreicht, in den Schichten 2 und 3 von 0 - 2 % und in den Schichten 4 und 5 von 0 - 1,5 %.



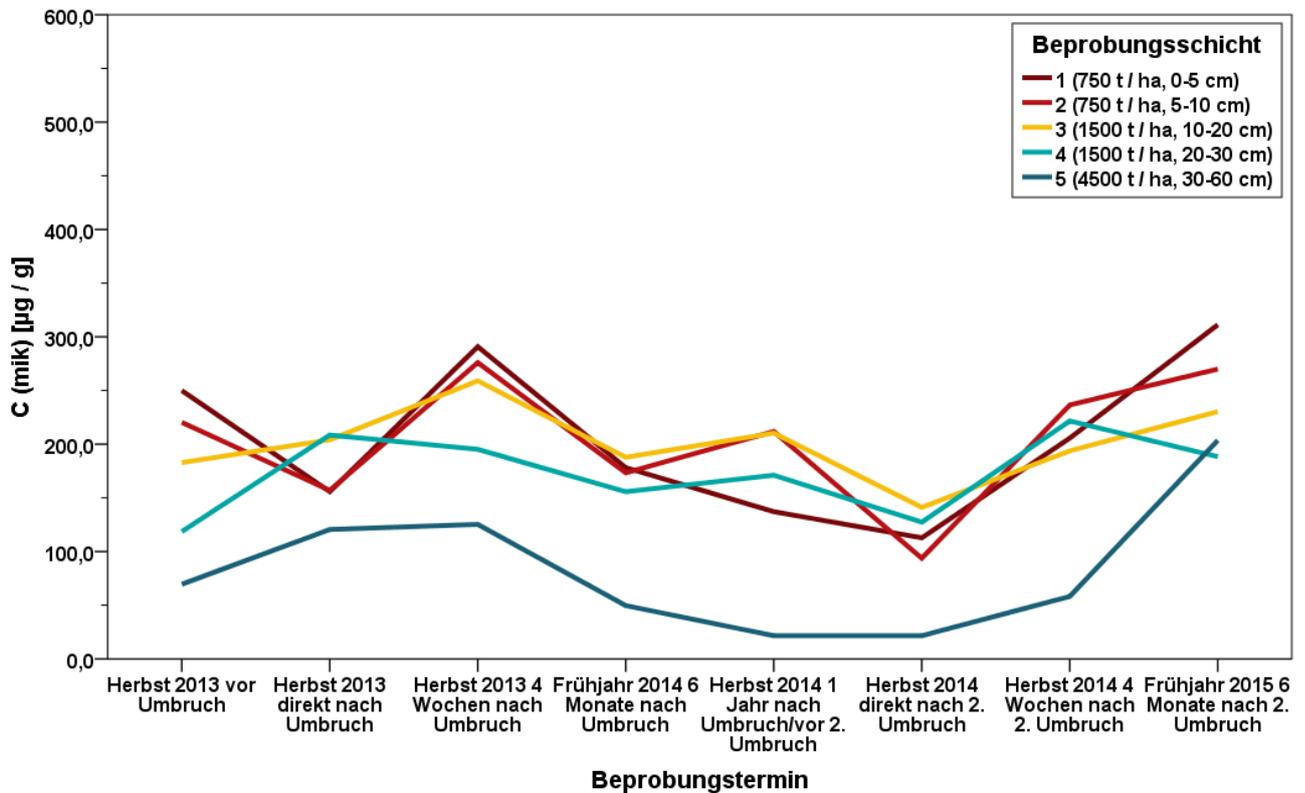
n = 6 je Schicht und Variante

Abbildung 149: Anteile von C_{mik} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012)

5.7.1.2 Umbruchversuch

Die mikrobiellen Kohlenstoffgehalte in der Variante Pflug (P) (Abbildung 150) liegen in der Krume (Schicht 1 - 4) im Verlauf des Umbruchversuches bei 100 - 300 $\mu\text{g g}^{-1}$. Dabei nahmen die C_{mik} -Gehalte in den Schichten 1 und 2 unmittelbar nach dem ersten Umbruch von 200 - 250 $\mu\text{g g}^{-1}$ auf ca. 150 $\mu\text{g g}^{-1}$ ab, während sie in den Schichten 3 und 4 auf ca. 200 $\mu\text{g g}^{-1}$ zunehmen. Bereits vier Wochen nach dem Umbruch liegen die C_{mik} -Gehalte allerdings in den Schichten 1 - 3 wieder bei 250 - 300 $\mu\text{g g}^{-1}$, während sie in Schicht 4 bei 200 $\mu\text{g g}^{-1}$ verbleiben. Zum Frühjahr 2014 sinken die C_{mik} -Gehalte in allen vier Schichten deutlich ab und liegen bei 150 - 200 $\mu\text{g g}^{-1}$. Für die Schichten 2, 3 und 4 wurde zum Herbst 2014 ein Anstieg der C_{mik} -Gehalte festgestellt, lediglich in Schicht 1 sinken sie auf ca. 150 $\mu\text{g g}^{-1}$ ab. Unmittelbar nach dem 2. Umbruch erreichen die C_{mik} -Gehalte in allen Schichten ein Minimum von 100 - 150 $\mu\text{g g}^{-1}$, steigen allerdings zum Termin 2. Wochen nach dem 2. Umbruch wieder deutlich auf ca. 200 $\mu\text{g g}^{-1}$ an. Im Frühjahr 2015 schließlich sind die C_{mik} -Gehalte als Funktion der Tiefe zwischen 300 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Schicht 1) und 200 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Schicht 4) stratifiziert.

In der nicht direkt von der Bodenbearbeitung betroffenen Schicht 5 nehmen die Gehalte im Verlauf des Herbstes 2013 von 70 auf 120 $\mu\text{g g}^{-1}$ zu, sinken dann allerdings kontinuierlich bis zum 2. Umbruch im Herbst 2014 ab. In der Folge steigen die C_{mik} -Gehalte in dieser Schicht stark an und liegen im Frühjahr 2015 mit ca. 200 $\mu\text{g g}^{-1}$ auf dem gleichen Niveau wie jene der Schicht 4.



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 150: Mittlere C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug (PU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Im Gegensatz zur Variante P sind die C_{mik} -Gehalte der fünf Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat (D) über den gesamten Untersuchungszeitraum des Umbruchversuches als Funktion der Tiefe stratifiziert (Abbildung 151).

Dabei weist Schicht 1 Gehalte zwischen 320 und 520 $\mu\text{g g}^{-1}$ auf, welche vom ersten Beprobungstermin im Herbst 2013 (400 $\mu\text{g g}^{-1}$) bis zum Frühjahr 2014 (520 $\mu\text{g g}^{-1}$) kontinuierlich zunehmen. Ein deutlicher Rückgang der C_{mik} -Gehalte dieser Schicht zum ersten Termin im Herbst 2014 vor der Rübenernte wird von einem kurzfristigen starken Anstieg zum Termin nach der Ernte sowie einem erneuten Rückgang zum Termin vier Wochen nach der Ernte gefolgt. Im Frühjahr 2015 liegen die C_{mik} -Gehalte wieder in etwa auf dem Niveau des Frühjahrs 2014.

Auch in Schicht 2 der Variante D zeigt sich ein ähnlicher zeitlicher Verlauf der Werte; diese liegen aber insgesamt niedriger (270 - 400 $\mu\text{g g}^{-1}$) und weisen weniger starke Schwankungen zwischen den Terminen auf.

In den Schichten 3 und 4 sind diese Schwankungen noch geringer, dabei werden Werte von 150 – 200 $\mu\text{g g}^{-1}$ erreicht, wobei Schicht 3 an (fast) allen Terminen geringfügig höhere C_{mik} -Gehalte aufweist.

Im Unterboden (Schicht 5) liegen die Gehalte zunächst bei ca. 100 $\mu\text{g g}^{-1}$, steigen allerdings über den Winter 2013 /2014 bis zum Frühjahr 2014 auf ca. 150 $\mu\text{g g}^{-1}$ an und erreichen damit das Niveau der Schichten 3 und 4. Im Herbst 2014 liegen die C_{mik} -Gehalte dieser Schicht zunächst wieder auf dem Niveau des Herbstes 2013,

steigen allerdings zum Termin vier Wochen nach der Ernte auf ein Maximum von $200 \mu\text{g g}^{-1}$. Im Frühjahr 2015 liegen die C_{mik} -Gehalte wieder auf dem Ausgangsniveau von ca. $100 \mu\text{g g}^{-1}$.

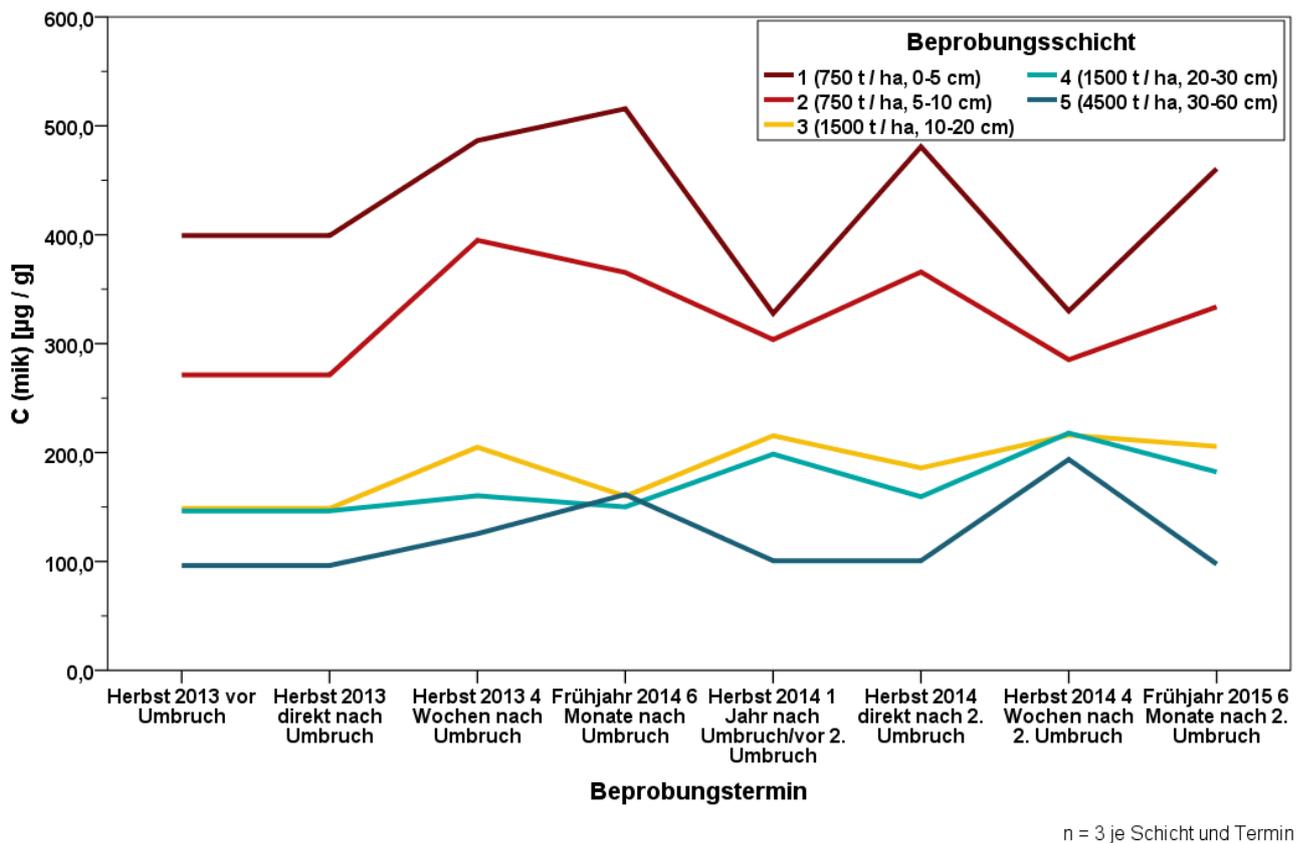
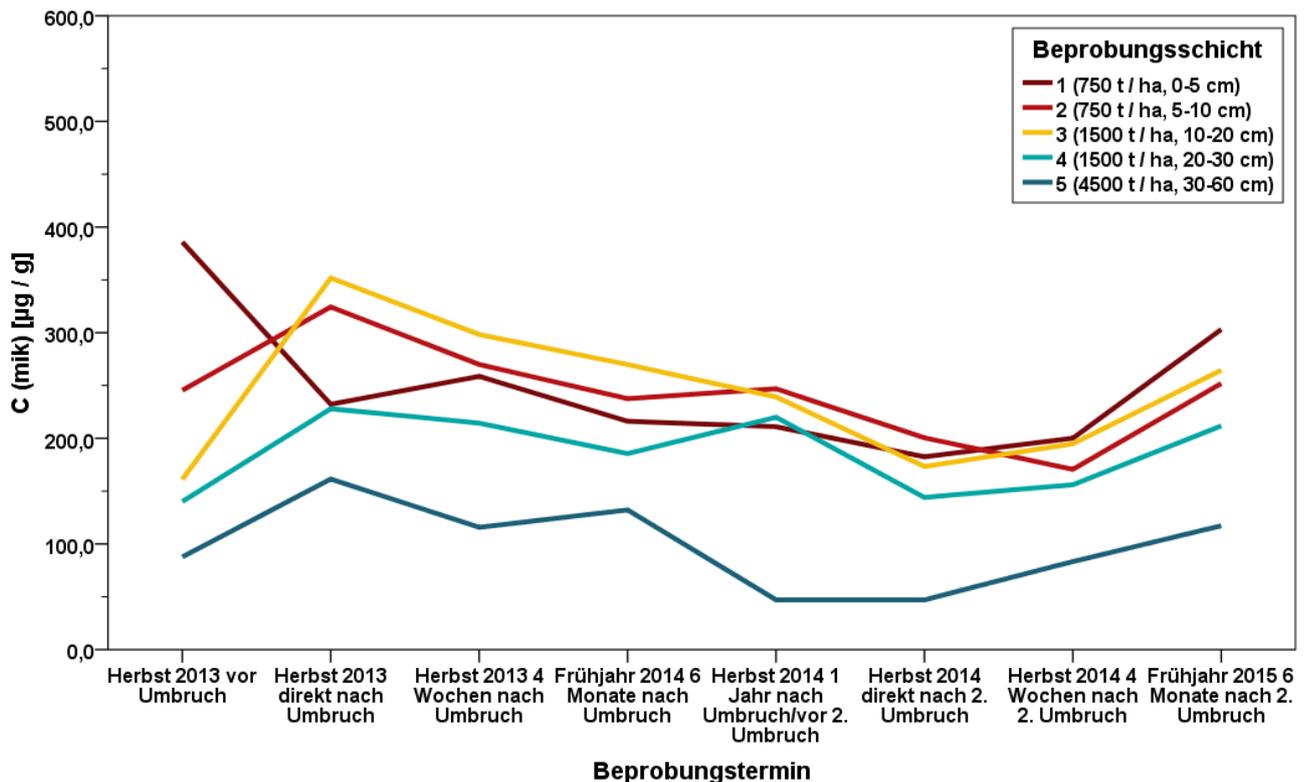


Abbildung 151: Mittlere C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat (DU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

In der Variante Direktsaat gepflügt (DP) liegen die C_{mik} -Gehalte der fünf Beprobungsschichten (Abbildung 152) im Herbst 2013 zunächst auf dem Niveau der Variante D. Durch den Umbruch weist zum Beprobungstermin nach dem Umbruch Schicht 3 mit $350 \mu\text{g g}^{-1}$ die höchsten C_{mik} -Gehalte auf, gefolgt von den Schichten 2 ($320 \mu\text{g g}^{-1}$) und 1 bzw. 4 (jeweils ca. $230 \mu\text{g g}^{-1}$). In der Folge nehmen die C_{mik} -Gehalte in den vier Schichten der Krume bis zum Frühjahr 2014 ab und liegen zu diesem Zeitpunkt bei $200 - 270 \mu\text{g g}^{-1}$. Eine starke Angleichung der C_{mik} -Gehalte in diesen Schichten erfolgt über das Jahr 2014, sodass diese zum Termin vor der Rübenernte bzw. dem 2. Umbruch im Herbst 2014 bei $200 - 250 \mu\text{g g}^{-1}$ liegen. In der Folge des 2. Umbruchs nehmen die C_{mik} -Gehalte in allen vier Schichten zunächst ab und erreichen mit Werten zwischen 150 und $200 \mu\text{g g}^{-1}$ die niedrigsten Gehalte im Versuchsverlauf. Zum Frühjahr 2015 nehmen die C_{mik} -Gehalte schließlich in alle vier Schichten wieder deutlich zu und liegen letztlich bei 200 (Schicht 4) bis $300 \mu\text{g g}^{-1}$ (Schicht 1). In dieser Variante wurden für Schicht 5 zunächst ebenfalls C_{mik} -Gehalte von ca. $100 \mu\text{g g}^{-1}$ ermittelt. Diese nehmen in der Folge des 1. Umbruchs zunächst auf ca. $150 \mu\text{g g}^{-1}$ zu, und liegen auch vier Wochen nach dem Umbruch bzw. im Frühjahr 2014 noch über $100 \mu\text{g g}^{-1}$. In der weiteren Folge des Versuches sinken sie aber stark ab und liegen im Herbst 2014 bei ca. $50 \mu\text{g g}^{-1}$. Durch einen erneuten Anstieg zum Termin 4 Wochen nach dem 2. Umbruch sowie, analog zur Krume, weiter zum Frühjahr 2015, liegen die C_{mik} -Gehalte des Unterbodens schließlich wie in den anderen beiden Varianten wieder auf dem Ausgangsniveau von ca. $100 \mu\text{g g}^{-1}$.

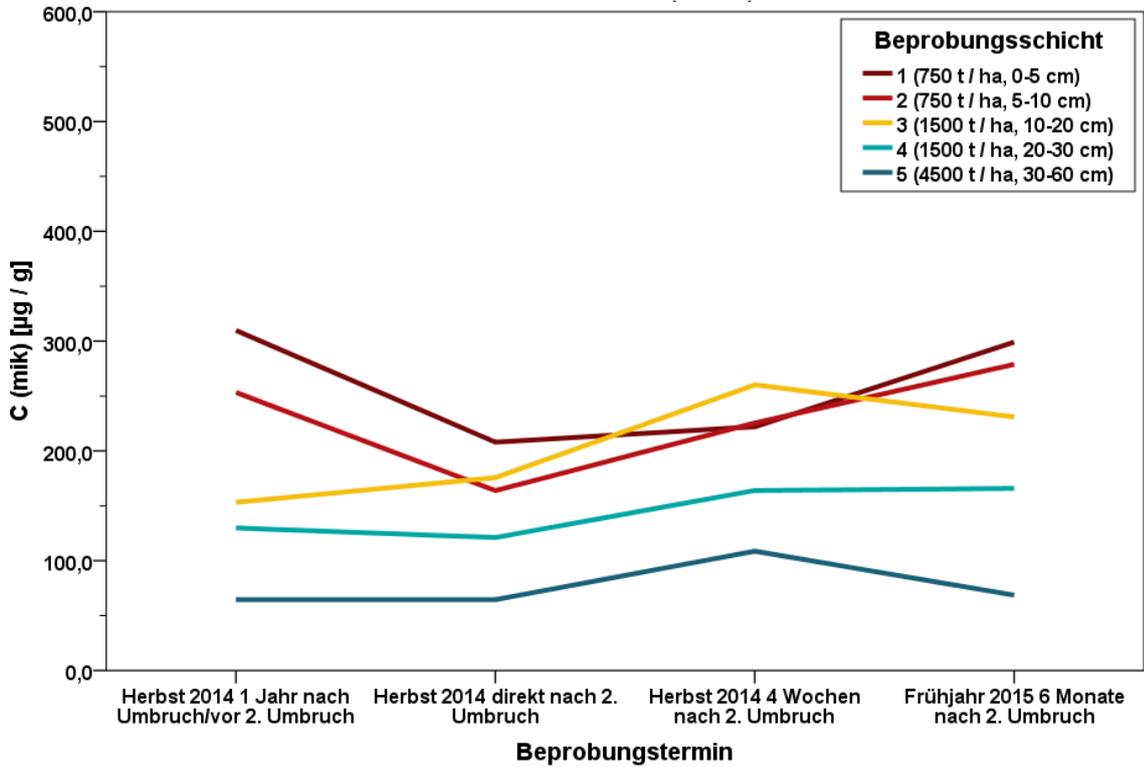


n = 9 je Schicht und Termin

Abbildung 152: Mittlere C_{mik}-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

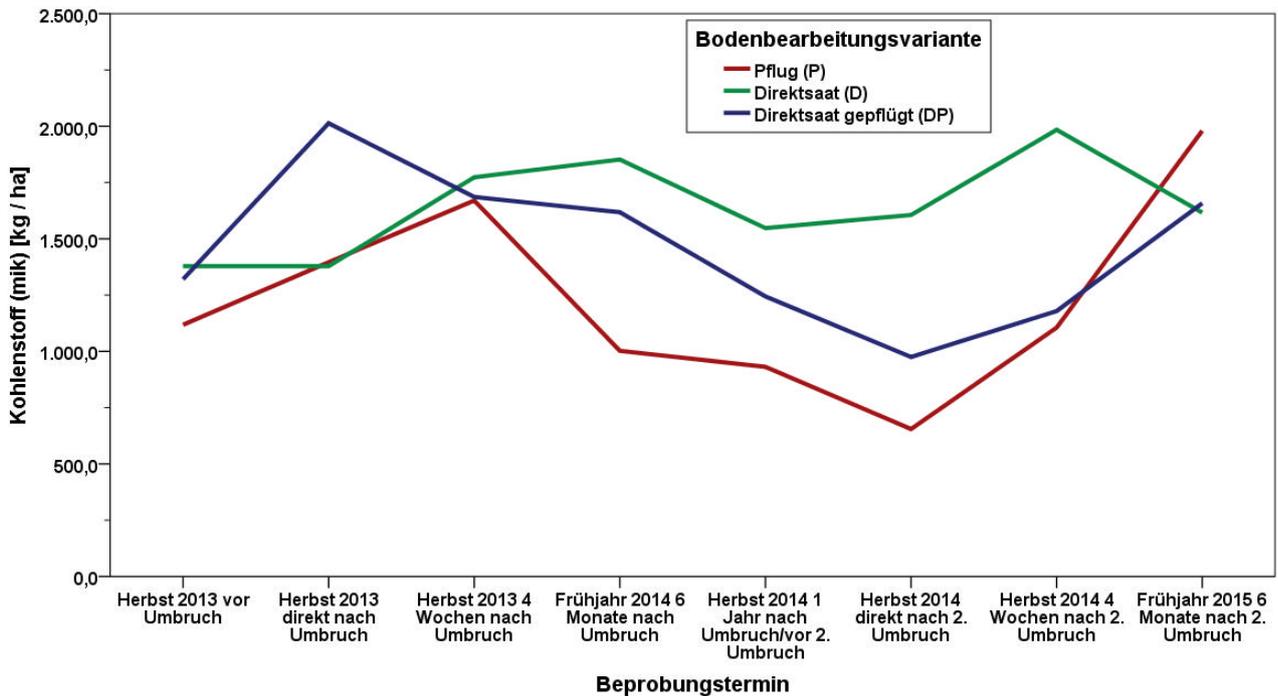
Im Rahmen der Wiederholung des Versuches wurden die Streifen DP4 - DP6 im Herbst 2014 (erstmalig) umgebrochen. Unmittelbar vor dem Umbruch sind die C_{mik}-Gehalte in den fünf Beprobungsschichten dieser Streifen (Abbildung 153) ähnlich stratifiziert wie jene der Varianten D und DP (s.o.), wobei die Ausgangsgehalte insbesondere in den Schichten 1 und 5 geringer sind als im Herbst 2013. Dies bestätigt die Ergebnisse, die für den Herbst 2014 in der Variante D ermittelt wurden.

Durch den Umbruch kommt es auch in der Versuchswiederholung zu einer Verringerung der C_{mik}-Gehalte in den Schichten 1 und 2, dies geht aber nicht mit einem entsprechend starken Anstieg der C_{mik}-Gehalte in den Schichten 3 und 4 einher. Zum Termin 4 Wochen nach Umbruch nehmen die Gehalte hingegen in allen Schichten deutlich zu, wobei der Anstieg in Schicht 3, in welche das humusreiche Oberbodenmaterial hauptsächlich eingemischt wurde, am stärksten ausfällt. Diese Schicht weist zu diesem Zeitpunkt mit 250 µg g⁻¹ die höchsten C_{mik}-Gehalte auf. Im Frühjahr 2015, ca. sechs Monate nach dem Umbruch, sind die C_{mik}-Gehalte in den Beprobungsschichten bereits wieder als Funktion der Tiefe stratifiziert und weisen ähnliche Gehalte wie im Herbst 2014 vor dem Umbruch auf (Ausnahme: Schicht 3 mit weiterhin deutlich höheren Gehalten). Schicht 5 weist zu allen Zeitpunkten dieser Versuchswiederholung C_{mik}-Gehalte zwischen 50 und 100 µg g⁻¹ auf.



n = 9 je Schicht und Termin

Abbildung 153: Mittlere C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen der Wiederholung des Umbruchversuches im Jahr 2014/2015



n = 3 je Termin für Varianten P und D,
n = 9 je Termin für Variante DP

Abbildung 154: Mittlere C_{mik} -Massen im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Die mittleren Gesamtmassen an mikrobiellem Kohlenstoff (Abbildung 154) liegen im Herbst 2013 zu Beginn des Umbruchversuches in der Variante P bei ca. 1100 kg ha⁻¹ und in den Varianten D und DP bei 1300 - 1400 kg ha⁻¹. In Folge des Umbruchs steigen diese insbesondere in der Variante DP stark an und liegen direkt nach diesem bei ca. 2000 kg ha⁻¹. Vier Wochen nach dem Umbruch sind die C_{mik}-Massen auch in den Variante P und D angestiegen und alle drei Varianten weisen ähnlich große Massen von ca. 1700 – 1800 kg ha⁻¹ auf. Zu allen Beprobungsterminen des Jahres 2014 weist die Variante D die höchsten C_{mik}-Massen auf, welche je nach Termin bei 1600 - 2000 kg ha⁻¹ liegen. In den umgebrochenen Varianten P und DP hingegen sinken die C_{mik}-Massen im Verlauf des Jahres 2014 ab und erreichen direkt nach dem 2. Umbruch ihre jeweils niedrigsten Werte (P: 600 kg ha⁻¹, DP: 1000 kg ha⁻¹). In Folge des 2. Umbruchs steigen die C_{mik}-Massen in diesen Variante aber zum Termin 4 Wochen nach dem Umbruch und weiter zum Frühjahr 2015 deutlich an, sodass sie zu letzterem Termin das Niveau der Variante D (1600 kg ha⁻¹) erreichen (DP) bzw. sogar darüber liegen (P: 2000 kg ha⁻¹).

Aufschlussreich ist zudem die Analyse der Streuungen dieser C_{mik}-Gesamtmassen (Abbildung 155). Dabei fällt auf, dass die Variante DP, welche eine Bewirtschaftungswechsel erfährt, direkt nach dem 1. Umbruch sehr große Streuungen in Bezug auf die C_{mik}-Massen aufweist, was sich auch zum Termin 4 Wochen nach dem Umbruch bestätigt. Die Variante D und P hingegen zeigen nur sehr geringe Streuungen, trotz der unterschiedlichen Reliefpositionen der Beprobungspunkte. Im Frühjahr 2014 sind die Streuungen der C_{mik}-Massen in allen drei Varianten relativ groß. Ab dem Herbst 2014 gehen die Streuungen auch in der Variante DP zurück, wobei diese in Bezug auf die C_{mik}-Massen vor dem 2. Umbruch zunächst eine Mittelstellung zwischen den Variante D und P einnimmt, nach dem Umbruch allerdings eher mit der Variante P auf einem Niveau liegt. Im Frühjahr 2015 liegen die C_{mik}-Massen in den Varianten D und DP wiederum in etwa auf einem Niveau bei recht geringen Streuungen, die Variante P weist bei ebenfalls geringer Streuung etwas höhere Massen auf.

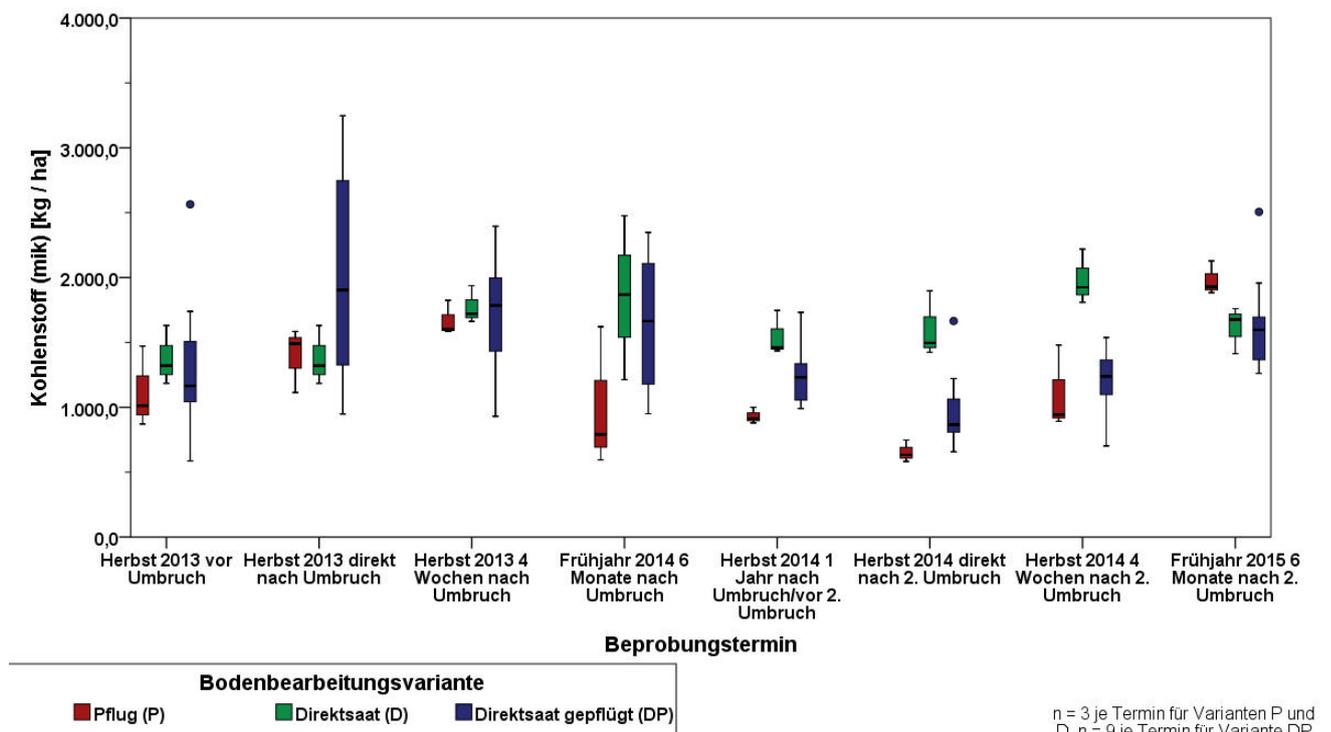


Abbildung 155: Streuungen der C_{mik}-Massen im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Die ermittelten Streuungen legen nahe, dass in der Variante DP unmittelbar nach dem Umbruch eine intensive aber auch je nach Beprobungspunkt stark differenzierte Umsatzdynamik einsetzt. Ab dem Frühjahr 2015 gleichen sich die Dynamiken in den drei Varianten jedoch einander an und der zweite Umbruch im Herbst 2014 schlägt sich in den C_{mik} -Massen und deren Streuungen kaum nieder.

Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Streuungen, die für die Versuchswiederholung im Jahr 2014 (DP4 - DP6) ermittelt wurden, ergeben sich, wie bei den C_{mik} -Gehalten der Schichten, etwas andere Ergebnisse (Abbildung 156). So weisen die C_{mik} -Massen der Variante DP (Jahr 2) erheblich geringere Streuungen auf als jene für den Umbruch im Jahr 2013 ermittelten. Vielmehr liegen die C_{mik} -Massen zu den ersten drei Terminen zwischen jenen der Varianten P und D bei geringfügig größeren Streuungen als in diesen. Im Frühjahr 2015 weist die Varianten DP (Jahr 2) die geringsten C_{mik} -Massen auf, bei ebenfalls etwas größeren Streuungen als in den anderen beiden Varianten.

Die Entwicklung der C_{mik} -Massen und deren Streuungen und die an diese gekoppelte Umsatzdynamik im Boden sind also nach dem erstmaligen Umbruch einer langjährigen Direktsaatfläche sehr stark vom Untersuchungsjahr (Kulturart, Witterung) abhängig.

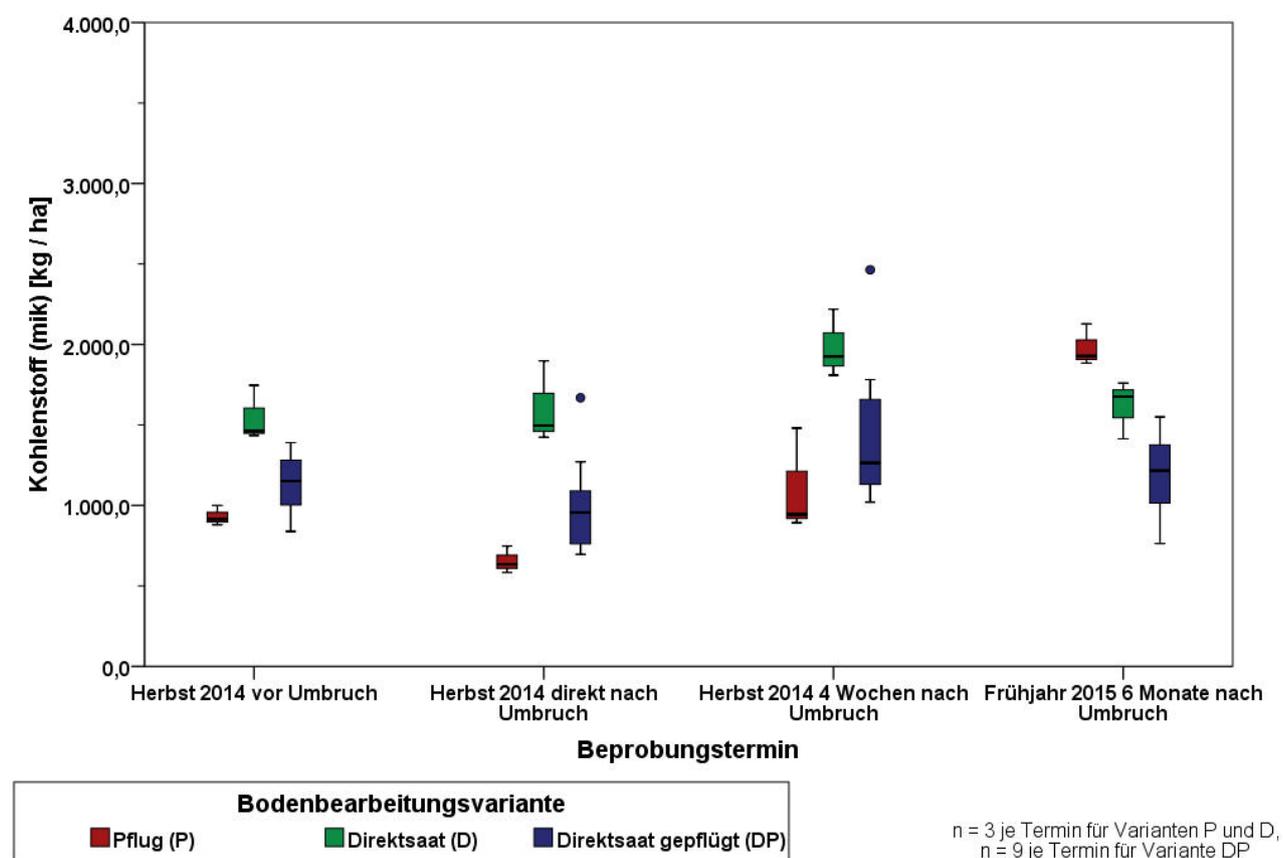
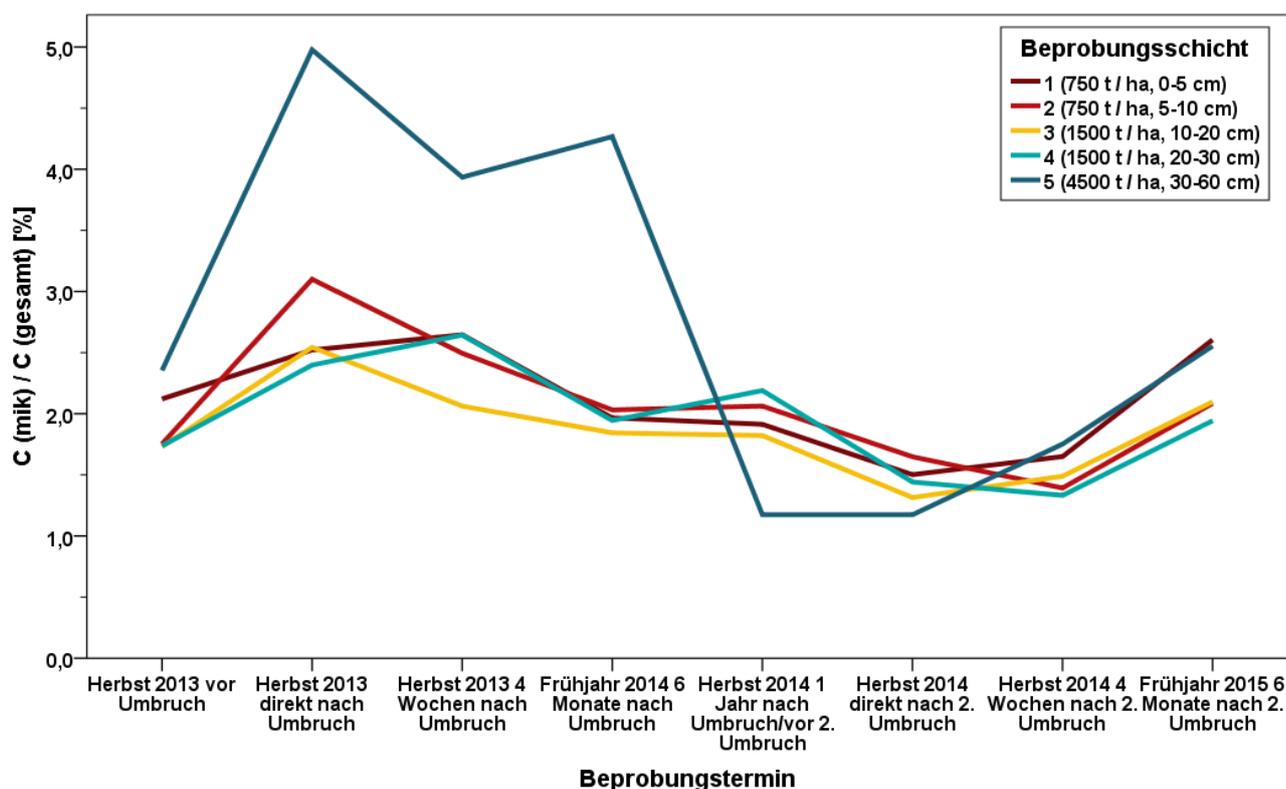


Abbildung 156: Streuungen der C_{mik} -Massen im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen der Wiederholung des Umbruchversuches im Jahr 2014/2015

Die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse der mittleren mikrobiellen Kohlenstoffmassen im Gesamtprofil über alle 8 Termine für die Varianten P ($n = 24$, $MW = 1232 \text{ kg ha}^{-1}$), D ($n = 24$, $MW = 1642 \text{ kg ha}^{-1}$) und DP (DP1-3, $n = 71$, $MW = 1437 \text{ kg ha}^{-1}$) sind in Bezug auf die Normalverteilung nach SHAPIRO-WILK für die Variante DP sowie homogener Varianzen der drei Varianten nach LEVENE nicht erfüllt. Würde die ANOVA dennoch

durchgeführt, zeigen sich signifikante Mittelwertunterschiede lediglich zwischen den Varianten P und D. Nach SCHEFFÉ können zwei homogene Untergruppen (P und DP sowie D und DP) gebildet werden. Für die Versuchswiederholung im Herbst 2014/Frühjahr 2015 (4 Termine) wird die Voraussetzung der Normalverteilung für die Variante DP (DP4-6) bei $n = 33$ und einem Mittelwert von 1162 kg ha^{-1} erfüllt. Dies gilt allerdings nicht für die Variante P mit $n = 12$ und einem Mittelwert von 1168 kg ha^{-1} . Für die Variante D wurde bei Normalverteilung der Werte ($n = 12$) ein Mittelwert von 1689 kg ha^{-1} errechnet. Es liegen allerdings keine homogenen Signifikanzen nach LEVENE vor. Wird die ANOVA dennoch gerechnet, ergeben sich signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Varianten P und D sowie D und DP. Es können die homogenen Untergruppen P und DP sowie D mit sehr hoher Signifikanz (0,999) gebildet werden.

Schlüsselt man die mittleren Anteile des mikrobiellen Kohlenstoffs am Gesamtkohlenstoff nach Beprobungsschichten auf (Abbildung 157), liegen diese in der Variante DP in den Schichten 1 - 4 zu Beginn des Versuches bei ca. 2 % und nehmen, insbesondere in Schicht 2 und 3, durch den Umbruch leicht auf 2,5 – 3 % zu. In der Folge fallen die Anteile in allen Schichten der Krume bis zum Termin 4 Wochen nach dem 2. Umbruch kontinuierlich ab und liegen zu diesem Zeitpunkt in allen vier Schichten bei ca. 1,5 %. Ein deutlicher Anstieg dieser Anteile wurde für den Termin Frühjahr 2015 ermittelt, zu welchem diese in den Schichten 2 - 4 bei ca. 2 % und in Schicht 1 bei ca. 2,5 % liegen.



$n = 9$ je Schicht und Termin

Abbildung 157: Anteile von C_{mik} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Schicht 5 nimmt eine Sonderrolle in Bezug auf die C_{mik} -Anteile ein. So steigen diese in Folge des Umbruchs von 2,3 auf 5 % an, auch 4 Wochen nach dem Umbruch (4 %) und im Frühjahr 2014 (4,2 %) sind sie noch sehr hoch. Zum Beprobungstermin im Herbst 2014 sind die C_{mik} -Anteile auf 1,2 % gesunken und liegen zu den

folgenden Terminen in etwa auf dem Niveau der anderen Beprobungsschichten. Obwohl Schicht 5 nicht direkt von der Bodenbearbeitung beeinflusst wird, scheint der Umbruch eine starke Reaktion bei der mikrobiellen Biomasse im Unterboden auszulösen.

Schlüsselt man die C_{mik} -Anteile am Gesamtkohlenstoff für die Versuchswiederholung im Jahr 2014 (DP4 - DP6) nach Beprobungsschichten auf (Abbildung 158), ergeben sich ähnlich geringe Anteile von 1 – 2 %, wie sie auch in den Streifen DP1 - DP3 für das Jahr 2014 ermittelt wurden. Lediglich die Schichten 1 und 2 weisen im Frühjahr 2015 Anteile zwischen 2 und 2,5 % auf. Die durch den Umbruch ausgelöste starke Erhöhung der C_{mik} -Anteile in Schicht 5 ist zwar auch in dieser Versuchswiederholung erkennbar, allerdings fällt sich mit maximalen Anteilen von 2,5 % (4 Wochen nach dem Umbruch) deutlich schwächer aus als im Jahr 2013 (s. o.). Ähnlich wie bei den C_{mik} -Gehalten hat sich auch bei den C_{mik} -Anteilen am Gesamtkohlenstoff im Frühjahr 2015 eine Tiefenstratifizierung der Schichten ausgebildet.

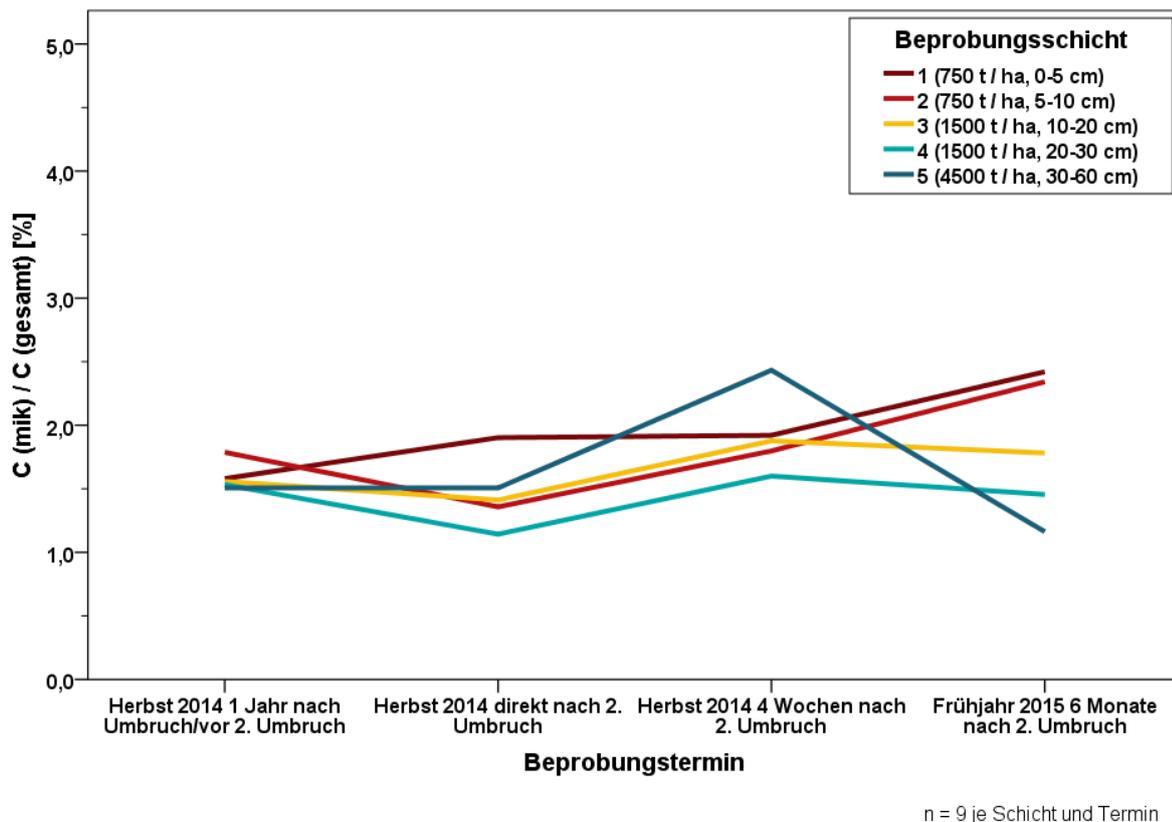


Abbildung 158: Anteile von C_{mik} am Gesamtkohlenstoff in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen der Wiederholung des Umbruchversuches im Jahr 2014/2015

Berechnet man die Anteile des mikrobiellen Kohlenstoffs am Gesamtkohlenstoff für das Gesamtprofil von 9000 t Boden ha^{-1} ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den Varianten (Abbildung 159). So weisen diese Anteile in der Variante Direktsaat (D) ($n = 3$) kaum Schwankungen im Verlauf der Beprobungstermine sowie geringe Streuungen innerhalb der Termine auf. Die Anteile liegen dabei zum Großteil zwischen 2 und 3 %.

In der Variante Pflug (P) ($n = 3$) liegen die Anteile im Herbst 2013 zunächst bei ca. 2- 4 %, sinken zum Frühjahr 2014 bei allerdings gleichbleibend hoher Streuung auf ca. 1 - 3 % ab. Für die Termine im Herbst 2014

wurden in dieser Variante sehr geringe C_{mik} -Anteile ermittelt, die bei geringen Streuungen innerhalb der Termine zwischen 1 und 2 % liegen. Zum Frühjahr 2015 steigen die Anteile bei wiederum mittlerer Streuung auf 3 - 4 %.

Anhand der Anteile in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) ($n = 9$) lässt sich der Einfluss des erstmaligen Umbruchs gut nachvollziehen. Liegen die Anteile vor dem Umbruch, wie in der Variante D, bei 1 - 2 %, steigen sie zum Folgetermin auf 1,5 - 5 %. Auch vier Wochen nach dem Umbruch sowie im Frühjahr 2014 weisen die C_{mik} -Anteile bei Werten zwischen 1 und 3,5 sehr hohe Streuungen auf. Ab dem Herbst 2014 haben sich die Anteile hingegen auf einem der Variante D vergleichbaren Niveau von 1 - 2 bei wesentlich geringeren Streuungen innerhalb der Termine eingestellt. Der zweite Umbruch ist anhand dieser Daten nicht oder kaum erkennbar. Zum Frühjahr 2015 werden in dieser Variante mit 1,5 - 3 % etwas höhere Anteile als in der Variante D erreicht.

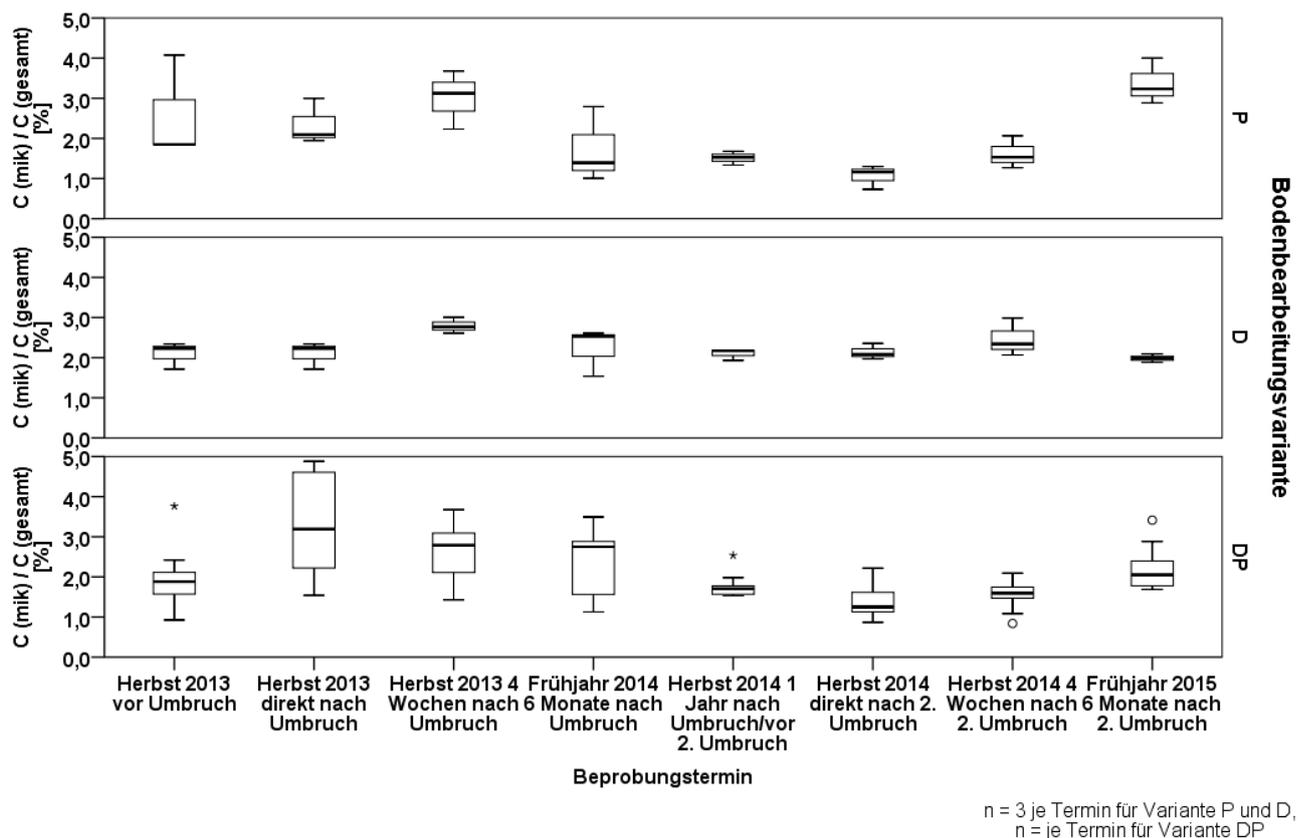
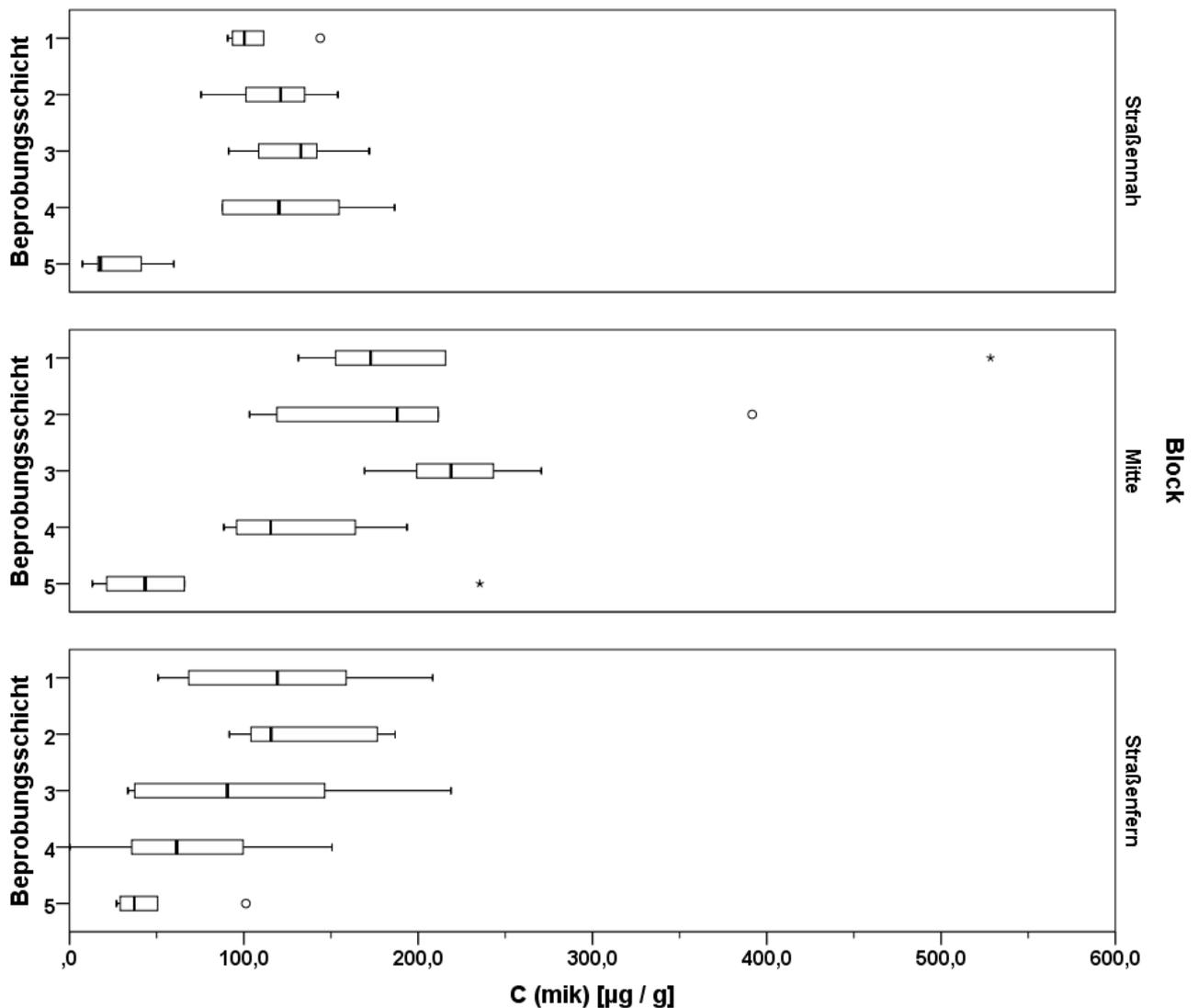


Abbildung 159: Anteile von C_{mik} am Gesamtkohlenstoff im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lütewitz im Rahmen des Umbruchversuches

5.7.2 Methau

Die Gehalte an mikrobiellem Kohlenstoff (C_{mik}) wurde für den Standort Methau für die Proben der beiden Beprobungstermine des Jahres 2012 ermittelt.

In der Variante Pflug (P) liegen die C_{mik} -Gehalte im straßennahen Block 1 in der Krume (Schicht 1 - 4) zwischen 100 und 200 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Abbildung 160) und damit etwas niedriger als in der gleichen Variante in Lüttewitz (s. o.). Im mittleren Block 2 in Methau liegen die C_{mik} -Gehalte etwas höher als in Block 1, insbesondere für die Schichten 1 - 3 wurde ein Zentralwertebereich bis über 200 $\mu\text{g g}^{-1}$ ermittelt. Schicht 4 weist in diesem Block C_{mik} -Gehalte auf, die jenen der entsprechenden Schicht in Block 1 vergleichbar sind. Die C_{mik} -Gehalte im straßenfernen Block 3 weisen in allen vier Schichten der Krume die höchsten Streuungen aller Blöcke auf. Dabei werden Werte zwischen 50 und 200 $\mu\text{g g}^{-1}$ in den Schichten 1 - 3 und zwischen 0 und 150 $\mu\text{g g}^{-1}$ in Schicht 4 erreicht. Schicht 5 weist in allen drei Blöcken Werte zwischen 20 und 70 $\mu\text{g g}^{-1}$ auf.



Gehaltsklassen A - E nach Körschen & Schulz (1999)

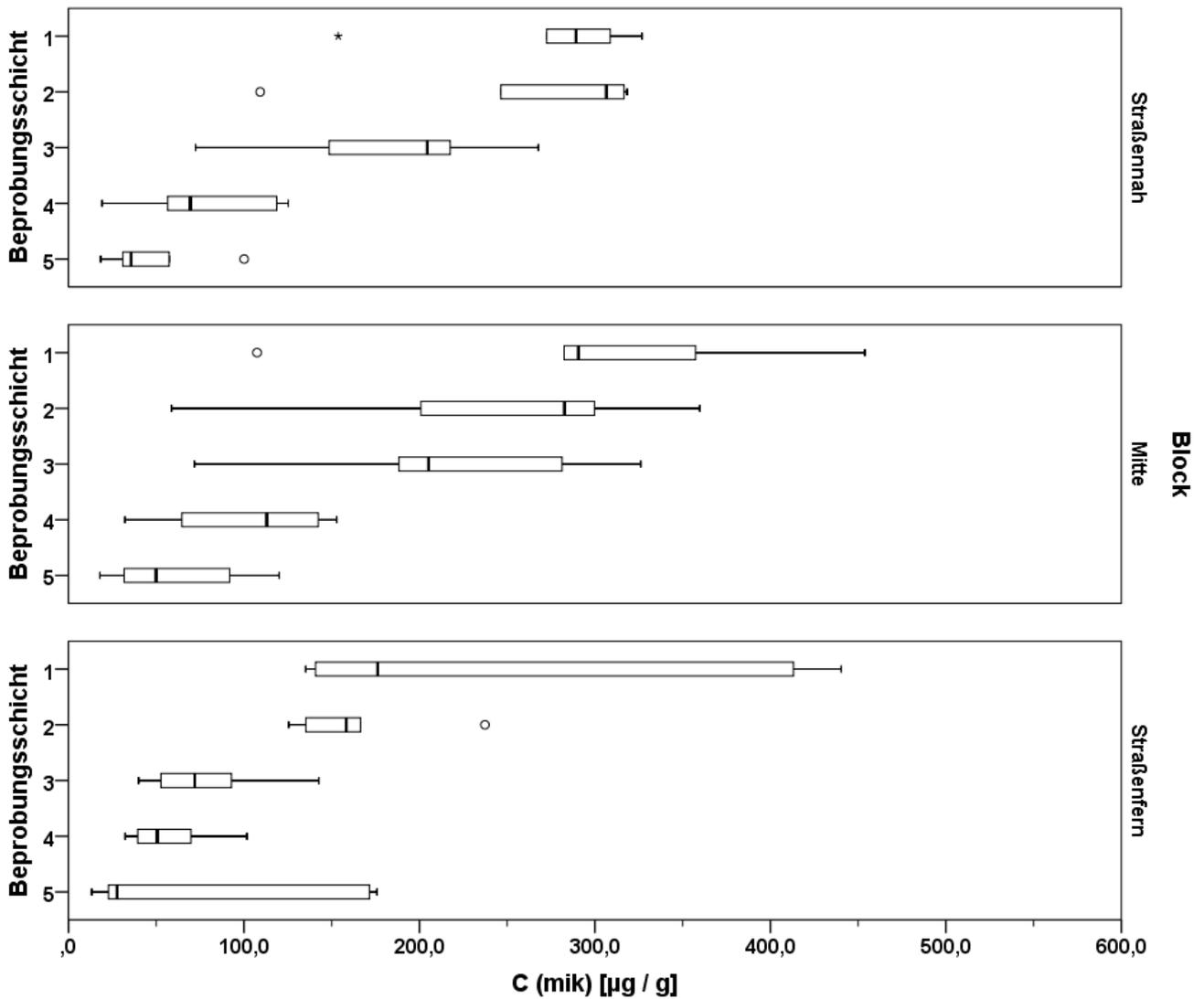
n = 6 je Schicht und Block

Abbildung 160: C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau

Grundsätzlich ergibt sich in der Variante Pflug die in dieser Variante für viele Parameter typische homogene Verteilung in der Krume nebst deutlich geringeren Gehalten im Unterboden.

In der Variante Konservierend (K) hingegen (Abbildung 161) zeigt sich, wie am Standort Lüttewitz, eine Stratifizierung der C_{mik} -Gehalte als Funktion der Tiefe. Dabei werden in Block 1 in den Schichten 1 und 2 C_{mik} -Gehalte von 250 - 330 $\mu\text{g g}^{-1}$ erreicht. Schicht 3 als Übergangsschicht weist bei sehr hoher Streuung Gehalte zwischen 80 und 280 $\mu\text{g g}^{-1}$ auf, gefolgt von den Schichten 4 (20 - 130 $\mu\text{g g}^{-1}$) und 5 (20 - 70 $\mu\text{g g}^{-1}$).

In dieser Variante weist der mittlere Block 2 insbesondere im Oberboden die höchsten Streuungen der C_{mik} -Gehalte auf. Dabei werden Gehalte von 280 - 450 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Schicht 1) bzw. 70 - 370 (Schichten 2 und 3) erreicht. In den Schichten 4 und 5 sind die Gehalte wie in Block 1 niedriger, wobei in diesem Block in Schicht 5 Maximalgehalte von 120 $\mu\text{g g}^{-1}$ bestimmt wurden.



Gehaltsklassen A - E nach Körschen & Schulz (1999)

n = 6 je Schicht und Block

Abbildung 161: C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau

Ähnlich hohe Streuungen wie in Block 2 werden im straßenfernen Block 3 nur in Schicht 1 erreicht ($140 - 440 \mu\text{g g}^{-1}$). In Schicht 2 sind die C_{mik} -Gehalte bei geringer Streuung für diese Variante untypisch niedrig ($130 - 170 \mu\text{g g}^{-1}$), in den Schichten 3 und 4 mit Gehalten von $30 - 150 \mu\text{g g}^{-1}$ ebenfalls vergleichsweise niedrig. Auffälligerweise wurden für den Unterboden (Schicht 5) in diesem Block die höchsten C_{mik} -Gehalte aller bearbeiteten Varianten und Blöcke für diese Schicht ermittelt ($20 - 180 \mu\text{g g}^{-1}$).

In der Variante Grünland (Abbildung 162, andere Skalierung) sind die C_{mik} -Gehalte ebenfalls als Funktion der Tiefe stratifiziert, wobei die Abnahme mit der Tiefe im Unterschied zur Variante K gleichmäßiger verläuft und die Wertebereiche der Schichten nicht bzw. kaum überlappen. In den Schichten 1 ($530 - 850 \mu\text{g g}^{-1}$) und 2 ($420 - 570 \mu\text{g g}^{-1}$) sind die C_{mik} -Gehalte deutlich höher als in der Krume der bearbeiteten Varianten. In Schicht 3 wird bei Gehalten zwischen 220 und $300 \mu\text{g g}^{-1}$ das Niveau der Variante K in den Blöcken 1 und 2 erreicht. Schicht 4 ähnelt bei Gehalten von $110 - 190 \mu\text{g g}^{-1}$ hingegen eher der Krume in der Variante P. Im Unterboden werden auch in der Variante G die für diese Schicht typischen Gehalte ($< 100 \mu\text{g g}^{-1}$) erreicht.

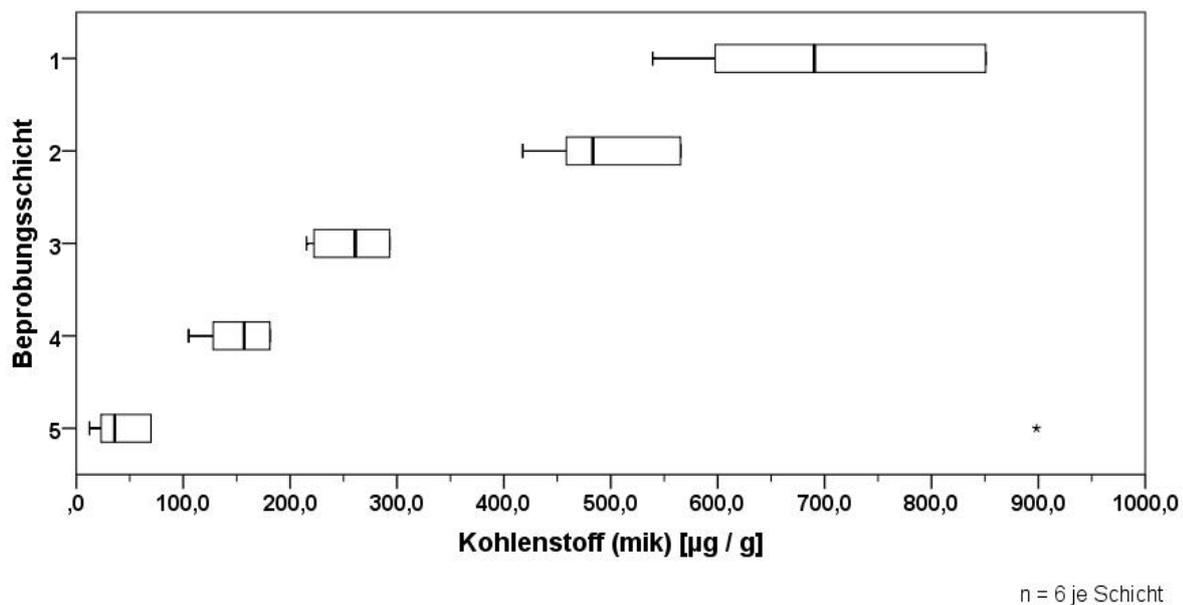


Abbildung 162: C_{mik} -Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau

Berechnet man die Gesamtmassen an mikrobiellem Kohlenstoff für das Profil von $9000 \text{ t Boden ha}^{-1}$, so ergeben sich für die beiden Termine sowie die drei Blöcke recht unterschiedliche Ergebnisse (Abbildung 163). Im Frühjahr 2012 waren die C_{mik} -Massen in beiden Varianten im Block 3 (straßenfern) (Winterweizen) bei Werten von ca. 500 kg ha^{-1} am geringsten. Im mittleren Block 2 (ZF bzw. Brache) hingegen werden für beide Varianten C_{mik} -Massen von bis zu 1700 kg ha^{-1} ermittelt, bei allerdings sehr großer Streuung der drei Messwerte. Im straßennahen Block 1 (Wintergerste) lag die C_{mik} -Masse der Variante P ebenfalls bei ca. 500 kg ha^{-1} , die Variante K wies bei deutlich größerer Streuung Massen zwischen 500 und 1250 kg ha^{-1} auf.

Im Herbst 2012 konnten für alle drei Blöcke leicht höhere C_{mik} -Massen in der Variante K als in der jeweils korrespondierenden Variante P festgestellt werden. Dabei wurden in Block 1 (straßennah) (ZF bzw. Brache) Massen von $600 - 900 \text{ kg ha}^{-1}$ (P) bzw. $900 - 1200 \text{ kg ha}^{-1}$ (K), in Block 2 (Mitte) (Winterweizen nach Mais) Massen von $800 - 1100 \text{ kg ha}^{-1}$ (P) bzw. $1000 - 1300$ (K) und für Block 3 (straßenfern) (Wintergerste) von $500 - 1000 \text{ kg ha}^{-1}$ (P) bzw. $500 - 1500 \text{ kg ha}^{-1}$ ermittelt. Im Gegensatz zum Termin im Frühjahr, zu welchem Block 3 die geringsten Streuungen aufweist, sind diese im Herbst 2012 in diesem Block am größten.

Für das Grünland (nicht dargestellt) wurden C_{mik} -Massen von 1400 - 1800 kg ha⁻¹ für beide Beprobungstermine errechnet.

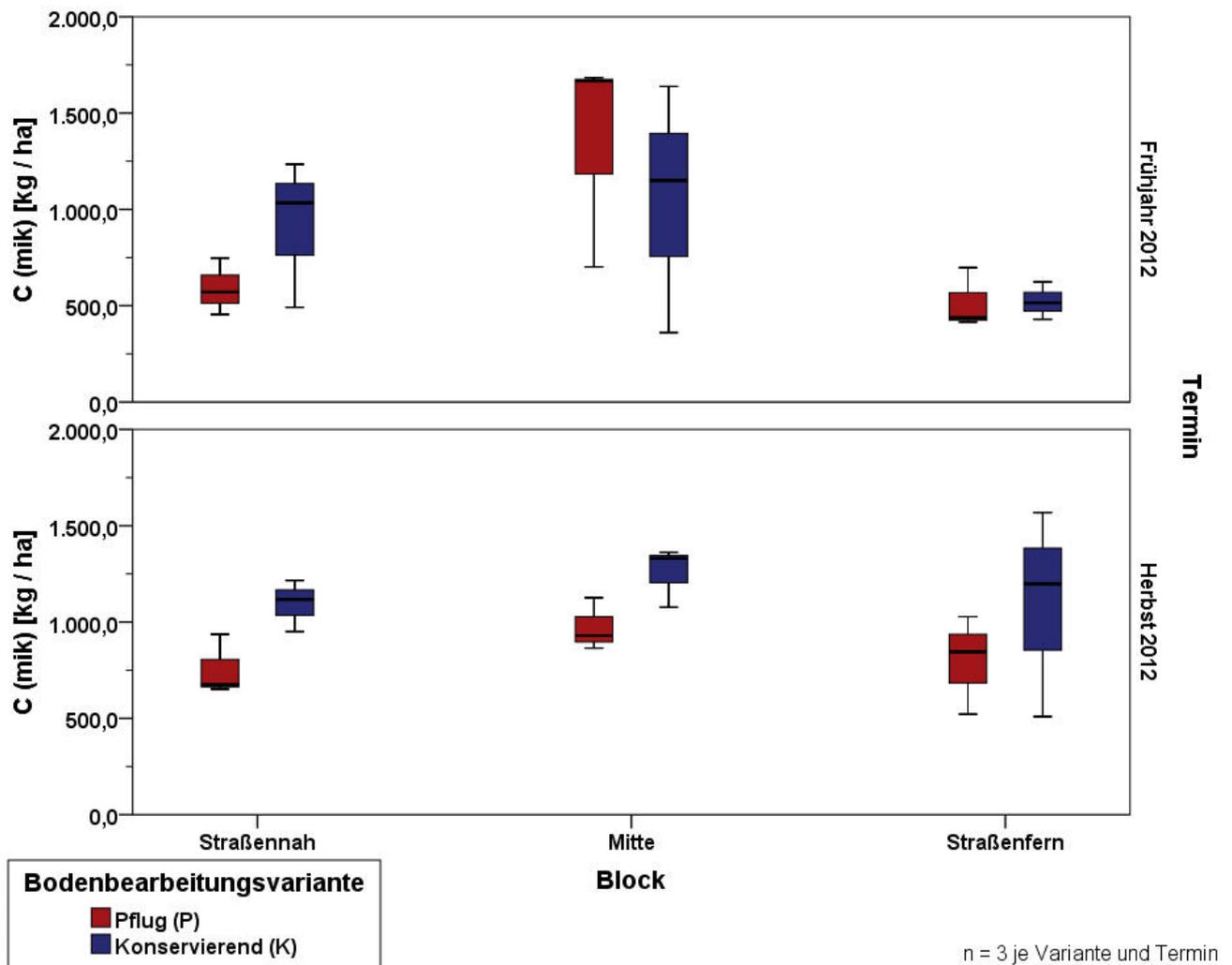


Abbildung 163: C_{mik} -Massen im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, Blöcken und Beprobungsterminen, am Standort Methau

Berechnet man die Anteile des mikrobiellen Kohlenstoffs am Gesamtkohlenstoff (Abbildung 164) ergibt sich eine ähnliche Verteilung wie bei den C_{mik} -Massen. So liegen die Anteile im Frühjahr 2012 im straßenfernen Block 3 bei 0,6 - 1 %. In Block 1 liegen die Anteile in der Variante P mit 0,75 - 1,25 % leicht höher als in Block 3, in der Variante K bei recht großer Streuung bei 0,7 - 1,8 %. Wie bei den C_{mik} -Massen, auf denen die Berechnung beruht, sind auch bei den Anteilen die Streuungen in Block 2 (Mitte) im Frühjahr 2012 am größten, und zwar sowohl für die Variante P (1,1 - 2,55 %) als auch für die Variante K (0,55 - 2,45 %).

Für den Herbst 2012 wurden in Block 1 (straßennah) Anteile von 0,75 - 1,6 % in der Variante P bzw. 1,7 - 2 % Variante K ermittelt. Die geringsten Streuungen weist zu diesem Termin Block 2 auf bei Anteilen von 1,6 - 1,8 % (P) bzw. 2 - 2,2 % (K). Ebenso korrespondierend zu den großen Streuungen bei den C_{mik} -Massen sind die Streuungen der C_{mik} -Anteile im Herbst 2012 ebenfalls in Block 3 in beiden Varianten am größten. Sie liegen bei 1,2 - 2,4 % (P) bzw. 0,9 - 3 % (K).

Im Grünland liegen die Anteile zu beiden Terminen recht stabil bei 1,4 - 1,8 % (nicht dargestellt).

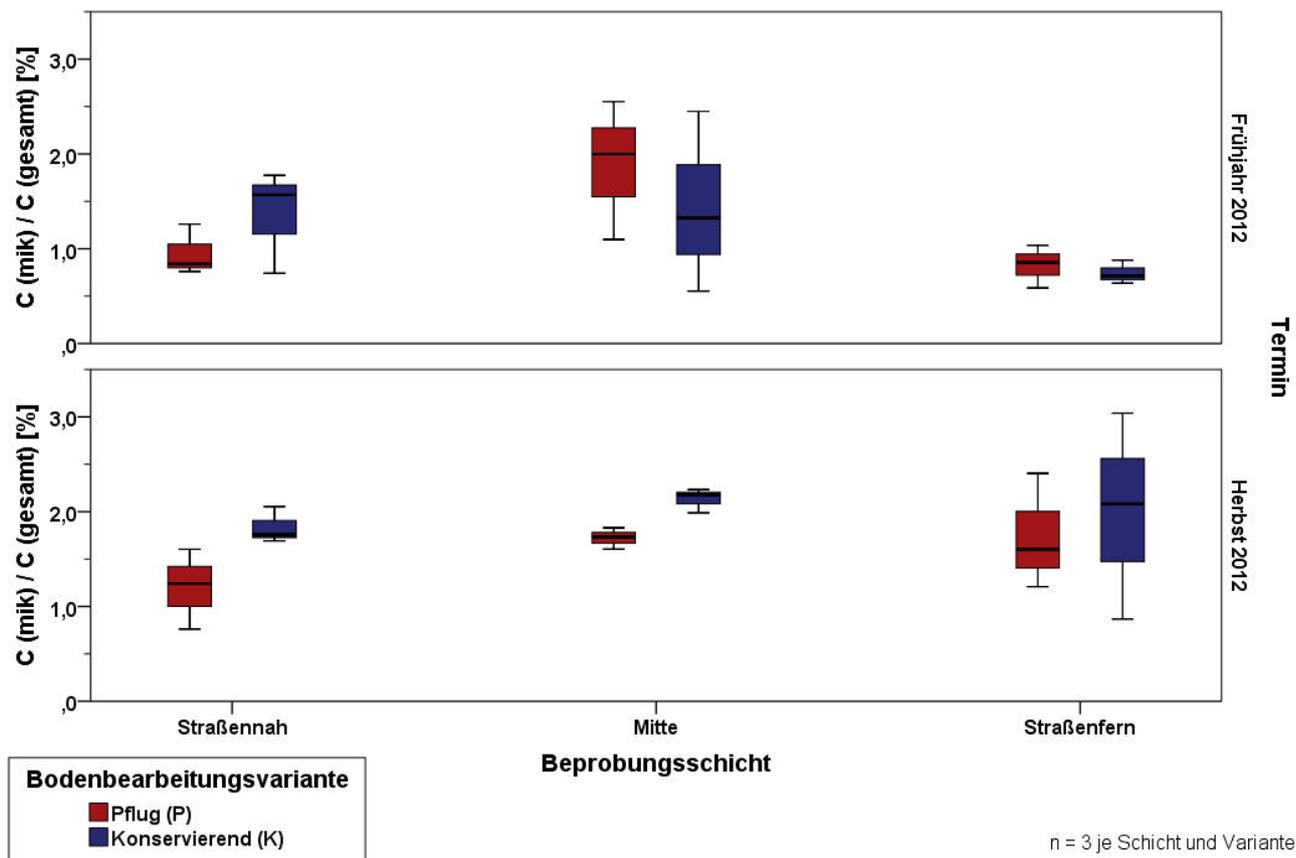


Abbildung 164: Anteile von C_{mik} am Gesamtkohlenstoff im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, Blöcken und Beprobungsterminen, am Standort Methau

Damit sind sowohl die jeweiligen Gesamtmassen an mikrobieller Biomasse bzw. mikrobiellem Kohlenstoff sowie die sich daraus ergebenden Anteile am Gesamtkohlenstoff in den bewirtschafteten Parzellen einer wesentlich stärkeren zeitlichen Dynamik unterworfen als im Grünland.

5.8 Dehydrogenaseaktivität

Die Dehydrogenaseaktivität (DHA) als Maß für die (oxidative) mikrobielle Enzymaktivität gilt als gut etablierter und sehr sensibler Parameter für Veränderungen der Umsatzbedingungen im Boden (MACHULLA 2003). Sie bildet das durch die im Boden lebenden Mikroorganismen betriebene Elektronentransportsystem ab.

Ein starker funktionaler und häufig auch positiver statistischer Zusammenhang besteht zwischen der DHA und der mikrobiellen Biomasse (PARIHAR et al. 2016). Sie wird daher häufig als Indikator für die gesamte mikrobielle Aktivität bezeichnet (NANNIPIERI 1994) und stellt somit eine Alternative zur ebenfalls sehr verbreiteten Messung der mikrobiellen Atmung dar. Weitere häufig genannte Korrelationen bestehen zum organischen Kohlenstoff (C_{org}) sowie zum wasserlöslichen Kohlenstoff (MADEJÓN et al. 2007).

Die Bestimmung der DHA erfolgte im Rahmen dieser Untersuchung nach der Methode von THALMANN (1968; ISO 23753 - 1:2005) mit einer Inkubationszeit von 16 Stunden. Chemisch handelt es sich bei dieser Methode um die Reduktion von 2,3,5 - Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC) zu Triphenylformazan (TPF), woraufhin die Konzentration des produzierten TPFs photometrisch bestimmt wird. Die Konzentrationsangabe erfolgt in $\mu\text{g TPF g Boden}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$.

5.8.1 Lüttewitz

Die Dehydrogenaseaktivität wurde für den Standort Lüttewitz im Frühjahr und Herbst 2012 (Basisbeprobungen) für jeweils drei Beprobungspunkte pro Bodenbearbeitungsvariante ermittelt.

Im Rahmen des Umbruchsversuches wurde die DHA für alle Proben analysiert.

5.8.1.1 Basisbeprobungen

Im Rahmen der beiden Basisbeprobungen liegt die DHA (Abbildung 165) in der Variante Pflug (P) in Schicht 1 bei $100 - 200 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ und in den Schichten 2 - 4 bei $50 - 150 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$.

In den Varianten Direktsaat (D) und Konservierend (K) hingegen wurden für Schicht 1 Werte zwischen 300 und $600 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ ermittelt sowie für Schicht 2 Werte von $100 - 300 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (D) bzw. $200 - 400 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (K). In der Variante Konservierend Locker (KL) war die DHA in Schicht 1 ($200 - 450 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$) ebenfalls größer als in der Variante P, jedoch geringer als in den Varianten D und K. Die Werte von Schicht 2 in der Variante KL ($200 - 300 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$) sind jenen der Variante D in dieser Schicht sehr ähnlich. In Schicht 3 geht die DHA in allen drei Varianten (D, K, KL) auf $50 - 150 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ zurück, wobei die Streuungen insbesondere in den Varianten D und K sehr gering sind. Die Variante D weist dabei insgesamt die geringsten DHA-Konzentrationen auf.

In Schicht 4 gehen die TPF-Gehalte weiter zurück und liegen in den Varianten D und KL unterhalb von $50 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$. In der Variante K wurden Gehalte zwischen 20 und $100 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ ermittelt.

In Schicht 5 gibt es kaum Unterschiede in den TPF-Gehalten zwischen den vier Varianten. Diese liegen durchgängig bei $0 - 20 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Ausnahme: ein Einzelwert in der Variante K von $72 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$).

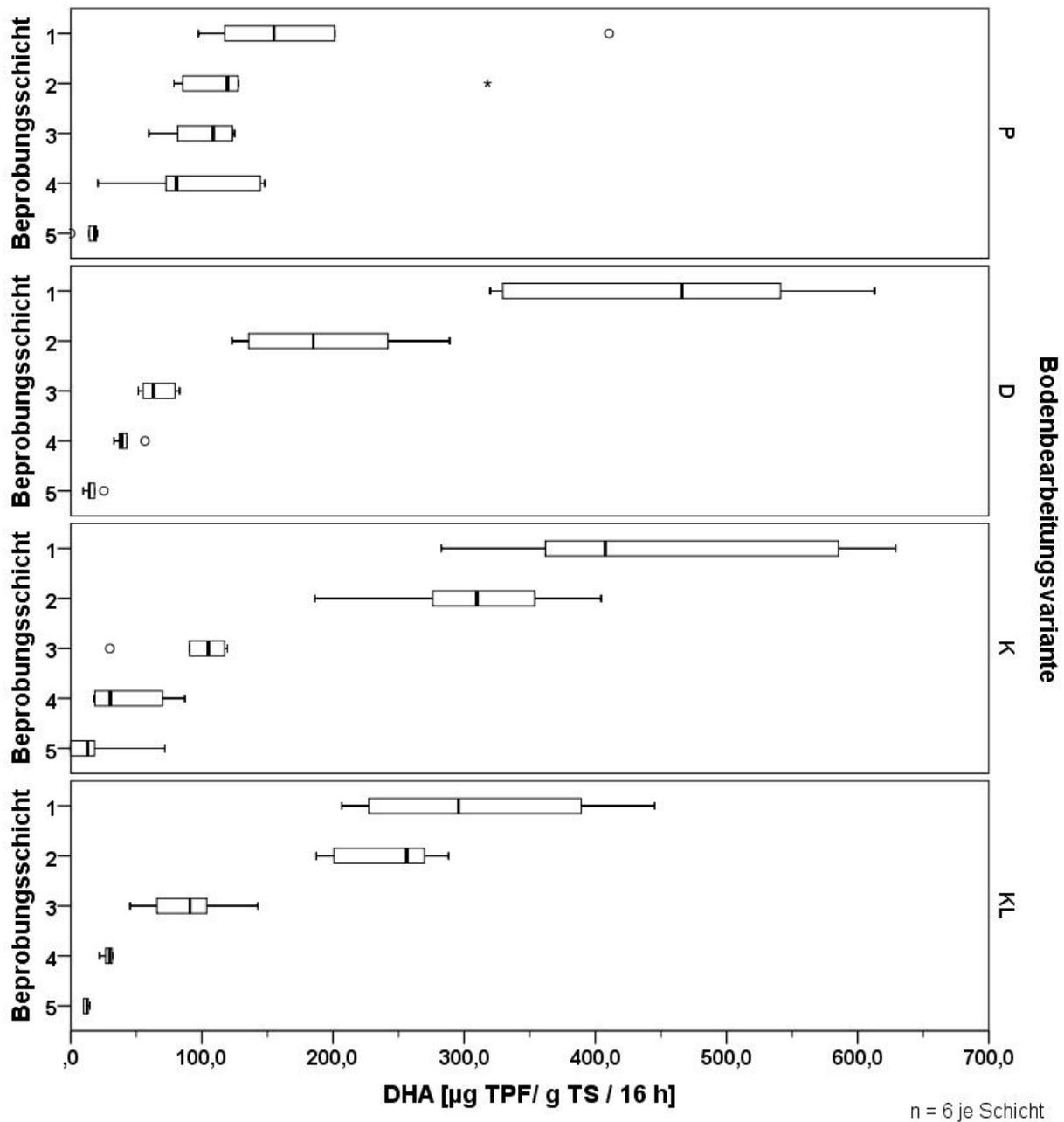


Abbildung 165: Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz (2 Beprobungstermine im Jahr 2012)

5.8.1.2 Umbruchversuch

Im Rahmen des Umbruchversuches wurde die DHA zu allen Beprobungsterminen für die drei Varianten P, D und DP ermittelt (Abbildung 166). Zu Beginn des Versuches liegen die TPF-Gehalte in der Variante Pflug (P) in Schicht 1 bei über $200 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ und in den Schichten 2 und 3 bei ca. $150 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$. Durch den Umbruch stellt sich allerdings direkt ein einheitliches Niveau von $50 - 100 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ in der gesamten Krume (Schicht 1 - 4) ein, welches bei sehr geringen Schwankungen bis zum Ende des Versuches im Frühjahr 2015 auf diesem Niveau verbleibt. Schicht 5 weist durchgängig Gehalte von unter $50 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ auf.

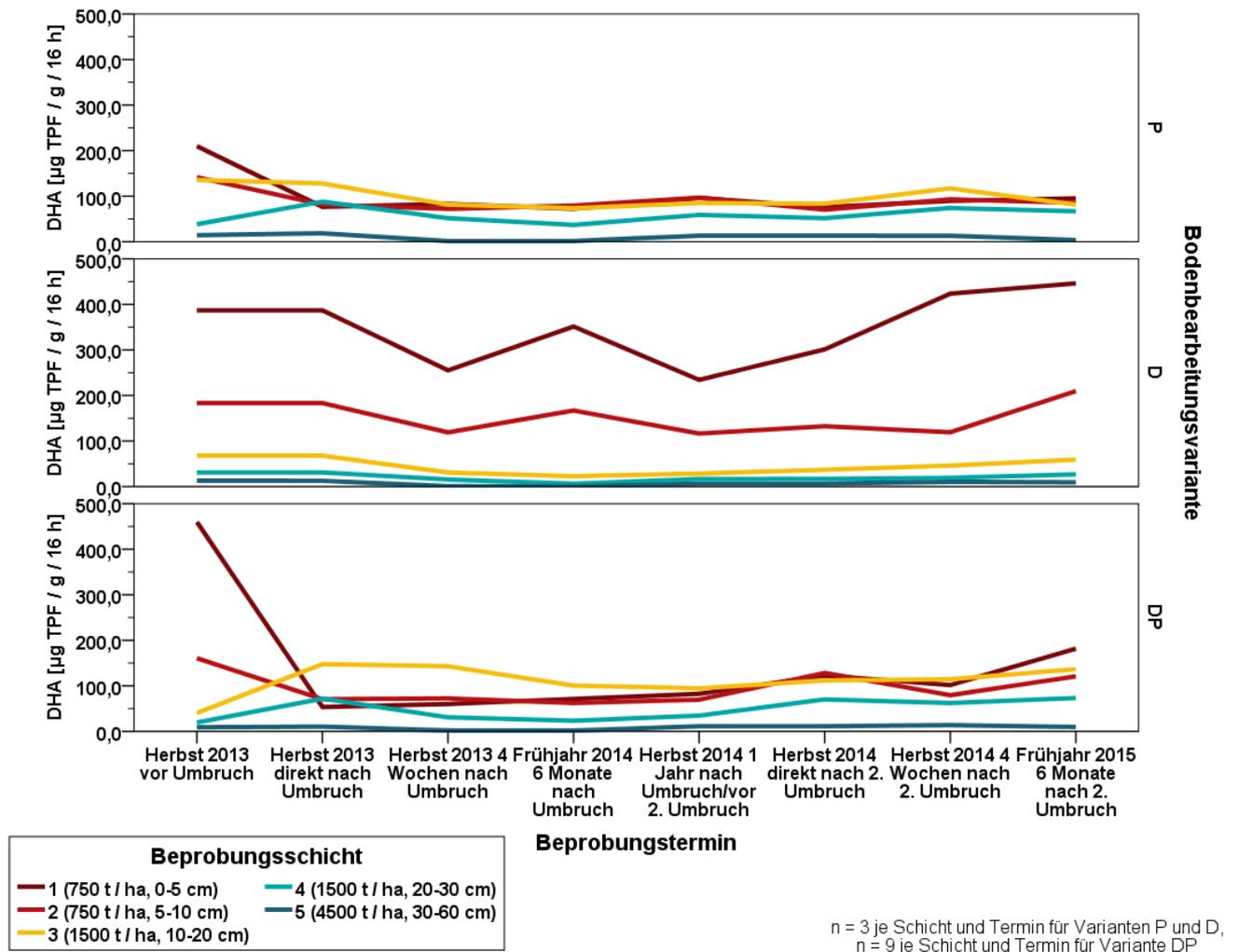


Abbildung 166: Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

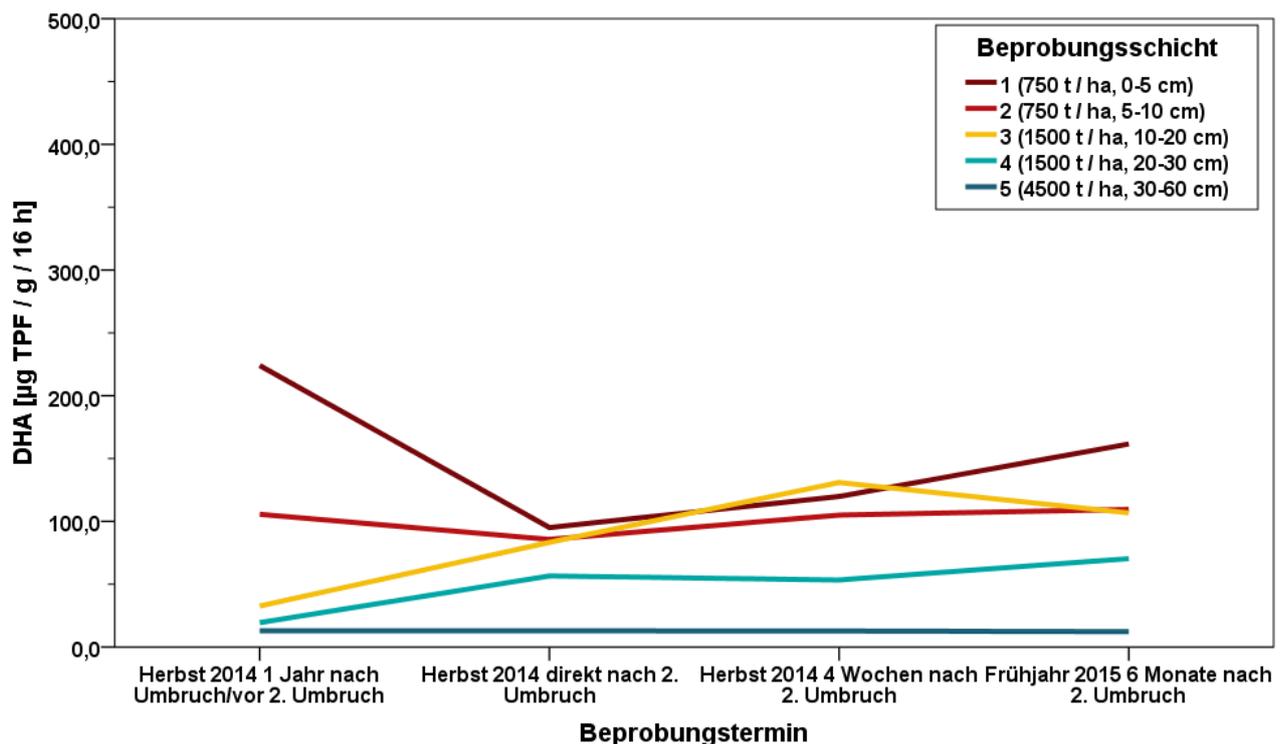
In der Variante Direktsaat (D) weisen die Schichten 1 und 2 signifikant höhere TPF-Gehalte auf als die Schichten 3 - 5 sowie alle Schichten der Variante P. Für Schicht 1 wurden im Herbst 2013 zunächst Gehalte von ca. $400 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ ermittelt, welche zum Termin 4 Wochen nach dem Umbruch auf ca. $250 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ zurückgehen. Auf einen Anstieg der Gehalte zum Frühjahr 2014 auf ca. $350 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ folgt ein erneuter Rückgang zum Herbst 2014 auf $250 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$. Nach der Rübenernte im Herbst 2014 steigen die Gehalte kontinuierlich an und erreichen im Frühjahr 2015 ihr Maximum von $450 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$.

In Schicht 2 der Variante D wurde ein ähnlicher zeitlicher Verlauf der TPF-Gehalte ermittelt, allerdings liegen die Werte kontinuierlich zwischen 100 und $200 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ und die absoluten Schwankungen zwischen den Terminen sind deutlich geringer. Schicht 3 weist durchgängig TPF-Gehalte von ca. $50 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ auf, in den Schichten 4 und 5 sind die Gehalte zu allen Terminen geringer als jene von Schicht 3.

In der Variante DP wurde vor dem Umbruch im Herbst 2013 in den Schichten 1 und 2 hohe TPF-Gehalte von $450 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Schicht 1) bzw. $150 \mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Schicht 2) gemessen, die auf dem Niveau der Variante D liegen. In der Folge des Umbruches sinken die Gehalte in diesen beiden Schichten

auf ca. 50 - 75 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ stark ab, während die initial niedrigen Gehalte der Schichten 3 und 4 deutlich auf 150 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Schicht 3) bzw. 75 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Schicht 4) angehoben werden. Auch bei den folgenden Terminen bis zum zweiten Umbruch im Herbst 2014 weist Schicht 3 die höchsten TPF-Gehalte aller Schichten dieser Variante auf. Diese nehmen aber kontinuierlich ab und nähern sich den Gehalten der Schichten 1 und 2 an. Im Herbst 2014 nach dem zweiten Umbruch haben sich die TPF-Gehalte in den Schichten 1, 2 und 3 einander angeglichen und liegen bei ca. 100 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$. Schicht 4 weist dabei durchgängig um ca. 50 - 100 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ geringere Gehalte auf als die oberen drei Schichten. Zum Frühjahr 2015 kommt es im Gegensatz zur Variante P zu einer erneuten leichten Differenzierung der TPF-Gehalte in der Krume, wobei Schicht 1 mit 150 - 200 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ die höchsten und Schicht 4 mit 75 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ die geringsten Gehalte aufweist. Auch in dieser Variante sind die TPF-Gehalte in Schicht 5 sehr gering und liegen zu allen Zeitpunkten deutlich unter 50 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$.

Im Rahmen der Versuchswiederholung wurde für die Variante DP (Jahr 2) ein ähnlicher zeitlicher Verlauf der TPF-Gehalte ermittelt (Abbildung 167): Initial hohe Gehalte von ca. 250 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ in Schicht 1 bzw. 100 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ in Schicht 2 wurden durch den Umbruch stark reduziert. Zum Termin nach dem Umbruch lagen die TPF-Gehalte in den Schichten 1 - 3 bei jeweils ca. 100 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ und in Schicht 4 bei 50 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$. Auch in dieser Wiederholungsvariante steigen die Gehalte zum Termin 4 Wochen nach dem Umbruch und insbesondere zum Frühjahr 2015 an, sodass zum Versuchsende Gehalte zwischen 150 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Schicht 1) und 50 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Schicht 4) gemessen wurden. Die Schichten 2 und 3 lagen mit Gehalten von ca. 100 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ dazwischen. Schicht 5 weist auch in dieser Variante zu allen Terminen sehr geringe TPF-Gehalte auf.



n = 9 je Schicht und Termin

Abbildung 167: Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen der Wiederholung des Umbruchversuches im Jahr 2014/2015

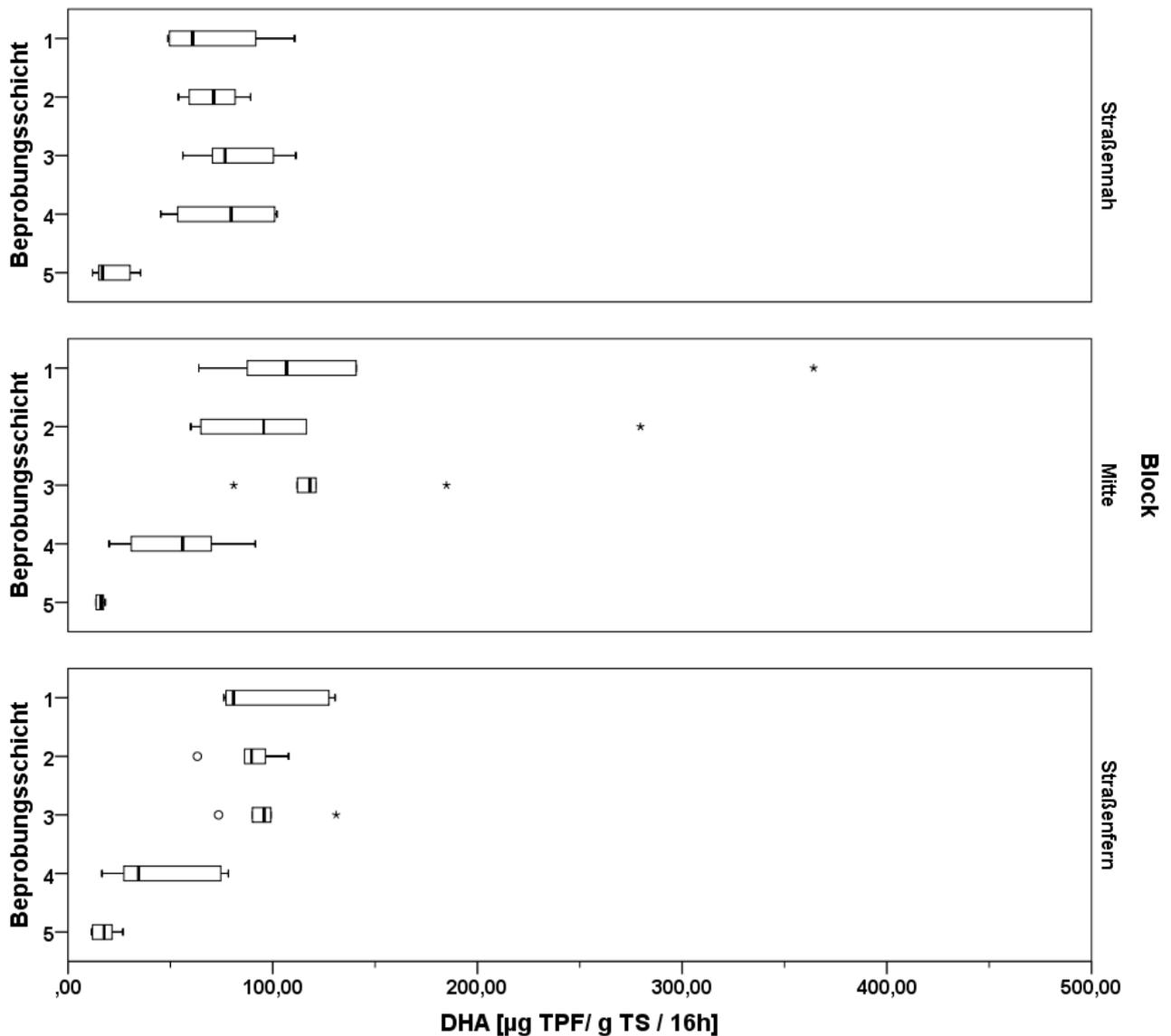
5.8.2 Methau

Die Dehydrogenaseaktivität (DHA) wurde für den Standort Methau für die Proben der beiden Beprobungstermine des Jahres 2012 ermittelt.

In der Variante Pflug (P) (Abbildung 168) liegen die TPF-Gehalte im straßennahen Block 1 in der Krume (Schicht 1 - 4) bei 50 - 100 µg TPF g⁻¹ 16 h⁻¹. Im mittleren Block 2 sind die TPF-Gehalte in der Krume etwas heterogener verteilt. So liegen diese in Schicht 1 bei 70 - 140 µg TPF g⁻¹ 16 h⁻¹, in Schicht 2 bei 60 - 120 µg TPF g⁻¹ 16 h⁻¹ und in Schicht 3 bei 110 - 130 µg TPF g⁻¹ 16 h⁻¹. In Schicht 4 werden bereits deutlich geringere TPF-Gehalte von 20 - 90 µg TPF g⁻¹ 16 h⁻¹ erreicht.

Im straßenfernen Block 3 ergibt sich eine ähnliche Verteilung der DHA wie in Block 2 mit TPF-Gehalten um 100 µg TPF g⁻¹ 16 h⁻¹ in den Schichten 1 - 3 und einer deutlich niedrigeren Aktivität von 20 - 80 µg TPF g⁻¹ 16 h⁻¹ in Schicht 4.

Die DHA in Schicht 5 liegt in allen drei Blöcken im Bereich zwischen 10 und 30 µg TPF g⁻¹ 16 h⁻¹.



n = 6 je Schicht und Block

Abbildung 168: Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau (2 Beprobungstermine im Jahr 2012)

In der Variante Konservierend (K) (Abbildung 169) ist die DHA in den Schichten 1 und 2 in allen drei Blöcken deutlich größer als in der Variante P. Dabei werden in Schicht 1 TPF-Gehalte von 125 – 200 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Block 1), 190 - 240 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Block 2) bzw. 150 - 290 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Block 3) erreicht. In Schicht 2 liegen die TPF-Gehalte in den Blöcken 1 und 3 in der gleichen Größenordnung wie in Schicht 1. Im mittleren Block 2 hingegen weist Schicht 2 mit 80 - 130 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ wesentlich geringere Gehalte auf. In Schicht 3 ist die DHA in den drei Blöcken sehr unterschiedlich, was den Übergangscharakter dieser Schicht unterstreicht. So liegen die TPF-Gehalte dieser Schicht in Block 1 bei 70 - 100 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$, in Block 2 bei 20 - 110 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ und in Block 3 bei 40 - 70 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$. Die TPF-Gehalte der Schichten 4 und 5 liegen in dieser Varianten in allen drei Blöcken im Bereich zwischen 0 und 40 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$.

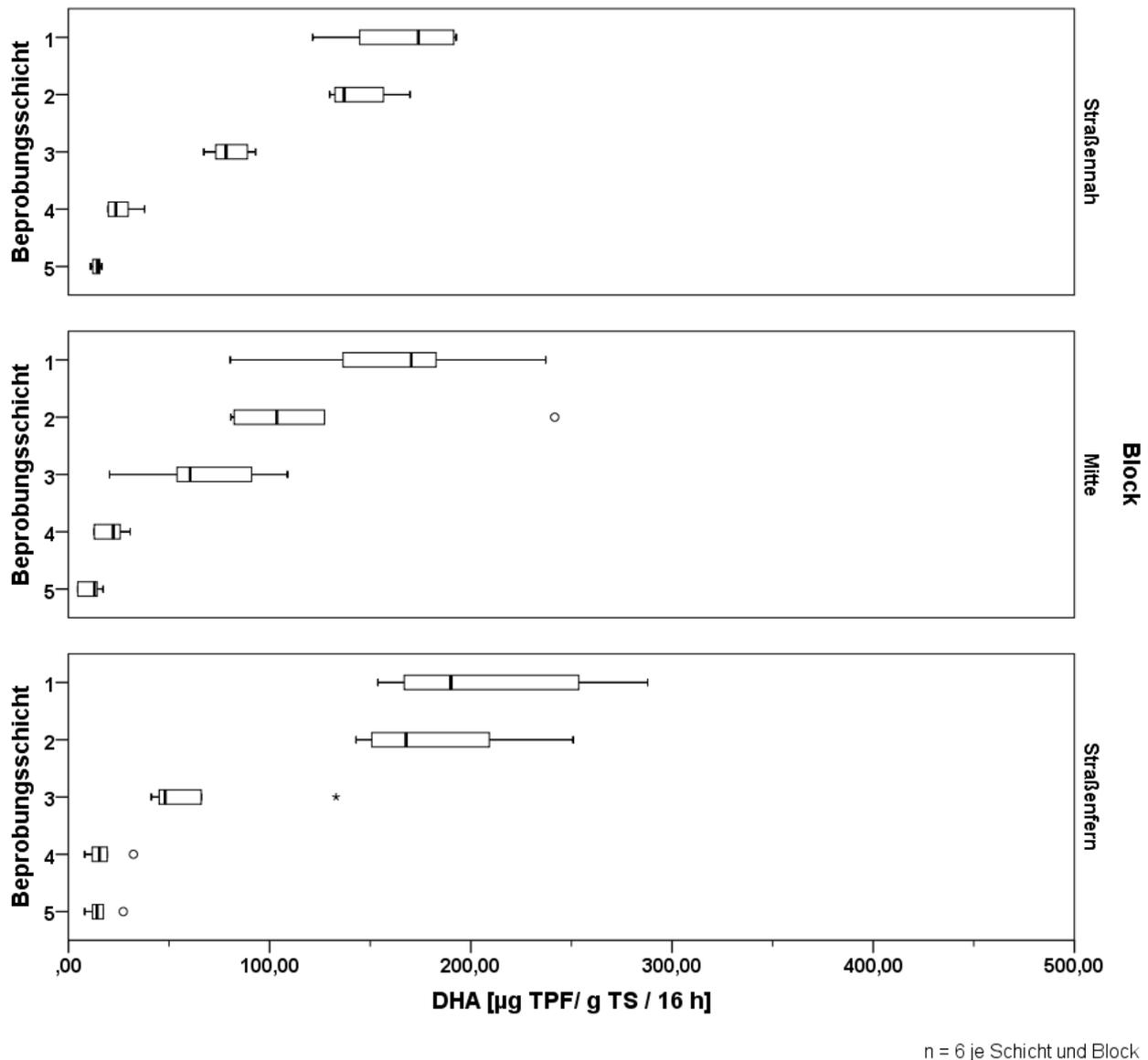


Abbildung 169: Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau (2 Beprobungstermine im Jahr 2012)

Die höchste DHA am Standort Methau wird in den Schichten 1 und 2 der Variante Grünland (G) mit 360 - 560 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Schicht 1) bzw. 230 - 420 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ (Schicht 2) erreicht (Abbildung 170). In Schicht 3 liegen die TPF-Gehalte bei 110 - 200 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ und in Schicht 4 bei 20 - 110 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$. Für Schicht 5 wurde, wie in den anderen Varianten, mit TPF-Gehalten von maximal 20 $\mu\text{g TPF g}^{-1} 16 \text{ h}^{-1}$ kaum Aktivität festgestellt.

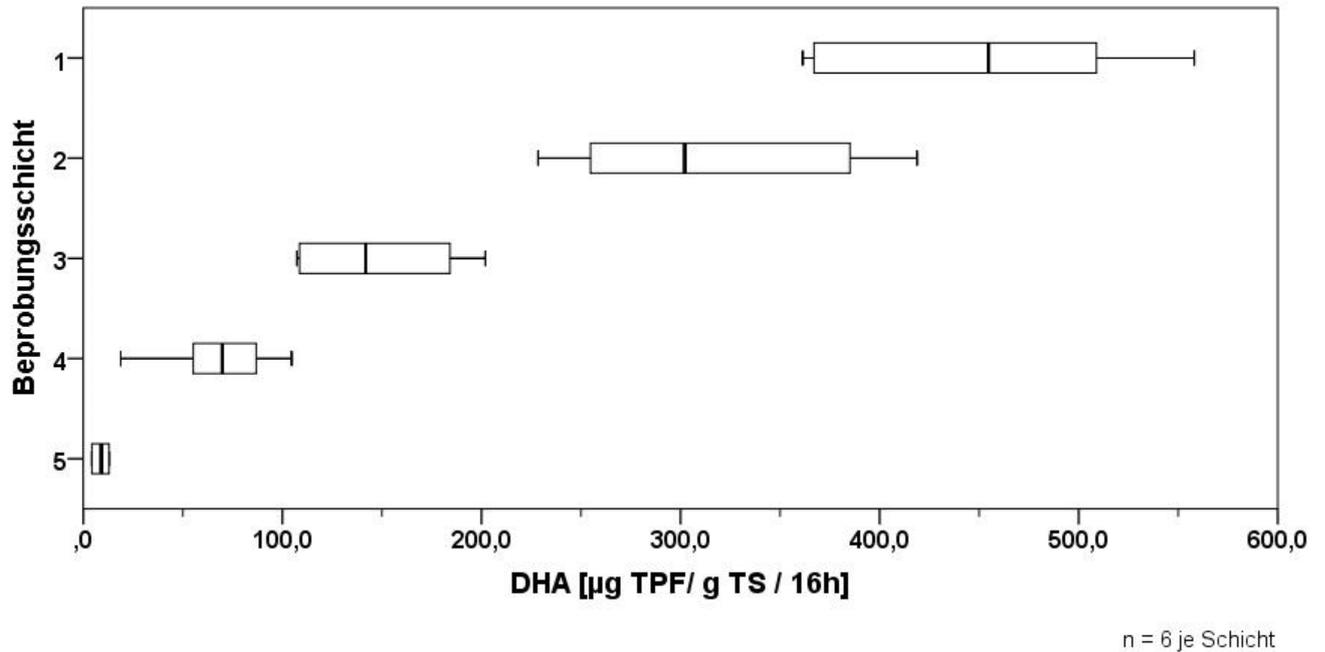


Abbildung 170: Dehydrogenaseaktivität in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau (2 Beprobungstermine im Jahr 2012)

5.9 Phosphor

Phosphor (P) ist ein wichtiger Makronährstoff für Pflanzen und insbesondere für den Energiehaushalt der Pflanze sowie als Zellbestandteil von zentraler Bedeutung.

Phosphor ist in natürlichen Systemen geogenen Ursprungs und dabei vorwiegend als Phosphat in Apatiten als sog. „natives P“ gebunden. Im Verlauf der Pedogenese sinkt der P-Gehalt des Bodens natürlicherweise ab (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 295). Er variiert in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein, der Textur und dem Entwicklungsgrad des Bodens, wobei der P-Gehalt mit zunehmendem Ton- und Humusgehalt höher ist, da P im Boden hauptsächlich an die Oberfläche der Tonpartikel oder an Humusverbindungen gebunden ist. Phosphor liegt im Boden überwiegend in Form des Orthophosphat-Anions (PO_4^{3-}) in gebundener Form vor, der Anteil in der Bodenlösung macht hingegen meist nur ca. 0,1 % des Gesamt-P aus (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 296). Dabei besteht eine hohe chemische Affinität des Phosphat-Anions zu den Kationen Fe^{3+} , Al^{3+} und Ca^{2+} . Die P-Verfügbarkeit im Boden hängt daher stark vom pH-Wert ab, da sowohl bei niedrigen ($< 5,0$, Fe, Al) als auch bei hohen ($> 6,5$, Ca) pH-Werten des Bodens eine verstärkte Aktivität der genannten Kationen zu verzeichnen ist, welche in der Folge sehr stabile Verbindungen mit den Phosphat-Anionen eingehen.

Pflanzenwurzeln nehmen Phosphat nur in seiner gelösten Form auf. Daher muss es ständig aus der gebundenen Form nachgeliefert werden. Dies geschieht durch Desorption, Auflösung von Ca-Phosphaten und Mineralisierung von organischem Phosphat (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 303). Das Calcium-Acetat-Laktat (CAL)-extrahierbare sog. pflanzenverfügbare Phosphat ahmt die Extraktionsleistung der Wurzeln nach. 4 - 5 mg P (CAL) 100 g^{-1} gelten dabei als Grenze, oberhalb welcher lediglich eine Entzugsdüngung stattfinden sollte bzw. eine Ertragssteigerung durch weitere P-Düngung nicht mehr mit Sicherheit vorausgesagt werden kann (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 304).

Im Rahmen der Umsetzung der Düngeverordnung (LFULG 2007) wurden dabei im Freistaat Sachsen fünf Gehaltsklassen (A - E) mit den folgenden Grenzen definiert (für Ackerland mit Humusgehalte $< 4 \%$ und die Bodenart Lehm):

- A: $< 2,4 \text{ mg P } 100 \text{ g}^{-1}$
- B: $2,5 - 4,8 \text{ mg P } 100 \text{ g}^{-1}$
- C: $4,9 - 7,2 \text{ mg P } 100 \text{ g}^{-1}$
- D: $7,3 - 10,4 \text{ mg P } 100 \text{ g}^{-1}$
- E: $> 10,5 \text{ mg P } 100 \text{ g}^{-1}$

Die Einordnung der P (CAL)-Gehalte in Gehaltsklassen im Rahmen dieses Berichtes erfolgt nach diesen Grenzwerten.

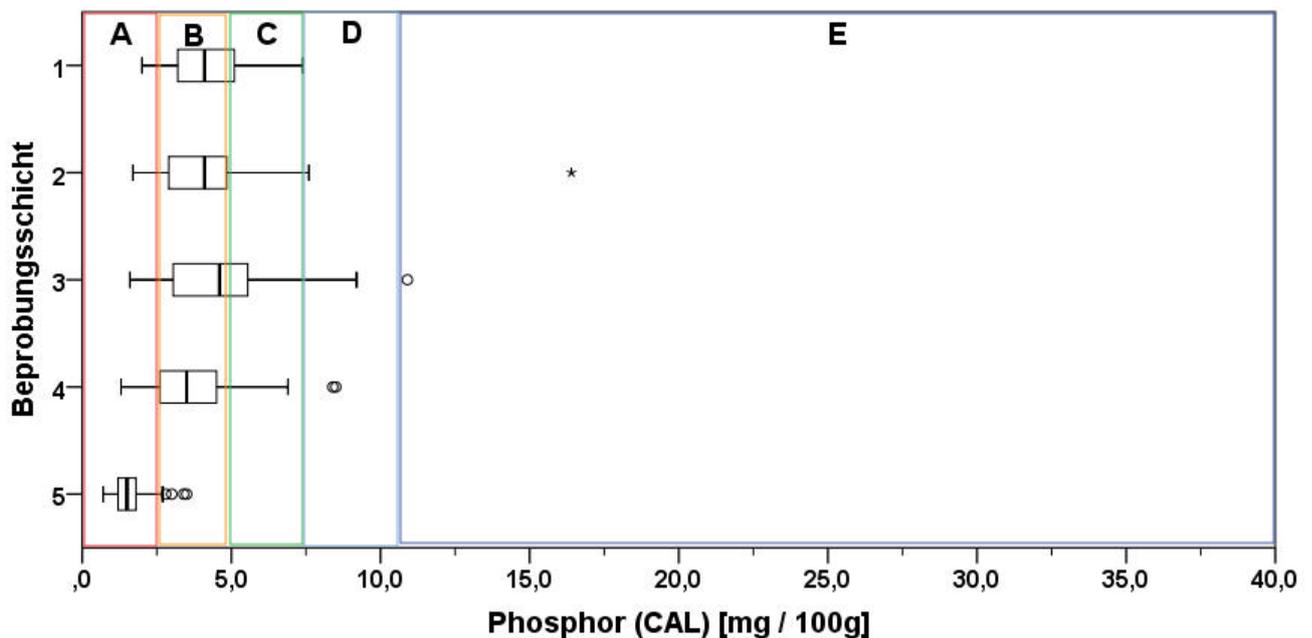
Da Phosphor im Boden bzw. der Bodenlösung weitestgehend immobil ist, findet der P-Entzug auf landwirtschaftlich genutzten Flächen hauptsächlich über Erosionsprozesse und Ernteentzüge statt. Nachdem in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts auf vielen Ackerflächen über die Düngung große P-Überschüsse bzw. -Reserven aufgebaut wurden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 304), werden diese aktuell genutzt und abgebaut. Die Aufwandmengen an P-Dünger wurden somit in den letzten drei Jahrzehnten erheblich reduziert, wozu auch die Preisentwicklung für P-Dünger auf dem Weltmarkt sowie gesetzliche Vorgaben zu den Düngermengen beigetragen haben.

5.9.1 Lüttewitz

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor (CAL) sind sehr stark vom (zeitlichen) Zusammenhang zum letzten Bodenbearbeitungs- bzw. Düngungstermin abhängig. Die ausführlichen Daten zur Bodenbearbeitung und Düngung können der Bewirtschaftungsübersicht im entsprechenden Abschnitt dieses Berichtes entnommen werden. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden hier alle Gaben von phosphathaltigem Mineraldünger im Untersuchungszeitraum kurz aufgeführt:

- 17.03.2012: 7,3 kg P ha⁻¹ (NPKS)
- 28.03.2012: 7,9 kg P ha⁻¹ (NPKS)
- 08.06.2012: 3,8 kg P ha⁻¹ (NPKS)
- 25.09.2012: 51,2 kg P ha⁻¹ (TSP)
- 13.04.2013: 6,6 kg P ha⁻¹ (NPKS)
- 04.05.2013: 7,7 kg P ha⁻¹ (NPKS)
- 30.09.2013: 79,7 kg P ha⁻¹ (TSP)
- 30.09.2013: 78,0 kg P ha⁻¹ (Carbokalk)
- 13.09.2014: 8,7 kg P ha⁻¹ (NPKS)
- 09.03.2015: 19,7 kg P ha⁻¹ (PK)

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor (CAL) in der Variante Pflug (P) (Abbildung 171) liegen in der Krume (Schichten 1 - 4) zwischen 2,5 und 6 mg 100 g⁻¹ und damit in der GHK B sowie im unteren Bereich der GHK C.



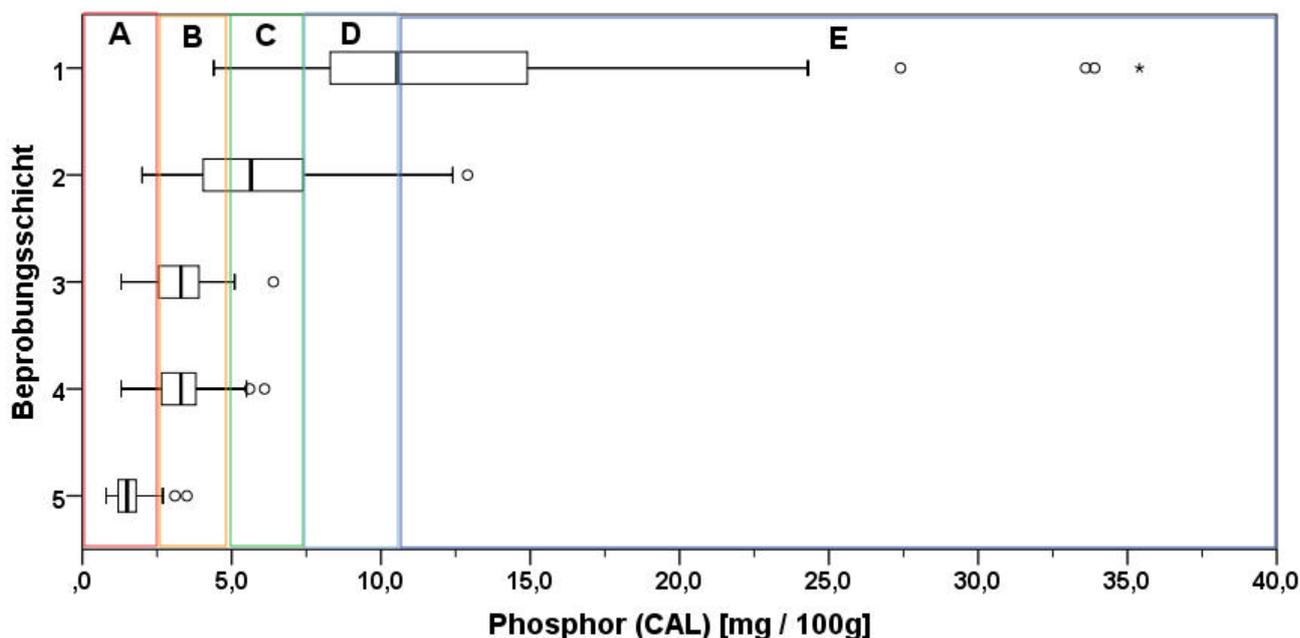
Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngerverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 59 je Schicht

Abbildung 171: P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine)

Dies entspricht dem in der Literatur genannten Grenzwert von 4 - 5 mg 100 g⁻¹ (s.o.), ab dem eine weitere Düngung keinen oder nur geringen Mehrertrag liefert. Es zeigt sich die bekannte bodenbearbeitungsbedingte homogenisierte Verteilung. Die P (CAL)-Gehalte im Unterboden (Schicht 5) liegen bei ca. 1 - 2 mg 100 g⁻¹ und damit in der GHK A.

Die P (CAL)-Gehalte in Schicht 1 der Variante Direktsaat (D) (Abbildung 172) liegen mit dem Zentralwertebereich zwischen 8 und 15 mg 100 g⁻¹ und damit im Grenzbereich zwischen den GHK D und E. Die Streuung der Werte ist dabei sehr groß. Die hohen Werte und hohen Streuungen lassen sich aus den jeweiligen Düngergaben (s.o.) sowie der geringen Löslichkeit des Phosphats in der Bodenlösung (Immobilität) erklären. In Schicht 2 dieser Variante liegt der Zentralwertebereich zwischen 4 und 7,5 mg 100 g⁻¹ und damit in der GHK C sowie im oberen Bereich der GHK B. Die P (CAL)-Gehalte sind damit höher als in den Schichten 1 - 4 der Pflugvariante. In den Schichten 3 und 4 liegen die Hauptwertebereiche der P (CAL)-Gehalte zwischen 2,5 und 4 mg 100 g⁻¹ und damit in der GHK B, in Schicht 5, ähnlich wie in der Pflugvariante, mit Werten zwischen 1 und 2 mg 100 g⁻¹ in der GHK A.



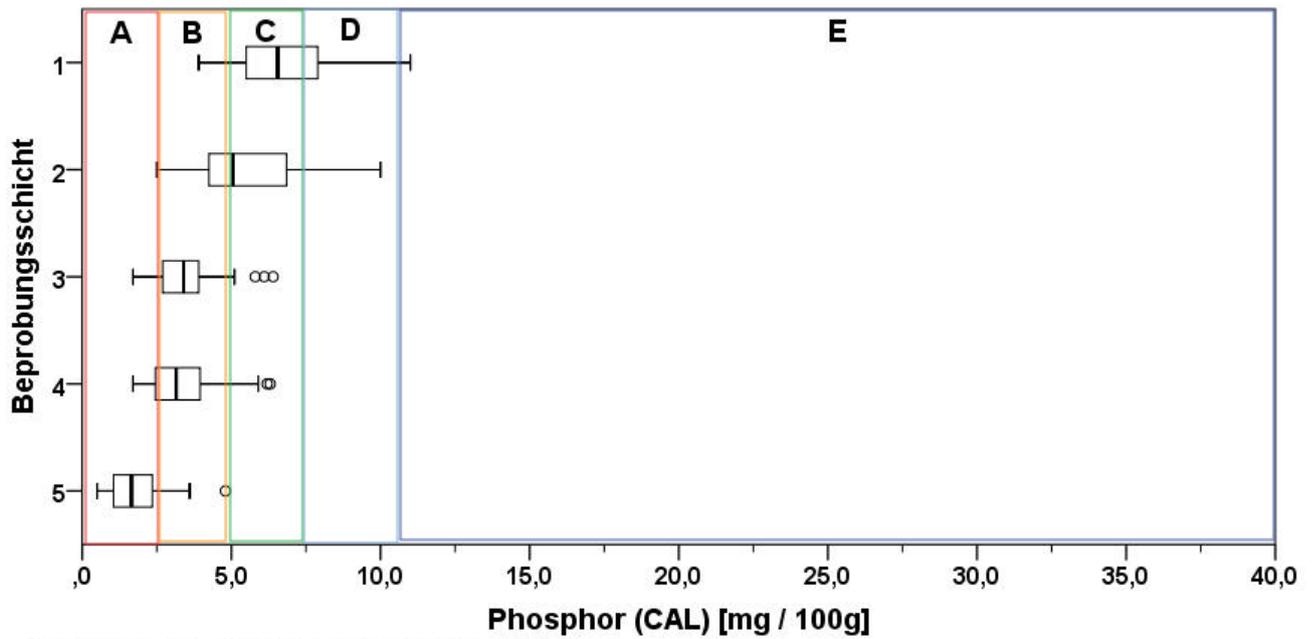
Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 60 je Schicht

Abbildung 172: P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Direktsaat am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine)

Für die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor (CAL) der Varianten K und KL ist zu beachten, dass hierbei nur Werte aus den vier Basisbeprobungsterminen (n = 36) einfließen, wohingegen in den Statistiken zu den Varianten P und D ebenfalls die Werte aus den Beprobungen zum Umbruchversuch (n = 59 bzw. 60) berücksichtigt wurden.

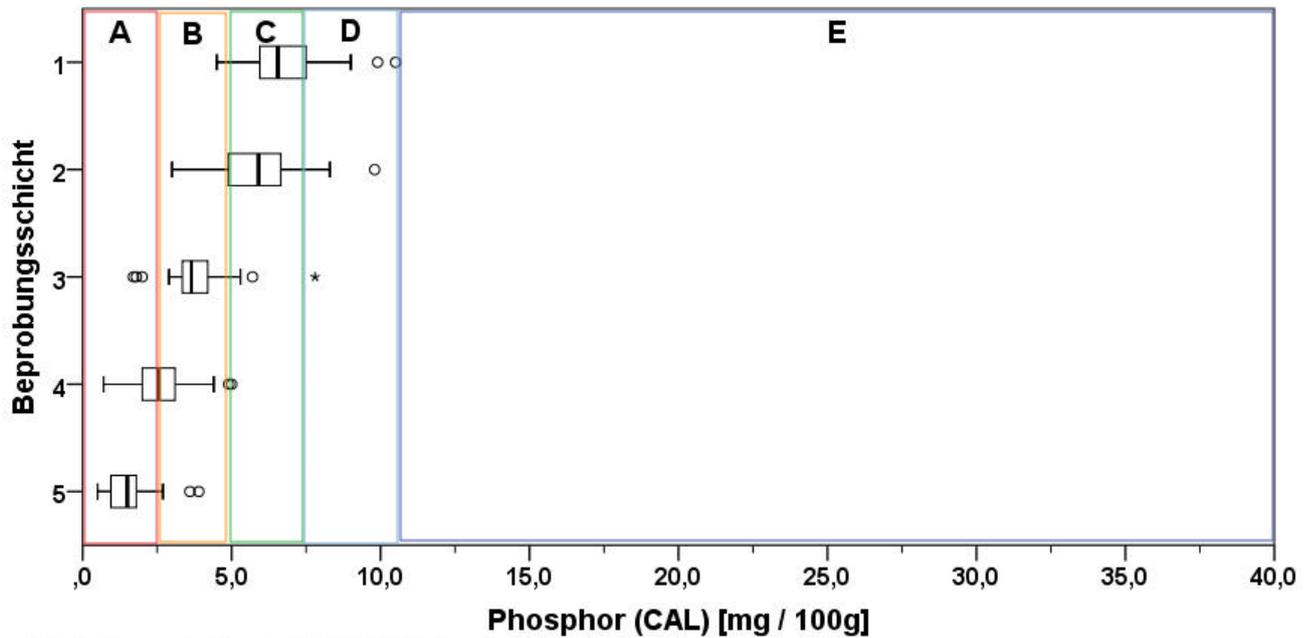
Die P (CAL)-Gehalte der Variante K zeigen in den Schichten 3, 4 und 5 eine sehr ähnliche Verteilung (Abbildung 173) wie in der Variante D. Die P (CAL)-Gehalte in Schicht 1 mit einem Zentralwertebereich zwischen 6 und 8 mg 100 g⁻¹ (GHK C - D) und in Schicht 2 mit einem Zentralwertebereich zwischen 4 und 7 mg 100 g⁻¹ (GHK B - C) sind zwar höher als in den darunter liegenden Schichten, allerdings nicht so hoch wie in der Variante D. Dies gilt ebenso für die Streuungen der Werte.



Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 36 je Schicht

Abbildung 173: P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine)



Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 36 je Schicht

Abbildung 174: P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine)

Die geringsten Streuungen innerhalb der Schichten weist die Variante Konservierend Locker (KL) auf (Abbildung 174). Die P (CAL)-Gehalte der Schichten sind als Funktion der Tiefe stratifiziert mit Zentralwertebereichen von 6 - 8 (Schicht 1, GHK C - D), 4 - 7 (Schicht 2, GHK B - C), 2,5 - 4 (Schicht 3, GHK B), 2,5 - 4 (Schicht 4, GHK B) und 1 - 2,5 (Schicht 5, GHK A) mg 100g⁻¹.

5.9.1.1 Basisbeprobungen

Anhand der Mischproben aus der Basisbeprobung im Frühjahr 2012 wurden im Rahmen einer Diplomarbeit (FÖRSTER 2012) die Gesamtgehalte bzw. -vorräte an Phosphor mittels Königswasseraufschluss ermittelt. Auf dieser Arbeit aufbauend werden hier zunächst die Gesamtmassen aus dem Frühjahr 2012 dargestellt (Abbildung 175).

Die Phosphor-Gesamtvorräte (P_i) sind in der Variante Pflug (P) mit 2,77 t ha⁻¹ im beprobten Bodenpaket von 9000 t Boden ha⁻¹ am geringsten, gefolgt von der Variante Direktsaat (D) mit 2,83 t ha⁻¹. Die Varianten Konservierend mit 2,98 t ha⁻¹ und Konservierend Locker (KL) mit 3,01 t ha⁻¹ weisen die größten Vorräte auf. Ein Großteil des ermittelten Unterschiedes wird hierbei, ähnlich wie beim Kalium, durch die Gehalte bzw. aus diesen abgeleiteten Massen im Unterboden (Schicht 5) verursacht. Diese Schicht enthält aufgrund ihrer Mächtigkeit ca. 30 – 50 % der Gesamtvorräte an Phosphor in den obersten 9000 t Boden ha⁻¹.

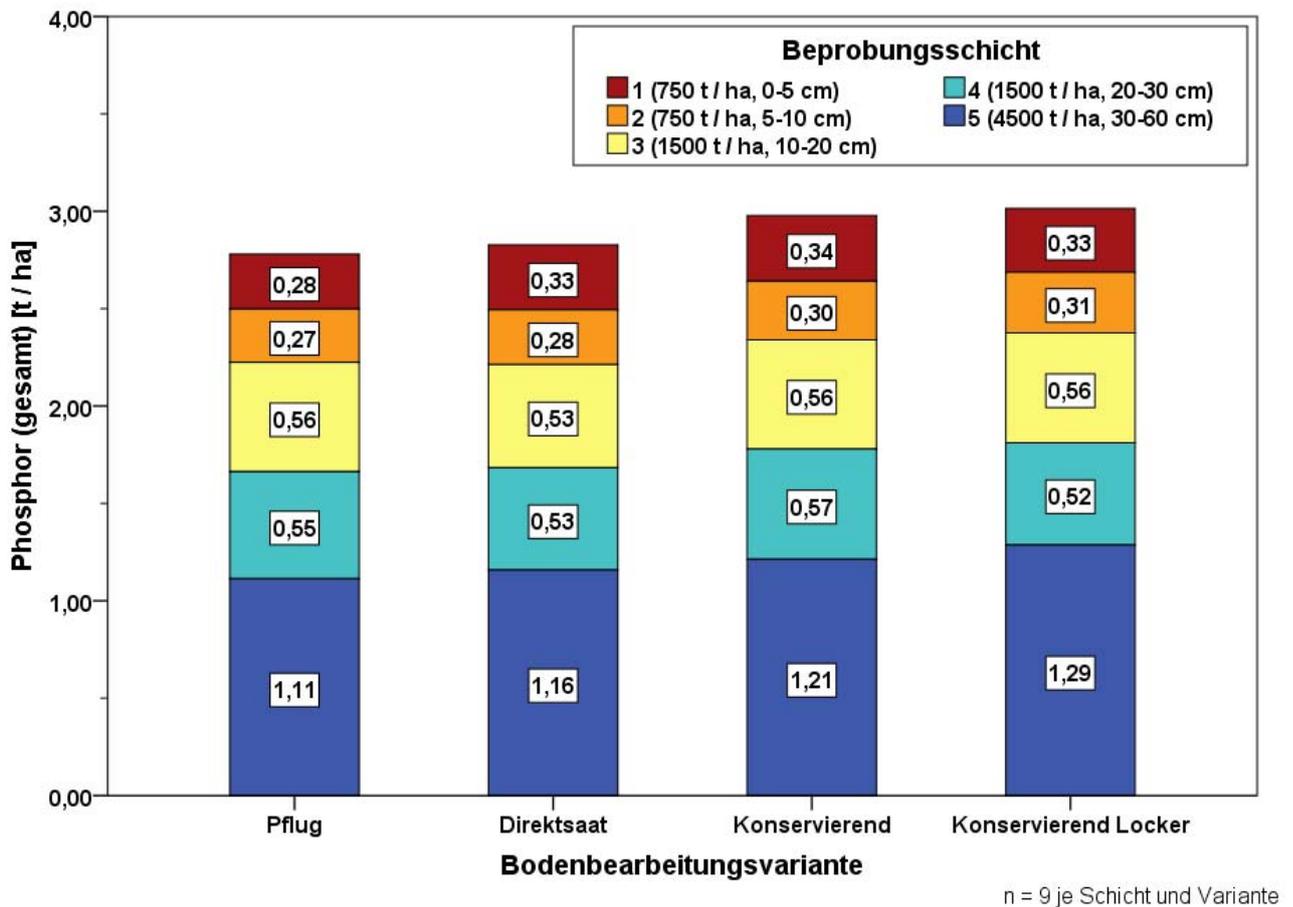


Abbildung 175: Mittlere Phosphor-Gesamtvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012

Die P_T -Gehalte in den einzelnen Bodenschichten sind in Abbildung 176 dargestellt. Sie liegen für die Krume (Schicht 1 - 4) in allen Varianten bei ca. 0,04 % mit Standardabweichungen von max. 0,01 % je Schicht und Variante. Die P_T -Gehalte sind dabei in der Variante Pflug (P) zwischen den Schichten homogen verteilt, in den Varianten D, K und KL ergibt sich ein mehr oder minder stark stratifiziertes Bild der P_T -Gehalte als Funktion der Tiefe. Ein deutlicher Unterschied zwischen den Varianten ist lediglich in Schicht 1 erkennbar, in der sich die Varianten D, K und KL mit P_T -Gehalten von 0,45 % klar von der Variante P mit 0,37 % unterscheiden. Auch in Schicht 2 sind die P_T -Gehalte in der Pflugvariante geringer als in den anderen drei Varianten, der Unterschied ist aber wesentlich geringer.

Im Unterboden (Schicht 5) sind die P_T -Gehalte in allen Varianten etwas geringer (0,025 - 0,03 %) als in der Krume.

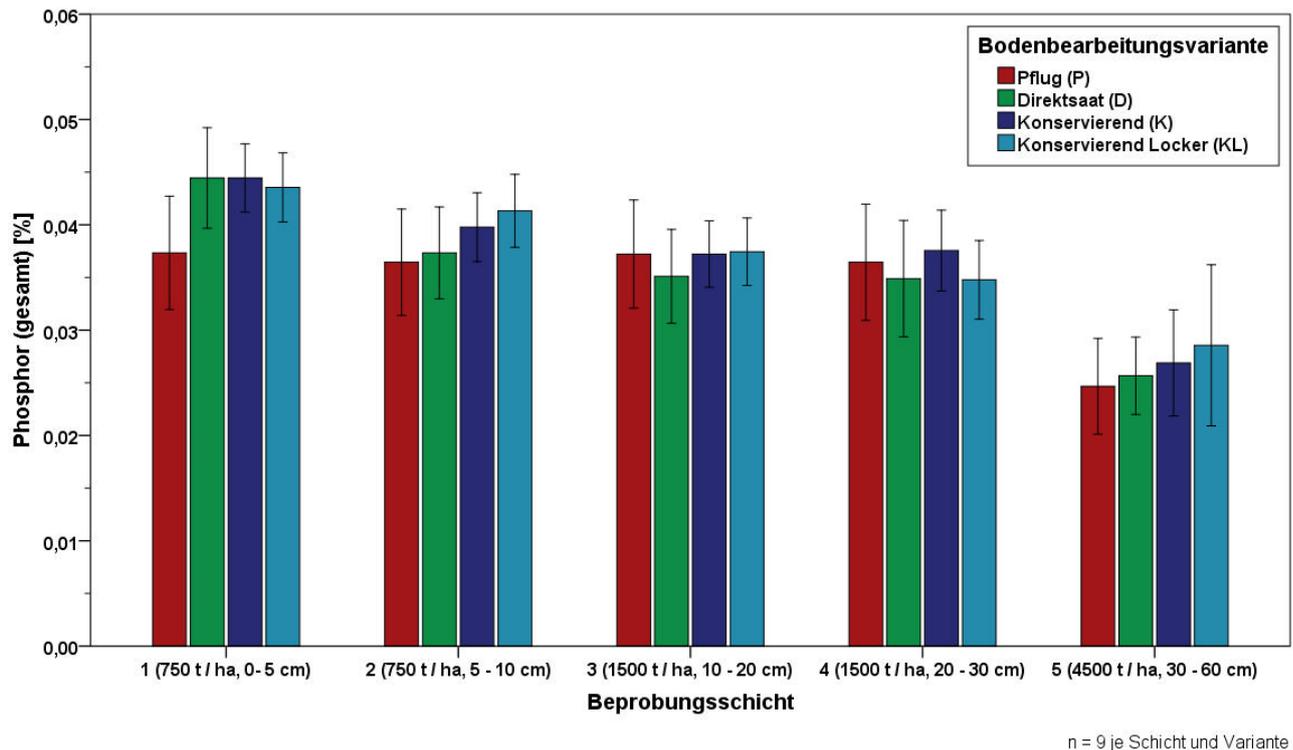


Abbildung 176: Phosphor-Gesamtgehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012

Die mittleren pflanzenverfügbaren Phosphor-Vorräte für das gesamte beprobte Bodenpaket von 9000 t Boden ha^{-1} liegen, je nach Termin und Variante, zwischen 200 und 350 $kg\ ha^{-1}$ (Abbildung 177). Dabei sind die P (CAL)-Massen im Verlauf der ersten drei Beprobungstermine relativ stabil, mit einem leichten Rückgang im Verlauf des Jahres 2012 in allen Varianten, vermutlich aufgrund des Ernteentzuges. Zum Frühjahr 2013 kommt es zu einer leichten Zunahme der P (CAL)-Massen in den Varianten P, D und KL, welche auf die Düngergabe von über 50 $kg\ P\ ha^{-1}$ (Triplesuperphosphat) kurze Zeit nach der Beprobung im Herbst 2012 zurückgeführt werden kann. Warum dieser Düngergabe in den Werten der Variante K nicht erkennbar ist, bleibt unklar.

Im Herbst 2015 liegen die P (CAL)-Massen in den Varianten P, D und K deutlich über jenen im Frühjahr 2013, wobei durch die Länge der Zeit und die Fülle an Bewirtschaftungsmaßnahmen (Ernteentzüge, Düngung, Bodenbearbeitung) in dieser Zeit kein linearer Verlauf der P (CAL)-Massen angenommen und die Veränderung der P (CAL)-Massen nicht im Detail interpretiert werden kann.

In jedem Fall hat die Düngung von über 150 kg P ha⁻¹ im Herbst 2013 in zwei Gaben (TSP und Carbokalk) die Phosphorvorräte des Untersuchungsschlages so stark aufgefüllt, dass diese nach Anbau von Zuckerrübe (2014) und Winterweizen (2014/2015) und nur geringen weiteren Düngergaben von insgesamt ca. 30 kg ha⁻¹ im Herbst 2015 in den genannten Varianten deutlich größer waren als im Frühjahr 2013. Warum dies für die Variante KL, für die im Herbst 2015 mit ca. 250 kg ha⁻¹ exakt gleich große Vorräte ermittelt wurden wie im Frühjahr 2013, nicht gilt, bleibt ebenfalls unklar. Der genauere zeitliche Verlauf der P (CAL)-Gehalte und -Massen während dieser Zeit kann anhand der Werte, die im Rahmen des Umbruchsversuches erhoben wurden (s.u.), verfolgt werden.

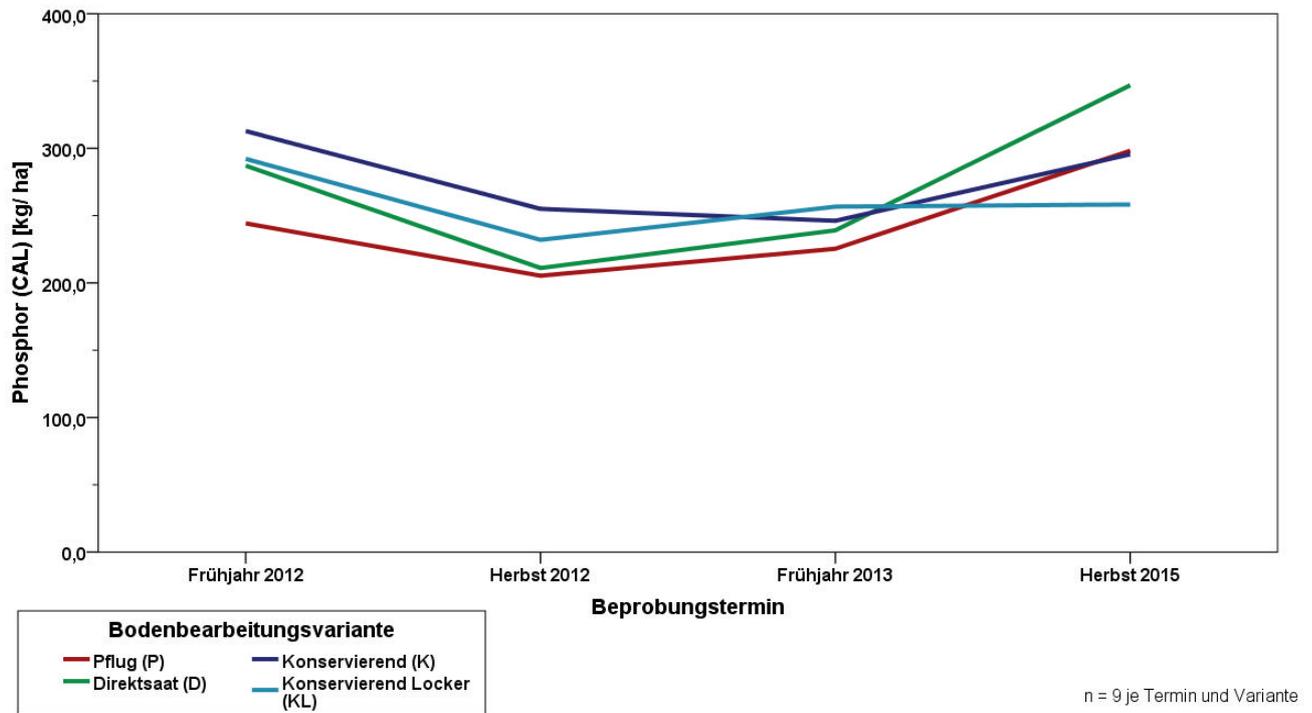
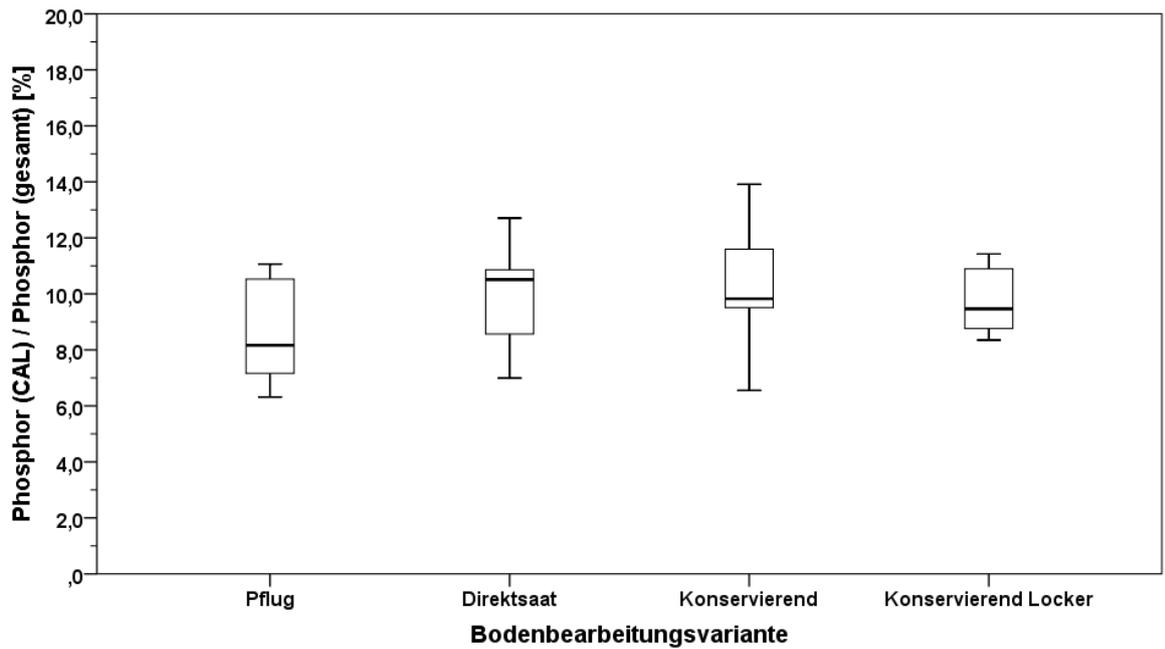


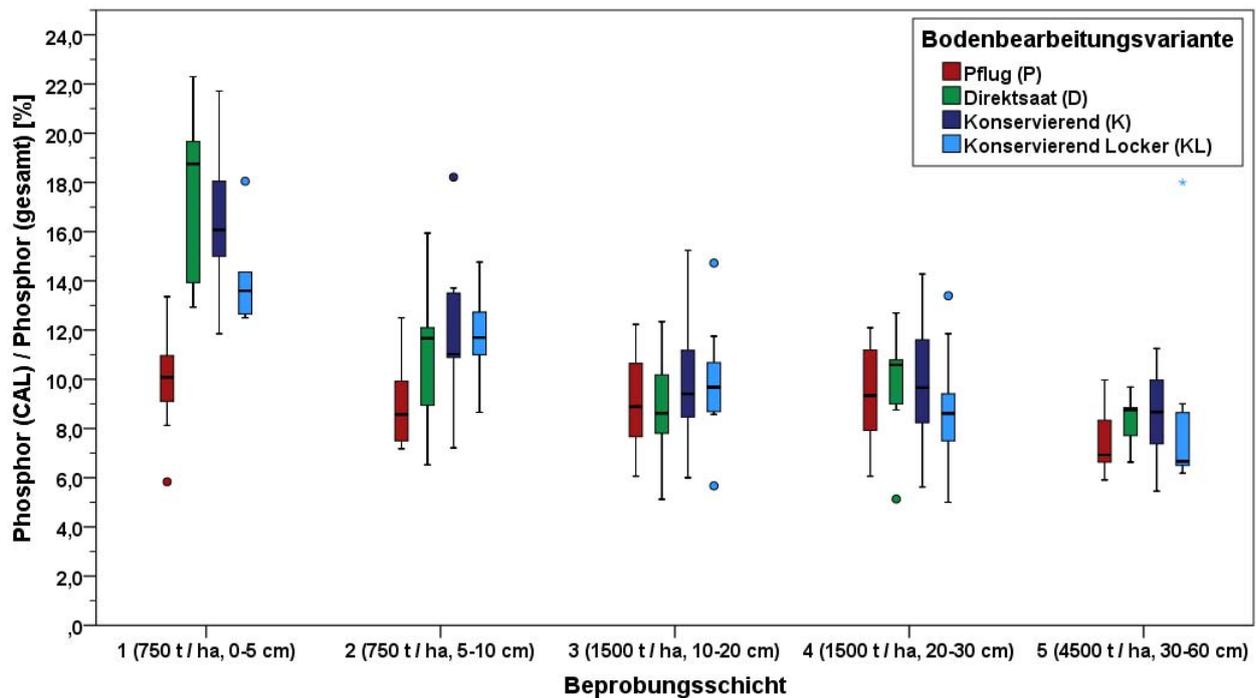
Abbildung 177: Mittlere P(CAL)-Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz

Während die pflanzenverfügbaren Phosphorgehalte insbesondere in den oberen Schichten über die Zeit stark variieren, wurden, ebenfalls aufbauend auf der Arbeit von FÖRSTER (2012), die Anteile des pflanzenverfügbaren Phosphors (CAL) an den Phosphorgesamtvorräten für das Frühjahr 2012 errechnet. In Bezug auf die für das Gesamtprofil errechneten Anteile (Abbildung 178) lassen sich nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten feststellen, wobei sowohl die Maxima als auch die Streuungen in den Varianten Direktsaat und Konservierend größer sind als in den Varianten Pflug und Konservierend Locker. Grundsätzlich wurden Anteile von 6 - 11 % (P), 7 - 13 % (D), 6 - 14 % (K) sowie 8 - 11 % (KL) ermittelt. Die jeweiligen Mediane (MN) liegen bei 8 % (P), 10,5 % (D), 10 % (K) sowie 9,5 % (KL).



N = 9 je Schicht und Variante

Abbildung 178: Anteile von P(CAL) am Gesamtphosphorvorrat im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012



n = 9 je Schicht und Variante

Abbildung 179: Anteile von P(CAL) am Gesamtphosphorvorrat in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012

Schlüsselt man die Anteile nach den fünf Beprobungsschichten auf ($n = 9$) ergibt sich ein klareres und differenzierteres Bild (Abbildung 179).

So liegen die P (CAL)-Anteile in Schicht 1 in den Varianten D und K mit einem Zentralwertebereich zwischen 14 und 20 % (D) bzw. 15 und 18 % (K) deutlich höher als jene der Variante KL (12,5 - 14,5 %) und insbesondere jene der Variante P (9 - 11 %). Während die Variante D, K und KL in Schicht 2 ebenfalls leicht höhere Anteile aufweisen als Variante P, gleichen sich die Anteile der einzelnen Varianten in den darunter liegenden Schichten immer stärker einander an. Zugleich nehmen die Anteile insgesamt leicht ab. Schicht 5 weist somit sowohl die absolut geringsten Anteile (ZWB 6 - 9 %), als auch die geringsten Streuungen innerhalb der Varianten sowie die geringsten Unterschiede zwischen den Varianten auf. Damit ergibt sich in Bezug auf den Variantenvergleich eine ähnliche Tiefenverteilung wie beim Kalium, auch wenn die jeweiligen pflanzenverfügbaren Anteile beim Phosphor absolut gesehen deutlich größer sind als beim Kalium (s. Kapitel 5.10).

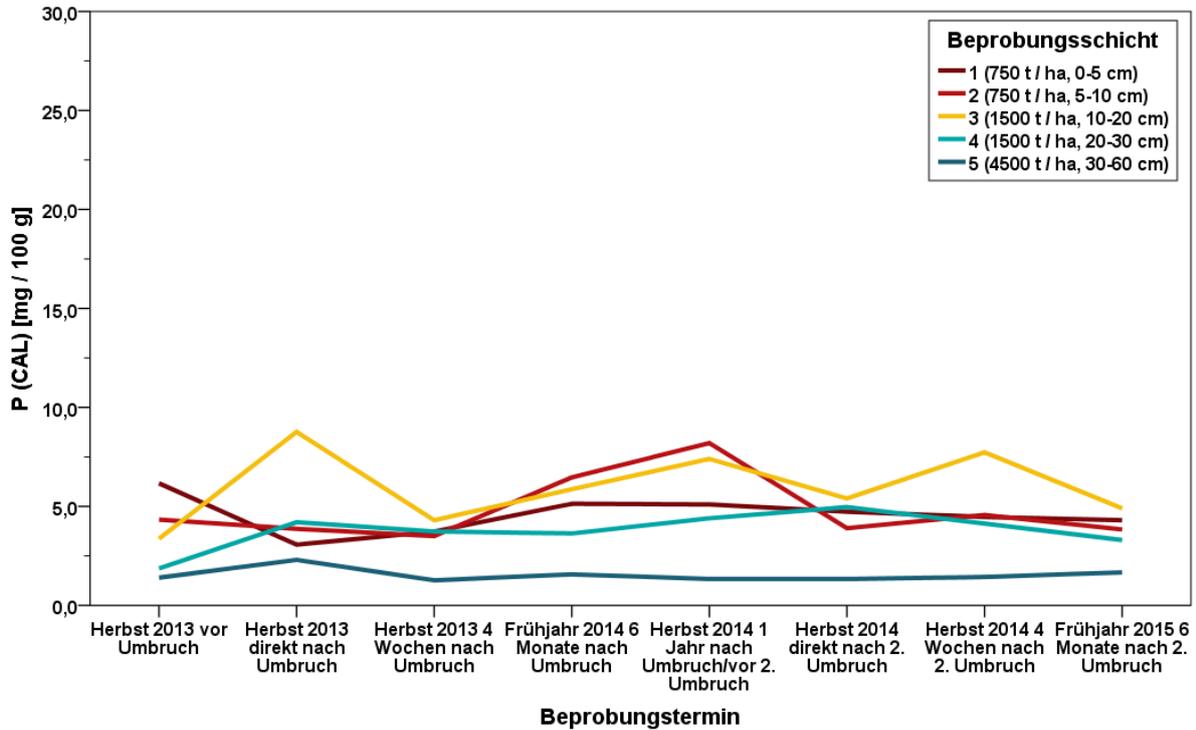
5.9.1.2 Umbruchversuch

Aufgrund der zeitlich engeren Staffelung der Beprobungstermine im Rahmen des Umbruchversuches werden die pflanzenverfügbaren Phosphorgehalte (CAL) für diesen im zeitlichen Verlauf der einzelnen Beprobungsschichten nach Varianten aufgeschlüsselt.

In der Variante Pflug (P) sind die P (CAL)-Gehalte im Herbst 2013 vor dem Umbruch zunächst als Funktion der Tiefe in den fünf Beprobungsschichten stratifiziert (Abbildung 180), mit Werten zwischen 1 (Schicht 5) und $7 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (Schicht 1). Durch den Umbruch in Verbindung mit einer großen Gabe phosphathaltigen Düngers (Triplesuperphosphat und Carbokalk mit jeweils ca. 80 kg P ha^{-1}) wird der P (CAL)-Gehalt in Schicht 3 zunächst auf ca. $10 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ angehoben, sinkt aber zum Termin „4 Wochen nach Umbruch“ wieder auf das Gehaltsniveau von $4 - 5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ der anderen Krumenschichten ab. Über den Winter 2013/2014 sowie im Verlauf des Jahres 2014 steigen die P (CAL)-Gehalte in den Schichten 1 - 4 deutlich an, vermutlich als Langzeitwirkung der im Herbst 2013 ausgebrachten Phosphatdünger. Besonders markant ist der Anstieg dabei in den Schichten 2 und 3. In der weiteren Folge des Versuches stabilisieren sich die Gehalte in den Schichten 1, 2 und 4 auf einem Niveau von $3 - 5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$, während Schicht 3 weiteren Schwankungen unterliegt, im Frühjahr 2015 aber ebenfalls einen Gehalt von ca. $5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ aufweist. Schicht 5 weist bei P (CAL)-Gehalten zwischen 1 und $2 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ insgesamt kaum Schwankungen in den Phosphorgehalten auf.

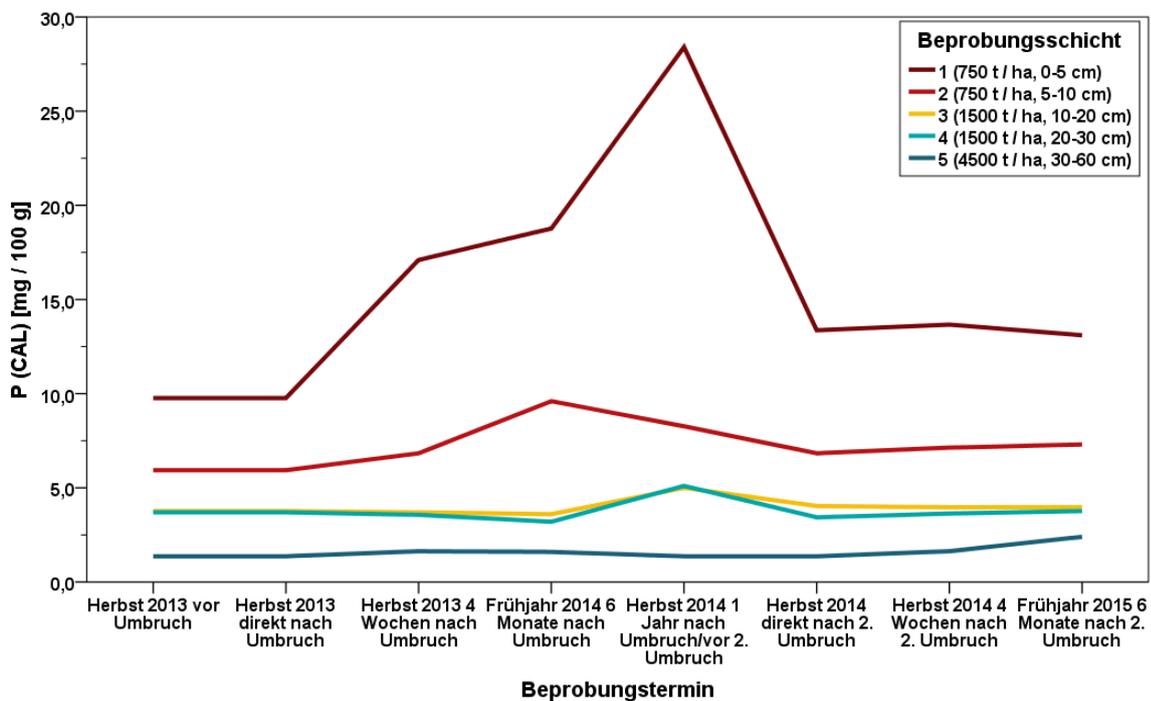
Die pflanzenverfügbaren Phosphorgehalte in der Variante Direktsaat (D) sind im Verlauf des gesamten Versuches als Funktion der Tiefe stratifiziert (Abbildung 181). Dabei treten in den Schichten 3 - 5 kaum Schwankungen der Gehalte auf. Lediglich im Herbst 2014 zeigen die Schichten 3 und 4, die konstant bei $3 - 4 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ liegen, eine leichte Zunahme der P (CAL)-Gehalte auf ca. $5 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$. Schicht 2 weist im Herbst 2013 Gehalte von $6 - 7 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ auf, welche zum Frühjahr 2014 auf $10 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ansteigen, was als Langzeiteffekt der Düngung im Herbst 2013 zu sehen ist. Im Verlauf der Vegetationsperiode des Jahres 2014 (Feldfrucht: Zuckerrübe) sinken die P (CAL)-Gehalte aber wieder langsam ab und stabilisieren sich im Herbst 2014 und Frühjahr 2015 auf einem Niveau von $7 - 8 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$.

Die stärksten zeitlichen Schwankungen der P (CAL)-Gehalte weist, düngungsbedingt, Schicht 1 auf. Von einem Ausgangsgehalt von $10 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ im Herbst 2013 steigen die Gehalte als Folge der Düngergabe vom 30.09.2013 kontinuierlich auf zunächst 17 (4 Wochen nach Umbruch / Düngung), dann 18 - 19 (Frühjahr 2014) und schließlich 28 - 29 (Herbst 2014 1 Jahr nach Umbruch / Düngung) $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$ an. Als Folge der Rübenernte mit hoher mechanischer Eingriffsintensität fällt der P (CAL)-Gehalt zum Termin nach Umbruch auf ca. $13 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ und stabilisiert sich in der Folge auf diesem Niveau. Fraglich bleibt, warum diese Abnahme im P (CAL)-Gehalt der Schicht 1 nicht durch einen Anstieg des P (CAL)-Gehaltes in einer oder mehreren anderen Schicht(en) einhergeht, was bei einer erntebedingten Umverteilung im Profil zu erwarten wäre. Vielmehr zeigen die Werte eher eine leichte Abnahme zum Termin nach der Ernte für die Schichten 2 - 4.



n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 180: Mittlere P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug (PU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

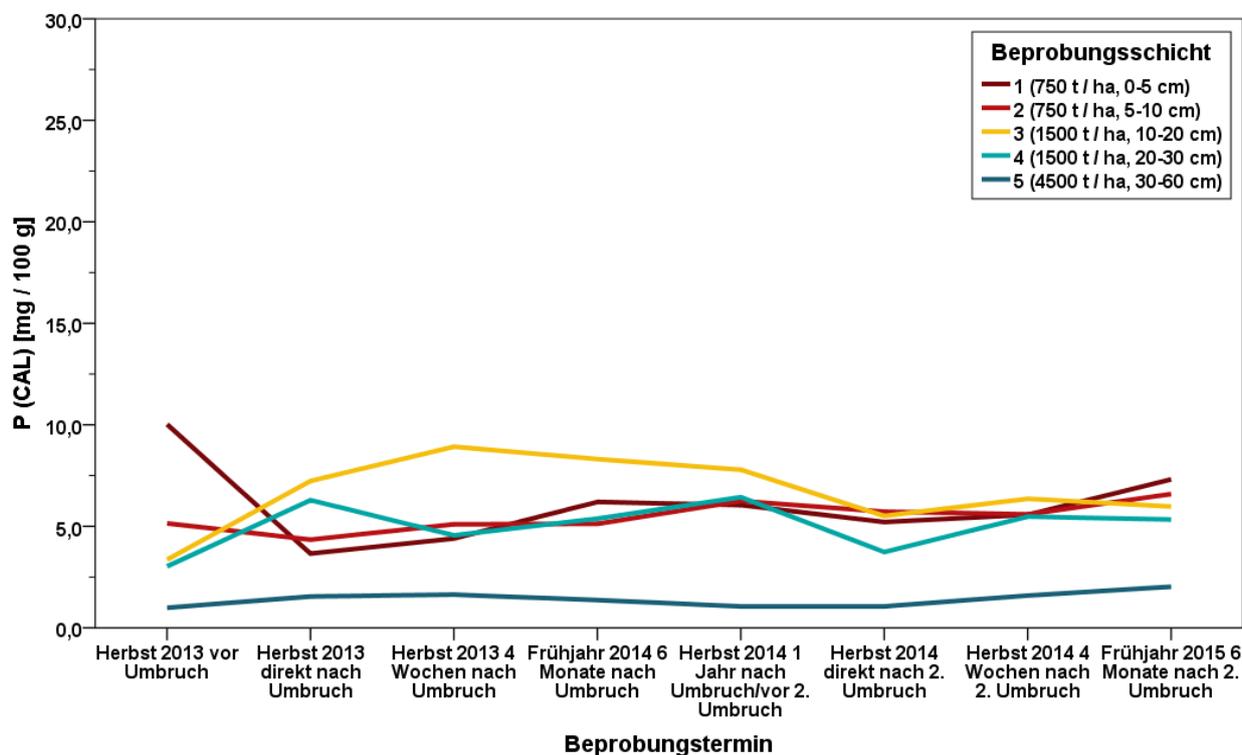


n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 181: Mittlere P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat (DU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Die Phosphorgehalte (CAL) der Variante Direktsaat gepflügt (DP) zeigen zu Beginn des Versuches die gleiche tiefenstratifizierte Verteilung in den Beprobungsschichten (Abbildung 182) wie jene der Variante D. Durch den Umbruch kommt es allerdings zu einer Umkehr der Schichten bzw. P (CAL)-Gehalte, sodass ab dem 2. Beprobungstermin Schicht 3 mit 7 - 9 mg 100 g⁻¹ die höchsten P (CAL)-Gehalte aufweist, welche sich erst nach dem 2. Umbruch im Herbst 2014 wieder jenen der anderen Schichten angleichen. Schicht 4 weist ebenfalls eine kurzzeitige Erhöhung der P (CAL)-Gehalte auf ca. 7 mg 100 g⁻¹ auf, welche aber bereits 4 Wochen nach dem Umbruch wieder auf dem Niveau der Schichten 1 und 2 liegen.

Im zweiten Jahr des Versuches kommt es zu einer weiteren Angleichung der P (CAL)-Gehalte in den Schichten, wobei im Rahmen des Umbruchs für Schicht 4 eine Verringerung des P (CAL)-Gehaltes von 7 auf 4 mg 100 g⁻¹ ermittelt wurde. Als Folge der Düngergabe vom 09.03.2015 hat sich im Frühjahr 2015 erneut eine tiefenstratifizierte Abfolge der P (CAL)-Gehalte eingestellt, wobei die Unterschiede zwischen den Schichten 1 - 4 deutlich geringer sind als zu Beginn des Versuches. Schicht 5 zeigt, wie in den Varianten P und D, kaum Schwankungen in den Phosphorgehalten, welche zwischen 1 und 2 mg 100 g⁻¹ liegen.



n = 9 je Schicht und Termin

Abbildung 182: Mittlere P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lütetowitz im Rahmen des Umbruchversuches

Aus den vorgestellten P(CAL)-Gehalten wurden die Gesamtmassen an pflanzenverfügbarem Phosphor (CAL) für die drei Bodenbearbeitungsvarianten berechnet (Abbildung 183). Diese liegen zu Beginn des Versuches bei 220 (P) bis 290 (D) kg ha⁻¹, wobei die Variante DP mit 250 kg ha⁻¹ eine Mittelstellung einnimmt. Durch die bodenbearbeitungsbedingte Einarbeitung des Düngers, welcher zum Umbruchtermin ausgebracht wurde, steigen die ermittelten P (CAL)-Massen in den Varianten P und DP zum Termin nach Umbruch direkt auf ca. 350 kg ha⁻¹ an, während sie in der Variante D aufgrund ihrer Lage an der Bodenoberfläche noch nicht mit erfasst wurden. Dieser Anstieg wird aber auch in der Variante D zu dem folgenden Termin sichtbar, sodass sich die P (CAL)-Massen in dieser bis auf fast 500 kg ha⁻¹ im Herbst 2014 erhöhen. Der Anstieg um fast

200 kg ha⁻¹ entspricht dabei etwa den ausgebrachten Düngermengen, ohne jedoch den Entzug mit der Ernte zu berücksichtigen.

Dieser liegt, berechnet auf der Grundlage von Standardwerten des KTBL (DÖHLER 2009: 213) bei einem Entzug über Haupt- und Nebenernteprodukte von 0,08 kg P dt⁻¹ für Zuckerrüben und einer Erntemenge von 1012 dt ha⁻¹ (Variante P) bzw. 869 dt ha⁻¹ (Variante D) bei 81 kg ha⁻¹ (Variante P) bzw. 69 (Variante D) kg ha⁻¹. Der Entzug in der Variante DP dürfte ebenfalls in dieser Größenordnung liegen. Auf dieser Grundlage erscheinen der für die Variante D ermittelte Anstieg auf ca. 500 kg P ha⁻¹ als sehr hoch und die für den Termine nach dem Umbruch 2014 ermittelten Werte von 330 - 380 kg ha⁻¹ als realistisch.

Die Variante DP zeigt vom Termin nach Umbruch im Herbst 2013 bis zum Termin vor Umbruch 2014 stabile P (CAL)-Massen von ca. 350 kg ha⁻¹. Für die Variante P wurden für den Termin 4 Wochen nach Umbruch im Herbst 2013 deutlich geringere P (CAL)-Massen (ca. 220 kg ha⁻¹) als für den Termin direkt nach Umbruch ermittelt. Zu den Folgeterminen (4 Wochen nach Umbruch bzw. Frühjahr 2014) steigen die P (CAL)-Massen aber wieder an. Dieser kurzfristige Rückgang der P (CAL)-Massen direkt nach dem Umbruch scheint dabei eher eine Ungenauigkeit im Vorgehen bei der Beprobung bzw. Analytik (s.u.) als ein bewirtschaftungsbedingter (tatsächlicher) Rückgang der P (CAL)-Massen zu sein. Ab dem Herbst 2014 liegen die P (CAL)-Massen in den Varianten P und DP etwa auf dem gleichen Niveau. Dieses fällt direkt nach dem Umbruch 2014 um 50 (P) bis 100 (DP) kg ha⁻¹, steigt aber in der Folge wieder an. Zum letzten Termin im Frühjahr 2015 liegen die P (CAL)-Massen in den Varianten D und DP auf einem Niveau (ca. 350 kg ha⁻¹), während die Variante P um ca. 100 kg ha⁻¹ geringere Vorräte aufweist.

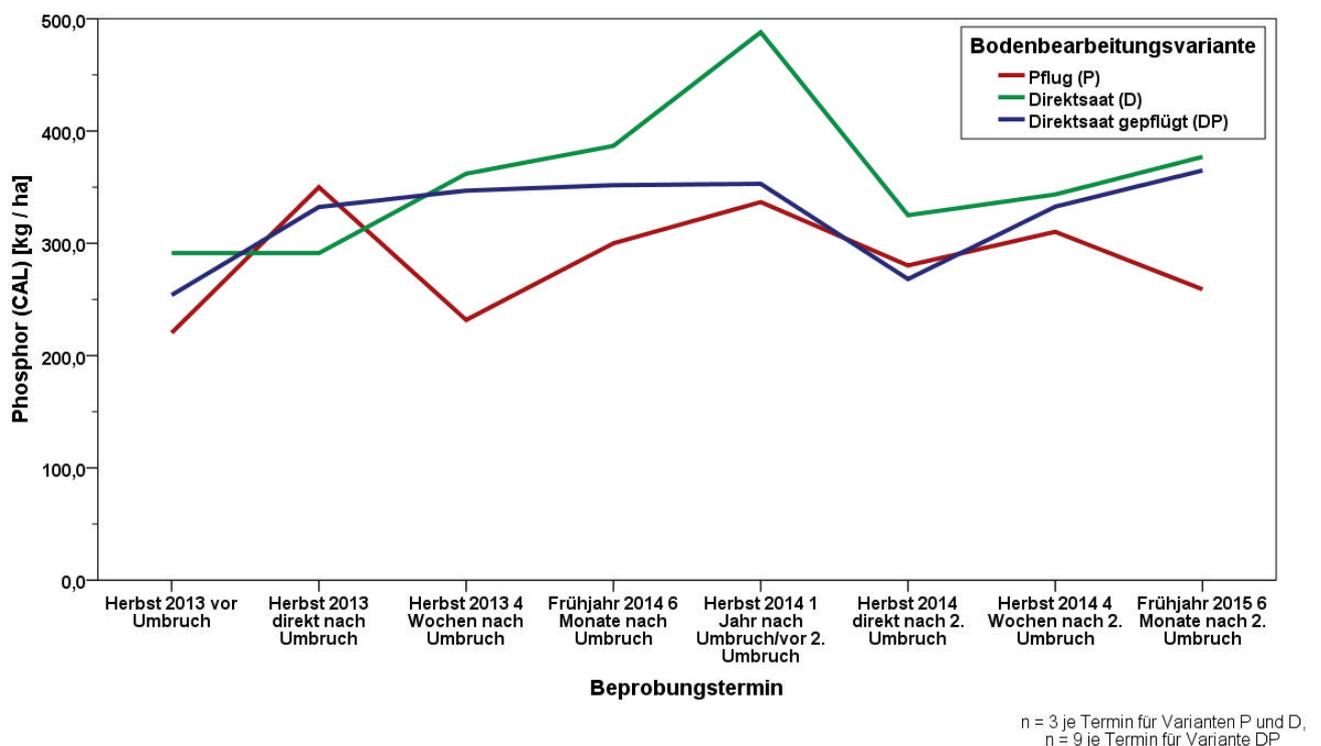


Abbildung 183: Mittlere P(CAL)-Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen (bewirtschaftungsbedingten) Variabilität des Phosphors im Boden scheint die Berechnung von repräsentativen P (CAL)-Gehalten bzw. -Massen für größere Parzellen auf der Basis von lediglich drei Beprobungspunkten, wie für die Varianten P und D geschehen, fragwürdig. Bei

einer größeren Anzahl (und ggf. entsprechenden räumlichen Verteilung) von Beprobungspunkten (Basisbeprobungen bzw. Variante DP, jeweils n = 9) hingegen nähern sich die Varianten einander an oder zeigen einen Verlauf, der vor dem Hintergrund der Zu- und Abfuhr von Phosphor in Form von Dünger und Ernteprodukten eher realistisch erscheint.

5.9.2 Methau

Die im Rahmen der Diplomarbeit von FÖRSTER (2012) durchgeführten Messungen des Gesamtvorrates an Phosphor

Abbildung 184) ergaben für den Standort Methau kaum Unterschiede zwischen den Variante und Blöcken bei Gesamtmassen zwischen 3,6 und 3,8 t ha⁻¹. Dabei sind die P_t-Gehalte und -Massen in allen Blöcken in der Variante K bodenbearbeitungsbedingt in den Schichten 1 - 3 größer und in den Schichten 4 und 5 kleiner als in der Variante P.

In der Variante Grünland (G) (Abbildung 185) liegen die Phosphor-Gesamtvorräte mit 3,22 t ha⁻¹ etwas niedriger als in den bewirtschafteten Varianten.

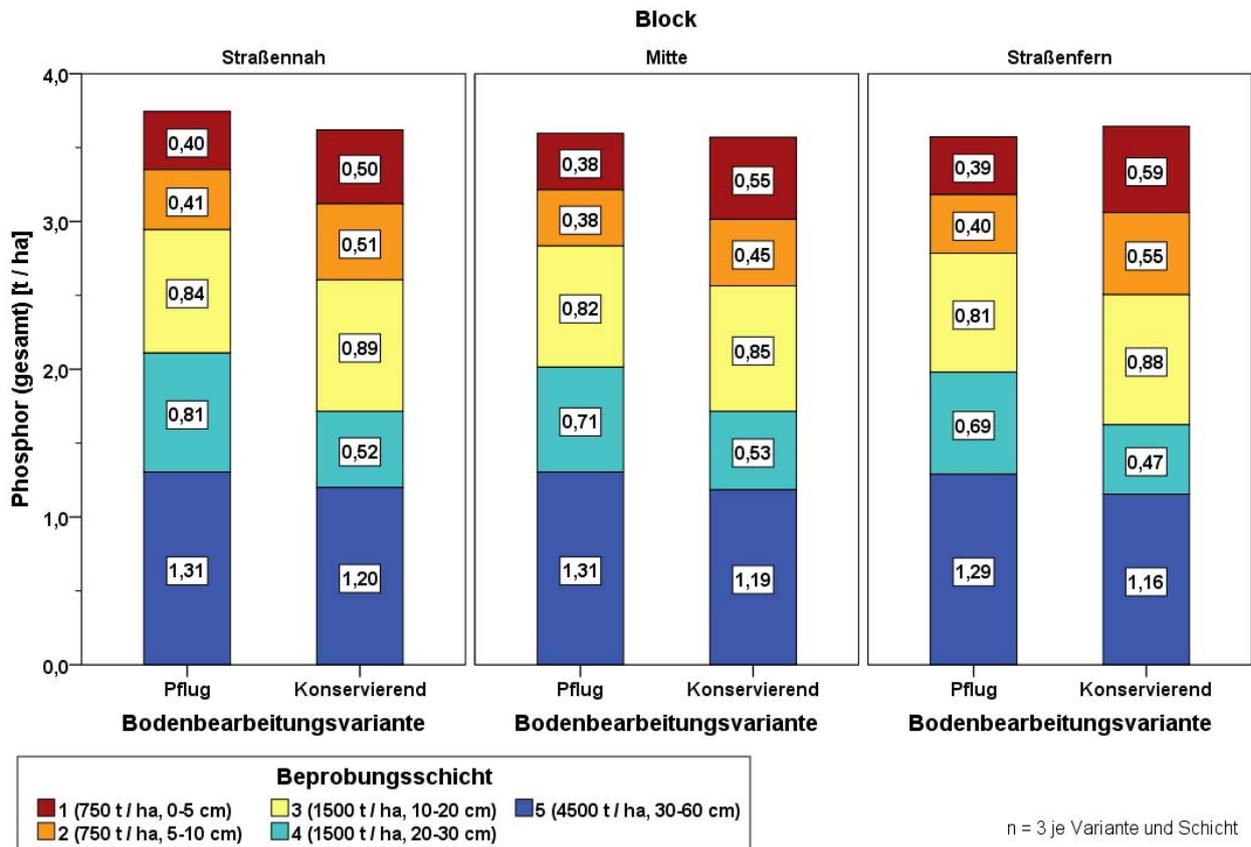


Abbildung 184: Mittlere Gesamtphosphorvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Frühjahr 2012

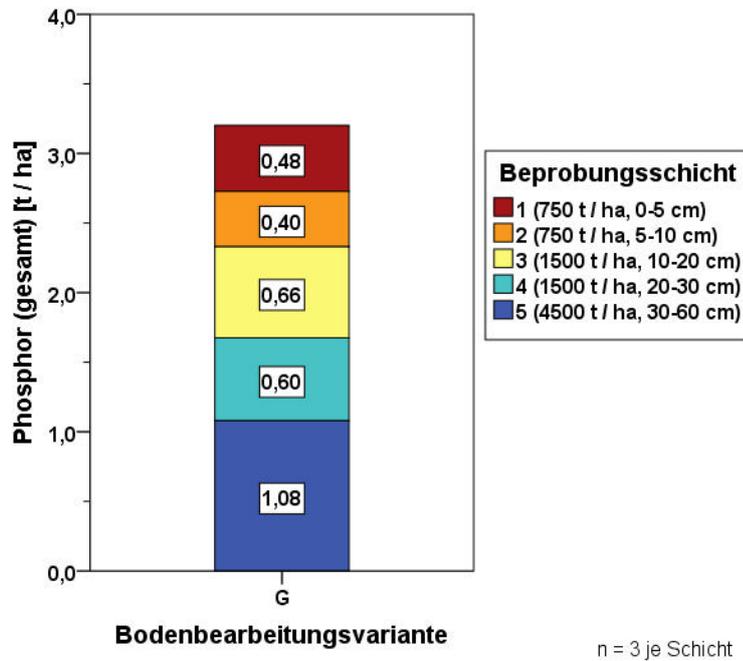


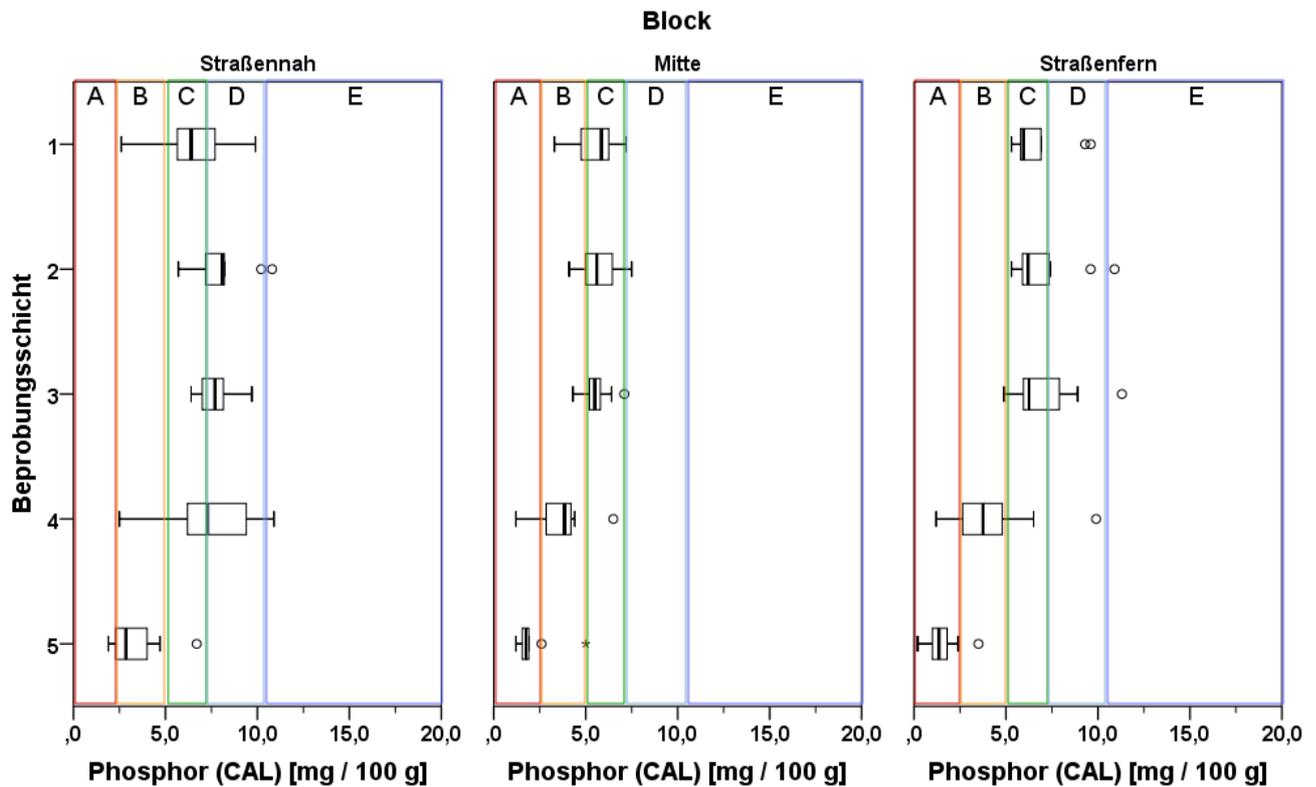
Abbildung 185: Mittlere Gesamtphosphorvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Frühjahr 2012

Die Phosphor-Gesamtvorräte wurden, wie bereits für den Kohlen- und Stickstoff, auf einen idealisierten Boden ohne Grobbodenanteile bezogen. Die korrigierten Vorräte für unterschiedliche Grobbodenanteile können Tabelle 13 entnommen werden.

Tabelle 13: Nach potentiellen Skelettanteilen korrigierte Gesamtphosphorvorräte innerhalb der einzelnen Blöcke und Bodenbearbeitungspartellen am Standort Methau im Frühjahr 2012

Beprobungsschicht	Skelettanteil	Block 1		Grünland	Block 2		Block 3		
		P	K	G	P	K	P	K	
		Gesamtphosphorvorräte [t ha ⁻¹]							
Masse-%									
1-4 (4500 t / ha)	0	2,46	2,42	2,14	2,29	2,38	2,29	2,49	
5 (4500 t / ha)	0	1,31	1,20	1,08	1,31	1,19	1,29	1,16	
1-5 (9000 t / ha)	0	3,77	3,62	3,22	3,60	3,57	3,58	3,65	
1-4 (4500 t / ha)	5	2,34	2,30	2,03	2,18	2,26	2,18	2,37	
5 (4500 t / ha)	5	1,24	1,14	1,03	1,24	1,13	1,23	1,10	
1-5 (9000 t / ha)	5	3,58	3,44	3,06	3,42	3,39	3,40	3,47	
1-4 (4500 t / ha)	10	2,21	2,18	1,93	2,06	2,14	2,06	2,24	
5 (4500 t / ha)	10	1,18	1,08	0,97	1,18	1,07	1,16	1,04	
1-5 (9000 t / ha)	10	3,39	3,26	2,90	3,24	3,21	3,22	3,29	
1-4 (4500 t / ha)	15	2,09	2,06	1,82	1,95	2,02	1,95	2,12	
5 (4500 t / ha)	15	1,11	1,02	0,92	1,11	1,01	1,10	0,99	
1-5 (9000 t / ha)	15	3,20	3,08	2,74	3,06	3,03	3,04	3,10	
1-4 (4500 t / ha)	20	1,97	1,94	1,71	1,83	1,90	1,83	1,99	
5 (4500 t / ha)	20	1,05	0,96	0,86	1,05	0,95	1,03	0,93	
1-5 (9000 t / ha)	20	3,02	2,90	2,58	2,88	2,86	2,86	2,92	
1-4 (4500 t / ha)	30	1,72	1,69	1,50	1,60	1,67	1,60	1,74	
5 (4500 t / ha)	30	0,92	0,84	0,76	0,92	0,83	0,90	0,81	
1-5 (9000 t / ha)	30	2,64	2,53	2,25	2,52	2,50	2,51	2,56	
1-4 (4500 t / ha)	50	1,23	1,21	1,07	1,15	1,19	1,15	1,25	
5 (4500 t / ha)	50	0,66	0,60	0,54	0,66	0,60	0,65	0,58	
1-5 (9000 t / ha)	50	1,89	1,81	1,61	1,80	1,79	1,79	1,83	

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor (CAL) in der Variante Pflug (Abbildung 186) liegen in den oberen drei Beprobungsschichten mit den Zentralwertebereichen zwischen 5 und 8 mg 100 g⁻¹ und damit in den GHK C und D, einzelne Messwerte erreichen allerdings auch die GHK B bzw. E. Die Werte liegen dabei im mittleren Block 2 etwas niedriger als in den Blöcken 1 und 3. In Schicht 4 gehen die P (CAL)-Gehalte in den Blöcken 2 und 3 auf 2,5 - 5 mg 100 g⁻¹ zurück und liegen damit überwiegend in der GHK B. Im straßennahen Block 1 hingegen weist diese Schicht, bei hohen Streuungen, die höchsten P (CAL)-Gehalte aller Schichten auf (2,5 - 11 mg 100 g⁻¹). Die P (CAL)-Gehalte in Schicht 5 liegen in den Blöcken 2 und 3 mit ZWB zwischen 1 und 2 mg 100 g⁻¹ in der GHK A, in Block 1 mit ZWB von 2,5 - 4 in der GHK B.



Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112; Bodenart Lehm

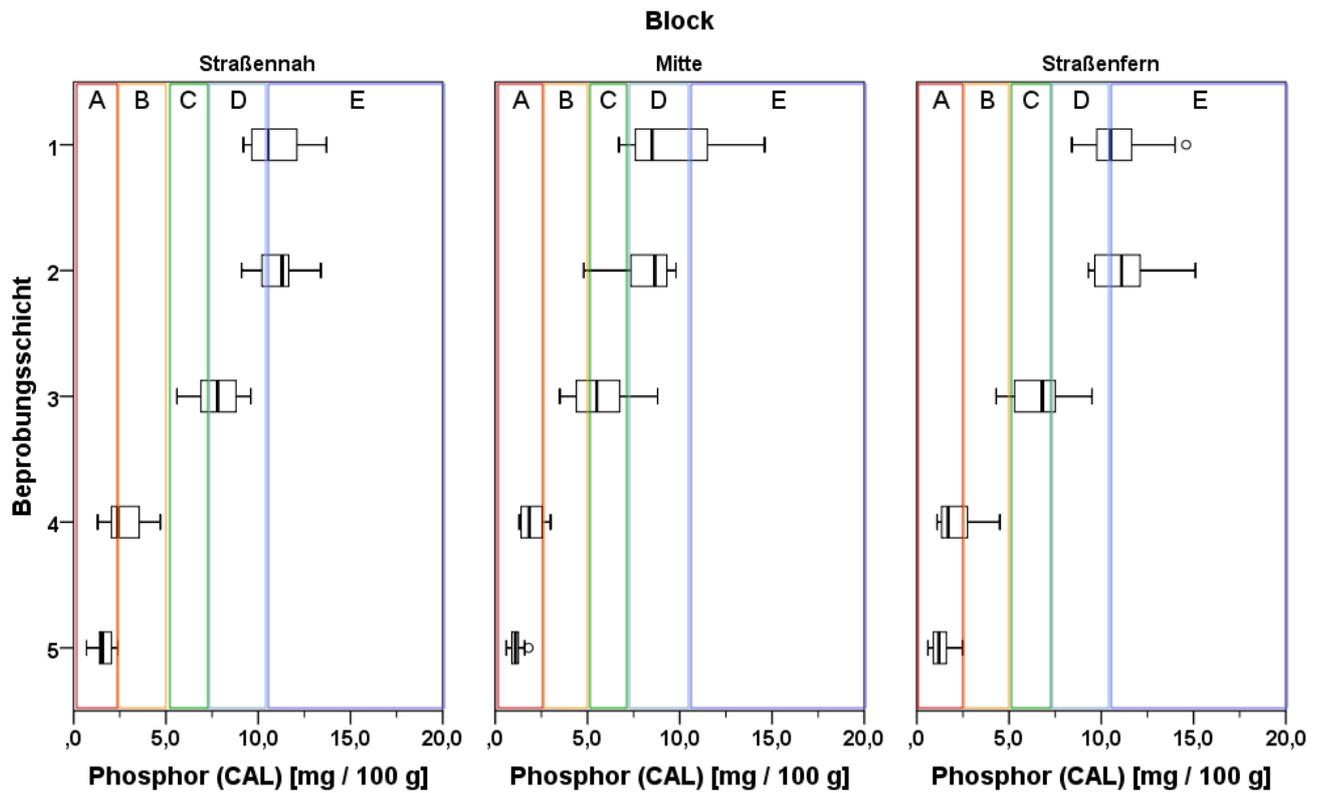
n = 12 je Schicht und Block

Abbildung 186: P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau (4 Beprobungstermine)

In der Variante Konservierend (K) ergibt sich auch beim pflanzenverfügbaren Phosphor ein tiefenstratifiziertes Bild (Abbildung 187). Die Zentralwertebereiche der Schichten 1 und 2 liegen in allen drei Blöcken zwischen 7,5 und 12 mg 100 g⁻¹ und damit in den GHK D und E. Die Übergangsschicht 3, welche in dieser Variante teilweise von der Bodenbearbeitung erfasst wird, weist mit Werten zwischen 6,5 und 9 mg 100 g⁻¹ (GHK B - D) ähnliche P (CAL)-Gehalte auf wie die oberen drei Schichten in der Variante P. Dabei wurden auch hier, wie im Unterboden der Variante P, im Block 1 die höchsten P (CAL)-Gehalte ermittelt. Dies gilt auch für Schicht 4, welche in Block 1 mit Werten zwischen 2 und 4 mg 100 g⁻¹ (GHK A/B) etwas höhere P (CAL)-Gehalte aufweist als die gleiche Schicht in den Blöcken 2 und 3. Im Unterboden (Schicht 5) liegen die Gehalte in allen drei Blöcken bei 1 - 2 mg 100 g⁻¹ und damit in der GHK A.

In der Variante Grünland (G) liegen die Gehalte in Schicht 1 mit einem ZWB von 6 - 8,5 mg 100 g⁻¹ in den GHK C und D (Abbildung 188) und damit zwischen jenen der entsprechenden Schicht in den Varianten P und

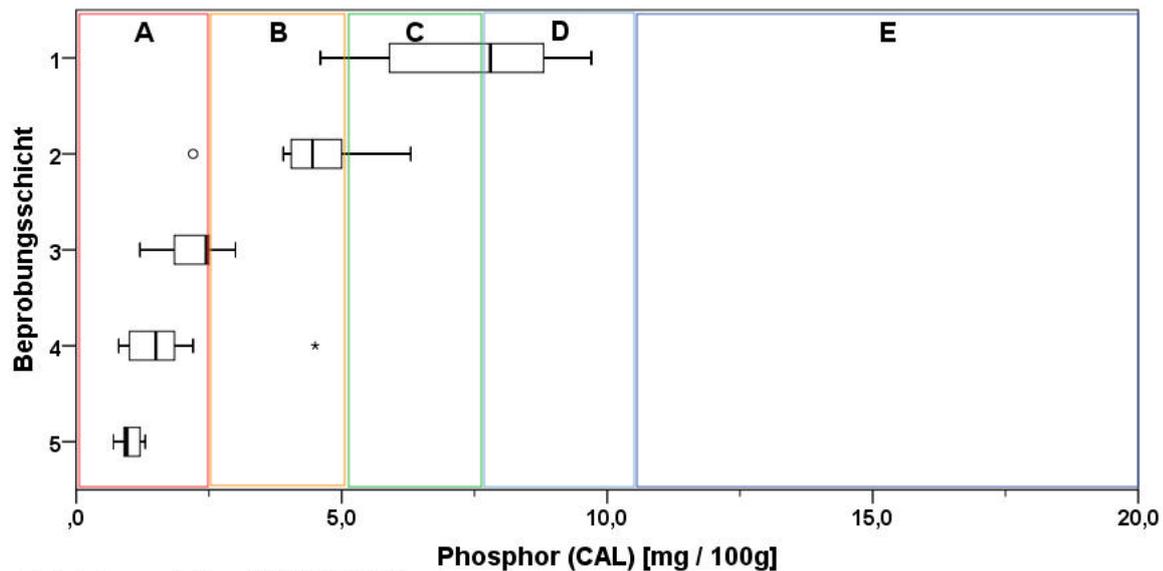
K. Bereits in Schicht 2 wird bei einem ZWB von 4 - 5 mg 100 g⁻¹ (GHK B) die ausbleibende mineralische Düngung im Vergleich zu den bewirtschafteten Parzellen erkennbar. In den Schichten 3 - 5 liegen die Gehalte durchgehend in der GHK A (ZWB 1 - 2,5 mg 100 g⁻¹).



Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007); Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112; Bodenart Lehm

n = 12 je Schicht und Block

Abbildung 187: P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau (4 Beprobungstermine)



Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 12 je Schicht

Abbildung 188: P(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau (4 Beprobungstermine)

Die Anteile des pflanzenverfügbaren Phosphors (CAL) am Gesamt-Phosphorvorrat für das Gesamtprofil von 9000 t Boden ha⁻¹ liegen im Frühjahr 2012 in den drei Blöcken zwischen 7 und 15 % (Abbildung 189). Diese Anteile sind dabei im straßennahen Block 1 in den Varianten P (11 - 15 %) und K (12 - 13 %) jeweils deutlich größer als in Block 2 (P: 7 - 10,5 %, K: 10,5 %). Im straßenfernen Block 3 weist insbesondere die Variante K bei Anteilen von 9 - 14,5 % sehr große Streuungen auf, in der Variante P liegen die Anteile mit 10 – 12 % zwischen jenen der anderen beiden Blöcke.

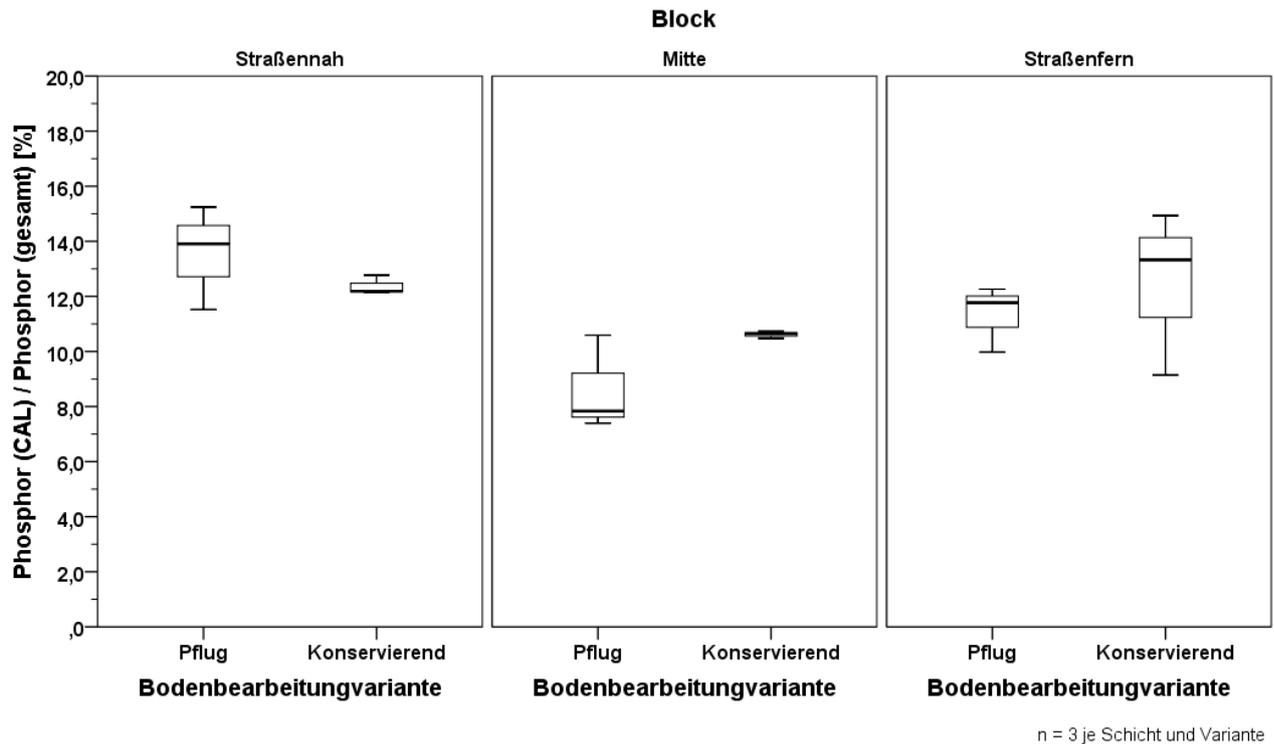


Abbildung 189: Anteile von P(CAL) an den Phosphor-Gesamtvorräten im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha) am Standort Methau im Frühjahr 2012

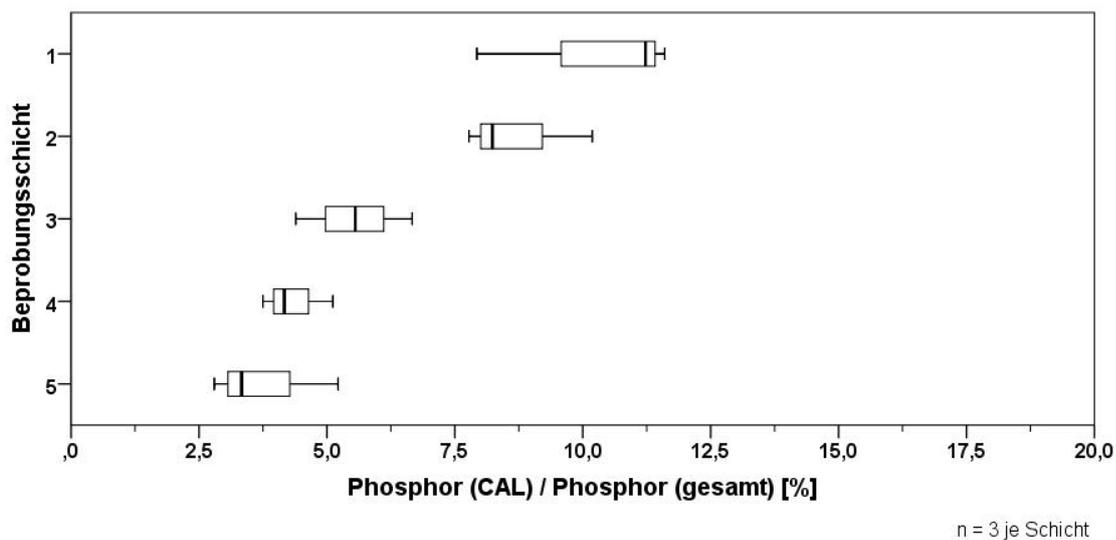


Abbildung 190: Anteile von P(CAL) an den Phosphor-Gesamtvorräten in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Frühjahr 2012

Schlüsselt man die Anteile nach den Beprobungsschichten auf, ergeben sich in der Variante Grünland (G) (Abbildung 190) in den beiden oberen Schichten Anteile von 7,5 - 11,5 %, wobei diese in Schicht 1 etwas größer sind als in Schicht 2. In den Schichten 3 - 5 gehen die Anteile auf 4 - 6,5 % (Schicht 3), 3,5 - 5 % (Schicht 4) sowie 2,5 - 5 % (Schicht 5) zurück.

In den bewirtschafteten Varianten liegen die Anteile aufgrund der mineralischen Düngung über jenen im Grünland. So wurden für die Variante Konservierend in allen drei Blöcken Anteile von ca. 14 - 20 % in den oberen beiden Schichten ermittelt (Abbildung 191). In den Blöcken 1 und 3 sind die Anteile in Schicht 3 mit 11 – 16 % nur geringfügig geringer als jene der oberen beiden Schichten. In Block 2 hingegen ist bei Anteilen von 9 – 13 % der Übergangscharakter der Schicht erkennbar. In Schicht 4 liegen die Anteile in Block 1 bei 10 – 12 %, in Block 2 bei 7,5 % und in Block 3 bei 6 - 13 %. In Schicht 5 sind die Anteile in dieser Variante in allen Blöcken am geringsten, bei Werten von ca. 7 - 8,5 % in Block 1, 6 % in Block 2 und 5 - 9 % in Block 3.

In der Variante Pflug (P) sind die Anteile recht homogen über die Krume (Schicht 1 - 4) verteilt. Sie liegen in Block 1 bei 11,5 - 18,5 %, in Block 2 bei 8,5 - 12 % und in Block 3 bei 11 - 17 %. Im Unterboden sind die Anteile in allen drei Blöcken geringer als in der jeweiligen Krume und etwa auf dem Niveau der Variante K im jeweiligen Block.

In allen drei Blöcken sind die pflanzenverfügbaren Anteile am Gesamtphosphor in den Schichten 1 und 2 in der Variante K deutlich größer als in der Variante P. In Schicht 3 sind diese Anteile in beiden Varianten in etwa gleich groß, in Schicht 4 sind sie in der Variante P in allen drei Blöcken größer als in der Variante K.

Im Vergleich zur Variante G sind die P (CAL)-Anteile am Gesamtphosphor in den bewirtschafteten Varianten in allen Schichten jeweils größer als in der entsprechenden Schicht im (nicht gedüngten) Grünland.

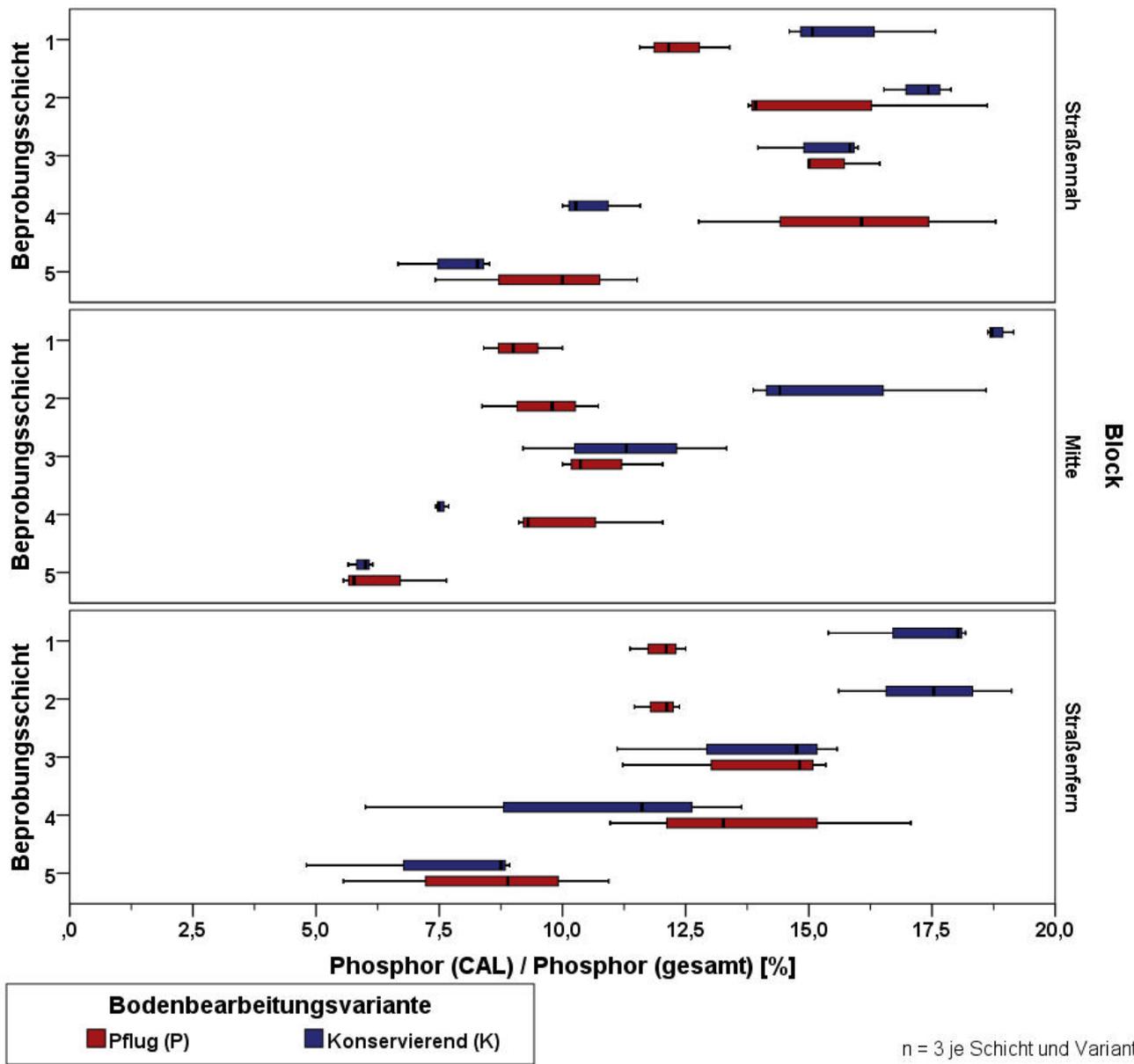


Abbildung 191: Anteile von P(CAL) an den Phosphor-Gesamtvorräten in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Frühjahr 2012

5.10 Kalium

Kalium ist einer der wichtigsten Makronährstoffe für Pflanzen im Boden und insbesondere für die Regulierung des Wasserhaushaltes in der Pflanze verantwortlich. Der höchste Kaliumbedarf der Pflanze besteht dabei während der vegetativen Phase zur Zeit des stärksten Massenwachstums. Wird der Bodenlösung durch die Pflanze Kalium entzogen, geht zunächst austauschbares Kalium in die Bodenlösung über, bevor bei weiterem Entzug auch das spezifische gebundene Kalium aus dem Zwischenschichtraum von Schichtsilikaten freigesetzt und damit pflanzenverfügbar wird.

Kalium ist in natürlichen Systemen geogenen Ursprungs und dabei vorwiegend in Feldspäten und Glimmern sowie in deren Verwitterungsprodukten (Tonminerale) gebunden. Unter tropischen Verwitterungsbedingungen bzw. in sehr alten oder intensiv genutzten Böden kommt es zu einer fortschreitenden K - Verarmung, der in der landwirtschaftlichen Praxis durch organische und/oder mineralische Dünger entgegengewirkt werden kann.

In Mineralböden liegt der überwiegende Anteil des Kaliums in Silikaten vor, ein geringer Teil ist in der mikrobiellen Biomasse sowie der Bodenlösung vorhanden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 290). Ein beträchtlicher Teil des Kaliums in landwirtschaftlich genutzten Böden zirkuliert permanent im System Boden - Pflanze, sodass Entzüge mit der Ernte durch entsprechende Düngung ausgeglichen werden müssen oder sich die Vorräte im Boden verringern.

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium wurden mit der Calcium-Acetat-Laktat (CAL)-Extraktion bestimmt, welche die Extraktionsleistung der Wurzeln nachahmt. Im Rahmen der Umsetzung der Düngeverordnung (LFULG 2007) wurden dabei im Freistaat Sachsen fünf Gehaltsklassen (A - E) mit den folgenden Grenzen definiert (für Ackerland mit Humusgehalte < 4 % und die Bodenart Lehm):

- A: < 5,9 mg K 100 g⁻¹
- B: 6,0 - 10,9 mg K 100 g⁻¹
- C: 11,0 - 16,9 mg K 100 g⁻¹
- D: 17,0 - 25,9 mg K 100 g⁻¹
- E: > 26,0 mg K 100 g⁻¹

Die Einordnung der K (CAL)-Gehalte in Gehaltsklassen im Rahmen dieses Berichtes erfolgt nach diesen Grenzwerten.

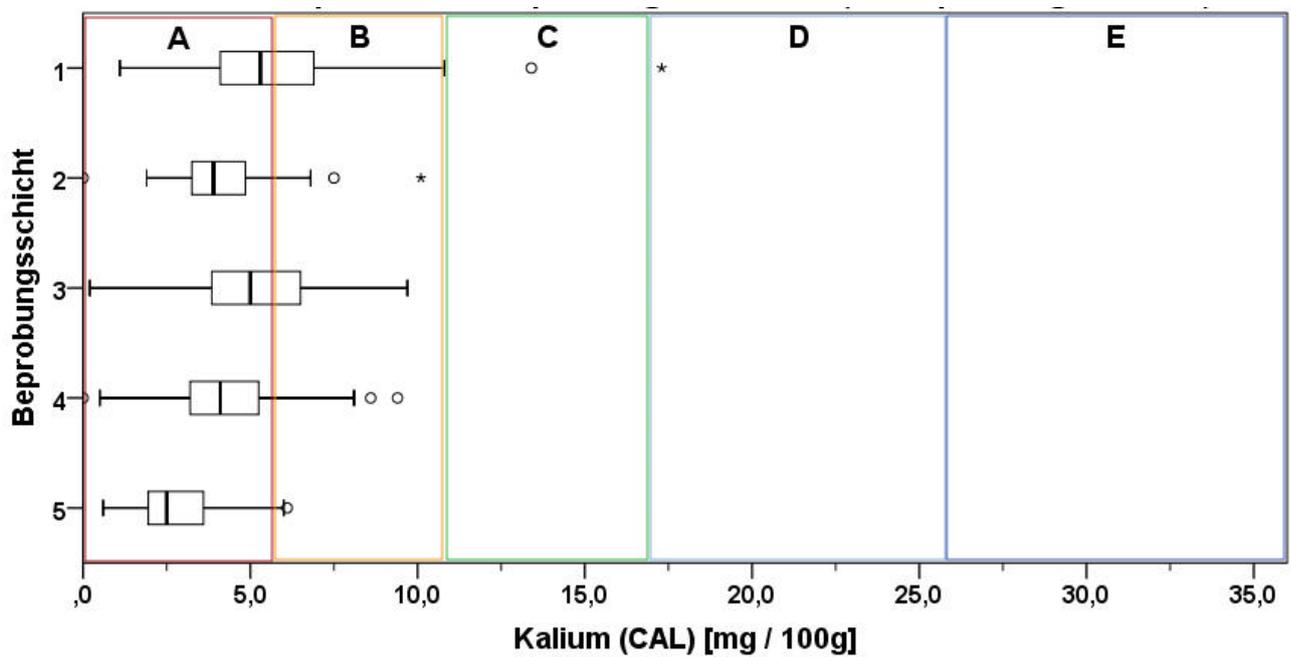
5.10.1 Lüttewitz

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium (CAL) sind sehr stark vom (zeitlichen) Zusammenhang zum letzten Bodenbearbeitungs- bzw. Düngungstermin sowie der Witterung zwischen diesen Terminen und dem jeweiligen Beprobungstermin abhängig. Die ausführlichen Daten zur Bodenbearbeitung und Düngung sowie zur Witterung können der Bewirtschaftungsübersicht bzw. dem Klimadiagramm im entsprechenden Abschnitt dieses Berichtes entnommen werden. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden hier alle Gaben von kaliumhaltigem Mineraldünger im Untersuchungszeitraum kurz aufgeführt:

- 17.03.2012: 14,0 kg K ha⁻¹ (NPKS)
- 28.03.2012: 15,1 kg K ha⁻¹ (NPKS)
- 08.06.2012: 7,2 kg K ha⁻¹ (NPKS)

- 13.04.2013: 12,5 kg K ha⁻¹ (NPKS)
- 04.05.2013: 14,7 kg K ha⁻¹ (NPKS)
- 24.09.2013: 103,3 kg K ha⁻¹ (Kornkali)
- 13.09.2014: 16,7 kg K ha⁻¹ (NPKS)
- 09.03.2015: 75 kg K ha⁻¹ (PK)

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium (CAL) in der Variante Pflug (P) liegen mit Werten zwischen 0 und 11 mg 100 g⁻¹ in allen fünf Beprobungsschichten und zu allen Terminen in den Gehaltsklassen A und B (Abbildung 192). Die Streuung der Werte innerhalb der Schichten ist dabei, je nach Zeitpunkt der letzten Düngung und Bodenbearbeitung, sehr hoch. Die Unterschiede zwischen den Schichten sind gering, wobei die Schichten 5 und 2 tendenziell die geringsten Gehalte aufweisen, welche fast durchgängig in der Gehaltsklasse A liegen.

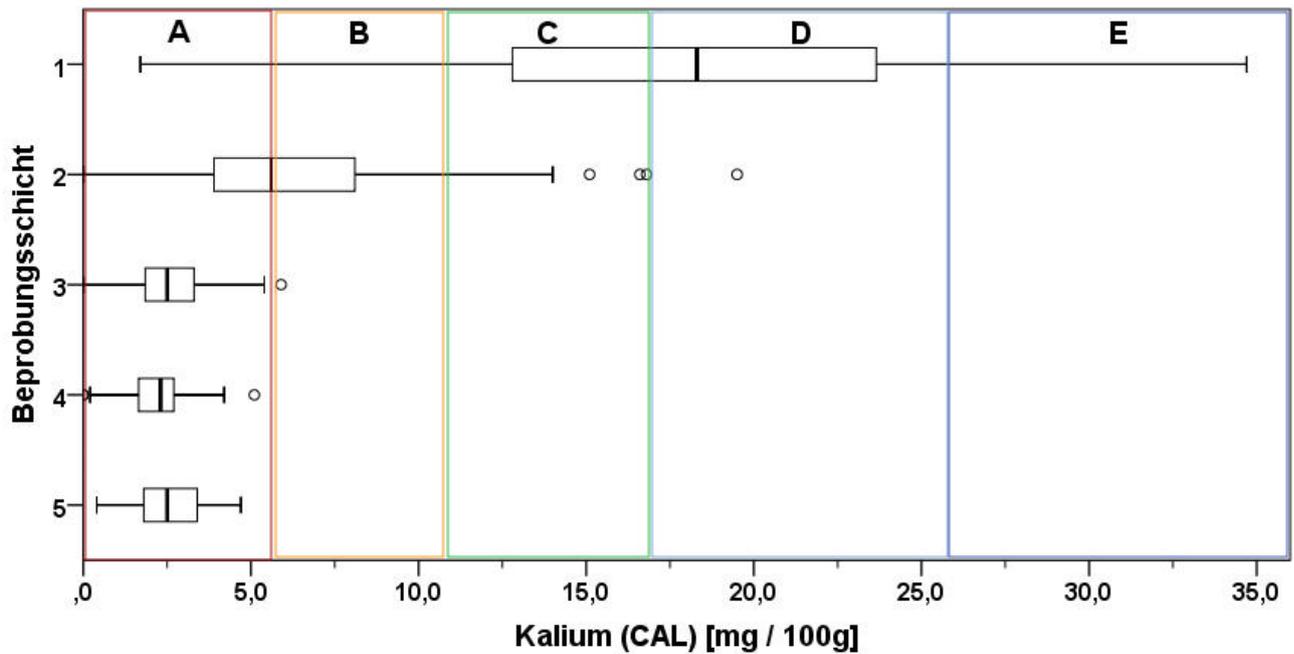


Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 59 je Schicht

Abbildung 192: K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Pflug am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine)

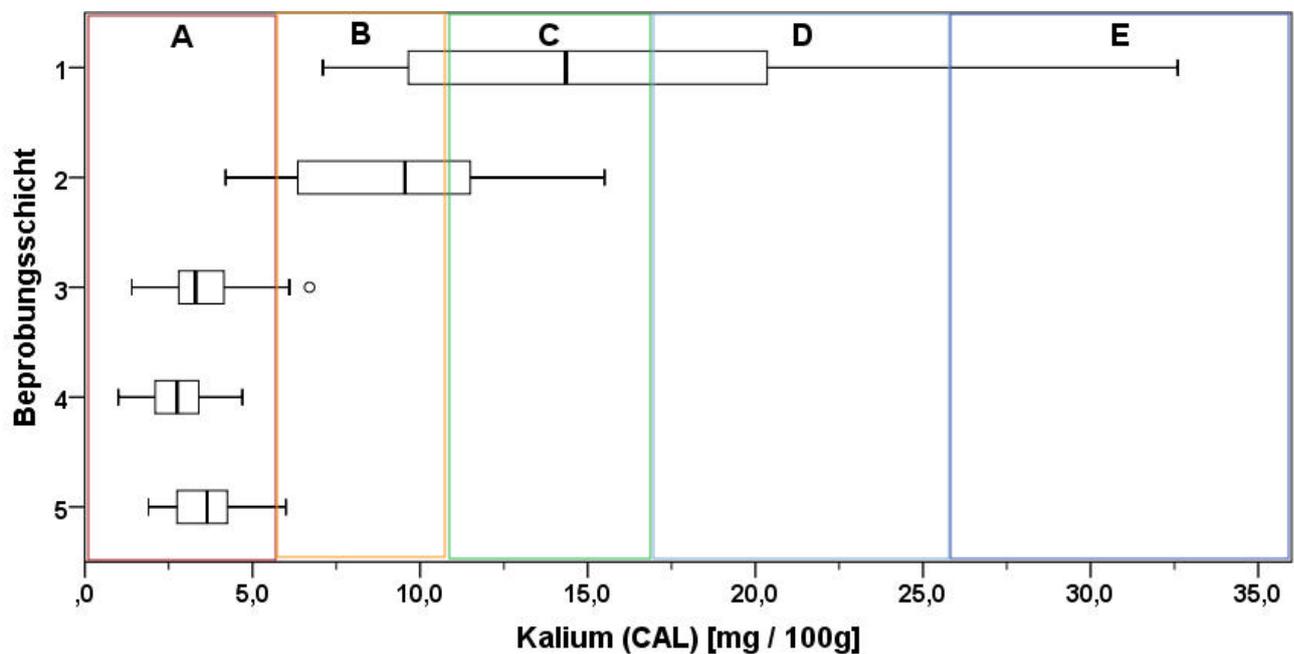
Die Abhängigkeit der pflanzenverfügbaren Kaliumgehalte (CAL) von der Bodenbearbeitung und der Düngung kommt noch stärker in der Variante Direktsaat (D) zum Ausdruck (Abbildung 193), bei welcher keine Durchmischung des Bodens stattfindet. In Schicht 1, auf welcher die Düngergabe erfolgt, werden Werte zwischen 2 (GHK A) und 35 mg 100g⁻¹ (GHK E) erreicht. Der Zentralwertebereich befindet sich dabei zwischen ca. 13 und 23 mg 100g⁻¹ und damit in den GHK C und D. Auch Schicht 2 weist eine hohe Streuung zwischen 0 und ca. 15 mg 100g⁻¹ auf, wobei der Zentralwertebereich zwischen 4 und 8 mg 100g⁻¹ liegt und damit auf der Grenze zwischen den GHK A und B. Die Schichten 3 - 5 weisen geringe K (CAL)-Gehalte (0 - 5 mg 100g⁻¹) mit geringer Streuung auf, welche ausschließlich in der GHK A liegen.



Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngerverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 60 je Schicht

Abbildung 193: K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Direkt-saat am Standort Lüttewitz (12 Beprobungstermine)

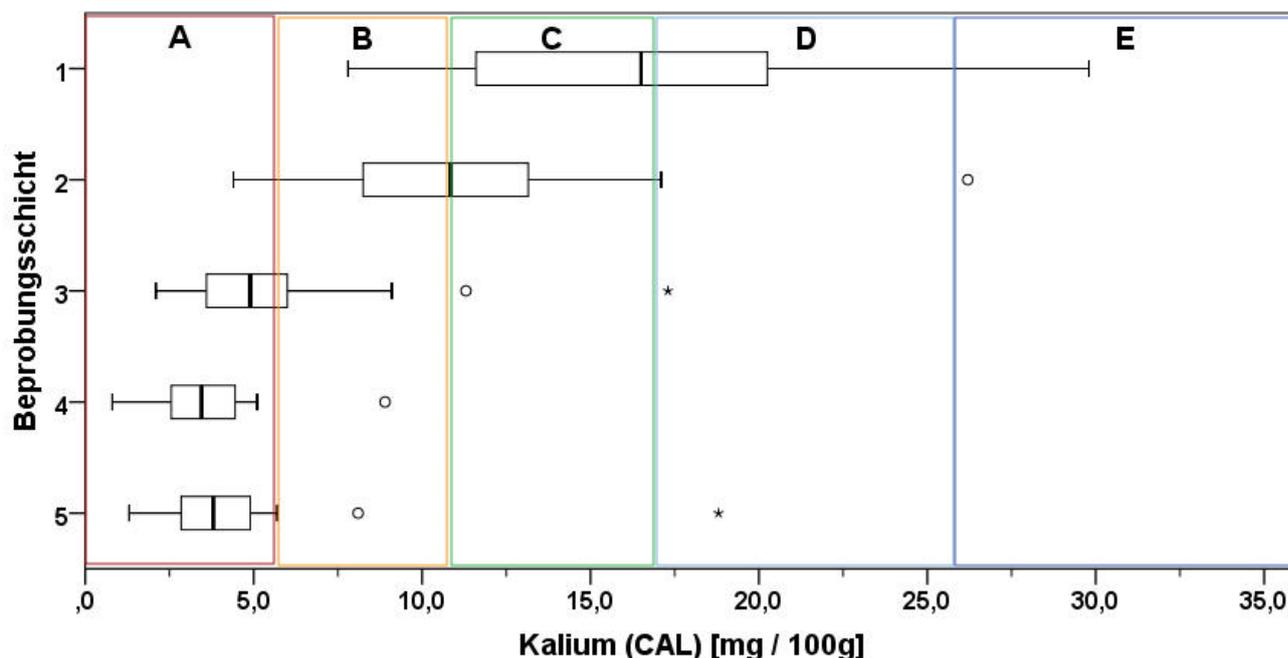


Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngerverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 36 je Schicht

Abbildung 194: K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine)

Die pflanzenverfügbaren Kaliumgehalte (CAL) der einzelnen Schichten in den Varianten K (Abbildung 194) und KL (Abbildung 195) ist jenen der Varianten D sehr ähnlich, wobei zu beachten ist, dass hierbei nur Werte aus den vier Basisbeprobungsterminen (n = 36) einfließen, wohingegen in den Statistiken zu den Varianten P und D ebenfalls die Werte aus den Beprobungen zum Umbruchversuch (n = 59 bzw. 60) berücksichtigt wurden.



Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 36 je Schicht

Abbildung 195: K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Konservierend Locker am Standort Lüttewitz (4 Beprobungstermine)

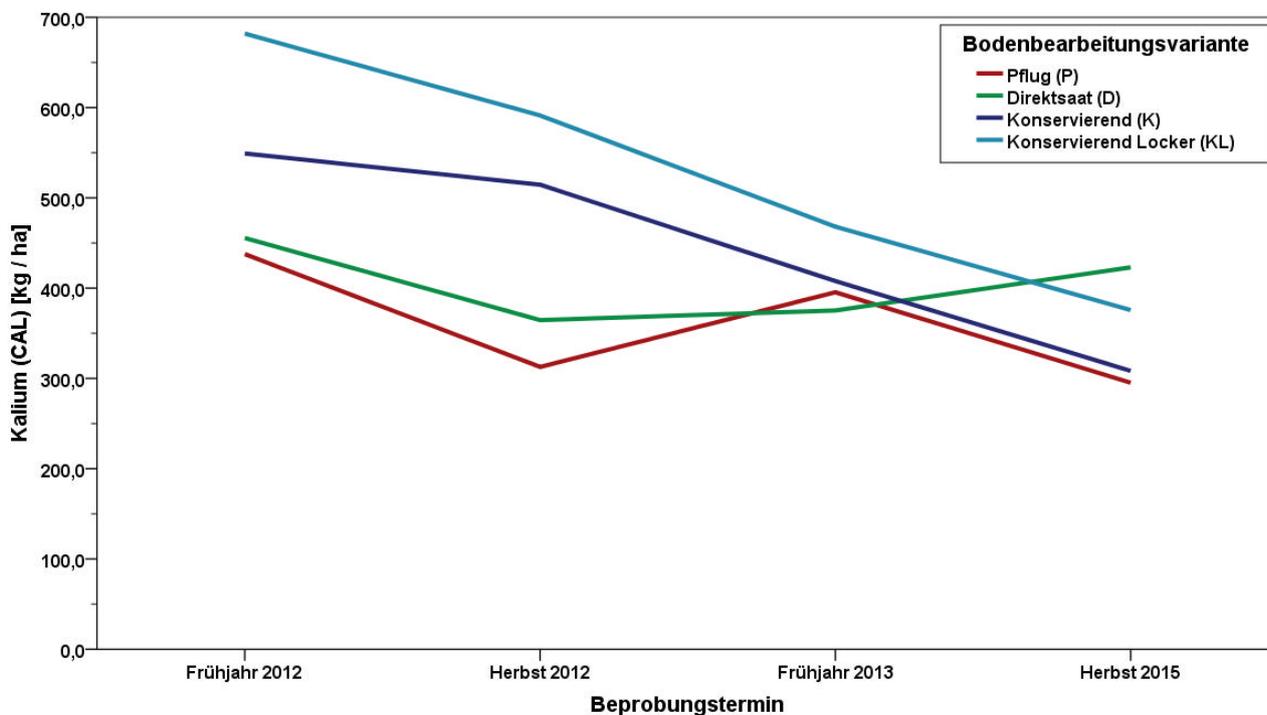
5.10.1.1 Basisbeprobungen

Aus den obigen K(CAL)-Gehalten wurden für die vier Basisbeprobungstermine die jeweiligen K(CAL)-Vorräte für das Gesamtprofil (9000 t Boden ha⁻¹) berechnet (Abbildung 196). Dabei ergeben sich erhebliche Unterschiede zwischen den Varianten sowie eine starke zeitliche Dynamik der Vorräte.

Während für das Frühjahr 2012 für die Varianten P und D mit ca. 450 kg ha⁻¹ annähernd gleich große Vorräte ermittelt wurden, lagen diese in den Varianten K mit ca. 550 kg ha⁻¹ und KL mit fast 700 kg ha⁻¹ deutlich darüber. Im Verlauf der Vegetationsperiode des Jahres 2012 sinken die Vorräte in allen Varianten, wobei die Unterschiede zwischen den Varianten etwa gleich bleiben. Im Frühjahr 2013 hingegen liegen die Varianten deutlich enger beieinander und weisen Vorräte von 400 - 450 kg ha⁻¹ auf. Dies bedeutet eine Abnahme in den Varianten K und KL im Vergleich zum Termin im Herbst 2012 und eine Zunahme für die Varianten P und D.

Nach einer längeren Phase von ca. 30 Monaten, die im Rahmen des Umbruchversuches näher untersucht wurde, liegen die Kaliumvorräte im Herbst 2015 zwischen 300 (P, K) und 450 kg (D) ha⁻¹. Die starken Unterschiede zwischen den Varianten sind aufgrund der für alle Varianten gleichen Aufwandmengen an Mineraldüngern zunächst verwunderlich. Sie könnten ihre Ursache in unterschiedlich hohen Ernteentzügen und/oder unterschiedlichen Verlusten als Folge von Erosionsprozessen haben. Die Berechnung der Kalium-Ernteentzüge für den Zeitraum 2011-2015 auf Basis der Erntedaten und KTBL-Standardwerten (DÖHLER

2009) für das Hauptprodukt ergab zwar etwas höhere Werte für die Varianten P (508 kg ha⁻¹) und K (489 kg ha⁻¹) als für die Varianten D (466 kg ha⁻¹) und KL (454 kg ha⁻¹), diese Unterschiede von max. 54 kg ha⁻¹ können aber weder die genannten Unterschiede in den Vorräten von bis zu 250 kg ha⁻¹ noch deren zeitliche Schwankungen erklären. Betrachtet man nur die beiden Zuckerrübenjahre 2011 und 2014, liegen die K-Entzüge auf Basis von Daten der Südzucker etwa bei der Hälfte der Entzüge, die mit den KTBL-Standardwerten ermittelt wurden. Die starken Unterschiede zwischen den Varianten sind bei dieser Berechnungsgrundlage allerdings noch weniger aus der Bewirtschaftung zu erklären.



n = 9 je Termin und Variante

Abbildung 196: Mittlere K(CAL)-Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz

Anhand der Mischproben aus der Basisbeprobung im Frühjahr 2012 wurden im Rahmen einer Diplomarbeit (WANG 2012) die Gesamtgehalte bzw. -vorräte an Kalium mittels Königswasseraufschluss ermittelt. Auf dieser Arbeit aufbauend werden hier zunächst die Gesamtgehalte aus der Frühjahr 2012 dargestellt (Abbildung 197).

Im Variantenvergleich sind die Kaliumvorräte in der Variante Direktsaat mit 16,2 t ha⁻¹ am geringsten, gefolgt von den Varianten Pflug (17,6 t ha⁻¹) und Konservierend (17,8 t ha⁻¹). Die Variante Konservierend Locker weist mit 19,9 t ha⁻¹ die größten Gesamtgehalte auf sowie auch in allen fünf Schichten die jeweils größten Vorräte auf. Mehr als die Hälfte der Differenzen zwischen den Varianten wird dabei jeweils durch den Unterboden (Schicht 5) verursacht, welcher aufgrund seiner Masse bzw. Mächtigkeit allein jeweils mehr als 50 % des gesamten Kaliums im beprobten Bodenpaket (9000 t ha⁻¹) enthält.

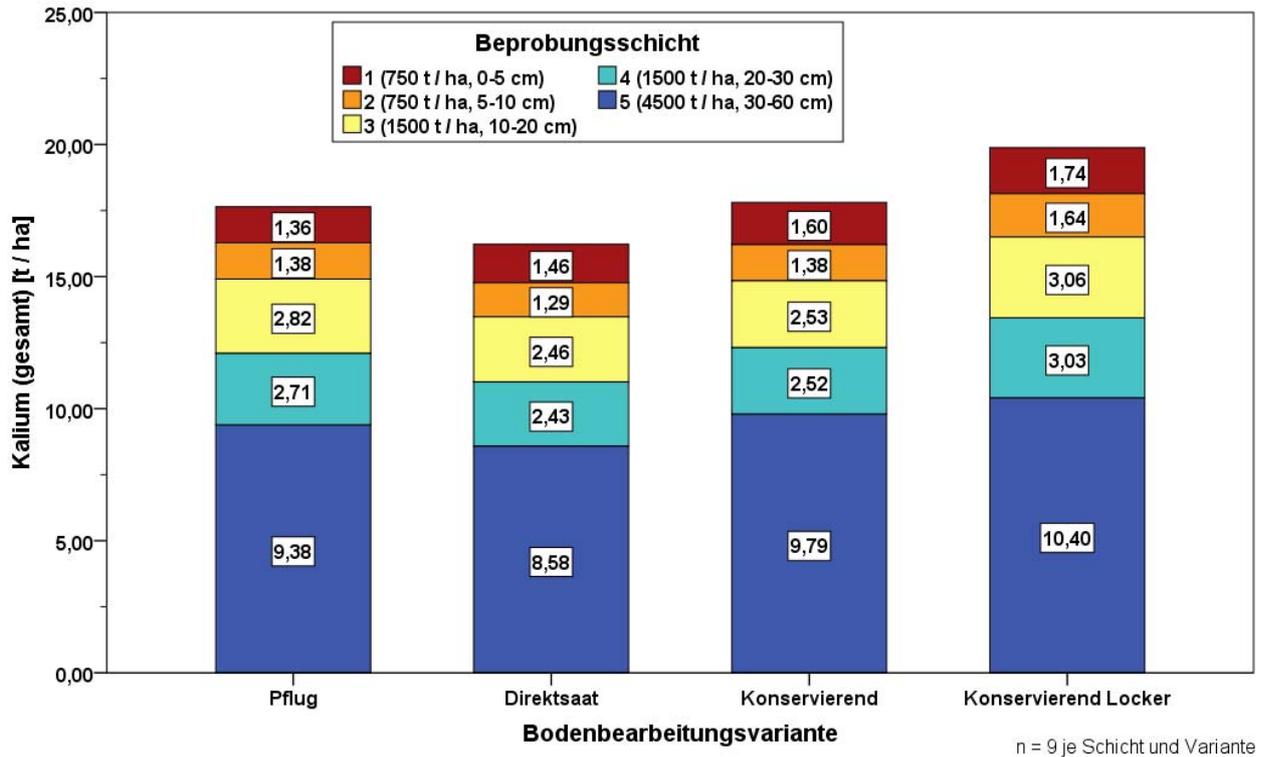


Abbildung 197: Mittlere Kalium-Gesamtvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012

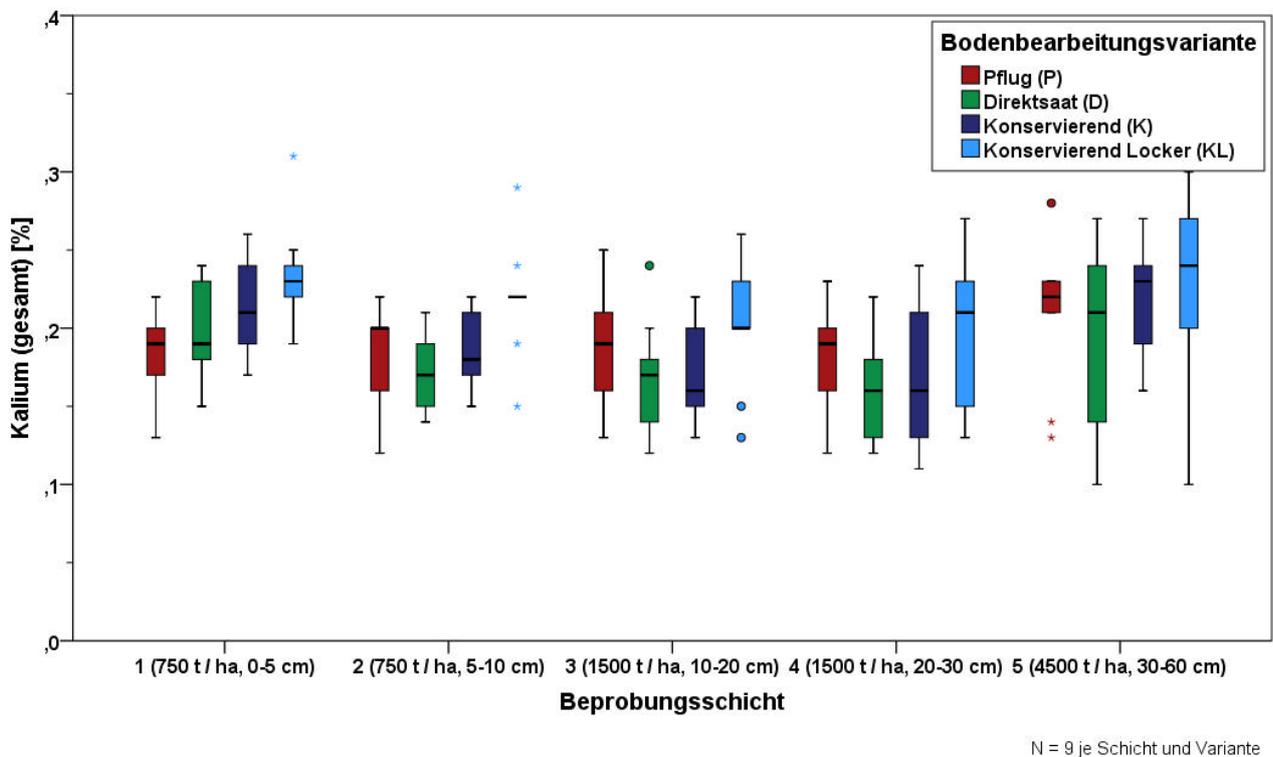


Abbildung 198: Kalium-Gesamtgehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012

Die K_f -Gehalte in den fünf Beprobungsschichten liegen dabei insgesamt zwischen 0,1 und 0,3 % (Abbildung 198), wobei ein Großteil der Werte in den Bereich zwischen 0,15 und 0,25 % fällt. Es wird deutlich, dass die Kaliumgehalte in den Schichten 4 und 5 deutlich größere Streuungen aufweisen als in den oberen Schichten. Dies gilt für die Variante Konservierend Locker ebenfalls für die Schichten 2 und 3. Aufgrund dieser sehr starken Streuungen, welche gerade in jenen Schichten und Varianten auftreten, die die größten Unterschiede in den Gesamtinventuren bedingen, sollten diese Unterschiede nur mit Vorsicht verallgemeinert werden. Aufgrund der Heterogenität der Untersuchungsfläche wäre vermutlich ein größeres Probenkollektiv notwendig, um belastbare Ergebnisse zu erzielen.

Während die pflanzenverfügbaren Kaliumgehalte insbesondere in den oberen Schichten über die Zeit stark variieren, wurden die Anteile des pflanzenverfügbaren Kaliums an den Kaliumgesamtinventuren für das Frühjahr 2012 errechnet (Abbildung 199). In Bezug auf die für das Gesamtprofil errechneten K_f -Massen lassen sich nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten feststellen, wobei die pflanzenverfügbaren Anteile eine zunehmende Tendenz in der Variantenreihenfolge $P < D < K < KL$ zeigen.

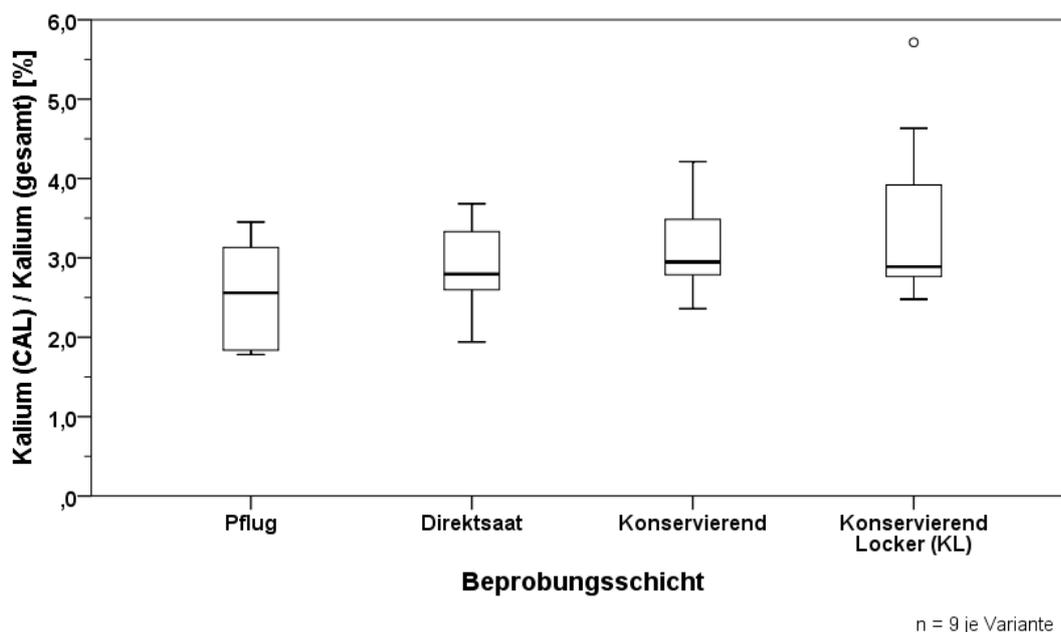
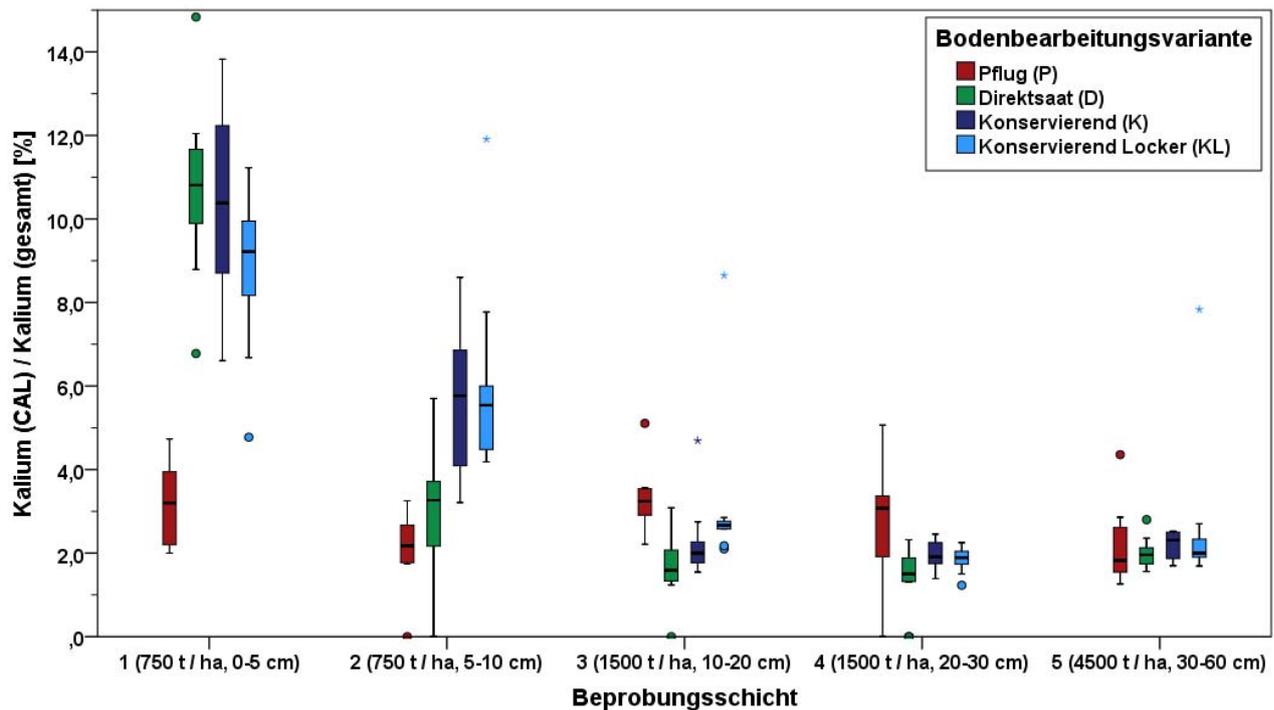


Abbildung 199: Anteile von K(CAL) an den Gesamtkaliumvorräten im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012

Schlüsselt man diese Anteile nach den einzelnen Beprobungsschichten auf, lassen sich allerdings, wie aus den Ergebnissen zu den pflanzenverfügbaren Anteilen schon erkennbar ist, deutlichere Unterschiede zwischen den Varianten feststellen (Abbildung 200).

Trotz der bereits dargelegten großen Streuungen in den Varianten D, K und KL in der obersten Schicht liegen die pflanzenverfügbaren Anteile mit ca. 8 - 12 % deutlich über jenen der Pflugvariante (ca. 2 - 4 %). In Schicht 2 nähern sich die Anteile einander an, wobei sie insbesondere in den Varianten K und KL mit 4 - 7 % aber ebenfalls über jenen der Variante P liegen. Die Schichten 3, 4 und 5 zeigen mit Anteilen zwischen 1,5 und 3 % (Variante P bis ca. 4 %) in allen Varianten ein relativ homogenes Bild, wobei die Variante P insbesondere in Schicht 4 eine erheblich größere Streuung aufweist als die anderen Varianten. Dies hängt höchst-

wahrscheinlich damit zusammen, dass diese Schicht in der Bearbeitungsvariante Pflug normalerweise die untere Grenze der Bodenbearbeitung darstellt.



N = 9 je Schicht und Variante

Abbildung 200: Anteile von K(CAL) an den Gesamtkaliumvorräten im 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten, am Standort Lüttenwitz im Frühjahr 2012

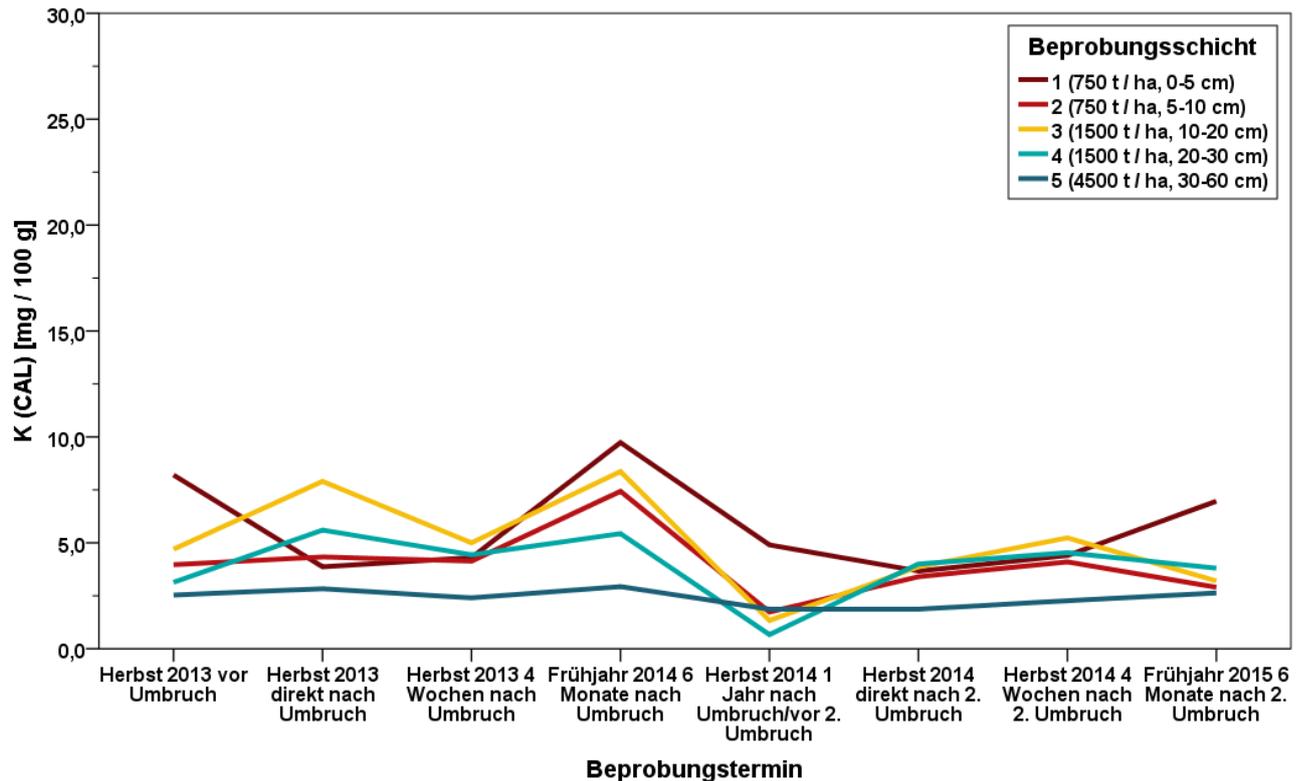
5.10.1.2 Umbruchversuch

Im Rahmen des Umbruchversuches sind für die Variante Pflug (Abbildung 201) zunächst relativ homogene K (CAL)-Gehalte in der Krume erkennbar, lediglich in den obersten Zentimetern des Bodens (Schicht 1) wurde ein erheblich höherer K(CAL)-Gehalt ermittelt. Dieses ist vermutlich ein Effekt der Düngung, durch welche unmittelbar vor der Beprobung ca. 103 kg K ha^{-1} in Form von Kornkali ausgebracht wurden.

Durch den Umbruch nach dem ersten Beprobungstermin wird das ansatzweise stratifizierte Bild, welches sich im Verlauf des Jahres 2013 entwickelt hat, umgekehrt bzw. homogenisiert. Als Resultat dessen weisen die Schichten 1 bis 4 einen Monat nach dem Umbruch annähernd gleiche K (CAL)-Gehalte von ca. $5 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ auf.

Zum Frühjahr 2014 steigen die K (CAL)-Gehalte in diesen vier Schichten, dabei insbesondere in den Schichten 1 - 3, deutlich an. Es handelt sich vermutlich um einen Effekt der Mineralisierung organischer Substanz über den Winter sowie um eine Langzeitwirkung des am 24.09.2013 ausgebrachten Kaliumdüngers (Kornkali). Im Verlauf des Jahres 2014 sind die Gehalte in den Schichten 2 - 4 auf ca. $2 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ gesunken, da das pflanzenverfügbare Kalium vom Pflanzenbestand (Zuckerrübe) zu einem großen Teil aufgenommen wurde. Schicht 1 weist vor dem Umbruch im Herbst 2014 höhere K (CAL)-Gehalte von ca. $5 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ auf, was vermutlich auf die Düngung von weiteren $16,7 \text{ kg K ha}^{-1}$ (als NPKS) am 13.09.2014 zurückzuführen ist. Ähnliches gilt für das Frühjahr 2015, in welchem die K (CAL)-Gehalte der Schichten 2 - 5 bei ca. $3 - 4 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ liegen.

Schicht 1 weist aufgrund der Düngung von 74 kg Kalium ha⁻¹ am 09.03.2015 (ca. 5 Wochen vor der Probenahme) höhere K (CAL)-Gehalte von 7 mg 100g⁻¹ auf.



n = 3 je Schicht und Termin

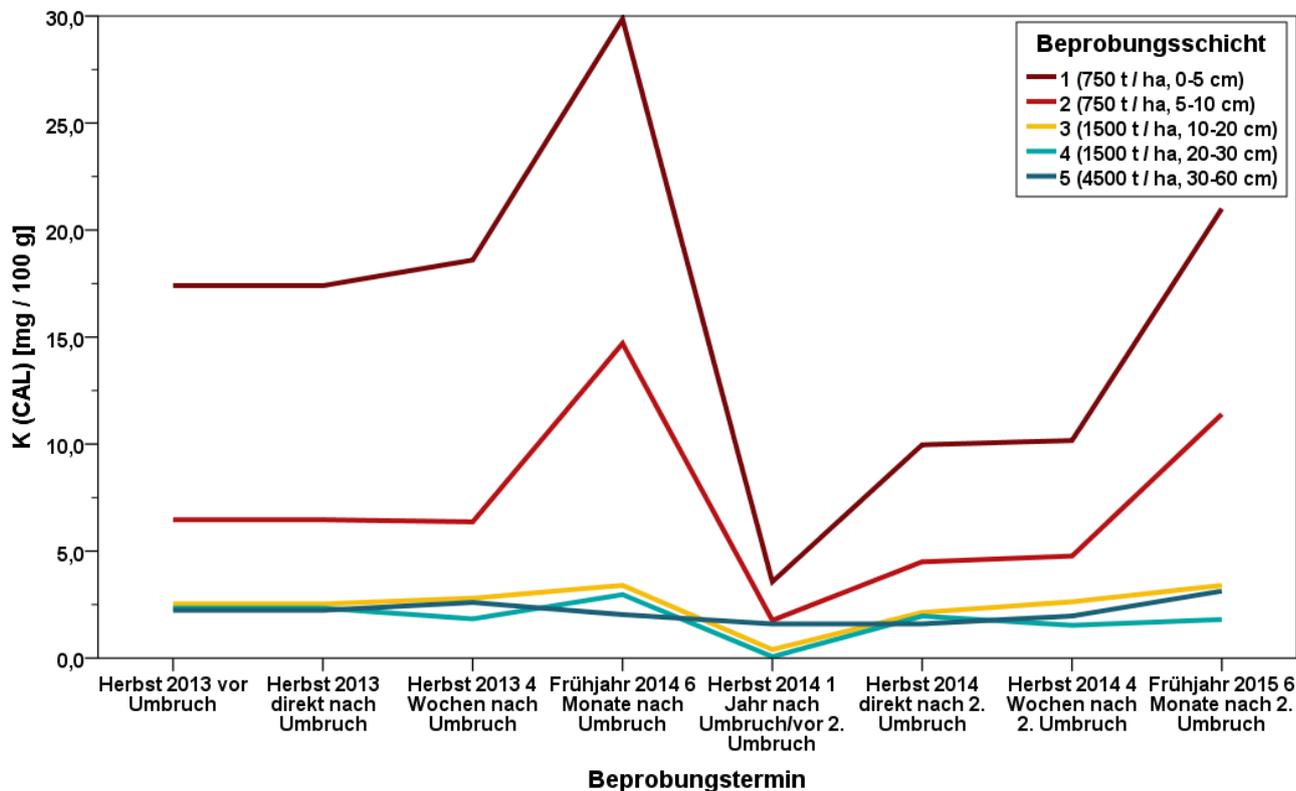
Abbildung 201: K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Pflug (PU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Die pflanzenverfügbaren Kaliumgehalte in der Variante Direktsaat (D) zeigen eine ähnliche Dynamik über die Beprobungstermine (Abbildung 202) wie in der Pflugvariante. Allerdings treten in den Schichten 3 - 5 kaum Schwankungen auf, diese weisen fast konstant K (CAL)-Gehalte zwischen 2 und 3 mg 100g⁻¹ auf. Eine Ausnahme bildet der Herbst 2014, in welchem durch den starken Kaliumentzug durch die Zuckerrübe die Gehalte auf ein Minimum reduziert wurden.

Die Schichten 1 und 2 zeigen hingegen starke Schwankungen, die ein Ergebnis der schon aufgeführten Düngergaben sowie der fehlenden Einarbeitung durch die Bodenbearbeitung sind. Besonders markant sind hierbei der Anstieg der K (CAL)-Gehalte zum Frühjahr 2014 als Mineralisierungs- und Düngungseffekt (s. o.), die starke Abnahme über die Vegetationsperiode des Jahres 2014 (Pflanzenentzug durch die Zuckerrübe) sowie der Anstieg zum Frühjahr 2015 (erneuter Mineralisierungs- und Düngungseffekt).

Zudem wird die Zuckerrübenernte im Herbst 2014 mit ihrer hohen (mechanischen) Eingriffsintensität durch einen Sprung in den K (CAL)-Gehalten vom ersten zum zweiten Termin im Herbst 2014 abgebildet. Unklar bleibt dabei, warum die Gehalte in den Schichten 1 - 4 durchweg zunehmen, obwohl im Sinne einer Homogenisierung eher eine Angleichung der Gehalte zu erwarten wäre. Möglicherweise stammt das zusätzlich gemessene Kalium aus dem Unterboden (Schicht 5), für welchen zum Termin vor der Ernte aufgrund des dichten Pflanzenbestandes keine Proben genommen werden konnten. Es könnte sich auch um beprobungsbedingten Fehler handeln, welcher durch die besondere Beprobungssituation vor der Ernte (Beprobung zwischen den Rübenkörpern) im Vergleich zum Nacherntetermin (kein Pflanzenbestand) ausgelöst wurde. Auch für die Pflugvariante wurde ein Anstieg der K (CAL)-Gehalte in den Schichten 2 - 4 zum Nacherntetermin im

Herbst 2014 ermittelt, dieser wurde aber zumindest zu einem gewissen Teil durch einen Rückgang des Kaliumgehaltes in Schicht 1 ausgeglichen. Gleichwohl bleibt hier, wie auch in der Variante DP (Abbildung 203) die Frage, ob es sich um einen (methodischen) Fehler oder eine Nachlieferung von Kalium aus dem Unterboden handelt.

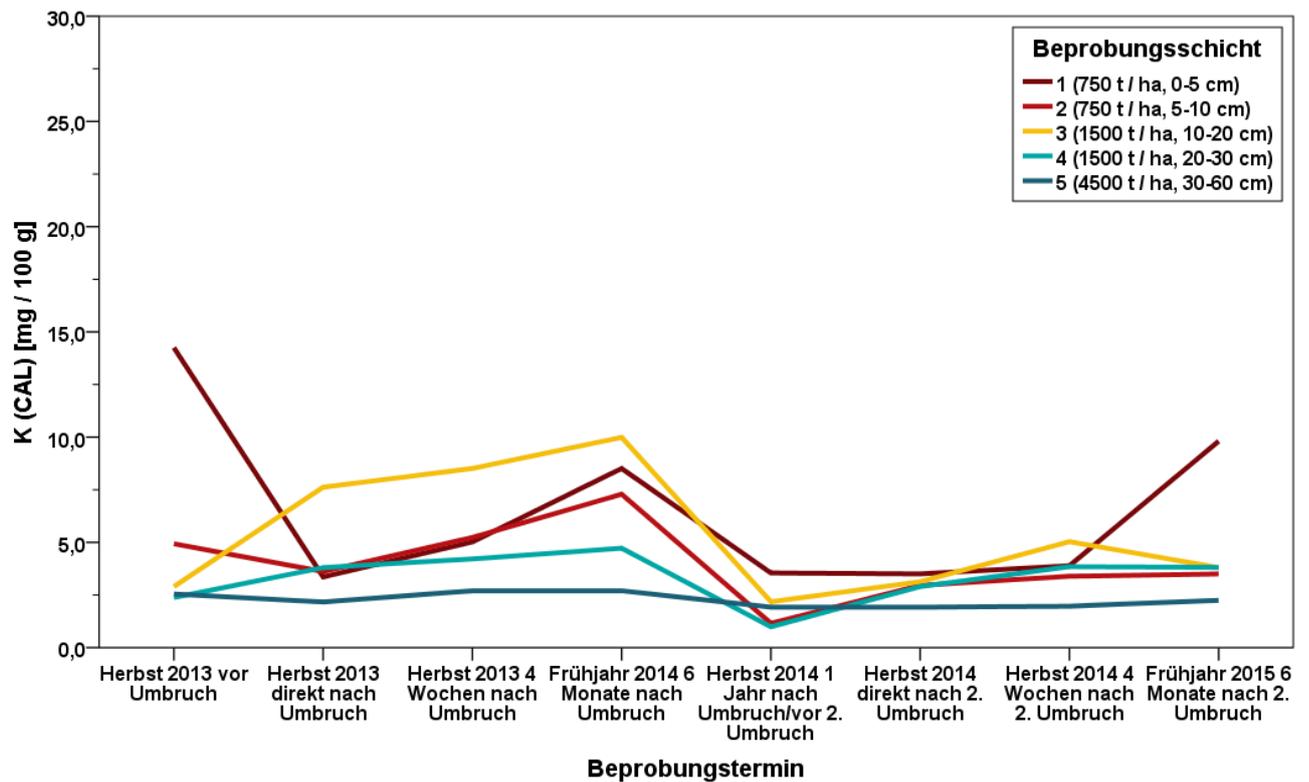


n = 3 je Schicht und Termin

Abbildung 202: K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat (DU) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

In der Variante Direktsaat gepflügt (DP) (Abbildung 203) werden die zunächst stratifizierten pflanzenverfügbaren Kaliumgehalte (CAL) durch den Umbruch homogenisiert, sodass Schicht 3 mit 8 - 10 mg 100g⁻¹ bis zum Frühjahr 2014 die höchsten K (CAL)-Gehalte aufweist. Aufgrund des Pflanzenentzuges durch die Zuckerrübe im Jahr 2014 sinken die Gehalte in allen Schichten zum Herbst deutlich ab, steigen in den Wochen nach der Ernte insbesondere in Schicht 3 aber wieder deutlich an. Es könnte sich hierbei um einen langfristigen Effekt der Nachlieferung von pflanzenverfügbarem Kalium aus der organischen Substanz handeln, da Schicht 3 große Teile der humusreichen ehemaligen obersten Bodenschicht (vor Umbruch im Herbst 2013) enthält. Weitere mögliche Ursachen wurden bereits weiter oben diskutiert. Der Anstieg des K (CAL)-Gehaltes in Schicht 1 zum Frühjahr 2015 kann, wie in den anderen Varianten, auf die Düngung am 09.03.2015 zurückgeführt werden.

Vergleicht man die Gesamtmassen an pflanzenverfügbarem Kalium (CAL) zwischen den Varianten ergeben sich im Rahmen des Umbruchversuches keine großen Unterschiede zwischen diesen (Abbildung 204), allerdings eine starke zeitliche Dynamik im Verlauf des Versuches. So liegen die K (CAL)-Massen im Herbst 2013 bei ca. 300 - 400 kg ha⁻¹ je Variante und steigen zum Frühjahr 2014 auf ca. 500 kg ha⁻¹ an. Der bereits bei der Darstellung der K (CAL)-Gehalte beschriebene Rückgang der Kaliumvorräte zum Herbst 2014 reduziert diese auf ca. 150 kg ha⁻¹.



n = 9 je Schicht und Termin

Abbildung 203: K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Beprobungsterminen, in der Variante Direktsaat gepflügt (DP) am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

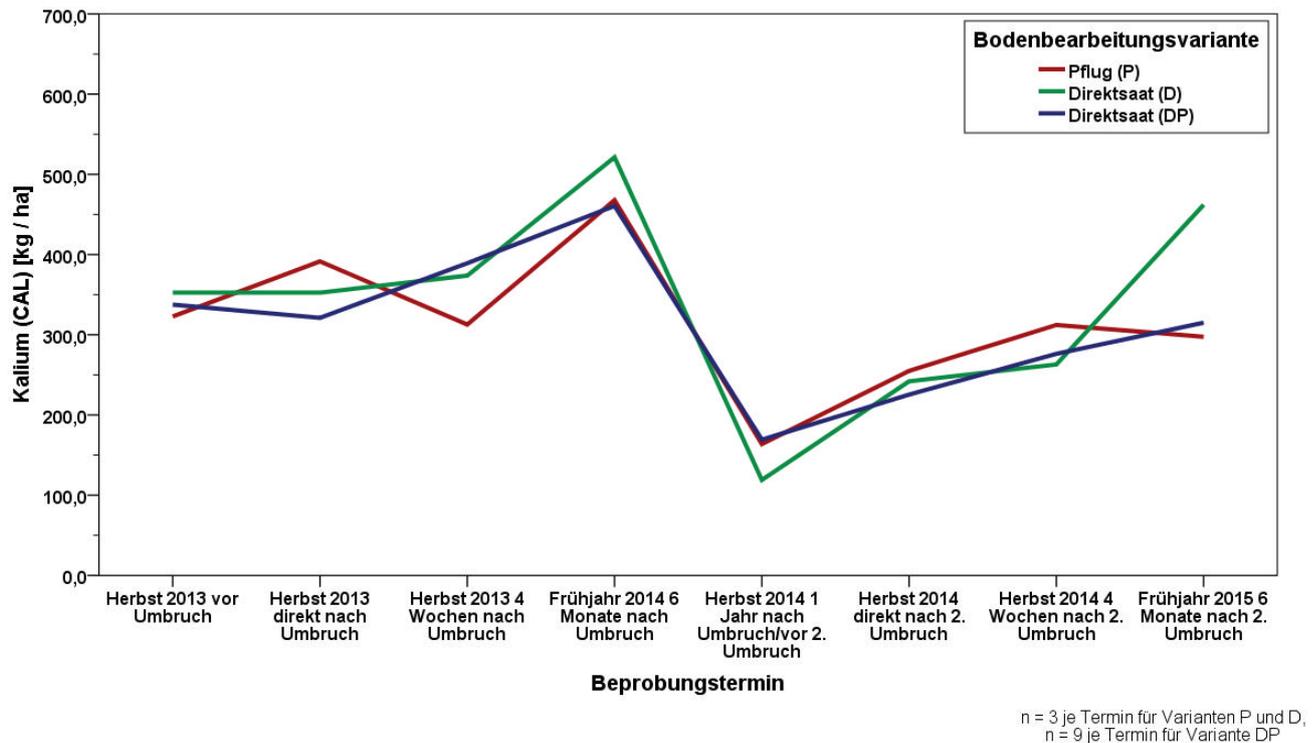


Abbildung 204: K(CAL)-Vorräte im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Beprobungsterminen, am Standort Lüttewitz im Rahmen des Umbruchversuches

Dieser Rückgang um ca. 300 - 400 kg ha⁻¹ muss ins Verhältnis gesetzt werden zu den K-Entzügen mit der Ernte, welche einerseits auf Grundlage der Qualitätsuntersuchung der Südzucker AG, andererseits auf der Basis von Standardwerten des KTBL (DÖHLER 2009) berechnet wurden:

Der auf Basis der Qualitätsuntersuchung (mittlerer Kalium-Gehalt der Rüben je Variante) errechnete K-Entzug mit der Ernte liegt bei 102 kg ha⁻¹ (Variante P) bzw. 106 kg ha⁻¹ (Variante D bzw. DP) und beträgt daher nur ca. ein Drittel bis ein Viertel des ermittelten Rückgangs der K-Massen im Boden.

Rechnet man mit üblichen Standardwerten (DÖHLER 2009: 213), ergibt sich für das Hauptprodukt ein Entzug von 212 kg ha⁻¹ (Variante P) bzw. 183 kg ha⁻¹ (Variante D), für Haupt- und Nebenprodukt ein Entzug von 567 kg ha⁻¹ (Variante P) bzw. 487 kg ha⁻¹ (Variante D). Dabei wird von einem K-Gehalt im Hauptprodukt von 0,21 kg dt⁻¹ und im Haupt- und Nebenprodukt von 0,56 kg dt⁻¹ ausgegangen. Den je nach Variante unterschiedlichen K-Gehalten wird dabei keine Rechnung getragen. Der im Rahmen dieser Untersuchung ermittelte K-Entzug liegt dabei zwischen den auf der Basis von Standardwerten ermittelten Entzügen für das Hauptprodukt und für das Haupt- und Nebenprodukt.

Wendet man allerdings das (Massen)Verhältnis von ca. 1:3 (Hauptprodukt: Haupt- und Nebenprodukt) auf die auf der Qualitätsuntersuchung basierenden Werte (s.o.) an, so ergibt sich ein K-Entzug durch Rübenkörper und -blätter bzw. -wurzeln von 306 kg ha⁻¹ (Variante P) und 318 kg ha⁻¹ (Variante D). Diese Zahlen liegen in der Größenordnung der ermittelten Abnahmen der K-Massen im Boden. Das in der Blattmassen und den Wurzeln gespeicherte Kalium verbleibt dabei auf dem Feld und fließt über den organischen Umsatz der Erntereste wieder in den Bodennährstoffspeicher zurück.

Nach der Ernte bzw. dem Umbruch steigen die Kaliummassen wieder an und erreichen zum Frühjahr 2015 Werte von ca. 300 kg ha⁻¹ in den Varianten P und DP. Dieser Termin stellt insofern eine Besonderheit dar, als sich die Werte der Variante D mit ca. 450 kg ha⁻¹ deutlich von jenen der anderen Varianten unterscheiden.

5.10.2 Methau

Die im Rahmen der Diplomarbeit von WANG (2012) durchgeführten Messungen des Gesamtvorrates an Kalium (Abbildung 205) ergaben für die Varianten Pflug und Konservierend am Standort Methau K-Gesamtmassen zwischen 19,1 und 24,3 t ha⁻¹. Dabei sind die Gesamtvorräte in allen drei Blöcken jeweils in der Pflugvariante um 1 - 3 t ha⁻¹ größer als in der Variante K.

Block 1 (straßennah) weist in beiden Varianten die jeweils größten Kaliumvorräte auf, wobei die Unterschiede zwischen den Varianten nicht im Unterboden, sondern recht gleichmäßig verteilt über alle vier Schichten der Krume auftreten. Die Variante P weist in den Blöcken 2 und 3 vergleichbar große Kaliummassen auf (21 - 21,5 t ha⁻¹). In der Variante K im straßenfernen Block 3 liegen die Kalium-Gesamtmassen aufgrund des Unterbodens um ca. 0,5 t ha⁻¹ niedriger als in den genannten Parzellen. Auffällig ist die geringe Kalium-Gesamtmasse von ca. 19 t ha⁻¹ in der Variante K im Block 2, welche durch geringe Gehalte bzw. Massen in den Schichten 4 und 5 bedingt ist.

In der Variante Grünland (G) liegen die Kalium-Gesamtmassen (Abbildung 206) mit 18,8 t ha⁻¹ etwas niedriger als in den bewirtschafteten Varianten, wobei die Hauptunterschiede zu diesen, wie bei der Variante K in Block 2, in den unteren Schichten 4 und 5 besteht.

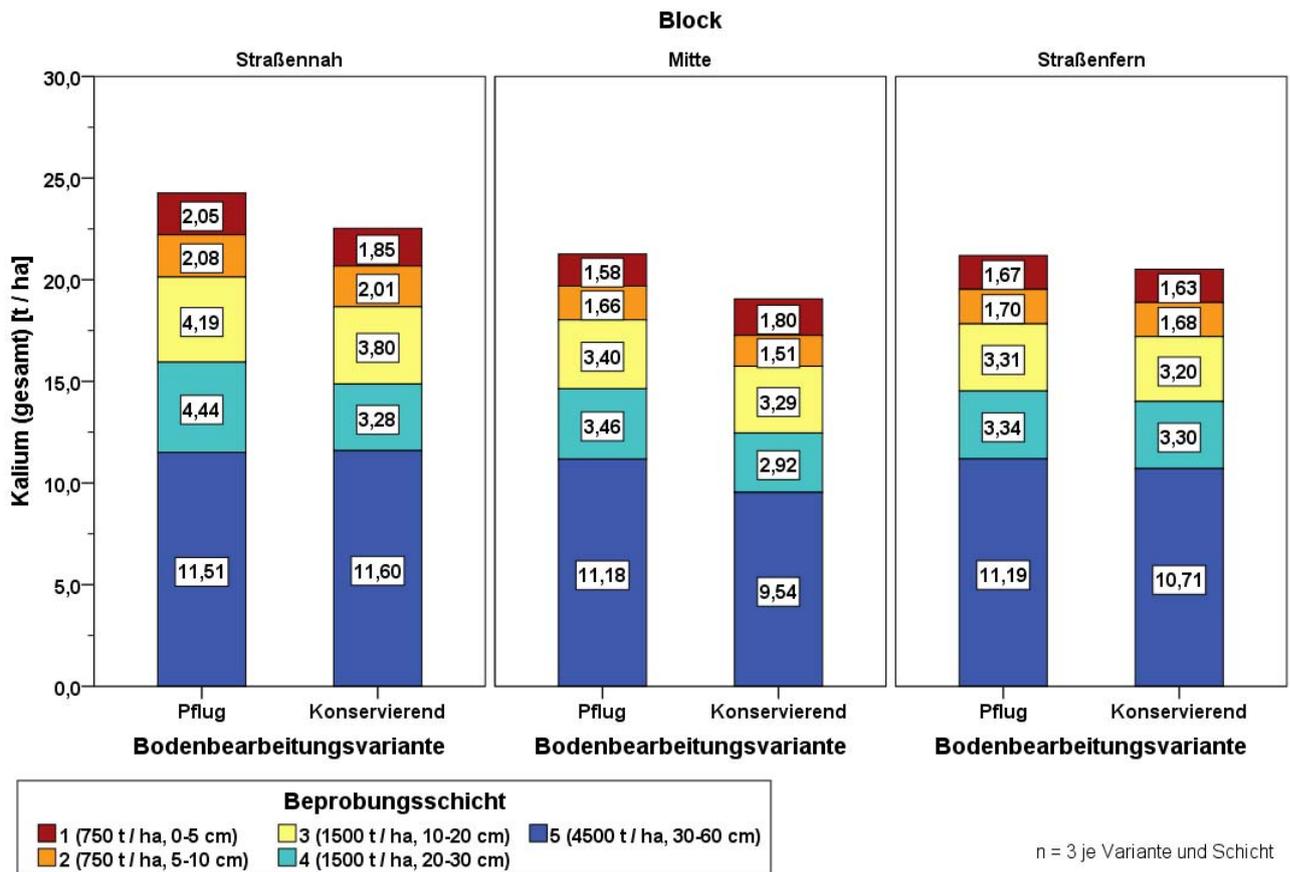


Abbildung 205: Mittlere Gesamtkaliumvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Frühjahr 2012

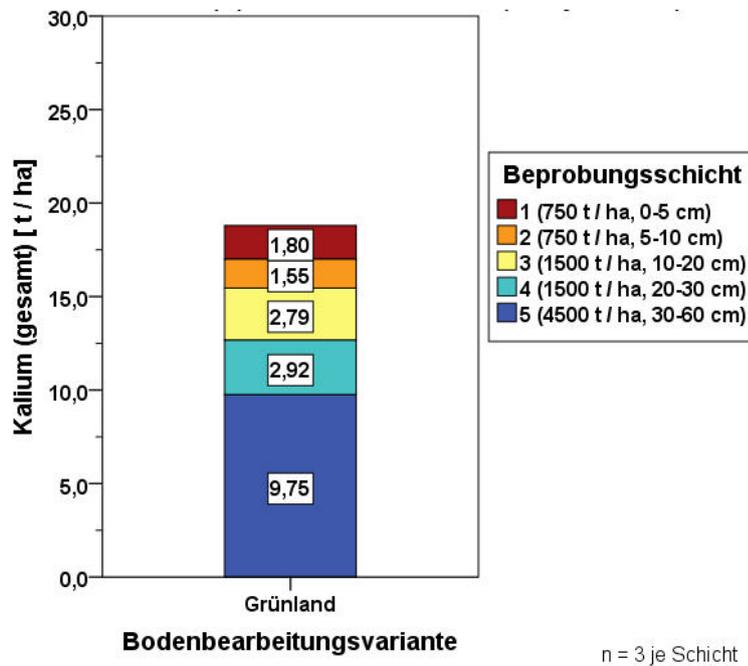


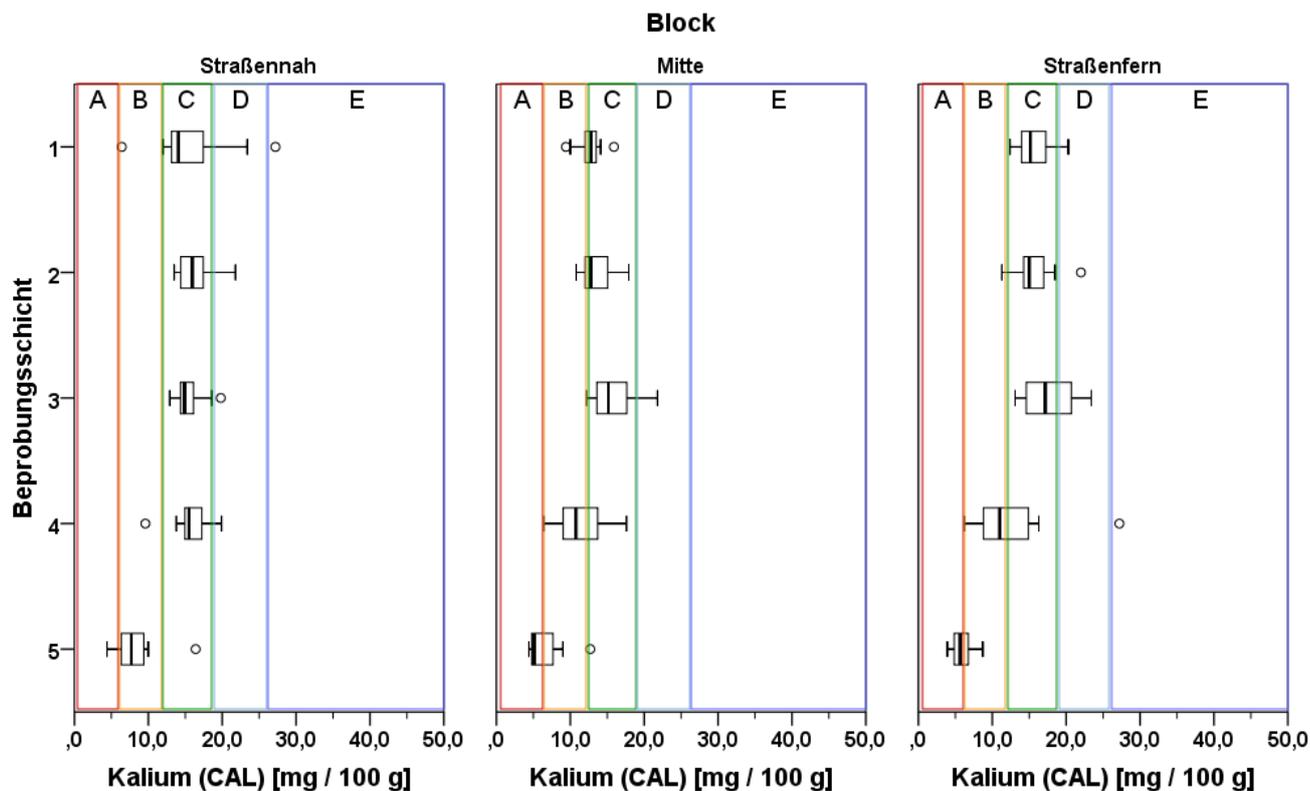
Abbildung 206: Mittlere Gesamtkaliumvorräte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Frühjahr 2012

Die Kalium-Gesamtvorräte wurden, wie bereits für den Kohlen- und Stickstoff, auf einen idealisierten Boden ohne Grobbodenanteile bezogen. Die korrigierten Vorräte für unterschiedliche Grobbodenanteile können Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Nach potentiellen Skelettanteilen korrigierte Gesamtkaliumvorräte innerhalb der einzelnen Blöcke und Bodenbearbeitungsparzellen am Standort Methau im Frühjahr 2012

Beprobungsschicht	Skelettanteil	Block 1		Grünland	Block 2		Block 3	
		P	K	G	P	K	P	K
		Masse-%		Gesamtkaliumvorräte [t ha ⁻¹]				
1-4 (4500 t / ha)	0	12,76	10,94	9,06	10,10	9,52	10,02	9,81
5 (4500 t / ha)	0	11,51	11,60	9,75	11,18	9,54	11,19	10,71
1-5 (9000 t / ha)	0	24,27	22,54	18,81	21,28	19,06	21,21	20,52
1-4 (4500 t / ha)	5	12,12	10,39	8,61	9,60	9,04	9,52	9,32
5 (4500 t / ha)	5	10,93	11,02	9,26	10,62	9,06	10,63	10,17
1-5 (9000 t / ha)	5	23,06	21,41	17,87	20,22	18,11	20,15	19,49
1-4 (4500 t / ha)	10	11,48	9,85	8,15	9,09	8,57	9,02	8,83
5 (4500 t / ha)	10	10,36	10,44	8,78	10,06	8,59	10,07	9,64
1-5 (9000 t / ha)	10	21,84	20,29	16,93	19,15	17,15	19,09	18,47
1-4 (4500 t / ha)	15	10,85	9,30	7,70	8,59	8,09	8,52	8,34
5 (4500 t / ha)	15	9,78	9,86	8,29	9,50	8,11	9,51	9,10
1-5 (9000 t / ha)	15	20,63	19,16	15,99	18,09	16,20	18,03	17,44
1-4 (4500 t / ha)	20	10,21	8,75	7,25	8,08	7,62	8,02	7,85
5 (4500 t / ha)	20	9,21	9,28	7,80	8,94	7,63	8,95	8,57
1-5 (9000 t / ha)	20	19,42	18,03	15,05	17,02	15,25	16,97	16,42
1-4 (4500 t / ha)	30	8,93	7,66	6,34	7,07	6,66	7,01	6,87
5 (4500 t / ha)	30	8,06	8,12	6,83	7,83	6,68	7,83	7,50
1-5 (9000 t / ha)	30	16,99	15,78	13,17	14,90	13,34	14,85	14,36
1-4 (4500 t / ha)	50	6,38	5,47	4,53	5,05	4,76	5,01	4,91
5 (4500 t / ha)	50	5,76	5,80	4,88	5,59	4,77	5,60	5,36
1-5 (9000 t / ha)	50	12,14	11,27	9,41	10,64	9,53	10,61	10,26

Die pflanzenverfügbaren Kaliumgehalte liegen in der Variante Pflug (P) in den Schichten 1 - 3 fast durchgängig in der GHK C (12 - 18 mg 100 g⁻¹) (Abbildung 207). Im straßenfernen Block 3 liegt der Zentralwertebereich der Schicht 3 zwischen 14 und 21 mg 100⁻⁹ und damit zwischen den GHK C und D. Während die K (CAL)-Gehalte in Block 1 (straßennah) auch in Schicht 4 durchgängig auf dem Niveau der Oberkrume und damit in der GHK C liegen, wurden für diese Schicht in den Blöcken 2 und 3 etwas geringere K (CAL)-Gehalte ermittelt (8 - 14 mg 100 g⁻¹), welche am Übergang der GHK B und C liegen. Im Unterboden (Schicht 5) liegen die Gehalte in allen drei Blöcken bei Zentralwertebereichen zwischen 4 und 9 mg 100 g⁻¹ in den GHK A und B.



Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112; Bodenart Lehm

n = 12 je Schicht und Block

Abbildung 207: K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Pflug am Standort Methau (4 Beprobungstermine)

Düngungs- und bodenbearbeitungsbedingt liegen die K (CAL)-Gehalte in der Variante Konservierend (K) (Abbildung 208) in den Schichten 1 und 2 mit Zentralwertebereichen zwischen 23 und 34 mg 100 g⁻¹ (Schicht 1) bzw. 18 und 33 mg 100 g⁻¹ (Schicht 2) in den GHK D und E, da keine tiefgreifende Einarbeitung des Mineraldüngers erfolgt. Die Streuungen sind dabei sehr groß. In dieser Variante ist beim Kalium, ähnlich wie bei vielen anderen untersuchten Parametern, die typische Stratifizierung mit der Tiefe ausgebildet, sodass in Schicht 3 die K (CAL)-Gehalte mit Zentralwertebereichen zwischen 10 und 17 mg 100 g⁻¹ (GHK B/C) sowie in Schicht 4 mit ZWB zwischen 4 und 7 mg 100 g⁻¹ (GHK A/B) nach unten hin abnehmen. In Schicht 5 schließlich liegen die K (CAL)-Gehalte in allen drei Blöcken mit sehr geringen Streuungen bei ca. 5 mg 100 g⁻¹ und damit in der GHK A.

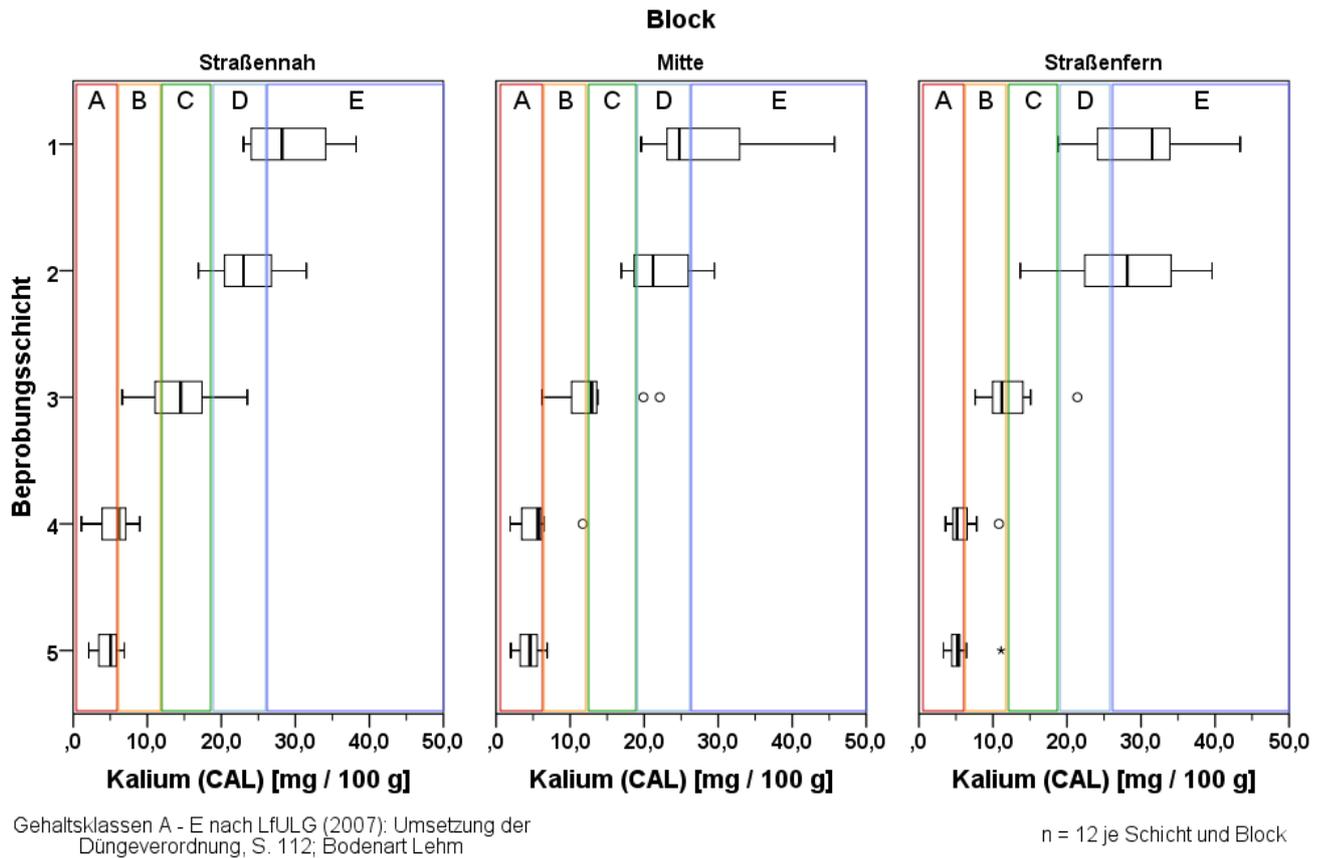


Abbildung 208: K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Blöcken, in der Variante Konservierend am Standort Methau (4 Beprobungstermine)

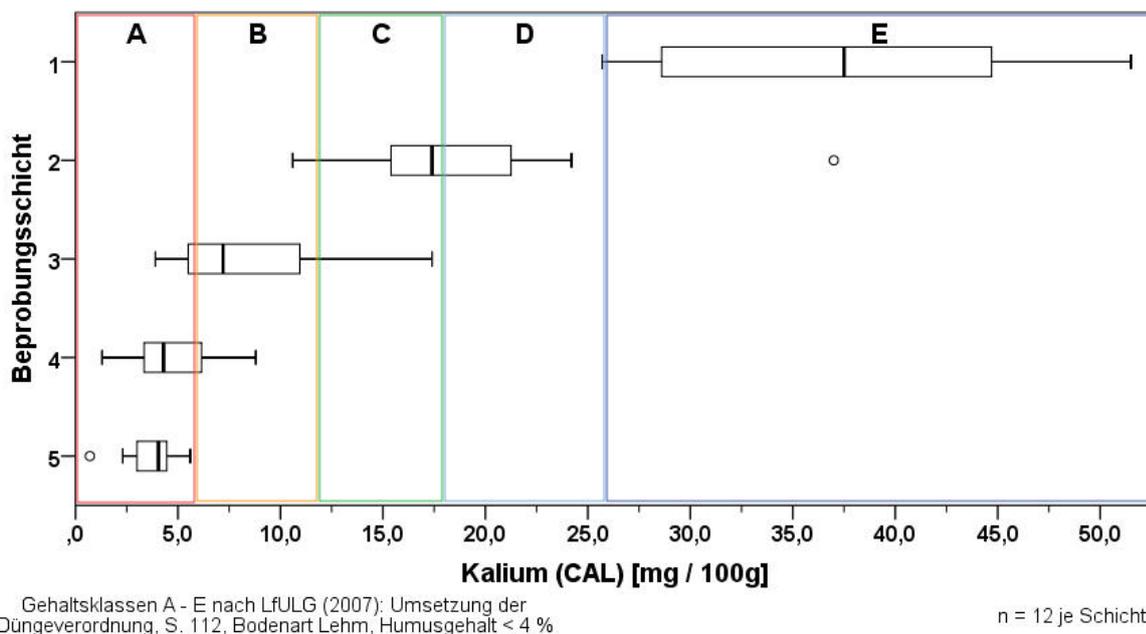


Abbildung 209: K(CAL)-Gehalte in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau (4 Beprobungstermine)

In der Variante Grünland (G) (Abbildung 209) weisen die K (CAL)-Gehalte insbesondere innerhalb den oberen drei Schichten sehr hohe Streuungen auf. Dabei liegt Schicht 1 mit Werten zwischen 26 und 51 mg 100 g⁻¹ in der GHK E, Schicht 2 in der GHK C/D (11 - 24 mg 100 g⁻¹) und Schicht 3 in den Gehaltsklassen A - C (4 - 17,5 mg 100 g⁻¹). Die Schichten 4 und 5 liegen mit den Zentralwertebereichen in der GHK A. In der Zeit seit der letzten Bewirtschaftung (1992) hat sich also eine deutliche Tiefenstratifizierung ausgebildet, wenngleich mit starken Streuungen zwischen den Beprobungspunkten und/oder Terminen.

Die Anteile des pflanzenverfügbaren Kaliums am Gesamtkaliumvorrat liegen im Frühjahr 2012 für das Gesamtprofil von 9000 t Boden ha⁻¹ im straßennahen Block 1 in beiden Variante bei ca. 5 % (Abbildung 210). Dies gilt ebenso für die Variante P in den Blöcken 2 und 3 bei geringfügig größerer Streuung (4,5 - 5,5 %). Die Variante K weist in den Blöcken 2 und 3 sehr große Streuungen in den Anteilen auf mit Werten zwischen 5 und 8,5 % (Block 2) bzw. 4,5 und 7,5 % (Block 3).

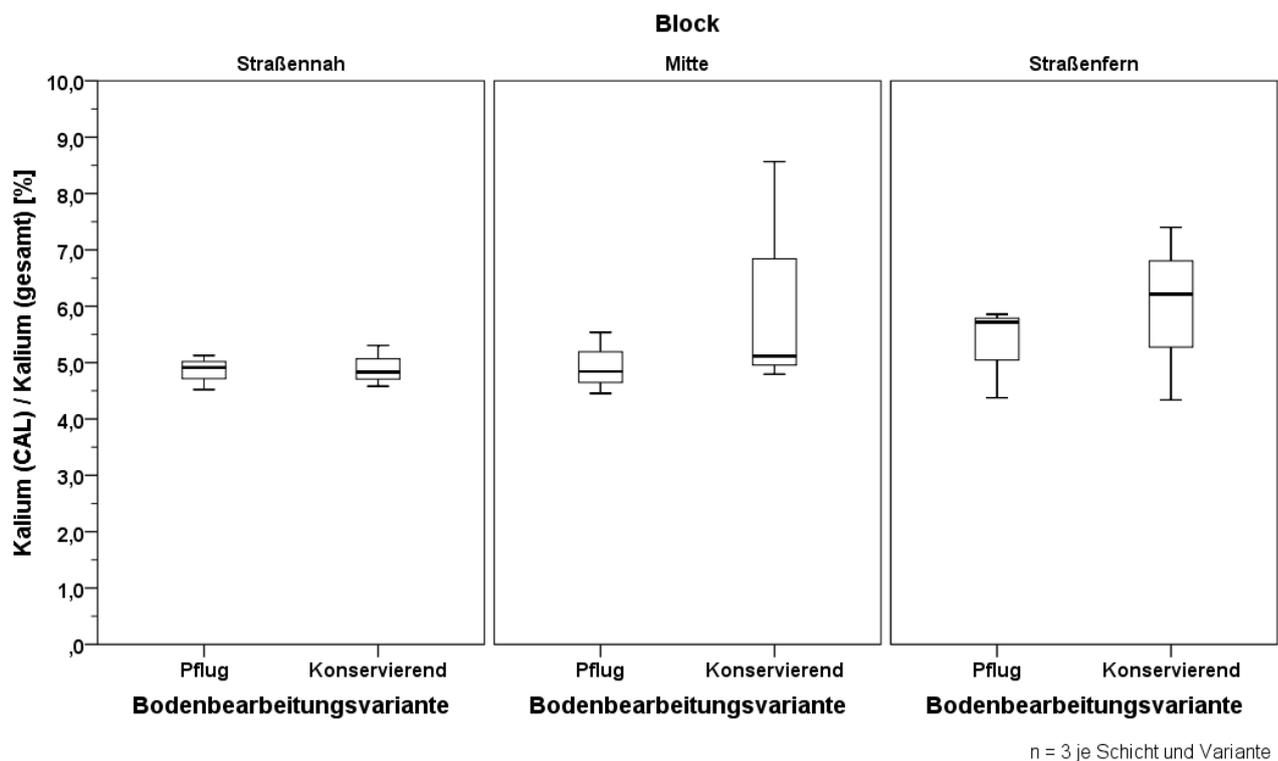


Abbildung 210: Anteile von K(CAL) an den Gesamtkaliumvorräten im Gesamtprofil (9000 t Boden / ha), differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Frühjahr 2012

Schlüsselt man diese Anteile nach Beprobungsschichten auf (Abbildung 211), ergibt sich für die Variante K in allen drei Blöcken ein sehr stark tiefenstratifiziertes Bild mit Maxima von bis zu 20 % in Schicht 1 und Minima von 2 % in Schicht 5. Dabei sind die Streuungen innerhalb der Schichten 1 - 3 in den Blöcken 1 und 3 sowie in den Schichten 3 - 5 in Block 2 sehr groß. In der Variante Pflug P sind die Anteile in der Krume (Schicht 1 - 4) in den drei Blöcken jeweils recht homogen, bei Werten von 5 - 7 %. Größere Streuungen treten im straßenfernen Block 3 in dieser Variante auf, wobei Anteile von bis zu 11,5 % (Schicht 4) ermittelt wurden. Im Unterboden (Schicht 5) liegen die Anteile in dieser Variante in allen drei Blöcken bei ca. 3 - 4 %.

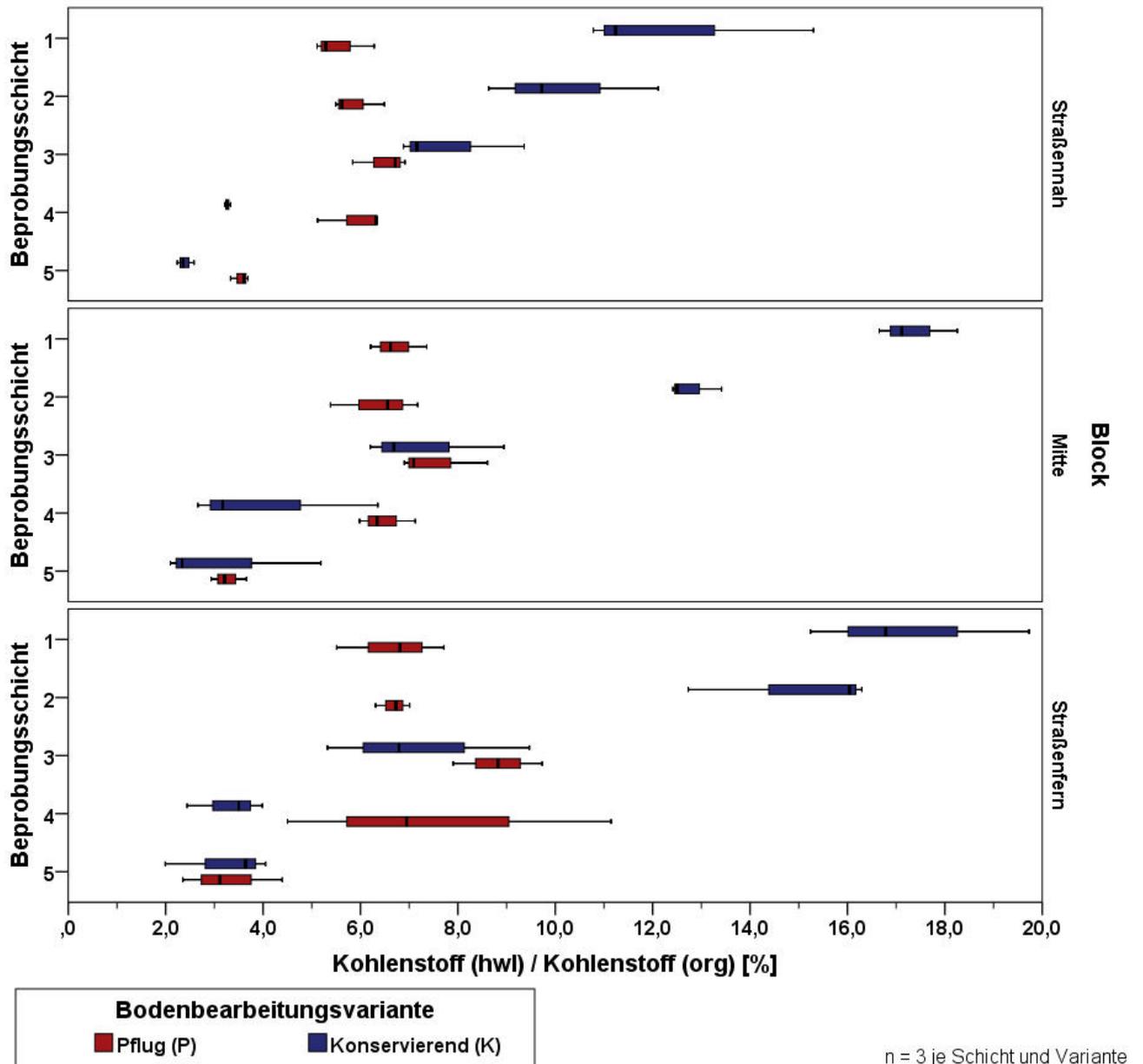
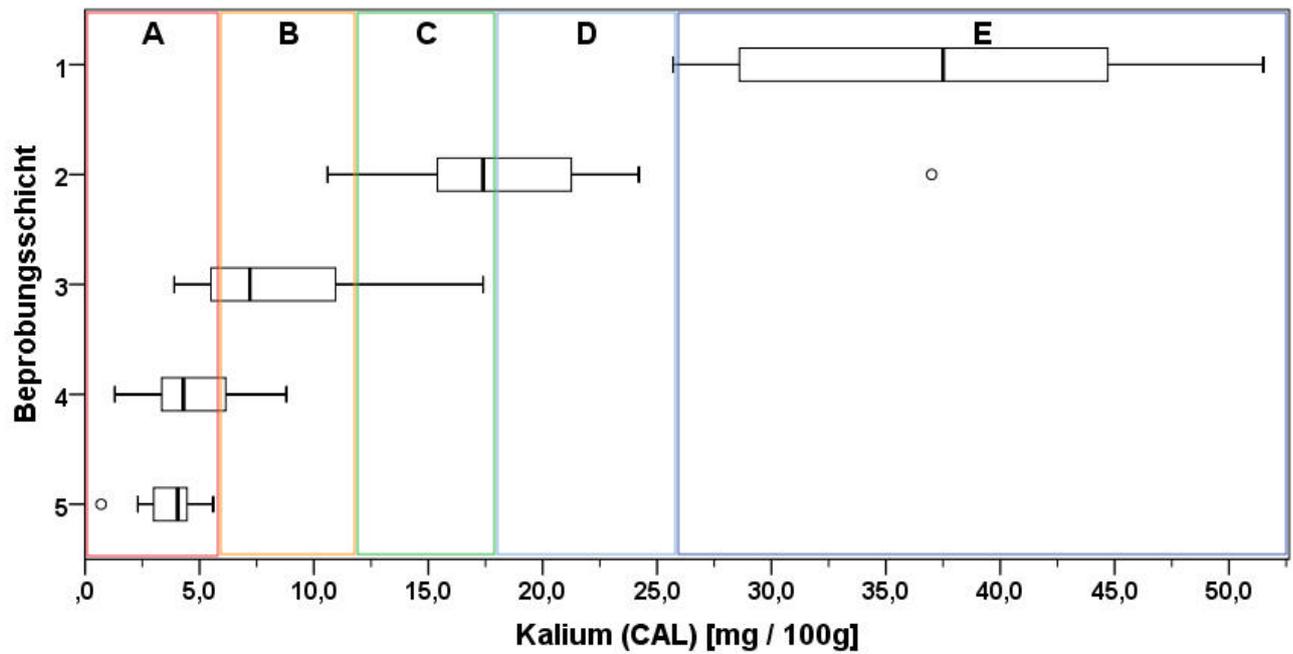


Abbildung 211: Anteile von K(CAL) an den Gesamtkaliumvorräten in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten, differenziert nach Bodenbearbeitungsvarianten und Blöcken, am Standort Methau im Frühjahr 2012

In der Variante Grünland (G) (Abbildung 212) liegen die pflanzenverfügbaren Kalium-Anteile in den oberen beiden Schichten bei 8 - 15,5 % und sind damit sowohl in Bezug auf die Werte als auch auf die großen Streuungen jenen der Variante K sehr ähnlich. In Schicht 3 liegen die Anteile bei 4 - 8 %, in Schicht 4 bei 2 - 3,5 %. In Schicht 5 ist die Streuung der Anteile bei Werten um 2 % minimal. Auch die Anteile in den unteren Schichten liegen damit in etwa in den Wertebereichen, die in den jeweiligen Schichten der Variante K ermittelt wurden.



Gehaltsklassen A - E nach LfULG (2007): Umsetzung der Düngeverordnung, S. 112, Bodenart Lehm, Humusgehalt < 4 %

n = 12 je Schicht

Abbildung 212: Anteile von K(CAL) an den Gesamtkaliumvorräten in 5 masseäquivalenten Beprobungsschichten in der Variante Grünland am Standort Methau im Frühjahr 2012

6 Diskussion

6.1 Korrelationen der untersuchten Parameter

In Tabelle 15 ist die Korrelationsmatrix der untersuchten bodenchemischen Parameter C_t , N_t , C_{hwl} , N_{hwl} , C_{mik} , DHA, P(CAL), K (CAL), $Mg(CaCl_2)$, P_t , K_t und Mg_t am Standort Lüttewitz dargestellt (die Untersuchungsergebnisse zum Parameter Magnesium sind in diesem Bericht nicht dargestellt, er wurde aus Gründen der Vollständigkeit jedoch trotzdem in die Korrelationsmatrix integriert). Dabei gehen jeweils alle gemessenen Einzelwerte für die fünf Beprobungsschichten ein. Für die Parameter C_t und N_t sowie die pflanzenverfügbaren Nährstoffe sind dies insgesamt (Basisbeprobungen und Umbruchversuch) 1495 Werte je Parameter. Für die Parameter C_{hwl} , N_{hwl} , C_{mik} und DHA liegen hauptsächlich Werte aus dem Umbruchversuch vor (840 - 900 Einzelwerte je Parameter). Für die Gesamtnährstoffgehalte liegen jeweils 180 Messwerte vor.

Dabei weist der Parameter C_t eine sehr hohe positive Korrelation mit den Parametern N_t (0,976), C_{hwl} (0,941) und N_{hwl} (0,847) auf. Weiterhin bestehen relativ hohe positive Korrelationen zu den Parametern C_{mik} (0,693), DHA (0,768) sowie P (CAL) (0,761), K (CAL) (0,628) und P_t (0,786). In diesen Korrelationen kommen die funktionalen Zusammenhänge der organischen Substanz als Speicherort für pflanzenverfügbare Nährstoffe (P, K) und Stickstoff (N_t) sowie als Hotspot mikrobieller Aktivität (C_{mik} , DHA) zum Ausdruck.

Auch zwischen diesen Parametern bestehen wiederum hohe Korrelationen, z.B. zwischen N_t und C_{hwl} (0,935) sowie N_{hwl} (0,877).

In Bezug auf die Nährstoffe bestehen beim Phosphor (0,856) und beim Magnesium (0,786) starke positive Korrelationen zwischen den Gesamtgehalten und den pflanzenverfügbaren Gehalten, wohingegen diese beim Kalium (0,292) schwach ausgeprägt ist. Eine hohe positive Korrelation (0,911) besteht zudem zwischen den Gesamtgehalten an Kalium und Magnesium.

Am Standort Methau wurden für die Parameter C_t , N_t sowie die Makronährstoffe insgesamt 420 Einzelwerte bestimmt. Für die mikrobiellen Parameter C_{mik} und DHA lagen jeweils 210 Einzelwerte vor (Frühjahr und Herbst 2012), für die Gesamtnährstoffvorräte 105 Einzelwerte (Frühjahr 2012). C_{hwl} wurde lediglich im Herbst 2012 bestimmt (105 Einzelwerte).

Auch am Standort Methau bestehen starke positive Korrelationen (Tabelle 16) zwischen dem Parameter C_t und den Parametern N_t (0,981), C_{hwl} (0,98), DHA (0,881), K (CAL) (0,789) und P_t (0,775). Etwas weniger stark als am Standort Lüttewitz sind hingegen die positiven Korrelationen von C_t mit den Parametern C_{mik} (0,57) und P (CAL) (0,631).

Weiterhin wurde starke Korrelationen zwischen diesen Parametern ermittelt, so z.B. zwischen C_{hwl} und N_t (0,976), C_{mik} (0,908) und DHA (0,916). Weitere starke Korrelationen wurden am Standort Methau für die Parameter P (CAL) und K (CAL) (0,852), P (CAL) und P_t (0,923) sowie K (CAL) und P_t (0,891) gefunden. Nur eine sehr schwache Korrelation bestand hingegen für K (CAL) und K_t (0,178) und für $Mg(CaCl_2)$ und Mg_t (0,548). Im Gegensatz zum Standort Lüttewitz wurde keine starke Korrelation der Gesamtgehalt an Kalium und Magnesium ermittelt, allerdings eine relative starke Korrelation von K_t und Mg_t (0,700).

Tabelle 15: Korrelationsmatrix der untersuchten Parameter am Standort Lüttewitz

		C_t	N_t	C_{hwl}	N_{hwl}	C_{mik}	DHA	P (CAL)	K (CAL)	Mg (CaCl₂)	P_t	K_t	Mg_t
C_t	Korrelation nach Pearson	1	,976**	,941**	,847**	,693**	,768**	,761**	,628**	-,354**	,786**	-,110	-,413**
	Signifikanz (2-seitig)		0,000	0,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,142	,000
	N	1495	1495	900	840	884	899	1495	1495	1495	180	180	180
N_t	Korrelation nach Pearson	,976**	1	,935**	,877**	,698**	,753**	,744**	,637**	-,368**	,786**	-,072	-,381**
	Signifikanz (2-seitig)	0,000		0,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,336	,000
	N	1495	1495	900	840	884	899	1495	1495	1495	180	180	180
C_{hwl}	Korrelation nach Pearson	,941**	,935**	1	,842**	,726**	,830**	,762**	,614**	-,227**	,706**	-,051	-,315*
	Signifikanz (2-seitig)	0,000	0,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,700	,014
	N	900	900	900	840	884	899	900	900	900	60	60	60
N_{hwl}	Korrelation nach Pearson	,847**	,877**	,842**	1	,635**	,728**	,720**	,677**	-,169**	,640**	-,008	-,264*
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,953	,042
	N	840	840	840	840	824	839	840	840	840	60	60	60
C_{mik}	Korrelation nach Pearson	,693**	,698**	,726**	,635**	1	,673**	,587**	,529**	-,178**	,573**	,191	-,039
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,148	,772
	N	884	884	884	824	884	884	884	884	884	59	59	59
DHA	Korrelation nach Pearson	,768**	,753**	,830**	,728**	,673**	1	,594**	,727**	-,016	,657**	,042	-,217
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,639	,000	,749	,096
	N	899	899	899	839	884	899	899	899	899	60	60	60
P (CAL)	Korrelation nach Pearson	,761**	,744**	,762**	,720**	,587**	,594**	1	,496**	-,216**	,856**	-,060	-,329**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,000	,426	,000
	N	1495	1495	900	840	884	899	1495	1495	1495	180	180	180
K (CAL)	Korrelation nach Pearson	,628**	,637**	,614**	,677**	,529**	,727**	,496**	1	,097**	,507**	,292**	,002

	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,983
	N	1495	1495	900	840	884	899	1495	1495	1495	180	180	180
	Korrelation nach Pearson	-,354**	-,368**	-,227**	-,169**	-,178**	-,016	-,216**	,097**	1	-,450**	,672**	,786**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,639	,000	,000		,000	,000	,000
Mg (CaCl2)	N	1495	1495	900	840	884	899	1495	1495	1495	180	180	180
	Korrelation nach Pearson	,786**	,786**	,706**	,640**	,573**	,657**	,856**	,507**	-,450**	1	-,133	-,402**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000		,076	,000
P_t	N	180	180	60	60	59	60	180	180	180	180	180	180
	Korrelation nach Pearson	-,110	-,072	-,051	-,008	,191	,042	-,060	,292**	,672**	-,133	1	,911**
	Signifikanz (2-seitig)	,142	,336	,700	,953	,148	,749	,426	,000	,000	,076		,000
K_t	N	180	180	60	60	59	60	180	180	180	180	180	180
	Korrelation nach Pearson	-,413**	-,381**	-,315*	-,264*	-,039	-,217	-,329**	,002	,786**	-,402**	,911**	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,014	,042	,772	,096	,000	,983	,000	,000	,000	
Mg_t	N	180	180	60	60	59	60	180	180	180	180	180	180

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 16: Korrelationsmatrix der untersuchten Parameter am Standort Methau

		C_t	N_t	C_{hwl}	C_{mik}	DHA	P (CAL)	K (CAL)	Mg (CaCl₂)	P_t	K_t	Mg_t
C_t	Korrelation nach Pearson	1	,981**	,980**	,570**	,881**	,631**	,789**	,041	,775**	-,129	-,462**
	Signifikanz (2-seitig)		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,404	,000	,190	,000
	N	420	420	105	208	210	420	420	420	105	105	105
N_t	Korrelation nach Pearson	,981**	1	,976**	,572**	,893**	,627**	,788**	,040	,793**	-,085	-,445**
	Signifikanz (2-seitig)	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,410	,000	,389	,000
	N	420	420	105	208	210	420	420	420	105	105	105
C_{hwl}	Korrelation nach Pearson	,980**	,976**	1	,908**	,916**	,572**	,837**	,216*	. ^c	. ^c	. ^c
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000		,000	,000	,000	,000	,027			
	N	105	105	105	105	105	105	105	105	0	0	0
C_{mik}	Korrelation nach Pearson	,570**	,572**	,908**	1	,574**	,176*	,430**	,326**	,208*	-,058	-,113
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000		,000	,011	,000	,000	,035	,558	,258
	N	208	208	105	208	208	208	208	208	103	103	103
DHA	Korrelation nach Pearson	,881**	,893**	,916**	,574**	1	,495**	,716**	,230**	,711**	,029	-,346**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,001	,000	,771	,000
	N	210	210	105	208	210	210	210	210	105	105	105
P (CAL)	Korrelation nach Pearson	,631**	,627**	,572**	,176*	,495**	1	,852**	-,254**	,923**	,253**	-,378**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,011	,000		,000	,000	,000	,009	,000

	N	420	420	105	208	210	420	420	420	105	105	105
	Korrelation nach Pearson	,789**	,788**	,837**	,430**	,716**	,852**	1	-,093	,891**	,178	-,393**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000		,058	,000	,069	,000
K (CAL)	N	420	420	105	208	210	420	420	420	105	105	105
	Korrelation nach Pearson	,041	,040	,216*	,326**	,230**	-,254**	-,093	1	-,126	,367**	,548**
	Signifikanz (2-seitig)	,404	,410	,027	,000	,001	,000	,058		,199	,000	,000
Mg (CaCl2)	N	420	420	105	208	210	420	420	420	105	105	105
	Korrelation nach Pearson	,775**	,793**	. ^c	,208*	,711**	,923**	,891**	-,126	1	,141	-,438**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000		,035	,000	,000	,000	,199		,150	,000
P_t	N	105	105	0	103	105	105	105	105	105	105	105
	Korrelation nach Pearson	-,129	-,085	. ^c	-,058	,029	,253**	,178	,367**	,141	1	,700**
	Signifikanz (2-seitig)	,190	,389		,558	,771	,009	,069	,000	,150		,000
K_t	N	105	105	0	103	105	105	105	105	105	105	105
	Korrelation nach Pearson	-,462**	-,445**	. ^c	-,113	-,346**	-,378**	-,393**	,548**	-,438**	,700**	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000		,258	,000	,000	,000	,000	,000	,000	
Mg_t	N	105	105	0	103	105	105	105	105	105	105	105

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

c. Kann nicht berechnet werden, da mindestens eine der Variablen konstant ist.

6.2 Kohlen- und Stickstoffvorräte sowie Variantenvergleich am Standort Lüttewitz

6.2.1 Bewertung und Einordnung der Daten aus Voruntersuchungen

Für den Standort Lüttewitz existieren Daten zu den Kohlen- und Stickstoffgehalten bzw. -vorräten aus diversen Voruntersuchungen. Diese Daten wurden aus Untersuchungen des Instituts für Zuckerrübenforschung (IfZ) (JACOBS et al. 2015, KOCH 2010), dem Abschlussbericht zum „Elbeprojekt“ der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (SCHMIDT ET AL. 2002), der Diplomarbeit bzw. Dissertation von THIEL (2002, 2010) sowie der Diplomarbeit von KELLER (2006) entnommen. Aufgrund sehr unterschiedlicher Vorgehensweisen in allen Untersuchungen ist ein direkter quantitativer Vergleich der Ergebnisse nur bedingt möglich. Dies gilt insbesondere für die Anzahl sowie Auswahl der Beprobungspunkte sowie die beprobten Tiefen bzw. Bodenmassen. Ein relativer Vergleich der Gehalte bzw. Vorräte zwischen den vier Bodenbearbeitungsvarianten ist aber möglich. Teilweise sind auch semiquantitative bzw. qualitative Vergleiche zwischen den Datensätzen möglich.

6.2.1.1 Ergebnisse des IfZ

In Bezug auf die Untersuchungen des IfZ lässt sich festhalten, dass für den ersten Beprobungstermin 1995/1996, ca. 3 Jahren nach Versuchsbeginn, in der Tiefe 0-30 cm relative geringe Unterschiede der C- und N-Vorräte auf der Basis einer äquivalenten Bodenmasse von 4100 t ha^{-1} zwischen den Varianten ermittelt wurden. Diese Unterschiede lagen bei maximal $2,5 \text{ t C ha}^{-1}$ und $0,3 \text{ t N ha}^{-1}$. Dabei waren die C-Vorräte in der Variante D am geringsten, die N-Vorräte hingegen am höchsten (KOCH 2010 & unveröffentlichte Daten IfZ).

Bei der erneuten Beprobung der Gesamtfläche im Jahr 2010 lag der Unterschied zwischen der Variante P und den Varianten D und K in den obersten $4170 \text{ t Boden ha}^{-1}$ bei $4 - 5 \text{ t C ha}^{-1}$ sowie $0,4 - 0,5 \text{ t N ha}^{-1}$. Das Verhältnis von ca. 10:1 in den Variantenunterschieden entspricht dabei dem für den Standort ermittelten C:N-Verhältnis und spricht daher für die Plausibilität des Ergebnisses.

Für den Bereich bis 45 cm Tiefe wurden im Jahr 2010 für eine äquivalente Bodenmasse von 6435 t ha^{-1} hingegen annähernd gleiche C- und N-Vorräte von $66 - 67 \text{ t C ha}^{-1}$ bzw. $7,8 \text{ t N ha}^{-1}$ in den Varianten P und K ermittelt. Die Variante D weist dabei um ca. 10 t C ha^{-1} sowie 1 t N ha^{-1} geringere Vorräte auf. Dieser Unterschied kann qualitativ mit der Einarbeitung von humusreichem Oberbodenmaterial in die Unterkrume bzw. den Unterboden in der Variante P erklärt werden. Es ist allerdings sehr fraglich, ob ein Unterschied von 22 t C ha^{-1} in der Variante P gegenüber 8 t C ha^{-1} in der Variante D in den untersten 15 cm bzw. $2300 \text{ t Boden ha}^{-1}$ als flächenrepräsentatives Ergebnis der differenzierten Bodenbearbeitung interpretiert werden kann. Vielmehr ist zu vermuten, dass es sich, im Rahmen der geringen Anzahl von Beprobungspunkten ($n = 4$), um Effekte der Flächenheterogenität handelt.

Diese Erklärung wird unterstützt durch die Ergebnisse der Untersuchung in den von TEIWES (2005) ausgewiesenen Messfeldern. Für diese wurden im Jahr 2005 in der Krume ($4220 \text{ t Boden ha}^{-1}$) Unterschiede zwischen den Varianten von max. $5,5 \text{ t C ha}^{-1}$ ermittelt, wobei die Variante D die geringsten und die Varianten K die höchsten Vorräte aufwiesen. Bei den N-Vorräten wies hingegen die Variante D die höchsten und die Variante K die geringsten Werte auf. Werden im Rahmen dieser Untersuchung die untersten 15 cm bzw. $2300 \text{ t Boden ha}^{-1}$ mit einbezogen, kehrt sich das Ergebnis um: Nunmehr weist die Variante D mit ca. 70 t C ha^{-1} die höchsten und die Variante K mit 59 t C ha^{-1} die mit Abstand geringsten C-Vorräte auf.

Wie schon in Bezug auf die Flächenbeprobungen in den Jahren 1995/1996 bzw. 2010 muss ein Unterschied von 9 t C ha^{-1} (K) gegenüber 15 t C ha^{-1} (D) in diesem Bodenpaket wohl als Ergebnis von Bodenheterogenitäten interpretiert werden, da Unterschiede in dieser Größenordnung als repräsentatives Ergebnis von Bodenbearbeitungsprozessen nicht realistisch erscheinen. Dies gilt insbesondere, als in beiden Varianten die relevante Tiefe bzw. Bodenschicht nicht direkt von der Bodenbearbeitung beeinflusst wird. Daher liegt die Vermu-

tung nahe, dass Unterschiede bzw. Heterogenitäten in den ermittelten Stoffvorräten in dieser Größenordnung selbst bei sorgfältiger Auswahl von vergleichbaren bzw. repräsentativen Teilflächen sowie der Anwendung einer komplexen Methodik zu erwarten sind. Dies unterstreicht die Schwierigkeit der zuverlässigen Ermittlung von bodenbearbeitungsbedingten Unterschieden in den C-Vorräten.

Vor diesem Hintergrund müssen auch die Ergebnisse der erneuten Beprobung der Messfelder im Jahr 2010 interpretiert werden. Dabei wurden, für eine dem Jahr 2005 vergleichbare Bodenmasse von 4290 t ha^{-1} für die Krume, C-Vorräte zwischen $45,6 \text{ t ha}^{-1}$ (P) und $51,3 \text{ t ha}^{-1}$ (K) ermittelt. Die Unterschiede zwischen den Varianten waren dabei gegenüber dem Jahr 2005 stark verändert. Für die Bodenmasse von 6420 t ha^{-1} , ebenfalls dem Jahr 2005 vergleichbar, wurden im Jahr 2010 lediglich in der Variante D C-Vorräte ermittelt, die dem Jahr 2005 entsprechen. In der Varianten P hingegen wurden um ca. 9 t ha^{-1} reduzierte C-Vorräte gegenüber 2005 ermittelt, in der Variante K um ca. 9 t ha^{-1} erhöhte. Auch bei diesen Werten erscheint eine Erklärung der Unterschiede zwischen den Varianten sowie deren zeitlicher Dynamik auf der Basis von Effekten der Bodenbearbeitung fraglich. Vielmehr scheint es sich um ein Zusammenspiel von kleinräumigen Flächenheterogenitäten und zeitlichen Schwankungen der C-Vorräte zu handeln.

Auch JACOBS et al. (2015: 2) stellen Überlegungen zu den ermittelten Schwankungen in den C-Vorräten an und nennen mit dem Beprobungszeitpunkt im Jahr sowie innerhalb der Fruchtfolge weitere wahrscheinliche Einflussfaktoren:

„Moreover, we suggest that the date of sampling within the crop rotation is likely to influence the outcomes since the amount and quality of organic matter incorporated into the soil is affected by the respective preceding crop. Generally, studies which determine the effects of the tillage regime only once, risk an interaction of their results with specific factors, such as yield and input of organic material, soil climate conditions during tillage and sampling.“

Dabei wird insbesondere die Notwendigkeit einer Wiederholung der Untersuchung unterstrichen, um die Auswirkungen kurz- und mittelfristiger Einflussfaktoren wie der Witterung, Fruchtfolgeeffekten oder Beprobungszeitpunkt auf die Ergebnisse zu minimieren.

In Bezug auf das Gesamtergebnis der Untersuchungen des IfZ, welches sich auf insgesamt 10 bodenkundlich diverse Dauerversuchsstandorte in Deutschland bezieht, schreibt KOCH (2010: 22):

„Während bei der Probenahme 1995/96 keine Unterschiede in den Poolgrößen auftraten, war an den beiden späteren Untersuchungsterminen im Mittel aller Standorte eine Steigerung des C_{org} -Pools von $2\text{-}8 \text{ t ha}^{-1}$ und des N_{t} -Pools von $0,2\text{-}0,8 \text{ t ha}^{-1}$ durch pfluglose Bodenbearbeitung zu verzeichnen. Bedingt durch deutlich abweichende Daten an einzelnen Standorten mit großer Bodenheterogenität waren diese Unterschiede nicht immer signifikant.“

Insgesamt bestätigen diese Ergebnisse das Potenzial pflugloser Bodenbearbeitung zur Steigerung des Humuspools in mitteleuropäischen Ackerböden um 5-10 %. Deutliche Unterschiede zwischen dem konservierenden Bearbeitungsverfahren Mulch und dauerhafter Direktsaat sind dabei nicht zu erwarten.“

6.2.1.2 Ergebnisse von Thiel und Keller

Im Rahmen seiner Untersuchung stellte THIEL (2002) fest, dass es am Standort Lüttewitz nach etwa 10 Jahren differenzierter Bewirtschaftung bereits zu einer deutlichen Differenzierung der C_{org} -Gehalte in der Oberkrume (0-5 cm) gekommen war. Im Rest der Krume (5 - 30 cm) lag der C_{org} -Gehalt der Varianten relativ eng beieinander. Für den Unterboden (30-60 cm) wurden mit C_{org} -Gehalten zwischen 0,68 % (P) und 0,83 % (K) erhebliche höhere Werte ermittelt als in den Messungen des LFL (1999-2001).

Die Unterschiede zwischen den Varianten in den Gesamtvorräten betragen dabei in der Krume bis zu 10 t C ha^{-1} und im Gesamtprofil bis 60 cm Tiefe bis zu 20 t C ha^{-1} . Obwohl diese Vorräte nicht auf der Basis äquivalenter Bodenmassen berechnet wurden, ist aufgrund von Erfahrungswerten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung davon auszugehen, dass eine solche Korrektur das Ergebnis nur in vergleichsweise gerin-

gem Maße verändern würde und die Grundtendenz sowie die Größenordnung des Variantenvergleiches gleich ausfallen würden. Da die Beprobung im Jahr 2002 ca. 3 Monate nach der letzten Bodenbearbeitung stattfand, ist davon auszugehen, dass die Unterschiede in der Trockenrohdichte der Krume, basierend auf Daten von JACOBS et al. (2015, vgl. Tabelle 17) max. $0,1 \text{ g cm}^{-3}$ betragen. Im Unterboden ist demnach, v. a. aufgrund des fehlenden Bearbeitungseinflusses, sogar mit noch geringeren Dichteunterschieden zu rechnen.

Tabelle 17: Trockenrohdichten am Standort Lüttewitz nach 12 Versuchsjahren (nach JACOBS et al. 2015: 5)

Tiefe [cm]	Variante P	Variante D [g cm ⁻³]	Variante K
0-10	1,35	1,44	1,42
10-20	1,41	1,52	1,54
20-30	1,46	1,52	1,53
30-45	1,55	1,53	1,55

Zudem ist davon auszugehen, dass sich die Unterschiede in den C-Gehalten zwischen den Varianten nicht innerhalb von 2-3 Jahren komplett umgekehrt haben. Insofern zeigt der Vergleich der Daten der LFL mit jenen von THIEL (2002, 2010), ähnlich wie die Daten des IfZ, dass je nach Lage und Anzahl der Beprobungspunkte sowie Vorgehensweise der Ermittlung von C-Vorräten sehr unterschiedliche, einander teilweise auch widersprechende Ergebnisse erzielt werden können.

Der Einfluss des Reliefs und der Geomorphodynamik wurde auch von THIEL (2002) beschrieben. So stellte er (2002: 67 ff.) im Vergleich zum Mittel der jeweiligen Parzellen leicht erhöhte C-Gehalte für die Oberkrume (0 - 5 cm) an den in Dellen gelegenen Beprobungspunkten P2 und P6 sowie niedrigere C-Gehalte an den Punkten D2 und KL5, welche sich im Kuppenbereich befinden, fest. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung. Allerdings konnte THIEL (2002: 68) bei weitem nicht für alle Beprobungspunkte eine Korrelation der Reliefgruppe mit den C-Gehalten in der Oberkrume feststellen. Für den Rest der Krume (5 - 30 cm) wurden auffallend geringe C-Gehalte für Hanglagen festgestellt, insbesondere für die Beprobungspunkte P5 und KL5.

Vergleicht man die Daten von KELLER (2006) aus dem Jahr 2005 für die oberen 5000 t Boden ha⁻¹ mit jenen von THIEL (2002) für die Schicht 0-30 cm, wurden um ca. 0,1 - 0,2 % niedrigere C-Gehalte ermittelt. Dies kann z. T. aus dem Einbezug von relativ humusarmem Unterbodenmaterial erklärt werden. Allerdings sind die Unterschiede in den C-Vorräten zwischen den Varianten bei KELLER (2006) deutlich geringer als bei THIEL (2002) und liegen auch absolut in den Varianten D, K und KL niedriger als jene. Lediglich für die Variante P wurden etwas höhere C-Vorräte berechnet.

Es lässt sich leider nicht quantifizieren, zu welchen Teilen diese Unterschiede auf jährliche Schwankungen und zu welchen Teilen auf die unterschiedliche Beprobungs- und Auswertungsmethodik zurückzuführen ist. In Bezug auf den Variantenvergleich lässt sich allerdings qualitativ festhalten, dass sowohl THIEL (2002) als auch KELLER (2006) für den Bereich der Krume höhere C-Gehalte und -Vorräte in den Varianten D und K als in den Varianten P und KL ermittelt haben. Dies entspricht den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung sowie den Ergebnissen des IfZ (KOCH 2010) aus dem Jahr 2010. Größere Schwankungen und Unsicherheiten in den Daten ergeben sich insbesondere dann, wenn der Unterboden in die Beprobung bzw. Auswertung mit einbezogen wird, wie z.B. bei der Berechnung der C-Vorräte in der Variante K im Jahr 2005 (Messfelder) sowie der Variante D im Jahr 2010 (Gesamtfläche).

6.2.2 Einordnung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung

6.2.2.1 C-Vorräte

Basierend auf der Ausgangsuntersuchung aus dem Jahr 1995/1996 (KOCH 2010 & unveröffentlichte Daten IfZ), welche für den Krumbereich sehr geringe Unterschiede in den C-Vorräten zwischen den Varianten P, D und K ausweist, können spätere bzw. heutige Vorratsunterschiede als Effekte der differenzierten Bodenbearbeitung interpretiert werden. Dies gilt für die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung insbesondere insofern, als trotz erheblicher zeitlicher Schwankungen sowie standortbedingter (Boden)Heterogenitäten stabile Unterschiede in den C-Vorräten zwischen den Varianten ermittelt wurden.

Die Unterschiede zwischen den Varianten D und K auf der einen und P und KL auf der anderen Seite lagen im Mittel der vier Basisbeprobungstermine bei $8 - 9 \text{ t C ha}^{-1}$, wobei ca. ein Drittel des Unterschiedes auf den Unterboden und ca. zwei Drittel des Unterschiedes auf die Krume entfallen. Die mittleren C-Massen in der Krume (oberste 4500 t ha^{-1}) lagen in den Varianten P und KL bei ca. 45 t ha^{-1} und in den Varianten D und K bei $52 - 53 \text{ t C ha}^{-1}$. Damit liegen sie in der gleichen Größenordnung, die in Voruntersuchungen des IfZ (KOCH 2010) sowie von THIEL (2002) bzw. KELLER (2006) für vergleichbare Bodenmassen ermittelt wurden.

HEINZE et al. (2010) ermittelten unter sehr vergleichbaren klimatischen und bodenkundlichen Bedingungen auf zwei langjährigen (ca. 40 Jahre) Dauerversuchsflächen bei Göttingen um 2 bzw. 4 t C ha^{-1} höhere Vorräte in den obersten 30 cm in der konservierend bearbeiteten Variante (RT) im Vergleich zur Pflugvariante (CT). Insgesamt wurden C-Gesamtvorräte von 37 bis 44 t C ha^{-1} ermittelt, was der Größenordnung der Vorräte in der vorliegenden Untersuchung entspricht. Die korrespondierenden N-Vorräte lagen zwischen $4,2$ und $4,8 \text{ t ha}^{-1}$ bei Unterschieden von $0,1 - 0,4 \text{ t ha}^{-1}$ zugunsten der RT-Variante. Im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchung wurden von HEINZE et al. (2010) für den Bereich in $30 - 40 \text{ cm}$ Tiefe keine Unterschiede in den C- und N-Vorräten zwischen den Varianten festgestellt.

Der mittlere Unterschied von ca. 10 t C ha^{-1} sowie ca. 1 t N ha^{-1} zwischen den Varianten D (NT) und P (CT) in der vorliegenden Untersuchung liegt in der gleichen Größenordnung wie in einer Untersuchung von GÁL et al. (2007), bei welcher die Unterschiede bis in eine Tiefe von 1 m ermittelt wurden. Im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchung wurden jedoch von GÁL et al. (2007) im Bereich zwischen 30 und 50 cm Tiefe deutlich höhere C- und N-Vorräte in der CT-Variante im Vergleich zur NT-Variante ermittelt. Die Hauptursache hierfür liegt vermutlich in der Methodik mit einer festen Beprobungstiefe bis 30 cm , wohingegen die Tiefe der vierten Beprobungsschicht (Unterkrume) im Rahmen der vorliegenden Untersuchung je nach ermittelter Trockenroh-dichte angepasst wurde und insbesondere in der locker lagernden Pflugvariante häufig Tiefen von über 35 cm erreichte. Dadurch wurde in die Unterkrume eingebrachtes organisches Material in der Bilanzierung der Krume und nicht dem Unterboden (Beprobungsschicht 5) zugeordnet.

Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der Metastudie von ANGERS & ERIKSEN-HAMEL (2008) bestätigt, welche in der Mehrzahl der ausgewerteten Untersuchungen eine C-Anreicherung bei CT im Vergleich zu NT im Bereich direkt unterhalb der maximalen Bearbeitungstiefe ($26 - 35 \text{ cm}$) feststellten. Der mittlere Unterschied zwischen NT und CT bei jenen Untersuchungen mit einer Laufzeit von mindestens fünf Jahren und einer Beprobungstiefe von mindestens 30 cm lag bei $4,9 \text{ t C ha}^{-1}$, wobei die Unterschiede mit längerer Laufzeit der Versuche zunahmten.

SUN et al. (2011) fanden bei ihrer Untersuchung in Schottland unter gemäßigten Klimabedingungen (ähnlich jenen in Deutschland) auf einem sandigen Lehm nach 5 Jahren differenzierter Bewirtschaftung keine signifikanten Unterschiede zwischen NT, RT und CT bis in eine Tiefe von 60 cm . Dabei sind die C-Vorräte mit $160 - 170 \text{ t C ha}^{-1}$ insgesamt ca. doppelt bis dreifach so hoch wie auf den Standorten der vorliegenden Untersuchung. Signifikante Unterschiede der C-Vorräte zwischen den Varianten konnten bis in eine Tiefe von ca. 30 cm nachgewiesen werden. Diese wurden allerdings durch höhere C_{org} -Gehalte im Unterboden in den tiefer bearbeiteten Varianten ausgeglichen. Dies erklären die Autoren zum einen mit der Einarbeitung von C-reichem Material durch die Bodenbearbeitung selbst, zum anderen mit dem geringen C-Input, hauptsächlich

aus Wurzeln, welcher mit den erheblich geringeren Erträgen in den flachen Bearbeitungsvarianten (72 % bzw. 78 % im Vergleich zu CT) korrespondiere.

Trotz der Ähnlichkeit der Klimabedingungen und der Bodenbearbeitungsverfahren erscheint die Übertragbarkeit der Ergebnisse von SUN et al. (2010) auf die vorliegende Untersuchung fraglich. Dies betrifft insbesondere die erheblich niedrigeren Erträge und C-Inputs. Zudem sind die kurze Laufzeit seit Versuchsbeginn sowie die insgesamt mehr als doppelt so hohen C-Vorräte wichtige Unterschiede zwischen den Untersuchungen.

6.2.2.2 C-Gehalte

In der vorliegenden Untersuchung liegen die ermittelten C-Gehalte in der Krume im Mittel aller Beprobungstermine bei 1,02 - 1,04 % in den Varianten P und KL sowie 1,17 - 1,19 % in den Varianten D und K (vgl. Tabelle 8). Damit werden die von KOLBE & ZIMMER (2015: 18) im Rahmen einer Metastudie angegebenen Mittelwerte für Sachsen (n = 979) von 1,45 % (bei einem Tongehalt von 12-17 %) bzw. 1,57 % (bei einem Tongehalt von 17-25 %) unterschritten. Dies gilt ebenso für die Mittelwerte aus allen untersuchten Regionen Europas, welche bei 1,49 % bzw. 1,52 % liegen. Allerdings weisen die Werte erhebliche Schwankungsbreiten auf, welche vermutlich aus unterschiedlichen Auswertungsmethoden sowie weiteren Einflussfaktoren auf die Kohlenstoffgehalte (Fruchtfolge, Klima bzw. Witterung, etc.) resultieren.

Es bleibt festzuhalten, dass die am Standort Lüttewitz ermittelten C-Gehalte bzw. -Vorräte je nach Variante und Bodenart sowie Vergleichsregion um 0,3 - 0,5 % unterhalb des Durchschnitts liegen. Basierend auf Zahlen einer deutschlandweiten Untersuchung von DÜWEL & UTERMANN (2008), die bei HÜTTL et al. (2008) zusammengefasst sind, wird für den Oberboden von Ackerböden auf Löss ein Median von 2,2 % Humus genannt (n = 86), was einem C_{org} -Gehalt von 1,28 % entspricht. Dieser Wert liegt um 0,1 - 0,25 % über dem im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ermittelten Wert.

Im Rahmen der Auswertung von Dauertestflächen des Landes Sachsen durch das LFULG (2016, unveröffentlichte Daten) wurden für die Region des mittelsächsischen Lössgebietes (n = 119, Agrarstrukturgebiet 3 des Freistaates Sachsen) die folgenden Mittelwerte für die Krume (0-30 cm) errechnet:

- 1996/1997: 2,1 % Humus (= 1,22 % C_{org})
- 1999/2000: 2,3 % Humus (=1,33 % C_{org})
- 2004/2005: 2,2 % Humus (=1,28 % C_{org})
- 2009/2010: 2,6 % Humus (=1,51 % C_{org})

Die aktuellen Daten für den Zeitraum 2013-2015 ergeben für diese Region einen Mittelwert von 1,24 % C_{org} (n = 27).

Aus diesen Zahlen wird ersichtlich, dass auch im Rahmen von regelmäßigen, landesweiten Erhebungen erhebliche zeitliche Unterschiede (i.d.F. bis zu 20 %) in Bezug auf die C-Gehalte bzw. -Vorräte auftreten. Auch die im Rahmen dieser Auswertung errechneten Mittelwerte liegen zu allen Zeitpunkten über jenen vom Standort Lüttewitz.

Weiterhin liegen die in Lüttewitz ermittelten C-Gehalte deutlich unterhalb der im Rahmen der europäischen Bodenrahmenrichtlinie sowie von Cross-Compliance-Regelungen häufig genannten kritischen Untergrenze von 2 % (HÜTTL et al. 2008). Allerdings ist sowohl das Konzept von standorttypischen Humus- bzw. C-Gehalten an sich als auch die Größenordnung derselben höchst umstritten (ebd.).

In der Regel werden standorttypische Humusgehalte anhand der Parameter Tongehalt sowie Niederschlags- und Temperaturverteilung ermittelt (KOLBE & ZIMMER 2015: 16 f.). Diese reichen allerdings häufig nicht aus, um

(regionale) Unterschiede in den C-Gehalten trotz gleicher oder ähnlicher Bewirtschaftung zu erklären (HÜTTL et al. 2008). Häufig hat die mittel- und langfristige Landnutzungshistorie einen starken Einfluss auf die Humusgehalte, welche bei Landnutzungsänderung erst nach mehreren Jahrzehnten ein neues Gleichgewicht erreichen. Zudem ist, insbesondere in Gebieten mit stark ausgeprägten Reliefmerkmalen sowie erosionsbegünstigenden Bodenarten wie dem mittelsächsischen Lösshügelland, ein großer Effekt auf die Verteilung der C-Gehalte durch die Reliefposition sowie entsprechende Erosions- und Akkumulationsprozesse zu erwarten. Es erscheint fraglich, ob bei solchen Ausgangsbedingungen von standorttypischen Humusgehalten im Sinne eines flächenrepräsentativen Mittelwertes gesprochen werden kann bzw. sollte (ebd.).

Die Forderung nach dem Erhalt von standorttypischen Humusgehalten dient zudem häufig als Stellvertreter für die Gewährleistung wichtiger Bodenfunktionen wie der Stabilität des Bodengefüges oder der Bodenfruchtbarkeit. Diese können allerdings über die Erhebung entsprechender spezifischer Parameter (z. B. Aggregatstabilität, Bodenabtragsmessungen, C_{hwl} -Gehalte) häufig besser ermittelt bzw. abgesichert werden. Insbesondere die C_{hwl} -Gehalte in Verbindung mit den aufgeführten Gehaltsklassen nach SCHULZ (1997) gelten in dieser Hinsicht als sehr aussagekräftig (SPARLING et al. 1998).

Insofern werden die vergleichsweise niedrigen C_{f} -Gehalte am Standort Lüttewitz durch die hohen bis sehr hohen C_{hwl} -Gehalte, die in der Oberkrume in allen Varianten in den Gehaltsklassen D und E liegen, relativiert. Demnach ist durch die ermittelten C_{hwl} -Gehalte eine nachhaltige Versorgung des Bodens mit organischer Substanz bei hohen Erträgen gesichert. Die C_{hwl} -Gehalte in der Krume liegen zudem in der gleichen Größenordnung wie an vergleichbar produktiven, intensiv genutzten Standorten wie dem Dauerversuch in Bad Lauchstädt (SCHMIDT et al. 2015).

6.2.2.3 (Zeitliche) Schwankungen der C-Vorräte

Ähnlich wie in den genannten Voruntersuchungen am Standort Lüttewitz traten auch im Verlauf der vier Basisbeprobungstermine erhebliche Schwankungen der C-Vorräte innerhalb der Bodenbearbeitungsparzellen sowie zwischen den Terminen auf. Diese Schwankungen, welche im vorliegenden Fall bis zu 15 t C ha^{-1} innerhalb eines Jahres betragen, können in dieser Größenordnung mit Modellen wie der Humusbilanzierung bzw. dem kurz- mittelfristigen Umsatz von Ernteresten nicht erklärt werden. So geben KOLBE & ZIMMER (2015: 47) für Getreidestroh eine Humusäquivalente (HÄQ) von max. $490 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ und für das Zuckerrübenblatt von max. $170 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ an. Selbst bei dem für das Lösshügelland typischen, sehr hohen Ertragsniveau dürften die realen Werte am Standort Lüttewitz nicht viel höher als die hier angegeben liegen. Vielmehr spielen offensichtlich Prozesse eine Rolle, die von der klassischen Bilanzierung nicht erfasst werden. Auch zahlreiche weitere Autoren finden im Rahmen ihrer Untersuchungen starke Schwankungen zwischen Beprobungsterminen, welche in der Größenordnung weder zu erwarten noch mit den gängigen Bilanzierungsmethoden zu erklären sind. HÜTTL et al. (2008: 72) vertreten als Ergebnis eines Expertenworkshops sogar die These, dass landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland kein wesentliches Potenzial zusätzlicher C-Sequestrierung aufweisen, denn „*die allgemein beschriebenen Potenziale liegen im Bereich der Messfehlerbreite der Gehalte*“. BEESE (in HÜTTL et al. 2008) quantifiziert die möglichen C-Gehaltsänderungen auf $0,1 - 0,2 \% C_{\text{org}}$ bzw. $4 - 8 \text{ t C ha}^{-1}$, wobei die Veränderungen nur mit extrem hohem Aufwand statistisch zu sichern seien, da der Bestimmungsfehler aufgrund der hohen räumlichen Variabilität in der Größenordnung von $10 - 20 \%$ liege. Diese Einschätzung entspricht den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung.

Trotz dieser Unsicherheiten ist davon auszugehen, dass die ermittelten Unterschiede zwischen den Varianten in ihrer Tendenz sowie ihrer Größenordnung als repräsentativ gelten können. Dafür spricht insbesondere, dass die absoluten Unterschiede in den C-Vorräten zwischen den Varianten über alle vier Basisbeprobungstermine nahezu konstant waren. Zudem fand sich die Tendenz der Abnahme der C-Vorräte im Verlauf des Jahres 2012 bis zum Frühjahr 2013 an beiden Untersuchungsstandorten wieder und wurde in der nicht be-

wirtschafteten Referenzfläche Grünland (Methau) ebenso bestätigt. Diese zeitliche(n) Schwankung(en) kann demnach als bewirtschaftungsunabhängig bezeichnet werden.

Weiterhin wurde mittels Varianzanalyse ein signifikanter Mittelwertunterschied zwischen den Varianten D/K und P/KL über alle vier Basisbeprobungstermine festgestellt.

Die oben zitierte Aussage von KOCH (2010) kann anhand der vorliegenden Untersuchung bestätigt werden. So wird einerseits deutlich, dass bei der häufig vorliegenden begrenzten Stichprobenzahl, die Ausweisung von Signifikanzen in den Unterschieden zwischen den Varianten aufgrund von Bodenheterogenitäten häufig nicht oder nur bedingt möglich ist. Andererseits konnten die ebenfalls erwähnte Steigerung des Humus- bzw. C-Pools um 5 - 10 % sowie die sehr geringen Unterschiede zwischen den Varianten Konservierend und Direktsaat bestätigt werden.

Zugleich konnte eine starke Abhängigkeit der C-Vorräte von der Reliefposition und den damit zusammenhängenden Bodeneigenschaften festgestellt werden. In Dellen und Senken, in denen häufig kolluviale Böden auftreten, finden sich i.d.R. höhere C-Massen. Dies gilt sowohl für die Krume als auch für den Unterboden. Überträgt man erste Ergebnisse zur erhöhten C-Sequestrierung im Unterboden in Folge des Tiefpflügens von landwirtschaftlichen Flächen (ALCÁNTARA et al. 2016) modellhaft auf die, wenngleich geringmächtigere, Bedeckung von Oberböden durch Sediment, sind die starken Heterogenitäten der C-Vorräte auf der Fläche in Lüttewitz auch im Unterboden erklärbar. In diesem Sinne wären die für die Fläche dokumentierten Erosions- und Akkumulationsprozesse möglicherweise sogar als förderlich für die C-Sequestrierung zu interpretieren: In den Dellen führt die Überdeckung zu einer Stabilisierung von organischem Material im Unterboden und auf den Kuppen und an den Hängen kommt es infolge der Erosion zu einer verstärkten Humifizierung. Dies gilt allerdings nur solange, wie es in den Erosionsbereichen (jene mit negativer Sedimentbilanz) nicht zu nennenswerten Ertragseinbußen kommt, welche eine ausreichende Humusreproduktion gefährden. Vor dem Hintergrund der intensiven Düngung und der beobachteten und erwarteten Entwicklung des Klimas in der Region (KOLBE 2009: 13) wird der ausschlaggebende Faktor hierbei vermutlich weniger die zu geringe Nährstoffversorgung denn ein Wassermangel zu bestimmten Zeiten des Jahres sein.

6.2.2.4 Der Einfluss des Reliefs und der Geomorphodynamik auf die C-Vorräte am Standort Lüttewitz

Für beide Untersuchungsstandorte wurden im Rahmen der Basisbeprobungen und des Umbruchversuches (am Standort Lüttewitz) erhebliche Unterschiede in Bezug auf die C-Gehalte und -Vorräte innerhalb der einzelnen Bodenbearbeitungsparzellen festgestellt. Ebenso wiesen die C-Gehalte und -Vorräte erhebliche zeitliche bzw. saisonale Schwankungen auf.

Ein Teil dieser Unterschiede und Schwankungen lässt sich mit der in-situ-Dynamik erklären. Dabei werden, in Abhängigkeit von der Witterung bzw. Bodentemperatur und -feuchte sowie bodenchemischen Parametern boden(mikro)biologische Prozesse in Gang gesetzt. Diese führen zu einem mehr oder weniger raschen Umsatz der Erntesterne (Humifizierung) bzw. einer Mineralisierung von organischen Substanzen. In den meisten Fällen können aber die Größenordnungen der Unterschiede bzw. Veränderungen in den C-Vorräten nicht allein mit diesen Prozessen erklärt werden. Weitere denkbare Gründe sind Ungenauigkeiten bzw. Fehler bei der Probenahme und Messung, (sehr) kleinräumige Heterogenitäten sowie Umlagerungsprozesse von C-reichem Bodenmaterial.

Nach gängigen bodengenetischen Vorstellungen und Modellen bestehen starke Wechselwirkungen zwischen den beiden letztgenannten Aspekten und dem Relief. Daher werden im Folgenden die Reliefeigenschaften der Untersuchungsfläche in Lüttewitz näher dargestellt und mit den ermittelten Werten der C-Dynamik verknüpft. Um den Einfluss der Bodenbearbeitungsvarianten von den Auswirkungen des Reliefs zu trennen, werden hierbei in vielen Fällen normalisierte mittlere C_r -Gehalte bzw. -Massen verwendet. Dazu wurde zunächst ein Mittelwert je Beprobungspunkt aus den vier Basisbeprobungsterminen gebildet. Die Normalisierung erfolgte durch die Division des Punktwertes durch den jeweiligen Parzellenmittelwert. Werte < 1 zeigen also unter-

durchschnittliche Gehalte bzw. Vorräte für die jeweilige Parzelle an und Werte > 1 überdurchschnittliche. Bei dieser Vorgehensweise wird davon ausgegangen, dass die Mittelwertunterschiede zwischen den Parzellen ein Effekt der Bodenbearbeitung sind, wohingegen die Schwankungen innerhalb der Parzellen ihre Ursache in Reliefunterschieden und kleinräumig wechselnden Bodeneigenschaften haben.

Zudem erfolgten eine Berechnung der Hangneigungen sowie eine Modellierung des Oberflächenabflusses bzw. der Abflussakkumulation auf Basis des DGM 2 (GEO SN 2012). Diese wurden mit dem Programm SAGA GIS mit den Methoden *9 parameter 2nd order polynom* (nach ZEVENBERGEN & THORNE 1987) für die Hangneigungen bzw. *Kinematic Routing Algorithm* (nach LEA 1992) für die Abflussmodellierung berechnet.

Die Interpolation der Messwerte über die Untersuchungsfläche wurde mit der Methode des Kriging (regulär) durchgeführt. Der Suchradius wurde dabei auf maximal 12 Punkte bzw. 150 m Entfernung begrenzt. Da sich im südlichen Teil der Untersuchungsfläche keine Beprobungspunkte befinden und daher keine Messwerte vorliegen, konnten für diesen Bereich sowie die Ränder der Untersuchungsfläche keine zuverlässige Interpolation durchgeführt werden.

Wie im Kapitel zu den Untersuchungsstandorten bereits dargestellt, ist der Untersuchungsschlag (Abbildung 3) durch eine zentrale Kuppe sowie eine große Delle im Südosten der Fläche gekennzeichnet. Weitere Kuppen befinden sich im Südwesten sowie Norden bzw. Nordosten der Fläche. Eine weitere kleine Delle befindet sich im nordwestlichen Bereich der Fläche zwischen der zentralen Kuppe und der nördlichen Kuppe.

Auf der vom LfULG (Referat Bodenschutz) erstellten Erosionsgefährdungskarte für den Standort Lüttewitz (Abbildung 213) auf der Basis des DGM5 (GEO SN 2012) ist die Erosionsgefahr in 7 Klassen eingeteilt. In die Berechnung der Erosionsgefahr gehen die Faktoren Bodenart (K), Hanglänge (L), Hangneigung (S) und Regenerosivität (R) ein. Die ABAG-Werte (Allgemeine Bodenabtragsgleichung) geben den potentiellen langjährigen mittleren flächenhaften Bodenabtrag in t Boden ha⁻¹ Jahr⁻¹ bei fehlender Bodenbedeckung (Schwarzbrache) an. Die Berechnung des tatsächlichen Abtrags kann auf dieser Grundlage unter Berücksichtigung des C-Faktors (Bodenbedeckungs- und Bearbeitungsfaktor) erfolgen.

Auf der Basis der Faktoren KLSR wird in den steilsten Hangbereichen im Osten der Fläche in Lüttewitz die Gefährdungsklasse 7 mit potentiellen mittleren Abträgen von mindestens 130 t Boden ha⁻¹ Jahr⁻¹ erreicht. Dies entspricht bei einer Trockenrohdichte von 1,5 g cm⁻³ einer Bodenschicht von mindestens 0,87 cm Jahr⁻¹. Große Teile der vier Bodenbearbeitungsparzellen fallen in die Gefährdungsklassen 5 und 6 mit mittleren Abträgen von 30 - 55 t Boden ha⁻¹ Jahr⁻¹ bzw. 55 - 130 t Boden ha⁻¹ Jahr⁻¹. Dies entspricht bei der genannten Trockenrohdichte mittleren jährlichen Abträgen von 0,2 - 0,37 cm bzw. 0,37 - 0,87 cm. Die Gefährdungsklassen 5 - 7 sind nach DIN19708 als Flächen mit sehr hoher Erosionsgefährdung eingestuft und umfassen 38 % der ackerbaulich genutzten Fläche Sachsens (Stand Dezember 2012, LfULG 2013). In Bezug auf die Erosionsgefährdung kann die Untersuchungsfläche demnach als repräsentativ für die Bedingungen auf mehr als einem Drittel der Ackerfläche in Sachsen bezeichnet werden.

ELTNER et al. (2015: 752) berichten von Ergebnissen aus ¹³⁷Cs-Tracermessungen in einem Hangbereich der Pflugparzelle mit einer mittleren Neigung von ca. 10 % nahe dem Beprobungspunkt PZ4. Dabei wurde ein Gesamtabtrag von 32 cm Bodenmaterial in den letzten 50 Jahren (durchschnittlich 6 mm Jahr⁻¹) ermittelt, was in etwa der Ackerkrumenmächtigkeit entspricht.

Bei Untersuchungen von Rillen- und Zwischenrillenerosion zwischen Oktober 2012 und Juli 2013 wurde in dem vegetationsfreien Plot (20 x 30 m) am Oberhang in der sehr niederschlagsreichen bzw. -intensiven Phase von April bis Mitte Juni 2013 eine Tieferlegung der Bodenoberfläche um 3 mm festgestellt, was bei einer mittleren TRD von 1,5 g cm⁻³ einer Bodenmasse von 45 t ha⁻¹ entspricht. Bei einem C_{org}-Gehalt von ca. 1 % entspricht dies 0,45 t C ha⁻¹. In der Phase von Mitte Juni bis Ende Juli 2013 wurde ein weitere Tieferlegung der Oberfläche um 8,1 mm ermittelt, was einer Bodenmasse von 121 t ha⁻¹ und einer C_{org}-Masse von 1,21 t ha⁻¹ entspricht. Während über den Winter und das Frühjahr die flächenhafte bzw. Zwischen-Rillen-Erosion eine

Hauptrolle spielte, wurde im Sommer 2013 hauptsächlich Rillenerosion festgestellt (ebd.). Zugleich kam es in dieser Phase zu einer Akkumulation von Bodenmaterial im Zwischen-Rillen-Bereich sowie in tiefer gelegenen Hangbereichen bzw. in Bereichen von natürlichen Barrieren (Vegetation). Für den Bereich der zentralen Kuppe wurde zudem, wahrscheinlich aufgrund der dort höheren Grobbodenanteile nebst einer höheren Zahl an Makroporen, eine deutliche geringe Erosionsneigung beobachtet (ebd.).

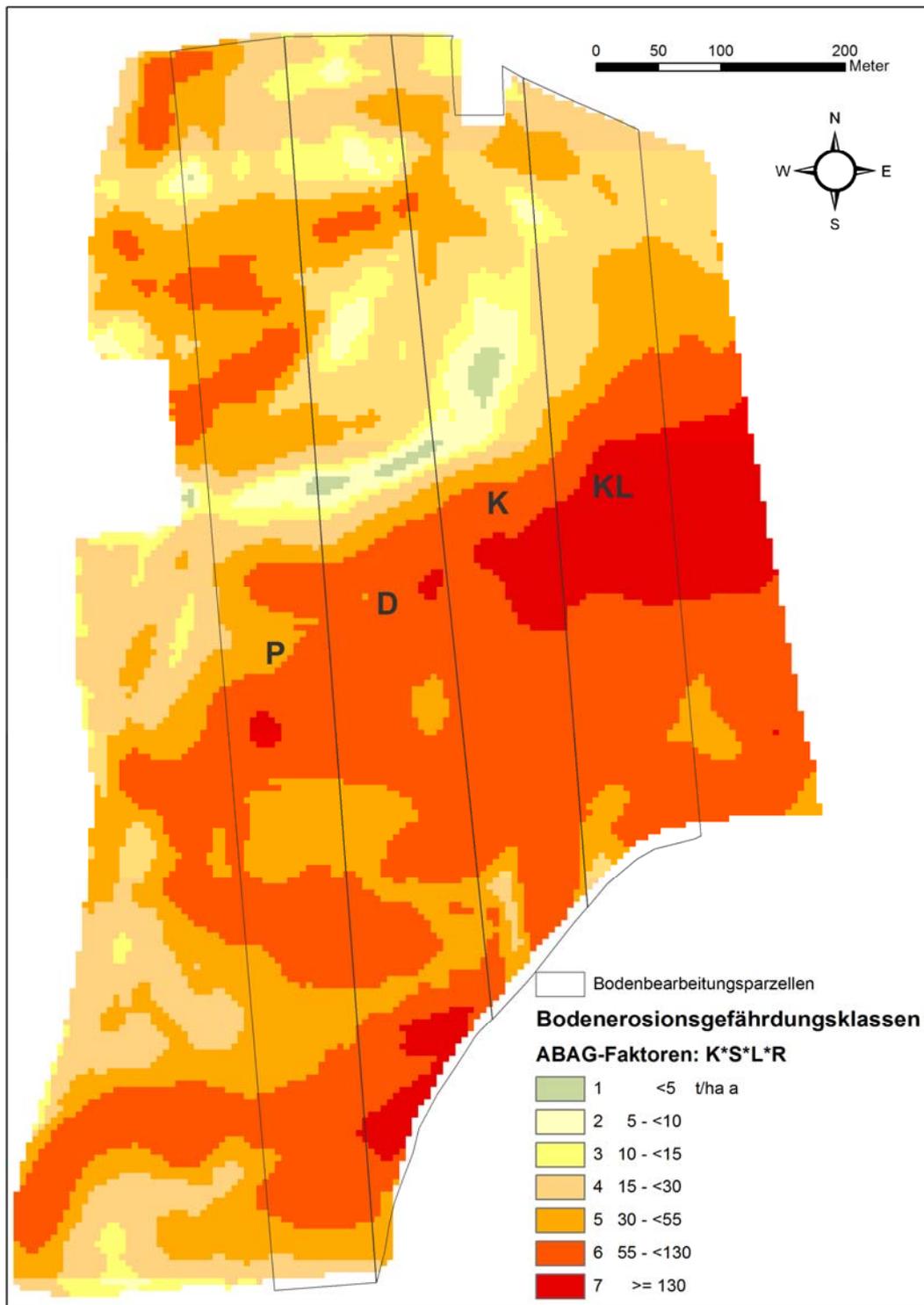


Abbildung 213: Verbreitung von Erosionsgefährdungsklassen am Untersuchungsstandort Lüttewitz, Auflösung 5 m (Datengrundlage: LfULG 2016, eigene Darstellung)

Die aus dem Digitalen Geländemodell berechneten Hangneigungen erreichen Werte von max. 15 % und wurden für Abbildung 214 in die Hangneigungsklassen NO - N3 nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (AG BODEN 2005: 58) eingeteilt. Große Teile des Schlages fallen in die Hangneigungsklasse N2 (3,5 - 9 %). Südlich der zentralen Kuppe werden die höchsten Neigungen in der Klasse N4 (9 - 18 %) erreicht, nördlich der Kuppe finden sich die größten relativ ebenen Bereiche in den Klassen N0 (< 2 %) und N1 (2 - 3,5 %).

Zur Einordnung der folgenden Ausführungen sind in Tabelle 18 die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen der C_T -Gehalte in der Oberkrume (oberste 750 t Boden ha^{-1} bzw. 0 - 5 cm) sowie jene der C_T -Gesamtmassen (9000 t Boden ha^{-1}) über die vier Basisbeprobungstermine dargestellt.

Tabelle 18: Kennzahlen der C-Gehalte bzw. -Vorräte am Standort Lüttewitz im Rahmen der 4 Basisbeprobungstermine

Parzelle	Mittelwert C_T -Gehalt in 0-5 cm [%]	Standardabweichung C_T - Gehalt in 0-5 cm [%]	Mittelwert C_T - Gesamtmasse [t ha^{-1}]	Standardabweichung C_T -Gesamtmasse [t ha^{-1}]
P	1,03	0,09	61,05	7,59
D	2,00	0,31	70,44	8,51
K	1,67	0,27	69,42	6,03
KL	1,36	0,14	61,10	6,51

Dabei kann zunächst kein deutlicher Zusammenhang der Größe der C_T -Vorräte mit den Hangneigungsklassen festgestellt werden. So finden sich beispielsweise die Punkte mit den größten C_T -Massen in allen drei Hangneigungsklassen N0 - N2. Es kann also kein direkter Zusammenhang zwischen den Parametern C_T -Vorräte und Hangneigung festgestellt werden. Dieses Ergebnis bestätigt die Interpretation von Abbildung 44. Zusätzlich zu den Hangneigungen wurden die potentiellen Abflussbahnen bzw. kumulierten Abflüsse modelliert (Abbildung 215). Auffällig sind dabei die großen Abflussbahnen im zentralen und östlichen Teil der Fläche, welche sich im Bereich der südöstlichen Delle vereinigen. Eine weitere, nach Westen gerichtete Abflussbahn wurde für die relativ ebenen Bereiche im Nordwesten der Fläche modelliert.

Zunächst liegt die Vermutung nahe, dass im Bereich der reliefbedingten Abflussbahnen C-reiches Oberbodenmaterial erodiert wird und es daher zu Reduzierung der C_T -Gehalte (im Oberboden) kommt. Die Werte für die normalisierten (s. o.) mittleren C_T -Massen in den obersten 750 t Boden ha^{-1} (ca. 0 - 5 cm) sind jedoch gerade in jenen Bereichen des Schlages überdurchschnittlich hoch, in denen sich die modellierten Abflussbahnen befinden (Abbildung 216). Dies betrifft insbesondere die Beprobungspunkte P1, P2, DZ1, D2, K2, K6, KLZ1, KL3, KL4, KLZ2 und KL6. Die meisten Beprobungspunkte mit unterdurchschnittlichen C_T -Massen liegen außerhalb der Abflussbahnen. Einzelne Punkte bilden allerdings auch Ausnahmen zu diesem Muster, insbesondere die Punkte PZ1, D2, KZ3, KL5 und KLZ3. Die Schwankungsbreite beträgt dabei in der Oberkrume in beide Richtungen maximal ca. 15 %.

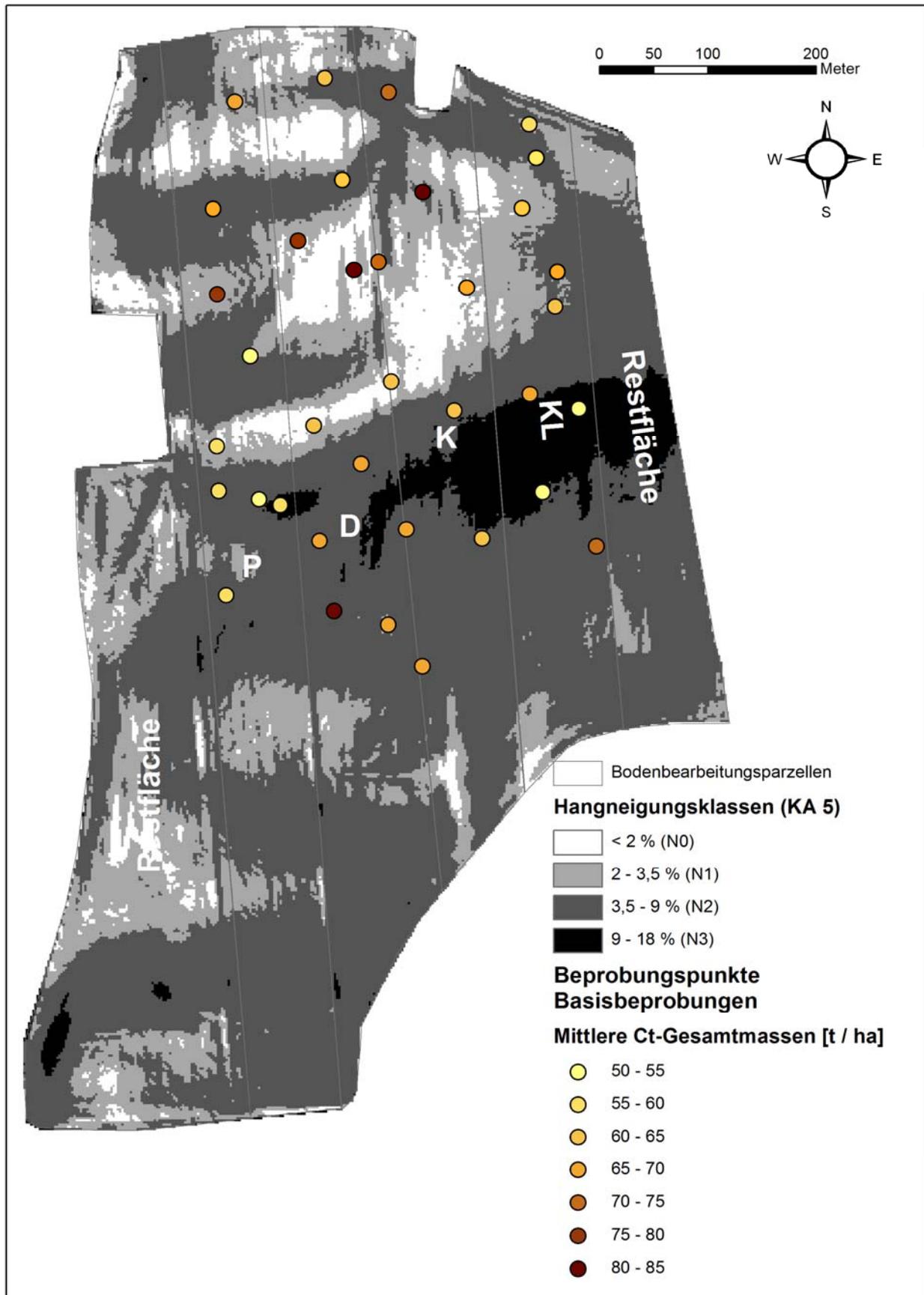


Abbildung 214: Klassifizierte Hangneigungen in der Fläche sowie mittlere Kohlenstoffvorräte an den Basisbeprobungspunkten am Untersuchungsstandort Lüttewitz

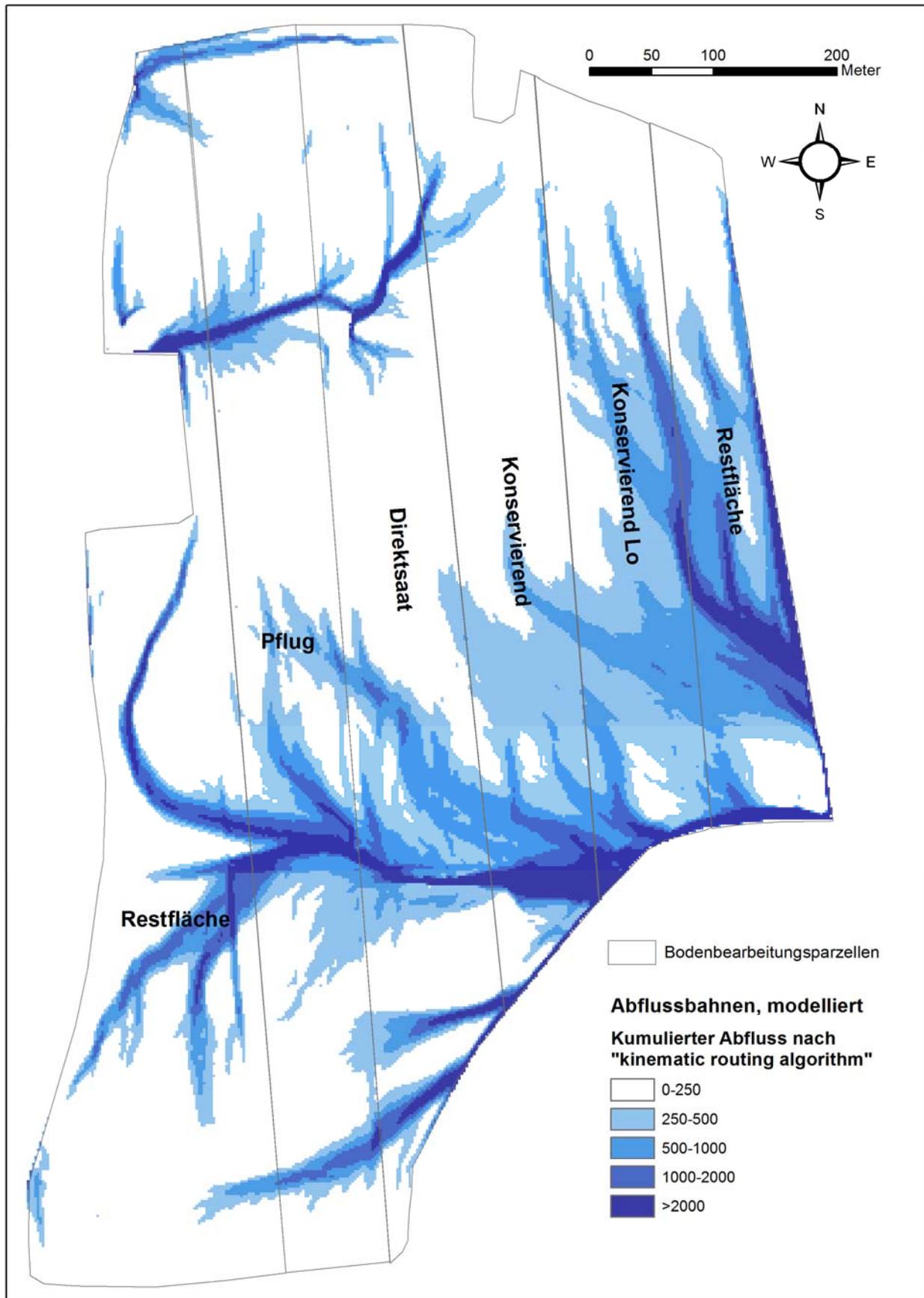


Abbildung 215: Modellierte kumulierte Abflussmengen nach "kinematic routing algorithm" am Untersuchungsstandort Lüttewitz auf Basis des DGM2 (GeoSN)

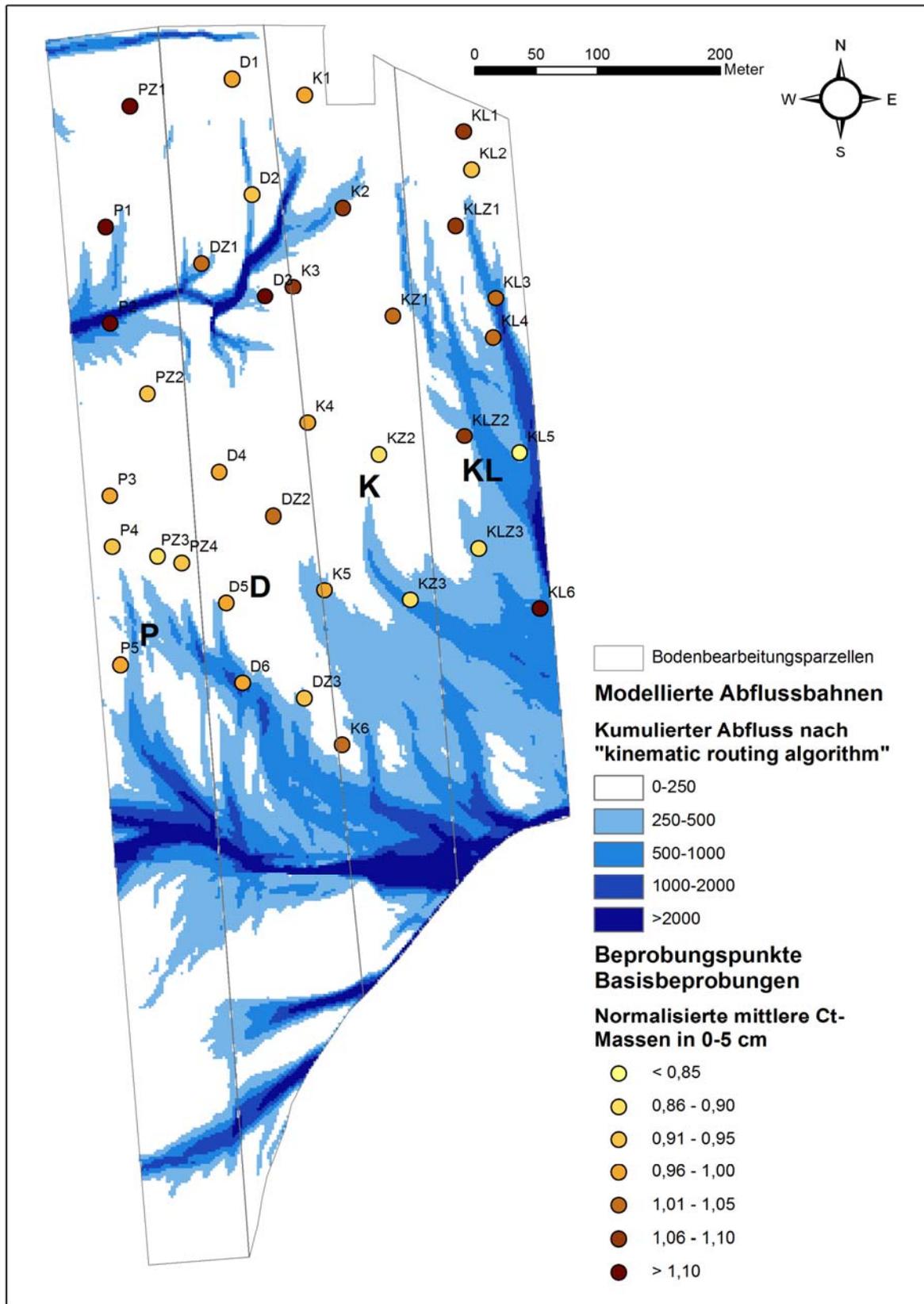


Abbildung 216: Modellierte Abflussbahnen sowie normalisierte mittlere Kohlenstoffvorräte in der Oberkrume (0-5 cm) an den Basisbeprobungspunkten am Untersuchungsstandort Lüttewitz

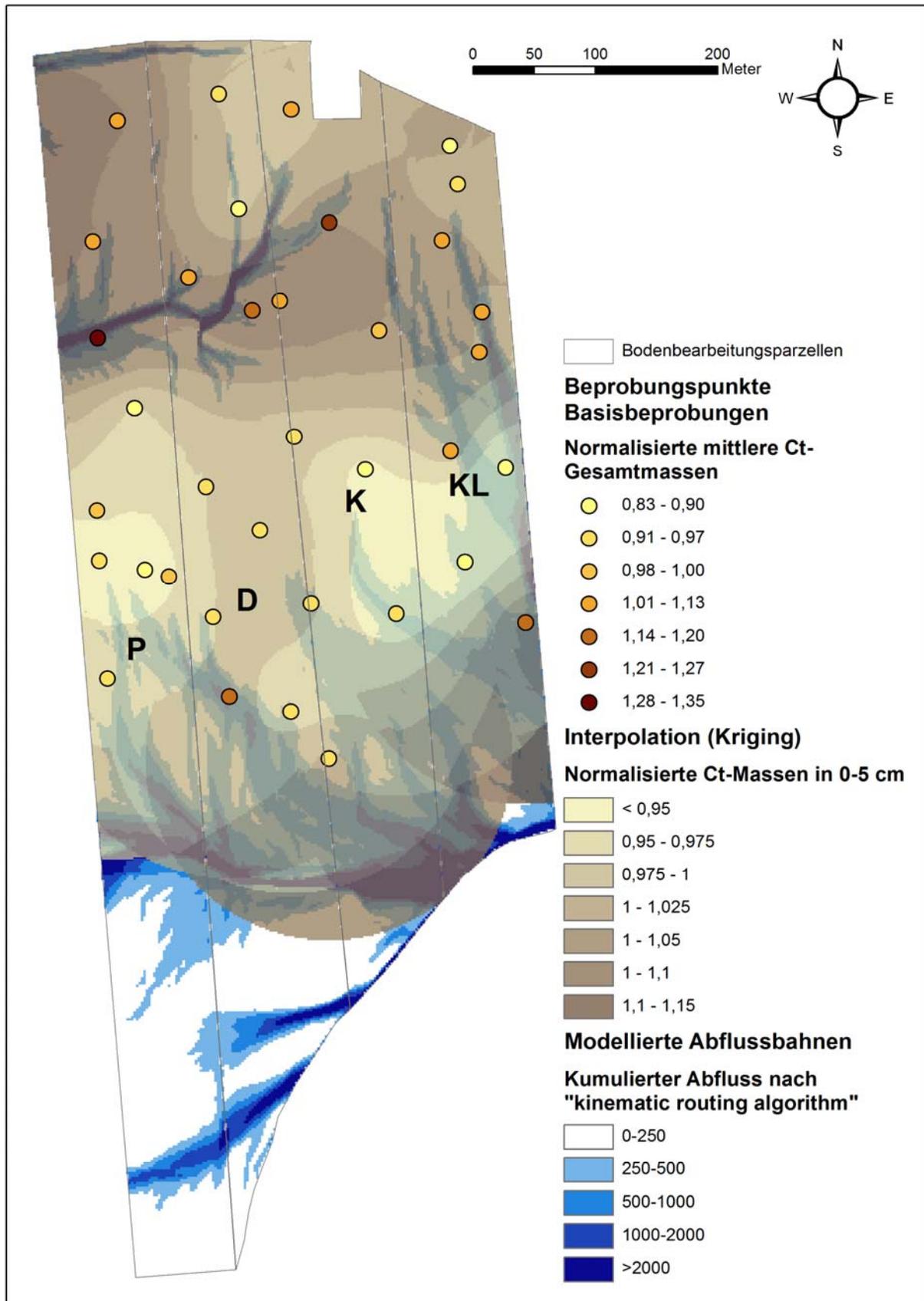


Abbildung 217: Modellerte Abflussbahnen, interpolierte räumliche Verteilung der normalisierten, mittleren Ct-Massen in der Oberkrume (0-5 cm) sowie normalisierte mittlere Ct-Gesamtmassen an den Basisbeprobungspunkten am Untersuchungsstandort Lüttewitz

Die normalisierten mittleren C_T -Massen in dieser obersten Beprobungsschicht wurden zudem in die Fläche interpoliert (Abbildung 217).

Dabei wurden insbesondere im Norden bzw. Nordwesten der Fläche die Bereiche mit den höchsten C_T -Massen im Oberboden ermittelt. Dieser Bereich weist eine große Deckung mit dem Bereich auf, in dem in der BK 50 die Verbreitung von Kolluvien kartiert wurde. Weiterhin sind in **Abbildung 217** die normalisierten mittleren C_T -Gesamtmassen (in 9000 t Boden ha⁻¹) an den einzelnen Beprobungspunkten dargestellt. Es wird deutlich, dass keine großen Unterschiede zwischen den C_T -Verteilungen an der Oberfläche und im Gesamtprofil bestehen. Auch in Bezug auf die C_T -Gesamtmassen befinden sich die Bereiche mit überdurchschnittlichen Werten im Norden bzw. Nordwesten der Fläche sowie vereinzelt im Bereich der Abflussbahnen südlich der zentralen Kuppe. Ähnliches gilt für die C_T -Massen im Unterboden (nicht dargestellt).

Entgegen der Eingangsvermutung scheinen also die (modellierten) Abflussbahnen (Tiefenlinien) im Saldo eher Akkumulationsgebiete als Erosionsgebiete von C-reichem Oberbodenmaterial darzustellen. Die Tatsache, dass sich diese Verteilung der C_T -Massen bis auf den Unterboden erstreckt, spricht zudem dafür, dass es sich hierbei nicht nur um eine saisonale bzw. kurzfristige, sondern um eine langfristige Dynamik handelt. Vermutlich wird nur bei einzelnen Starkregenereignissen die Transportkapazität erreicht, tatsächlich C-reiches Oberbodenmaterial auszuräumen. In der Regel sind die Tiefenlinien eher Akkumulationsgebiet von in angrenzenden Bereichen erodiertem Bodenmaterial.

Zur Überprüfung dieser These wurde die jeweilige normalisierte Standardabweichung der C_T -Massen an den Beprobungspunkten ermittelt (Abbildung 218). Bei der Berechnung wurde, analog zur Normalisierung der C_T -Massen, die Standardabweichung über die vier Basisbeprobungstermine mit der mittleren Standardabweichung je Variante verrechnet.

Große normalisierte Standardabweichungen wurden für den Bereich des Kolluviums nördlich der zentralen Kuppe ermittelt, insbesondere an den Beprobungspunkten P2, PZ2, DZ1, D3 und K3. An den Punkten P5, D5, KLZ1, KL4 und KL6, die ebenfalls überdurchschnittlich hohe Standardabweichungen aufweisen, wurden Abflussbahnen modelliert. Sie liegen also in Bereichen hoher potentieller Geomorphodynamik. Eine deutliche Ausnahme bildet der Punkt KZ2, welcher am Oberhang südlich der zentralen Kuppe liegt und weder im Bereich einer Abflussbahn liegt noch überdurchschnittliche C_T -Gesamtmassen aufweist. Hinzu kommen mehrere, in modellierten Abflussbahnen gelegenen Beprobungspunkte (D2, D6, K2, K5, KL3), an denen trotz durchschnittlicher bis überdurchschnittlicher C_T -Gehalte im Oberboden bzw. C_T -Gesamtmassen nur durchschnittliche bis unterdurchschnittliche Standardabweichungen auftreten. An diesen Punkten hat es, möglicherweise aufgrund der reduzierten Bodenbearbeitung, keine starken kurzfristigen Schwankungen der C-Vorräte aufgrund von Oberflächenprozessen gegeben.

Trotz einzelner Ausnahmen wird in der Mehrzahl der Beprobungspunkte anhand der normalisierten Standardabweichungen das oben eingeführte Modell bestätigt und kann erweitert wie folgt formuliert werden:

In Bereichen erhöhter Geomorphodynamik, welche aus dem DGM anhand modellierter Abflussbahnen identifiziert werden können und häufig mit der Verbreitung von Kolluvien korrelieren, sind die zeitlichen Schwankungen der C_T -Vorräte i.d.R. größer als in den geomorphologisch stabileren Flächenanteilen. Dabei sind in den erstgenannten Bereichen auch die C_T -Gehalte im Oberboden sowie die C_T -Gesamtmassen häufig höher. Die Akkumulation von C-reichem Bodenmaterial ist in diesen Bereichen also in der Summe größer als die Erosion, wenngleich es, je nach Bodenbearbeitungsvariante und Niederschlagsintensität, auch vereinzelt zu erheblichem Austrag von Bodenmaterial aus den einzelnen Parzellen bzw. dem Schlag kommen kann.

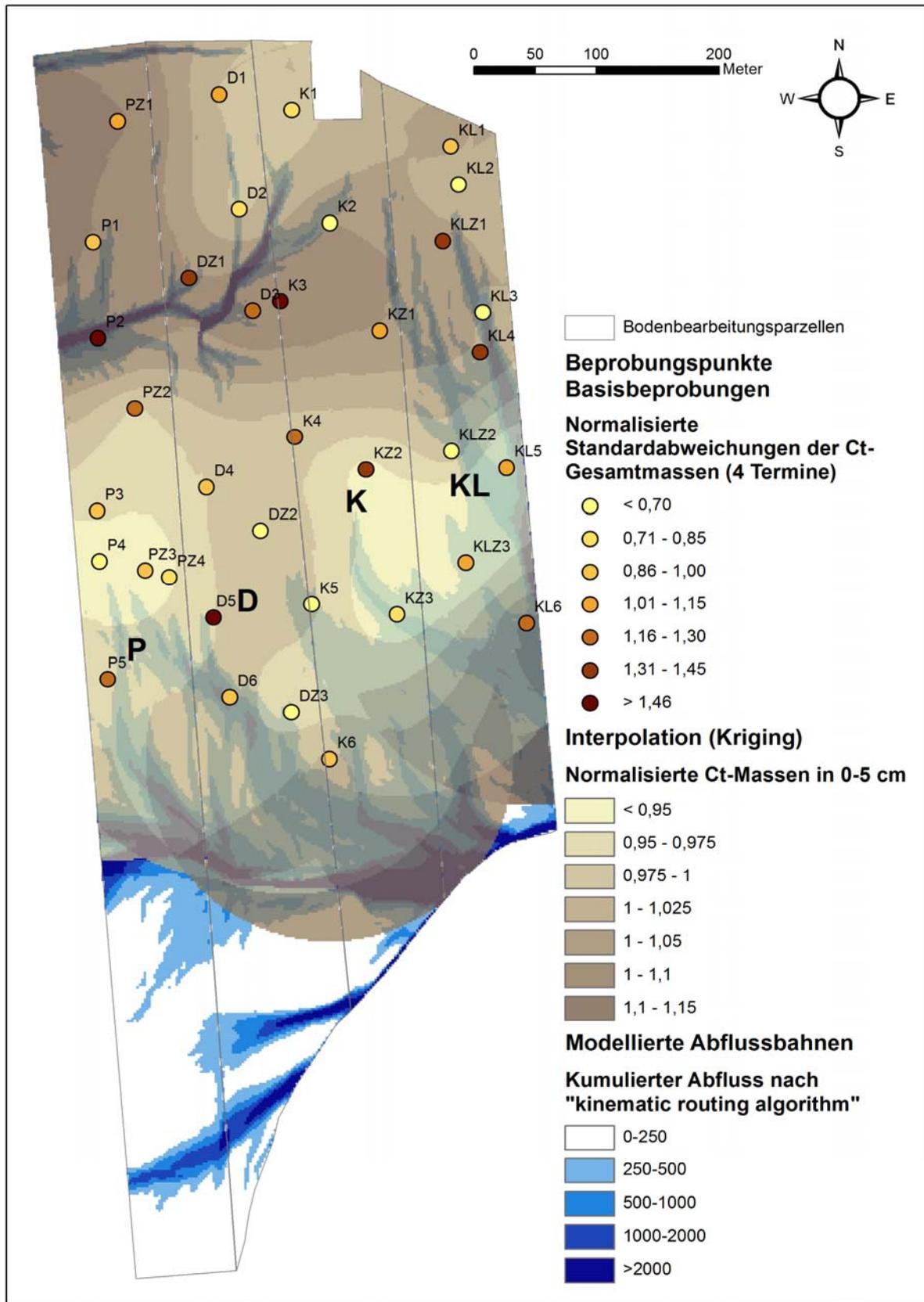


Abbildung 218: Modellierte Abflussbahnen, interpolierte räumliche Verteilung der normalisierten, mittleren Kohlenstoffvorräte in der Oberkrume (0-5 cm) sowie normalisierte mittlere Standardabweichungen der Ct-Gesamtvorräte an den Basisbeprobungspunkten am Untersuchungsstandort Lüttewitz

6.2.2.5 N-Vorräte

Die N_t -Vorräte am Standort Lüttewitz folgen bei Werten zwischen 9 und 10 t ha⁻¹ der gleichen Verteilung wie die C-Vorräte. So weisen die Varianten D und K um etwa 10 % (ca. 1 t ha⁻¹) größere N_t -Vorräte auf als die Varianten P und KL. Die Ursachen dieser mittleren Stickstoffanreicherung von ca. 1 t ha⁻¹ in den Varianten D und K bleiben zunächst unklar.

Bilanziert man die N-Abfuhr mit der Ernte des Hauptproduktes aus den jeweiligen Parzellen anhand der Erträge und Standard-Nährstoffgehalten nach KTBL (DÖHLER 2009), so ergibt sich für den Zeitraum 2002-2015 eine N-Abfuhr von 1941 kg ha⁻¹ in der Variante Pflug, 1881 kg ha⁻¹ in der Variante Direktsaat, 1923 kg ha⁻¹ in der Variante Konservierend und 1806 kg ha⁻¹ in der Variante Konservierend Locker. Für diesen Zeitraum beträgt der Unterschied also maximal 100 kg N ha⁻¹, wobei in der Variante KL die geringsten Entzüge vorliegen, diese Parzelle jedoch zugleich relativ niedrige Vorräte aufweist. Für den Zeitraum 1992-2002 liegen keine Ertragsdaten vor, sodass die Unterschiede möglicherweise durch Ertragsunterschiede in den ersten Jahren des Versuches begründet sind.

Zudem schwanken die ermittelten N_t -Massen zwischen den Beprobungsterminen innerhalb der Parzellen erheblich (bis zu 10 % bzw. 1 t ha⁻¹). Neben der Düngung und dem Entzug mit der Ernte scheinen also auch weitere Faktoren einen erheblichen (kurzfristigen) Einfluss auf die N-Vorräte und deren zeitlicher Dynamik zu haben. Dazu könnte, nach neuesten Ergebnissen, eine bodenbearbeitungsbedingte Differenzierung der Lachgasemissionen als Folge der Denitrifikation gehören (DON 2016), wobei aktuell eher von einer Erhöhung der Emissionen nebst N-Verlusten bei RT/NT-Systemen im Vergleich zur wendenden Bodenbearbeitung ausgegangen wird. Als weiterer Unsicherheitsfaktor ist, ähnlich wie bei den C-Vorräten, eine erhebliche Heterogenität in Bezug auf die Stoffvorräte bzw. -verteilung innerhalb der Untersuchungsfläche anzusehen.

6.3 Kohlen- und Stickstoffvorräte sowie Variantenvergleich am Standort Methau

6.3.1 Bewertung und Einordnung der Daten aus Voruntersuchungen

Die Ausgangsdaten für den Standort Methau (SCHMIDT 1993) wurden im Kapitel Untersuchungsstandorte vorgestellt (vgl. Tabelle 6). Zum Vergleich mit den für die vorliegende Untersuchung beprobten Bereichen am Mittelhang wurde der Mittelwert aus den für die Hangabschnitte Oberhang und Unterhang angegebenen Werten gebildet. Daraus ergeben sich für die Krume (0-30 cm) C-Gehalte von 1,03 % für Block 1, 1,24 % für Block 2 und 1,10 % für Block 3. Für den Unterboden (30-60 cm) liegen die entsprechenden C-Gehalte bei 0,45 % in Block 1, 0,37 % in Block 2 und 0,41 % in Block 3. Die mittleren C-Gehalte sind demnach in Block 2 in der Krume am höchsten und im Unterboden am geringsten. Da keine Trockenrohdichten erhoben wurden, erfolgte auch keine Umrechnung der Gehalte in Vorräte. Zudem wurden keine Grobbodenanteile (> 2 mm) ermittelt bzw. berücksichtigt.

Im Rahmen der Versuchsanlage wurden die in der Folge differenziert bearbeiteten Streifen bzw. Parzellen nicht getrennt untersucht, sodass keine abgesicherten Aussagen über mögliche Unterschiede in den C-Gehalten bzw. -Vorräten zwischen den Parzellen getroffen werden können. Es wird anhand der Daten aber ersichtlich, dass sowohl in Längs- als auch in Querrichtung des Hanges sowie mit der Tiefe erheblich Veränderungen sowie Heterogenitäten der C-Gehalte bzw. -Vorräte vorlagen. Dabei wurden die jeweils niedrigsten C-Gehalte in der Krume in Block 1 am Oberhang, in Block 2 am Hangfuß und in Block 3 am Unterhang ermittelt. Aufgrund der bis zu diesem Zeitpunkt homogenen Bewirtschaftung der Fläche sowie des relativ homogenen Reliefs müsste man in allen drei Blöcken ähnliche geomorphologische und bodenchemische Prozessdynamiken vermuten, die zu vergleichbaren Verteilungen der C-Gehalte führen sollten. Da dies nicht der Fall ist, haben die bewirtschaftungs- und reliefunabhängigen Bodeneigenschaften sowie deren Heterogenitäten offensichtlich einen erheblichen Einfluss auf die C-Dynamik.

Möglicherweise spielen am Standort Methau die Heterogenitäten der Tongehalte eine wichtige Rolle in Bezug auf die Stabilisierung von C_{org} im Boden. Gemeinhin wird ein positiver Zusammenhang zwischen den Tongehalten und den Gehalten an C_{org} konstatiert (KOLBE & ZIMMER 2015: 13).

MÜLLER & HÖPER (2004) konnten diesen Zusammenhang jedoch im Rahmen ihrer Untersuchungen, die aus einer Literaturliteraturauswertung und eigenen Erhebungen auf niedersächsischen Böden bestehen, nur sehr eingeschränkt nachweisen. Insbesondere für die untersuchten Ackerstandorte war dieser Zusammenhang nicht signifikant. Dies führen die Autoren insbesondere auf die dominierenden Effekte der intensiven Bewirtschaftung auf die C_{org} -Gehalte zurück, welche einen möglichen Einfluss der Tongehalte überdecken. Ein deutlicher, positiver statistischer Zusammenhang ergab sich jedoch für den Tongehalt und die C_{mik} -Gehalte, wohingegen die spezifische mikrobielle Aktivität (metabolischer Quotient) mit steigenden Tongehalten abnahm. Der Grund hierfür könnte die Schaffung von stabilen Lebensbedingungen in Mikrohabitaten sein, welche eine große Mikrobenpopulation ermöglichen. Die geringe spezifische Aktivität weist auf stabile Lebensbedingungen ohne Stressfaktoren hin.

Grundsätzlich sind, laut MÜLLER & HÖPER (2004), viele landwirtschaftliche Böden Deutschlands mit relativ hohen Schluff- und Tongehalten hochproduktive Standorte, welche durch hohe Erträge und C-Inputs durch Wurzeln und Erntereste gekennzeichnet sind. Diese haben hohe C_{mik} -Gehalte und entsprechende Umsatzprozesse zur Folge.

6.3.2 Einordnung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung

Die am Standort Methau ermittelten C-Vorräte liegen mit ca. 60 t C ha^{-1} in den bewirtschafteten Varianten in der gleichen Größenordnung wie am Standort Lüttewitz. Auch die saisonale Dynamik, insbesondere die Abnahme der Vorräte im Verlauf des Jahres 2012 bis zum Frühjahr 2013, ist sehr vergleichbar, nicht zuletzt auch zum ebenfalls beprobten Grünland. Aufgrund der Minimalbewirtschaftung der Variante G (nur Mahd) kann dies kein Effekt der Bodenbearbeitung bzw. Bewirtschaftung sein. Vermutlich ist die Abnahme mit dem sehr langen und kalten Winter 2012/2013 zu erklären, welcher einen Umsatz der organischen Reste aus dem Jahr 2012 verzögert hat.

Im Gegensatz zum Standort Lüttewitz konnten in Methau, mit Ausnahme von Block 3, keine bodenbearbeitungsbedingten Unterschiede in den C-Vorräten festgestellt werden. In Methau werden die höheren C-Gehalte bzw. -Massen in der Oberkrume der Varianten K durch entsprechend höhere C-Gehalte bzw. -Massen in der Unterkrume der Variante P ausgeglichen. Dabei treten allerdings erhebliche Unterschiede zwischen den Blöcken auf, welche insbesondere auf die Bodenheterogenität des Standortes zurückzuführen ist. Zudem spielen vermutlich Fruchtfolgeeffekte eine Rolle. So wurde, aufgrund der über den Versuch rotierenden Fruchtfolge, in Block 2 sowohl im Herbst 2012 als auch im Herbst 2015 jeweils direkt nach Maisanbau beprobt, im Block 1 hingegen erst zwei Jahre nach Maisanbau.

Die C-Massen im Grünland liegen mit ca. 90 t ha^{-1} um etwa 50 % über jenen der bewirtschafteten Varianten und geben einen Hinweis darauf, in welcher Größenordnung sich die C-Vorräte bei einer Nutzungsänderung von Acker- in Grünland innerhalb von ca. 20-25 Jahren erhöhen würden. Allerdings unterliegen auch diese Vorräte erheblichen saisonalen Schwankungen.

Am Standort Methau bestehen aufgrund der relativ hohen und sowohl mit der Tiefe als auch in der Fläche stark schwankenden Grobbodenanteile erhebliche Unsicherheiten bei der Berechnung von Stoffvorräten. Zur Absicherung der hier vorgelegten Ergebnisse sowie ihrer Übertragung in die Fläche ist eine möglichst hochaufgelöste separate Ermittlung der Grobbodenanteile nötig. Auf dieser Basis könnten die ermittelten Stoffvorräte anhand der erstellten Tabellen für die gewünschten Flächenanteile bilanziert werden.

Die N_f -Vorräte in Methau liegen in den bewirtschafteten Varianten zwischen 8 und 9 t ha^{-1} . Analog zu den C_f -Massen weist dabei die Variante P in Block 3 etwas geringere N_f -Vorräte als die anderen Parzellen auf. Inse-

samt konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten festgestellt werden. In Bezug auf die Entwicklung der N_t -Vorräte bei Nutzungsänderung zu Grünland kann ein erheblicher Anstieg der Vorräte auf ca. 11 t ha^{-1} innerhalb von 20 - 25 Jahren erwartet werden, der prozentual allerdings etwas geringer ausfällt als bei C_{org} .

6.4 Einfluss von Klimaänderungen auf die Entwicklung der C-Vorräte

HÜTTL et al. 2008 (33 ff.) erwarten durch den Trend zu höheren Jahresmitteltemperaturen in Verbindung mit längeren Vegetationsperioden eine Erhöhung der Nettoprimärproduktion, welche das Potential für einen Humusaufbau mit sich bringt. Zugleich seien aber auch höhere Mineralisationsraten zu erwarten. Vermutlich muss die Entwicklung regionalklimatisch differenziert werden und ist zudem von der Witterung der Einzeljahre abhängig: Bei klimatischen Extrembedingungen, insbesondere Sommerdürre wie z.B. im Jahr 2003, sinkt die Nettoprimärproduktion und es kann in der Folge zum Rückgang der Humusvorräte kommen.

Bei dem für den Osten Deutschlands prognostizierten zunehmenden Wasserdefizit im Frühsommer und Sommer (HÜTTL et al. 2008), welches beispielsweise im Jahr 2016 mit 260 mm Niederschlag von April bis Juli (langjähriges Mittel: 341 mm) an der Klimastation Nossen vorlag, sind die NT- und RT-Varianten aufgrund der höheren Wasserspeicherfähigkeit ackerbaulich im Vorteil gegenüber der CT-Variante. Dies hatte, nach dem Bericht des Bewirtschafters des Versuchsstandortes Lüttewitz D. KUNZENDORF (mündliche Mitteilung 29.08.2016), erhebliche Auswirkungen auf die Erträge des Winterweizens, welche in der Varianten D (NT) um 5 - 10 % höher lagen als in der Varianten P (CT). Mittel- und langfristig könnten die damit einhergehenden größeren Strohmenngen bei ähnlichen Witterungsverhältnissen zu einer stärkeren Differenzierung der C_{org} -Massen zwischen den Varianten führen.

Laut HÜTTL et al. (2008) sind jedoch die Auswirkungen der erwarteten Klimaveränderungen auf die Nettoprimärproduktion, auch und gerade im Ackerbau, wissenschaftlich noch stark umstritten. Untersuchungen zu diesem Thema finden aktuell z.B. an der Versuchsstation Bad Lauchstädt in der Global Change Experimental Facility statt (UFZ 2016).

6.5 Auswirkungen des periodischen Pflugeinsatzes auf die C-Dynamik

Am Standort Lüttewitz wurden zusätzlich zum Vergleich der C- und N-Vorräte im Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten die Auswirkungen des ein- bzw. zweimaligen Pflugeinsatzes in langjährig in Direktsaat bestellten Parzellen untersucht. Dabei konnte die Ausgangshypothese der raschen Re-Mineralisierung der aufgebauten C-Vorratsunterschiede (STOCKFISCH et al. 1999) nicht bestätigt werden. Vielmehr zeigt die umgebrochene Variante (DP) einen ähnlichen zeitlichen bzw. saisonalen Verlauf der Entwicklung der C-Vorräte wie die Direktsaatvariante (D), bei geringfügig niedrigeren C-Vorräten als diese.

Statisch wurde sowohl für die zweimal umgebrochenen Pflugstreifen DP1-DP3 als auch für die einmalig umgebrochenen Pflugstreifen DP4-DP6 eine homogene Untergruppe mit der Variante D in Abgrenzung zur Variante P ausgewiesen. Es bestehen allerdings auch hier erhebliche Einflüsse des Reliefs und der Geomorphodynamik auf die C-Vorräte sowie deren Dynamik.

Diese Ergebnisse entsprechend jenen von PIERCE et al. (1994), die ebenfalls bei einem geringen Rückgang der C-Vorräte nach Umbruch im Vergleich zum NT-System insbesondere große jährliche Schwankungen der C-Vorräte feststellten, welche in der gleichen Größenordnung wie die Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten lagen.

Die Ergebnisse der reliefabhängigen Auswertung innerhalb der Bodenbearbeitungsvarianten (Abbildung 51 bis Abbildung 60) bestätigen jene des Vergleichs der Bearbeitungsvarianten in den Reliefpositionen. So existiert, unabhängig von der Bodenbearbeitung, ein deutlicher Unterschied in den C-Vorräten in Abhängigkeit von der Reliefposition. Dieser Unterschied ist in der Variante Pflug am deutlichsten ausgeprägt. Der Anstieg der C-Vorräte zum Frühjahr 2014 hingegen ist in allen drei Varianten und allen drei Reliefpositionen ermittelt worden, wobei er in der Reliefposition Delle am stärksten ausfällt. Dies könnte mit der Akkumulation von humusreichem Oberbodenmaterial im Verlauf des Winters zusammenhängen. In der Reliefposition Hang in der Pflugvariante (PU2) gingen die C-Vorräte bis zum Frühjahr 2014 erheblich zurück, möglicherweise aufgrund von Erosion. Kurz nach der Beprobung in Folge des Umbruchs fand, nach einem vergleichsweise trockenen Sommer, ein Starkniederschlagsereignis statt (10.10.2013, 29 mm innerhalb von 24 Stunden).

Im Verlauf des Winters 2014/2015 kam es im Pflugstreifen DP2 sowie an den Punkten PU1, PU2, PU3 und DU1 zu starken Abnahmen der C-Vorräte, welche im Gegensatz zur auf Basis des Vorjahres erwarteten Entwicklung stehen. Aufgrund der Ähnlichkeit der Witterung zum Winter 2013/2014 handelt es sich vermutlich um einen Effekt der Fruchtfolge. So begann im Herbst 2013 bereits Ende August der Umsatz des Weizenstrohs, wohingegen der Abbau der Rübenblätter erst ab Ende Oktober 2014 begann, was in die Zeit der Bodenruhe fällt. Zudem sind auch hierbei Effekte von Oberflächenabtrag nicht auszuschließen, insbesondere aufgrund der relativ unbedeckten Bodenoberfläche im Winter nach der Zuckerrübe. Allerdings wurden im Winter 2014/2015 keine Starkniederschläge (> 25 mm innerhalb von 24 h) aufgezeichnet.

Die Abnahme der C-Vorräte nach Zuckerrübenanbau wird auch von anderen Autoren beschrieben. So kann es nach ROGASIK et al. (2008 in HÜTTL et al. 2008: 145) durch den Anbau von Zuckerrüben zu einem Rückgang der C-Vorräte um mehr als $700 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ kommen. HÜTTL et al. selbst (2008: 180) geben bei Zuckerrübenanbau Werte für die Veränderung der C-Vorräte von $-0,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$, bei Belassen der Blattrückstände auf der Fläche von $-0,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ an. Für Wintergetreide lauten die entsprechenden $-0,3 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$, mit Strohrückständen $+0,3 \text{ t C ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$. Auch KOLBE & ZIMMER (2015: 14) geben für Hackfrüchte negative Humusäquivalente von $500 - 900 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ an. Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ermittelten Rückgänge der C-Vorräte liegen allerdings um ein Vielfaches höher als diese Werte und sind daher vermutlich das Ergebnis von Umlagerungsprozessen und/oder primären Flächenheterogenitäten.

Die These der kurzfristigen, (nahezu) vollständigen Re-Mineralisierung der durch RT/NT-Systeme aufgebauten höheren C-Vorräte konnte, entgegen dem aktuellen Stand der Forschung und der Eingangshypothese, im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht bestätigt werden. Um diese Ergebnisse mittel- und langfristig abzusichern, ist es sinnvoll, die umgebrochenen Pflugstreifen sowie die Referenzpunkte am Standort Lüttewitz in gewissen zeitlichen Abständen einer erneuten Untersuchung zu unterziehen.

Durch den Umbruch kam es, unabhängig von der Entwicklung der C-Vorräte, zu einer Erhöhung der Erosionsanfälligkeit durch die Zerstörung von Bodenaggregaten sowie zu einer Veränderung der Bodenqualität und des Stratifizierungsverhältnisses. Allerdings war der Einfluss des Umbruchs auf die Gehalte an wasserstabilen Aggregaten weniger stark ausgeprägt als vermutet (KLAHSEN 2015), was zugleich eine wahrscheinliche Erklärung für die unerwartete geringe Re-Mineralisierung der C-Vorräte ist. Auch in Bezug auf die Aggregatdynamik scheinen demnach die Einflüsse der Witterung und der sonstigen Bewirtschaftung (z.B. Zuckerrübenernte) die Effekte der Bodenbearbeitung zu überdecken.

6.6 Qualität der organischen Substanz (C/N-Verhältnis) / C_{hwl} - & C_{mik} -Gehalte

6.6.1 C/N-Verhältnis

In Lüttewitz lagen die C/N-Verhältnisse in allen Beprobungsschichten bzw. Tiefen sowie Varianten im Untersuchungszeitraum deutlich niedriger als 10. Dies gilt auch für die Oberkrume in den Varianten D und K bzw. KL, welche eine starke Akkumulation von C-reichen Ernteresten an der Bodenoberfläche aufweisen.

Es handelt sich demnach um einen Standort mit hochaktiven Böden, in welchen die N-reiche mikrobielle Biomasse organische Stoffe rasch umsetzt. Dies wird insbesondere durch die Gaben an N-reichem Mineraldünger gefördert. Im Untersuchungszeitraum (2012 - 2015) waren dies am Standort Lüttewitz insgesamt ca. 850 kg N ha^{-1} . Die zeitlichen Schwankungen der C/N-Verhältnisse sind dabei ein kombinierter Effekt der Umverteilung von organischen Resten durch die Bodenbearbeitung, der Umsatzdynamik der organischen Substanzen sowie der N-Düngung bzw. -Verfügbarkeit.

Im Rahmen des Umbruchversuches konnten, bis auf den Termin im Frühjahr 2014, keine Unterschiede zwischen den Varianten ermittelt werden und das C/N-Verhältnis für das Gesamtprofil von $9000 \text{ t Boden ha}^{-1}$ lag durchgängig zwischen 6 und 7.

Am Standort Methau lagen die C/N-Verhältnisse in den bewirtschafteten Parzellen zu allen Terminen ebenfalls niedriger als 10. Die N-Gaben in Form von Mineraldünger betragen im Untersuchungszeitraum, je nach Block, zwischen 500 und 600 kg N ha^{-1} . Im Grünland, welches keine N-Düngung erfährt, wurden in der Krume höhere C/N-Verhältnisse ermittelt, welche zu einzelnen Terminen auch über 10 liegen. Der Unterschied im C/N-Verhältnis zu den bewirtschafteten Parzellen beträgt im Mittel über das Gesamtprofil zwischen 1 und 2.

An beiden Standorten lässt sich keine deutliche Abhängigkeit der C/N-Verhältnisse von der Bodenbearbeitungsvariante feststellen.

6.6.2 C_{hwl}

Anhand der C_{hwl} -Gehalte am Standort Lüttewitz, welche fast durchgängig in den GHK C-E lagen, lässt sich die Versorgung der Krume mit schnell umsetzbaren organischen Substanzen in allen Varianten als gut bis sehr gut charakterisieren. Dabei wiesen die Varianten D, K und KL signifikant höhere C_{hwl} -Gesamtvorräte auf als die Variante P. Zudem wiesen diese drei Varianten in den obersten beiden Beprobungsschichten (bis ca. 10 cm Tiefe) deutlich erhöhte Anteile von C_{hwl} am Gesamtkohlenstoff auf.

Durch den Umbruch wurden die C_{hwl} -Massen in der Variante DP zwar innerhalb des Profils stark umverteilt, es kommt aber innerhalb des Untersuchungszeitraums nicht zu einer Angleichung an das Niveau der Pflugvariante. Die Anteile von C_{hwl} am Gesamtkohlenstoff lagen zu allen Zeitpunkten des Versuches in der Krume zwischen 4 und 6 %.

Diese Anteile liegen damit in der gleichen Größenordnung wie jene, die LEINWEBER et al. (1995) auf landwirtschaftlich genutzten Böden in Bad Lauchstädt ermittelten. Ähnliche Werte werden auch von VOHLAND & EMERLING (2011: 599) für den Ap-Horizont von Cambisolen aus quartären Sedimenten bei Rostock angegeben. Diese sind mit Werten von $1,07 \%$ C_{org} , $0,08 \%$ N und einem Tongehalt von $12,3 \%$ sowie einem pH-Wert von $6,26$ der Fläche in Lüttewitz nicht unähnlich: Der C_{hwl} -Gehalt dieser Cambisole lag bei 407 mg kg^{-1} und der Anteil von C_{hwl} an C_{org} bei $3,8 \%$.

Für den Standort Methau wurde der Parameter C_{hwl} einmalig im Herbst 2012 bestimmt und spiegelt daher sehr spezifisch die Bedingungen zu diesem Zeitpunkt wider. Dabei traten keine statistisch signifikanten Unterschie-

de in den C_{hwl} -Massen zwischen den Varianten innerhalb der einzelnen Blöcke auf. Allerdings sind die C_{hwl} -Massen insgesamt geringer als am Standort Lüttewitz. Die höchsten C_{hwl} -Massen wurden für den Grünlandstreifen ermittelt. Die Anteile von C_{hwl} am Gesamtkohlenstoff waren in Methau insgesamt etwas geringer als am Standort Lüttewitz. Zudem lagen sie in den obersten 10 - 15 cm in den Varianten K und G höher als in der Variante P.

Auch am Standort Methau kann die Humusversorgung anhand des Indikators C_{hwl} als gut charakterisiert werden, da die C_{hwl} -Gehalte in der Krume in allen Parzellen zumeist in den GHK D und E lagen. Im Gegensatz zum Standort Lüttewitz sind in der Unterkrume (Beprobungsschicht 4) deutlich geringere C_{hwl} -Gehalte erkennbar, was möglicherweise auf eine verstärkte bzw. raschere Mineralisierung im Übergang zum Unterboden hinweist. Denkbar ist auch, dass aufgrund der geringen Bioturbation in der Unterkrume bzw. dem Unterboden wenig Einwaschung von wasserlöslichen organischen Substanzen (DOC) erfolgt.

Der Vergleich der Blöcke und Varianten deutet darauf hin, dass die Fruchtfolge sowie die Witterung in Verbindung mit der Bodenbearbeitung einen starken kurz- bis mittelfristigen Einfluss auf die C_{hwl} -Gehalte haben.

KÖRSCHENS & SCHULZ (1999: 36) geben für den Standort Methau einen C_{hwl} -Gehalt von 320 mg kg^{-1} an, was bei einer Bodenmasse von 4500 t ha^{-1} in der Krume einer C_{hwl} -Masse von 1440 kg ha^{-1} entspricht. Dieser Wert liegt in der gleichen Größenordnung wie jene im Rahmen der vorliegenden Untersuchung in der Variante P ermittelten Werte.

6.6.3 Mikrobielle Biomasse und Aktivität

Die C_{mik} -Gehalte und die Dehydrogenaseaktivität spiegeln die kurzfristige Umsatzdynamik im Boden wider. Je nach Versorgungszustand der Bodenmikroben mit Nahrung (organischen Substanzen) und dem hydrothermalen Regime (SCHINNER & SONNLEITNER 1996a: 267) unterliegen sowohl die Menge als auch die Aktivität der mikrobiellen Biomasse einer starken kurzfristigen bzw. saisonalen Dynamik.

So kam es am Standort Lüttewitz in der Variante Pflug im Rahmen des Umbruchversuches im Herbst 2013 zu einer deutlichen Erhöhung der mikrobiellen Biomasse in den oberen drei Beprobungsschichten zum Termin vier Wochen nach dem Umbruch. Das Wachstum der mikrobiellen Biomasse wird in dieser Phase stark durch die hohen Düngermengen gefördert, welche unmittelbar vor dem Umbruch ausgebracht und durch diesen eingemischt worden waren. Diese Erhöhung der C_{mik} -Gehalte ging allerdings nicht mit einer Erhöhung der Dehydrogenaseaktivität einher, welche in der Pflugvariante über den gesamten Versuchszeitraum sehr stabile Werte zeigt.

Zum Frühjahr 2014 kam es im gesamten Bodenprofil zu einer Abnahme der mikrobiellen Biomasse, vermutlich aufgrund der witterungsbedingten Winterruhe. Einen erneuten starken Anstieg erfuhr die mikrobielle Biomasse zum Termin vier Wochen nach dem zweiten Umbruch im Herbst bzw. Winter 2014. Die Zuckerrübenenernte nebst wendender Bodenbearbeitung im November 2014 förderte, nicht zuletzt durch die Einarbeitung der Blattreste, die Menge an mikrobieller Biomasse. Dieser Trend bestätigte sich im Frühjahr 2015, in welchem für alle Beprobungsschichten die höchsten C_{mik} -Gehalte ermittelt wurden. Unklar bleibt hierbei, warum die DHA keinen größeren Schwankungen unterlag.

Der Einfluss der Düngung im Herbst 2013 kommt besonders deutlich anhand der Entwicklung der C_{mik} -Gehalte in der Variante D zum Vorschein. Insbesondere in der Oberkrume (Beprobungsschichten 1 und 2) kam es in der Variante D zum Termin vier Wochen nach dem Umbruch und auch zum Frühjahr 2014 zu einer deutlichen Steigerung der C_{mik} -Gehalte, welche in dieser Variante nicht auf einen Einfluss der Bodenbearbeitung selbst zurückgeführt werden kann. Im Unterboden ergeben sich hingegen nur geringere Änderungen der C_{mik} -Gehalte.

Die mikrobielle Aktivität (DHA) in der Oberkrume nahm zum Winter 2013 in der Variante D zunächst ab, um im Frühjahr 2014 wieder anzusteigen. Die C_{mik} -Gehalte in der Oberkrume nahmen zum Herbst 2014 deutlich ab,

was zum einen für eine begrenzte Dauer des Düngungseffektes aus dem Herbst 2013 spricht, zum anderen auf mögliche Defizite im Versorgungszustand der Mikroorganismen hindeutet. Darauf weist auch die DHA hin, welche im Herbst 2014 ebenfalls geringer ausfiel als im Frühjahr.

Durch die Zuckerrübenenernte im Herbst 2014, welche im Rahmen der Bewirtschaftung den insgesamt stärksten mechanischen Eingriff in die Krume in der Direktsaatvariante darstellt, kommt es in der Oberkrume zunächst kurzfristig zu einer Zunahme der mikrobiellen Biomasse und Aktivität. Während die Aktivität zu den beiden Folgeterminen im Winter 2014 bzw. Frühjahr 2015 weiter ansteigt, ergab sich vier Wochen nach der Ernte im Winter 2014 eine für diese Variante besondere Situation: Die C_{mik} -Gehalte in der Oberkrume nahmen ab und jene der Unterkrume nahmen zu. Dieser Trend kehrte sich allerdings im Frühjahr 2015 wieder um.

Die durchgängig höhere Aktivität der Mikroorganismen in der Oberkrume (Beprobungsschichten 1 und 2) der Variante D im Vergleich zur Pflugvariante ist dabei hauptsächlich auf die bessere Versorgung mit sowie effizientere Verwertung von organischem Material zurückzuführen (HEINZE 2009), in der relativ trockenen Sommerperiode vermutlich auch auf das stabilere hydrothermale Regime. Die starken saisonalen Schwankungen ergeben sich aus den Effekten der Düngung und der Witterung, welche auf diesen obersten Krumbereich aufgrund der räumlichen Nähe den stärksten Einfluss haben. Darauf sind wahrscheinlich auch die Schwankungen in der mikrobiellen Aktivität (DHA) in der Variante D zurückzuführen, wohingegen in der Variante P zu allen Terminen annähernd gleiche Aktivitäten ermittelt wurden.

Im Rahmen des Umbruchversuches kam es durch den Pflugeinsatz in der Variante DP, analog zur Homogenisierung der Stoffvorräte, auch in Bezug auf die mikrobielle Biomasse und Aktivität zu einer Homogenisierung innerhalb des Profils. Die höchsten Werte für C_{mik} und DHA wurden kurz nach dem Umbruch in Beprobungsschicht 3 (10-20 cm Bodentiefe) erreicht, in welche der Großteil der ursprünglichen, humusreichen Oberkrume nebst Ernteresten eingebracht wurde.

Es kam in der weiteren Folge des Versuches zu einer Abnahme der mikrobiellen Biomasse in allen Beprobungsschichten. Diese Dynamik bestätigt die Ergebnisse der Entwicklung der C-Vorräte in der Variante DP: Entgegen der Erwartung kam es in Folge des Umbruchs nicht zu einer starken Zunahme der mikrobiellen Biomasse und Aktivität, welche eine entsprechende Mineralisierung und Abnahme der C-Vorräte zur Folge gehabt hätte. Ebenso nahmen die Unterschiede bzw. Schwankungen der ermittelten C_{mik} -Werte zwischen den Beprobungspunkten im Verlauf des Jahres 2014 deutlich ab und steigen auch in der Folge des zweiten Umbruchs im Herbst 2014 nicht wieder deutlich an. Dies spricht für eine Stabilisierung des Systems im Folgejahr des Umbruchs. Der Anteil von C_{mik} am Gesamtkohlenstoffvorrat, welcher nach dem ersten Umbruch in allen Beprobungsschichten kurzfristig deutlich anstieg (im Unterboden auf bis zu 4 - 5 %), sank in der Folge bereits zum Termin vier Wochen nach dem Umbruch und weiter zum Frühjahr und Herbst 2014 wieder deutlich ab. Erst zum Frühjahr 2015 stiegen die Anteile in allen Profiltiefen wieder an.

Insgesamt lagen die ermittelten C_{mik} -Massen in allen drei Varianten zu allen Zeitpunkten (Ausnahme: Variante P im Herbst 2014 vor Umbruch) zwischen 1000 und 2000 kg ha⁻¹ im Gesamtprofil, wobei der überwiegende Teil auf die Krume entfiel. Diese Werte entsprechen nach der Einteilung von MACHULLA et al. (2001) den Gehaltssklassen 4 (Mittel) und 5 (hoch) und bestätigen somit die bereits anhand des Parameters C_{hwl} getroffene Einordnung der untersuchten Böden als hoch aktiv mit entsprechend kurzen Umsatzzeiten der organischen Substanz. Gleiches gilt für die ermittelten $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnisse, welche mit einem Wertebereich zwischen 1 und 5 % in den Gehaltssklassen 3 (mittel) bis 5 (sehr hoch) nach SOMMER et al. (2002) liegen. Dabei liegt ein Großteil der Werte über 2 % und ist damit in die Gehaltssklassen 4 (hoch) und 5 (sehr hoch) einzuordnen.

HEINZE et al. (2010) ermittelten im Rahmen ihrer Untersuchungen auf zwei Lössstandorten bei Göttingen erheblich höhere C_{mik} -Gehalte in den obersten 10 cm des Bodens in der RT-Variante im Vergleich zur Pflugvariante. In der Unterkrume (20 - 30 cm) kehrte sich dieses Verhältnis zugunsten der Pflugvariante um. Die Gesamtmassen an C_{mik} in der Krume waren in der RT-Variante um 18 % höher als in der Pflugvariante. Dabei

trat eine starke Korrelation der Parameter C_{mik} und C_{org} auf. Der Anteil von C_{mik} an C_{org} betrug 2,1 % in der Pflugvariante und zwischen 1,6 und 2,6 % in der RT-Variante, wobei die Anteile mit zunehmender Profiltiefe abnahmen. Diese Zahlen bestätigen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung. Da von HEINZE et al. (2010) nur zu einem einzelnen Zeitpunkt im Frühjahr 2007 Proben genommen wurden, können keine Vergleiche zur vorliegenden Untersuchung bzgl. der zeitlichen Dynamik vorgenommen werden.

HEINZE et al. (2010) geben eine mögliche Erklärung für den Zusammenhang von höheren C_{org} - und C_{mik} -Vorräten in Kombination mit geringerer mikrobieller Aktivität in der RT-Variante, wie sie auch in der vorliegenden Untersuchung festgestellt wurden: Bei reduzierter Bodenbearbeitungsintensität (RT bzw. NT) zeigen die Bodenmikroben eine höhere Substratnutzungseffizienz bei einer gleichzeitig verbesserten Verfügbarkeit organischer Substanzen als Nahrung. Dies würde, bei etwa gleichen Erträgen, die mittel- und langfristig höheren C-Vorräte erklären, welche demnach eine Folge der verringerten Mineralisierung auf der Basis einer höheren Substratnutzungseffizienz wären.

Die veränderte Substratnutzungseffizienz wiederum ist vermutlich die Folge einer Veränderung der Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft, wobei insbesondere der Anteil von saprothroken Pilzen eine wichtige Rolle spielt. Gemeinhin wird davon ausgegangen, dass durch intensive Bodenbearbeitung insbesondere das Wachstum von Pilzen gestört und daher deren Anteil an der mikrobiellen Biomasse reduziert wird (SCHINNER & SONNLEITNER 1996a: 89 und 1996b: 70f.). Allerdings sollten die kalkungsbedingt höheren pH-Werte in der Oberkrume am Standort Lüttewitz sich eher hemmend auf die Ausbreitung von Pilzen auswirken. Die genauen Mechanismen hierbei sind allerdings aktuell noch nicht ausreichend geklärt und es besteht weiterer Forschungsbedarf. Auch die mittel- und langfristig stabileren Lebensbedingungen für das Bodenleben bei RT/NT-Systemen tragen vermutlich zu einer höheren Substratnutzungseffizienz bei.

Für den Standort Methau wurden nur wenige Werte für C_{mik} und DHA im Jahr 2012 erhoben. Dabei wurden etwas geringe C_{mik} -Massen sowie -Anteile am Gesamtkohlenstoff als am Standort Lüttewitz ermittelt. Bemerkenswert sind die hohen C_{mik} - und DHA-Werte in der Variante Grünland. In dieser findet zwar keine Stickstoffdüngung statt, nichtsdestotrotz wurden in der Oberkrume sowohl die höchsten C_{mik} -Gehalte als auch die höchste Dehydrogenaseaktivität aller Varianten bzw. Beprobungsschichten gemessen.

6.7 Verfügbarkeit der Makronährstoffe

6.7.1 Phosphor

6.7.1.1 Lüttewitz

Der maximale Unterschied in den Phosphor-Gesamtvorräten zwischen den Varianten betrug am Standort Lüttewitz im Frühjahr 2012 ca. 10 % der Vorräte, welche insgesamt zwischen 2,8 und 3 t P ha⁻¹ lagen. Ein Großteil der Unterschiede resultierte dabei aus Gehalts- bzw. Vorratsunterschieden im Unterboden. Da in dieser Tiefe keine Bodenbearbeitung stattfindet (Ausnahme: Variante KL, periodisch) und Phosphor kaum mit der Bodenlösung verlagert wird, ist davon auszugehen, dass die Unterschiede auf (natürlichen) Heterogenitäten des Bodens basieren bzw. das Ergebnis von biogener Verlagerung (z.B. durch Regenwürmer) sind.

In der Krume waren die P_t -Gehalte in der Variante Pflug stark homogenisiert und in den Varianten D, K und KL mit der Tiefe stratifiziert. Dabei lagen die Gehaltsunterschiede innerhalb der Krume der Varianten D, K und KL bei maximal 0,01 Masse-%, was etwa 20 - 25 % des Vorrates beträgt.

Die pflanzenverfügbaren Phosphorgehalte (CAL) lagen in der Krume in allen Varianten i.d.R. in den Gehaltsklassen B und C (2,5 - 7,2 mg P 100 g⁻¹). In den Varianten K und KL wurden in den Beprobungsschichten 1

und 2, also bis ca. 10 cm Tiefe, zu einzelnen Terminen auch Werte in der Gehaltsklasse D (7,3 - 10,4 mg P 100 g⁻¹) ermittelt. In der Variante Direktsaat gilt dies ebenso, wobei im Bereich bis ca. 5 cm Tiefe sogar Werte ermittelt wurden, die in der Gehaltsklasse E liegen.

Vergleicht man diese Werte mit den Mittelwerten, die im Jahr 1995 durch das IfZ für die Krume (0 - 30 cm) in den vier Varianten ermittelt wurden (13,7 - 18,8 mg P 100 g⁻¹), fällt ein deutlicher Rückgang der mittleren P(CAL)-Gehalte auf. Gemäß den Vorgaben der Düngeverordnung (LFL 2007: 39 ff.) wurden also durch die Reduzierung der Düngermengen, welche unterhalb der Entzugsdüngung lagen, vorhandene P-Überschüsse im Boden sukzessive abgebaut. Dies wird durch die im Jahr 2005 ebenfalls vom IfZ ermittelten P(CAL)-Gehalte bestätigt. Bereits zu diesem Zeitpunkt waren die Gehalte auf Werte zwischen 3 und 8 mg 100 g⁻¹ in der Krume der Varianten P, D und K zurückgegangen. Auffällig ist bei diesen Daten, dass die Gehalte in allen beprobten Tiefen in der Variante P deutlich höher sind als in den anderen beiden Varianten (Ausnahme: 0 - 10 cm, Variante D) und in der Variante K in allen Tiefen am geringsten.

PIEGHOLDT et al. (2013) geben für den Standort Lüttewitz, basierend auf einer Beprobung im April 2010, für die Krume (0 - 25 cm) P(CAL)-Gehalte von 4 - 4,2 mg 100 g⁻¹ an. Die Gehalte in 25 - 40 cm Tiefe betragen zwischen 2,3 mg 100 g⁻¹ (Variante D) und 3,6 mg 100 g⁻¹ (Variante P). Diese Zahlen liegen in der gleichen Größenordnung wie jene der vorliegenden Untersuchung und bestätigen diese. Die Unterschiede im Unterboden sind als Effekt der bodenbearbeitungsbedingten Umverteilung zu interpretieren. Die P_t-Gesamtvorräte in 0 - 40 cm werden, im Mittel der vier untersuchten Standorte, von PIEGHOLDT et al. mit 3,5 - 3,7 t ha⁻¹ angegeben, bei P_t-Gehalten von 0,07 % in der Krume und ca. 0,06 % im Unterboden. Diese Werte liegen etwas höher als jene der vorliegenden Untersuchung, sodass der Standort Lüttewitz im Vergleich der vier untersuchten Standorte der Südzucker AG als Standort mit vergleichsweise geringen P_t-Gehalten bzw. -Vorräten gelten kann.

Ein Vergleich zu den im Rahmen des „Elbprojektes“ erhobenen Daten aus den Jahren 2000 und 2001 (SCHMIDT ET AL. 2002) ist nur eingeschränkt möglich, da die pflanzenverfügbaren Phosphorgehalte damals mit der Doppellaktat-Methode ermittelt wurden. Die Analysewerte der beiden Methoden lassen sich nicht ohne weiteres umrechnen. Mit der DL-Methode wurden 2001/2001 Werte zwischen 4 und 8 mg 100 g⁻¹ für die Krume aller vier Bodenbearbeitungsvarianten ermittelt, welche in die Gehaltsklassen B und C eingeordnet wurden.

Basierend auf den in der vorliegenden Untersuchung ermittelten verfügbaren P-Gehalten sollten die Düngermengen, im Hinblick auf eine Ertragsoptimierung, aktuell den jeweiligen Entzug mindestens ausgleichen. Insbesondere in der Unterkrume wurden in allen Varianten Gehalte in der GHK B ermittelt, welche möglicherweise eine pflanzenbaulich relevante Unterversorgung anzeigen.

Allerdings sind die Gehaltsklassen entsprechend der Düngeverordnung (LFL 2007) auf den Krumenbereich von 0 - 20 cm geeicht. Dies sollte bei der hier durchgeführten Einordnung in die Gehaltsklassen sowohl für den Vergleich zwischen einzelnen Beprobungsschichten innerhalb der Krume als auch für Aussagen zur Versorgung der Unterkrume einschränkend bedacht werden.

Die mittleren Anteile des pflanzenverfügbaren Phosphors am Gesamtvorrat lagen in allen Varianten zwischen 8 und 10,5 %. Dabei waren die Anteile in den Varianten D, K und KL in der Oberkrume (0 - 10 cm) deutlich höher als in der Pflugvariante. In der Unterkrume sowie im Unterboden waren die mittleren Anteile, bei erheblichen Schwankungen bzw. Heterogenitäten innerhalb der Varianten bzw. Parzellen, nahezu gleich.

Eine aufgrund der Immobilität des Phosphors häufig befürchtete bodenbearbeitungsbedingte Unterversorgung der Unterkrume bzw. des Unterbodens mit pflanzenverfügbarem Phosphor konnte am Standort nicht festgestellt werden. Es sollte allerdings in der Zukunft eine regelmäßige Überprüfung dieses Ergebnisses stattfinden, da es sich um einen Standort handelt, der in der jüngeren Vergangenheit bei homogener Bodenbearbeitung

eine ausreichende Phosphor-Versorgung aufwies. Insofern könnten die erzielten Ergebnisse als Relikt dieser Bewirtschaftung interpretiert werden. Demnach könnte, bei fortgesetzter differenzierter Bewirtschaftung sowie entsprechendem P-Entzug mit der Ernte, eine langsame Entwicklung zu einer P-Unterversorgung in der Unterkrume der Varianten D, K und KL eintreten.

Der für den Zeitraum 2011-2015 auf Basis der Erntedaten und von Standardwerten der KTBL (DÖHLER 2009) berechnete P-Entzug mit der Ernte (Hauptprodukt) betrug, je nach Variante, ca. 150 - 160 kg P ha⁻¹. Die P-Düngung betrug hingegen im gleichen Zeitraum 275 kg P ha⁻¹ in allen Varianten. Es wurde also im angegebenen Zeitraum ein Überschuss von 120 - 130 kg P ha⁻¹ ausgebracht.

Daher ist insgesamt, vor dem Hintergrund der Verteilung P-Vorräte in der Krume sowie der aktuell über dem Entzug liegenden regelmäßigen P-Düngungen, keine P-Unterversorgung in der Unterkrume der Varianten D, K und KL zu erwarten. Vielmehr dürften die höheren P(CAL)-Gehalte in der Oberkrume dieser Varianten die Entwicklung der Jungpflanzen im Vergleich zur Variante P befördern.

6.7.1.2 Methau

Am Standort Methau lagen die Phosphor-Gesamtvorräte im Frühjahr 2012 mit 3,6 - 3,8 t P ha⁻¹ ca. 0,8 t ha⁻¹ über den Vorräten des Standortes Lüttewitz. In der Variante Grünland wurden mit 3,2 t P ha⁻¹ Vorräte ermittelt, die zwischen jenen der beiden Standorte liegen. Auf dieser Grundlage lässt sich sagen, dass etwa die Hälfte des Vorratsunterschiedes bewirtschaftungsbedingt (bezogen auf die Zeit seit 1992) und die andere Hälfte geogen bzw. vorbewirtschaftungsbedingt (vor 1992) ist.

Die pflanzenverfügbaren P-Gehalte (CAL) lagen in der Variante P in allen Blöcken in der Krume zumeist in den GHK C und D. Lediglich in Beprobungsschicht 4 (ca. 20 - 30 cm) in den Blöcken 2 und 3 wurden Werte ermittelt, die in der GHK B liegen. In der Variante K lagen die P-Gehalte in der Oberkrume (0-10 cm) in allen Blöcken in den GHK D und E und in der Mittelkrume (10-20 cm) in den GHK B-D. In dieser Variante macht sich die flachgründige Bodenbearbeitung insofern bemerkbar, als in der Unterkrume (20-30 cm) geringe bis sehr geringe P(CAL)-Gehalte ermittelt wurden, die in den GHK A und B liegen und eine entsprechende Unterversorgung bedeuten können. Im Unterboden wurden lediglich in der Variante Pflug im straßennahen Block 1 P(CAL)-Gehalte ermittelt, die in der GHK B liegen. In allen anderen Parzellen lagen die Werte im Unterboden in der GHK A. Auch am Standort Methau sind die erwähnten Einschränkungen bzgl. der Aussagenkraft der Gehaltsklassen nach Düngeverordnung für einzelne Beprobungsschichten bzw. den Unterboden zu beachten.

Aufschlussreich ist die Verteilung der P(CAL)-Gehalte in der Variante Grünland. So liegen die ermittelten Werte in 0 - 5 cm Tiefe in den GHK C und D, bereits in 5 - 10 cm Tiefe liegt ein Großteil der Werte aber in der GHK B. Im Rest der Krume sowie dem Unterboden wurden durchweg Werte ermittelt, die in der GHK A liegen. Es ist erkennbar, dass trotz ausbleibender P-Abfuhr mit der Ernte lediglich in der oberen, dauerhaft durchwurzelten Krume ein P-Kreislauf zu landwirtschaftlich relevanten pflanzenverfügbaren P-Gehalten führt. In den darunter liegenden Bereichen sind zwar die Phosphor-Gesamtvorräte nicht wesentlich geringer als in den bewirtschafteten Parzellen, es ist aber ein geringerer Anteil pflanzenverfügbar als in jenen.

In den bewirtschafteten Parzellen am Standort Methau liegen die pflanzenverfügbaren P-Anteile an den Gesamtvorräten mit Werten über 10 % in den Blöcken 1 und 3 etwas höher als jene am Standort Lüttewitz. Im mittleren Block 2 werden hingegen mit Anteilen zwischen 7 und 10,5 % Werte in der gleichen Größenordnung wie in Lüttewitz erreicht.

Insgesamt ist die P-Versorgung bzw. -Verfügbarkeit am Standort Methau als gut zu bezeichnen. Dabei liegen sowohl die Gesamtvorräte, die pflanzenverfügbaren Anteile an diesen sowie die P(CAL)-Gehalte höher als am Standort Lüttewitz. Allerdings ist in Methau bereits in der Unterkrume (20 - 30 cm) in der Variante Konservie-

rend und z. T. auch der Variante Pflug ein pflanzenbaulich relevanter Rückgang der P(CAL)-Gehalte zu verzeichnen, welcher vermutlich geogen und bodenbearbeitungsbedingt zugleich ist.

6.7.2 Kalium

6.7.2.1 Lüttewitz

Am Standort Lüttewitz lagen die Kalium-Gesamtvorräte im Frühjahr 2012 zwischen 16 und 20 t ha⁻¹. Dabei war sowohl mehr als die Hälfte dieses Vorrates als auch etwa die Hälfte der Differenz zwischen den Varianten im Unterboden zu finden. Auffällig ist zudem, dass die Variante KL in allen Beprobungsschichten bzw. -tiefen die höchsten Kaliumgehalte bzw. -vorräte aufwies. Die Gesamtgehalte weisen zudem in allen Tiefen und insbesondere in der Unterkrume und im Unterboden, erheblich Schwankungen innerhalb der Varianten auf. Es ist daher zu vermuten, dass trotz der erheblichen Unterschiede zwischen den Varianten nur ein geringer Teil dieser Unterschiede mit der (differenzierten) Bearbeitung erklärt werden kann.

Die K(CAL)-Gehalte lagen über alle Beprobungstermine in allen Tiefen und Varianten in den GHK A und B. Ausnahmen hiervon bilden die oberen beiden Beprobungsschichten (0 - 5 cm bzw. 5 - 10 cm) in den Varianten D, K und KL, welche bei insgesamt sehr großen (zeitlichen) Streuungen auch Werte aufwiesen, die in der GHK E liegen. Aufgrund des Beprobungstermins im Frühjahr 2012, welcher nur wenige Tage bzw. Wochen nach zwei Düngergaben lag (insgesamt ca. 29 kg K ha⁻¹), sollten insbesondere die sehr hohen Werte in der Oberkrume nicht überbewertet werden. Dies gilt in ähnlicher Weise für die Beprobung im Frühjahr 2013. Interessant ist zudem, dass in der Variante P keine erhöhten K(CAL)-Gehalte ermittelt wurden, obwohl auch in dieser Variante im Frühjahr keine Bodenbearbeitung erfolgt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der höhere Bodenbedeckungsgrad in den Varianten D, K und KL zu einer zeitlichen Verzögerung der K-Verlagerung mit dem Regen- bzw. Sickerwasser führte.

Im Vergleich zu den im Jahr 1995 durch das IfZ ermittelten Werten von 10 - 15 mg 100 g⁻¹ in der Krume, wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung, ähnlich wie beim Phosphor, erheblich geringere K(CAL)-Gehalte ermittelt. Die aktuellen K(CAL)-Gehalte entsprechen in der Größenordnung eher den vom IfZ im Jahr 2005 (Messfelder nach TEIWES 2005) ermittelten Werten.

Ein Vergleich zu den vom LfULG im Rahmen des „Elbeproyektes“ veröffentlichten Daten aus dem Herbst 2000 bzw. Frühjahr 2001 (SCHMIDT 2002: 39) kann nur qualitativ erfolgen, da die entsprechenden Kaliumgehalte mit einer anderen Labormethode (Doppellactat-Auszug) als der hier verwendeten ermittelt wurden. Auch in diesem Rahmen wurden allerdings in den Varianten KL, K und D in der Oberkrume deutlich höhere Gehalte ermittelt als in der Variante P. Insgesamt lagen die pflanzenverfügbaren K-Gehalte im den Jahren 2000/2001 etwas höher als jene der vorliegenden Untersuchung.

Auf der Basis der K(CAL)-Gehalte wurden auch die K(CAL)-Gesamtvorräte berechnet. Diese wiesen im Verlauf der Basisbeprobungen sowohl große Unterschiede zwischen den Varianten als auch den Terminen auf, welche anhand der K-Entzüge mit der Ernte nicht zu erklären sind.

Sowohl die ermittelten K-Gesamtvorräte als auch die jeweils ermittelten pflanzenverfügbaren K-Gehalte bzw. -Vorräte unterliegen also erheblichen räumlichen und zeitlichen Schwankungen, die nur sehr eingeschränkt aus der Bewirtschaftung abgeleitet werden können und ihre Ursache vermutlich in geogenen bzw. pedogenen Heterogenitäten haben.

Im Rahmen des Umbruchversuches konnten hingegen nur sehr geringe Unterschiede in den K(CAL)-Gesamtmassen zwischen den Varianten ermittelt werden, welche im Bereich der Messungenauigkeit bzw. natürlichen Heterogenitäten liegen. Allerdings wurde, analog zu allen anderen bodenchemischen Parametern, das Verteilungsmuster in der Krume in der erstmalig umgebrochenen Variante DP verändert.

Die mittleren pflanzenverfügbaren Anteile an den K-Gesamtvorräten lagen im Gesamtprofil im Frühjahr 2012 bei 2 - 4 %. Ähnlich wie beim Phosphor waren die Anteile in den Varianten D, K und KL in der Oberkrume gegenüber der Variante P deutlich erhöht. Dies ist vermutlich zu einem erheblichen Anteil auf die bereits diskutierte Düngung kurze Zeit vor der Probenahme zurückzuführen. In der Unterkrume wies die Variante P etwas höhere pflanzenverfügbare K-Anteile auf, im Unterboden hingegen bestanden nur noch sehr geringe Unterschiede zwischen den Varianten.

6.7.2.2 Methau

Die Kalium-Gesamtvorräte im Feinboden am Standort Methau lagen im Frühjahr 2012 bei 19 - 24 t ha⁻¹ und damit, ähnlich wie beim Phosphor, etwas höher als am Standort Lüttewitz. Die höheren K-Gehalte bzw. -Massen verteilen sich dabei relativ gleichmäßig auf alle Beprobungsschichten bzw. Tiefen. Dies gilt ebenso für die Unterschiede in den K-Gehalten zwischen den Parzellen bzw. Blöcken. Zudem sind in allen drei Blöcken die ermittelten Kalium-Vorräte in der Pflugvariante um 1 - 3 t ha⁻¹ größer als in der jeweiligen konservierend bearbeiteten Parzelle. Die Variante Grünland weist mit ca. 19 t ha⁻¹ relativ geringe Kalium-Vorräte auf, die am unteren Ende der für diesen Standort ermittelten Größenordnung liegen.

Die pflanzenverfügbaren K-Gehalte in Methau liegen in der Variante Pflug in der Krume nahezu durchgängig in der GHK C und zeigen damit eine ausreichende Versorgung an. In der Variante Konservierend liegen die K(CAL)-Gehalte in der Oberkrume in den GHK D und E, sinken allerdings als Funktion der Tiefe ab und erreichen in der Unterkrume (ca. 20 - 30 cm) nur noch Werte um 5 mg 100 g⁻¹ und damit die GHK A und B. In dieser Tiefe und Variante könnte daher eine pflanzenbaulich relevante K-Unterversorgung vorliegen. Im Gegensatz zum Standort Lüttewitz gingen den Beprobungen im Frühjahr 2012 bzw. im Frühjahr 2013 keine Mineraldüngergaben voraus, sodass die ermittelten K(CAL)-Gehalte auch in der Oberkrume als vergleichbar und repräsentativ anzusehen sind.

Die Anteile des pflanzenverfügbaren Kaliums an den Gesamtvorräten lagen im Frühjahr 2012 im Gesamtprofil bei ca. 5 %. In den Blöcken 2 und 3 wies dieser Anteil in der Variante K allerdings eine sehr große Streuung auf, die vermutlich geogen bedingt ist.

7 Zusammenfassung/Fazit

Im Rahmen des Projektes „C-Status und -Dynamik sowie Grundnährstoffversorgung nach 20-jährigem Pflugverzicht“ wurden über insgesamt vier Vegetationsperioden (2012 bis 2015) zwei typische mittelsächsische Ackerstandorte hinsichtlich ihrer Kohlenstoff-, Stickstoff- und Nährstoffdynamik in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung intensiv untersucht. Der Fokus lag dabei einerseits auf den Stoffgehalten sowie deren Verteilung im Bodenprofil, zum anderen auf den vorhandenen Stoffvorräten. Die Ermittlung der Vorräte erfolgte dabei bis in eine Tiefe von ca. 60 cm auf der Basis von äquivalenten Bodenmassen.

Die Ausgangshypothese der im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung mit dem Pflug höheren C-Vorräte bei konservierender Bearbeitung bzw. Direktsaat konnte am Standort Lüttewitz bestätigt und statistisch abgesichert werden. Dies gilt auch für die mit den C-Vorräten eng verknüpften N-Vorräte. Der Unterschied zwischen den Varianten Pflug (und Konservierend Locker) sowie Direktsaat bzw. Konservierend betrug dabei im Mittel ca. 10 t C ha^{-1} , was zwischen 10 und 20 % der Gesamtvorräte ausmacht.

Am Standort Methau konnten hingegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten Pflug und Konservierend festgestellt werden, sodass die Ausgangshypothese für diesen Standort nicht bestätigt werden konnte. Mögliche Unterschiede in den Stoffvorräten zwischen den Bearbeitungsvarianten blieben auf einzelne Blöcke sowie Beprobungszeitpunkte beschränkt. Eine Schwierigkeit der Ermittlung von Stoffvorräten am Standort Methau besteht in den kleinräumig stark variablen Grobbodenanteilen, welche ihre Ursache in der Bodengenese am Standort haben. Alle ermittelten Stoffvorräte beziehen sich auf den Feinbodenanteil des Bodens und können daher nicht als flächenrepräsentativ angesehen werden. Die Stoffvorräte für einzelne Flächenanteile oder die Gesamtfläche können auf Grundlage der ermittelten Daten anhand der erstellten Übersichtstabellen mit mittleren pauschalen Grobbodenanteilen abgeschätzt werden.

Insgesamt ergaben sich für beide Standorte sehr starke sowohl zeitliche als auch räumliche Schwankungen bzw. Heterogenitäten der Stoffvorräte. Diese erschwerten zum einen die statistische Absicherung der Ergebnisse und wiesen zum anderen auf die große Bedeutung der Faktoren Witterung und Relief sowie Bodenheterogenität für die Bestimmung der Kohlenstoffvorräte hin.

Die zeitlichen Trends der Entwicklung der C-Vorräte waren an beiden Standorten sowie auf der Referenzfläche Grünland am Standort Methau sehr ähnlich, weswegen sie als bewirtschaftungs- und standortunabhängig angesehen werden können. Sie sind demnach Effekte der Witterung sowie von dieser gesteuerter Umsatzprozesse im Boden.

Die räumlichen Heterogenitäten der Stoffvorräte am Standort Lüttewitz sind sehr stark durch das Relief und von diesem beeinflusste Erosions- und Sedimentationsprozesse geprägt. Dabei sind in den Dellen bzw. Tiefenlinien, auch über die Bodenbearbeitungsgrenzen hinweg, deutlich höhere C-Vorräte vorhanden. Dies gilt größtenteils auch für den Unterboden. Auf den Kuppen sowie in Hangpositionen sind die C-Vorräte hingegen geringer, wobei hier aufgrund der unterschiedlichen Erosionsdynamik seit Versuchsbeginn deutliche Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten erkennbar sind. Die genaue Quantifizierung der Abtrags- und Sedimentationsraten in Abhängigkeit vom Relief, der Bewirtschaftung, der Witterung sowie der Bodenart ist allerdings recht komplex und nicht Gegenstand dieser Untersuchung, sodass hier, auf Basis der Geländebefunde, nur qualitative Aussagen zu den Auswirkungen dieser Prozesse auf die C-Vorräte getroffen werden können.

Aufgrund dieser Schwankungen und Heterogenitäten sowie der sehr unterschiedlichen Vorgehensweisen in der vorliegenden Untersuchung sowie den diversen Voruntersuchungen an beiden Standorten sind quantitative Vergleiche nur sehr eingeschränkt möglich sowie zeitliche Trends kaum feststellbar.

Zudem wurden die Auswirkungen eines periodischen Pflugeinsatzes auf langjährig konservierend bzw. in Direktsaat bearbeiteten Flächen am Standort Lüttewitz untersucht. Die Ausgangshypothese der raschen vollständigen Remineralisierung der zunächst höheren C-Vorräte konnte nicht bestätigt werden. Tatsächlich kam es in den erstmals umgebrochenen Streifen zwar kurzfristig zu einer höheren mikrobiellen Biomasse und Aktivität in der Mittel- und Unterkrume als Anzeiger für erhöhte Umsatzprozesse sowie zu einer leichten Abnahme der C-Vorräte zum Frühjahr nach dem Umbruch. Bereits ein Jahr nach dem Umbruch hatte sich das System aber bereits wieder stabilisiert und der zweite Umbruch im Herbst 2014 war anhand der meisten untersuchten Parameter nicht oder nur sehr eingeschränkt sichtbar. Die C-Vorräte lagen im Frühjahr 2015, ca. 18 Monate nach dem ersten Umbruch, in der gleichen Größenordnung wie in der Direktsaatvariante. Die Versuchswiederholung im Herbst 2014 mittels weiterer Pflugstreifen bestätigte dieses Ergebnis.

Nichtdestotrotz muss in den umgebrochenen Streifen, aufgrund der Aggregatzerstörung sowie geringeren Bodenbedeckung nach dem Umbruch, mit C-Verlusten durch oberflächliche Abspülungsprozesse gerechnet werden. Zudem konnten die mittel- bis langfristigen Effekte des Umbruchs aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit nicht untersucht werden.

Für beide Standorte kann aufgrund der ermittelten niedrigen C/N-Verhältnisse sowie der hohen Gehalte an leicht umsetzbaren organischen Substanzen eine gute bis sehr gute Humusversorgung angenommen werden. Die Umsetzung von Ernte- und Wurzelrückständen erfolgt sehr rasch.

Die Versorgung mit (pflanzenverfügbaren) Nährstoffen, insbesondere Kalium und Phosphor, ist an beiden Standorten als ausreichend bis gut zu bezeichnen. Die ermittelten Gehalte liegen zum überwiegenden Teil in den Gehaltsklassen B bis D. Der Vergleich mit Daten aus Voruntersuchungen verdeutlicht zudem die Effekte der Reduzierung der Düngermengen in den letzten zwei Jahrzehnten, welche eine Absenkung der Gesamtvorräte sowie Gehalte zur Folge hatte. Die konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren hatten keine negativen Auswirkungen auf die Verfügbarkeit der Nährstoffe innerhalb der Krume. Trotz deutlich erhöhter Nährstoffgehalte in der Oberkrume der Varianten Direktsaat bzw. Konservierend konnte keine pflanzenbaulich relevante Unterversorgung in der Unterkrume festgestellt werden.

Am Standort Methau wurde eine deutliche, hauptsächlich nutzungsbedingte, pH-Wert-Absenkung in der Krume festgestellt, welche mittel- und langfristig zu einer Einschränkung der Nährstoffverfügbarkeit führen kann. Am Standort Lüttewitz wird diesem Effekt durch regelmäßige Carbokalkgaben vorgebeugt.

Literaturverzeichnis

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 41 Abbildungen, 103 Tabellen und 31 Listen. – Schweizerbart, Stuttgart, 438 pp.
- AHL, C., JOERGENSEN, R.G., KANDELER, E., MEYER, B. & WOELER, V. (1998): Microbial biomass and activity in silt and sand loams after long-term shallow tillage in central Germany. – *Soil and Tillage Research* **49**(1-2): 93–104.
- ALCANTARA, V., DON, A., WELL, R. & NIEDER, R. (2016): Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks. – *Global Change Biology* **22**(8): 2939–2956.
- ALEF, K. (1993): Bestimmung mikrobieller Biomasse im Boden: Eine kritische Betrachtung. – *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **156**(2): 109–114.
- ALVAREZ, C., ALVAREZ, R., GRIGERA, M. & LAVADO, R. (1998): Associations between organic matter fractions and the active soil microbial biomass. – *Soil Biology and Biochemistry* **30**(6): 767–773.
- ALVAREZ, R. (2005): A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. – *Soil Use and Management* **21**(1): 38–52.
- ANDERSON, T.-H. (2003): Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **98**(1-3): 285–293.
- ANDRUSCHKEWITSCH, R., GEISSELER, D., KOCH, H.-J. & LUDWIG, B. (2013): Effects of tillage on contents of organic carbon, nitrogen, water-stable aggregates and light fraction for four different long-term trials. – *Geoderma* **192**: 368–377.
- ANGERS, D.A. & ERIKSEN-HAMEL, N.S. (2008): Full-Inversion Tillage and Organic Carbon Distribution in Soil Profiles: A Meta-Analysis. – *Soil Science Society of America Journal* **72**(5): 1370.
- ANGERS, D.A., N'DAYEGAMIYE, A. & CÔTÉ, D. (1993): Tillage-Induced Differences in Organic Matter of Particle-Size Fractions and Microbial Biomass. – *Soil Science Society of America Journal* **57**(2): 512.
- APPEL, T. (2007): Bodenbearbeitungsversuche der Landwirtschaftskammer in Rheinland-Pfalz. Ergebnisse bodenkundlicher Untersuchungen zum Gewässer- und Klimaschutz.
- APPEL, T. (2008): Projektbericht Welschbillig 2008. Nährstoffverteilung, Humusgehalt und Kohlenstoff-Sequestrierung im Bodenprofil nach acht Jahren unterschiedlicher Intensität der Grundbodenbearbeitung auf einem Muschelkalkstandort in der Eifel, 16 pp.
- APPEL, T. (2011): Weniger Kohlenstoff im Boden nach langjährig pflugloser Bodenbearbeitung. – In: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft: Jahrestagung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft: Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen. 3. - 9. September 2011, Berlin.
- APPEL, T. & BAI, M. (2015): Relevance of bias-free estimation of the organic carbon stock in soils, SOM 2015 Göttingen.
- APPEL, T., BERG, V., LAUFER, O. & BAI, M. (2008): Bewirkt die konservierende Bodenbearbeitung eine Sequestrierung von Kohlenstoff im Boden? – In: VDLUFA: Pflanzenernährung und Ressourcenschutz. Kongressband.: 519–528.
- AUTORENKOLLEKTIV (2010): "Mehrländerprojekt Agrarbezogener Bodenschutz". Ergebnisbericht zum Mehrländerprojekt „Maßnahmenentwicklung und -umsetzung für den vorsorgenden landwirtschaftlichen Bodenschutz“, 64 pp.
- BAKER, J.M., OCHSNER, T.E., VENTEREA, R.T. & GRIFFIS, T.J. (2007): Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **118**(1-4): 1–5.
- BALESDENT, J., CHENU, C. & BALABANE, M. (2000): Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. – *Soil and Tillage Research* **53**(3-4): 215–230.
- BALOTA, E.L., COLOZZI FILHO, A., ANDRADE, D.S. & DICK, R.P. (2004): Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. – *Soil and Tillage Research* **77**(2): 137–145.
- BBSRC: Rothamsted Research. <http://www.rothamsted.ac.uk/>. Accessed 07/19/2016.
- BEARE, M.H., HENDRIX, P.F. & COLEMAN, D.C. (1994): Water-Stable Aggregates and Organic Matter Fractions in Conventional- and No-Tillage Soils. – *Soil Science Society of America Journal* **58**(3): 777–786.
- BENEFIELD, C.B., HOWARD, P. & HOWARD, D.M. (1977): The estimation of dehydrogenase activity in soil. – *Soil Biology and Biochemistry* **9**(1): 67–70.
- BENJAMIN, J.G., HALVORSON, A.D., MIKHA, M.M. & NIELSEN, D.C. (2012): Comparison of methods to evaluate soil and crop management-induced soil carbon changes. – In: International Plant Nutrition Institute: Great Plains Soil Fertility Conference. 14 (2012): 258–264.
- BOLINDER, M.A., ANGERS, D.A., GREGORICH, E.G. & CARTER, M.R. (1999): The response of soil quality indicators to conservation management. – *Canadian Journal of Soil Science* **79**(1): 37–45.

- BORITZKI, A. (2009): Biologische Bodeneigenschaften in integrierten und ökologischen Anbausystemen auf Löß-Schwarzerde im mitteldeutschen Trockengebiet – Diplomarbeit, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle-Wittenberg.
- BREULMANN, M., BOETTGER, T., BUSCOT, F., GRUENDLING, R. & SCHULZ, E. (2016): Carbon storage potential in size-density fractions from semi-natural grassland ecosystems with different productivities over varying soil depths. – *The Science of the total environment* **545-546**: 30–39.
- BROCK, C., FRANKO, U., OBERHOLZER, H.-R., KUKA, K., LEITHOLD, G., KOLBE, H. & REINHOLD, J. (2013): Humus balancing in Central Europe-concepts, state of the art, and further challenges. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **176**(1): 3–11.
- BROOKES, P. (2001): The Soil Microbial Biomass: Concept, Measurement and Applications in Soil Ecosystem Research. – *Microbes and Environments* **16**(3): 131–140.
- (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz. BBodSchG. – In: Bundesministerium der Justiz: Bundesgesetzblatt I: 502–509; Bundesanzeiger Verlag.
- BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, ED. (1998): Bundesgesetzblatt I. – Bundesanzeiger Verlag.
- CAMBARDELLA, C.A. (2005): CARBON CYCLE IN SOILS | Formation and Decomposition. – In: Hillel, D.: *Encyclopedia of Soils in the Environment*: 170–175; Elsevier, Oxford.
- CAMPBELL, C.A., JANZEN, H.H., PAUSTIAN, K., GREGORICH, E.G., SHERROD, L., LIANG, B.C. & ZENTNER, R.P. (2005): Carbon Storage in Soils of the North American Great Plains. – *Agronomy Journal* **97**(2): 349.
- CAMPBELL, C.A., MCCONKEY, B.G., ZENTNER, R.P., DYCK, F.B., SELLES, F. & CURTIN, D. (1995): Carbon sequestration in a Brown Chernozem as affected by tillage and rotation. – *Canadian Journal of Soil Science* **75**(4): 449–458.
- CAPRIEL, P. (2010): Humusversorgung der Ackerböden, Freising.
- CARTER, M. (1992): Influence of reduced tillage systems on organic matter, microbial biomass, macroaggregate distribution and structural stability of the surface soil in a humid climate. – *Soil and Tillage Research* **23**(4): 361–372.
- CARTER, M.R. & GREGORICH, E.G., eds. (2008): *Soil sampling and methods of analysis*. – Canadian Society of Soil Science; CRC Press, [Pinawa, Manitoba], Boca Raton, FL, 1224 pp.
- CATCH-C-PROJEKT (2014): *Compatibility of Agricultural Management Practices and Types of Farming in the EU to enhance Climate Change Mitigation and Soil Health*.
- CHANTIGNY, M.H. (2003): Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. – *Geoderma* **113**(3-4): 357–380.
- CHATTERJEE, A., LAL, R., WIELOPOLSKI, L., MARTIN, M.Z. & EBINGER, M.H. (2009): Evaluation of Different Soil Carbon Determination Methods. – *Critical Reviews in Plant Sciences* **28**(3): 164–178.
- CHEN, H., MARHAN, S., BILLEN, N. & STAHR, K. (2009): Soil organic-carbon and total nitrogen stocks as affected by different land uses in Baden-Württemberg (southwest Germany). – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **172**(1): 32–42.
- CHIVENGE, P., MURWIRA, H., GILLER, K., MAPFUMO, P. & SIX, J. (2007): Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils. – *Soil and Tillage Research* **94**(2): 328–337.
- CONANT, R.T., EASTER, M., PAUSTIAN, K., SWAN, A. & WILLIAMS, S. (2007): Impacts of periodic tillage on soil C stocks. A synthesis. – *Soil and Tillage Research* **95**(1-2): 1–10.
- D'HAENE, K., SLEUTEL, S., NEVE, S. de, GABRIELS, D. & HOFMAN, G. (2009): The effect of reduced tillage agriculture on carbon dynamics in silt loam soils. – *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **84**(3): 249–265.
- D'HOSE, T., MOLENDIJK, L., VAN DEN BERG, W., HOEK, H. & RUNIA, W. (2014): Impacts of soil management on biological soil quality. – In: *Compatibility of Agricultural Management Practices and Types of Farming in the EU to enhance Climate Change Mitigation and Soil Health*.
- DEEN, W. & KATAKI, P. (2003): Carbon sequestration in a long-term conventional versus conservation tillage experiment. – *Soil and Tillage Research* **74**(2): 143–150.
- DENEFF, K., SIX, J., MERCKX, R. & PAUSTIAN, K. (2004): Carbon Sequestration in Microaggregates of No-Tillage Soils with Different Clay Mineralogy. – *Soil Science Society of America Journal* **68**(6): 19–35.
- DERPSCH, R. & FRIEDRICH, T. (2009): Development and current status of no-till adoption in the world. Paper T1-041. – In: *International Soil Tillage Research Organisation: Proceedings of the 18th Conference*: 1–16.
- DEUMLICH, D., FUNK, R., FRIELINGHAUS, M., SCHMIDT, W. & NITZSCHE, O. (2006): Basics of effective erosion control in German agriculture. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **169**(3): 370–381.
- DEUTSCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT, ED. (2009): *Jahrestagung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft. Böden - eine endliche Ressource*. September 2009, Bonn.

- DEUTSCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT, ED. (2011): Jahrestagung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft: Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen. 3. - 9. September 2011, Berlin.
- DEUTSCHER BUNDESTAG, 1. (2012): Aktivitäten der Bundesregierung zum konsequenten Schutz des Bodens auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene. Kleine Anfrage der Abgeordneten Dorothea Steiner, Cornelia Behm, Harald Ebner, Nicole Maisch, Bärbel Höhn, Sylvia Kotting-Uhl, Ingrid Nestle, Friedrich Ostendorff, Dr. Hermann E. Ott, Daniela Wagner, Dr. Valerie Wilms und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, 8 pp.
- DÍAZ-ZORITA, M., GROVE, J.H., MURDOCK, L., HERBECK, J. & PERFECT, E. (2004): Soil Structural Disturbance Effects on Crop Yields and Soil Properties in a No-Till Production System. – *Agronomy Journal* **96**(6): 1651–1659.
- DIECKMANN, J. & KOCH, H.-J. (2008): Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische Bodeneigenschaften und Zuckerrübenenertrag. – *Pflanzenbauwissenschaften* **12**(1): 22–31.
- DIECKMANN, J. (2008): Zur Bedeutung der Bodenstruktur für den Ertrag von Zuckerrüben. Eine pflanzenbauliche und ökonomische Analyse in einer Zuckerrüben-Getreide-Fruchtfolge mit dauerhaft differenzierter Bodenbearbeitung – Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, 138 pp.
- DIEPENBROCK, W., ELLMER, F. & LÉON, J. (2012): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Grundwissen Bachelor. – UTB GmbH, Stuttgart, 364 pp.
- DIMASSI, B., COHAN, J.-P., LABREUCHE, J. & MARY, B. (2013): Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **169**: 12–20.
- DIMASSI, B., MARY, B., WYLLEMAN, R., LABREUCHE, J., COUTURE, D., PIRAUX, F. & COHAN, J.-P. (2014): Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **188**: 134–146.
- DÖHLER, H., ed. (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. KTBL, Darmstadt, 1180 pp.
- DOLAN, M.S., CLAPP, C.E., ALLMARAS, R.R., BAKER, J. & MOLINA, J. (2006): Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil as related to tillage, residue and nitrogen management. – *Soil and Tillage Research* **89**(2): 221–231.
- DON, A. (2016): Klimaschutz durch Pflugverzicht? http://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Boden/_Texte/Klimaschutz-durch-Pflugverzicht.html;jsessionid=83536B99C37051FF6B338F60635EB17A.2_cid376#4. Accessed 11/07/2016.
- DON, A., SCHUMACHER, J., SCHERER-LORENZEN, M., SCHOLTEN, T. & SCHULZE, E.-D. (2007): Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites — Implications for measuring soil carbon stocks. – *Geoderma* **141**(3-4): 272–282.
- EKSCHMITT, K., KANDELER, E., POLL, C., BRUNE, A., BUSCOT, F., FRIEDRICH, M., GLEIXNER, G., HARTMANN, A., KÄSTNER, M., MARHAN, S., MILTNER, A., SCHEU, S. & WOLTERS, V. (2008): Soil-carbon preservation through habitat constraints and biological limitations on decomposer activity. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **171**(1): 27–35.
- ELLERT, B.H. & BETTANY, J.R. (1995): Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. – *Canadian Journal of Soil Science* **75**(4): 529–538.
- ELLERT, B.H., JANZEN, H.H. & ENTZ, T. (2002): Assessment of a Method to Measure Temporal Change in Soil Carbon Storage. – *Soil Science Society of America Journal* **66**(5): 1687.
- ELLERT, B.H., JANZEN, H.H. & MCCONKEY, B.G. (2001): Chapter 10: Measuring and Comparing Soil Carbon Storage. – In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A.: *Assessment methods for soil carbon*: 131–146; Lewis Publishers, Boca Raton, Fla.
- ELLERT, B.H., JANZEN, H.H., VANDENBYGAART, A.J. & BREMER, E. (2008): Measuring Change in Soil Organic Carbon Storage. Chapter 3. – In: Carter, M.R., Gregorich, E.G.: *Soil sampling and methods of analysis*: 25–38; Canadian Society of Soil Science; CRC Press, [Pinawa, Manitoba], Boca Raton, FL.
- ELTNER, A., BAUMGART, P., MAAS, H. & FAUST, D. (2015): Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. – *Earth Surface Processes and Landforms* **40**(6): 741–755.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2012): Die Umsetzung der Thematischen Strategie für den Bodenschutz und laufende Maßnahmen, Brüssel.
- FOLEY, J.A., RAMANKUTTY, N., BRAUMAN, K.A., CASSIDY, E.S., GERBER, J.S., JOHNSTON, M., MUELLER, N.D., O'CONNELL, C., RAY, D.K., WEST, P.C., BALZER, C., BENNETT, E.M., CARPENTER, S.R., HILL, J., MONFREDA, C., POLASKY, S., ROCKSTRÖM, J., SHEEHAN, J., SIEBERT, S., TILMAN, D. & ZAKS, D.P.M. (2011): Solutions for a cultivated planet. – *Nature* **478**(7369): 337–342.

- FÖRSTER, S. (2012): Ermittlung der Nährstoffverfügbarkeit und der verfügbaren Nährstoffmasse von Phosphor in Abhängigkeit von einer langjährigen unterschiedlichen Bodenbearbeitung – Masterarbeit, Universität Leipzig, Leipzig.
- FORSTREUTER, T. (1999): Bodenfruchtbarkeitskennwerte und Kulturpflanzenertrag in zwei Bodennutzungssystemen – Dissertation, Universität Göttingen, Göttingen.
- FRANKO, U., KOLBE, H., THIEL, E. & LIEß, E. (2011): Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. – *Geoderma* **166**(1): 119–134.
- FRANZLUEBBERS, A.J. & ARSHAD, M.A. (1996): Soil organic matter pools during early adoption of conservation tillage in northwestern Canada. – *Soil Science Society of America Journal* **60**(5): 1422–1427.
- FRANZLUEBBERS, A.J. & STUEDEMANN, J.A. (2013): Soil-profile distribution of organic C and N after 6 years of tillage and grazing management. – *European Journal of Soil Science* **64**(5): 558–566.
- FRANZLUEBBERS, A. (2002): Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. – *Soil and Tillage Research* **66**(2): 95–106.
- FREIBAUER, A., ROUNSEVELL, M.D., SMITH, P. & VERHAGEN, J. (2004): Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. – *Geoderma* **122**(1): 1–23.
- FREISTAAT SACHSEN: Agrarmeteorologisches Messnetz Sachsen - Wetterdaten. <https://www.landwirtschaft.sachsen.de/Wetter09/asp/inhalt.asp?seite=uebersicht>. Accessed 07/19/2016.
- FREISTAAT SACHSEN: Umweltindikatoren. Erosionsminderung. <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/4566.asp?id=4517&headline=Umweltindikatoren%20von%20A%20bis%20E>. Accessed 07/05/2016.
- GÁL, A., VYN, T.J., MICHÉLI, E., KLADIVKO, E.J. & MCFEE, W.W. (2007): Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. – *Soil and Tillage Research* **96**(1–2): 42–51.
- GAUBLomme, E., DE VOS, B. & COOLS, N. (2006): An Indicator for Microbial Biodiversity in Forest Soils, Brüssel.
- GEOSN (2016): DGM2. – Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen.
- GHANI, A., DEXTER, M. & PERROTT, K. (2003): Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. – *Soil Biology and Biochemistry* **35**(9): 1231–1243.
- GIFFORD, R.M. & RODERICK, M.L. (2003): Soil carbon stocks and bulk density: spatial or cumulative mass coordinates as a basis of expression? – *Global Change Biology* **9**(11): 1507–1514.
- GISI, U. (1997): Bodenökologie. [mit] 56 Tabellen. – Thieme, Stuttgart [u.a.], XIII, 351 S.
- GOEBEL, M.-O., BACHMANN, J., WOCHÉ, S.K. & FISCHER, W.R. (2005): Soil wettability, aggregate stability, and the decomposition of soil organic matter. – *Geoderma* **128**(1-2): 80–93.
- GOEBEL, M.-O., WOCHÉ, S.K. & BACHMANN, J. (2009): Do soil aggregates really protect encapsulated organic matter against microbial decomposition? – *Biologia* **64**(3).
- GOIDTS, E., VAN WESEMAEL, B. & CRUCIFIX, M. (2009): Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales. – *European Journal of Soil Science* **60**(5): 723–739.
- GOLCHIN, A., OADES, J.M., SKJEMSTAD, J.O. & CLARKE, P. (1994): Soil structure and carbon cycling. – *Australian Journal of Soil Research* **32**(5): 1043.
- GOSLING, P., PARSONS, N. & BENDING, G.D. (2013): What are the primary factors controlling the light fraction and particulate soil organic matter content of agricultural soils? – *Biology and Fertility of Soils* **49**(8): 1001–1014.
- GOVAERTS, B., VERHULST, N., CASTELLANOS-NAVARRETE, A., SAYRE, K.D., DIXON, J. & DENDOOVEN, L. (2009): Conservation Agriculture and Soil Carbon Sequestration: Between Myth and Farmer Reality. – *Critical Reviews in Plant Sciences* **28**(3): 97–122.
- GREGORICH, E.G., ed.: Soil Sampling and Methods of Analysis.
- GREGORICH, E.G., CARTER, M.R., DORAN, J.W., PANKHURST, C.E. & DWYER, L.M. (1997): Chapter 4: Biological attributes of soil quality. – In: Gregorich, E.G., Carter, M.R.: Soil quality for crop production and ecosystem health: 81–113; Elsevier, Amsterdam, New York.
- GREGORICH, E.G. & CARTER, M.R., eds. (1997): Soil quality for crop production and ecosystem health. – Elsevier, Amsterdam, New York, xv, 448.
- GREGORICH, E.G., MONREAL, C.M., CARTER, M.R., ANGERS, D.A. & ELLERT, B.H. (1994): Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. – *Canadian Journal of Soil Science* **74**(4): 367–385.
- GUMPert, J. (2012): Untersuchung von Erosionsstandorten auf einer Hangfläche in Methau (Sachsen) unter besonderer Berücksichtigung der Kolluvisolverbreitung. Ein Vergleich der Ergebnisse der mittelmaßstäblichen Bodenkarte BK 50 mit der in die Bodensystematik übersetzten Bodenschätzungskarte und eigenen Geländeuntersuchungen – Bachelorarbeit, TU Dresden, Dresden.

- GUO, D., LI, X., LI, X., WANG, J. & FU, H. (2013): Conventional tillage increases soil microbial biomass and activity in the Loess Plateau, China. – *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* **63**(6): 489–496.
- HAASE, G. & MANNSFELD, K. (2008): Mittelsächsisches Lösshügelland. – In: Mannsfeld, K., Syrbe, R.-U.: *Naturräume in Sachsen: 135–141*; Dt. Akad. für Landeskunde, Leipzig.
- HAASE, G. & MANNSFELD, K. (2008): Mulde - Lösshügelland. – In: Mannsfeld, K., Syrbe, R.-U.: *Naturräume in Sachsen: 141–148*; Dt. Akad. für Landeskunde, Leipzig.
- HAIDER, K. (1996): *Biochemie des Bodens.* – F. Enke, Stuttgart, x, 174.
- HARRISON, R.B., ADAMS, A.B., LICATA, C., FLAMING, B., WAGONER, G.L., CARPENTER, P. & VANCE, E.D. (2003): Quantifying Deep-Soil and Coarse-Soil Fractions. – *Soil Science Society of America Journal* **67**(5): 1602.
- HARTEMINK, A.E. & MCSWEENEY, K., eds. (2014): *Soil carbon.* – Springer, 506 pp.
- HARTGE, K.H. & HORN, R. (1989): *Die physikalische Untersuchung von Böden.* – Ferdinand Enke, Stuttgart.
- HAYNES, R. (2005): Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. – *Advances in Agronomy* **85**: 221–268.
- HEINZE, S. (2009): *Organische Düngung und reduzierte Bodenbearbeitung als Steuerungsfaktoren für die C-, N-, P- und S-Speicherung von Mikroorganismen* – Dissertation, Universität Kassel, Kassel.
- HEINZE, S., RAUBER, R. & JOERGENSEN, R.G. (2010): Influence of mouldboard plough and rotary harrow tillage on microbial biomass and nutrient stocks in two long-term experiments on loess derived Luvisols. – *Applied Soil Ecology* **46**(3): 405–412.
- HERMLE, S., ANKEN, T., LEIFELD, J. & WEISSKOPF, P. (2008): The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. – *Soil and Tillage Research* **98**(1): 94–105.
- HILLEL, D., ed. (2005): *Encyclopedia of Soils in the Environment.* – Elsevier, Oxford.
- HOBLEY, E. & WILLGOOSE, G. (2010): Measuring soil organic carbon stocks - issues and considerations. – In: IUSS: *Soil Solutions for a Changing World.*
- HOLLAND, H.D. & TUREKIAN, K.K., eds. (2014): *Treatise on Geochemistry.* – Elsevier Pergamon, Oxford, UK, San Diego, CA, USA.
- HOLLAND, J. (2004): The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **103**(1): 1–25.
- HÖPER, H. & SCHÄFER, W. (2012): Die Bedeutung der organischen Substanz von Mineralböden für den Klimaschutz. – *Bodenschutz* **2012**(3): 72–80.
- HOYER, U., REENTS, H.-J. & HÜLSBERGEN, K.-J. (2007): Einfluss der Bewirtschaftung auf Humuspools auf Humusbilanzen in landwirtschaftlich genutzten Böden.
- HUANG, S., SUN, Y.-N., RUI, W.-Y., LIU, W.-R. & ZHANG, W.-J. (2010): Long-Term Effect of No-Tillage on Soil Organic Carbon Fractions in a Continuous Maize Cropping System of Northeast China. – *Pedosphere* **20**(3): 285–292.
- HUTCHINSON, J., CAMPBELL, C. & DESJARDINS, R. (2007): Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. – *Agricultural and Forest Meteorology* **142**(2-4): 288–302.
- HÜTTL, R., PRECHTEL, A. & BENS, O. (2008): *Humusversorgung von Böden in Deutschland.*
- INSTITUT FÜR ZUCKERRÜBENFORSCHUNG (2016): *Bodendaten Lüttewitz 1995-2010.* E-Mail.
- INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, ED. (2012): *Great Plains Soil Fertility Conference.*
- INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANISATION, ED. (2009): *Proceedings of the 18th Conference.*
- IUSS, ED. (2010): *Soil Solutions for a Changing World.*
- IZZAURRALDE, R.C., HAUGEN-KOZYRA, K.H., JANS, D.C., MCGILL, W.B., GRANT, R.F. & HILEY, J.C. (2001): Chapter 37: Soil C Dynamics: Measurement, Simulation and Site-to-Region Scale-Up. – In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A.: *Assessment methods for soil carbon: 553–575*; Lewis Publishers, Boca Raton, Fla.
- JACOBS, A. (2010): *Effects of tillage on processes of organic matter sequestration* – Dissertation, Universität Kassel, Kassel.
- JACOBS, A., HELFRICH, M., HANISCH, S., QUENDT, U., RAUBER, R. & LUDWIG, B. (2010): Effect of conventional and minimum tillage on physical and biochemical stabilization of soil organic matter. – *Biology and Fertility of Soils* **46**(7): 671–680.
- JACOBS, A., JUNGERT, S. & KOCH, H.-J. (2015): Soil organic carbon as affected by direct drilling and mulching in sugar beet – wheat rotations. – *Archives of Agronomy and Soil Science* **61**(8): 1079–1087.
- JACOBS, A., RAUBER, R. & LUDWIG, B. (2009): Impact of reduced tillage on carbon and nitrogen storage of two Haplic Luvisols after 40 years. – *Soil and Tillage Research* **102**(1): 158–164.
- JANDL, R. & OLSSON, M., eds. (2007): *COST Action 639: Greenhouse-gas budget of soils under changing climate and land use (BurnOut).* European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, Wien.

- JANZEN, H.H., CAMPBELL, C.A., ELLERT, B.H. & BREMER, E. (1997): Chapter 12: Soil organic matter dynamics and their relationship to soil quality. – In: Gregorich, E.G., Carter, M.R.: Soil quality for crop production and ecosystem health: 227–291; Elsevier, Amsterdam, New York.
- JENKINSON, D. (2004): Measuring soil microbial biomass. – *Soil Biology and Biochemistry* **36**(1): 5–7.
- JOERGENSEN, R.G. (1996): The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the kEC value. – *Soil Biology and Biochemistry* **28**(1): 25–31.
- JOERGENSEN, R.G. & OLFS, H.-W. (1998): The variability between different analytical procedures and laboratories for measuring soil microbial biomass C and biomass N by the fumigation extraction method. – *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **161**(1): 51–58.
- JOERGENSEN, R.G., WU, J. & BROOKES, P.C. (2011): Measuring soil microbial biomass using an automated procedure. – *Soil Biology and Biochemistry* **43**(5): 873–876.
- JOSCHKO, M., BARKUSKY, D., ROGASIK, J., FOX, C.A., ROGASIK, H., GELLERT, R., BUCHHOLZ, B., ELLMER, F., REINHOLD, J. & GERLACH, F. (2012): On-farm study of reduced tillage on sandy soil: effects on soil organic carbon dynamic and earthworm abundance. – *Archives of Agronomy and Soil Science* **58**(sup1): 252–260.
- KAISER, M., PIEGHOLDT, C., ANDRUSCHKEWITSCH, R., LINSLER, D., KOCH, H.-J. & LUDWIG, B. (2014): Impact of tillage intensity on carbon and nitrogen pools in surface and sub-surface soils of three long-term field experiments. – *European Journal of Soil Science* **65**(4): 499–509.
- KANDELER, E., PALLI, S., STEMMER, M. & GERZABEK, M.H. (1999): Tillage changes microbial biomass and enzyme activities in particle-size fractions of a Haplic Chernozem. – *Soil Biology and Biochemistry* **31**(9): 1253–1264.
- KAY, B.D. & VANDENBYGAART, A.J. (2002): Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. – *Soil and Tillage Research* **66**(2): 107–118.
- KELLER, T. (2006): Vergleich unterschiedlicher, landwirtschaftlicher Bearbeitungsmethoden hinsichtlich der Akkumulation von Humus, organischem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff innerhalb der Ackerkrume, nach langjährig differenzierter Bewirtschaftung – Diplomarbeit, Universität Leipzig, Leipzig.
- KERN, J.S. & JOHNSON, M.G. (1993): Conservation Tillage Impacts on National Soil and Atmospheric Carbon Levels. – *Soil Science Society of America Journal* **57**(1): 200.
- KINDLER, R., MILTNER, A., RICHNOW, H. & KÄSTNER, M. (2006): Fate of gram-negative bacterial biomass in soil—mineralization and contribution to SOM. – *Soil Biology and Biochemistry* **38**(9): 2860–2870.
- KLAHSEN, W. (2015): Wie wirkt sich einmaliges Pflügen nach langjähriger Direktsaat auf den Anteil von Makroaggregaten im Boden aus? Eine zeitlich differenzierte Betrachtung – Bachelorarbeit, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen.
- KNEBL, L., LEITHOLD, G. & BROCK, C. (2015): Improving minimum detectable differences in the assessment of soil organic matter change in short-term field experiments. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **178**(1): 35–42.
- KOCH, H.-J. (2010): Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf den Humuspool des Bodens. Untersuchungen im Gemeinschaftsversuch Bodenbearbeitung von Südzucker AG und IfZ. Interner Abschlussbericht.
- KOCH, H.-J. & STOCKFISCH, N. (2006): Loss of soil organic matter upon ploughing under a loess soil after several years of conservation tillage. – *Soil and Tillage Research* **86**(1): 73–83.
- KÖGEL-KNABNER, I. & AMELUNG, W. (2014): Dynamics, Chemistry, and Preservation of Organic Matter in Soils. – In: Holland, H.D., Turekian, K.K.: *Treatise on Geochemistry*: 157–215; Elsevier Pergamon, Oxford, UK, San Diego, CA, USA.
- KÖGEL-KNABNER, I., EKSCHMITT, K., FLESSA, H., GUGGENBERGER, G., MATZNER, E., MARSCHNER, B. & LÜTZOW, M. von (2008): An integrative approach of organic matter stabilization in temperate soils: Linking chemistry, physics, and biology. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **171**(1): 5–13.
- KÖHLER, W., SCHACHTEL, G.A. & VOLESKE, P. (2007): *Biostatistik*. [eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler] ; mit 50 Tabellen. – Springer, Berlin, Heidelberg, New York, XIV, 329 S.
- KOLBE, H. (2009): Klimawandel und C-Sequestrierung. Auswirkungen differenzierter Land- und Bodenbewirtschaftung auf den C- und N-Haushalt der Böden unter Berücksichtigung konkreter Szenarien der prognostizierten Klimaänderung im Freistaat Sachsen, 143 pp.
- KOLBE, H. (2010): Site-adjusted organic matter-balance method for use in arable farming systems. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **173**(5): 678–691.
- KOLBE, H. (2012): Bilanzierungsmethoden und Versorgungsniveau für Humus.
- KOLBE, H., FRANKO, U., THIEL, E. & LIEß, E. (2013): Humusreproduktion und N-Umsatz. Verfahren zur Abschätzung von Humusreproduktion und N-Umsatz im ökologischen und konventionellen Ackerbau.
- KOLBE, H. & ZIMMER, J. (2015): Leitfaden zur Humusversorgung. Informationen für Praxis, Beratung, Schulung, Dresden.

- KÖRSCHENS, M. (2010): Der organische Kohlenstoff im Boden (Corg) – Bedeutung, Bestimmung, Bewertung Soil organic carbon (Corg) – importance, determination, evaluation. – Archives of Agronomy and Soil Science **56**(4): 375–392.
- KÖRSCHENS, M., ALBERT, E., BAUMECKER, M., ELLMER, F., GRUNERT, M., HOFFMANN, S., KISMANYOKY, T., KUBAT, J., KUNZOVA, E., MARX, M., ROGASIK, J., RINKLEBE, J., RÜHLMANN, J., SCHILLI, C., SCHRÖTER, H., SCHROETTER, S., SCHWEIZER, K., TOTH, Z., ZIMMER, J. & ZORN, W. (2014): Humus und Klimaänderung - Ergebnisse aus 15 langjährigen Dauerfeldversuchen. – Archives of Agronomy and Soil Science **60**(11): 1485–1517.
- KÖRSCHENS, M. & SCHULZ, E. (1999): Die organische Bodensubstanz. Dynamik - Reproduktion - ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte.
- KÖRSCHENS, M., SCHULZ, E. & BEHM, R. (1990): Heißwasserlöslicher C und N im Boden als Kriterium für das N-Nachlieferungsvermögen. – Zentralblatt für Mikrobiologie **145**(4): 305–311.
- KRAWUTSCHKE, M. (2007): Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf Gehalt und Dynamik der organischen Bodensubstanz in Ackerböden sowie deren Bedeutung für die Humusbilanzierung – Masterarbeit, Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- KRAWUTSCHKE, M., BROCK, C. & LEITHOLD, G. (2009): Humusmenge in der Ackerkrume nach langjährig differenzierter Intensität der Grundbodenbearbeitung. – In: Mayer, J., Alföldi, T., Leiber, F., Dubois, D., Fried, P., Heckendorn, F., Hillmann, E., Klocke, P., Lüscher, A., Riedel, S., Stolze, M., Strasser, F., van der Heijden, M., Willer, H.: Werte - Wege - Wirkungen: Biolandbau im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherung, Markt und Klimawandel.: Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Zürich. Volume 1: 45–48.
- KTBL (2015): Bodenbearbeitung und Bestellung. Definition von Bodenbearbeitungs- und Bestellsystemen.
- KUKA, K. (2005): Modellierung des Kohlenstoffhaushaltes in Ackerböden auf der Grundlage bodenstrukturabhängiger Umsatzprozesse – Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle-Wittenberg, 205 pp.
- KURZ, G., MÜLLER, M. & YARAMANCI, U. (2005): Ermittlung des Wasserretentionsvermögens von Ackerflächen mit Hilfe der Kombination geophysikalischer Methoden. Abschlussbericht.
- KUTSCH, W., BAHN, M. & HEINEMEYER, A. (2009): Soil carbon dynamics. An integrated methodology. – Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, xi, 286.
- LAL, R. (2004): Agricultural activities and the global carbon cycle. – Nutrient Cycling in Agroecosystems **70**(2): 103–116.
- LAL, R. & KIMBLE, J.M. (2001): Chapter 3: Importance of soil bulk density and methods of its measurement. – In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A.: Assessment methods for soil carbon: 31–44; Lewis Publishers, Boca Raton, Fla.
- LAL, R., KIMBLE, J.M., FOLLETT, R.F. & STEWART, B.A., eds. (2001): Assessment methods for soil carbon. – Lewis Publishers, Boca Raton, Fla., 676 pp.
- LAL, R., LORENZ, K., HÜTTL, R.F., SCHNEIDER, B.U. & VON BRAUN, J. (2012): Terrestrial Biosphere as a Source and Sink of Atmospheric Carbon Dioxide. – In: Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Braun, J. von: Recarbonization of the biosphere: Ecosystems and the global carbon cycle: 1–15; Springer, Dordrecht.
- LAL, R., LORENZ, K., HÜTTL, R.F., SCHNEIDER, B.U. & BRAUN, J. von, eds. (2012): Recarbonization of the biosphere. Ecosystems and the global carbon cycle. – Springer, Dordrecht, 586 S.
- LANDGRAF, D., BÖHM, C. & MAKESCHIN, F. (2003): Dynamic of different C and N fractions in a Cambisol under five year succession fallow in Saxony (Germany). – Journal of Plant Nutrition and Soil Science **166**(3): 319–325.
- LARNEY, F.J., BREMER, E., JANZEN, H., JOHNSTON, A.M. & LINDWALL, C. (1997): Changes in total, mineralizable and light fraction soil organic matter with cropping and tillage intensities in semiarid southern Alberta, Canada. – Soil and Tillage Research **42**(4): 229–240.
- LEE, J., HOPMANS, J.W., ROLSTON, D.E., BAER, S.G. & SIX, J. (2009): Determining soil carbon stock changes: Simple bulk density corrections fail. – Agriculture, Ecosystems & Environment **134**(3-4): 251–256.
- LEIFELD, J. & KÖGEL-KNABNER, I. (2005): Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? – Geoderma **124**(1-2): 143–155.
- LEINWEBER, P., SCHULTEN, H.-R. & KÖRSCHENS, M. (1995): Hot water extracted organic matter: chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment. – Biology and Fertility of Soils **20**(1): 17–23.
- LEWANDOWSKI, A. (1999): Assessing the soil system. A review of soil quality literature.
- LFULG 2012: Exkursionsführer – Exkursion der Bodenspezialisten der Bodenspezialisten – Jahrestagung 2012, 85 Seiten, Hrsg. LfULG

- LIEBEROTH, I. (1963): Lösssedimentation und Bodenbildung während des Pleistozäns in Sachsen. – *Geologie* **12**(2): 149–187.
- LIU, E., TECLEMARIAM, S.G., YAN, C., YU, J., GU, R., LIU, S., HE, W. & LIU, Q. (2014): Long-term effects of no-tillage management practice on soil organic carbon and its fractions in the northern China. – *Geoderma* **213**: 379–384.
- LORENZ, K. & LAL, R. (2012): Cropland Soil Carbon Dynamics. – In: Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R.F., Schneider, B.U., Braun, J. von: *Recarbonization of the biosphere: Ecosystems and the global carbon cycle*: 303–346; Springer, Dordrecht.
- LU, X. & LIAO, Y. (2016): Effect of tillage practices on net carbon flux and economic parameters from farmland on the Loess Plateau in China. – *Journal of Cleaner Production*.
- LUGATO, E., BAMPA, F., PANAGOS, P., MONTANARELLA, L. & JONES, A. (2014): Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices. – *Global Change Biology* **20**(11): 3557–3567.
- LUO, Z., WANG, E. & SUN, O.J. (2010): Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **139**(1-2): 224–231.
- LUO, Z., WANG, E. & SUN, O.J. (2010): Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: A review and synthesis. – *Geoderma* **155**(3-4): 211–223.
- LÜTZOW, M. von, KÖGEL-KNABNER, I., LUDWIG, B., MATZNER, E., FLESSA, H., EKSCMITT, K., GUGGENBERGER, G., MARSCHNER, B. & KALBITZ, K. (2008): Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **171**(1): 111–124.
- MACHULLA, G. (2000): *Mikrobielle Aktivität von Böden aus anthropogenen und natürlichen Substraten. Meß- und Schätzverfahren für die Standortbewertung – Habilitation*, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle-Wittenberg.
- MACHULLA, G. (2003): Soil microbial indicators and their environmental significance. – *Journal of Soils and Sediments* **3**(4): 229.
- MACHULLA, G. & BLUME, H.-P., JAHN, R. (2001): Schätzung der mikrobiellen Biomasse von Böden aus anthropogenen und natürlichen Substraten — ein Beitrag zur Standortbewertung. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **164**(5): 547–554.
- MACHULLA, G., NITZSCHE, O. & SCHMIDT, W. (2008): *Stoffaustrag und Bodenbearbeitung. Veränderte Pflanzenschutzmittel- und Nährstoffausträge bei bodenschonender Bewirtschaftung – Risikoanalyse und -vorsorge*, Dresden.
- MADEJON, E., MORENO, F., MURILLO, J.M. & PELEGRIN, F. (2007): Soil biochemical response to long-term conservation tillage under semi-arid Mediterranean conditions. – *Soil and Tillage Research* **94**(2): 346–352.
- MALLAST, J., RÜHLMANN, J. & STEINMANN, H.-H. (2015): Wird "Pfluglos" überbewertet?
- MANNFELD, K. (2008): Böden. – In: Mannsfeld, K., Syrbe, R.-U.: *Naturräume in Sachsen*: 34–38; Dt. Akad. für Landeskunde, Leipzig.
- MANNFELD, K. & SYRBE, R.-U., eds. (2008): *Naturräume in Sachsen*. – Dt. Akad. für Landeskunde, Leipzig, 288 pp.
- MARSCHNER, B., BRODOWSKI, S., DREVES, A., GLEIXNER, G., GUDE, A., GROOTES, P.M., HAMER, U., HEIM, A., JANDL, G., JI, R., KAISER, K., KALBITZ, K., KRAMER, C., LEINWEBER, P., RETHEMEYER, J., SCHÄFFER, A., SCHMIDT, M.W.I., SCHWARK, L. & WIESENBERG, G.L.B. (2008): How relevant is recalcitrance for the stabilization of organic matter in soils? – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **171**(1): 91–110.
- MAYER, J., ALFÖLDI, T., LEIBER, F., DUBOIS, D., FRIED, P., HECKENDORN, F., HILLMANN, E., KLOCKE, P., LÜSCHER, A., RIEDEL, S., STOLZE, M., STRASSER, F., VAN DER HEIJDEN, M., WILLER, H., ED. (2009): *Werte - Wege - Wirkungen: Biolandbau im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherung, Markt und Klimawandel. Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*, Zürich.
- MAZZONCINI, M., ANTICHI, D., DI BENE, C., RISALITI, R., PETRI, M. & BONARI, E. (2016): Soil carbon and nitrogen changes after 28 years of no-tillage management under Mediterranean conditions. – *European Journal of Agronomy* **77**: 156–165.
- MEHLER, K., SCHÖNING, I. & BERLI, M. (2014): The Importance of Rock Fragment Density for the Calculation of Soil Bulk Density and Soil Organic Carbon Stocks. – *Soil Science Society of America Journal* **78**(4): 1186.
- MELERO, S., LÓPEZ-GARRIDO, R., MURILLO, J.M. & MORENO, F. (2009): Conservation tillage. Short- and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. – *Soil and Tillage Research* **104**(2): 292–298.
- MESZNER, S. (2008): *Lösse in Sachsen. Neue Untersuchungen zur Stratigraphie der weichselzeitlichen Lössse in der Region um Lommatzsch – Diplomarbeit*, Technische Universität Dresden, Dresden.

- MILTNER, A., BOMBACH, P., SCHMIDT-BRÜCKEN, B. & KÄSTNER, M. (2012): SOM genesis: microbial biomass as a significant source. – *Biogeochemistry* **111**(1-3): 41–55.
- MISHRA, U., USSIRI, D.A. & LAL, R. (2010): Tillage effects on soil organic carbon storage and dynamics in Corn Belt of Ohio USA. – *Soil and Tillage Research* **107**(2): 88–96.
- MORDHORST, A. (2013): Soil structure-carbon relations of differently textured and managed arable soils subjected to mechanical loading – Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- MÜLLER, T. & HÖPER, H. (2004): Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content. Consequences for model applications. – *Soil Biology and Biochemistry* **36**(6): 877–888.
- NANNIPIERI, P. (1994): The potential use of soil enzymes as indicators of productivity, sustainability and pollution. – In: Pankhurst, C.E.: *Soil biota: Management in sustainable farming systems*: 238–244; CSIRO, East Melbourne.
- NIEDER, R., HARDEN, T., MARTENS, R. & KUMAR BENBI, D. (2008): Microbial biomass in arable soils of Germany during the growth period of annual crops. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **171**(6): 878–885.
- NITZSCHE, O., KRÜCK, S., ZIMMERLING, B. & SCHMIDT, W.: *Boden- und gewässerschonende Landwirtschaft in Flusseinzugsgebieten*: 1–22.
- ODUM, E.P. (1969): The Strategy of Ecosystem Development. – *Science* **164**(3877): 262–270.
- OGLE, S.M., SWAN, A. & PAUSTIAN, K. (2012): No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **149**: 37–49.
- OLSON, K.R., EBELHAR, S.A. & LANG, J.M. (2013): Effects of 24 Years of Conservation Tillage Systems on Soil Organic Carbon and Soil Productivity. – *Applied and Environmental Soil Science* **2013**(4): 1–10.
- OMONODE, R.A., GAL, A., STOTT, D.E., ABNEY, T.S. & VYN, T.J. (2006): Short-term Versus Continuous Chisel and No-till Effects on Soil Carbon and Nitrogen. – *Soil Science Society of America Journal* **70**(2): 419–425.
- OORTS, K., BOSSUYT, H., LABREUCHE, J., MERCKX, R. & NICOLARDOT, B. (2007): Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. – *European Journal of Soil Science* **58**(1): 248–259.
- PANKHURST, C.E., ed. (1994): *Soil biota. Management in sustainable farming systems*. – CSIRO, East Melbourne, 262 pp.
- PARIHAR, C.M., YADAV, M.R., JAT, S.L., SINGH, A.K., KUMAR BENBI, D., PRADHAN, S., CHAKRABORTY, D., JAT, M.L., JAT, R.K., SAHARAWAT, Y.S. & YADAV, O.P. (2016): Long term effect of conservation agriculture in maize rotations on total organic carbon, physical and biological properties of a sandy loam soil in north-western Indo-Gangetic Plains. – *Soil and Tillage Research* **161**: 116–128.
- PAUL, E.A. (2007): *Soil microbiology, ecology and biochemistry*. – Academic Press, Burlington, Mass, 532 pp.
- PAUSTIAN, K., ANDRÉN, O., JANZEN, H.H., LAL, R., SMITH, P., TIAN, G., TIESSSEN, H., NOORDWIJK, M. & WOOMER, P.L. (1997): Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. – *Soil Use and Management* **13**(s4): 230–244.
- PAUSTIAN, K., SIX, J., ELLIOTT, E.T. & HUNT, H.W. (2000): Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. – *Biogeochemistry* **48**(1): 147–163.
- PECIO, A., SYP, A. & FOTYMA, M. (2014): Impacts of soil management on chemical soil quality. – In: *Compatibility of Agricultural Management Practices and Types of Farming in the EU to enhance Climate Change Mitigation and Soil Health*.
- PICCOLO, A. (2012): Carbon sequestration in agricultural soils. A multidisciplinary approach to innovative methods. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Heidelberg, New York, 1 online resource (xiii, 307).
- PIEGHOLDT, C., GEISSELER, D., KOCH, H.-J. & LUDWIG, B. (2013): Long-term tillage effects on the distribution of phosphorus fractions of loess soils in Germany. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **176**(2): 217–226.
- PIERCE, F.J., FORTIN, M.-C. & STATON, M.J. (1994): Periodic Plowing Effects on Soil Properties in a No-Till Farming System. – *Soil Science Society of America Journal* **58**(6): 1782–1787.
- PLANTE, A.F. & MCGILL, W.B. (2002): Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. – *Soil and Tillage Research* **66**(1): 79–92.
- POEPLAU, C., DON, A., VESTERDAL, L., LEIFELD, J., VAN WESEMAEL, B.A., SCHUMACHER, J. & GENSIOR, A. (2011): Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone - carbon response functions as a model approach. – *Global Change Biology* **17**(7): 2415–2427.
- POWLSON, D.S. & JENKINSON, D.S. (1981): A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils. – *The Journal of Agricultural Science* **97**(03): 713.
- POWLSON, D.S., STIRLING, C.M., JAT, M.L., GERARD, B.G., PALM, C.A., SANCHEZ, P.A. & CASSMAN, K.G. (2014): Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. – *Nature Climate Change* **4**(8): 678–683.

- PRECHTEL, A., LÜTZOW, M. von, SCHNEIDER, B.U., BENS, O., BANNICK, C.G., KÖGEL-KNABNER, I. & HÜTTL, R.F. (2009): Organic carbon in soils of Germany: Status quo and the need for new data to evaluate potentials and trends of soil carbon sequestration. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **172**(5): 601–614.
- PRONK, G.J., HEISTER, K. & KÖGEL-KNABNER, I. (2013): Is turnover and development of organic matter controlled by mineral composition? – *Soil Biology and Biochemistry* **67**: 235–244.
- PUGET, P., CHENU, C. & BALESSENT, J. (1995): Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. – *European Journal of Soil Science* **46**(3): 449–459.
- PUGET, P., CHENU, C. & BALESSENT, J. (2000): Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. – *European Journal of Soil Science* **51**(4): 595–605.
- RASMUSSEN, P.E. & COLLINS, H.P. (1991): Long-Term Impacts Of Tillage, Fertilizer, And Crop Residue On Soil Organic Matter In Temperate Semiarid Regions. – *Advances in Agronomy* **45**: 93–134.
- REEVES, D.W. (1997): The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. – *Soil and Tillage Research* **43**(1-2): 131–167.
- REICOSKY, D.C., REEVES, D.W., PRIOR, S.A., RUNION, G.B., ROGERS, H.H. & RAPER, R.L. (1999): Effects of residue management and controlled traffic on carbon dioxide and water loss. – *Soil and Tillage Research* **52**(3–4): 153–165.
- RICE, C.W. (2005): Carbon Cycle in Soils. Dynamics and Management. – In: Hillel, D.: *Encyclopedia of Soils in the Environment*: 164–170; Elsevier, Oxford.
- RICHTER, D.d.B., HOFMOCKEL, M., CALLAHAM, M.A., POWLSON, D.S. & SMITH, P. (2007): Long-Term Soil Experiments: Keys to Managing Earth's Rapidly Changing Ecosystems. – *Soil Science Society of America Journal* **71**(2): 266.
- ROWELL, D.L. (1997): *Bodenkunde. Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen*. – Springer, Berlin, Heidelberg.
- SÁ, J.C.d.M. & LAL, R. (2009): Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. – *Soil and Tillage Research* **103**(1): 46–56.
- SÄCHSISCHER AGRARBERICHT 2015 (2016), Hrsg. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/26607>.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2002): *Berichte aus der Pflanzenproduktion*.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, ED. (2004): *Landwirtschaftlicher Bodenschutz in Sachsen*.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2005): *Entwicklung der Biodiversität von Ackerflächen bei umweltgerechtem Ackerbau. Abschlussbericht zum Projekt „Entwicklung der Biodiversität von Ackerflächen bei umweltgerechtem Ackerbau“*.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2007): *Umsetzung der Düngeverordnung. Hinweise und Richtwerte für die Praxis*.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, L.u.G. (2011): *Exkursionsführer Landwirtschaftlicher Erosionsschutz. Exkursion TU Bergakademie Freiberg Fachgebiet Boden- und Gewässerschutz 23.03.2011, 32 pp*.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, L.u.G. (2012): *Agrarstrukturgebiete im Freistaat Sachsen. Zusammenstellung standörtlicher Bedingungen für die Landwirtschaft und Flächennutzung*. https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/RAWIS_Natuerliche_Bedingungen_ASG.pdf. Accessed 10/14/2016.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, L.u.G. (2012): *Bodenkarte 1:50 000 (BK 50). Digitale Version*. – Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, L.u.G. (2012): *Exkursionsführer. Exkursion der Bodenspezialisten der Bundesländer im Rahmen der Jahrestagung 2012 am 23.05.2012*.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, L.u.G. (2013): *Erläuterung Erosionsgefährdungskarten Freistaat Sachsen*. https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/Erosionskarten_Erlaeuterung.pdf. Accessed 11/02/2016.
- SCHÄDLER, M.: *Versuchsstation Bad Lauchstädt*. <https://www.ufz.de/index.php?de=39922>. Accessed 07/19/2016.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*. – Spektrum Akad. Verl., Heidelberg, 593 pp.
- SCHINNER, F., ÖHLINGER, R. & KANDELER, E. (1991): *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. – Springer, Berlin, Heidelberg.
- SCHINNER, F. & SONNLEITNER, R. (1996): *Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik. Grundlagen, Klima, Vegetation, Relief*. – Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 450 pp.
- SCHINNER, F. & SONNLEITNER, R. (1996): *Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenenzymatik. II Bodenbewirtschaftung, Düngung, Rekultivierung*. – Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio, 359 pp.

- SCHLESINGER, W.H. (2000): Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **82**(1-3): 121–127.
- SCHMELMER, K. & URBAN, B. (2011): Humusgehalte ackerbaulich genutzter Sandböden im Klimawandel – Experimente und Modellierung. – In: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft: Jahrestagung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft: Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen. 3. - 9. September 2011, Berlin.
- SCHMIDT, J., SCHULZ, E., MICHALZIK, B., BUSCOT, F. & GUTKNECHT, J.L. (2015): Carbon input and crop-related changes in microbial biomarker levels strongly affect the turnover and composition of soil organic carbon. – *Soil Biology and Biochemistry* **85**: 39–50.
- SCHMIDT, M.W.I., TORN, M.S., ABIVEN, S., DITTMAR, T., GUGGENBERGER, G., JANSSENS, I.A., KLEBER, M., KÖGEL-KNABNER, I., LEHMANN, J., MANNING, D.A.C., NANNIPIERI, P., RASSE, D.P., WEINER, S. & TRUMBORE, S.E. (2011): Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. – *Nature* **478**(7367): 49–56.
- SCHMIDT, W. (1993): Ergebnisse zur Bodenerosion durch Wasser. Versuchsjahr 1992 (Feldversuch Mettau/Hermsdorf).
- SCHMIDT, W., NITZSCHE, O., KRÜCK, S. & ZIMMERMANN, M. (2002): Entwicklung von dauerhaft umweltgerechten Landwirtschaftungsverfahren im sächsischen Einzugsgebiet der Elbe. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Teilthema I: Begleitende Untersuchungen zur praktischen Anwendung und Verbreitung von konservierender Bodenbearbeitung, Zwischenfruchtanbau sowie Mulchsaat in den Ackerbaugebieten Sachsens zur Minderung von Wassererosion und Nährstoffaustrag im Elbeeinzugsgebiet, 133 pp. URL: <https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/10895.htm>.
- SCHRÖDER, P. (2016): Der Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die Bodenrespiration von Ackerböden. Untersuchungen zur CO₂-Emission des Bodens auf einer Dauerversuchsfläche im Sächsischen Lösshügelland – Masterarbeit, Universität Leipzig, Leipzig.
- SCHRUMPF, M., SCHULZE, E.D., KAISER, K. & SCHUMACHER, J. (2011): How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? – *Biogeosciences* **8**(5): 1193–1212.
- Schulz, E. (1997): Charakterisierung der organischen Bodensubstanz (OBS) nach dem Grad ihrer Umsetzbarkeit und ihre Bedeutung für Transformationsprozesse für Nähr- und Schadstoffe. *Arch. Acker-Pfl. Boden.* **41**, 465–484.
- SCHULZ, E. (2004): Influence of site conditions and management on different soil organic matter (som) pools. – *Archives of Agronomy and Soil Science* **50**(1): 33–47.
- SCHULZ, F., BROCK, C., SCHMIDT, H., FRANZ, K.-P. & LEITHOLD, G. (2014): Development of soil organic matter stocks under different farm types and tillage systems in the Organic Arable Farming Experiment Gladbacherhof. – *Archives of Agronomy and Soil Science* **60**(3): 313–326.
- SEIDEL, M. (2013): Charakterisierung der Verteilung von organischer Bodensubstanz in Ackerböden bei differenzierter Bodenbewirtschaftung und VIS-NIR-spektroskopische Bestimmung unterschiedlicher OBS-Fraktionen – Masterarbeit, Universität Leipzig, Leipzig.
- SEYFAHRT, W., JOSCHKO, M., ROGASIK, J., HÖHN, W., AUGUSTIN, J. & SCHROETTER, S. (1999): Bodenökologische und pflanzenbauliche Effekte konservierender Bodenbearbeitung auf sandigen Böden, Müncheberg.
- SEYFAHRT, W., JOSCHKO, M., ROGASIK, J., HÖHN, W., AUGUSTIN, J., SCHROETTER, S., BRUNOTTE, J., ELLERBROCK, R., HIEROLD, W., HÖFLICH, G., ROGASIK, H., TAUSCHKE, M., WENDROTH, O. & SCHULZE, M. (1999): Bodenökologische und pflanzenbauliche Effekte konservierender Bodenbearbeitung auf sandigen Böden: C- und N-Verluste und bodenbiologische Aktivität. – In: Seyfahrt, W., Joschko, M., Rogasik, J., Höhn, W., Augustin, J., Schroetter, S.: Bodenökologische und pflanzenbauliche Effekte konservierender Bodenbearbeitung auf sandigen Böden: 9–90, Müncheberg.
- SHI, A. & MARSCHNER, P. (2014): Addition of a clay subsoil to a sandy topsoil changes the response of microbial activity to drying and rewetting after residue addition - a model experiment. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **177**(4): 532–540.
- SHI, A. & MARSCHNER, P. (2014): Soil respiration and microbial biomass after residue addition are influenced by the extent by which water-extractable organic C was removed from the residues. – *European Journal of Soil Biology* **63**: 28–32.
- SIX, J., CONANT, R.T., PAUL, E.A. & PAUSTIAN, K. (2002): Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. – *Plant and Soil* **241**(2): 155–176.
- SIX, J., ELLIOTT, E. & PAUSTIAN, K. (2000): Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. – *Soil Biology and Biochemistry* **32**(14): 2099–2103.
- SIX, J., FELLER, C., DENEFF, K., OGLE, S.M., MORAES, J.C. de & ALBRECHT, A. (2002): Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. – *Agronomie* **22**(7-8): 755–775.

- SMUCKER, A.J., WANG, W., KRAVCHENKO, A.N. & DICK, W.A. (2010): Forms and Functions of Meso and Micro-niches of Carbon within Soil Aggregates. – *Journal of Nematology* **42**(1): 84–86.
- SOANE, B.D., BALL, B.C., ARVIDSSON, J., BASCH, G., MORENO, F. & ROGER-ESTRADE, J. (2012): No-till in northern, western and south-western Europe. A review of problems and opportunities for crop production and the environment. – *Soil and Tillage Research* **118**: 66–87.
- SOMMER, R., RYAN, J., MASRI, S., SINGH, M. & DIEKMANN, J. (2011): Effect of shallow tillage, moldboard plowing, straw management and compost addition on soil organic matter and nitrogen in a dryland barley/wheat-vetch rotation. – *Soil and Tillage Research* **115-116**: 39–46.
- SPARGO, J., ALLEY, M., FOLLETT, R. & WALLACE, J. (2008): Soil carbon sequestration with continuous no-till management of grain cropping systems in the Virginia coastal plain. – *Soil and Tillage Research* **100**(1-2): 133–140.
- SPARLING, G.P., FELTHAM, C.W., REYNOLDS, J., WEST, A.W. & SINGLETON, P. (1990): Estimation of soil microbial C by a fumigation-extraction method: use on soils of high organic matter content, and a reassessment of the *k_e*-factor. – *Soil Biology and Biochemistry* **22**(3): 301–307.
- SPARLING, G.P., VOJVODIĆ-VUKOVIĆ, M. & SCHIPPER, L. (1998): Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: The relationship with microbial biomass C. – *Soil Biology and Biochemistry* **30**(10-11): 1469–1472.
- SPARLING, G.P. & WEST, A.W. (1989): Importance of soil water content when estimating soil microbial C, N and P by the fumigation-extraction methods. – *Soil Biology and Biochemistry* **21**(2): 245–253.
- SPIEGEL, H., SCHLATTER, N., HASLMAYR, H.-P., LEHTINEN, T. & BAUMGARTEN, A. (2014): Impacts of soil management on indicators for climate change mitigation. – In: *Compatibility of Agricultural Management Practices and Types of Farming in the EU to enhance Climate Change Mitigation and Soil Health*.
- STALEY, T.E., EDWARDS, W.M., OWENS, L.B. & SCOTT, C.L. (1988): Soil Microbial Biomass and Organic Component Alterations in a No-Tillage Chronosequence. – *Soil Science Society of America Journal* **52**(4): 998.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2010): Bei der Bodenbearbeitung dominiert der Pflug. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Produktionsmethoden/AktuellBodenbearbeitung.html>. Accessed 07/05/2016.
- STATISTISCHES LANDESAMT DES FREISTAATES SACHSEN (2015): Erträge ausgewählter Fruchtarten im Freistaat Sachsen ab 1991. https://www.statistik.sachsen.de/download/050_W-Land-Forstwirt/Zeitreihe_Ertraege.pdf. Accessed 07/05/2016.
- STEINMANN, T., WELP, G., WOLF, A., HOLBECK, B., GROßE-RÜSCHKAMP, T. & AMELUNG, W. (2016): Repeated monitoring of organic carbon stocks after eight years reveals carbon losses from intensively managed agricultural soils in Western Germany. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **179**(3): 355–366.
- STOCKFISCH, N., FORSTREUTER, T. & EHLERS, W. (1999): Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. – *Soil and Tillage Research* **52**(1-2): 91–101.
- STOCKMANN, U., ADAMS, M.A., CRAWFORD, J.W., FIELD, D.J., HENAKAARCHCHI, N., JENKINS, M., MINASNY, B., MCBRATNEY, A.B., COURCELLES, V.d.R.d., SINGH, K., WHEELER, I., ABBOTT, L., ANGERS, D.A., BALDOCK, J., BIRD, M., BROOKES, P.C., CHENU, C., JASTROW, J.D., LAL, R., LEHMANN, J., O'DONNELL, A.G., PARTON, W.J., WHITEHEAD, D. & ZIMMERMANN, M. (2013): The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **164**: 80–99.
- SÜMER, M.R. (2012): Auswirkungen verschiedener Bodennutzungssysteme auf ausgewählte physiko-chemische Bodeneigenschaften und pflanzenbauliche Parameter in Berlin-Dahlem und Dedelow – Dissertation, Humboldt-Universität, Berlin.
- SÜMER, M.R. & ZEITZ, J. (2009): Verschiedene Bodennutzungssysteme und deren Effekte auf Humusgehalt, Aggregat Stabilität und die ungesättigte Wasserleitfähigkeit eines langjährigen Versuchsfeldes in Berlin Dahlem. – In: *Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft: Jahrestagung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft: Böden - eine endliche Ressource*. September 2009, Bonn.
- SÜMER, M.R. & ZEITZ, J. (2011): Verschiedene Bodennutzungssysteme und deren Auswirkungen auf den Humusgehalt (Corg) in zwei langjährigen Versuchsfeldern, Berlin Dahlem (Humboldt- Universität zu Berlin) und in Dedelow, ZALF Müncheberg. – In: *Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft: Jahrestagung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft: Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen*. 3. - 9. September 2011, Berlin.
- SUN, B., HALLETT, P.D., CAUL, S., DANIELL, T.J. & HOPKINS, D.W. (2011): Distribution of soil carbon and microbial biomass in arable soils under different tillage regimes. – *Plant and Soil* **338**(1-2): 17–25.

- SUN, H.Y., WANG, C.X., WANG, X.D. & REES, R.M. (2013): Changes in soil organic carbon and its chemical fractions under different tillage practices on loess soils of the Guanzhong Plain in north-west China. – *Soil Use and Management* **29**(3): 344–353.
- TEBRÜGGE, F. & DÜRING, R.-A. (1999): Reducing tillage intensity — a review of results from a long-term study in Germany. – *Soil and Tillage Research* **53**(1): 15–28.
- TEIWES, K. (1997): Bodenkundliche Bestandsaufnahme auf Feldversuchsflächen der Südzucker AG zur Bodenbearbeitung.
- TEIWES, K. (2005): Auswahl repräsentativer Meßfelder und Packungsdichten des Bodens auf der Versuchsfläche Lüttewitz der Südzucker AG.
- THIEL, E. (2002): Stickstoffhaushalt und sickerwassergebundener Stickstoffaustrag bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung. Ein Untersuchungsbeispiel aus dem Mittelsächsischen Lösshügelland unter besonderer Berücksichtigung des Reliefeinflusses und des C/N-Verhältnisses. – Diplomarbeit, Universität Leipzig, Leipzig.
- THIEL, E. (2010): Modellierung des Einflusses landwirtschaftlicher Landnutzung auf Bodenfunktionen mit dem Modell CANDY. – Der Andere Verl, Tönning, Lübeck, Marburg, XII, 115 S.
- THIEL, E. & KOLBE, H. (2011): Untersuchungen zur nachhaltigen Sicherung der Humusgehalte in Sachsen. – In: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft: Jahrestagung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft: Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen. 3. - 9. September 2011, Berlin. Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen.
- THROOP, H.L., ARCHER, S.R., MONGER, H.C. & WALTMAN, S. (2012): When bulk density methods matter. Implications for estimating soil organic carbon pools in rocky soils. – *Journal of Arid Environments* **77**: 66–71.
- THUN, R. & HOFFMANN, G. (2012): Die Untersuchung von Böden. – VDLUFA-Verl., Darmstadt, Losebl.-Ausg.
- THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2011): Vergleich von Bodenbearbeitungsverfahren mit und ohne Pflug.
- UFZ (2016): Global Change Experimental Facility (GCEF). <https://www.ufz.de/index.php?de=40038>.
- ULRICH, S., TISCHER, S., HOFMANN, B. & CHRISTEN, O. (2010): Biological soil properties in a long-term tillage trial in Germany. – *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **173**(4): 483–489.
- VAN-CAMP, L., BUJARRABAL, B., GENTILE, A.R., JONES, R.J.A., MONTANARELLA, L., OLAZABAL, C. & SELVARADJOU, S.-K., eds. (2004): Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. Volume III - Organic Matter, Luxembourg.
- VANCE, E.D., BROOKES, P.C. & JENKINSON, D.S. (1987): An extraction method for measuring soil microbial biomass C. – *Soil Biology and Biochemistry* **19**(6): 703–707.
- VANDENBYGAART, A.J. (2006): Monitoring soil organic carbon stock changes in agricultural landscapes: Issues and a proposed approach. – *Canadian Journal of Soil Science* **86**(3): 451–463.
- VANDENBYGAART, A.J., GREGORICH, E.G. & ANGERS, D.A. (2003): Influence of agricultural management on soil organic carbon: A compendium and assessment of Canadian studies. – *Canadian Journal of Soil Science* **83**(4): 363–380.
- VANDENBYGAART, A.J. & KAY, B.D. (2004): Persistence of Soil Organic Carbon after Plowing a Long-Term No-Till Field in Southern Ontario, Canada. – *Soil Science Society of America Journal* **68**(4): 1394–1402.
- VDLUFA, ED. (2008): Pflanzenernährung und Ressourcenschutz. Kongressband., 10 pp.
- VENTEREA, R.T., BAKER, J.M., DOLAN, M.S. & SPOKAS, K.A. (2006): Carbon and Nitrogen Storage are Greater under Biennial Tillage in a Minnesota Corn–Soybean Rotation. – *Soil Science Society of America Journal* **70**(5): 1752.
- VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (2012): Anhang E5 (2016). Aus Ringversuchen abgeleitete Messunsicherheiten von Parametern der Boden- und Substratanalytik. – In: Bassler, R.: Die Untersuchung von Böden; VDLUFA-Verl., Darmstadt.
- VESTERDAL, L. & LEIFELD, J. (2007): Land-use change and management effects on soil carbon sequestration: Forestry and agriculture. – In: Jandl, R., Olsson, M.: COST Action 639: Greenhouse-gas budget of soils under changing climate and land use (BurnOut): European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research: 25–32, Wien.
- VIRTO, I., BARRÉ, P., BURLLOT, A. & CHENU, C. (2012): Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. – *Biogeochemistry* **108**(1-3): 17–26.
- VOHLAND, M., BESOLD, J., HILL, J. & FRÜND, H.-C. (2011): Comparing different multivariate calibration methods for the determination of soil organic carbon pools with visible to near infrared spectroscopy. – *Geoderma* **166**(1): 198–205.

- VOHLAND, M. & EMMERLING, C. (2011): Determination of total soil organic C and hot water-extractable C from VIS-NIR soil reflectance with partial least squares regression and spectral feature selection techniques. – *European Journal of Soil Science* **62**(4): 598–606.
- WALTER, K., DON, A., TIEMEYER, B. & FREIBAUER, A. (2016): Determining Soil Bulk Density for Carbon Stock Calculations. A Systematic Method Comparison. – *Soil Science Society of America Journal* **80**(3): 579.
- WASNER, J. (2009): Einfluss einer Carbokalkdüngung bei kalkhaltigen Böden auf das Ertragsverhalten sowie auf ausgewählte bodenchemische und -physikalische Parameter – Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- WEGENER, U. (2001): Dauerhafte Bodenbearbeitungsverfahren in Zuckerrübenfruchtfolgen. Ertragsbildung, Rentabilität, Energiebilanz und Bodenerosion im Vergleich. Univ., Diss.–Göttingen, 2001. – Cu villier, Göttingen, 145 pp.
- WEIGEL, A., EUSTICE, T., VAN ANTWERPEN, R., NAIDOO, G. & SCHULZ, E. (2011): Soil organic carbon (SOC) changes indicated by hot water extractable carbon (HWEC). – *Proc S Afr Sug Technol Ass*(84): 210–222.
- WENDT, J.W. & HAUSER, S. (2013): An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers. – *European Journal of Soil Science* **64**(1): 58–65.
- WEST, T.O. & POST, W.M. (2002): Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation. – *Soil Science Society of America Journal* **66**(6): 1930–1946.
- WIESMEIER, M., HÜBNER, R., BARTHOLD, F., SPÖRLEIN, P., GEUß, U., HANGEN, E., REISCHL, A., SCHILLING, B., LÜTZOW, M. von & KÖGEL-KNABNER, I. (2013): Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of southeast Germany (Bavaria). – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **176**: 39–52.
- WIESMEIER, M., SCHAD, P., LÜTZOW, M. von, POEPLAU, C., SPÖRLEIN, P., GEUß, U., HANGEN, E., REISCHL, A., SCHILLING, B. & KÖGEL-KNABNER, I. (2014): Quantification of functional soil organic carbon pools for major soil units and land uses in southeast Germany (Bavaria). – *Agriculture, Ecosystems & Environment* **185**: 208–220.
- WINKELMANN, W., ELLMER, F. & ZEITZ, J. (2006): Einfluss differenzierter organisch-mineralischer Düngung auf die partikuläre organische Substanz des Bodens. *Archives of Agronomy and Soil Science*. – *Archives of Agronomy and Soil Science* **52**(4): 365–376.
- WINTER, J.P., ZHANG, Z., TENUTA, M. & VORONEY, R.P. (1994): Measurement of Microbial Biomass by Fumigation-Extraction in Soil Stored Frozen. – *Soil Science Society of America Journal* **58**(6): 1645.
- WOLF (2009: 40 ff.):
- WOLF, B. & SNYDER, G.H. (2003): Sustainable Soils. The Place of Organic Matter in Sustaining Soils and their Productivity. – The Haworth Press, Binghamton (New York).
- WRIGHT, A.L. & HONS, F.M. (2005): Tillage impacts on soil aggregation and carbon and nitrogen sequestration under wheat cropping sequences. – *Soil and Tillage Research* **84**(1): 67–75.
- WRIGHT, A.L., HONS, F.M., LEMON, R.G., MCFARLAND, M.L. & NICHOLS, R.L. (2007): Stratification of nutrients in soil for different tillage regimes and cotton rotations. – *Soil and Tillage Research* **96**(1-2): 19–27.
- WUEST, S.B. (2009): Correction of Bulk Density and Sampling Method Biases Using Soil Mass per Unit Area. – *Soil Science Society of America Journal* **73**(1): 312.
- YANG, X., DRURY, C., REYNOLDS, W. & TAN, C. (2008): Impacts of long-term and recently imposed tillage practices on the vertical distribution of soil organic carbon. – *Soil and Tillage Research* **100**(1-2): 120–124.
- YANG, X., DRURY, C., WANDER, M. & KAY, B.D. (2008): Evaluating the Effect of Tillage on Carbon Sequestration Using the Minimum Detectable Difference Concept. – *Pedosphere* **18**(4): 421–430.
- YANG, X., DRURY, C. & WANDER, M.M. (2013): A wide view of no-tillage practices and soil organic carbon sequestration. – *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* **63**(6): 523–530.
- YANG, X. & KAY, B.D. (2001): Impacts of tillage practices on total, loose- and occluded-particulate, and humified organic carbon fractions in soils within a field in southern Ontario. – *Canadian Journal of Soil Science* **81**(2): 149–156.
- ZEVENBERGEN, L.W. & THORNE, C.R. (1987): Quantitative analysis of land surface topography. – *Earth Surface Processes and Landforms* **12**(1): 47–56.
- ZHU, L., YANG, M. & CHEN, C. (2012): Effect of Improved Management Practices on Soil Organic Carbon Sequestration in Wheat-maize Double Cropping System in North China. – *Journal of Agricultural Science* **4**(9).
- ZIBILSKE, L., BRADFORD, J. & SMART, J. (2002): Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. – *Soil and Tillage Research* **66**(2): 153–163.

Danksagung

Unser Dank gilt

- der Südzucker AG, Geschäftsbereich Landwirtschaft und
- Herrn Daniel Kunzendorf, Gut Lüttewitz, Lüttewitz/Sachsen (Südzucker AG)

für die Bereitstellung der Versuchsfelder sowie für die Unterstützung bei den Felduntersuchungen und Feldversuchen.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL).

Autor:

Dr. Fabian Kirsten
Institut für Geographie
Johannisallee 19a, 04103 Leipzig
Telefon: +49 341 97 32910
E-Mail: fabian.kirsten@uni-leipzig.de

Redaktion:

Dr. Walter Schmidt
LfULG, Abteilung Landwirtschaft, Referat Pflanzenbau
Waldheimer Str. 219, 01683 Nossen
Telefon: + 49 35242 631-7200
Telefax: +49 35242 631-7299
E-Mail: walter.schmidt@smul.sachsen.de

Fotos:

Susann Förster, Dr. Fabian Kirsten, Ines Walter

Redaktionsschluss:

30.06.2017

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/31557> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinarbeit des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.