UNIVERSITÄT TRIER

Fachbereich VI

Geographie / Geowissenschaften

Studiengang:

Geographie SR II

Angewandte Physische Geographie

Diplomarbeit

Überprüfung der Humusbilanzierung anhand von Dauerversuchen in verschiedenen Klimaregionen Europas

vorgelegt von:

Karen Beuke

Am Herrenhof 66

53913 Swisttal

Matr.-Nr. 386790

Erstgutachter: Prof. Dr. D. Schröder

Zweitgutachter: PD Dr. Ch. Emmerling

Januar 2006

Inhalt

Inhaltsverzeichnis I
Abbildungsverzeichnis III
Tabellenverzeichnis IX
Kartenverzeichnis XV
Abkürzungsverzeichnis XVI

1. Einleitung 1
2. Stand der Forschung 3
2.1 Die organische Bodensubstanz (OBS) 3
2.2 Einflüsse auf die Humusumsetzung im Boden 3
2.2.1 Abbau und Umwandlung der organischen Primärsubstanz 4
2.2.2 Stabilisierung der organischen Substanz 4
2.3 Einfluss von Standorteigenschaften auf den Humusgehalt der Böden 5
2.3.1 Bodeneigenschaften 5
2.3.2 Klima und Relief 7
2.3.3 Einfluss der Bewirtschaftung 8
2.4 Fraktionierungen 11
2.5 Der standorttypische Humusgehalt und die Humusbestimmung 12
2.6 Bilanzierung und Modellierung des C-Umsatzes 14
3. Zielsetzung 20
4. Material und Methoden 21
5. Ergebnisse 26
5.1 Allgemeines 26
5.1.1 Ausreißer 27
5.1.2 Trockenmassegehalte der organischen Düngemittel 31
5.1.3 Der Corg-Wert zu Versuchsbeginn 32
5.1.4 Die Optimalvarianten 34
5.2 Dünger und Fruchtarten 35
5.2.1 Mineralischer Stickstoffdünger 36
5.2.2 Organische Dünger 39
5.2.3 Fruchtarten 55
5.3 Klimaparameter 57

5.3.1 Einfluss des Niederschlages 57
5.3.2 Einfluss der Temperatur 64
5.4 Einfluss der Bodenarten..... 67
5.5 Ergebnisüberblick hinsichtlich Dünge- und Bodenartengruppen..... 78
6. Diskussion..... 80
6.1 Unter- bzw. Überschätzung der Humusan- bzw. –abreicherung der Humusbilanz..... 80
6.2 Möglichkeiten der Verbesserung oder Anpassung an verschiedene Boden- und Klimaeigenschaften..... 87
6.3 Ökologische Beurteilungen 88
7. Schlussfolgerungen und Ausblick 90
8. Zusammenfassung 93

Literaturverzeichnis 95
Anhang..... 111
Dank 153
Erklärung 154

Abbildungen

Abb. 1: Median, Streubereiche und Ausreißer der Differenz zwischen der tatsächlichen jährlichen Veränderung an Corg (= 0 kg/ha/a) und den mit den unteren bzw. oberen Bilanzwerten berechneten Änderungen unter Einbeziehung von 123 unterschiedlich gedüngten oder ungedüngten Versuchsvarianten 27

Abb. 2: Darstellung aller Varianten, deren Bilanzwerte (untere oder obere) um mehr als 1000 kg/ha/a Corg von den tatsächlichen Werten abweichen (Ausreißer). Vergleich zwischen den tatsächlichen Veränderungen an Corg (= 0 kg/ha/a) zwischen Versuchsanfang und -ende und den unteren sowie oberen Bilanzwerten 28

Abb. 3: Alle Düngevarianten des Standortes Speyer. Verglichen werden die tatsächlichen Veränderungen an Corg (kg/ha/a) mit den Bilanzsalden (untere und obere Werte) 31

Abb. 4: Vergleich der Differenz des Corg-Wertes zu Versuchsende (kg/ha) vier verschiedener Klassen (n = 14) mit unterschiedlich hohen Stickstoffmineraldüngergaben mit dem Corg-Wert der jeweiligen Nullparzellen zu Versuchsende 36

Abb. 5: Vergleich der tatsächlichen jährlichen Veränderung der Corg-Menge (kg/ha) des Ap-Horizontes von fünf verschiedenen Klassen mit unterschiedlich hohen Stickstoffmineraldüngergaben, einschließlich der Nullvarianten 38

Abb. 6: Vergleich fünf verschiedener Klassen mit unterschiedlich hohen Stickstoffmineraldüngergaben, einschließlich der Nullvarianten, bezüglich der Differenz (mittlerer Betrag der Abweichung) zwischen den Bilanzwerten (untere und obere) und den tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg (= 0 kg/ha) 38

Abb. 7: Vergleich der Differenz des Corg-Wertes zu Versuchsende (kg/ha) zwischen den mit ausschließlich unterschiedlichen Mengen an Stallmist gedüngten Parzellen und des Corg-Wertes der Nullparzellen 39

Abb. 8: Vergleich der Differenz des Corg-Wertes zu Versuchsende (kg/ha) zwischen den „optimal“ mit Stallmist und Stickstoffmineraldünger behandelten Parzellen und des Corg-Wertes der Nullparzellen 40

Abb. 9: Vergleich der optimalen Düngevarianten mit der jeweiligen Stallmistvariante (gleiche Düngegabe an Stallmist wie die Optimalvariante) und der Stickstoffmineraldüngungsvariante (gleiche Düngegabe an Stickstoffmineraldünger wie die Optimalvariante) hinsichtlich der Differenz der Corg-Werte (kg/ha) zur Nullvariante bei Versuchsende 41

Abb. 10: Vergleich der tatsächlichen jährlichen Veränderung an Corg (= 0 kg/ha/a Corg) und der unteren und oberen Bilanzwerte der neun „optimal“ mit Stallmist und Mineralstickstoff gedüngten Varianten 43

Abb. 11: Vergleich der optimalen Güllevariante (Gülle + N-Min.) mit der Güllevariante (gleiche Düngegabe an Gülle, wie die Optimalvariante) und der N-Mineraldüngungsvariante (gleiche Düngegabe an N-Min. wie die Optimalvariante) hinsichtlich der Differenz der Corg-Werte (kg/ha) zur Nullvariante (= 0 kg/ha Corg) bei Versuchsende des Standortes Puch 46

Abb. 12: Vergleich der zwei „optimal“ mit Gülle und Stickstoffmineraldünger gedüngten Varianten zwischen der tatsächlichen jährlichen Veränderung an Corg (= 0 kg/ha/a Corg) und den unteren und oberen Bilanzwerten 47

Abb. 13: Vergleich der „optimalen“ Strohvarianten (Puch: 3,5 t/ha/a Stroh + 80 kg/ha/a N-Min., Ultuna 4,4 t/ha/a Stroh + 80 kg/ha/a N-Min.) mit der Strohvariante (gleiche Strohmenge, wie die Optimalvariante) und der Stickstoffmineraldüngungsvariante (gleiche Menge an N-Min. wie die Optimalvariante) der Standorte Puch und Ultuna hinsichtlich der Differenz der Corg-Werte (kg/ha) zur Nullvariante bei Versuchsende 49

Abb. 14: Unterschied der Corg-Gehalte der Nullvariante und der Strohvarianten mit gestaffelten N-Mineraldüngergaben zwischen Versuchsbeginn 1983 und Versuchsende 1994 des Standortes Puch in Bayern 50

Abb. 15: Vergleich der zwei „optimal“ mit Stroh und Stickstoffmineraldünger gedüngten Varianten hinsichtlich der tatsächlichen jährlichen Veränderung an Corg (kg/ha) und den unteren und oberen Bilanzwerten 52

Abb. 16: Entwicklung der organischen Bodenkohlenstoffgehalte von 1956 (Versuchsbeginn) bis 1999 der Nullparzelle und der „Optimalvariante“ mit einer Düngung von 4,4 t/ha/a Stroh und 80 kg/ha/a Stickstoffmineraldünger in Ultuna (Schweden) 54

Abb. 17: Gegenüberstellung der jährlichen Corg-Veränderungen (kg/ha/a) und Bilanzergebnisse der unteren und oberen Werte (Corg kg/ha/a) in den Zeiträumen 1956 - 1991 und 1987 - 1991 der Optimalvariante (4,41 t/ha/a Stroh + 80 kg/ha/a N) von Ultuna..... 54

Abb. 18: Vergleich der „optimal“ mit Stallmist, Gülle und Stroh (jeweils mit Stickstoffmineraldünger) gedüngten Varianten mit der Düngungsempfehlung der unteren Bilanzwerte, der oberen Bilanzwerte und durch die tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg (t/ha/a) 55

Abb. 19: Vergleich der Corg-Veränderungen (Masse-%) zwischen Versuchsbeginn (= 0 Masse-%) und -ende zweier unterschiedlicher Fruchtfolgen unter jeweils gleichen Düngergaben (Nullparzelle, gestaffelte N-Min.-Düngung 40-160 kg/ha/a) des Standortes Puch 56

Abb. 20: Einfluss des Niederschlages (mm/a) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der Nullvarianten zu Versuchsende aller 13 Standorte (einfache lineare Regression) 57

Abb. 21: Einfluss des Niederschlages (mm/a) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der Nullvarianten bei Versuchsende von elf Standorten ohne die Ausreißer von Wien und Keszthely (einfache lineare Regression)..... 58

Abb. 22: Darstellung des Corg-Gehaltes (Masse-%) unter Einfluss des Niederschlages zu Versuchsende von elf Nullparzellen ohne Ausreißer. Gruppierung der Standorte in zwei Bodenarten-gruppen (S- und U/L-Böden) und Darstellung durch je eine Anpassungslinie (Regressionslinie mit quadratischer Steigung)..... 59

Abb. 23: Darstellung des Corg-Gehaltes (Masse-%) unter Einfluss des Niederschlages zu Versuchsende von elf Nullparzellen ohne Ausreißer. Gruppierung der Standorte in zwei Bodenartengruppen (S- und U/L-Böden) und Darstellung durch je eine Anpassungslinie (iterativ gewichtete kleinste Quadrate nach Epanechnikow – Loess) 60

Abb. 24: Einfluss des Niederschlages (mm/a) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der zehn „optimal“ gedüngten Varianten bei Versuchsende ohne Ausreißer (einfache lineare Regression)..... 61

Abb. 25: Darstellung des Corg-Gehaltes (Masse-%) unter Einfluss des Niederschlages zu Versuchsende von zehn „optimal“ gedüngten Varianten ohne Ausreißer. Gruppierung der Standorte in zwei Bodenartengruppen (S- und U/L-Böden) und Darstellung deren Trends durch eine Anpassungslinie (Regressionslinie mit quadratischer Steigung) 62

Abb. 26: Einfluss des Jahresdurchschnittsniederschlages (mm) auf die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen der Corg-Mengen (= 0 kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der zehn „optimal“ gedüngten Varianten (Regressionslinie mit quadratischer Steigung) 63

Abb. 27: Einfluss der Temperatur (°C) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der Böden der elf Nullvarianten bei Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression) 64

Abb. 28: Einfluss der Temperatur (°C) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der Böden der neun „Optimalvarianten“ (ohne Ultuna) bei Versuchsende der einzelnen Standorte (einfache lineare Regression) 65

Abb. 29: Darstellung des Corg-Gehaltes (Masse-%) unter Einfluss der Temperatur zu Versuchsende von zehn „optimal“ gedüngten Varianten. Gruppierung der Standorte in zwei Bodenartengruppen (S- und U/L-Böden) und Darstellung durch je eine Anpassungslinie (Regressionslinie mit quadratischer Steigung)..... 66

Abb. 30: Einfluss der Jahresdurchschnittstemperatur (°C) auf die Differenz zwischen den gemessenen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes (kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der zehn „optimal“ gedüngten Varianten (0 kg/ha/a Corg = gemessene jährliche Veränderungen) 67

Abb. 31: Einfluss des Tongehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der Nullvarianten zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression) 68

Abb. 32: Einfluss des Tongehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der Optimalvarianten zu Versuchsende der zehn Dauerversuche (einfache lineare Regression) 69

Abb. 33: Einfluss des Schluffgehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der Nullvarianten (ohne Puch) zu Versuchsende der zehn Dauerversuche (einfache lineare Regression) 70

Abb. 34: Einfluss des Schluffgehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der neun „Optimalvarianten“ (ohne Puch) zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression)..... 71

Abb. 35: Einfluss des FAT-Gehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der neun Nullvarianten (ohne Ultuna und Dülmen) zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression)..... 72

Abb. 36: Einfluss des FAT-Gehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der neun „Optimalvarianten (ohne Ultuna) zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression)..... 72

Abb. 37: Einfluss des Sandgehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der zehn Nullvarianten (ohne Puch) zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression) 73

Abb. 38: Einfluss des Sand-Gehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der neun Optimalvarianten (ohne Puch) zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (Einfache lineare Regression)..... 74

Abb. 39: Einfluss des Tongehaltes (Masse-%) auf die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes (kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der neun „optimal“ gedüngten Varianten 75

Abb. 40: Einfluss des Schluffgehaltes (Masse-%) auf die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes (kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der acht „optimal“ gedüngten Varianten (ohne Puch und Thyrow) 76

Abb. 41: Einfluss des Feinanteilgehaltes (Masse-%) auf die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes (kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der neun „optimal“ gedüngten Varianten 76

Abb. 42: Einfluss des Sandgehaltes (Masse-%) auf die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes (kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der acht „optimal“ gedüngten Varianten (ohne Puch und Thyrow) 77

Abb. 43: Sortierung der „Optimalvarianten“ in Dünge- und Bodenartengruppen. Vergleich hinsichtlich der durchschnittlichen Abweichung der Bilanzergebnisse (untere und obere Werte) von der gemessenen Corg-Bilanz (kg/ha/a) im Boden 79

Tabellen

Tab. 1: Menge und Qualität (C kg/ha; C/N) der Ernte- und Wurzelrückstände (EWR; Spross und Wurzeln, ohne Wurzelhaare) verschiedener Fruchtarten auf einer Schwarzerde aus Löss (Bad Lauchstädt) bei mittlerem Düngungsniveau 10

Tab. 2: Mittlere Verweilzeiten (a) von Kohlenstoff in verschiedenen Pools der organischen Bodensubstanz nach Modellen von JENKINSON & RAYNER (1977), BUYANOVSKY/ASLAM/ WAGNER (1994), HAIDER (1998), KÖRSCHENS (1980a, zit. nach KÖRSCHENS et al. 1997) und FRANKO (1997) (eigene zusammenfassende Darstellung nach zitierter Literatur)..... 12

Tab 3: Versuchsnummern und -namen, Bodenart und Klima-parameter der 13 Dauerversuchsstandorte dieser Arbeit 22

Tab. 4: Rechenbeispiel der Humusbilanz (KÖRSCHENS et al. 2004) anhand einer Variante (var1a33) des Standortes Puch (eigene Berechnung, s. Tab. A1, A2) 23

Tab. 5: Corg-Mengen und Gehalte (t/ha, Masse-%) vom Versuchsbeginn (1984) und Versuchsende (1992) aller Düngungsvarianten vom Standort Keszthely (Ungarn)..... 29

Tab. 6: Corg-Mengen und Gehalte (t/ha, Masse-%) vom Versuchsbeginn (1986) und Versuchsende (1998) aller Düngungsvarianten vom Standort Wien (Österreich) 30

Tab. 7: Gegenüberstellung vom Betrag der mittleren Abweichung zwischen dem Bilanzsaldo (unterer und oberer Wert) und der tatsächlichen Veränderung an Corg (kg/ha/a) bei allen 32 ausschließlich mit Stallmist gedüngten Varianten hinsichtlich der unterschiedlichen Stallmist-Trockenmassegehalte von 25, 35 und 55 % 32

Tab. 8: Alle Versuche deren Corg-Werte zu Versuchsbeginn annähernd im Fließgleichgewicht liegen (mit Jahresangaben)..... 33

Tab. 9: Bewirtschaftungsweise der acht verschiedenen Versuchs-flächen vor Versuchsbeginn und deren Versuchsdauer. Aufgezählt werden nur die Standorte, deren Versuchsbeginn dem Anlagejahr entspricht 33

Tab. 10: Alle experimentell ermittelten optimalen Düngevarianten zwölf verschiedener Standorte mit Düngeformen und –mengen sowie Corg-Mengen zu Versuchsbeginn und –ende. (Grau unterlegt sind die Varianten, die für Berechnungen des Klima- und Bodenarteneinflusses herangezogen wurden) 35

Tab. 11: Experimentell ermittelter, mit den unteren Werten und oberen Werten bilanzierter und anhand der tatsächlichen jährlichen Veränderungen errechneter Humusbedarf (verrotteter Stallmist t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Stallmist-varianten (organisch-mineralisch). 40 Humusäquivalente (kg Humus-C) je t Stallmist 45

Tab. 12: Experimentell ermittelter, mit den unteren und oberen Werten bilanzierter und anhand der tatsächlichen jährlichen Veränderungen errechneter Humusbedarf (Gülle t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Güllevarianten (organisch-mineralisch). Neun Humusäquivalente (kg Humus-C) je t Gülle..... 48

Tab. 13: Experimentell ermittelter, mit den unteren und oberen Werten bilanzierter und anhand der tatsächlichen jährlichen Veränderungen errechneter Humusbedarf (Stroh t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Strohvarianten (organisch-mineralisch) 53

Tabellen im Anhang

Tab. A1–27: Standorteigenschaften und Düngevarianten der Dauer-versuche 111-131

Tab. A28: Vergleich der unteren und oberen Bilanzwerte mit den gemessenen jährlichen Corg-Veränderungen (kg/ha/a). Die Differenzen sind durch den Median, das 25. Perzentil, das 75. Perzentil und den mittlerer Betrag der Abweichung dargestellt. Berücksichtigt werden 123 Varianten von zwölf verschiedenen Standorten. Den Bilanzberechnungen liegt ein Gülle TM-Gehalt von 6 % zugrunde 132

Tab. A29: Alle Varianten, deren mit den unteren und oberen Bilanzwerten bilanzierter Corg-Gehalt (kg/ha/a) um mehr als 1000 kg/ha/a von den gemessenen Ergebnissen abweicht (≙ Ausreißer). 17 von insgesamt 123 Varianten sind Ausreißer. Den Bilanzberechnungen liegt ein Gülle TM-Gehalt von 6 % zugrunde 135

Tab. A30: Vergleich der Differenzen zwischen den unteren und oberen Bilanzwerten mit den gemessenen Corg-Veränderungen (kg/ha/a) ohne Ausreißer (s. Tab. A29). Berücksichtigt werden 106 Varianten von elf verschiedenen Standorten. Den Bilanzberechnungen liegt ein Gülle TM-Gehalt von 6 % zugrunde 135

Tab. A31: Gegenüberstellung des Betrags der mittleren Abweichung zwischen dem Bilanzsaldo (unterer und oberer Wert) und der gemessenen Veränderung an Corg (kg/ha/a) bei allen 32 ausschließlich mit Stallmist gedüngten Varianten hinsichtlich der unterschiedlichen Stallmist-Trockenmassegehalte von 25, 35 und 55 % 138

Tab. A32: Vergleich der Differenz des Corg-Wertes zu Versuchsende (kg/ha) von vier verschiedenen Klassen mit unterschiedlich hohen N-Mineraldüngergaben mit dem Corg-Wert der jeweiligen Nullparzellen (dargestellt in Tab. A32I) zu Versuchsende 139

Tab. A33: Einteilung von 31 mit unterschiedlich hohen N-Mineraldüngergaben (einschließlich der Nullvarianten) gedüngten Varianten in fünf Klassen unter Betrachtung der gemessenen jährlichen Veränderung des Corg-Gehaltes (kg/ha) des Ap (Mittelwert) und dessen Differenz zu den unteren und oberen Bilanzwerten. Die Differenzen sind als mittlerer Betrag der Abweichung angegeben 141

Tab. A34: Differenzen des Corg-Wertes (kg/ha) zwischen den mit ausschließlich unterschiedlichen Mengen an Stallmist gedüngten Varianten zu Versuchsende und des Corg-Wertes der Nullvarianten zu Versuchsende von zehn Standorten 143

Tab. A35: Vergleich der gemessenen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha/a) mit den unteren und oberen Bilanzwerten der „optimal“ mit Stallmist und N-Mineraldüngung gedüngten Varianten. Angabe der Differenz des Corg-Gehaltes (kg/ha) zwischen Versuchsende der Nullparzellen und den Optimalvarianten 144

Tab. A36: Vergleich der neun „optimal“ mit Stallmist und Stickstoffmineraldünger gedüngten Varianten zwischen der gemessenen jährlichen Veränderung an Corg (kg/ha/a) und den unteren und oberen Bilanzwerten. Die mittlere Abweichung der Ergebnisse ist in Betrag angegeben 144

Tab. A37: Experimentell ermittelter und mit den unteren Werten bilanzierter Humusbedarf (verrotteter Stallmist t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Stallmistvarianten (organisch-mineralisch) 145

Tab. A38: Vergleich der Differenz des Corg-Wertes zu Versuchsende (kg/ha) zwischen den mit ausschließlich unterschiedlichen Mengen an Gülle gedüngten Parzellen (Optimalvariante und ausschließlich Gülle) und des Corg-Wertes der Nullparzellen von Puch 145

Tab. A39: Humusreproduktionskoeffizient der den optimalen Gülleversuch des Standortes Puch am besten einschätzt 145

Tab. A40: Vergleich der zwei „optimal“ mit Gülle und N-Min. gedüngten Varianten zwischen den gemessenen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha) und den unteren und oberen Bilanzwerten. Die mittlere Abweichung der Ergebnisse ist in Betrag angegeben 146

Tab. A41: Experimentell ermittelter und mit den unteren Werten bilanzierter Humusbedarf (Gülle t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Güllevarianten (organisch-mineralisch) 146

Tab. A42: Differenz des Corg-Wertes (kg/ha) zu Versuchsende zwischen den mit unterschiedlichen Mengen an Stroh gedüngten Parzellen und dem Corg-Wert der Nullparzellen 146

Tab. A43: Vergleich der zwei „optimal“ mit Stroh und N-Min. gedüngten Varianten zwischen der gemessenen jährlichen Veränderung an Corg (kg/ha) und den unteren und oberen Bilanzwerten. Die mittlere Abweichung der Ergebnisse ist in Betrag angegeben. Außerdem Vergleich der Differenzen zu Versuchsende zwischen dem Corg-Gehalt (kg/ha) der Stroh-Optimalvarianten und der jeweiligen Nullvariante 147

Tab. A44: Unterschied der organischen Bodenkohlenstoffgehalte der Nullvariante und der Strohvarianten mit gestaffelten N-Mineraldüngergaben zwischen Versuchsbeginn (1983) und Versuchsende (1994) des IOSDV(a) von Puch in Bayern 147

Tab. A45: Experimentell ermittelter und mit den unteren Werten bilanzierter Humusbedarf (Stroh t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Stallmistvarianten (organisch-mineralisch) 148

Tab. A46: Corg-Gehalte (Masse-%) der Nullvariante und der Optimalvariante (Stroh + N-Min.) des Soil organic matter-Dauerversuches in Ultuna von 16 Jahren im Zeitraum von 1956 bis 1999 148

Tab. A47: Vergleich der gemessenen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha/a) mit den unteren und oberen Bilanzwerten von der „optimal“ mit Stroh und N-Min. gedüngten Variante von Ultuna in unterschiedlichen Zeiträumen 149

Tab. A48: Corg-Werte (Masse-%) vom Versuchsende, gemessene jährliche Veränderungen an Corg (kg/ha), Bilanzierungsergebnisse (obere und untere Werte), Differenzen zwischen den gemessenen Corg-Mengen (kg/ha/a) und den Bilanzergebnissen sowie Klima- und Bodenparameter der 13 Nullvarianten 150

Tab. A49: Corg-Werte (Masse-%) vom Versuchsende, gemessene jährliche Veränderungen an Corg (kg/ha), Bilanzierungsergebnisse (obere und untere Werte), Differenzen zwischen den gemessenen Corg-Mengen (kg/ha/a) und den Bilanzergebnissen sowie Klima- und Bodenparameter der zehn „optimal“ gedüngten Varianten 151

Tab. A50: Einteilung ausgewählter „Optimalvarianten“ in die Bodenartengruppen Sandböden („leichte“ Böden) und Schluff- und Lehmböden („schwere“ Böden) 152

Tab. A51: Gruppierung der „Optimalvarianten“ nach Dünge- und Bodenartengruppen und Beurteilung hinsichtlich der durchschnittlichen Abweichung der Bilanzergebnisse (untere und obere Werte) zu der gemessenen Corg-Bilanz des Bodens 152

Karte

Karte 1: Übersichtskarte der 13 europäischen Standorte, deren Dauerversuche hinsichtlich der Humusbilanzierung ausgewertet werden 21

Abkürzungen

a	Jahr
Ap	gepflügter terrestrischer Oberbodenhorizont
AOS	aktive organische Substanz
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
Corg	organischer Kohlenstoff
Ct	Gesamtkohlenstoff
Cums	umsetzbarer Kohlenstoff
dt	Dezitonne
EWR	Ernte- und Wurzelrückstände
FAT	Feinanteil (Ton und Feinschluff, Korngrößen < 0,0063 mm)
FM	Frischmasse
fU	Feinschluff (0,002 – 0,0063 mm Äquivalentdurchmesser)
HE	Humuseinheit
Humus-C	organischer Kohlenstoff
IOSDV	Internationale organische Stickstoffdauerdüngungsversuche
K	Kalium
Ld	Lagerungsdichte
N	Stickstoff
N-Min.	mineralischer Stickstoffdünger
Nt	Gesamtstickstoff
n. v.	nicht vorhanden
OBS	organische Bodensubstanz
OPS	organische Primärsubstanz
P	Phosphor
pers.	persönliche
ROS	reproduktionswirksame organische Substanz
S	Sand (0,063 – 2 mm Äquivalentdurchmesser)
So	Sommer
sog.	so genannt
SOS	stabilisierte organische Substanz
T	Ton (< 0,002 mm Äquivalentdurchmesser)
TM	Trockenmasse
U	Schluff (0,002 – 0,063 mm Äquivalentdurchmesser)
VDLUFA	Verband deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
Wi	Winter
zit.	zitiert

1. Einleitung

Der Humus oder die organische Bodensubstanz (= OBS, im Folgenden synonym verwendet) ist ein wesentlicher Parameter für die Bodenfruchtbarkeit. Er hat Einfluss auf die Bodenfunktionen und spielt eine große Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf.

Die OBS dient als eine Nährstoffquelle für die Pflanzen und wirkt regulierend auf deren Nährstoffversorgung. Nährstoffe, die im Boden in Form von Kationen vorliegen, werden von den Huminstoffen adsorbiert. Die OBS hat somit Einfluss auf die Kationenaustauschkapazität (KAK) der Böden. Außer den Filter– und Pufferfunktionen sind die physikalischen Wirkungen von Bedeutung. Dies sind u. a. die Begünstigung eines stabilen Aggregatgefüges, Einfluss auf die Trockenrohdichte, eine hohe Wasserspeicherkapazität, die Verschiebung der Konsistenzgrenzen der Böden in Richtung höherer Wassergehalte und die Erwärmungsbegünstigung der Böden. Humus kann somit erosionsmindernd wirken. Eine erhöhte biologische Aktivität durch die organische Substanz kommt nicht zu letzt wieder dem Pflanzenwachstum zu gute. Bei den Kulturpflanzen kommt durch die organische Düngung noch der positive, nachhaltige Effekt des antiphytopathogenen Potentials hinzu, d. h. sie sind in humushaltigen Böden weniger krankheitsanfällig (SAUERBECK 1992).

Die Intensivierung der Landwirtschaft im letzten Jahrhundert und die dadurch bedingte Abnahme der Humusgehalte im Boden haben die erhöhten CO_2-Gehalte in der Atmosphäre mit verursacht (SCHEFFER 2002). Auch in Europa stellt in vielen landwirtschaftlich genutzten Gebieten der Rückgang der organischen Substanz ein ernsthaftes Problem dar (KOM 2002). Das deutsche Bundesbodenschutzgesetz (BBODSCHG 1998, § 17) verlangt, dass „*der standorttypische Humusgehalt des Bodens, insbesondere durch eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz oder durch Reduzierung der Bearbeitungsintensität erhalten wird*“.

Seit 2004 besteht durch die Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung (DIREKTZAHLVERPFLV 2004) unter bestimmten Bedingungen die Forderung an den Landwirt zur Humusbilanzierung seiner betrieblichen Ackerfläche. Eine Methode zur Berechnung bzw. Beurteilung der Humusreproduktion wurde vom Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) veröffentlicht (KÖRSCHENS et al. 2004). Im Folgenden soll dieses Verfahren an Hand von Ergebnissen aus Dauerfeldversuchen überprüft werden. Da der Humusgehalt der Böden von unterschiedlichen Standortfaktoren abhängt, werden Versuche aus verschiedenen Klimaregionen herangezogen. Die Bilanzierungsmethode sollte nicht nur die

optimale Ertragsfähigkeit sicherstellen können, sondern auch eine nachhaltige Humusversorgung der Böden sichern.

2. Stand der Forschung

2.1 Die organische Bodensubstanz (OBS)

Der Begriff o*rganische Bodensubstanz* wird in der Literatur unterschiedlich definiert. Nach SCHROEDER (1992, S. 36) *„... umfasst* (die organische Bodensubstanz) *lebende Organismen der Bodenflora und –fauna, lebende Pflanzenwurzeln sowie abgestorbene, mehr oder weniger stark zersetzte, umgeformte und neu gebildete organische Substanzen pflanzlicher und tierischer Herkunft“*. Er unterscheidet hiervon den Humus als *„Gesamtheit der abgestorbenen organischen Bodensubstanz“* (SCHROEDER 1992, S. 36). MÜLLER (1980, S. 73) versteht unter organischer Bodensubstanz *„die im Boden integrierte lebende und abgestorbene organische Substanz…“*. Eine andere Auffassung vertritt SCHEFFER (2002, S. 51), der unter der organischen Substanz des Bodens „*alle in und auf dem Mineralboden befindlichen abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe und deren organischen Umwandlungsprodukte*“ versteht. Das Edaphon, das als Gesamtheit aller im Boden lebenden Organismen definiert wird, zählt er nicht dazu (SCHEFFER 2002).
Hier gilt im Folgenden die o. g. Definition nach SCHROEDER (1992) und MÜLLER (1980) der sich Autoren des VDLUFA Standpunktes zur Humusbilanzierung (KÖRSCHENS et al. 2004) anschließen (KÖRSCHENS et al. 1997). Beim Edaphon erfolgt jedoch nach KÖRSCHENS et al. (1997) eine Einschränkung auf die Mikroorganismen. Dem allgemeinen Sprachgebrauch entsprechend wird der Begriff Humus hier als Synonym für die organische Bodensubstanz verwendet (SCHEFFER 2002).

2.2 Einflüsse auf die Humusumsetzung im Boden

Die Auf- und Abbauprozesse der OBS werden durch verschiedenste Standortfaktoren und unterschiedliche Bodenbewirtschaftungsmaßnahmen beeinflusst. Sie führen zu unterschiedlicher Quantität sowie auch Qualität (chemische Zusammensetzung) des Humus (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR BODENKULTUR UND PFLANZENBAU 1997).

2.2.1 Abbau und Umwandlung der organischen Primärsubstanz

Die organischen Ausgangsstoffe im und auf dem Boden, auch *organische Primärsubstanz* (OPS) genannt, werden durch Bodenfauna und -flora zersetzt, in Huminstoffe umgewandelt („Humifizierung“) und mineralisiert. Mineralisierung und Humifizierung erfolgen in mehreren Phasen, die jedoch eng ineinander greifen.
Bei ackerbaulich genutzten Böden wird organische Substanz zum einen durch die Ernte- und Wurzelrückstände, zum anderen auch in Form unterschiedlichster organischer Dünger wie Stallmist, Gülle und Stroh zugeführt. Da die Ausgangsstoffe pflanzlicher sowie tierischer Herkunft sind und sich in verschiedenen Stadien ihrer Umwandlung im Boden befinden, liegt die OBS im Boden im Allgemeinen in sehr heterogenen Formen vor. Je nachdem um welche Gewebetypen (parenchymatisches oder verholztes Gewebe) es sich bei den pflanzlichen Materialien handelt, werden sie leicht oder schwer abgebaut. Polysaccharide (Cellulose, Hemicellulose) und Proteine werden von den Mikroorganismen als C- und Energiequelle genutzt und dabei vollständig metabolisiert. Stroh z. B. besteht aus verholzten Pflanzenresten, enthält überwiegend Cellulose, Hemicellulose und verhältnismäßig viel (18 bis 21 % in der Trockensubstanz) Lignin (SCHEFFER 2002). Die in letzterem vorhandenen aromatischen Ringe gehören zu den resistentesten Polymeren (OADES 1995). Mikroorganismen können das Lignin nur extrazellulär und co-metabolisch abbauen, d. h. es dient nicht als C- oder Energiequelle. Diese muss aber dazu anderweitig im Boden vorhanden sein, was das weite C/N Verhältnis von 50 bis 100 bei Stroh (SCHEFFER 2002), sowie die zusätzliche N-Mineralzufuhr bei einer ausschließlichen Strohdüngung im konventionellen Ackerbau erklärt (KÖRSCHENS/WEIGEL/SCHULZ 1998). Lignin könnte innerhalb eines Jahres abgebaut werden, jedoch nur in der Abwesenheit von anorganischen Substanzen (OADES 1995). Tatsächlich wird es im Boden innerhalb eines Jahres selten zu mehr als 30 % abgebaut. Im Mittel werden organische Rückstände im mitteleuropäischen kühlgemäßigtem Klima, sobald sie in den Boden gelangen, innerhalb eines Jahres zu 60 bis 70 % zersetzt (HAIDER 1999).

2.2.2 Stabilisierung der organischen Substanz

Diesem sehr raschen Abbau folgt eine lange, langsamere Abbauphase, d. h. die Mineralisationsphase verläuft am Anfang sehr schnell und wird dann immer langsamer. Pflanzliche und mikrobielle Reste sowie die Huminstoffe werden

vermehrt durch verschiedene Prozesse stabilisiert. Die Mineralisationsgeschwindigkeit dieser Stoffe ist sehr unterschiedlich (SCHEFFER 2002).
Eine *chemische Stabilisierung* erfolgt durch die strukturellen Eigenschaften der Ausgangsstoffe, wie z. B. bei o. g. Lignin. Einen nicht unbedeutenden Anteil an der organischen Substanz der Böden hat die Holzkohle, die als abbauresistent angesehen wird (OADES 1995) und häufig in Schwarzerdeböden vorzufinden ist (SCHEFFER 2002).
Bei der *physikalischen Stabilisierung* liegt zwischen der abzubauenden Substanz und dem Zersetzer eine räumliche Trennung vor. Man geht davon aus, dass die Substrate im Innern von Aggregaten oder Faeces eingeschlossen sind. Hierbei spielen die Bodenart und die Aktivität der Bodenfauna eine große Rolle. Beides beeinflusst die Aggregierung des Bodens. Aus Teilchen der Tonfraktion (< 2 µm) können Mikroaggregate entstehen, welche oft aus einem Kern aus humifizierten organischen Materialien bestehen. Diese sind über Jahrzehnte stabil. Daraus entstehende Makroaggregate können organische Substanzen wenige Jahre stabilisieren (HAIDER 1999). Eine weitere Möglichkeit ist die Einkapslung von gelösten organischen Substanzen (DOM = dissolved organic matter) in Mikroporen der mineralischen oder organischen Festphase (SCHEFFER 2002).
Organo-mineralische Bindungen sind eine weitere Form der Stabilisierung. Hieran ist besonders die Tonfraktion beteiligt. Je geringer die Teilchengröße ist, desto größer wird die spezifische Oberfläche innerhalb der Tonfraktion und damit steigt auch der Gehalt an gebundenen Huminstoffen. Es können aber auch einfache organische Verbindungen wie Zucker, Alkohole und Aminosäuren, an Tonminerale gebunden werden (SCHEFFER 2002). Der Zustand oder das Verhalten der OBS wird entscheidend von diesen mehr oder weniger stabilen Ton-Humus-Komplexen oder Ton-Humus-Assoziaten bestimmt (GREENLAND 1965a und b, HUANG & SCHNITZER 1986, zit. nach SCHULZ 2000). Doch auch die Adsorption von organischen Stoffen an Aluminium- und Eisenoxiden sowie an Schwermetallen beeinflussen die Mineralisierungsrate (SCHEFFER 2002).

2.3 Einfluss von Standorteigenschaften auf den Humusgehalt der Böden

2.3.1 Bodeneigenschaften

Der Humusgehalt im Boden hängt von zahlreichen Bodeneigenschaften ab. So sind Böden mit ähnlichen Klima- und Vegetationsbedingungen durch erhöhte Gehalte an *Tonmineralen* reicher an Humus als tonarme Böden (JENNY 1980).

95 % des Corg-Gehaltes ist an den Mineralpartikeln sorbiert (ANDERSON et al. 1981), davon nur 3-4 % in der *Sandfraktion*. Bei der Tonfraktion enthält der Feinton einen höheren Anteil stabilen organischen Kohlenstoffs als der Grobton (MIKUTTA/KLEBER/JAHN 2005). Entscheidend ist außer dem Ton hierbei noch der *Schluffanteil* (GALANTINI et al. 2004), nach SCHULTEN/ LEINWEBER/SORGE (1993) jedoch nur der Fein- und Mittelschluffgehalt der Böden. Ausführlich wird dazu auch von KÖRSCHENS (1980b) Stellung genommen. Er sieht den *Feinanteil* (FAT) der Böden (Ton und Feinschluff, Korngrößen < 2 µm, nach AG BODEN 1994 < 6,3 µm) als geeignetes Kriterium für den Humusgehalt. Untersuchungsergebnisse von Dauerversuchen zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen beiden Größen, da mit zunehmendem Feinanteil in den Böden der inerte C-Gehalt ansteigt (KÖRSCHENS 1980b). Der C-Gehalt kann in grundwasserfreien Böden aus folgender Beziehung abgeleitet werden (KUNTZE/ROESCHMANN/SCHWERDTFEGER 1994):

$$C = 0{,}04\ (T + fU) + 0{,}3$$

Die Bedeutung des Tongehaltes ist dabei umso höher, je weniger Ton im Boden enthalten ist.

SPRINGOB et al. (2001) hingegen stellen in Böden Norddeutschlands fest, dass Sande mit sehr geringem Tongehalt einen höheren Corg-Wert aufweisen als tonreiche Lössböden. Sie sehen daher den Tongehalt als ungeeigneten Prognosewert für den standorttypischen Corg-Gehalt der Böden. Sie vermuten, dass die hohen Corg-Gehalte dadurch zustande gekommen sind, dass die *refraktären organischen Substanzen* an sich stabil sind und nicht durch die Bindung an Mineralpartikel stabilisiert werden. Auch OADES (1995) stellt in Frage, ob der Tongehalt die direkte Ursache für hohe Corg-Gehalte ist.

In Böden mit guter *Belüftung* ist unter sonst gleichen Standortbedingungen der Humusgehalt niedriger als in Böden mit häufigem Luftmangel. Die v. a. unter aeroben Bedingungen einhergehende Mineralisation ist dort intensiver (SCHEFFER 2002). Häufiges Pflügen eines Ackers verbessert die Durchlüftung und intensiviert somit den Humusabbau (GISI 1990).

Ein häufiger Wechsel im *Wassergehalt* der Böden fördert die Mineralisierung, da Aggregate zerfallen und für die Mikroorganismen leichter zugänglich sind (SCHEFFER 2002). Eine Wassersättigung jedoch führt durch die anaeroben Verhältnisse zur Humusakkumulation (OADES 1988).

Der *pH-Wert* von ackerbaulich genutzten Böden hat hingegen keinen entscheidenden Einfluss auf den Gehalt an organischer Bodensubstanz (SCHEFFER 2002). Auch hohe Kalkgaben vermindern deren Gehalt nicht, da sich die Erträge und damit die Streu- und Wurzelmasse auch erhöhen, was eine höhere

Versorgung der Böden an organischer Primärsubstanz zur Folge hat (NIESCHLAG/MÜLLER/WESTERHOFF 1956). Eine pH-Wert Erhöhung kann eine vermehrte Bildung an stabilen Ton-Humuskomplexen bewirken, da höhere Anteile von Ca^{+}-Ionen den Austausch fördern. Teilweise wurde bei einer pH-Wert Erhöhung aber nur ein leicht erhöhter Humusgehalt festgestellt (SCHEFFER 2002).

2.3.2 Klima und Relief

Temperatur, Niederschläge, Höhenlage, Exposition und Hangneigung haben teilweise maßgeblichen Einfluss auf die organische Bodensubstanz (SCHEFFER 2002).

Eine höhere *Temperatur* fördert den Humusabbau, da der Mikroorganismenbesatz zunimmt. Eine längere Austrocknung des Bodens, v. a. in der Vegetationsperiode, wie auch eine vermehrte Streu- und Wurzelzufuhr würde dem jedoch entgegenwirken. Ebenso wirken hohe *Niederschläge* und die dadurch bedingten anaeroben Verhältnisse dem Abbau entgegen. Eine niedrige Temperatur führt ebenfalls zu einer Humusakkumulation (OADES 1988), sowie die zunehmende Höhe im Gebirge (KUNTZE/ROESCHMANN/SCHWERDTFEGER, 1994).

Schon kleinräumige Unterschiede im Klima haben somit Einfluss auf die Humusversorgung der Böden. Die stärker erwärmten Südhänge weisen eine höhere biologische Aktivität bzw. Mineralisierungsrate auf als die Nordhänge, die einen höheren Humusgehalt besitzen können. Dieser kann an Südhängen aber durch vorübergehende Trockenheit gehemmt sein, besonders bei flachgründigen Böden wie z. B. Rendzinen (SCHEFFER 2002). Durch erhöhte Erosion haben Oberhänge geringere Humusgehalte als Hangfüße, an denen sich der verlagerte Humus anreichert.

Besonders hohe Gehalte an organischer Substanz befinden sich in Hochgebirgsböden bei Nordexposition, die kühle und feuchte Verhältnisse aufweisen (KUNTZE/ROESCHMANN/SCHWERDTFEGER 1994).

2.3.3 Bewirtschaftung

Nicht nur die natürlichen Standortfaktoren, sondern auch die drei klassischen Bewirtschaftungsmaßnahmen *Bodenbearbeitung*, *Düngung* und *Fruchtfolge* führen zu einem unterschiedlichen Humusgehalt im Boden (SCHEFFER 2002).
Wird Wald- oder Grünlandboden als Ackerland genutzt, so führt dies zu einer Humusverarmung und zu einem neuen Einpendeln des Humusspiegels auf einem niedrigeren Niveau (SCHEFFER 2002). Nach SPRINGOB (2005) dauert dies 50 bis 80 Jahre. Die Menge an Ernterückständen kann den Humusgehalt nicht aufrechterhalten. Auf einem Braunschweiger Versuchsfeld wurde festgestellt, dass nach 50-jähriger Bewirtschaftung der Humusspiegel um 60 % abgesunken ist, bei noch längerer Bewirtschaftung um 80 % (ROGASIK et al. 2001). Auf dem Acker fällt weniger organische Primärsubstanz an und durch die *Bodenbearbeitung* wird der Humus i. Allg. schneller abgebaut (SAUERBECK 1992). Wendende Tätigkeiten führen z. B. zur Zerstörung von Mikroaggregaten und damit zum Abbau physikalisch stabilisierter organischer Substanz (BALESDENT/CHENU/BALABANE 2000, HAIDER 1999). Dies kann verringert werden, wenn lockernde, nicht wendende Geräte bei der Bodenbearbeitung zum Einsatz kämen (SCHEFFER 2002). Eine reduzierte Bodenbearbeitung führt in den oberen 4-10 cm des Ap-Horizontes zu einer Erhöhung des Humusgehaltes (SAUERBECK 1992).
Durch Verdichtung des Bodens wie den Scherflächen des Pfluges oder durch schwere Radlasten, nimmt der Luftgehalt ab und damit auch die Aktivität der Mikroorganismen. Das Wurzelwachstum wird ebenfalls gehemmt. Die Mineralisation nimmt ab (SCHEFFER 2002).
Durch die Vertiefung des Ah- bzw. Ap-Horizontes tritt im Allgemeinen ein Verdünnungseffekt ein (SCHEFFER 2002). Dies muss bei der Betrachtung von Dauerversuchen beachtet werden, da im letzten Jahrhundert der Pferdepflug durch den tiefer lockernden Traktorenpflug ersetzt wurde. Wird aber der Ap-Horizont allmählich vertieft (1 cm/a) und gleichzeitig die Humuszufuhr leicht erhöht, so können sandige Böden mit Humus angereichert werden (MAKOWSKI 2004).
ELLMER & BAUMECKER (2002) haben durch einen der „Thyrower Dauerversuche“ eine tendenzielle Humuserhöhung durch die künstliche Beregnung des Feldes festgestellt. Grund ist vermutlich der vermehrte Ertrag und die erhöhten Wurzelrückstände.
Auch die unterschiedlichen *Düngungsarten und –mengen* haben Einfluss auf die organische Substanz des Bodens. Äcker, die außer den Ernte- und Wurzelrückständen keine weitere Düngung erhalten, weisen den niedrigsten Humusspiegel auf. Je nach Anfall werden in der Landwirtschaft unterschiedliche

organische Dünger verwendet (SAUERBECK 1992). Häufig genutzte Wirtschaftsdünger sind Gülle, Stroh und Stallmist. Diese haben eine jeweils unterschiedliche Humusreproduktionswirkung aufgrund ihrer stofflichen Beschaffenheit (ASMUS 1992). Der Stickstoffgehalt der Gülle ist im Gegensatz zum Stallmist schneller pflanzenverfügbar, der Stallmist hat dagegen eine höhere Langzeitwirkung auf die organische Bodensubstanz (SAUERBECK 1992). Selbst zwischen der tierischen Herkunft der Dünger muss unterschieden werden. Rindergülle z. B. hat mit 0,86 ein weiteres Lignin / Zellulose-Verhältnis als Schweinegülle mit 0,73 (ASMUS 1992) und damit eine höhere Humifizierungsrate. Anhand der Veränderungen von C-Gehalten im Boden des 30-jährigen Dauerversuches auf einer Tieflehm-Fahlerde in Groß Kreutz errechnete Asmus unterschiedliche Humifizierungsraten verschiedener organischer Dünger (ASMUS 1992). Stallmist hat dabei die höchste Humifizierungsrate von 26,6 %, Stroh liegt bei 14,6 %.

Eine stetige Steigerung der zugeführten Menge an organischen Düngern bewirkt aber keine lineare, sondern eine exponentielle Zunahme der Humusgehalte im Boden. Getreidestroh ist z. B. nach vier Monaten zu 50 % abgebaut, nach neun Jahren aber erst zu 90 % (GISI 1990). Ist der standort- und nutzungstypische Humusspiegel überschritten, so sinkt die Humifizierungsrate. Die organischen Dünger unterliegen einer stärkeren Mineralisation und der organische Dünger nimmt in seiner Reproduktionswirkung ab (ASMUS 1992).

Der Düngezeitpunkt hat besonders bei sandigen Böden einen Einfluss auf die N-Versorgung der Böden. Wird z. B. Stallmist im Herbst ausgebracht, dann besteht die Gefahr, dass ein Teil davon noch mineralisiert und durch fehlende Vegetation verlagert wird (ASMUS 1992).

Auch die Düngenachwirkungen sind zu bedenken. Die Düngewirkung einer Stallmistgabe ist noch nach drei Jahren auf dem Feld wirksam (ASMUS 1992).

Mit alleiniger organischer Düngung werden die Humusgehalte der Böden gegenüber der düngungsfreien Variante (0-Variante) sowie gegenüber der Variante mit alleiniger Mineraldüngung (NPK-Parzellen) erhöht (FRÜCHTENICHT/HOFFMANN/VETTER 1979). Die ausschließliche Mineraldüngung erhöht den Humusgehalt indirekt durch die vermehrten Erträge und die höheren Ernte- und Wurzelreste (SAUERBECK 1992, SHEVTSOVA et al. 2003). Die höchsten Humusgehalte wurden bei kombinierter organisch-mineralischer Düngung erzielt (DEBRUCK & BOGUSLAWSKI 1980; ASMUS 1992; FRÜCHTENICHT/HOFFMANN/VETTER 1979). Stallmist-Parzellen bringen die gleichen Erträge wie reine NPK-Parzellen, wenn dort immer wieder eine Gründüngung eingebracht wird (SAUERBECK 1992).

Durch die unterschiedlichen Dünger wird auch das Edaphon auf verschiedene Weise beeinflusst: Eine kombinierte organisch-mineralische Düngung erhöht

den Regenwurmbesatz am wirksamsten, bei häufiger Gülleanwendung ist eine Reduktion nachgewiesen worden. Im Allgemeinen wurde aber durch organische Dünger eine erhöhte biologische Aktivität im Boden festgestellt (GISI 1990), wodurch wiederum der Humushaushalt beeinflusst wird.

Der Gesamthumusgehalt des Ackers kann, ausgehend vom durch die jeweilige Bewirtschaftungsweise bedingten Niveau, durch eine andere Wirtschaftsform insgesamt aber nur um ± 20-30 % verändert werden (SAUERBECK 1992).

Als dritte der klassischen Bewirtschaftungsmaßnahmen hat die gewählte *Fruchtfolge* auf den Humusgehalt der Ackerböden entscheidenden Einfluss (DEBRUCK 1981). Sie unterscheidet sich in Menge und Qualität der Ernte- und Wurzelrückstände, dem Bedeckungsgrad, unterschiedlich hoher Düngergaben und verschieden intensiver Bodenbearbeitung.

Die Ernte- und Wurzelrückstände sind ein entscheidender Parameter bezüglich der Humusmasse in ackerbaulich genutzten Böden. In den Ackerböden von Mitteleuropa verbleiben davon im Durchschnitt 3 t/ha/a TM im Boden. (SCHEFFER 2002). Die Menge differiert nach angebauter Fruchtart (Tab. 1). Durch Wurzeln und Stoppeln hinterlässt Getreide z. B. zwischen 1,5 und 2,5 t/ha organische Masse auf dem Feld, Rüben und Kartoffeln aber nur 0,8 bis 1 t/ha (SAUERBECK 1992). Hackfrüchte (Kartoffeln, Zuckerrüben) und Mais sind „humuszehrende“ Kulturen, Getreide zählt, sofern die Stoppel- und Wurzelrückstände auf dem Feld verbleiben, zu den „humusneutralen“ Kulturen (GISI 1990).

Tab. 1: Menge und Qualität (C kg/ha; C/N) der Ernte- und Wurzelrückstände (EWR; Spross und Wurzeln, ohne Wurzelhaare) verschiedener Fruchtarten auf einer Schwarzerde aus Löss (Bad Lauchstädt) bei mittlerem Düngungsniveau (SCHEFFER 2002, KÖRSCHENS 1992)

Fruchtart	EWR (dt/ha TM)	C (kg/ha)	C/N
Rotklee	60	2400	18
Winterraps	40	1600	n. v.
Silomais	30	1200	45
Winterroggen	20	980	98
Winterweizen	20	930	71
Wintergerste	20	n. v.	n. v.
Hafer	20	800	50
Sommergerste	18	700	60
Kartoffeln	10	400	40
Zuckerrübe	10	400	20

Die Deckung des Bedarfs an organischer Substanz könnte bei 90 % Getreide in der Fruchtfolge ohne zusätzliche organische Düngung gehalten werden. In der Praxis sprechen aber viele Gründe wie z. B. phytosanitäre Probleme gegen eine solche getreidereiche Fruchtfolge. Den höchstmöglichen Humusgehalt erreicht man im Ackerbau durch mehrjährigen Feldfutterpflanzenanbau, also durch „humusmehrende“ Arten wie kleeartige Futterpflanzen, Luzerne und Futtergräser oder durch zeitweilige Grasnutzung. Die humusanreichernde Wirkung besteht hier nicht nur durch die vermehrte Zufuhr von Pflanzenrückständen sondern auch durch die konservierende Bodenbearbeitung in dieser Zeit (SAUERBECK 1992).
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Humusgehalt des Bodens von der eingetragenen Biomasse, deren Zersetzungsrate und der Menge an schon vorhandener organischer Substanz bestimmt wird (SCHEFFER 2002).

2.4 Fraktionierungen

Aufgrund der o. g. unterschiedlichen Umsetzungsraten bzw. der differenten stofflichen Beschaffenheit wird die organische Substanz des Bodens in verschiedene Fraktionen oder Pools eingeteilt. Nach JENKINSON & RAYNER (1977) und BUYANOVSKY/ASLAM/WAGNER (1994) wird zwischen fünf verschiedenen Fraktionen unterschieden. Zwei davon sind stabilisiert, drei sind umsetzbar. HAIDER (1999) spricht von einem „aktiven“ und einem „passiven“ Teil. KÖRSCHENS (1980a, zit. nach KÖRSCHENS et al. 1997) und FRANKO 1997 beschreiben die passive und chemisch stabilisierte Fraktion als den inerten C-Anteil. Der inerte Kohlenstoff ist unbeteiligt an den Mineralisierungsvorgängen und wird von KÖRSCHENS (1980a, zit. nach KÖRSCHENS et al. 1997, S. 431) definiert als *„organischer Kohlenstoff im Boden, der unter natürlichen Bedingungen bei langjähriger Unterlassung jeglicher Düngung und Anbau humuszehrender Fruchtarten bzw. Schwarzbrache nicht unterschritten wird“*. Diese Fraktion bildet in Modellen oft eine Konstante (SCHEFFER 2002). Die Übergänge zwischen den Fraktionen sind fließend, da die organische Substanz im Boden als Kontinuum vorliegt. 70 bis 80 % der Huminstoffe gehören zu dem passiven Teil, der aus stabilisierten Fraktionen mit einer Verweildauer von ca. 72 bis 3000 Jahren besteht. Sie wird durch äußere Faktoren nur wenig beeinflusst. Der „aktive“ Teil wird schneller, innerhalb von Monaten bis zu 50 Jahren, umgesetzt (Tab. 2). Er besteht aus leichter sowie schwerer zersetzbaren Resten von Pflanzen und Mikroorganismen. Sie sind an der Außenseite von Aggregaten angelagert oder darin eingeschlossen. Dieser aktive Teil der

organischen Bodensubstanz ist ein sehr wichtiger Faktor für die Bodenfruchtbarkeit. Soll der Gehalt an organischer Substanz im Boden beibehalten werden, so muss dieser Anteil an organischer Biomasse dem Boden immer wieder zugeführt werden (HAIDER 1999). Der inerte Kohlenstoff ist von der Bodenart abhängig, d. h. mit steigendem FAT-Anteil nimmt auch der inerte Kohlenstoff zu (KÖRSCHENS 1997).

Tab. 2: Mittlere Verweilzeiten (a) von Kohlenstoff in verschiedenen Pools der organischen Bodensubstanz nach Modellen von JENKINSON & RAYNER (1977), BUYANOVSKY/ASLAM/WAGNER (1994), HAIDER (1999), KÖRSCHENS (1980a, zit. nach KÖRSCHENS et al. 1997) und FRANKO (1997) (eigene zusammenfassende Darstellung nach zitierter Literatur)

JENKINSON & RAYNER (1977)		BUYANOVSKY/ASLAM/ WAGNER (1994)		HAIDER (1999)	KÖRSCHENS (1980a, zit. nach KÖRSCHENS et al. 1997), FRANKO (1997)
Pools	Mittlere Verweil-zeiten (Jahre)	Pools	Mittlere Ver-weil-zeiten (Jahre)	Pools	Pools
Leicht abbaubare Pflanzenbestand-teile	0,5	Pflanzliche Fragmente (2 - >0,053 µm)	0,5-2	Aktiv	OPS
Schwer abbaubare Pflanzenbestand-teile	3,3	Pflanzliche Fragmente (0,053 - 0,025 µm)	2-3	Aktiv	OPS
Mikrobielle Biomasse	2-4	Pflanzliche Fragmente in Makro- und Mikroaggregaten	1-10	Aktiv	Umsetzbare OBS, aktiv (AOS)
Physikalisch stabilisierter Boden-C	72	Organische Bodensubstanz in Feinschluff	ca. 400	Passiv	Umsetzbare OBS, stabilisierte (SOS)
Chemisch stabilisierte organische Bodensubstanz	1000-3000	Organische Bodensubstanz in Feinton	ca. 1000	Passiv	Inerte OBS

2.5 Der standorttypische Humusgehalt und die Humusbestimmung

Wie aus den vorangegangenen Kapiteln hervorgeht, hängt die Umsatzzeit (turnover time) der organischen Substanz im Boden von den verschiedensten Faktoren ab. Die Dynamik der Mineralisation und der Humifizierung ist sehr

hoch. Unter gleich bleibenden Bewirtschaftungs- und Umweltbedingungen stellt sich jedoch, wie unter natürlichen Bedingungen auch, nach einer bestimmten Zeit ein Fließgleichgewicht der organischen Bodensubstanz ein. Dies ist ein Gleichgewicht zwischen Anlieferung und Abbau der organischen Substanz, gekennzeichnet durch einen charakteristischen Humusgehalt bzw. Humusspiegel. Da Humusaufbau und -abbau relativ langsam verlaufen, stellt sich dieses Gleichgewicht erst nach vielen Jahren ein (SCHEFFER 2002). LEINWEBER/KAHLE/SCHULTEN (1991) konstatieren Veränderungen an der Qualität der organischen Substanz noch zwischen dem 19. und 34. Versuchsjahr. Im „Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt“ sind die größten Veränderungen ebenfalls in den ersten 30 Jahren aufgetreten, ein Fließgleichgewicht wurde aber erst nach 70 Jahren erreicht (KÖRSCHENS 2003). WALTHER et al. (2001) stellten auf einem stark lehmigen Sandboden in Zürich-Reckenholz, nach dem Umbruch einer Naturwiese in eine Ackerfläche mit einer Düngekombination von Stallmist und Mineraldünger, ein neues Fließgleichgewicht erst nach ca. 35 Jahren fest. Bei der Düngung mit Klärschlamm oder Torf hat sich nach 48 Jahren noch kein neues Fließgleichgewicht eingestellt.

Wird auf einer Ackerfläche die Bewirtschaftungsweise geändert, so ist eine Humuszunahme oder -abnahme meistens erst nach ca. fünf Jahren analytisch nachweisbar (CAPRIEL 2003). Nach KÖRSCHENS/MERBACH/SCHULZ (2002) sind Änderungen am Kohlenstoffgehalt des Bodens erst nach mehr als 10 Jahren erkennbar. CAPRIEL (2003) geht nach mindestens zehn Jahren gleicher Bewirtschaftungsweise und Standortbedingungen von einem standorttypischen Humusgehalt aus.

Durch Gründe wie große räumliche Variabilität der organischen Substanz auf einem Schlag, Schwankungen während der Vegetationsperiode, die Anbau-, Düngungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen etc. kommen auch nach mehr als 10 Jahren Schwankungen des Humusgehaltes von bis zu 0,2 % Corg innerhalb eines Jahres vor (KÖRSCHENS & SPITZL 1978). WACHENDORF (1996) und LÜTZOW V. (1993) fanden Corg-Schwankungen von bis zu 0,3 % Corg heraus. Autoren wie GISI (1990) und HAMER & MARSCHNER (2005) sprechen von dem „Priming Effect“ nach einer Substrat- bzw. Düngergabe, d. h. durch die Düngung werden vorübergehend hohe Mineralisationsschübe verursacht, die wiederum einen sinkenden Corg-Gehalt zur Folge haben. Um diese Schwankungen weitgehend zu eliminieren, sollten Probenahmen immer zum gleichen Zeitpunkt im Jahr stattfinden, möglichst im Frühjahr (KÖRSCHENS 1982, CAPRIEL 2003). KÖRSCHENS (1982) fordert bei der Corg-Bestimmung eine Signifikanzschwelle unter 0,1 % Corg.

Eine direkte Bestimmung des Humusgehaltes der Mineralböden ist im Labor nur bei ton- und karbonatfreien Böden durch Veraschung (550 °C, DIN 19684, Teil 3 I) möglich (KUNTZE/ROESCHMANN/SCHWERDTFEGER 1994). Da diese Bedingungen in der Praxis selten anzutreffen sind, muss auf die analytische Ermittlung des organischen Kohlenstoffes (Corg) im Boden zurückgegriffen werden. Die OBS wird daraus mit Hilfe eines Faktors berechnet. Der C-Gehalt ist umso höher, je stärker die organische Substanz humifiziert ist. Die Schwankungen der unterschiedlichen organischen Bodenbestandteile betragen nach KUNTZE/ROESCHMANN/SCHWERDTFEGER (1994) zwischen 40 und 60 %, was einen Umrechnungsfaktor von zwei ergibt. Dieser Faktor wird ebenfalls von BLUME (2004) und MÜCKENHAUSEN (1993) verwendet. Durch andere Autoren wie KONONOVA (1958), RASMUSSEN & COLLINS (1991) und RIEK (1995) (zit. nach: KÖRSCHENS et al. 1997), ergeben sich Umrechnungsfaktoren zwischen 1,4 und 3,3. Die AD-HOC-AG BODEN (2005) gibt den Faktor 1,72 an. Das setzt voraus, dass der Kohlenstoffanteil der OBS 58 % beträgt. Günstiger ist es, wenn möglich, mit dem direkt bestimmten Corg-Wert zu rechnen (KUNTZE/ROESCHMANN/SCHWERDTFEGER 1994). Durch das bei der Analyse evtl. mit erfasste Edaphon sind Gehaltsschwankungen von selten mehr als 10 % möglich (SCHEFFER 2002).
Die höchsten Corg–Gehalte und Umsätze der organischen Substanz sind in den Oberböden zu finden, bei Ackerböden im Ap-Horizont. In Deutschland sind durchschnittlich 100-200 t/ha organische Substanz im Boden vorhanden (SCHEFFER 2002). Laut GISI (1990) beträgt der Humusgehalt der Böden durchschnittlich 2 %.

2.6 Bilanzierung und Modellierung des C-Umsatzes

Aufgrund der oben geschilderten Dynamik der organischen Substanz können Gehaltsschwankungen im Boden nur über Jahre hinweg erfasst und bewertet werden. Gesicherte Kennwerte zu optimalen Humusgehalten liegen noch nicht vor (LEITHOLD 2004). Forschungen hierzu werden u. a. von SCHULZ (1990) betrieben, die den Versorgungszustand des Bodens mit umsetzbarer organischer Bodensubstanz mit Hilfe des heißwasserextrahierbaren Kohlenstoffs in der Ackerkrume bestimmt. Eine Bewirtschaftungsempfehlung für ackerbaulich genutzte Böden kann bisher durch die einmalige Messung des Humusvorrates daraus nicht resultieren (LEITHOLD 2004).

Außer dem analytischen Weg wird daher seit längerer Zeit versucht, die organische Substanz anhand von Bilanzierungen oder Modellen zu quantifizieren und zu bewerten.

Für die *dynamischen Modelle*, die die Humifizierungs- und Mineralisationsprozesse beschreiben und den Versorgungszustand des Bodens an organischer Substanz einschätzen sollen, wird die organische Bodensubstanz, aufgrund der unterschiedlich langen Umsetzungszeiten, in mindestens zwei der o. g. verschieden stabilen Fraktionen aufgeteilt (KÖRSCHENS et al. 1997). Modelle wie CENTURY und DAISY, die den Kohlenstoff- oder auch Stickstoffhaushalt durch das Einsetzen der unterschiedlichsten das Agrarökosystem charakterisierenden Parameter simulieren sollen, werden von MOLINA & SMITH (1998) beschrieben. Weltweit gibt es z. Zt. ca. 50 verschiedene dynamische Modelle (KOLBE 2005, pers. Mitteilung).

In das CANDY-Modell (**Ca**rbon and **N**itrogen **Dy**namics) z. B. fließen die Parameter Temperatur, Wasser- und Tongehalt mit ein (FRANKO/ÖLSCHLÄGEL/SCHECK 1995). Ein eigenständiges Teilmodell daraus ist das CCB (**C**ANDY-**C**arbon **B**alance). Es simuliert die C-Dynamik mit relativ wenigen, in der landwirtschaftlichen Praxis meist gut verfügbaren Eingangsdaten (KOLBE 2004). Nach KOLBE (2004) ist es für leichte und mittlere Böden Ostdeutschlands sehr gut geeignet. Schlecht funktioniert das Verfahren bei Lehmböden und auf sandigen Böden im humideren Westdeutschland. Dazu kommt, dass dieses Verfahren sehr ungenau sein kann, wenn es nicht richtig eingestellt ist (KOLBE 2005, pers. Mitteilungen). Diese Problematik beschreiben auch SHEVTSOVA et al. (2003) über das dynamische Kohlenstoff-Modell SUNDIAL. SPRINGOB et al. (2001) kritisieren, dass der Tongehalt in solchen Modellen keine Schlüsselvariable bezüglich des Corg-Gehaltes darstellen sollte (s. Kap. 2.3.1).

Humusbilanzierungsmethoden sind dagegen leicht anzuwenden und benötigen vergleichbar wenige, bei den Landwirten vorhandene, Parameter. Im letzten Jahrhundert sind in Deutschland wie auch im Ausland viele Methoden, z. B. von WELTE (1955), KORTLEVEN (1963) und LYKOV (1977) entstanden (zit. nach LEITHOLD 1984). Ein Überblick über die verschiedenen Methoden sowie Analysen dazu, geben BAUMANN & SCHMIDT (1979), LEITHOLD (1984) und KÖRSCHENS/WEIGEL/SCHULZ (1998). Die meisten dieser Methoden scheiterten in Deutschland in der Praxis, da sie entweder nur Teile des Humushaushaltes einbezogen oder in der Handhabung zu schwierig waren (LEITHOLD 1984, LEITHOLD et al. 1997).

Eine neuere Methode entwickelten DIEZ & KRAUSS (1992), welche nach LANG (1995) überarbeitet wurde. Diese Methode findet in leicht abgewandelter Form in Bayern Anwendung (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT

& INSTITUT FÜR AGRARÖKOLOGIE, ÖKOLOGISCHEN LANDBAU UND BODENSCHUTZ 2003). Nach KÖRSCHENS/WEIGEL/SCHULZ (1998) wird bei diesem Verfahren die Schätzung zunehmend ungenauer je niedriger der Ct-Gehalt der Böden ist. Der Grund liegt darin, dass der Abbau der organischen Substanz auf den Gesamtkohlenstoffgehalt (Ct-Gehalt) bezogen wird und nicht auf den umsetzbaren Kohlenstoff (Cums). Das bedeutet, dass das Verfahren bei Böden mit mittleren und hohen Tongehalten gute Ergebnisse bringt, bei sandigen Böden aber zu wenig gedüngt würde.

Ziel der Bilanzierungen ist es in landwirtschaftlichen Betrieben die Zufuhr an organischen Substanzen so zu steuern, dass stabile und hohe Erträge gesichert werden und gleichzeitig eine nachhaltige Bewirtschaftungsweise angewandt wird (KÖRSCHENS/ROGASIK/SCHULZ 2005). Sie beschreiben Trends der Humusauf- und –abbauprozesse unter Praxisbedingungen. Als Basis der Bilanzierungen dienen Koeffizienten für die verschiedensten humuszehrenden und humusmehrenden Kulturen sowie für die Humusreproduktionsleistung unterschiedlichster organischer Dünger (LEITHOLD 2004). Der daraus und aus der Düngemenge errechnete Humussaldo gibt Auskunft über die Erhöhung oder Reduktion des organischen Düngemittels. Diese Düngeempfehlungen sollen den standortspezifischen Humusspiegel erhalten (KÖRSCHENS et al. 2004).

Das in dieser Arbeit zu untersuchende Verfahren wurde von einer Projektgruppe der VDLUFA erarbeitet (KÖRSCHENS et al. 2004). Es liegt in einem VDLUFA-Standpunkt mit dem Titel „*Humusbilanzierung - Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland*“ (KÖRSCHENS et al. 2004) vor und basiert auf zwei verschiedenen Bilanzansätzen: Zum einem auf der *ROS-Bilanzmethode* (ROS = reproduktionswirksame organische Substanz), die von ASMUS & HERRMANN (1977) erstmals vorgestellt wurde, zum anderen auf der *HE-Methode* (HE = Humuseinheit), deren Ansatz auf RAUHE & SCHÖNMEIER (1966) zurückgeht. Beide Methoden wurden in der Praxis angewandt (LEITHOLD et al. 1997) und beruhen auf Versuchen mit mineralisch und organisch gedüngten Fruchtfolgen (KÖRSCHENS et al. 2004).

Die ROS-Bilanzmethode (ASMUS & HERRMANN 1977) wurde 1977 von KUNDLER et al. (1977) ausgearbeitet und im gleichen Jahr flächendeckend in der ehemaligen DDR eingeführt. Sie wird heute u. a. in Thüringen und Bayern verwendet (KÖRSCHENS & SCHULZ 1999). Zur Berechnung des Bedarfs des Bodens an ROS dienten ASMUS & HERRMANN (1977) die Veränderungen des C-Gehaltes im Boden von ca. 30 Dauerversuchen der ehemaligen DDR. Als Bezugsbasis für die Berechnung der ROS wurde der Stallmist verwendet mit einem Reproduktionskoeffizienten von 1 (1 t ROS ≙ 1 t organische Trocken-

masse von Rottemist). Dieser Dünger wurde am häufigsten genutzt und es lagen dazu die meisten Versuche vor. Die verschiedenen weiteren organischen Dünger wie Stroh, Gülle und Torf wurden in ihrem Reproduktionsverhalten, unter Berücksichtigung der jeweiligen Trockenmasse, gegenüber dem Stallmist auf- bzw. abgewertet (vgl. ASMUS & HERRMANN 1977). Konkrete Düngeempfehlungen, auch hinsichtlich des Humusentzugs durch die unterschiedlichen Fruchtfolgen und der Bodenart, lieferten KUNDLER et al. (1977). Diese sog. *einfache Methode zur Ermittlung des Bedarfs an organischer Substanz* soll den Humusbedarf um 100 % decken (KUNDLER et al. 1981).

Auf dieser Grundlage basieren die Bilanzwerte der sog. „*erweiterten Reproduktion der organischen Substanz im Boden*“ von KUNDLER et al. (1981, S. 9). Hier wurden die Bedarfsfaktoren der Humuszehrer, wie Hackfrüchte, Mais und Getreide, um 30 % erhöht, um eine Ertragssteigerung zu erzielen.

RAUHE & SCHÖNMEIER entwickelten 1966 den Humusersatzschlüssel. Als Bemessungsgrundlage diente nicht der C-Gehalt der Böden, sondern in Anlehnung an TJURIN (1956, zit. nach RAUHE & SCHÖNMEIER 1966) der N-Gehalt. Durch die Auswertung von Stickstoffbilanzen von Dauerversuchen und diversen Betrieben wurde festgestellt, dass ein Entzug von 50 kg N aus dem Boden einem Verlust von 1 t Humus entspricht. Diese Humusmenge wird als eine Humuseinheit (HE) bezeichnet und kann durch Zufuhr von 10 t Stallmist wieder ersetzt werden. Dies gilt für „*mittlere Standorte*“ (RAUHE & SCHÖNMEIER 1966, S. 4). Unter Modifizierung der Faktoren für die „erweiterte Reproduktion“ (KUNDLER et al. 1981) und den *Humuseinheiten* (RAUHE & SCHÖNMEIER 1966) bildeten LEITHOLD et al. (1997) z. T. neue Humusbilanzkoeffizienten. Grundlage dieser Änderungen bildete der Fruchtfolgedüngungsversuch in Seehausen, einem Standort mit schluffig lehmigen Sand, 556 mm Jahresdurchschnittsniederschlag und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 9 °C (WICKE et al. 1990). Bei dieser letztendlich als *Humuseinheitenmethode* bezeichneten Bilanzierung gilt folgender Bezug (LEITHOLD 2004):

$$1\ \text{HE} \cong 1\ \text{t Humus} \cong \begin{array}{l} 50\ \text{kg organisch gebundener Stickstoff und} \\ 580\ \text{kg organisch gebundener Kohlenstoff} \end{array}$$

Eine Umrechnung zwischen der ROS-Methode und der HE-Methode kann durch folgende Gleichungen geschehen (KÖRSCHENS et al. 2004):

$$1\ \text{t ROS} \approx 0{,}35\ \text{HE}$$
$$1\ \text{HE} \approx 2{,}8\ \text{t ROS}$$

Bei der VDLUFA-Humusbilanzierungsmethode (KÖRSCHENS et al. 2004) wurden diese Werte in Humusäquivalente (1 Humusäquivalente ≙ 1 kg Humus-C)/ha/a umgerechnet. Unter Humus-C wird die humifizierte organische Masse des Bodens verstanden. Die „*Richtwerte für die anbauspezifische Veränderung der Humusvorräte von Böden in Humusäquivalenten…*“ (KÖRSCHENS et al. 2004, S. 8) geben den Entzug oder die Anreicherung der Hauptfruchtarten, des mehrjährigen Feldfutters, der Zwischenfrüchte oder auch der Brache in kg Humus-C/ha/a an. Sie werden durch „*untere Werte*“ und „*obere Werte*“ (KÖRSCHENS et al. 2004, S. 8) angegeben. Für die Brachflächen wird nur ein Wert angegeben. Die unteren Werte entsprechen den ROS-Werten, die oberen Werte entsprechen den HE-Werten. Das ergibt folgende Umrechnung (KÖRSCHENS et al. 2004):

untere Werte: 1 kg/ha/a Humus-C ≈ 1 t/ha/a ROS * 200
obere Werte: 1 kg/ha/a Humus-C ≈ 1 HE/ha/a * 580

Durch die Gleichungen wird deutlich, dass die unteren Werte eine geringere Anreicherung bzw. Zuführung an Humusäquivalenten ergeben als die oberen Werte. Sie liegen im Durchschnitt um 1,43 kg/ha/a Humus-C (eigene Berechnungen nach Tab. 2, KÖRSCHENS et al. 2004, S. 8) niedriger als die oberen Kennziffern. Somit sollen die unteren Werte nach KÖRSCHENS et al. (2004, S. 6) „*bei Böden in gutem Kulturzustand mit optimaler mineralischer N-Düngung*“ angewendet werden und die oberen Werte „*für bereits längere Zeit mit Humus unterversorgte Böden*“ (KÖRSCHENS et al. 2004, S. 6). Die unteren Werte überschreiten durchschnittlich den anhand von Langzeitversuchen (experimentell) ermittelten Humusbedarf um 20 %, das entspricht 1,9 t/ha Stalldung-Rottemist (KÖRSCHENS et al. 2004). Als Bemessungsgrundlage dienen *„optimale“* Düngungsvarianten, die *„durch eine höhere Zufuhr an organischer Substanz keine weitere*(n) *Ertragssteigerung*(en*) mehr erziel*(en) *und die höchste Effizienz der N-Düngung erreicht wurde“* (KÖRSCHENS et al. 2004, S. 4). Nur im Falle des „Statischen Düngungsversuchs Bad Lauchstädt“ wurden C-Bilanz und Energiegewinn in die Bewertungen miteinbezogen (vgl. RATHKE/KÖRSCHENS/DIEPENBROCK 2002; KÖRSCHENS 2005, pers. Mitteilungen).

Bei der Humusreproduktionsleistung der organischen Dünger wird nach der jeweiligen stofflichen Zusammensetzung unterschieden. Kriterien sind Trockenmassegehalt, Tierart, sofern es sich um einen Dünger tierischer Herkunft handelt, der Rottegrad bei Stallmist und Bioabfall sowie die Behandlungsart des Klärschlamms.

Die Bewertung des errechneten Humussaldos erfolgt anhand von fünf verschiedenen Humusbilanzierungsklassen.
Die VDLUFA-Humusbilanzierungsmethode kann nach folgendem Schema beschrieben werden:

		Humuszufuhr				**Humusabbau**
Humussaldo (kg/ha/a Humus-C)	=	Humusreproduktion organischer Dünger (kg Humus-C) je t Substrat * Düngemenge (t/ha/a)	+	Humusanreicherung durch Fruchtarten / Brache (kg/ha/a Humus-C)	-	Humusbedarf der Haupt-fruchtarten (kg/ha/a Humus-C)

Quelle: verändert nach KÖRSCHENS/ROGASIK/SCHULZ (2005)

Die Bilanzierung sollte eine Fruchtfolge oder die letzten 5 bis 10 Jahre eines Schlages abdecken. Sie wurde für integriert wirtschaftende Betriebe konzipiert und kann aufgrund der in die Humusreproduktionsleistung der Dünger bzw. in die fruchtartenspezifischen Richtwerte mit einbezogene N-Mineraldüngung nicht im ökologischen Landbau angewandt werden (KÖRSCHENS et al. 2004). Dort sind, um ausreichende Erträge zu erzielen, höhere Humusvorräte nötig. Vorstellung zu einer Humusbilanzierung im ökologischen Landbau geben LEITHOLD & HÜLSBERGEN (1997, 1998) und KOLBE (2005). Im Rahmen des Bundesprogramms Öko-Landbau läuft bis 2007 das Projekt zur „*Entwicklung einer praxisanwendbaren Methode der Humusbilanzierung im ökologischen Landbau*“ unter Leitung von Prof. Leithold und PD Dr. habil Hülsbergen (http://www.bundesprogramm-oekolandbau.de/projekt_03oe084_1.html vom 12.12.2005; http://www.bundesprogramm-oekolandbau.de/projekt_03oe084_2.html vom 12.12.2005).
Ausführliche Stellungnahmen und Erläuterungen zu der HE- und ROS-Methode oder der VDLUFA-Bilanzmethode (KÖRSCHENS et al. 2004) sind u. a. bei LEITHOLD et al. (1997), LEITHOLD (2004), KÖRSCHENS & SCHULZ (1999), KÖRSCHENS/ROGASIK/SCHULZ (2005) und KOLBE (2004) zu finden. Der Versuch einer Anpassung an unterschiedliche Standortbedingungen (Klima, Boden) der VDLUFA-Bilanzierungsmethode (KÖRSCHENS et al. 2004) wird derzeit von Dr. KOLBE von der SÄCHSISCHEN LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT unternommen (2005, pers. Mitteilungen). Die vorliegende Arbeit setzt ebenfalls an dieser Stelle an.

3. Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Evaluierung der Humusbilanzierungsmethode (KÖRSCHENS et al. 2004) für Standorte mit unterschiedlichen Klimabedingungen und bodenkundlichen Standorteigenschaften. Dazu werden folgende Hypothesen aufgestellt:

- Hypothese 1 (Humusnährung): Die Koeffizienten für die Berechnung der Humusreproduktionsleistung von organischen Düngern variieren in Abhängigkeit von Niederschlagshöhe, Temperatur und Bodenart.
- Hypothese 2 (Kulturarten): Die fruchtfolgeabhängigen Faktoren der An- bzw. Abreicherung von organischer Bodensubstanz und die damit verbundenen Veränderungen der Humusvorräte im Boden variieren in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe, der Temperatur und der Bodenart.

Das Arbeitsprogramm besteht aus folgenden Teilzielen:

- Zusammenstellung von Datensätzen aus Dauerversuchen mit einem weiten Spektrum für die Parameter Niederschlag, Temperatur und Textur.
- Berechnung der Humusbilanz für alle Standorte mit den unteren und oberen Bilanzwerten.
- Prognose der Entwicklung der Bodenkohlenstoffmengen auf Basis der Humusbilanzen.
- Vergleich der errechneten Bilanzwerte mit den Differenzen zwischen der Corg-Menge von Versuchsanfang und –ende (tatsächliche jährliche Veränderungen) und mit den experimentell anhand von Dauerversuchen ermittelten „optimalen“ Düngemengen.
- Ausweisung von standortspezifischen Änderungsmöglichkeiten der Humusreproduktionskoeffizienten auf Basis der Differenzen zwischen dem Corg-Gehalt von Versuchsanfang und -ende.
- Ausweisung von standortspezifischen Änderungsmöglichkeiten der fruchtfolgeabhängigen Faktoren der An- bzw. Abreicherung von organischer Bodensubstanz auf Basis der Differenzen zwischen dem Corg-Gehalt von Versuchsanfang und –ende.

4. Material und Methoden

Für die Überprüfung der VDLUFA-Humusbilanzierungsmethode (KÖRSCHENS et al. 2004) wurden Datensätze von 13 verschiedenen landwirtschaftlichen Dauerversuchen ausgewertet (Karte 1). Wichtiges Kriterium für die Auswahl der Standorte war es, möglichst große Unterschiede in den Parametern Niederschlag, Temperatur und Bodenart abzudecken (Tab. 3). Die Versuche sind auf zwölf Standorte in Deutschland, Österreich, Slowenien, Ungarn und Schweden verteilt. Der 13. Standort, Dülmen, wurde wegen fehlender Corg-Anfangswerte nur in die Berechnung des Einflusses der Boden- und Klimaparameter mit in die Auswertung einbezogen. Insgesamt stehen 123 verschiedene Düngevarianten zur Verfügung (Tab. A1-A27).

Karte 1: Übersichtskarte der 13 europäischen Standorte, deren Dauerversuche hinsichtlich der Humusbilanzierung ausgewertet werden (eigene Darstellung, Programm Freehand).

Die aus den Dauerversuchen vorliegenden Angaben zur Bodenart werden nach den Vorgaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung in der vierten Auflage (AG BODEN 1994) in Bodenartenuntergruppen klassifiziert. Der Feinschluffanteil von Ultuna wurde durch den gemittelten Feinschluffanteil aller Varianten errechnet. Mit dem vorhandenen Tongehalt (Masse-%) und diesem gemittelten Wert wurde der FAT-Gehalt (Masse-%) errechnet.

Tab. 3: Versuchsnummern und -namen, Bodenart und Klimaparameter der 13 Dauerversuchsstandorte dieser Arbeit

Nr.	Standort	Versuchsname	Bodenart	Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	Jahresdurchschnittstemperatur (°C)
1	Puch	IOSDV	Lu	922	7,9
2	Dülmen	IOSDV	Sl2	878	9,1
3	Berlin-Dahlem	IOSDV	Su2	550	9,3
4	Speyer	IOSDV	Sl3	583	9,8
5	Halle	Ewiger Roggenbau	Sl3	494	9,2
6	Bad Lauchstädt	Statischer Versuch	Ut4	480	8,8
7	Thyrow	Nährstoffmangelversuch	Su2	496	8,6
8	Dikopshof	Dauerdüngungsversuch	Ut2	635	9,7
9	Wien	IOSDV	Lt2	489	9,5
10	Ljubljana-Jable	IOSDV	Uls	1397	9,7
11	Rakičan	IOSDV	Sl4	810	9,4
12	Keszthely	IOSDV	Ls2	700	10,8
13	Ultuna	Soil organic matter / Frame 56	Lt3	660	5,5

Quellen: s. Tab. A1, A4, A6, A8, A10, A12, A14, A16, A18, A20, A22, A24, A26

Zur Berechnung der Humusbilanz mit der VDLUFA-Methode (KÖRSCHENS et al. 2004) wurden die Trockenmassegehalte (TM %) und Frischmassegehalte (FM %) der organischen Düngemittel benötigt. Diese waren beim Stallmist nicht angegeben, weshalb, um den frischen, verrotteten und kompostierten Stallmist abzudecken, mit 25, 35 und 55 % TM gerechnet wurde (vgl. KÖRSCHENS et al. 2004, S. 10).

Die Humusreproduktionsleistung von Stroh schwankt zwischen 80 und 110 kg Humus-C/t Substrat (KÖRSCHENS et al. 2004, S. 10). Hier wurde mit 100 kg Humus-C/t Substrat gerechnet (DIREKTZAHLVERPFLV 2004).

Wegen einer besseren Darstellungsweise und Vergleichbarkeit wird Gülle (m³) in dieser Arbeit in Tonnen (t) angegeben, wobei 1 m³ Gülle als 1 t angenommen wird (vgl. FINCK 1992).

Für alle Varianten wurde die Humusbilanz nach der VDLUFA-Methode mit den unteren und oberen Werten nach folgendem Beispiel einer Variante (var1a33) des IOSDV vom Standort Puch berechnet (Tab. 4):

Tab. 4: Rechenbeispiel der Humusbilanz (KÖRSCHENS et al. 2004) anhand einer Variante (var1a33) des Standortes Puch (eigene Berechnung, s. Tab. A1, A2)

a) Humusbedarf der Fruchtarten / Fruchtfolge:

Fruchtart	Humusbedarf (untere Werte) kg Humus-C/ha	Humusbedarf (obere Werte) kg Humus-C/ha
1. Silomais	-560	-800
2. Winterweizen	-280	-400
3. Wintergerste	-280	-400
Humusbedarf	-1120	-1600

b) Humusreproduktion der zugeführten organischen Dünger

Organischer Dünger		Humusreproduktion	
Art	Menge (t/ha/Fruchtfolge)	kg Humus-C/ t Substrat	kg Humus-C/ha
Rottemist (25 % TM)	30	40	1200
Summe			1200

c) Humussaldo der Fruchtfolge in Humusäquivalenten (kg Humus-C)/ha

Humusbedarf nach den unteren Werten	Humusreproduktion	Humussaldo	
		je Fruchtfolge	je Jahr
-1120	+1200	+80	**26,7**

Humusbedarf nach den oberen Werten	Humusreproduktion	Humussaldo	
		je Fruchtfolge	je Jahr
-1600	+1200	-400	**-133,3**

In der Literatur nicht angegebene Lagerungsdichten der Standorte Puch und Dülmen wurden anhand der Angaben von SCHEFFER (2002, S. 164) oder anhand der Lagerungsdichten der Versuche dieser Arbeit gemittelt. Die Berechnung der Lagerungsdichte aus der Trockenrohdichte erfolgte nach der AG BODEN (1994).

Falls nicht im Einzelfall anders gekennzeichnet, wurde mit einer Ap-Tiefe von 30 cm gerechnet.

Humusgehaltsangaben (Masse-%) wurden, soweit nicht anders angegeben, mit dem Faktor 1,72 (AG BODEN 1994) in Corg (Masse-%) umgerechnet.

Von den Versuchen Berlin-Dahlem, Speyer, Dikopshof, Jable, Rakičan und Keszthely liegt jeweils nur ein Corg-Wert (Masse-%) vom Beginn der

Versuche vor. Dieser wurde für alle Varianten des jeweiligen Versuches eingesetzt.
Die Corg-Gehalte (Masse-%) von Versuchsanfang und -ende der einzelnen Varianten wurden nach folgender Formel in Corg-Mengen (kg/ha) umgerechnet:

$$\text{Corg (Masse-\%)} * \text{Ld (g/cm}^3\text{)} * \text{Ap (dm)} * 10000 = \mathbf{Corg\ (kg/ha)}$$

Alle Versuche haben eine Laufzeit von mindestens zehn Jahren, mit Ausnahme von Keszthely, der seit neun Jahren läuft.
Die Berechnung des gemessenen jährlichen Humussaldos erfolgte nach folgender Formel:

$$\frac{\text{Corg (kg/ha) Versuchsende - Corg (kg/ha) Versuchsanfang}}{\text{Versuchsdauer (a)}} = \mathbf{Corg\text{-}Saldo\ (kg/ha/a)}$$

Außer diesem so genannten „tatsächlichen Corg-Saldo“ standen experimentell anhand von Dauerversuchen ermittelte, optimale organische Düngemengen zur Verfügung. Diese wurden von den jeweiligen Versuchsanstellern unter Berücksichtigung des höchsten Ertrages bei einer „umweltverträglichen“ Stickstoffbilanz („*hohe N-Effizienz und ausgewogenen N-Salden*“, KÖRSCHENS et al. 2004, S. 4) ausgewiesen. Die Kriterien dienen im VDLUFA-Standpunkt zur Humusbilanzierung als Bewertungsgrundlage für die Bilanzrechnungen (vgl. KÖRSCHENS et al. 2004). In Einzelfällen wurde nach eigenem Ermessen nach o. g. Kriterien eine entsprechende Variante bestimmt bzw., aus Mangel an wichtigen Analysewerten, eine annähernd optimale ausgewählt (vgl. Tab. A1 – A27).

Die Schätzgenauigkeit der VDLUFA-Bilanzierungsmethode wurde anhand zweier Datensätze überprüft:

a) Vergleich der tatsächlichen jährlichen Veränderungen (Corg-Saldo) der Corg-Mengen (kg/ha/a) der Böden mit den unteren und oberen Bilanzergebnissen, auch hinsichtlich Jahresdurchschnittsniederschlag (mm), Jahresdurchschnittstemperatur (° C) und Bodenart.
b) Vergleich der optimalen, experimentell anhand von Langzeitversuchen ermittelten Düngermengen mit den unteren und oberen Bilanzergebnissen.

Die Überprüfung erfolgte durch die Bildung von Differenzen, Median, arithmetischen Mitteln, mittleren Abweichungen und dem Betrag der mittleren

Abweichung. Als statistische Verfahren fanden Korrelationsanalysen und Regressionsanalysen Anwendung (Programm SPSS 13.0.1). Anpassungslinien wurden durch Regressionslinien mit quadratischer Steigung oder iterativer gewichteter kleinster Quadrate (Loess) berechnet.

Die Wirkung der Düngung (Stickstoffmineraldüngung, organische Düngung und kombinierte organisch-mineralische Düngung) auf die Corg-Menge (kg/ha) des Bodens wurde überprüft. Hierzu diente die Differenz zwischen der Corg-Menge der jeweiligen Nullparzelle und der Corg-Menge der Düngungsvariante bei Versuchsende als Prüfkriterium.

5. Ergebnisse

5.1 Allgemeines

Zur Überprüfung der Bilanzierungsmethode (KÖRSCHENS et al. 2004) werden 123 auf verschiedene Weise gedüngte oder ungedüngte Varianten von zwölf unterschiedlichen Standorten miteinander verglichen. Die Bilanzsalden, errechnet mit den oberen und unteren Werten, werden dazu den gemessenen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha) gegenübergestellt (Abb. 1), z. T. auch den experimentell ermittelten Ergebnissen. Der Median der Differenz zwischen den unteren Bilanzwerten und den tatsächlichen Veränderungen beträgt -114 kg/ha/a Corg. Der interquartile Bereich (50 % aller Fälle) liegt zwischen 43 und -413 kg/ha/a Corg. Bei der Differenz zu den oberen Bilanzwerten liegt der Median bei -340 kg/ha/a Corg, der interquartile Bereich wird von -173 kg/ha/a Corg nach oben und von -587 kg/ha/a Corg nach unten begrenzt. Das bedeutet, dass im Durchschnitt aller Varianten die Corg-Salden mit den unteren Bilanzwerten um 226 kg/ha/a Corg besser eingeschätzt werden, als die Berechnung mit den oberen Werten. Das entspricht bei einer mittleren Ap-Tiefe von 2,62 dm und einer mittleren Lagerungsdichte von 1,52 g/cm³ aller Standorte dieser Arbeit einem Unterschied von 0,006 Masse-% Corg. Anhand der Boxplotdarstellung wird außerdem deutlich, dass sich unter den Varianten Ausreißer befinden. Bei diesen Varianten besteht zwischen den unteren oder oberen Bilanzwerten zu den gemessenen Werten eine Differenz von mehr als 1000 kg/ha/a Corg. Das betrifft alle Varianten des Standortes Keszthely (Ungarn), Varianten von Wien und eine Variante von Speyer (Abb. 2, s. Tab. A29). Diese Varianten werden im folgenden Kapitel im Einzelnen betrachtet und finden in allen folgenden Auswertungen, wenn nicht ausdrücklich erwähnt, keine Beachtung. Sie beeinflussen die Mittelwerte erheblich und verfälschen damit die gesamte Bewertung.

Der Betrag der mittleren Abweichung zwischen den tatsächlichen Corg-Veränderungen und den unteren Bilanzwerten der 106 Varianten ohne Ausreißer ist 184 kg/ha/a Corg, die maximale Abweichung beträgt 679 kg/ha/a Corg (s. Tab. A30). Der Betrag der mittleren Abweichung bezüglich der oberen Werte ergibt 310 kg/ha/a Corg, die maximale Abweichung liegt bei 939 kg/ha/a Corg. Das ergibt eine bessere Schätzung der organischen Bodenkohlenstoffwerte mit der Berechnung anhand der unteren Bilanzwerte. Die Differenz des Betrags der mittleren Abweichung zwischen den unteren und oberen Werten ergibt bei einer mittleren Ap-Tiefe von 2,62 dm und einer mittleren Lagerungsdichte von 1,52 g/cm³ im Durchschnitt aller 106 Varianten 0,003 Masse-% Corg (126 kg/ha/a Corg). Die unteren Bilanzwerte

unterschätzen die Bodenkohlenstoffgehalte in 60 %, die oberen Werte in 92 % aller Fälle.

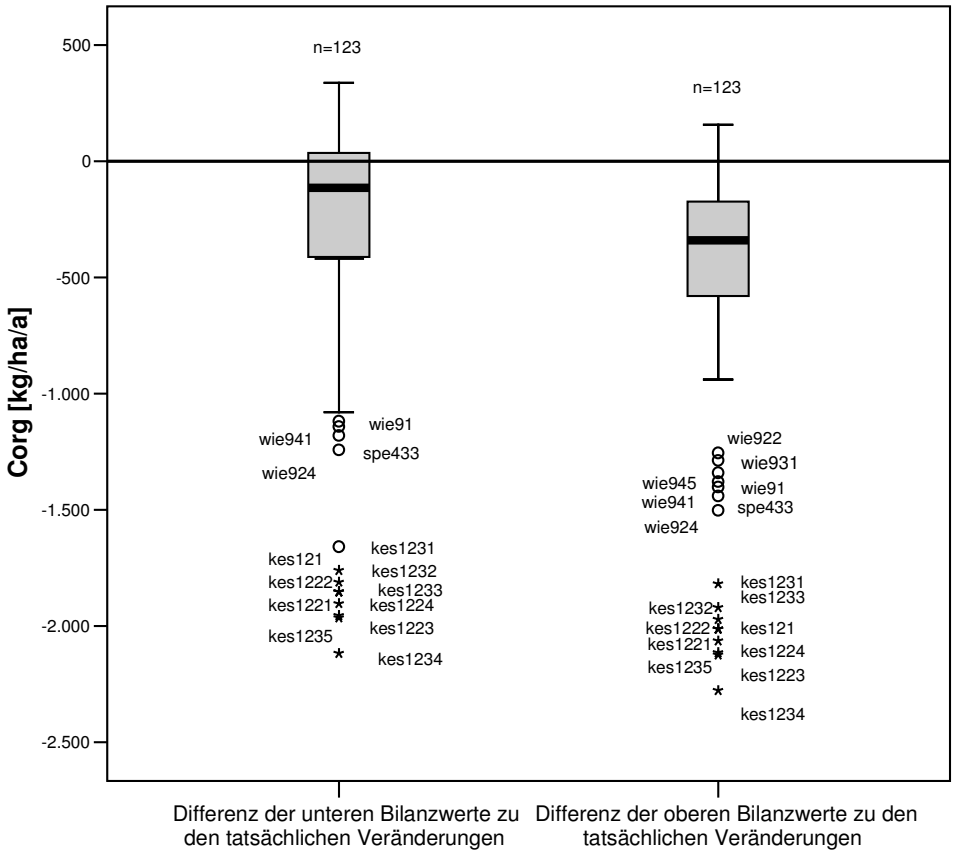

Abb. 1: Median, Streubereiche und Ausreißer der Differenz zwischen der tatsächlichen jährlichen Veränderung an Corg (kg/ha) (= 0 kg/ha/a Corg) und den mit den unteren bzw. oberen Bilanzwerten berechneten Änderungen unter Einbeziehung von 123 unterschiedlich gedüngten oder ungedüngten Versuchsvarianten (s. Tab. A28).

5.1.1 Ausreißer

Von 123 verschiedenen Varianten sind anhand der Boxplotanalyse aus Kapitel 5.1 knapp 14 % (n = 17) als Ausreißer ausgewiesen worden (Abb. 2, s. Tab. A29).

Unter diesen Varianten, bei denen die Differenz zwischen der tatsächlichen jährliche Veränderung an Corg im Boden und den unteren oder oberen Bilanzsalden mehr als 1000 kg/ha/a Corg beträgt, fallen alle zehn Varianten des *Standortes Keszthely* in Ungarn auf (Tab. 5). Dies sind eine Nullvariante, vier ausschließlich mit unterschiedlich hohen Stickstoffmineraldüngergaben behandelte Flächen, eine mit 11,7 t/ha/a Stallmist gedüngte Variante und vier mit ebensoviel Stallmist und verschieden hohen Stickstoffmineraldüngergaben

gedüngten Parzellen. Die Differenzen zwischen den tatsächlichen Veränderungen und den unteren und oberen Bilanzwerten überschreiten 1600 kg/ha/a Corg.

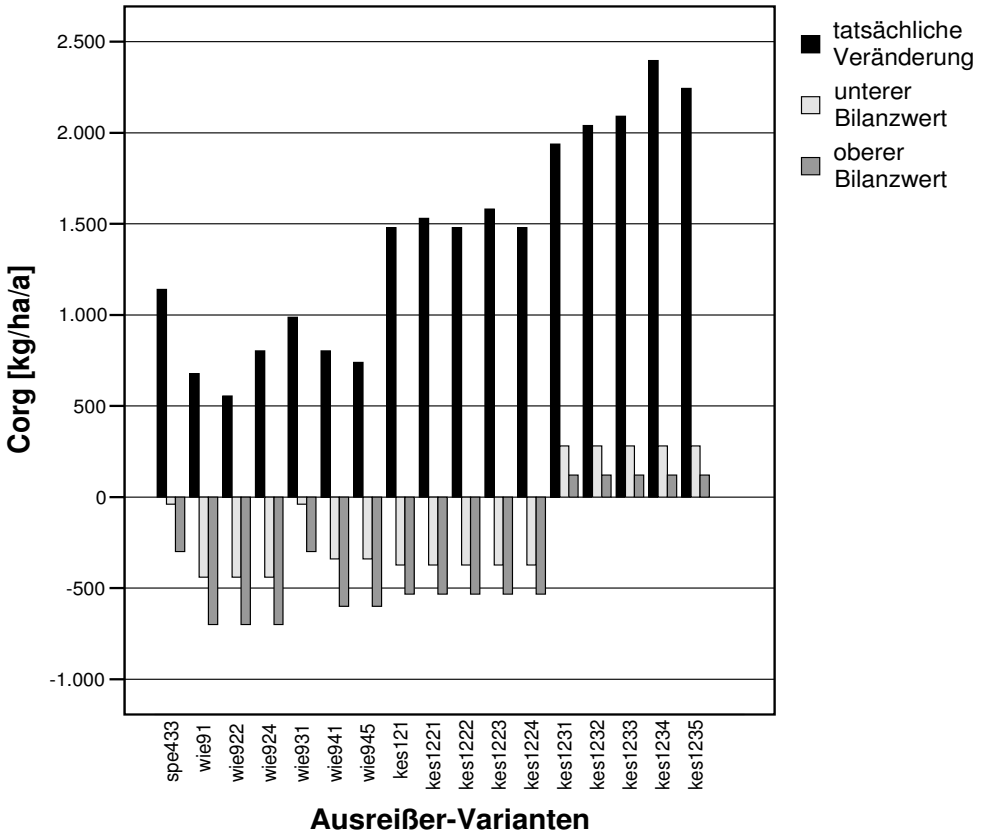

Abb. 2: Darstellung aller Varianten, deren Bilanzwerte (untere oder obere) um mehr als 1000 kg/ha/a Corg von den tatsächlichen Werten abweichen (Ausreißer). Vergleich zwischen den tatsächlichen Veränderungen an Corg (= 0 kg/ha/a Corg) zwischen Versuchsanfang und -ende und den unteren sowie oberen Bilanzwerten (Tab. A29).

Auffällig ist an diesem Standort die tatsächliche Veränderung der Bodenkohlenstoffmengen. Zu Versuchsbeginn enthielt der Boden 37,2 t/ha/3dm organischen Kohlenstoff, nach neun Versuchsjahren hatten alle Varianten, auch die Nullvariante, eine um durchschnittlich 16,4 t/ha/3dm höhere Menge an organischem Kohlenstoff von im Mittel 53,6 t/ha/3dm. Der Ausgangswert von 0,81 Masse-% Corg stieg auf 1,10 Masse-% bei der Nullvariante und bis auf 1,28 Masse-% Corg bei der mit 11,7 t/ha/a Stallmist und 160 kg/ha/a Stickstoffmineraldünger gedüngten Variante. Die Veränderungen der Corg-Mengen der ungedüngten und ausschließlich mineralisch gedüngten Varianten (53-213 kg/ha/a mineralischer N) nehmen ähnliche Ausmaße von knapp 1510 kg/ha/a Corg an. Bei den mit ausschließlich Stallmist und mit Stallmist und mineralischen Stickstoffgaben gedüngten Parzellen liegt eine jährliche

Erhöhung von durchschnittlich 2142 kg/ha/a Corg vor. Die Bilanzwerte der organisch gedüngten Varianten liegen im positiven Bereich bei 280 kg/ha/a Corg (unterer Wert) und 120 kg/ha/a Corg (oberer Wert). Bei der Nullvariante und den ausschließlich mineralisch gedüngten Varianten weist die Bilanz ein Defizit von -373 g/ha/a Corg (unterer Wert) und -533 kg/ha/a Corg (oberer Wert) aus.

Tab. 5: Corg-Mengen und Gehalte (t/ha, Masse-%) vom Versuchsbeginn (1984) und Versuchsende (1992) aller Düngungsvarianten vom Standort Keszthely (Ungarn)

Variante	organische Düngung (t/ha/a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	Corg (t/ha) 1984	Corg (t/ha) 1992	Corg (Masse-%) 1984	Corg (Masse-%) 1992
var12.1	ohne	ohne	37,2	50,49	0,81	1,1
var12.2.1	ohne	53,33	37,2	50,95	0,81	1,11
var12.2.2	ohne	106,67	37,2	50,49	0,81	1,1
var12.2.3	ohne	160	37,2	51,41	0,81	1,12
var12.2.4	ohne	213,33	37,2	50,49	0,81	1,1
var12.3.1	Stallmist, 11,7 FM / 3,9 TM	ohne	37,2	54,62	0,81	1,19
var12.3.2	Stallmist, 11,7 FM / 3,9 TM	160	37,2	55,54	0,81	1,21
var12.3.3	Stallmist, 11,7 FM / 3,9 TM	320	37,2	56,00	0,81	1,22
var12.3.4	Stallmist, 11,7 FM / 3,9 TM	480	37,2	58,75	0,81	1,28
var12.3.5	Stallmist, 11,7 FM / 3,9 TM	640	37,2	57,38	0,81	1,25

Quellen: HOFFMANN/KISMÁNYOKY/BALÁZS (1997, 1999a, 1999b)

Vom *Standort Wien* fließen in diese Arbeit 15 Varianten ein, sechs davon sind Ausreißer (Abb. 2, Tab. 6). Bei allen Wiener Varianten weist der Humussaldo der Bilanzierungsmethode (untere und obere Werte) einen negativen Saldo aus (s. Tab. A28). Ausreißer sind die Nullvariante, zwei mit ausschließlich Mineralstickstoff gedüngte Varianten, eine mit ausschließlich 10 t/ha/a Stallmist gedüngte Variante, die mit knapp 17 t/ha/a Gülle gedüngte Parzelle und die mit Gülle und der höchsten Mineralstickstoffgabe gedüngten Variante. Hier liegt die tatsächliche Veränderung pro Jahr zwischen +555 kg/ha Corg (zweite Stickstoffmineraldünger Düngungsstufe, Variante wie922) und +987 kg/ha/a (ausschließlich 10 t/ha/a Stallmist-FM, Variante wie931). Der Humussaldo liegt also gegenüber der Bilanzmethode bei den Ausreißern ausschließlich im positiven Bereich. Bei allen anderen Wiener Varianten liegen die tatsächlichen Veränderungen meist auch im positiven Bereich, nur zwei Varianten weisen einen negativen Saldo auf. Auffällig ist, dass die Nullvariante an Corg zunimmt, die Variante mit der hier geringsten Stickstoffmineraldüngermenge, ebenso die Stallmistvariante mit der geringsten Stickstoffmineraldüngermenge eine Abnahme erfährt. Dieser Standort ist bei diesen Varianten durch eine sehr heterogene Entwicklung der Corg-Werte gekennzeichnet.

Tab. 6: Corg-Mengen und Gehalte (t/ha, Masse-%) vom Versuchsbeginn (1986) und Versuchsende (1998) aller Düngungsvarianten vom Standort Wien (Österreich). Die Varianten, die Ausreißer darstellen, sind grau unterlegt

Varianten	organische Düngung (t/ha/a)	mineralische N Düngung (kg/ha/a)	Corg (t/ha) 1986	Corg (t/ha) 1998	Corg (Masse-%) 1986	Corg (Masse-%) 1998
var9.1	ohne	ohne	52,17	60,31	1,41	1,63
var9.2.1	ohne	43,33	55,87	52,54	1,51	1,42
var9.2.2	ohne	86,67	54,76	61,42	1,48	1,66
var9.2.3	ohne	130	54,39	55,87	1,47	1,51
var9.2.4	ohne	173,33	54,39	64,01	1,47	1,73
var9.3.1	Stallmist, 10 t FM	ohne	52,17	64,01	1,41	1,73
var9.3.2	Stallmist, 10 t FM	43,33	55,87	53,28	1,51	1,44
var9.3.3	Stallmist, 10 t FM	86,67	54,39	59,20	1,47	1,6
var9.3.4	Stallmist, 10 t FM	130	58,09	57,35	1,57	1,55
var9.3.5	Stallmist, 10 t FM	173,33	55,13	61,42	1,49	1,66
var9.4.1	Gülle (16,67 m³)	ohne	53,28	62,90	1,44	1,7
var9.4.2	Gülle (16,67 m³)	43,33	54,39	56,61	1,47	1,53
var9.4.3	Gülle (16,67 m³)	86,67	55,87	59,94	1,51	1,62
var9.4.4	Gülle (16,67 m³)	130	52,54	54,02	1,42	1,46
var9.4.5	Gülle (16,67 m³)	173,33	58,09	66,97	1,57	1,81

Quellen: HÖSCH & DERSCH (1997), HÖSCH (2005, pers. Mitteilungen)

Der dritte *Standort*, *Speyer*, zeigt bei insgesamt sechs verschiedenen Varianten nur einen Ausreißer (Abb. 2 + 3). Es handelt sich um die mit 10 t/ha/a Stallmist-FM und 227 kg/ha/a Stickstoffmineraldünger gedüngte Parzelle, eine Düngungsvariante mit den bei diesem Standort höchsten Stickstoffmineraldüngergaben. Mit dem unteren Wert schätzt die Bilanzmethode einen Saldo von -40 kg/ha/a Corg, mit dem oberen Wert -300 kg/ha/a Corg. Die tatsächliche jährliche Veränderung beträgt jedoch +1140 kg/ha/a Corg (s. Tab. A28). Die Nullvariante, die mit 113 kg/ha/a Stickstoffmineraldünger gedüngte Variante und die mit ausschließlich Stallmist behandelte Variante zeigen eine negative Bilanz. Die Variante, die mit der hier höchsten Gabe an Stickstoffmineraldünger von 227 kg/ha/a gedüngt wurde und die Parzellen mit einer kombinierten Düngung aus Stallmist und Stickstoffmineraldünger haben eine positive Bilanz. Bei der kombinierten Düngung fallen die mit zunehmender Mineraldüngung gesteigerten Corg-Überschüsse auf, dies gilt v. a. für die Ausreißervariante. Mit zunehmenden Stickstoffmineraldüngergaben nimmt hier bei der kombinierten Düngung die Differenz zwischen den Bilanzwerten und der tatsächlichen Corg-Veränderung zu.

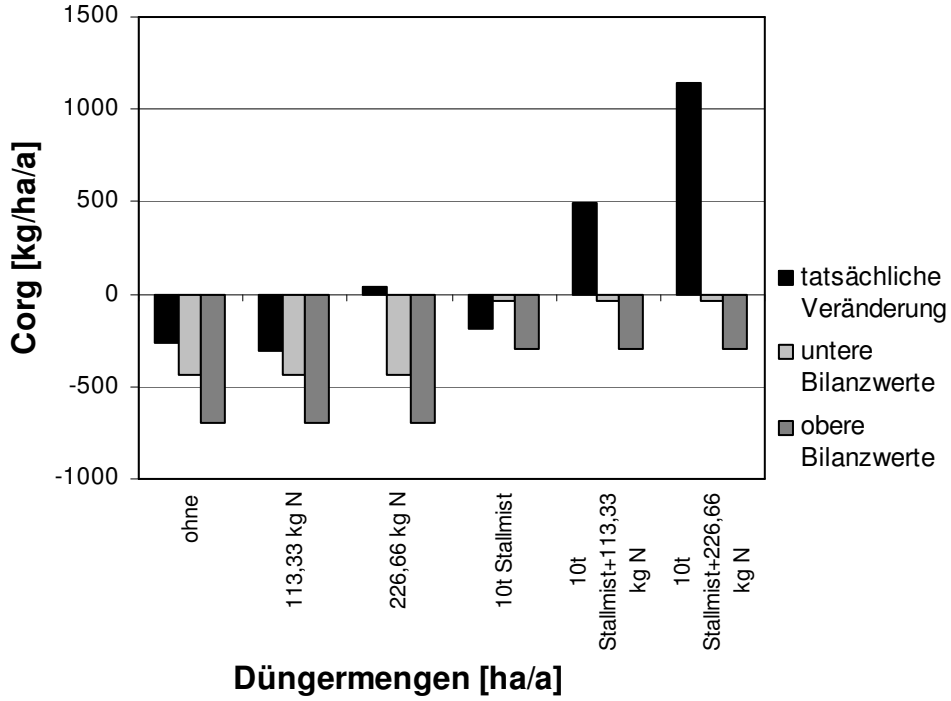

Abb. 3: Alle Düngevarianten des Standortes Speyer. Verglichen werden die tatsächlichen Veränderungen an Corg (kg/ha/a) mit den Bilanzsalden (untere und obere Werte) (s. A28).

5.1.2 Trockenmassegehalte der organischen Düngemittel

Der Trockenmassegehalt des organischen Düngemittels Stallmist sowie die tierische Herkunft sind unklar. Deshalb wird in dieser Arbeit bei den mit Stallmist gedüngten Varianten, außer beim Standort Keszthely, dort war der Wert angegeben, ein bestimmter Trockenmassegehalt unterstellt, um die Bilanzierungsrechnungen durchführen zu können. Beim Stallmist wird von 25 % Trockenmasse ausgegangen. Dieser Trockenmassegehalt wird üblicherweise verwendet (KÖRSCHENS 2005, pers. Mitteilung) und deckt nach der Bilanzmethode den frischen sowie verrotteten Stallmist ab. Berechnungen mit höheren Trockenmassegehalten von 35 % und 55 % führen bei allen 32 ausschließlich mit Stallmist gedüngten Versuchen, bei Berechnung mit den unteren und oberen Bilanzwerten, zu schlechteren Einschätzungen des Humussaldos im Vergleich zu den tatsächlichen Werten (Tab. 7).

Tab. 7: Gegenüberstellung vom Betrag der mittleren Abweichung zwischen dem Bilanzsaldo (unterer und oberer Wert) und der tatsächlichen Veränderung an Corg (kg/ha/a) bei allen 32 ausschließlich mit Stallmist gedüngten Varianten hinsichtlich der unterschiedlichen Stallmist-Trockenmassegehalte von 25, 35 und 55 % (s. Tab. A31)

Stallmist-Trockenmasse (%)	n	Betrag der mittleren Abweichung zwischen den tatsächlichen Veränderungen und den unteren Bilanzwerten (Corg kg/ha/a)	Betrag der mittleren Abweichung zwischen den tatsächlichen Veränderungen und den oberen Bilanzwerten (Corg kg/ha/a)
25	32	266	369
35	32	276	282
55	32	523	401

5.1.3 Der Corg-Wert zu Versuchsbeginn

Die Corg-Werte des Versuchsbeginns sind durch die vorhergehende Bewirtschaftungsweise beeinflusst, weshalb diese hier näher betrachtet werden muss. Das Anlagejahr der Standorte Halle, Bad Lauchstädt, Thyrow und Dikopshof liegt zwischen 38 und 75 Jahren vor dem Versuchsbeginn der dieser Arbeit zugrunde liegt (Tab. 8). Der Versuchsaufbau von Halle und Bad Lauchstädt blieb seitdem unverändert, in Thyrow fanden die letzten Änderungen 16 Jahre vor dem Versuchsbeginn statt, beim Dikopshof 13 Jahre vor Versuchsbeginn. In Thyrow fand ein Fruchtwechsel von Kartoffel-Sommergerste zu Kartoffel-Sommergerste-Silomais-Sommergerste statt, die Düngermengen blieben jedoch seit dem Anlagejahr unverändert (PESCHKE 1997). Beim Dauerdüngungsversuch vom Dikopshof änderte sich 1966 nur die Kleeart (SCHELLBERG & HÜGING 1997). So wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass zu Versuchsbeginn bei den genannten Versuchen annähernd ein Fließgleichgewicht zwischen Humusanlieferung und –abbau herrscht. Höchstens geringfügige Änderungen des Corg-Gehaltes sind bei gleich bleibender Bewirtschaftungsweise zu erwarten bzw. eingetreten (STUMPE/GARZ/HAGEDORN 1990, KÖRSCHENS 2003, PESCHKE 1997).

Bei allen anderen Standorten entspricht der Versuchsbeginn auch dem Anlagejahr. Die vorhergehende Bewirtschaftungsweise ist nur z. T. genau bekannt. Für diese Arbeit wird angenommen, dass sich der Corg-Wert der optimal gedüngten Variante zu Versuchsbeginn im Fließgleichgewicht befindet. Bei allen Standorten waren die Versuchsflächen vorher weder abgemagert, noch durch extrem hohe Düngergaben vorbelastet (Tab. 9). Meist wurde eine ortsübliche Fruchtfolge, mit den dazugehörigen ortsüblichen

Düngergaben, angebaut. Diese Bewirtschaftung, die oft über Jahrzehnte betrieben wurde, entspricht in etwa der Bewirtschaftungsweise der jeweiligen Optimalvarianten (s. Kap.5.1.4) dieser Arbeit.

Tab. 8: Alle Versuche deren Corg-Werte zu Versuchsbeginn annähernd im Fließgleichgewicht liegen (mit Jahresangaben)

Versuch	Anlagejahr	Jahr der letzten bekannten Änderung des Versuchsaufbaus im Zeitraum zwischen Anlagejahr und Versuchsbeginn	Versuchs-beginn	Differenz zwischen Anlagejahr und Versuchsbeginn (a)	Versuchs-dauer (a)
Halle	1878	keine	1929	51	29
Bad Lauchstädt	1902	keine	1954	52	36
Thyrow	1937	1959	1975	38	21
Dikopshof	1904	1966	1979	75	18

Quelle: STUMPE/GARZ/HAGEDORN (1990), KÖRSCHENS et al. (1994), PESCHKE (1997), GROSS (1983), SCHELLBERG/KÖRSCHENS/HÜGING (1999)

Tab. 9: Bewirtschaftungsweise der acht verschiedenen Versuchsflächen vor Versuchsbeginn und Dauer des Versuches (a). Aufgezählt werden nur die Standorte, deren Versuchsbeginn dem Anlagejahr entspricht

Standort	Bewirtschaftungs dauer vor Versuchsbeginn (≙ Anlagejahr)	Düngung vor Versuchsanlage	Fruchtfolge vor Versuchsanlage	Versuchsdauer (a)
Puch	?	ortsübliche Düngung (organisch und mineralisch)	"normal" (Blattfrüchte, Halmfrüchte)	12
Berlin-Dahlem	Jahrzehnte	ortsübliche Düngung (organisch und mineralisch), Jahrzehnte lang	"normal" (Blattfrüchte, Halmfrüchte)	12
Speyer	25 Jahre	organische und bedarfsgerechte mineralische Düngung	"normal" (1/3 Blatt-früchte, Halmfrüchte)	12
Wien	?	ortsüblich	Getreide, Zuckerrübe, Kartoffel	12
Jable	viele Jahre	nach „guter landwirtschaftlicher Praxis“, ohne Stallmist, aber mit N-Min. ca. 146 kg/ha/a	Mais-Winterweizen-Gerste	10

Fortsetzung Tab. 9:

Standort	Bewirtschaftungs dauer vor Versuchsbeginn (≙ Anlagejahr)	Düngung vor Versuchsanlage	Fruchtfolge vor Versuchsanlage	Versuchsdauer (a)
Rakičan	viele Jahre	nach „guter landwirtschaftlicher Praxis“, ohne Stallmist, aber mit N-Min. ca. 146 kg/ha/a	Mais-Winterweizen-Gerste	10
Keszthely	?	unklar, doch nicht abgemagert	wahrscheinlich Getreide, Mais, evtl. auch Gras	9
Ultuna	?	Unklar, evtl. maximal 6 t/ha/a Stallmist + 50 kg N (+PK)	Unklar, wahrscheinlich 30 % Klee / Gras, Gerste, Wi-Weizen, Hafer, evtl. auch Ölfrüchte	35

Quelle: HEGE (2005, pers. Mitteilungen), KÖHN (2005, pers. Mitteilungen), BISCHOFF (2005, pers. Mitteilungen), HÖSCH (2005, pers. Mitteilungen), HOFFMANN (2005, pers. Mitteilungen), MATTSSON (2005, pers. Mitteilungen)

5.1.4 Die Optimalvarianten

Die Humusbilanzierungsmethode basiert auf „optimal“ bewirtschafteten Versuchsvarianten. Hierunter wird diejenige Variante verstanden, *„bei der in Kombination mit Mineraldüngung durch höhere Zufuhr an organischer Substanz keine weitere Ertragssteigerung mehr erzielt und die höchste Effizienz der N-Düngung erreicht wurde“* (KÖRSCHENS et al. 2004, S. 4). Zur Überprüfung der Bilanzmethode wird daher diese optimale, experimentell anhand von Langzeitversuchen ermittelte Variante pro Standort und organischer Düngemittel herangezogen (Tab. 10). In der Regel wurde von den Versuchsanstellern diese Variante ausgewiesen, wenn nicht wurde selbst eine nach o. g. Kriterien ausgewählt. Ist pro Standort keine optimale Düngevariante vorhanden, wird die Variante herangezogen, die der Optimalvariante am nächsten kommt. Vom Standort Halle existiert keine Variante mit kombinierter organisch-mineralischer Düngung.

Tab. 10: Alle experimentell ermittelten optimalen Düngevarianten elf verschiedener Standorte mit Düngeformen und –mengen (t/ha/a, kg/ha/a) sowie Corg-Mengen (t/ha) zu Versuchsbeginn und –ende. (Grau unterlegt sind die Varianten, die für Berechnungen des Klima- und Bodenarteneinflusses herangezogen wurden)

Variante	organische Düngung (FM t/ha/a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	Corg (t/ha) Versuchsbeginn	Corg (t/ha) Versuchsende
puc1a33	10 Stallmist	80	51,8	52,3
puc1a53	3,5 Stroh	80	50,9	49,0
puc1a63	20 Gülle	80	50,9	50,9
puc1a83	3,5 Stroh, 20 Gülle, 5,3 Raps	80	50,9	53,3
puc1b33	3,5 Stroh, 11,7 Rübenblatt	80	51,8	50,9
puc1b43	3,5 Stroh, 5,3 Wicken-Erbsen-Gemenge, 11,7 Rübenblatt	80	54,7	55,2
ber332	10 Stallmist	143	21,9	24,1
ber342	4 Stroh, 8,3 Rübenblatt, 8,3 Ölrettich	143	21,9	22,8
spe432	10 Stallmist	113	37,9	43,8
lau632	10 Stallmist	70	69,5	71,6
thy732	15 Stallmist	75	31,8	27,4
dik832	12 Stallmist	46	47,9	57,9
wie933	10 Stallmist	86	54,4	59,2
wie943	16,7 Gülle	86	55,9	59,9
jab1033	10 Stallmist	146	54,6	54,3
rak1132	10 Stallmist	73	39,5	44,1
kes1233	11,7 Stallmist	106	37,2	56,0
ult1342	4,4 Stroh	80	41,0	53,1

Quellen: s. Tab. A1-A27

5.2 Dünger und Fruchtarten

Der Einfluss unterschiedlicher Düngemittel auf die Bilanzierungsergebnisse soll im Folgenden überprüft werden. Hat die Gabe von Stickstoffmineraldünger einen Einfluss auf die Corg-Menge des Bodens und wie wirken sich die organischen Düngemittel Stallmist, Gülle und Stroh und die unterschiedlichen Fruchtarten auf die Corg-Mengen des Bodens aus? Die Einschätzung der Bilanz wird anhand der unterschiedlichen Düngevarianten der zwölf Standorte untersucht.

5.2.1 Mineralischer Stickstoffdünger

Der Einfluss des Mineralstickstoffdüngers auf die Corg-Mengen (kg/ha) des Bodens kann untersucht werden, indem der Corg-Wert (kg/ha) der Nullparzellen zu Versuchsende mit dem Corg-Wert (kg/ha) der mit ausschließlich Stickstoffmineraldünger gedüngten Parzellen zu Versuchsende verglichen wird. Dazu werden 14 Varianten von zehn verschiedenen Standorten (ohne Ausreißer), zu denen die nötigen Angaben vorliegen, miteinander verglichen. Die Düngevarianten werden je nach Stickstoffmineraldüngerhöhe in vier verschiedene Klassen eingeteilt (Abb. 4). Dabei ist zu erkennen, dass die Mineraldüngung die Corg-Menge des Bodens über alle Klassen hinweg im Mittel der Varianten gegenüber den Nullvarianten erhöht. Die Düngungsklasse mit einer Stickstoffmineraldüngergabe von 75 bis 95 kg/ha/a erreicht dabei die hier maximale Erhöhung von 4303 kg/ha Corg. Die Varianten der drei weiteren Mineraldüngerklassen zeigen eine Erhöhung der Corg-Menge von durchschnittlich 1000 bis 2000 kg/ha gegenüber der Nullparzelle auf. Im Mittel aller Klassen erhöht sich die Corg-Menge des Bodens gegenüber der Nullparzelle um 2150 kg/ha, das entspricht, bei einer mittleren Ap-Tiefe von 2,62 dm und einer mittleren Lagerungsdichte von 1,52 g/cm³ aller Versuche dieser Arbeit, einer Erhöhung um 0,05 Masse-% Corg.

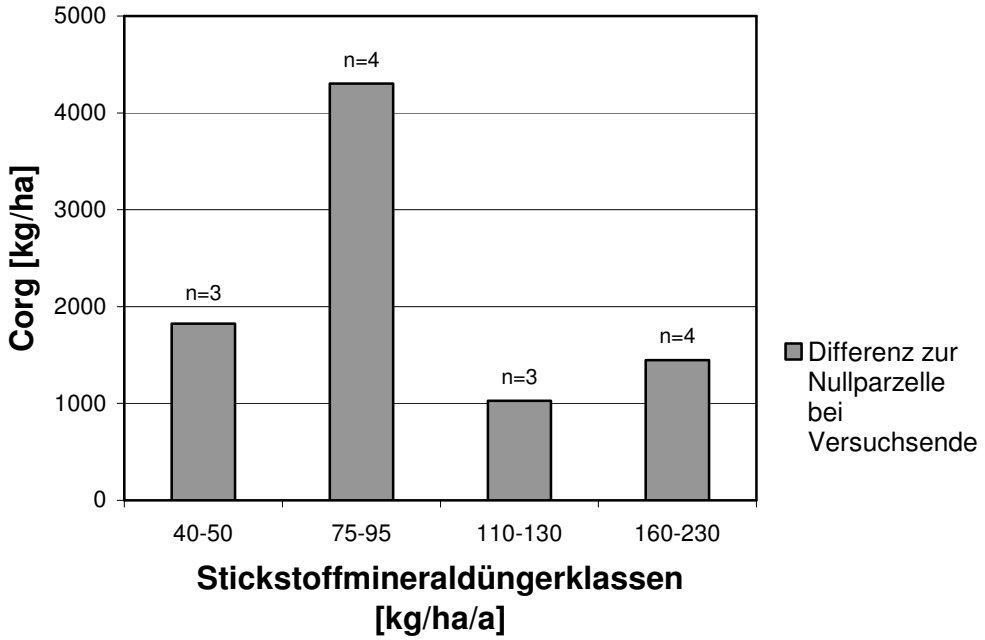

Abb. 4: Vergleich der Differenz des Corg-Wertes zu Versuchsende (kg/ha) vier verschiedener Klassen (n = 14) mit unterschiedlich hohen Stickstoffmineraldüngergaben mit dem Corg-Wert der jeweiligen Nullparzellen zu Versuchsende (s. Tab. A32).

Die Entwicklung der Corg-Mengen des Bodens vom Versuchsanfang bis zum Versuchsende ist in Abb. 5 zu erkennen. Die Klasseneinteilung in vier Mineralstickstoffklassen bleibt erhalten, als fünfte Klasse wird noch die der Nullvarianten hinzugenommen. Insgesamt werden dadurch 26 verschiedene Varianten einbezogen. Anhand der Darstellung ist zu erkennen, dass in allen Klassen die Corg-Menge im Durchschnitt der Versuchsjahre abgesunken ist. Dies ist bei den drei Klassen mit den höchsten Stickstoffmineraldüngergaben von 75 bis 230 kg/ha/a am geringsten (im Durchschnitt -154 kg/ha/a). Bei den Nullvarianten sinkt die Corg-Menge um 224 kg/ha/a. Die Düngeklasse mit 40 bis 50 kg/ha/a Stickstoffmineraldünger liegt noch darunter, hier nimmt die Abnahme der Corg-Menge Ausmaße von jährlich 266 kg/ha an.

Die Auswirkung der Mineralstickstoffdüngermenge auf die mit Hilfe der Bilanzierungsmethode (untere und obere Werte) prognostizierten Corg-Salden soll im Folgenden dargestellt werden. Dazu wird der Betrag der mittleren Abweichung zwischen den tatsächlichen jährlichen Corg-Veränderungen (kg/ha) zu den unteren bzw. oberen Bilanzsalden herangezogen. Die Einteilung der 26 Varianten in die fünf o. g. Stickstoffmineraldüngungsklassen bleibt dabei bestehen (Abb. 6, s. Tab. A33). Der Betrag der mittleren Abweichung zwischen den gemessenen Bodenkohlenstoffwerten und den unteren Bilanzwerten beträgt in der Klasse der Nullvarianten 242 kg/ha/a Corg. Das entspricht 0,006 Masse-% Corg. Die geringste Differenz zu den unteren Werten mit 162 kg/ha/a Corg zeigt die Klasse mit der geringsten mineralischen N-Düngergabe von 40 bis 50 kg/ha/a. Bei den beiden Klassen mit 75 bis 95 kg/ha/a und 110 bis 130 kg/ha/a mineralischer N-Düngung nimmt die Differenz zu den unteren Werten wieder um 264 bzw. 270 kg/ha/a Corg zu. Das ist die größte Abweichung. Die unteren Bilanzwerte nähern sich bei der Klasse mit den höchsten Düngergaben den tatsächlich gemessenen Corg-Werten wieder an. Sie verschätzen sich um 242 kg/ha/a. Die durchschnittliche Abweichung der mit unterschiedlichen Mengen an mineralischem N-Dünger behandelten Klassen zu den unteren Bilanzwerten beträgt 235 kg/ha/a Corg, das entspricht 0,006 Masse-% Corg. Die oberen Bilanzwerte schätzen die tatsächlichen Corg-Verhältnisse über alle Klassen hinweg um durchschnittlich 157 kg/ha/a Corg schlechter ein als die unteren Werte. Die durchschnittliche Abweichung der oberen Bilanzwerte zu den tatsächlichen jährlichen Veränderungen im Mittel aller mineralischen N-Düngungsklassen beträgt 404 kg/ha/a, das entspricht 0,01 Masse-% Corg.

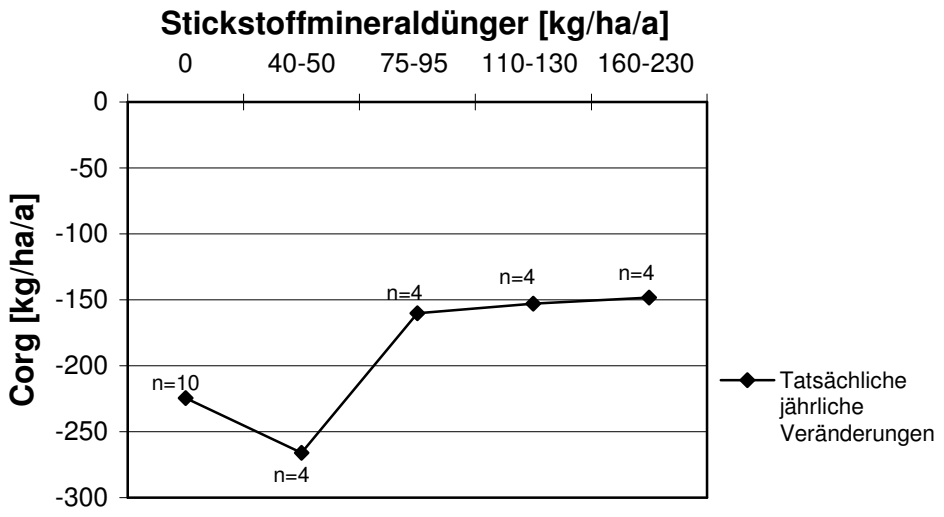

Abb. 5: Vergleich der tatsächlichen jährlichen Veränderung der Corg-Menge (kg/ha) des Ap-Horizontes von fünf verschiedenen Klassen mit unterschiedlich hohen Stickstoffmineraldüngergaben, einschließlich der Nullvarianten (s. Tab. A33).

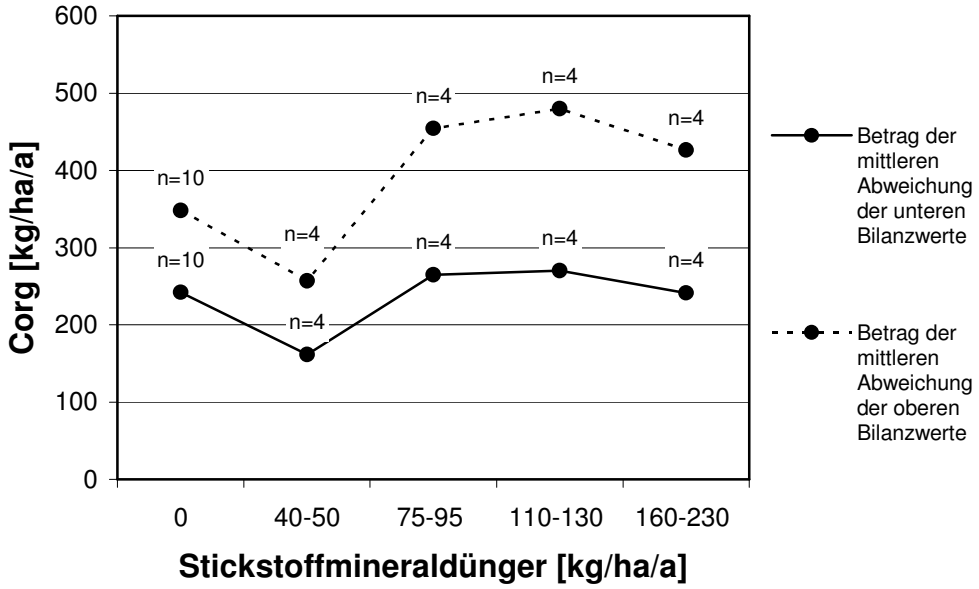

Abb. 6: Vergleich fünf verschiedener Klassen mit unterschiedlich hohen Stickstoffmineraldüngergaben, einschließlich der Nullvarianten, bezüglich der Differenz (mittlerer Betrag der Abweichung) zwischen den Bilanzwerten (untere und obere) und den tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg (= 0 kg/ha) (s. Tab. A33).

5.2.2 Organische Dünger

Der Einfluss des Stallmistes auf die Corg-Menge des Bodens (kg/ha) wird nachgewiesen, in dem der Corg-Wert der Nullparzelle zu Versuchsende dem Corg-Wert der ausschließlich mit Stallmist gedüngten Parzelle gegenübergestellt wird (Abb. 7).

Bei allen zehn untersuchten Standorten ist eine Corg-Erhöhung gegenüber den jeweiligen Nullparzellen festzustellen. Im Mittel aller Standorte beträgt diese Abweichung 10030 kg/ha Corg, das entspricht 0,25 Masse-% Corg. Die höchste Abweichung von 31088 kg/ha weist, bei den höchsten jährlichen Düngergaben von knapp 17 t/ha/a Stallmist, Ultuna auf. Das entspricht bei einer Lagerungsdichte von 1,34 g/cm³ und einer Ap-Mächtigkeit von 20 cm 1,16 Masse-% Corg.

Der Standort Speyer zeigt die geringsten Differenzen zu der Nullvariante mit einer Abweichung von 912 kg/ha Corg bzw. 0,02 Masse-% Corg bei einer Lagerungsdichte von 1,52 g/cm³ und einer Ap-Tiefe von 30 cm.

Werden nur die sechs Varianten mit einer Stallmistdüngung von 10 t/ha/a beachtet, so beträgt die mittlere Abweichung zu der Corg-Menge der Nullparzellen 4712 kg/ha/a, also 0,12 Masse-% Corg.

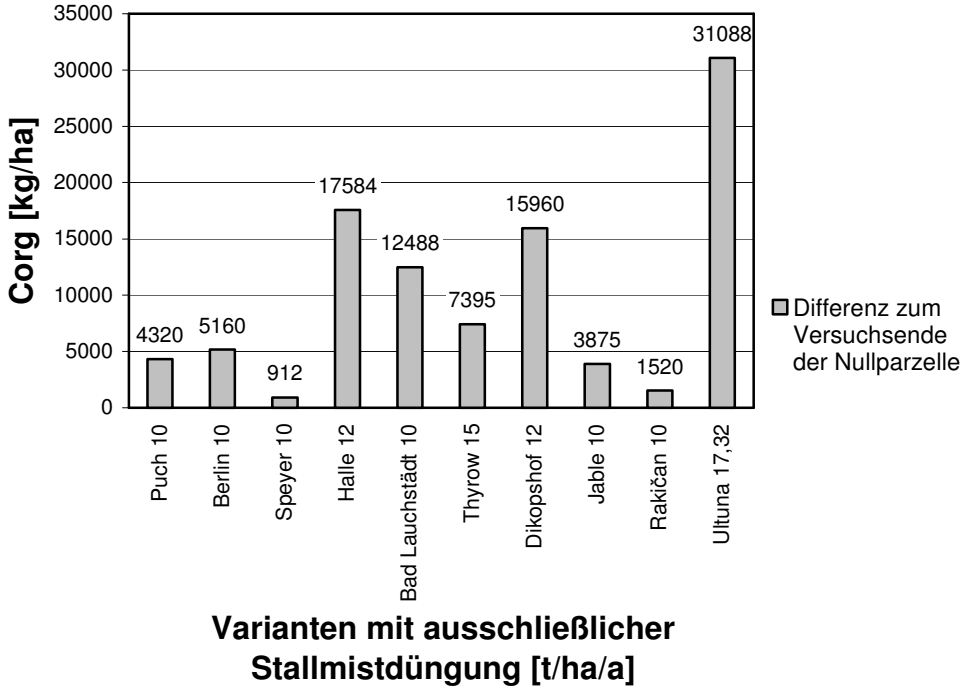

Abb. 7: Vergleich der Differenz des Corg-Wertes zu Versuchsende (kg/ha) zwischen den mit ausschließlich unterschiedlichen Mengen an Stallmist gedüngten Parzellen und des Corg-Wertes der Nullparzellen (s. Tab. A34).

Die Bilanzierungsmethode geht von optimalen Düngeverhältnissen der landwirtschaftlichen Flächen aus. Es werden nun die acht „optimal“ mit verschiedenen Mengen an Stallmist und Stickstoffmineraldüngung versorgten Flächen miteinander verglichen (Abb. 8, s. Tab. 10 in Kap. 5.1.4). Dazu wird der Einfluss der kombinierten Düngung anhand der Differenz zwischen dem Corg-Endwert der Nullparzelle und dem Endwert der gedüngten Parzelle errechnet. Alle optimal gedüngten Versuchsflächen zeigen einen höheren Corg-Wert bei Versuchsende als die ungedüngten Varianten. Im Durchschnitt der Standorte beträgt die Abweichung 9,2 t/ha Corg, das entspricht 0,23 Masse-% Corg. Maximale Unterschiede verzeichnen die Standorte Bad Lauchstädt und Dikopshof mit 18,7 t/ha Corg (0,55 Masse-%) und 17,2 t/ha Corg (0,38 Masse-%). Rakičan und Puch haben die geringste Abweichung zu den Nullvariantenwerten mit 3,4 t/ha Corg und 3,8 t/ha Corg. Das entspricht 0,09 Masse-% Corg bzw. 0,08 Masse-% Corg bezogen auf die jeweiligen Lagerungsdichten und Ap-Tiefen des Bodens. Ein etwas größerer Abstand zur Nullvariante ist bei Jable (4,7 t/ha Corg) und Berlin (5,6 t/ha Corg) zu erkennen. Die „Optimalvarianten“ der Standorte Thyrow und Speyer kommen den mittleren Differenzen mit 9,1 t/ha Corg Unterschied und 11,3 t/ha Corg am nächsten.

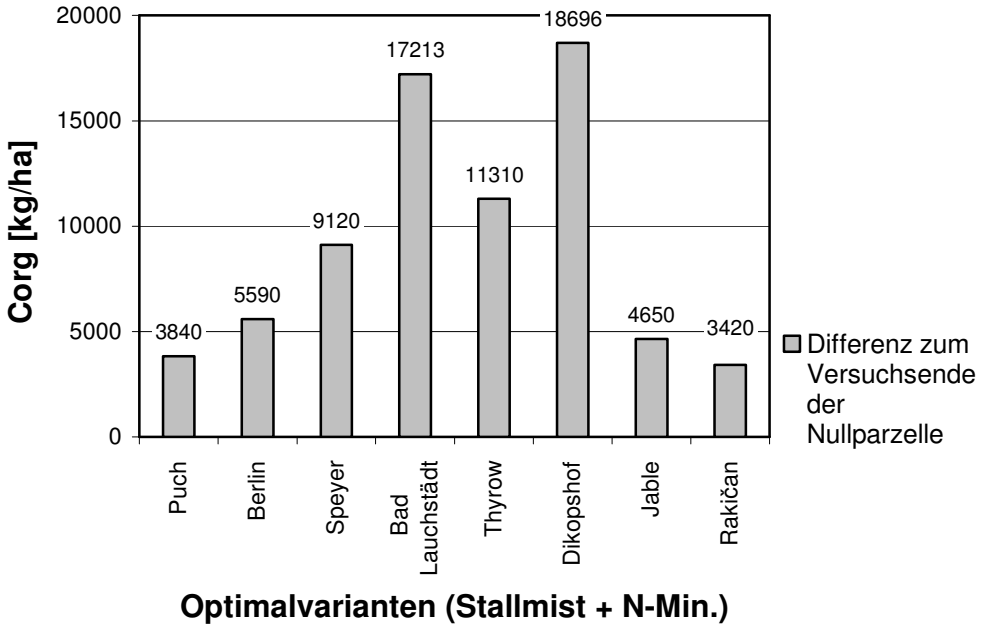

Abb. 8: Vergleich der Differenz des Corg-Wertes zu Versuchsende (kg/ha) zwischen den „optimal“ mit Stallmist und Stickstoffmineraldünger behandelten Parzellen und des Corg-Wertes der Nullparzellen (s. Tab. A32).

Zum direkten Vergleich werden diese Differenzen den Unterschieden zwischen Nullparzellenende und alleiniger Stallmistdüngung bzw. ausschließlicher Stickstoffmineraldüngung in Abb. 9 gegenübergestellt. Es werden nur Varianten ausgewählt, bei denen die gleichen Mengen an Stallmist bzw. Mineraldünger verabreicht wurden wie bei den jeweiligen „Optimalvarianten“. Es ist deutlich, dass die kombinierte „optimale“ Düngung den größten Einfluss auf die Humusmengen der Böden unter den drei Düngungsmethoden hat. Lediglich beim Standort Puch verzeichnet im Beprobungsjahr die Stallmistparzelle eine höhere Corg-Menge als die optimal gedüngte Variante. Die Differenz zwischen beiden Varianten beträgt 480 kg/ha Corg, das entspricht 0,01 Masse-%.

Die mittlere Abweichung zwischen allen Endwerten der Stallmistvarianten und der jeweiligen Nullvarianten beträgt 6,5 t/ha Corg (= 0,16 Masse-% Corg). Der Unterschied zwischen den Nullparzellen und den „Optimalvarianten“ beträgt durchschnittlich 9,2 t/ha Corg (= 0,23 Masse-% Corg), das sind 2,7 t/ha Corg mehr als die Differenz zwischen den Stallmistvarianten und den Nullvarianten ausmacht. Dieser Unterschied entspricht bei einer mittleren Lagerungsdichte von 1,52 g/cm³ und einer Ap-Mächtigkeit von 2,62 dm 0,07 Masse-% Corg.

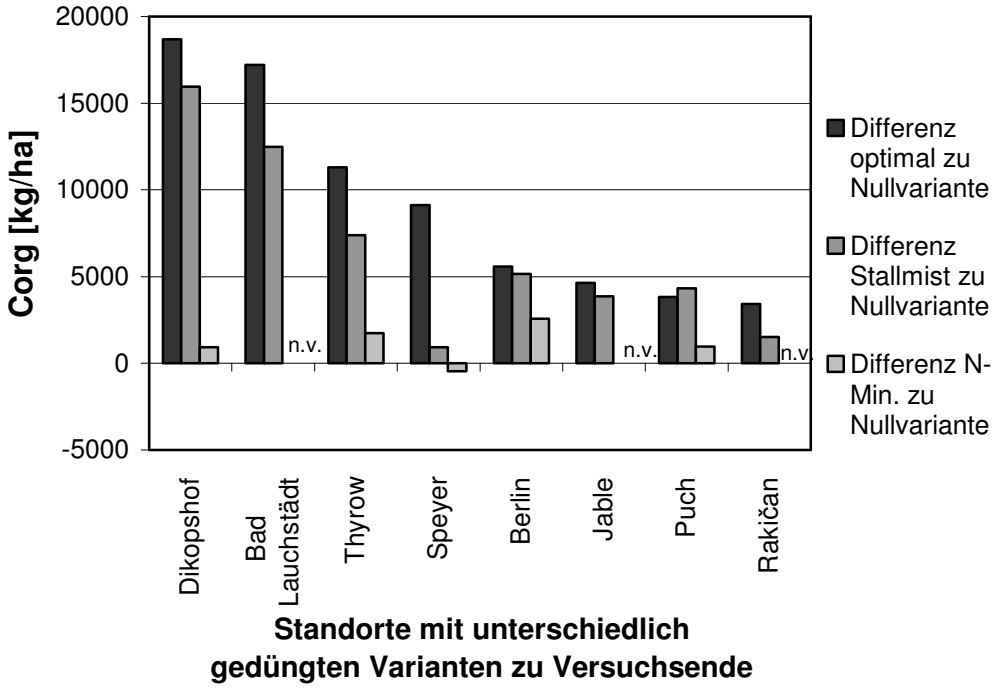

Abb. 9: Vergleich der optimalen Düngevarianten mit der jeweiligen Stallmistvariante (gleiche Düngegabe an Stallmist wie die Optimalvariante) und der Stickstoffmineraldüngungsvariante (gleiche Düngegabe an Stickstoffmineraldünger wie die Optimalvariante) hinsichtlich der Differenz der Corg-Werte (kg/ha) zur Nullvariante bei Versuchsende (s. Tab. A32, A34, A35).

Die mittlere Differenz zwischen den „Optimalvarianten“ und den mineralischen N-Düngervarianten kann nicht genau angegeben werden, da von Bad Lauchstädt, Jable und Rakičan die jeweiligen Varianten für diese Arbeit nicht vorhanden sind. Somit werden die übrigen fünf Standorte dazu herangezogen. Die Abweichung dieser Optimalvarianten zu den Endwerten der jeweiligen Nullvarianten beträgt 9,7 t/ha Corg, das Ergebnis der Stickstoffmineraldüngervarianten zu den Nullvarianten beläuft sich im Mittel auf 1,1 t/ha Corg. Somit beträgt die Differenz zwischen dem Ergebnis der optimal gedüngten Varianten und den Versuchen mit Stickstoffmineraldünger 8,6 t/ha Corg, das sind 0,22 Masse-% Corg. Nach den Optimalvarianten befinden sich auf den Parzellen mit Stallmistdüngung die höchsten Corg-Mengen im Boden, dann erst kommen die hier untersuchten Mineraldüngerflächen.

Zu den *„optimal“ gedüngten Varianten* zählen neun verschiedene mit Stallmist und Stickstoffmineraldünger behandelte Parzellen von neun unterschiedlichen Standorten (s. Tab. 10 in Kap. 5.1.4). Die tatsächlichen jährlichen Corg-Veränderungen in kg/ha/a dieser Varianten werden nun mit den von der Bilanz (untere und obere Werte) prognostizierten Ergebnissen verglichen (Abb. 10).

Dabei ist zu erkennen, dass die tatsächlichen Corg-Verhältnisse im Durchschnitt mit den unteren Bilanzwerten besser eingeschätzt werden als mit den oberen Werten. Der mittlere Betrag der Abweichung ist 288 kg/ha/a Corg (0,007 Masse-% Corg) zu den unteren Werten, zu den oberen Bilanzwerten 429 kg Corg/ha/a (0,01 Masse-% Corg). Die durchschnittliche Abweichung der unteren Werte zu den gemessenen Werten beträgt -198 kg/ha/a Corg, bei den oberen Werten sind es -394 kg/ha/a Corg. Eine Ausnahme stellt ein Versuch aus Thyrow da. Bei einer Stallmistdüngung von 15 t/ha/a und einer zusätzlichen mineralischen N-Düngung von 75 kg/ha/a weichen die Schätzungen der unteren Werte um 337 kg/ha/a Corg, der oberen Werte um 157 kg/ha/a Corg von den tatsächlichen Verhältnissen ab, das heißt die Einschätzung mit den oberen Werten ist besser als mit den unteren Werten. Die Varianten des Standortes Puch (10 t Stallmist + 80 kg/ha/a mineralischer N) und Jable (10 t Stallmist + 147 kg/ha/a mineralischer N) werden durch die Bilanzmethode am besten eingeschätzt. Bei Puch verfehlen die unteren Werte die tatsächlichen Veränderungen von +40 kg//ha/a Corg um -13 kg/ha/a Corg (oberer Bilanzwert um -173 kg/ha/a Corg), bei Jable verschätzt sich der untere Bilanzwert um 66 kg/ha/a Corg (oberer Bilanzwert -95 kg/ha/a Corg). Am schlechtesten wird das Ergebnis aus Speyer (10 t Stallmist + 113 kg/ha/a mineralischer N) eingeschätzt. Der untere Bilanzwert liegt um 534 kg/ha/a Corg (oberer Wert um -794 kg/ha/a Corg) niedriger als der tatsächliche Wert. Somit liegt die Abweichung der Schätzungen der unteren Werte bei den „optimal“ mit Stallmist und

Mineralstickstoff gedüngten Parzellen zwischen 13 kg/ha/a Corg bis maximal 534 kg/ha/a Corg zu den tatsächlichen Ergebnissen. Diese Spannweite entspricht bei einer mittleren Ap-Tiefe und einer mittleren Lagerungsdichte einem Unterschied von 0,01 Masse-% Corg des Bodens. Die schlechteste Einschätzung mit den unteren Werten ergibt eine Abweichung von den tatsächlichen Veränderungen um 0,01 Masse-% Corg des Bodens, bei den oberen Werten sind es 0,02 Masse-% Corg. In sieben von neun Fällen werden die Corg-Veränderungen von den unteren Bilanzwerten unterschätzt, es würde dort mehr gedüngt oder zu wenig Dünger reduziert als nach den tatsächlichen Corg-Veränderungen nötig wäre, um eine ausgeglichene Corg-Bilanz zu erhalten. Die zwei überschätzten Standorte sind Thyrow und Jable. Das heißt in diesen Fällen, dass dort weniger gedüngt würde als nötig ist (Tab. 11). Durch den oberen Bilanzwert werden acht Varianten unterschätzt, nur Thyrow wird überschätzt, dort würde in diesem Falle ebenfalls zu wenig gedüngt.

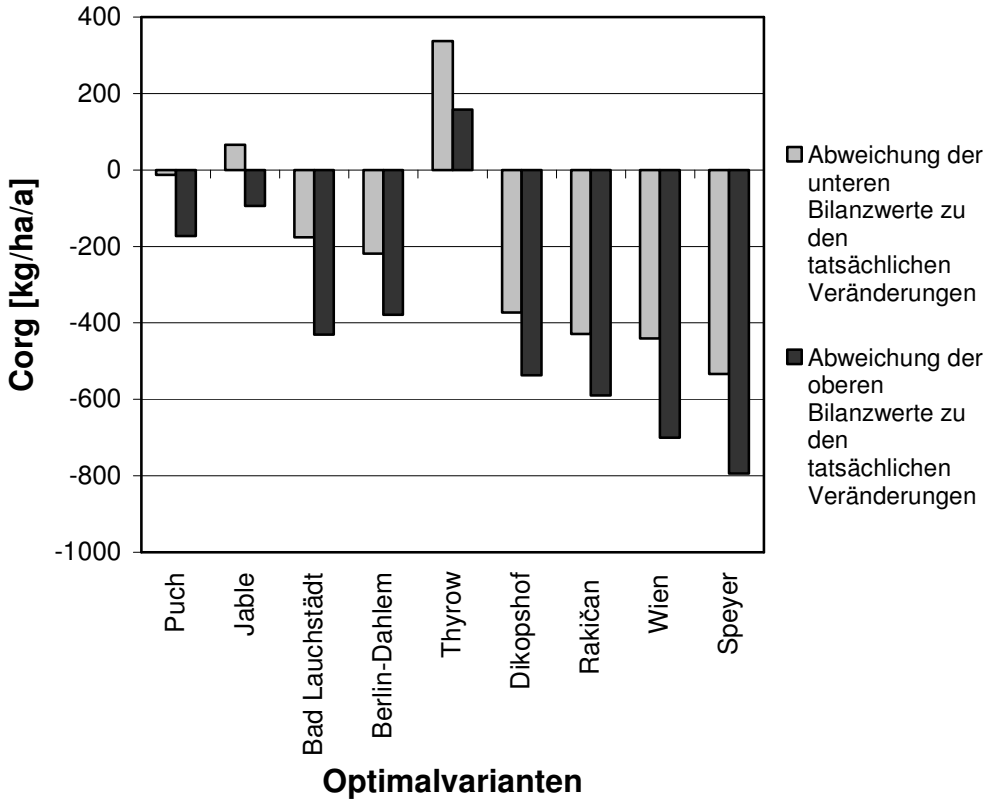

Abb. 10: Vergleich der tatsächlichen jährlichen Veränderung an Corg (= 0 kg/ha/a Corg) und der unteren und oberen Bilanzwerte der neun „optimal“ mit Stallmist und Mineralstickstoff gedüngten Varianten (s. Tab. A36).

Werden die neun einzelnen Varianten bezüglich des experimentell ermittelten (s. Tab. 10 in Kap. 5.1.4) und bilanzierten Humusbedarfs der „optimalen“ Mengen an verrottetem Stallmist-Dünger (t/ha/a) gegenübergestellt (vgl.

KÖRSCHENS et al. 2004, S. 5), so kommt man zu folgenden Ergebnissen (Tab. 11): Im Mittel aller neun Varianten verschätzt sich die Bilanz, mit den unteren Werten, um 0,4 t/ha/a Stallmist sowie mit den oberen Bilanzwerten um im Mittel 4,5 t/ha/a Stallmist. Die Abweichung der Schätzung mit den unteren Werten zu den experimentell ermittelten Düngegaben ist mit höchsten 1 t/ha/a Stallmist bei den Standorten Puch, Berlin, Speyer, Wien, Jable und Rakičan am geringsten. Bad Lauchstädt wird um 3 t/ha/a Stallmist von den unteren Bilanzwerten überschätzt, Thyrow um 3,3 t/ha/a Stallmist unterschätzt. Beim Dikopshof tritt die größte Diskrepanz von 4,6 t/ha/a Stallmist, unterschätzt mit den unteren Werten, ein. Dort sollen anstatt 12 t/ha/a 7,4 t/ha/a Stallmist gedüngt werden. Dieser Versuch und Thyrow werden mit den oberen Werten besser eingeschätzt als mit den unteren Werten.

Die gemessenen tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha), die sich jeweils auf einen bestimmten Zeitraum beziehen, werden mit dem Humusreproduktionskoeffizienten von 40 ebenfalls in Stallmist-FM (t/ha/a) umgerechnet. So können die Ergebnisse besser verglichen werden. Geht man hier ebenfalls davon aus, dass die experimentell ermittelte Düngermenge optimal ist, so müsste der Humusspiegel ausgeglichen sein, d. h. die experimentell vorliegenden Düngemengen müssten theoretisch mit den anhand der Corg-Werte errechneten Mengen identisch sein. Im Mittel aller neun Versuche unterscheidet sich diese Menge aber um -4,7 t/ha/a Stallmist-FM von den mittleren Düngegaben von 10,8 t Stallmist. Das heißt im Mittel der Versuche wurde der Humusspiegel durch eine Düngergabe von durchschnittlich 10,8 t/ha/a Stallmist und Mineralstickstoff angereichert, was zum Zeitpunkt der Probenahme (Versuchsende) mehr ist als die Summe der Varianten für eine ausgeglichene Humusbilanz benötigt. Im Mittel müsste stattdessen zu Versuchsende nur noch 6,1 t/ha/a Stallmist gedüngt werden. Dies unter der Annahme, dass der Humusreproduktionskoeffizient im Mittel der Versuche 40 ist. Bei einer Umrechnung mit dem Koeffizienten von 56, liegt die mittlere Stallmistmenge statt bei 6,1 t/ha/a bei 13,6 t/ha/a.

Die unteren Bilanzwerte empfehlen eine Düngergabe von jährlich 10,4 t/ha Stallmist, das sind 4,3 t/ha/a mehr als die mittlere Düngeempfehlung, errechnet durch die tatsächlichen Veränderungen, ergibt. Die oberen Bilanzwerte weichen noch weiter davon ab, durch sie würde 9,1 t/ha/a mehr gedüngt, als die Corg-Messungen ergaben.

Mit den beiden Methoden, zum einen der Vergleich der tatsächlichen jährlichen Veränderungen mit den bilanzierten Werten, zum anderen die Gegenüberstellung des experimentell ermittelten Düngebedarfs durch Langzeitstudien im Feld, wird anhand der neun „optimal“ gedüngten Varianten deutlich, dass die unteren Bilanzwerte im Mittel den tatsächlichen

Humusbedarf besser einschätzen als die oberen Bilanzwerte. Nur beim Standort Thyrow ergeben beide Methoden eine bessere Einschätzung des Humusbedarfs durch die oberen Bilanzwerte. Die Gegenüberstellung des experimentell ermittelten Düngebedarfs mit den unteren Bilanzwerten, gibt eine im Durchschnitt der neun Versuche relativ genaue Schätzung wieder. Die Abweichung liegt bei 0,0004 Masse-% Corg. Die Analyse bezüglich der tatsächlichen Corg-Veränderungen ergibt im Mittel eine Diskrepanz zwischen den unteren Werten und den tatsächlichen Veränderungen von 0,07 Masse-% Corg.

Tab. 11: Experimentell ermittelter, mit den unteren Werten und oberen Werten bilanzierter und anhand der tatsächlichen jährlichen Veränderungen errechneter Humusbedarf (verrotteter Stallmist t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Stallmistvarianten (organisch-mineralisch). 40 Humusäquivalente (kg Humus-C) je t Stallmist (s. Tab. A37)

Standort	Humusbedarf (verrotteter Stallmist FM t/ha/a)			
	experimentell ermittelt*	untere Bilanzwerte	obere Bilanzwerte	Düngungsempfehlung nach den tatsächlichen jährlichen Veränderungen
Puch	10	9,33	13,33	9
Berlin	10	11	15	5,5
Speyer	10	11	17,5	-2,4
Bad Lauchstädt	10	13	19,38	8,6
Thyrow	15	11,75	16,25	20,2
Dikopshof	12	7,40	11,50	-1,9
Wien	10	11	17,50	0
Jable	10	9,32	13,33	11
Rakičan	10	9,32	13,33	-1,4
Mittelwert:	10,78	10,35	15,24	6,1

* s. Tab. 10

Der Einfluss der Wirkung ausschließlicher *Gülledüngung* auf die tatsächliche Corg-Menge (kg/ha) des Bodens kann nur anhand des Standortes Puch betrachtet werden (Abb. 11). Der Corg-Wert der Nullparzelle zu Versuchsende von Puch wird mit dem Corg-Wert der ausschließlich mit 20 t/ha/a Gülle gedüngten Parzelle verglichen. Die Gülleparzelle hat einen um 2,9 t/ha Corg höheren Wert als die Nullparzelle zu verzeichnen. Das sind 0,06 Masse-% Corg, die damit auf die Güllegaben zurückgeführt werden. Die mit 20 t/ha/a Gülle und 80 kg/ha/a Stickstoffmineraldüngung „optimal“ gedüngte Variante liegt mit einer Corg-Menge von 50,9 t/ha bei Versuchsende 2,4 t/ha (=0,05 Masse-% Corg) über der Corg-Menge der Nullparzelle. Dies sind 480 kg/ha weniger, als die Differenz zwischen der Nullparzelle und der

Gülleparzelle. Das entspricht 0,01 Masse-% Corg des Bodens. Der Einfluss der N-Mineraldüngung von 80 kg/ha/a auf die Kohlenstoffmengen des Ap-Horizontes beweist die Differenz zwischen der Nullparzelle und der mit ausschließlich N-Mineraldünger gedüngten Variante zu Versuchsende. Die Differenz beträgt in Puch 960 kg/ha Corg. Das entspricht 0,02 Masse-% Corg.

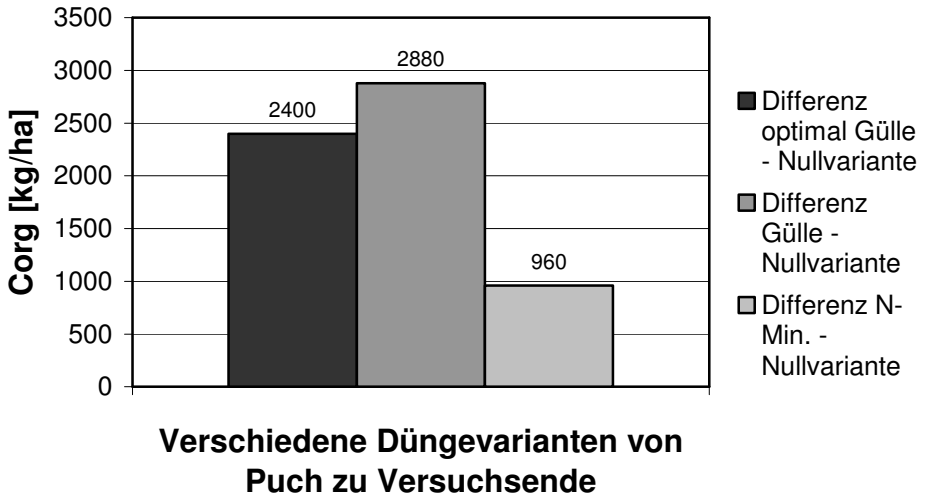

Abb. 11: Vergleich der optimalen Güllevariante (Gülle + N-Min.) mit der Güllevariante (gleiche Düngegabe an Gülle, wie die Optimalvariante) und der N-Mineraldüngungsvariante (gleiche Düngegabe an N-Min. wie die Optimalvariante) hinsichtlich der Differenz der Corg-Werte (kg/ha) zur Nullvariante (= 0 kg/ha Corg) bei Versuchsende des Standortes Puch (s. Tab. A32, A38).

Zur Beurteilung der Bilanzierungsmethode hinsichtlich der Gülledüngung können zwei „optimal“ gedüngte Varianten der Standorte Puch und Wien herangezogen werden (Abb. 12, s. Tab. 10 in Kap. 5.1.4). Diese Variante von Wien zählt nicht zu den Ausreißern. Die durchschnittliche Abweichung der unteren Bilanzwerte zu den tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg beträgt im Mittel der beiden Güllevarianten -411 kg/ha/a Corg. Die oberen Bilanzwerte verschätzen sich um durchschnittlich -621 kg/ha/a Corg, das entspricht einer Differenz von 210 kg/ha/a Corg zu dem Mittel der Abweichung der unteren Werte zu den tatsächlichen jährlichen Veränderungen. Am besten wird der Standort Puch von den beiden Bilanzwerten eingeschätzt. Durch die unteren Werte unterschätzt sich die Bilanz hier um -193 kg/ha/a Corg (0,005 Masse-% Corg), der obere Bilanzwert weist 353 kg/ha/a Corg (0,009 Masse-% Corg) weniger aus als die tatsächlichen Veränderungen ergeben. Die Wiener Variante wird von den unteren Bilanzwerten um -629 kg/ha/a Corg (0,02 Masse-%) unterschätzt, die oberen Werte verschätzen sich um -889 kg/ha/a Corg (0,02 Masse-%) gegenüber den tatsächlichen

Veränderungen. Somit werden beide Standorte durch die Bilanzwerte im Hinblick auf die Gülledüngung unter-, mit den unteren Bilanzwerten aber besser eingeschätzt als mit den oberen Werten.

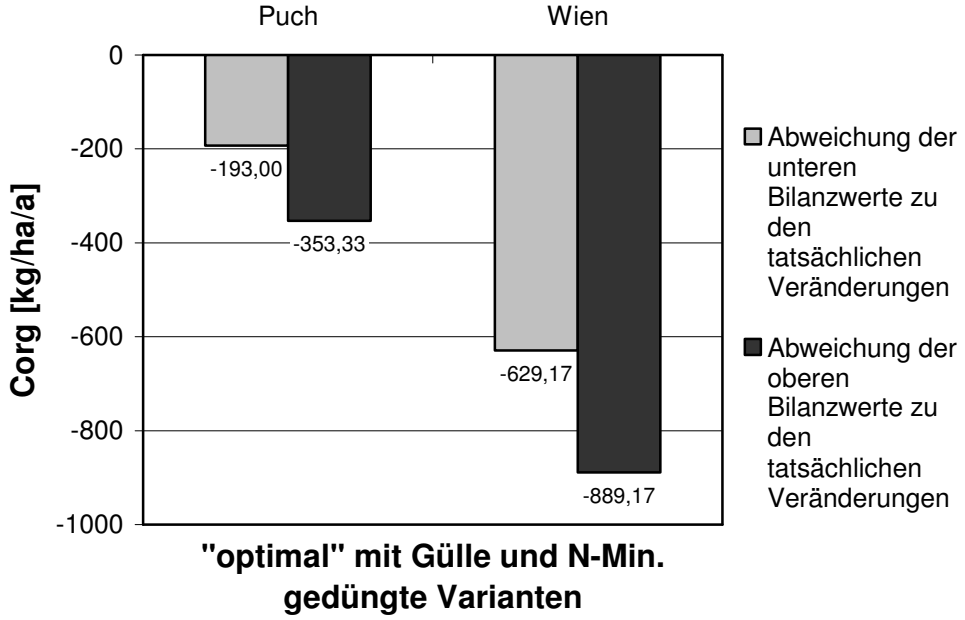

Abb. 12: Vergleich der zwei „optimal“ mit Gülle und Stickstoffmineraldünger gedüngten Varianten zwischen der tatsächlichen jährlichen Veränderung an Corg (= 0 kg/ha/a Corg) und den unteren und oberen Bilanzwerten (s. Tab. A40).

Werden nun diese Corg-Mengen in Gülle (t/ha/a) mit Hilfe des Humusreproduktionsfaktors neun der Humusbilanzierung (KÖRSCHENS et al. 2004, S. 10) umgerechnet, so können diese Werte besser mit den tatsächlichen Düngegaben verglichen werden (Tab. 12). Nach den tatsächlichen jährlichen Veränderungen sollte in Puch die Düngungsmenge von 20 t/ha/a Gülle beibehalten werden. Die unteren und oberen Werte weichen davon aber um das Doppelte bzw. Dreifache ab. Nach der Bilanzierungsmethode müssten Mengen von 40 bis 60 t/ha/a Gülle-FM gedüngt werden, um den Humusspiegel aufrecht zu erhalten. Beim Standort Puch kommt ein Humusreproduktionskoeffizient von 18 den tatsächlichen jährlichen Veränderungen und den experimentell ermittelten Düngegaben am nahsten (s. Tab. A39). Beim Standort Wien, der wegen seiner Ausreißer bereits aufgefallen ist, decken sich die ermittelten Werte in keiner Weise. Der optimale durch experimentelle Langzeitversuche ermittelte Düngebedarf beträgt 16,7 t/ha/a. Nach den tatsächlichen Veränderungen zu urteilen ist dies zu viel, denn die Düngeempfehlungen ergeben einen Wert von -21 t/ha/a. Die unteren Bilanzwerte hingegen empfehlen eine Düngergabe von 48,9 t/ha/a, die oberen von 77,8 t/ha/a.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Ergebnis der beiden Methoden, zum einen die tatsächlichen jährlichen Veränderungen mit den bilanzierten Werten zu vergleichen, zum anderen die Gegenüberstellung des experimentell ermittelten Düngebedarfs durch Langzeitstudien im Feld mit den Bilanzwerten, im Falle der optimalen Gülledüngung von Puch und Wien zeigt, dass die unteren Bilanzwerte den tatsächlichen Bedarf an Gülle besser einschätzen als die oberen Werte. Durch beide Methoden wird deutlich, dass der tatsächliche Humusbedarf durch die Bilanzwerte überschätzt wird, das heißt es würde nach den Bilanzwerten deutlich zu viel gedüngt.

Tab. 12: Experimentell ermittelter, mit den unteren und oberen Werten bilanzierter und anhand der tatsächlichen jährlichen Veränderungen errechneter Humusbedarf (Gülle t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Güllevarianten (organisch-mineralisch). Neun Humusäquivalente (kg Humus-C) je t Gülle (s. Tab. A41)

Standort	Humusbedarf (Gülle t/ha/a)			
	experimentell ermittelt*	untere Bilanzwerte	obere Bilanzwerte	Düngungsempfehlung nach den tatsächlichen jährlichen Veränderungen
Puch	20	41,4	59,3	20
Wien	16,7	48,9	77,8	-21
Mittelwert:	18,3	45,2	68,5	-0,5

* s. Tab. 10

Die Wirkung des organischen Düngers *Stroh* auf die Corg-Menge des Bodens wird anhand zweier Standorte, Puch und Ultuna (Schweden), untersucht. Diese beiden Standorte sind die einzigen Strohdüngungsversuche, die für diese Arbeit vorliegen. Sie sollen äußerst kritisch betrachtet werden, da die Düngung vor Versuchsbeginn nicht der Düngungsweise des Versuches entspricht. Diese Problematik und weitere Gesichtspunkte, die die Einschätzung des Düngebedarfs bezüglich eines optimalen Humusspiegels und der Bilanzierung erschweren, sollen im Folgenden aufgegriffen werden.

Die Beeinflussung des Bodenkohlenstoffhaushaltes durch die ausschließliche Strohdüngung wird deutlich, wenn zu Versuchsende die Corg-Menge (kg/ha) der Variante mit ausschließlich Strohdüngung der jeweiligen Nullparzelle gegenübergestellt wird (Abb. 13). Bei einer jährlichen Düngermenge von 3,5 t/ha Stroh beträgt diese Differenz in Puch 480 kg/ha Corg, d. h. dieser Unterschied ist v. a. auf das Stroh zurückzuführen. In Ultuna liegt die Corg-Menge der Strohparzelle um 16,9 t/ha höher als bei der Nullparzelle, gedüngt wurden dort jährlich 4,4 t/ha Stroh. Wird in Ultuna die Nullparzelle zu

Versuchsende mit der „optimal“ mit Stroh und Stickstoffmineraldünger (4,4 t/ha/a Stroh und 80 kg/ha/a Stickstoffmineraldünger) gedüngten Variante verglichen, so zeigt die Optimalvariante eine um 25,2 t/ha höhere Corg-Menge. Das sind gegenüber der Differenz zwischen der Strohvariante und der Nullparzelle 8,3 t/ha Corg mehr. Dieser Wert wird auch ungefähr durch die Differenz zwischen der Nullparzelle und der Variante mit ausschließlicher Stickstoffmineraldüngung (80 kg/ha/a) zu Versuchsende errechnet. Dort macht die Differenz 9,1 t/ha Corg aus, was auf die Stickstoffmineraldüngung zurückgeführt werden kann. Bezogen auf eine Lagerungsdichte von 1,34 g/cm³ und einer Ap-Tiefe von 20 cm bewirkt die optimale Strohdüngung in Ultuna eine Corg-Anreicherung gegenüber der Nullparzelle um 0,94 Masse-% Corg.
In Puch sind die Verhältnisse anders. Die Optimalvariante mit einer Düngung von 3,5 t/ha/a Stroh und 80 kg/ha/a Stickstoffmineraldünger zeigt gegenüber der Strohvariante bei Versuchsende keine Corg-Veränderung. Die Differenz zur Nullparzelle beträgt bei Versuchsende auch 480 kg/ha/a. Demgegenüber zeigt die mineralische N-Variante (80 kg/ha/a mineralischer-N) eine Anreicherung von 960 kg/ha gegenüber der Nullparzelle, also genau doppelt so viel wie die beiden mit ausschließlich Stroh und optimal Stroh gedüngten Varianten.

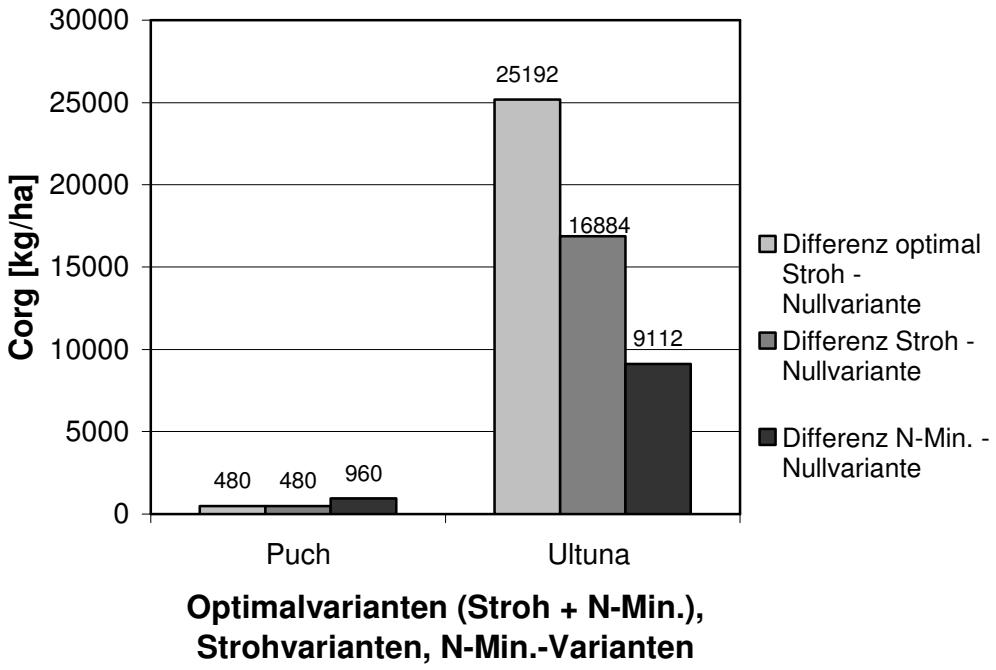

Abb. 13: Vergleich der „optimalen“ Strohvarianten (Puch: 3,5 t/ha/a Stroh + 80 kg/ha/a N-Min., Ultuna 4,4 t/ha/a Stroh + 80 kg/ha/a N-Min.) mit der Strohvariante (gleiche Strohmenge, wie die Optimalvariante) und der Stickstoffmineraldüngungsvariante (gleiche Menge an N-Min. wie die Optimalvariante) der Standorte Puch und Ultuna hinsichtlich der Differenz der Corg-Werte (kg/ha) zur Nullvariante zu Versuchsende (s. Tab. A32, A42, A43)

Hier kommen die Fragen auf, warum die optimale Variante keinen höheren Wert aufweist, als die Stickstoffmineraldüngervariante bzw. auch als die Strohvariante, wie es in Ultuna der Fall ist und weshalb die Differenzen zu dem Endwert der Nullvariante nur so gering sind. Dazu muss der ganze Versuchsaufbau von Puch betrachtet werden. Der Versuchsbeginn war 1983, zu dieser Zeit lag der Ausgangswert der Nullvariante sowie der Stickstoffmineraldüngervariante um 2,9 t/ha Corg höher als der Ausgangswert der Strohparzellen (Abb. 14). Eine Abmagerung des Corg-Gehaltes ist bei allen Varianten bis 1994 eingetreten, doch diese war bei der Nullparzelle mit 440 kg/ha/a und der Stickstoffmineraldüngerparzelle mit 360 kg/ha/a höher als bei den Strohdüngungsvarianten. Die geringste Corg-Abreicherung wurde bei den Strohvarianten, kombiniert mit einer hohen N-Mineraldüngung (120 kg/ha/a und 160 kg/ha/a), gemessen. Sie betrug jeweils 80 kg/ha/a Corg.

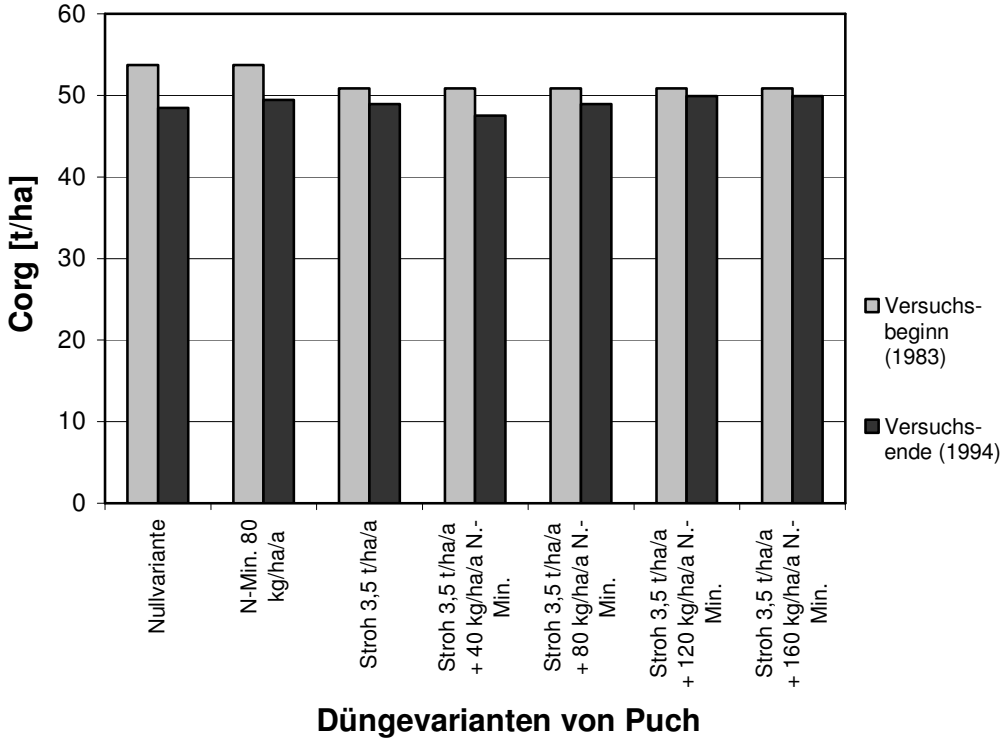

Abb. 14: Unterschied der Corg-Mengen (t/ha) der Nullvariante und der Strohvarianten mit gestaffelten N-Mineraldüngergaben zwischen Versuchsbeginn 1983 und Versuchsende 1994 des Standortes Puch in Bayern (s. Tab. A44).

Zusammengefasst wird also auch beim Standort Puch deutlich, dass die Wirkung einer kombinierten Strohdüngung im Mittel dieser Versuche auf die Corg-Mengen des Bodens größer ist als die alleinige Strohdüngung oder Stickstoffmineraldüngung. Dies kann hier aber nicht durch den Vergleich der Nullparzelle zu Versuchsende mit den gedüngten Parzellen zu Versuchsende

dargestellt werden, sondern nur im Vergleich der Abreicherungsraten von Corg (t/ha) der einzelnen Düngevarianten und den jeweiligen Nullparzellen. Die gleiche Corg-Menge der Strohdüngungsvariante und der Optimalvariante zu Versuchsende kann so auch nicht begründet werden.

Die tatsächlichen jährlichen Veränderungen zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende der optimal mit Stroh und Stickstoffmineraldünger gedüngten Varianten werden nun mit den unteren und oberen Bilanzwerten verglichen (Abb. 15). Beim Standort Puch ist zu erkennen, dass alle drei Werte negative Ergebnisse zeigen. Die tatsächlichen jährlichen Veränderungen betragen -160 kg/ha/a Corg, der untere Bilanzwert schätzt die Verhältnisse auf -23 kg/ha/a Corg ein. Das entspricht einer Differenz von 137 kg/ha/a Corg, das sind 0,002 Masse-% Corg. Werden diese Werte in Strohmengen mit dem Humusreproduktionsfaktor 100 (KÖRSCHENS et al. 2004, S. 10) umgerechnet, so müsste nach den tatsächlichen jährlichen Veränderungen 5,1 t/ha/a Stroh gedüngt werden, nach den unteren Bilanzwerten 3,7 t/ha/a (Tab. 13). Tatsächlich wurden 3,5 t/ha/a gedüngt und als optimal angenommen (experimentell ermittelter Düngebedarf). Die unteren Werte liegen also mit einer Differenz von 0,2 t/ha/a Stroh näher an den experimentell ermittelten Werten, als an den Düngemengen, die durch die tatsächlichen jährlichen Veränderungen ermittelt wurden. Letztere liegen mit einer Düngeempfehlung von 5,1 t/ha/a Stroh näher an den oberen Bilanzwerten von 5,3 t/ha/a Stroh. Der obere Bilanzwert unterschätzt die gemessenen Bodenkohlenstoffwerte um 23 kg/ha/a Corg. Die tatsächlichen Veränderungen der Optimalvariante von Puch müssen aber, wie oben erläutert, hier besonders kritisch betrachtet werden.

In Ultuna ist die tatsächliche jährliche Veränderung positiv, sie beträgt 345 kg/ha/a Corg, das sind 0,01 Masse-% Corg. Um eine ausgeglichene Corg-Bilanz zu erhalten, müsste demnach zu Versuchsende weniger, also theoretisch nur noch 0,9 t/ha/a Stroh, zugeführt werden. Die unteren Bilanzwerte geben mit 104 kg/ha/a Corg ebenfalls einen Humusüberschuss an, liegen aber mit 241 kg/ha/a Corg unter den tatsächlichen Werten. Das entspricht 0,009 Masse-% Corg. Die Düngeempfehlung liegt dadurch bei 3,4 t/ha, also 1 t/ha/a weniger als experimentell ermittelt wurde. Die Einschätzung mit den oberen Bilanzwerten ist gegenüber den Messwerten schlechter, sie ergeben eine negative Bilanz mit -59 kg/ha/a. Sie würden zu einer Düngergabe von 5 t/ha/a Stroh führen, 0,6 t/ha/a Stroh mehr als experimentell ermittelt und 4,1 t/ha/a mehr als die tatsächlichen jährlichen Veränderungen nachweisen. Somit ist nach den tatsächlichen jährlichen Veränderungen die Einschätzung nach den unteren Werten besser geeignet, als es die oberen Werte sind. Nach den experimentell ermittelten Düngemengen ist es hingegen umgekehrt. Auch

in Ultuna müssen die tatsächlichen jährlichen Veränderungen als kritisch angesehen werden, da vor Versuchsbeginn wahrscheinlich weniger gedüngt wurde und eine andere Fruchtfolge angebaut wurde (s. Tab. 9 in Kap. 5.1.3).

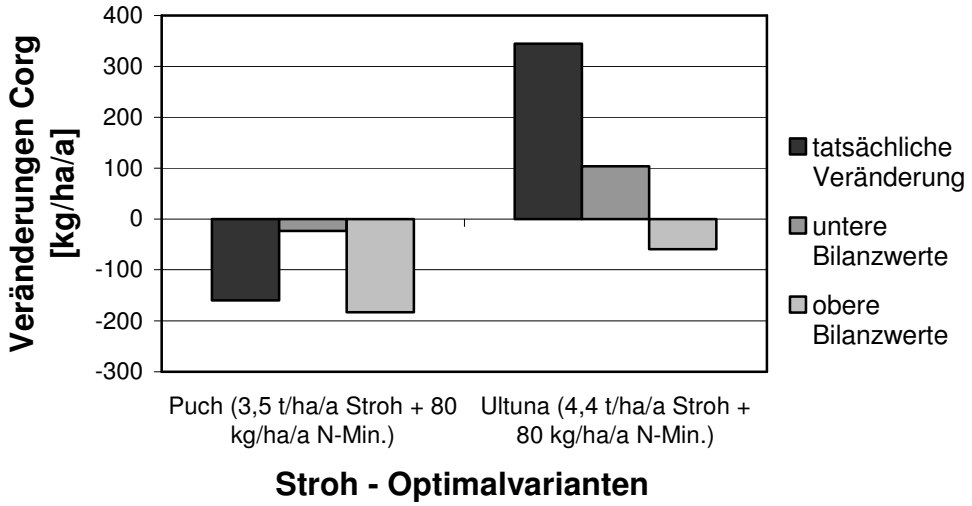

Abb. 15: Vergleich der zwei „optimal“ mit Stroh und Stickstoffmineraldünger gedüngten Varianten hinsichtlich der tatsächlichen jährlichen Veränderung an Corg (kg/ha) und den unteren und oberen Bilanzwerten (s. Tab. A43).

Anhand dieser beiden Standorte Puch und Ultuna kann durch den Vergleich der tatsächlichen jährlichen Veränderungen oder der experimentell ermittelten Düngemengen mit den Bilanzwerten keine Aussage darüber getroffen werden, ob die unteren oder oberen Bilanzwerte die optimale Strohdüngung im Allgemeinen hinsichtlich ihrer Humusreproduktion besser einschätzen. In Ultuna liegen die unteren Werte näher an den tatsächlichen jährlichen Veränderungen, in Puch die oberen Werte. Umgekehrt verhält es sich mit den experimentell ermittelten Gegenüberstellungen.

Im Mittel der beiden Versuche liegen die unteren Bilanzwerte mit einer Differenz von 189 kg/ha/a Corg näher an den tatsächlichen Veränderungen als die oberen Werte mit einer Differenz von 213 kg/ha/a Corg. Die durchschnittliche Abweichung der unteren Werte beträgt -52 kg/ha/a Corg, bei den oberen Werten sind es -213 kg/ha/a Corg (s. Tab. A43). Im Mittel wurden jährlich (experimentell ermittelt) 4 t/ha Stroh gedüngt, die unteren Bilanzwerte ergeben einen mittleren Düngebedarf von 3,6 t/ha/a Stroh, also 0,4 t/ha/a weniger. Die oberen Werte überschätzen die Düngemengen um 1,2 t/ha/a Stroh gegenüber den experimentell ermittelten Empfehlungen. Im Vergleich zu den tatsächlichen jährlichen Veränderungen werden nach den oberen Werten im Mittel der beiden Varianten 2,2 t/ha/a Stroh zu viel gedüngt.

Tab. 13: Experimentell ermittelter, mit den unteren und oberen Werten bilanzierter und anhand der tatsächlichen jährlichen Veränderungen errechneter Humusbedarf (Stroh t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Strohvarianten (organisch-mineralisch) (s. Tab. A45)

Standort	Humusbedarf (Stroh t/ha/a)			
	experimentell ermittelt*	untere Bilanzwerte	obere Bilanzwerte	Düngungs-empfehlung nach den tatsächlichen jährlichen Veränderungen
Puch	3,5	3,7	5,3	5,1
Ultuna	4,4	3,4	5,0	0,9
Mittelwert:	4,0	3,6	5,2	3

* s. Tab. 10

Die *Dynamik der Bodenkohlenstoffgehalte* wird anhand der Strohoptimalvariante und der Nullvariante von Ultuna erläutert (Abb. 16). Im Jahre 1956 wurde der Versuch angelegt. Es gibt keine gleichmäßige Fruchtfolge. Die verschiedensten Fruchtarten wurden angebaut, v. a. zumindest bis 1991 (danach liegen die Angaben nicht vor) Gerste und Hafer (s. Tab. A26). Die Düngegaben sind seitdem gleich. Die Nullparzelle blieb gänzlich ungedüngt, die „optimale“ Strohvariante bekam jährlich eine Düngergabe von 4,41 t/ha/a Stroh und 80 kg/ha/a Calciumnitrat. Der Ausgangswert der Nullparzelle lag 1956 bei 1,48 Masse-% Corg, die Optimalparzelle hatte 1,53 Masse-% Corg im Ap-Horizont (s. Tab. A27). Nach 11 Jahren liegen erst wieder Corg-Werte vor. In der Nullparzelle sind die Corg-Gehalte auf 1,3 Masse-% gesunken, die Werte der optimalen Parzelle sind auf 1,59 Masse-% gestiegen. Die Veränderungen der Nullparzelle sind bis 1987 am stärksten, der Gehalt liegt dann bei 1,04 Masse-% Corg. In den folgenden Jahren schwankt dieser Wert nicht mehr als +/-0,09 Masse-% (s. Tab. A46). Nach KÖRSCHENS & SCHULZ (1999) hat der Standort sein Fließgleichgewicht erreicht. Die Optimalvariante unterliegt zwischen 1956 und 1981 einem Anstieg des Corg-Gehaltes um maximal 0,22 Masse-% Corg auf 1,75 Masse-% Corg. Zwischen 1981 und 1999 sind die Schwankungen größer. Die Werte schwanken um bis zu 0,25 Masse-% Corg und steigen maximal auf 1,98 Masse-% (1991).

Um die tatsächlichen Corg–Veränderungen der Optimalparzelle im *Fließgleichgewicht* darzustellen wird im Folgenden der Zeitraum von 1987 bis 1991 betrachtet. Die tatsächlichen jährlichen Veränderungen liegen in diesem Zeitraum bei einer Zunahme von 1394 kg/ha Corg (Abb. 17). Das sind 1049 kg/ha/a mehr als im Zeitraum von 1956 bis 1991. Die Abweichung zu den Bilanzwerten ist somit noch größer. Die Corg-Veränderungen der

„Optimalvariante“ von Ultuna unterliegen in diesem kurzen Zeitraum größeren mittleren Schwankungen als im Mittel der Zeit von 1956 bis 1991.

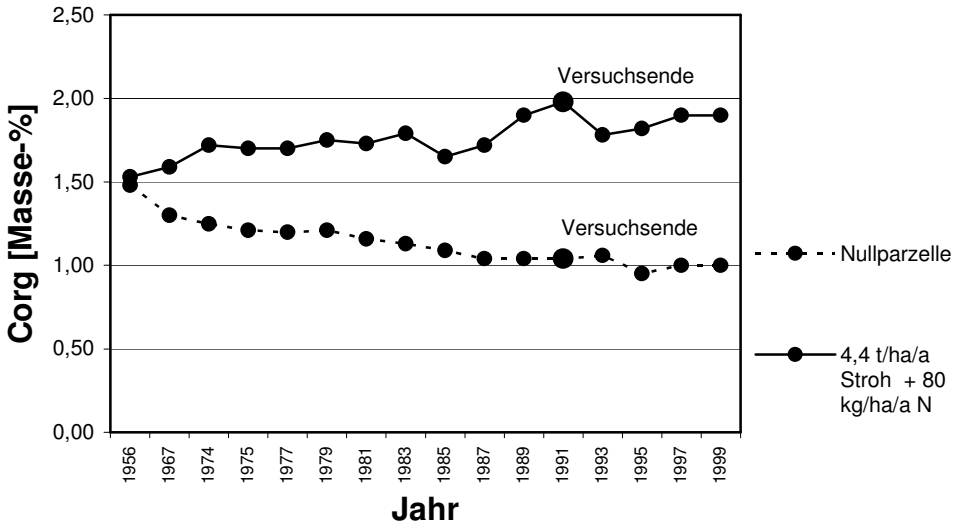

Abb. 16: Entwicklung der organischen Bodenkohlenstoffgehalte (Masse-%) von 1956 (Versuchsbeginn) bis 1999 der Nullparzelle und der „Optimalvariante“ mit einer Düngung von 4,4 t/ha/a Stroh und 80 kg/ha/a Stickstoffmineraldünger in Ultuna (Schweden) (s. Tab. A46).

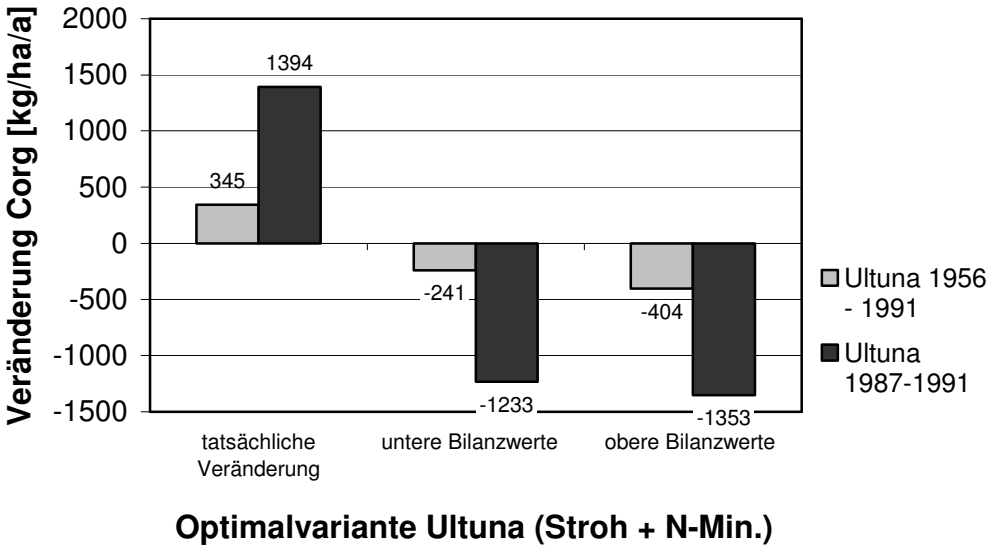

Abb. 17: Gegenüberstellung der jährlichen Corg-Veränderungen (kg/ha/a) und Bilanzergebnisse der unteren und oberen Werte (Corg kg/ha/a) in den Zeiträumen 1956 - 1991 und 1987 - 1991 der Optimalvariante (4,41 t/ha/a Stroh + 80 kg/ha/a N) von Ultuna (s. Tab. A47).

Zusammenfassend werden hier die *Ergebnisse aller „optimalen“ Düngungsvarianten* aufgeführt (Abb. 18). Die Düngeempfehlungen nach den unteren Bilanzwerten, nach den oberen Bilanzwerten und nach den tatsächlichen

jährlichen Veränderungen werden miteinander und mit den experimentell ermittelten Düngemengen verglichen.

Anhand Abb. 18 ist gut ersichtlich, dass Differenzen zwischen der Düngeempfehlung – bei Beachtung der unterschiedlich hohen Düngegaben - durch die unteren und oberen Bilanzwerte und der experimentell ermittelten Düngegabe bei den beiden Güllevarianten am größten ist. Auch die tatsächlichen jährlichen Veränderungen der Corg-Werte ergeben bei einer der Güllevarianten die größte Differenz zu den Bilanzwerten, aber auch zu den experimentell ermittelten Düngeempfehlungen.

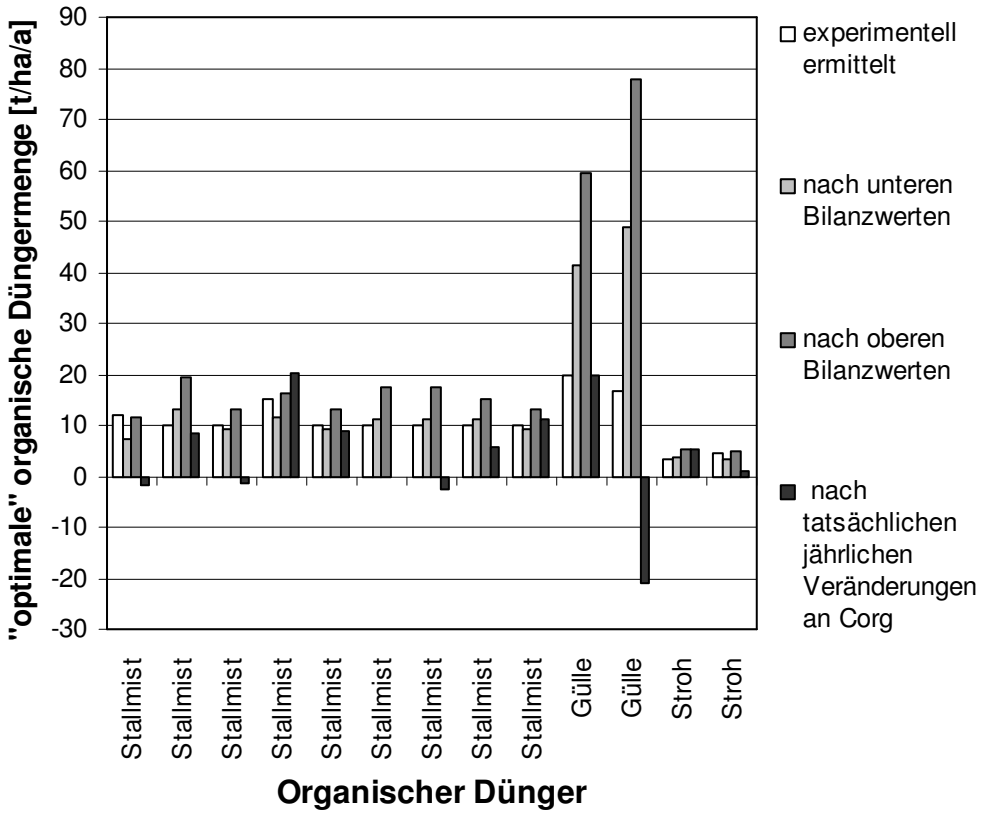

Abb. 18: Vergleich der „optimal“ mit Stallmist, Gülle und Stroh (jeweils mit Stickstoffmineraldünger) gedüngten Varianten mit der Düngungsempfehlung der unteren Bilanzwerte, der oberen Bilanzwerte und durch die tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg (t/ha/a) (s. Tab. A37, A41, A45).

5.2.3 Fruchtarten

Auf die einzelnen Kulturarten-Koeffizienten kann im Rahmen dieser Arbeit nicht ausführlich eingegangen werden. Es sind dazu nicht genug vergleichbare

Varianten vorhanden. Nur der Standort Puch lässt einen Vergleich der Auswirkungen zweier unterschiedlicher Fruchtfolgen auf den Corg-Gehalt des Bodens zu. Hierbei können nur die jeweiligen Nullparzellen und die mit unterschiedlichen Mengen an Stickstoffmineraldünger gedüngten Parzellen betrachtet werden. Die Fruchtfolge Silomais, Winterweizen, Wintergerste wird der Fruchtfolge Zuckerrüben, Winterweizen, Wintergerste in Abb. 19 bezüglich der Corg-Veränderungen zwischen Versuchsbeginn und –ende gegenübergestellt.

Die Fruchtfolgen unterscheiden sich nur durch den Anbau von Silomais oder Zuckerrübe. Die Corg-Veränderungen unterscheiden sich bei den Nullparzellen um 0,04 Masse-% Corg und bei der mit 80 kg/ha/a Stickstoffmineraldünger gedüngten Variante um 0,01 Masse-% Corg. Bei den anderen drei Düngungsvarianten sind die Corg-Abnahmen der beiden Fruchtfolgen genau gleich. Signifikante Unterschiede können anhand dieses Versuches auf die Auswirkungen der Corg-Veränderungen zwischen Silomais und Zuckerrübe nicht festgestellt werden. Aussagen bezüglich der Bilanzergebnisse sind schon in Kapitel 5.2.2 beschrieben worden.

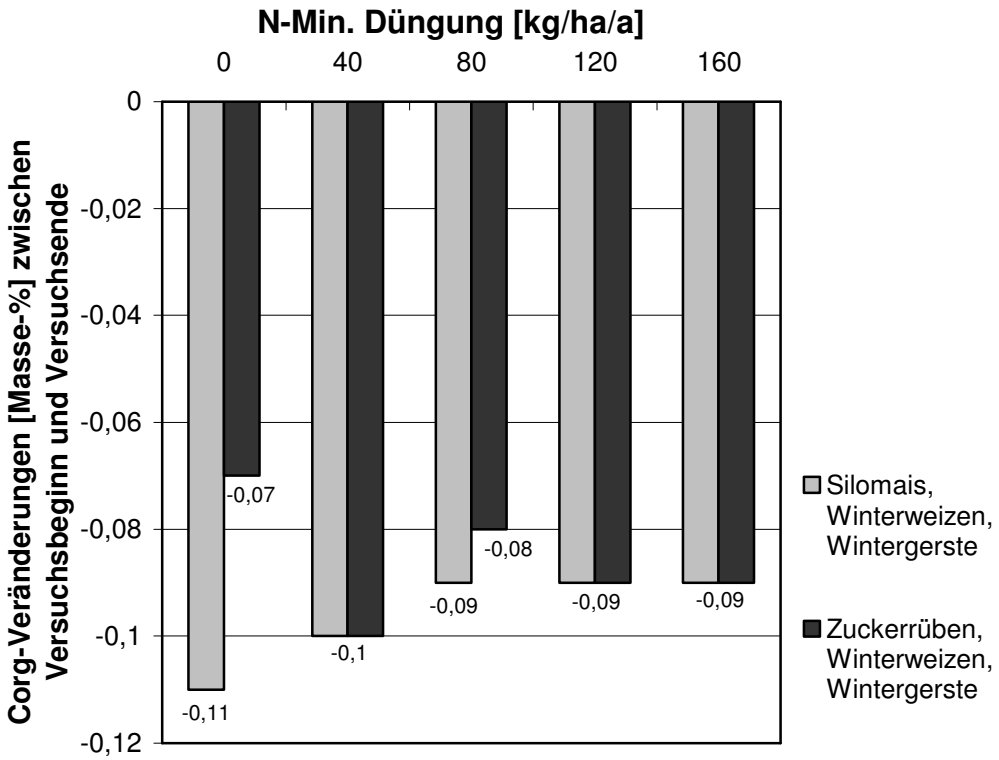

Abb. 19: Vergleich der Corg-Veränderungen (Masse-%) zwischen Versuchsbeginn (= 0 Masse-%) und -ende zweier unterschiedlicher Fruchtfolgen unter jeweils gleichen Düngergaben (Nullparzelle, gestaffelte N-Min.-Düngung 40 bis160 kg/ha/a) des Standortes Puch (s. Tab. A2, A3).

5.3 Klimaparameter

5.3.1 Einfluss des Niederschlages

Der Einfluss des Jahresdurchschnittsniederschlags auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der Böden wird zuerst anhand der *Nullparzellen* aller Dauerversuche zu Versuchsende betrachtet. Unter Einbeziehung aller Standorte, auch der Ausreißer von Wien und Keszthely (s. Kap. 5.1.1), kommt bei einer linearen Regression zwischen dem Niederschlag und dem Corg-Gehalt ein Bestimmtheitsmaß von 0,017 heraus (r = 0,130), das heißt es werden 1,7 % der Abweichung durch den Niederschlag erklärt (Abb. 20). Anhand der Abb. 20 wird auch deutlich, dass die Nullparzelle von Wien, die zu den Ausreißern zählt, bei relativ geringem Niederschlag von 489 mm/a den höchsten Corg-Wert von 1,63 Masse-% zu verzeichnen hat. Bei dem Bodentyp handelt es sich dort um einen Tschernosem (s. Tab. A18). Keszthely hingegen liegt bei einem Niederschlag von 700 mm und einem Corg-Wert von 1,1 Masse-% relativ nahe an der Regressionsgeraden, hat aber bei den Standorten zwischen 600 und 900 mm Niederschlag den höchsten Corg-Gehalt.

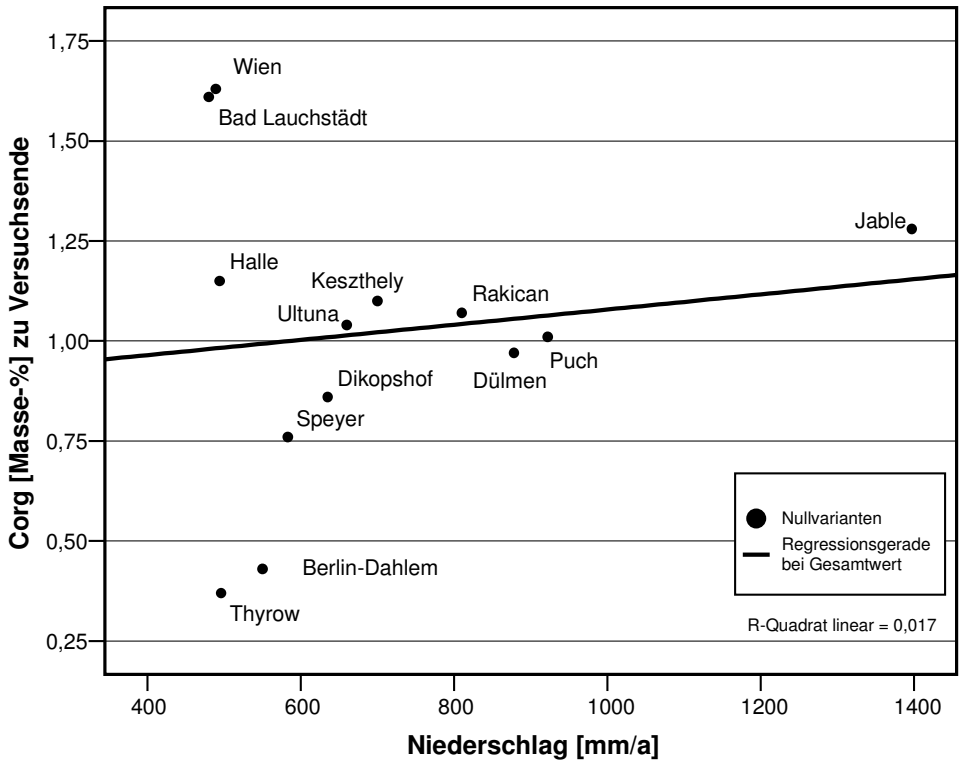

Abb. 20: Einfluss des Niederschlages (mm/a) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der Nullvarianten zu Versuchsende aller 13 Standorte (einfache lineare Regression) (s. Tab. A48).

Nimmt man die Ausreißer Wien und Keszthely aus der Bewertung heraus, so erlangt das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression einen Wert von 0,091

(r = 0,301, Abb. 21), demnach werden 9,1 % der Abweichung durch den Niederschlag erklärt. Anhand der Abb. 21 wird deutlich, dass unter den elf Standorten Bad Lauchstädt einen relativ hohen Corg-Gehalt von 1,61 Masse-% bei eher geringem Jahresdurchschnittsniederschlag von 480 mm aufweist. Der dortige Bodentyp ist ein Haplic Chernozem (s. Tab. A12). Auf der anderen Seite fallen die Nullparzellenwerte der Standorte Berlin-Dahlem und Thyrow auf. Sie haben bei einem Niederschlag von 550 mm bzw. 496 mm geringe Corg-Gehalte von 0,43 Masse-% und 0,37 Masse-%. Bei der Bodenart handelt es sich bei beiden Standorten um Su2 (s. Tab. A6 + A14). Mit zunehmendem Niederschlag wird die Korrelation zwischen dem Corg-Gehalt (Masse-%) und dem Niederschlag (mm/a) größer. Die Versuche liegen näher an der Regressionsgeraden. Lässt man auch die Standorte Bad Lauchstädt, Thyrow und Berlin-Dahlem außer Acht, so beträgt das Bestimmtheitsmaß bei einer linearen Regression zwischen dem Corg-Wert (Masse-%) zu Versuchsende der Nullparzellen und dem durchschnittlichen Jahresniederschlag 0,352 (r = 0,593).

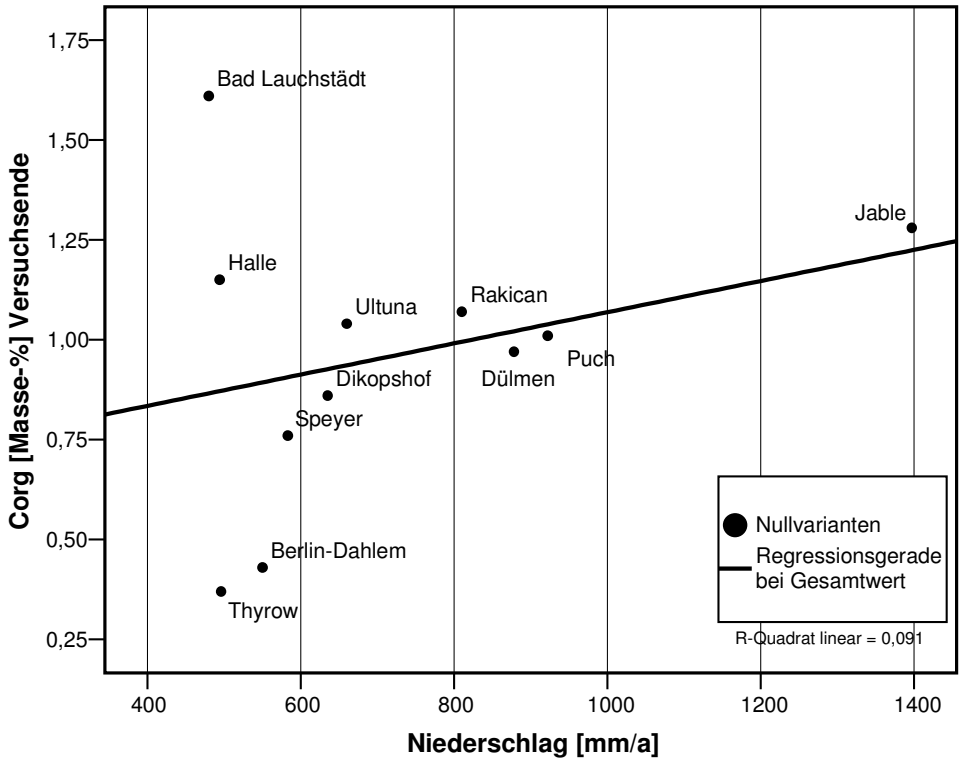

Abb. 21: Einfluss des Niederschlages (mm/a) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der Nullvarianten bei Versuchsende von elf Standorten ohne die Ausreißer von Wien und Keszthely (einfache lineare Regression) (s. Tab. A48).

Um eine Scheinkorrelation zwischen dem Niederschlag (mm/a) und dem Corg-Gehalt (Masse-%) aufzudecken, wird eine partielle Korrelation berechnet. Als

Kontrollvariable dient der Tongehalt (Masse-%). Hierbei liegt der Korrelationskoeffizient bei 0,258, also noch niedriger als bei der ausschließlichen Korrelation zwischen Niederschlag (mm/a) und Corg (Masse-%). Somit hat der Tongehalt des Bodens einen signifikanten Einfluss auf diese Korrelation.

Die elf Nullvarianten werden bei gleichzeitiger Betrachtung des Niederschlages (mm) und Corg-Gehaltes (Masse-%) in zwei verschiedene Bodenartengruppen aufgeteilt (Abb. 22), zum einen in die Gruppe der *Sandböden* (n = 6) und in die Gruppe der *Lehm- und Schluffböden* (n = 5). Hierbei fällt auf, das bis zu einem Niederschlag von ca. 690 mm/a die Lehm- und Schluffstandorte einen höheren Corg-Gehalt als die Sandstandorte verzeichnen. Dieser Wert wird durch die Anpassungslinie nach Epanechnikow (iterativ gewichtete kleinste Quadrate mit einer Anpassung von 99 %) deutlich gemacht (Abb. 23). Der Corg-Gehalt der U- und L-Böden nimmt bei einem Niederschlag von 480 mm bis ca. 690 mm ab und dann erst wieder zu. Bei den Sandböden ist mit zunehmendem Niederschlag auch eine stetige Zunahme des Corg-Gehaltes (Masse-%) verbunden. Jable wird zwecks besserer graphischer Darstellung auch in diese Gruppe miteinbezogen.

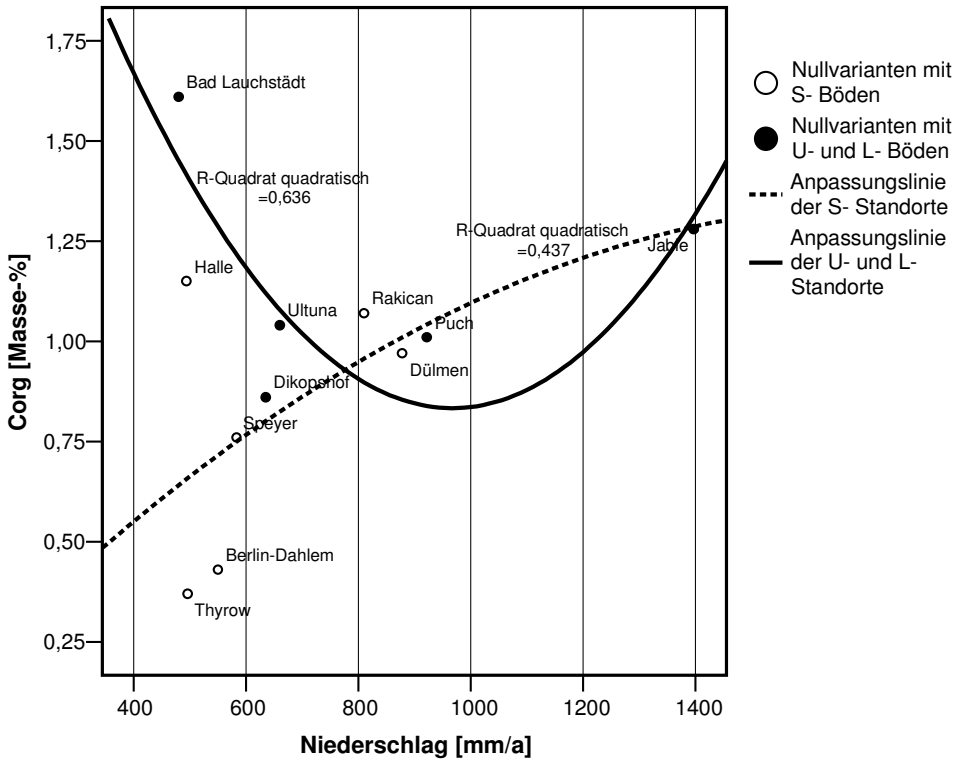

Abb. 22: Darstellung des Corg-Gehaltes (Masse-%) unter Einfluss des Niederschlages zu Versuchsende von elf Nullparzellen ohne Ausreißer. Gruppierung der Standorte in zwei Bodenartengruppen (S- und U/L-Böden) und Darstellung durch je eine Anpassungslinie (Regressionslinie mit quadratischer Steigung) (s. Tab. A48).

Außer den Nullparzellen werden noch die Corg-Gehalte (Masse-%) der *„optimal“ gedüngten Varianten* zu Versuchsende betrachtet (ohne Ausreißer). Der Einfluss des Niederschlags (mm/a) wird ebenfalls anhand einer linearen Regressionsanalyse errechnet (Abb. 24). Bei den zehn mit Stallmist oder Stroh „optimal“ gedüngten Varianten besteht nach dieser Analyse kein signifikanter Zusammenhang zwischen beiden Variablen. Das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,0004 (r = 0,020). Zum besseren Vergleich mit Tab. 10 (s. Kap. 5.1.4) sind in dieser Abbildung die Varianten einmalig für dieses Kapitel mit ihren Variantennamen gekennzeichnet.

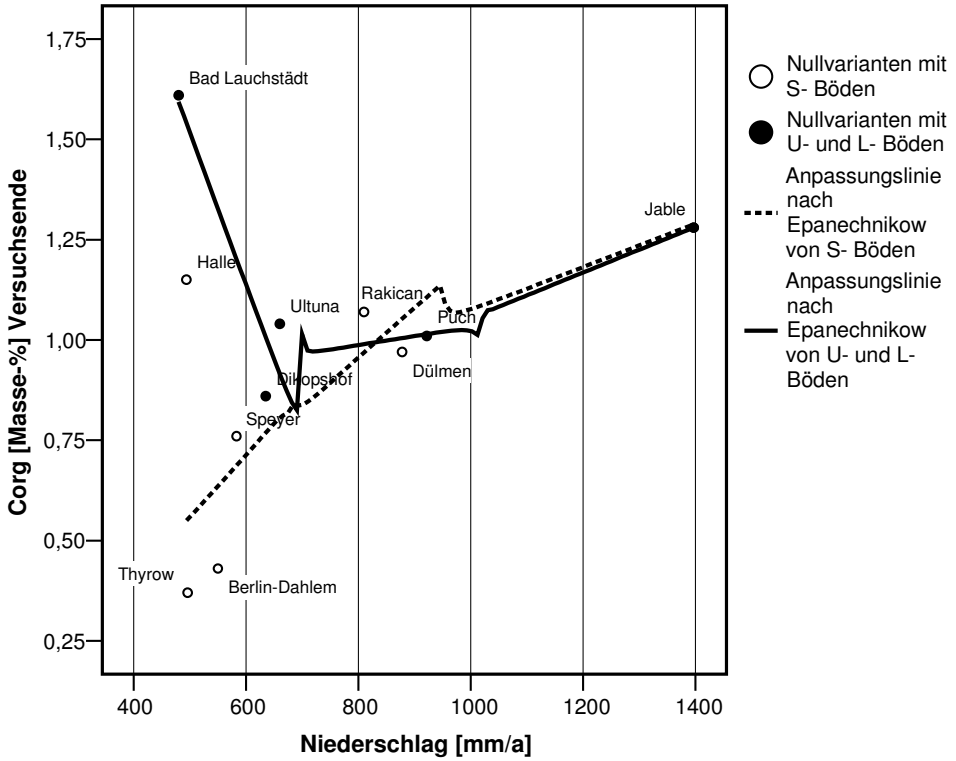

Abb. 23: Darstellung des Corg-Gehaltes (Masse-%) unter Einfluss des Niederschlages zu Versuchsende von elf Nullparzellen ohne Ausreißer. Gruppierung der Standorte in zwei Bodenartengruppen (S- und U/L-Böden) und Darstellung durch je eine Anpassungslinie (iterativ gewichtete kleinste Quadrate nach Epanechnikow – Loess) (s. Tab. A48).

Werden die zehn Optimalvarianten bezüglich ihrer Bodenart wieder in zwei Gruppen eingeteilt (*S- und U-/L-Böden*), so zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den untersuchten Nullparzellen (s. Abb. 25). Jedoch haben die beiden Gruppen erst bei einem höheren jährlichen Niederschlag von ca. 860 mm gleich hohe Corg-Gehalte (Masse-%), was die Anpassungslinie (Regressionslinie mit quadratischer Steigung) zeigt. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass die Corg-Werte der Sandstandorte auch weiterhin mit dem Niederschlag ansteigen, so wie es die Nullparzellen oben zeigen.

Zusammengefasst haben die Untersuchungen ergeben, dass der Niederschlag den absoluten Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens beeinflusst, dies aber bei den untersuchten Standorten erst ab ca. 690 mm/a Niederschlag. Der Corg-Gehalt der Böden steigt ab dieser Niederschlagshöhe mit Zunahme des Niederschlages an. Darunter ist der Einfluss anderer Variablen, wie des Tongehaltes (Masse-%) der Böden, stärker.

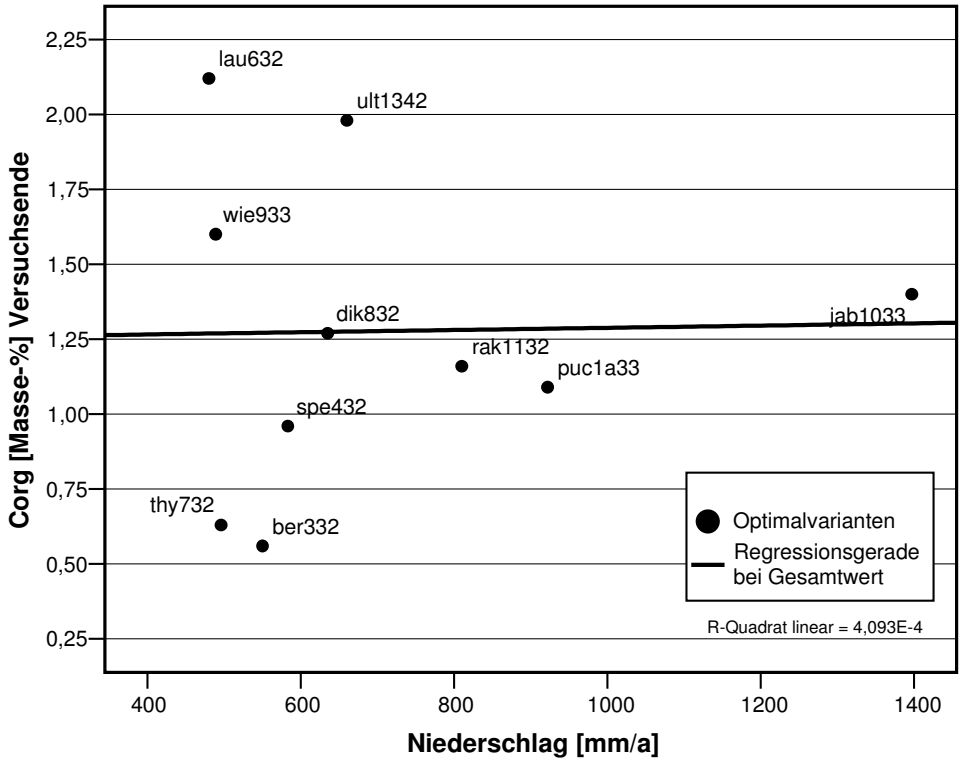

Abb. 24: Einfluss des Niederschlages (mm/a) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der zehn „optimal“ gedüngten Varianten bei Versuchsende ohne Ausreißer (einfache lineare Regression) (s. Tab. A49).

Die drei Standorte dieser Arbeit, die den Jahresdurchschnittsniederschlag von 690 mm überschreiten sind Puch, Jable und Rakičan. Betrachtet man die Ergebnisse der „optimal“ gedüngten Varianten dieser Standorte bezüglich der Überprüfung der *Humusbilanzierung*, zum einen durch die experimentell ermittelten Ergebnisse, zum anderen durch den Vergleich der Bilanzwerte mit den tatsächlichen jährlichen Veränderungen, so kommt die Bilanz bei den Stallmistvarianten von Puch und Jable zu annähernd richtigen Ergebnissen (Abb. 26, s. Tab. 11 in Kap. 5.2.2). Nur die Güllevariante von Puch wird hinsichtlich ihrer Humusversorgung stark unterschätzt. Die Stallmist- und Strohvariante zeigen aber gute Ergebnisse. Die Stallmistvariante von Rakičan gibt nach den unteren Bilanzwerten eine leicht geringere Düngeempfehlung von 9,3 t/ha/a Stallmist FM im Vergleich zu den experimentell ermittelten

Mengen von 10 t/ha/a Stallmist FM an. Nach den tatsächlichen jährlichen Veränderungen sollte aber aktuell gar nicht gedüngt werden.

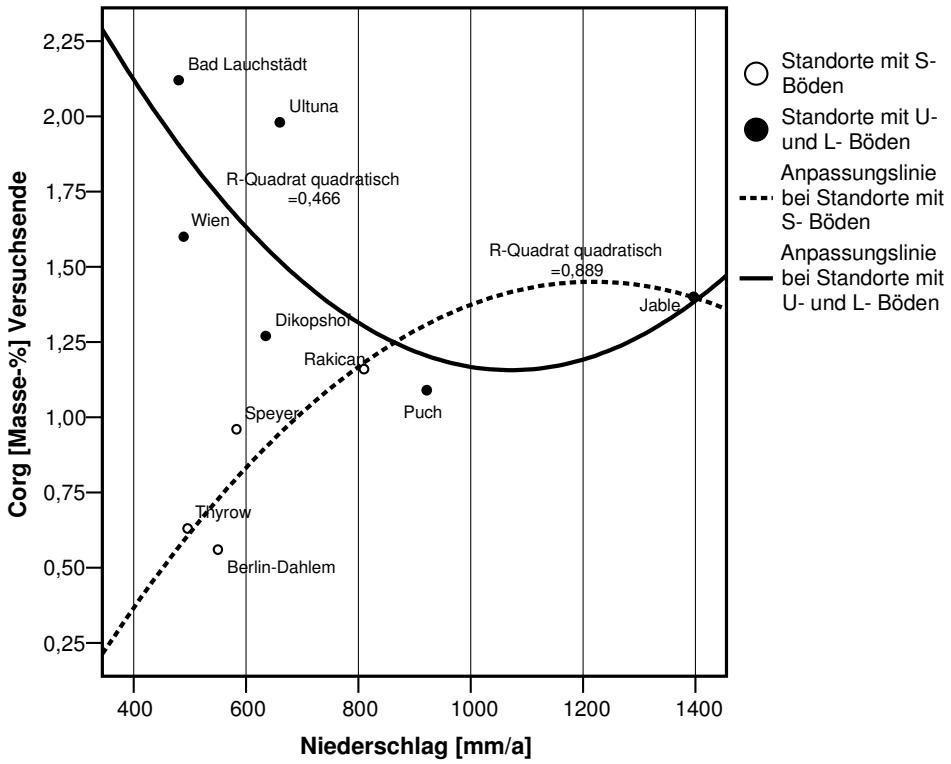

Abb. 25: Darstellung des Corg-Gehaltes (Masse-%) unter Einfluss des Niederschlages zu Versuchsende von zehn „optimal“ gedüngten Varianten ohne Ausreißer. Gruppierung der Standorte in zwei Bodenartengruppen (S- und U/L-Böden) und Darstellung deren Trends durch eine Anpassungslinie (Regressionslinie mit quadratischer Steigung) (s. Tab. A49).

Bei einer bivariaten Korrelation der Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen und den unteren Bilanzwerten mit dem Jahresdurchschnittsniederschlag (mm) werden 7,9 % der Abweichung durch den Niederschlag erklärt (r = 0,281; obere Bilanzwerte: r = 0,339). Wie in Abb. 26 ersichtlich, fällt der Standort Thyrow als Ausreißer auf. Ohne diese Variante beträgt r = 0,674 bei den unteren Werten und ist damit auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant. Lässt man auch die Standorte mit mehr als 810 mm Niederschlag außer Acht, wird wieder deutlich, dass die restlichen sieben Standorte bei einer Zunahme bis zu 810 mm Niederschlag im Jahr eine zunehmende Abweichung der unteren Bilanzwerte von den gemessenen jährlichen Veränderungen aufweisen. Die gemessenen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes nehmen bei diesen Varianten bis ca. 750 mm Niederschlag zu und dann mit zunehmendem Niederschlag wieder ab. Anhand der Anpassungslinie mit quadratischer Steigung wird dieser scheinbar nicht

lineare Verlauf bezüglich der Differenz zu den unteren Bilanzwerten deutlich. Ab mehr als 810 mm Niederschlag wird die Bilanzrechnung mit den unteren Werten wieder genauer. Die Berechnung mit den oberen Werten weisen ähnliche Ergebnisse auf.

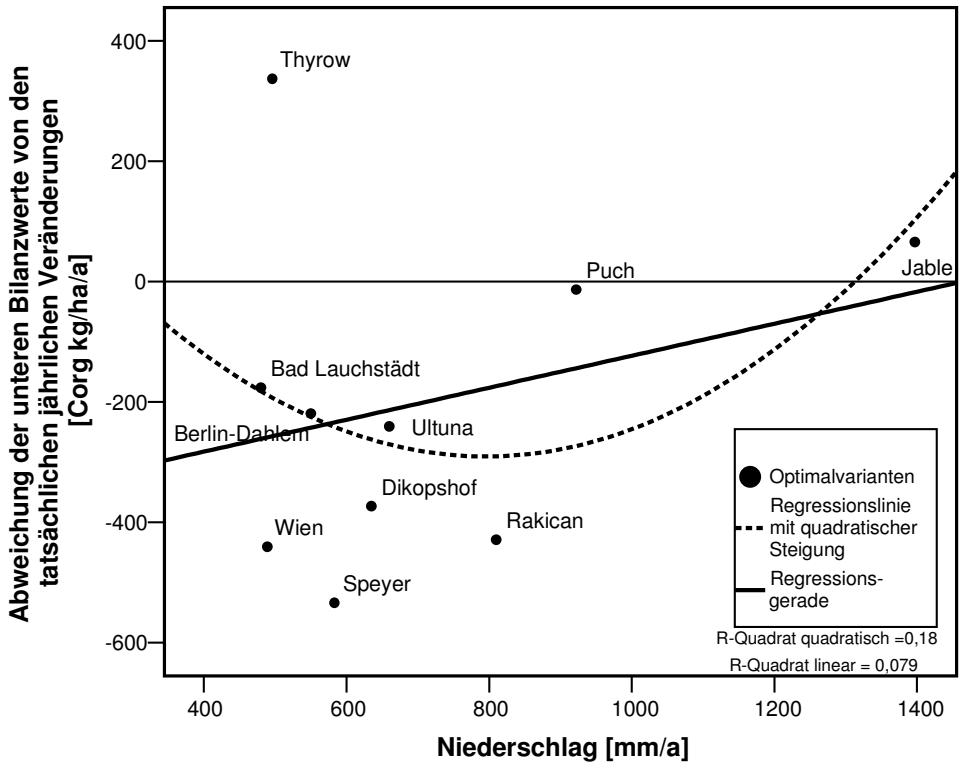

Abb. 26: Einfluss des Jahresdurchschnittsniederschlages (mm) auf die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen der Corg-Mengen (= 0 kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der zehn „optimal“ gedüngten Varianten (Regressionslinie mit quadratischer Steigung) (s. Tab. A49).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Niederschlag die tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes tendenziell, aber nicht signifikant beeinflusst. Ab einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge von ca. 750 mm/a werden die Bilanzierungsergebnisse mit den unteren Bilanzwerten zunehmend genauer. Bei Standorten mit einer Niederschlagshöhe von 480 mm bis 750 mm werden die Berechnungen mit den unteren Bilanzwerten zunehmend ungenauer. Hier überlagert der Einfluss weiterer Faktoren den Niederschlagseinfluss.

5.3.2 Einfluss der Temperatur

Der Einfluss der Jahresdurchschnittstemperatur (°C)auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der Böden von elf *Nullvarianten* wird durch eine bivariate Korrelation berechnet. Durch den Korrelationskoeffizienten von –0,071 kann hierbei kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Bei der linearen Regression beträgt das Bestimmtheitsmaß 0,005 (Abb. 27). Zehn der elf Standorte liegen in einem Temperaturbereich von 7,9 bis 9,8 °C. Ihre Corg-Gehalte schwanken zwischen 0,37 Masse-% Corg und 1,61 Masse-% Corg. Nur ein Standort, Ultuna, fällt mit 5,5 °C aus diesem Bereich heraus. Er hat einen Corg-Gehalt von 1,04 Masse-% zu Versuchsende der Nullparzelle. Das entspricht fast dem mittleren Corg-Gehalt der zehn anderen Nullparzellen von 0,95 Masse-% Corg. Nimmt man Ultuna aus der Betrachtung heraus, so wird der Zusammenhang noch geringer, der Korrelationskoeffizient beträgt -0,009.

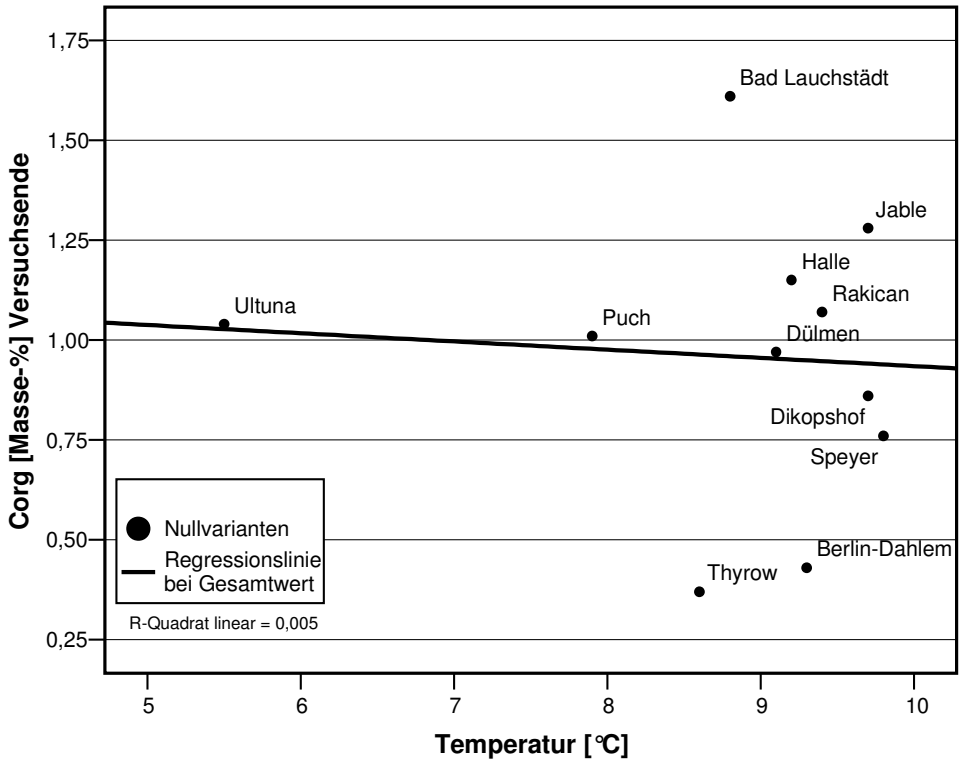

Abb. 27: Einfluss der Temperatur (°C) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der Böden der elf Nullvarianten zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression) (s. Tab. A48).

Die Betrachtung der zehn *optimal gedüngten Varianten* zu Versuchsende ergibt hinsichtlich des Einflusses der Temperatur (°C) auf die Corg-Gehalte (Masse-%) der Böden einen geringen Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,16 (r = -0,4). Dies ist eine Scheinkorrelation. Hier nimmt wieder der

Standort Ultuna eine entscheidende Position ein. Durch seine niedrige Temperatur und seinen relativ hohen Corg-Gehalt ist er im Gegensatz zu den anderen Standorten ein Ausreißer. Durch ihn korreliert die Temperatur signifikant negativ mit dem Tongehalt (r = -0,636), dies wiederum beeinflusst die Korrelation zwischen dem Corg-Gehalt und der Temperatur. Nimmt man Ultuna aus der Berechnung heraus ist die Korrelation zwischen dem Tongehalt (Masse-%) und der Temperatur (°C) mit r = 0,037 nicht mehr signifikant und der Einfluss der Temperatur auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens zu Versuchsende ist mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,004 ebenfalls nicht mehr signifikant nachzuweisen (Abb. 28).

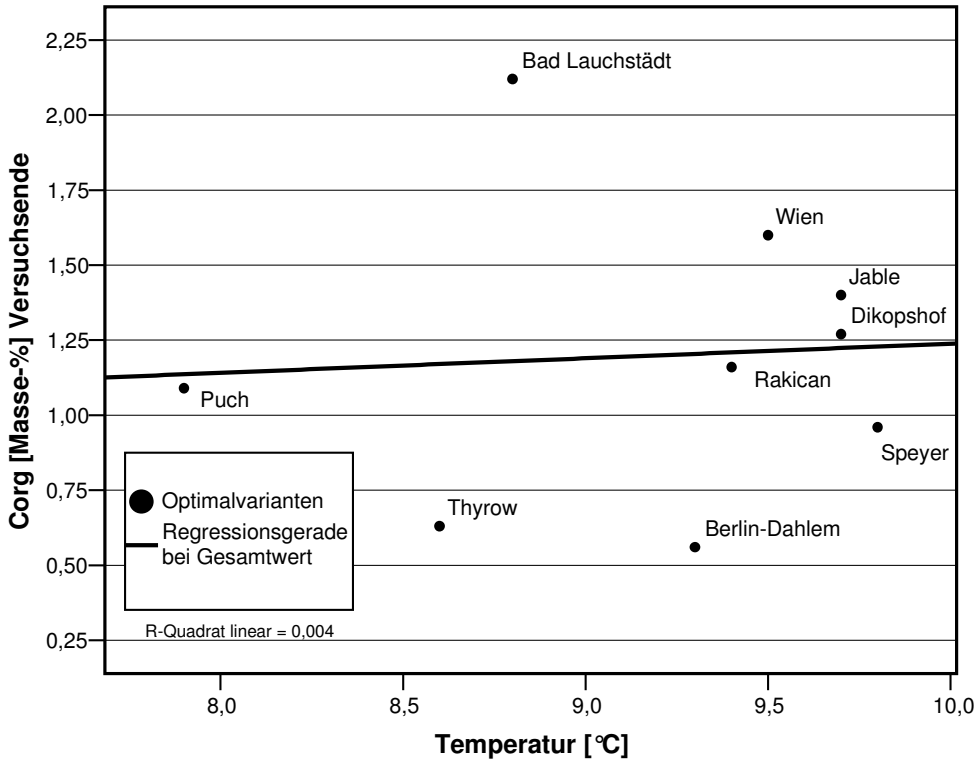

Abb. 28: Einfluss der Temperatur (°C) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) der Böden der neun „Optimalvarianten“ (ohne Ultuna) bei Versuchsende der einzelnen Standorte (einfache lineare Regression) (s. Tab. A49).

Der überlagernde Einfluss der Bodenart bzw. des Tongehaltes auf den Corg-Gehalt wird anhand der Abb. 29 noch einmal deutlich, soll aber im nächsten Kapitel näher erläutert werden. Die Varianten mit vorwiegend schluffigen und lehmigen Böden liegen im oberen Corg-Gehalts Bereich, die Standorte mit den sandigen Böden liegen im niedrigen Bereich.

Im Folgenden wird der Einfluss der Temperatur auf die *Bilanzergebnisse* betrachtet. Dazu wird die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha/a) zu den Bilanzergebnissen der unteren und oberen Werte (Corg kg/ha/a) mit der Jahresdurchschnittstemperatur (°C)

korreliert (Abb. 30). Hierzu werden ausschließlich die Ergebnisse der zehn „Optimalvarianten“ herangezogen (s. Tab. 10 in Kap. 5.1.4). Die bivariate Korrelation zeigt einen leichten negativen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen bezüglich der unteren Bilanzwerte und der Temperatur (r = -0,223; obere Bilanzwerte: r = -0,252). Nimmt man den Standort Ultuna heraus, so wird die Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,589 (obere Werte: -0,574) größer. Dies bedeutet, dass die Bilanzergebnisse mit zunehmender Temperatur die tatsächlichen Bilanzwerte pro Jahr zunehmend unterschätzen. Die tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg nehmen mit Zunahme der Temperatur zu. Der diesbezügliche Korrelationskoeffizient ist aber mit 0,14 nicht signifikant. Ohne Ultuna beträgt er allerdings schon 0,389. Bei einer partiellen Korrelation zwischen der Differenz der tatsächlichen jährlichen Veränderungen und den unteren Bilanzwerten mit der Temperatur und der Kontrollvariable Ton bei Betrachtung aller zehn Standorte incl. Ultuna, beträgt r = -0,51 (obere Werte: r = -0,552), d. h. die Korrelation wird enger und 26 % der Abweichung können durch die Temperatur erklärt werden.

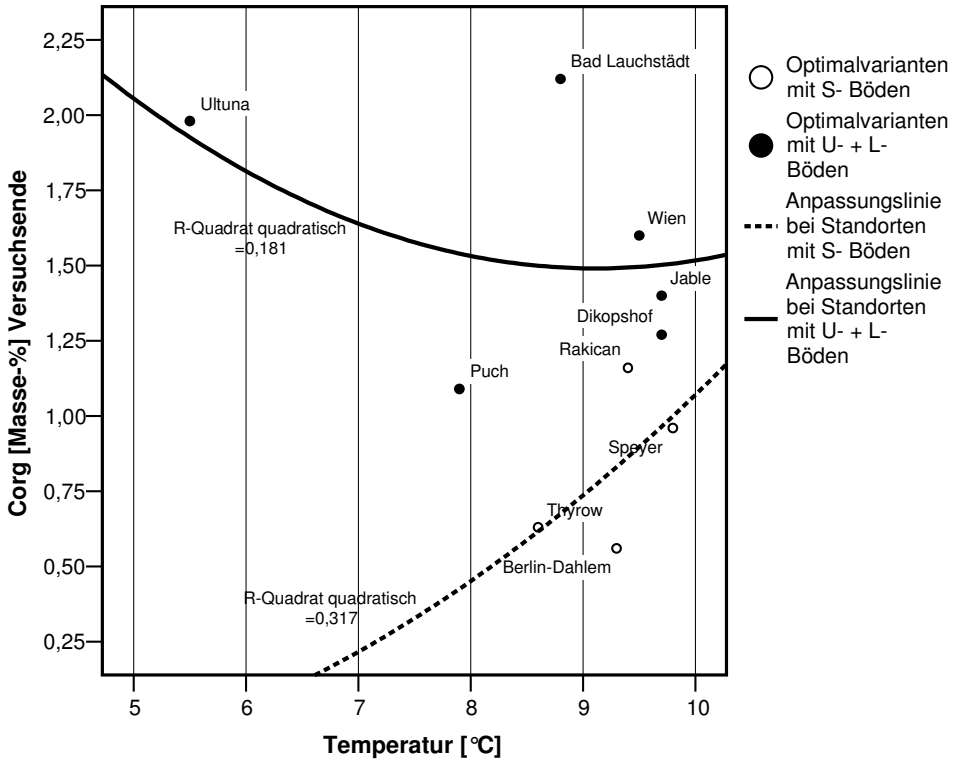

Abb. 29: Darstellung des Corg-Gehaltes (Masse-%) unter Einfluss der Temperatur zu Versuchsende von zehn „optimal“ gedüngten Varianten. Gruppierung der Standorte in zwei Bodenartengruppen (S- und U/L-Böden) und Darstellung durch je eine Anpassungslinie (Regressionslinie mit quadratischer Steigung) (s. Tab. A49).

Zusammengefasst lässt sich zum Einfluss der Temperatur auf die Bilanzergebnisse sagen, dass die Bilanzwerte die gemessenen Corg-Gehalte mit zunehmender Temperatur unterschätzen. Ein Zusammenhang zwischen den absoluten Temperaturwerten und dem Corg-Gehalt der Böden konnte nicht festgestellt werden, hingegen aber eine Zunahme der tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes mit Erhöhung der Temperatur.

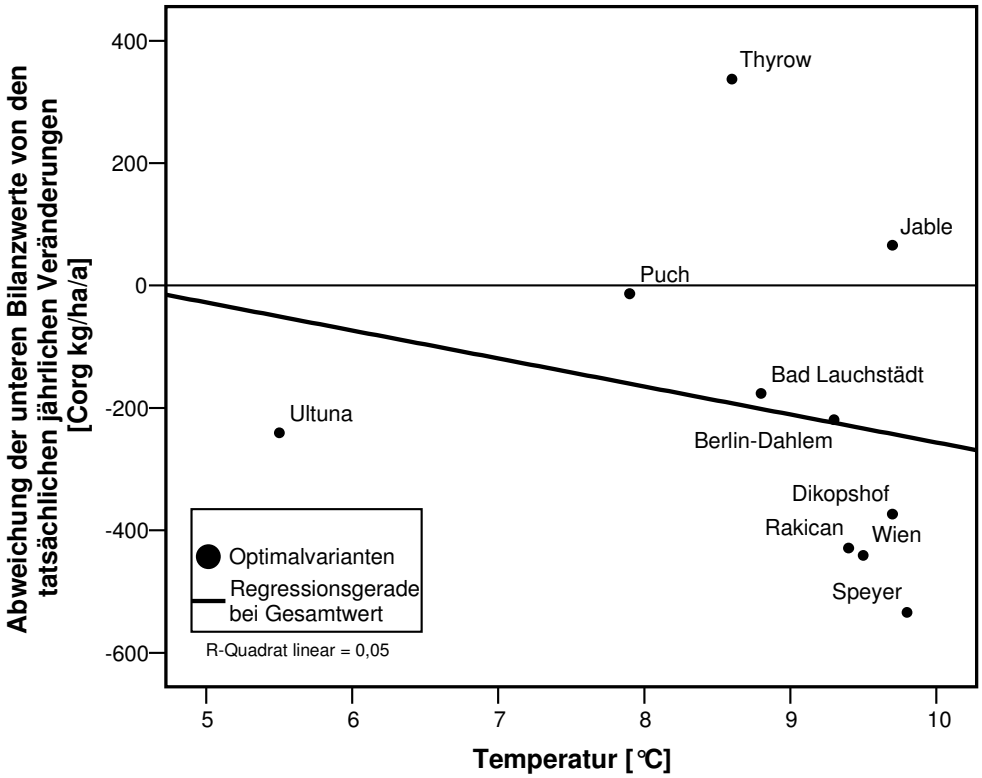

Abb. 30: Einfluss der Jahresdurchschnittstemperatur (°C) auf die Differenz zwischen den gemessenen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes (= 0 kg/ha/a) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der zehn „optimal“ gedüngten Varianten (s. Tab. A49).

5.4 Einfluss der Bodenarten

Der Einfluss der unterschiedlichen Bodenarten Ton, Schluff und Sand sowie des Feinanteils (FAT = T + fU) auf den organischen Kohlenstoffgehalt der Böden wird im Folgenden untersucht.

Wie im Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 aufgefallen ist, haben die *Tongehalte* (Masse-%) des Bodens einen entscheidenden Einfluss auf den Corg-Gehalt der Böden. Legt man alle 13 *Nullvarianten* zu Grunde, so beträgt bei einer linearen Regression zwischen dem Corg-Gehalt (Masse-%) und dem Tongehalt

(Masse-%) das Bestimmtheitsmaß 0,4 (r = 0,633). Ohne die Ausreißer Keszthely und Wien werden knapp 32 % (r^2 = 0,318; r = 0,564) der Abweichung vom Tongehalt beeinflusst (Abb. 31). Ein evtl. überlagernder Einfluss durch den Feinschluffgehalt (Masse-%) wird durch eine partielle Korrelation getestet. Dazu können nur neun Nullvarianten betrachtet werden, da nur von diesen die notwendigen Bodendaten vorhanden sind. Die Korrelation zwischen den Corg-Gehalten (Masse-%) zu Versuchsende und dem Tongehalt (Masse-%) dieser neun Nullvarianten (außer Dülmen und Ultuna) ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) mit einem Korrelationskoeffizient von 0,911 signifikant. Bei der partiellen Korrelation unter Ausschluss des Einflusses des Feinschluffgehaltes beträgt der Korrelationskoeffizient 0,854. Der Zusammenhang ist nicht mehr so hoch signifikant, doch es wird noch deutlich, dass mit steigendem Tongehalt der Böden auch der Corg-Gehalt der Böden der Nullvarianten zunimmt. Bei einer partiellen Korrelation unter Ausschluss des Schluffeinflusses nimmt die Korrelation zwischen dem Corg-Gehalt und dem Tongehalt ebenfalls ab, der Korrelationskoeffizient sinkt von 0,562 auf 0,405.

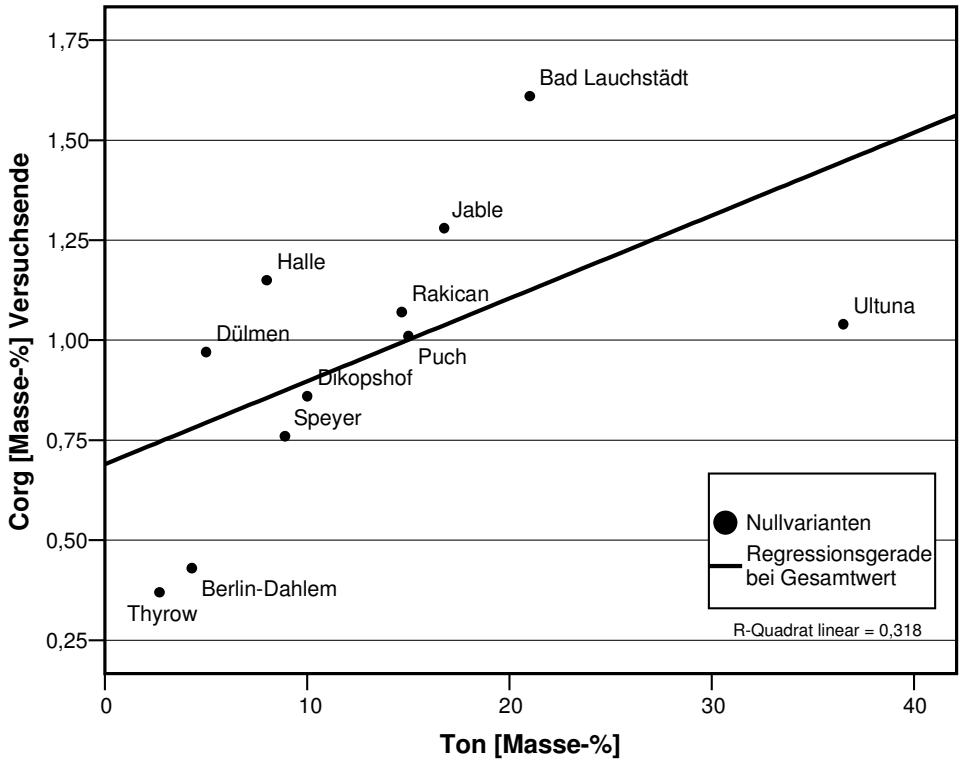

Abb. 31: Einfluss des Tongehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der elf Nullvarianten zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression) (s. Tab. A48).

Eine Korrelation zwischen den Corg-Gehalten (Masse-%) der zehn *optimal gedüngten Varianten* ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) mit einen Korrelationskoeffizienten von 0,874 (r^2 = 0,763) signifikant (Abb. 32), das heißt es besteht ein starker Zusammenhang. Anhand der Abbildung wird auch gleichzeitig deutlich, dass der Tongehalt nicht die einzige Variable ist, die die Höhe des Corg-Gehaltes beeinflusst, die Regressionsgerade würde die y-Achse im Nullpunkt schneiden und nicht wie hier bei einem Corg-Wert von ca. 0,6 Masse-%. Eine partielle Korrelation unter Ausschluss des Einflusses von Feinschluff führt zu einer leicht geringeren Korrelation.

Die Standorte Ultuna (63,5 Masse-% Ton), Bad Lauchstädt (21 Masse-% Ton) und Wien (25 Masse-% Ton) haben unter den Standorten (ohne Ausreißer) dieser Arbeit die höchsten Tongehalte. Die Standorte Thyrow, Berlin-Dahlem und Speyer haben die geringsten Tongehalte mit Humusgehalten unter 1 Masse-%.

Zusammengefasst wird deutlich, dass die Zunahme des Tongehaltes die Zunahme des Corg-Gehaltes z. T. signifikant beeinflusst, gleichzeitig aber auch der Schluffgehalt der Böden und v. a. der Feinschluffanteil diese Korrelation beeinflusst.

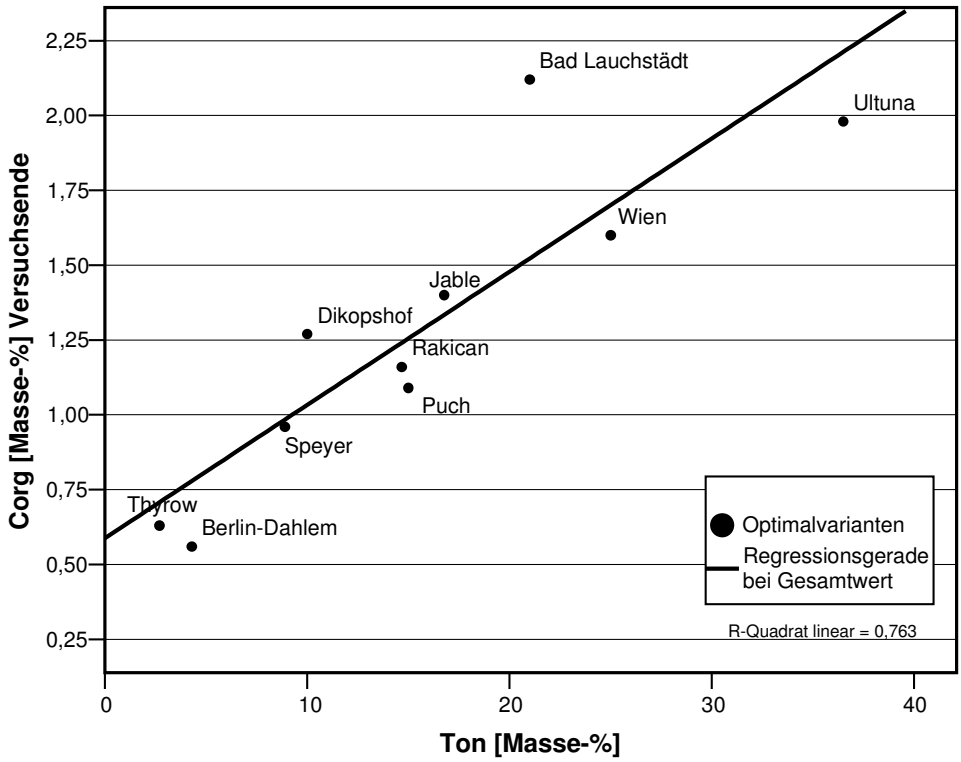

Abb. 32: Einfluss des Tongehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der Optimalvarianten zu Versuchsende der zehn Dauerversuche (einfache lineare Regression) (s. Tab. A49).

Der Einfluss der Bodenart *Schluff* auf zehn *Nullvarianten* wird in Abb. 33 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression beträgt 0,328 (r = 0,572), das heißt 33 % der Abweichung wird durch den Schluffgehalt erklärt. Das entspricht ungefähr dem Einfluss des Tongehaltes auf die Corg-Gehalte der Nullvarianten. Wie auch bei dem Tongehalt ist die Korrelation zwischen dem Corg-Gehalt (Masse-%) der *Optimalvarianten* höher als bei den Nullvarianten. Der Zusammenhang ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,685 signifikant. Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression ergibt demnach 0,469, das heißt durch den Schluffgehalt können 47 % der Abweichung erklärt werden (Abb. 34).
Hier fällt wieder Bad Lauchstädt mit einem hohen Schluffgehalt von 67,8 Masse-% auf, ebenso der Dikopshof mit 74,9 Masse-% und auch Jable mit 55,53 Masse-%.
Zusammengefasst wurde hier festgestellt, dass mit steigendem Schluffgehalt der Corg-Wert des Bodens zunimmt, dies bei Betrachtung der Optimalvarianten auf einem signifikanten Niveau.

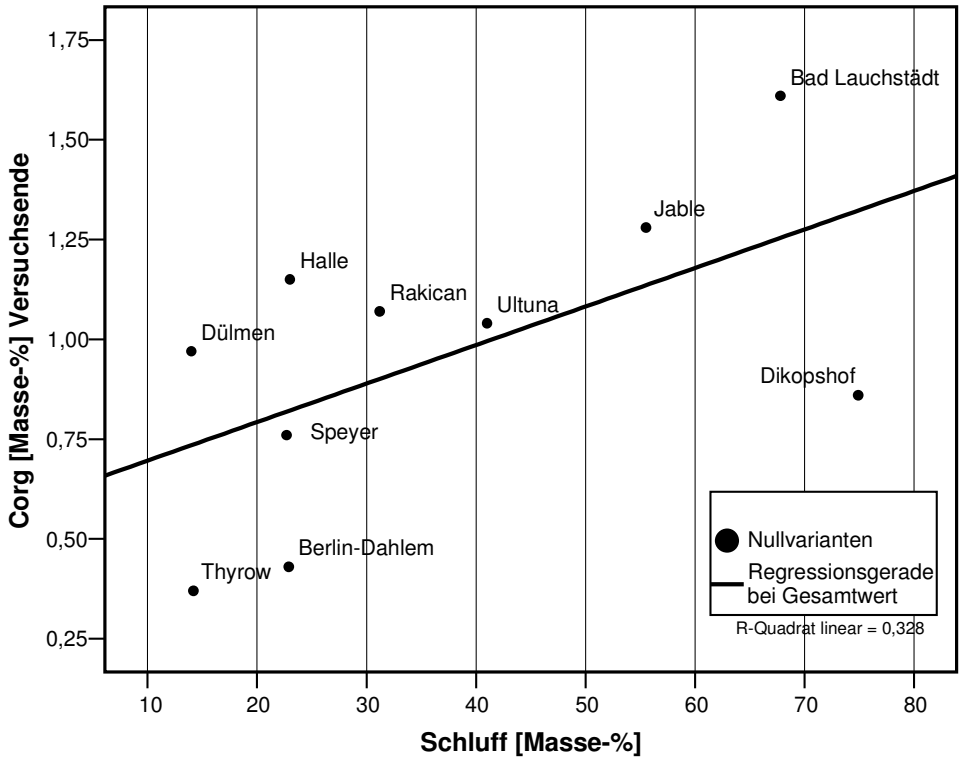

Abb. 33: Einfluss des Schluffgehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der Nullvarianten (ohne Puch) zu Versuchsende der zehn Dauerversuche (einfache lineare Regression) (s. Tab. A48).

Wird nun der Einfluss des *Feinanteils* (fU+T) der Böden auf den Corg-Gehalt (Masse-%) betrachtet, so kommt man bei Berechnung der Korrelation mit den

Werten der *Nullvarianten* (ohne Ultuna und Dülmen) zu einem Korrelationskoeffizienten von 0,858. Dieses Ergebnis ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant. Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression besagt demnach, dass 73 % der Abweichung durch den Feinanteil erklärt werden kann (Abb. 35). Bei Betrachtung der neun *Optimalvarianten* zu Versuchsende (ohne Ultuna) ist die Korrelation zwischen dem Feinanteil (Masse-%) und dem Corg-Gehalt ebenfalls auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant. Knapp 67 % der Abweichung wird durch den Feinanteil erklärt, das entspricht dem Bestimmtheitsmaß der linearen Regression von 0,665 (Abb. 36). Hier stellt Bad Lauchstädt einen Ausreißer dar. Dieser Standort hat mit 2,12 Masse-% Corg den höchsten Corg-Gehalt unter allen Standorten. Jable, Bad Lauchstädt, Wien und Puch fallen durch die höchsten FAT-Gehalte (Masse-%) aller Standorte dieser Arbeit auf. Der Gehalt beträgt 26 bis 35 Masse-%.

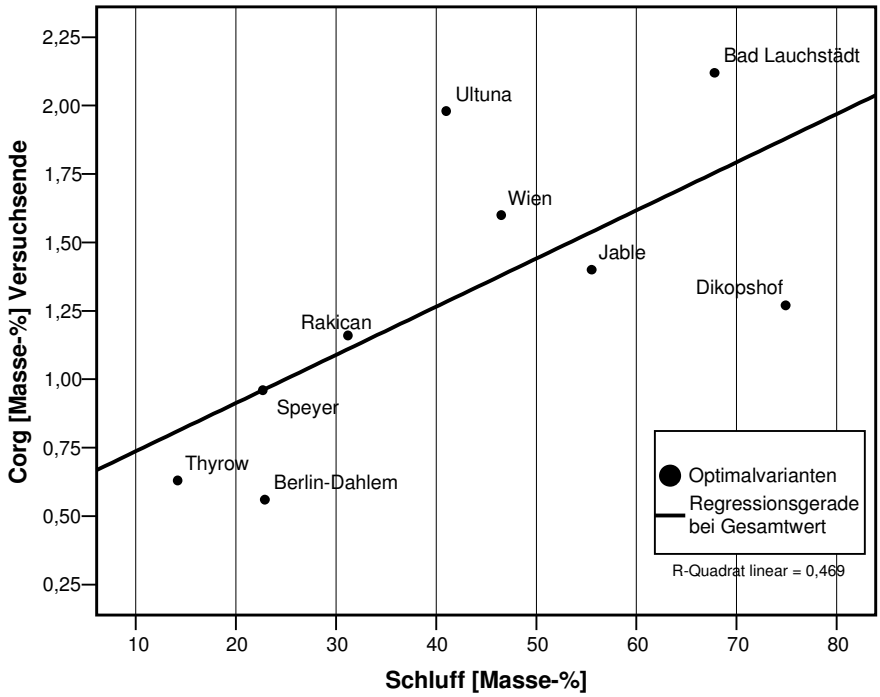

Abb. 34: Einfluss des Schluffgehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der neun „Optimalvarianten“ (ohne Puch) zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression) (s. Tab. A49).

Zusammengefasst ist bei den untersuchten Standorten ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Zunahme des Feinanteils und der Zunahme der Corg-Gehalte der Böden festgestellt worden. Der Feinanteil, aber auch der ausschließliche Tongehalt, haben unter den Bodenarten den größten Einfluss auf den Corg-Gehalt der untersuchten Varianten.

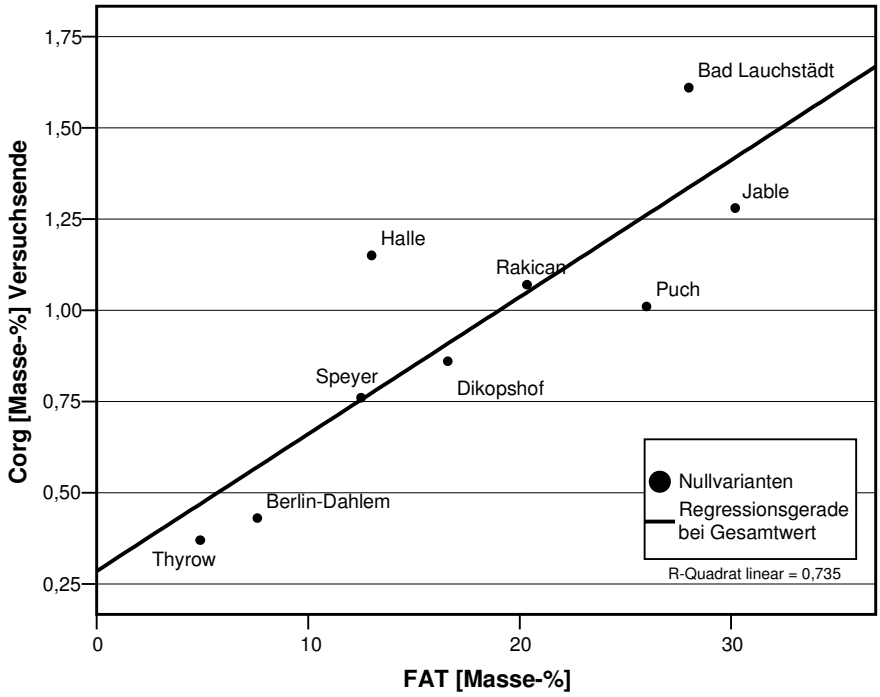

Abb. 35: Einfluss des FAT-Gehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der neun Nullvarianten (ohne Ultuna und Dülmen) zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression) (s. Tab. A48).

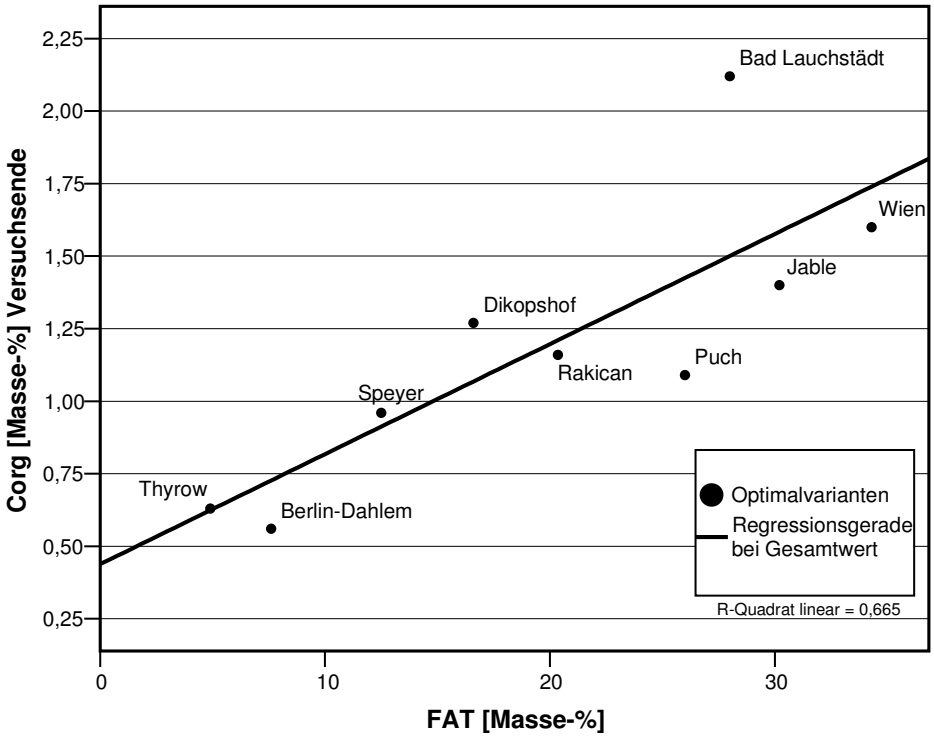

Abb. 36: Einfluss des FAT-Gehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der neun „Optimalvarianten“ (ohne Ultuna) zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression) (s. Tab. A49).

Der *Sandgehalt* (Masse-%) der Böden korreliert mit den Corg-Gehalten (Masse-%) zu Versuchsende der *Nullvarianten* sowie den „*Optimalvarianten*“ negativ. Die Korrelation des Corg-Wertes der Nullvarianten ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant negativ mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,644. Knapp 42 % ($r^2 = 0,415$) der Abweichung wird durch die Variable Sand erklärt (Abb. 37). Die Corg-Werte der Optimalvarianten korrelieren noch stärker negativ mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,848. Der Wert erreicht eine Signifikanz auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig). Hier wird 72 % der Abweichung durch den Sandgehalt erklärt (Abb. 38).

Die Standorte Berlin-Dahlem, Thyrow und Speyer fallen hier durch einen relativ hohen Sandgehalt von 72 bis 86 Masse-% Sand auf. Berlin-Dahlem und Thyrow haben mit 0,43 und 0,37 die geringsten Corg-Werte (Masse-%) aller Nullvarianten dieser Arbeit, gefolgt von Speyer mit 0,76 Masse-% Corg.

Zusammengefasst ist bei den untersuchten Standorten ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Zunahme des Sandgehaltes (Masse-%) und der gleichzeitigen Abnahme der Corg-Gehalte (Masse-%) der Böden festgestellt worden.

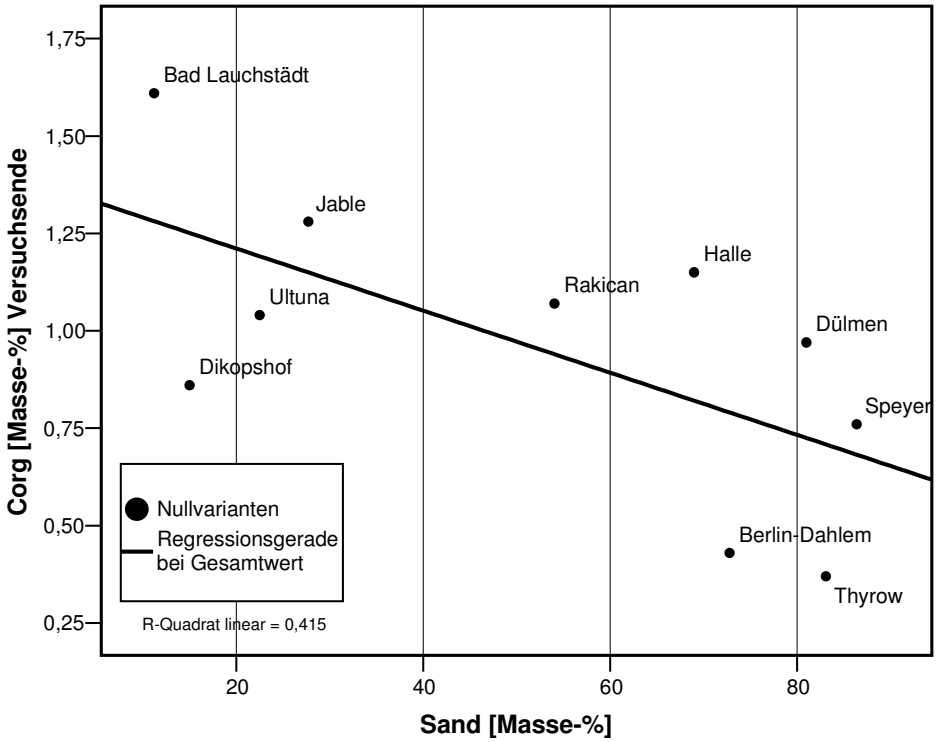

Abb. 37: Einfluss des Sandgehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der zehn Nullvarianten (ohne Puch) zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (einfache lineare Regression) (s. Tab. A48).

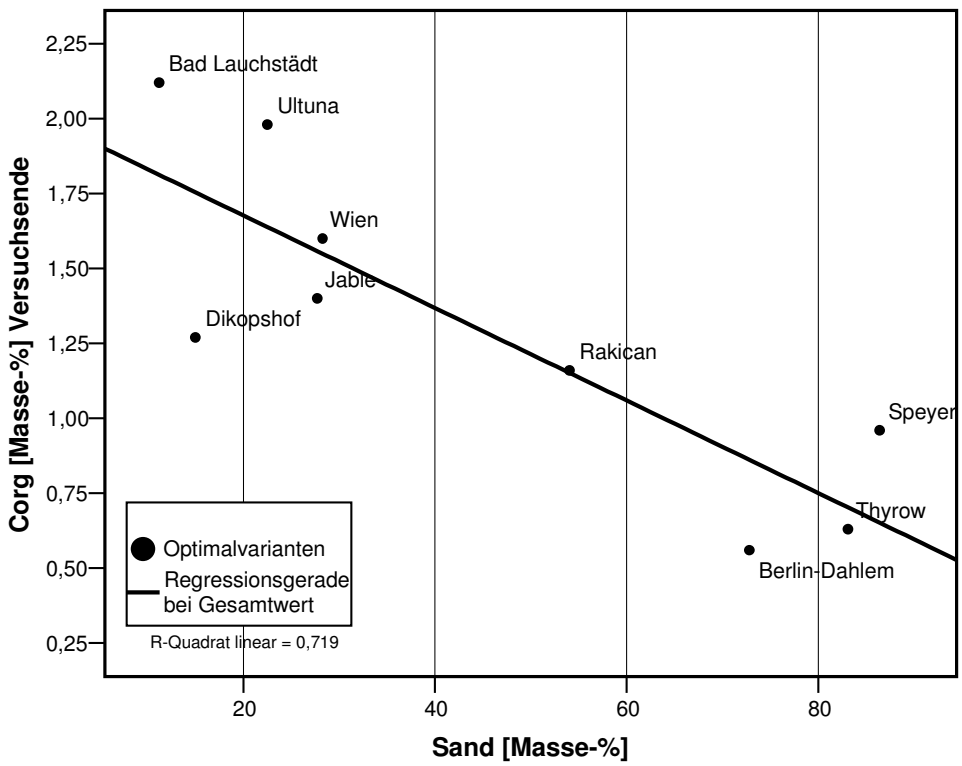

Abb. 38: Einfluss des Sandgehaltes (Masse-%) auf den Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens der neun Optimalvarianten (ohne Puch) zu Versuchsende der einzelnen Dauerversuche (Einfache lineare Regression) (s. Tab. A49).

Nachdem der signifikante Einfluss der Bodenarten auf den Corg-Gehalt festgestellt wurde, werden im Folgenden die *Bilanzergebnisse* in Abhängigkeit von den Bodenarten betrachtet. Dazu dient die Differenz zwischen den gemessenen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha/a) zu den Bilanzergebnissen der unteren und gegebenenfalls auch der oberen Werte (Corg kg/ha/a). Es werden nur neun „optimale“ Düngevarianten“ betrachtet (s. Tab. 10 in Kap. 5.1.4). Die Variante von Thyrow bildet hierbei ein Ausreißer und wird aus der Betrachtung herausgenommen. Die gemessenen jährlichen Veränderungen pro Jahr (Corg kg/ha) ergeben einen leichten Zusammenhang mit den Bodenarten. Mit dem Sandgehalt (Masse-%) der Böden korrelieren sie negativ (-0,418) und mit dem Tongehalt, dem Schluffgehalt sowie dem Feinanteil ist die Korrelation positiv, jedoch in allen Bereichen nicht signifikant.

Die Differenzen zu den unteren Bilanzwerten zeigen in Abhängigkeit vom *Tongehalt* (Masse-%) der Böden eine leicht positive Korrelation (Abb. 39). Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,102 (r^2= 0,01). Das bedeutet, dass mit zunehmendem Tongehalt die Schätzungen mit den unteren Bilanzwerten die Tendenz haben, genauer zu werden. Diese Aussage ist nicht signifikant. Das

Ergebnis zu den oberen Bilanzwerten ist fast gleich und bringt keine neuen Erkenntnisse.

Ähnliches gilt für den Einfluss des *Schluffgehaltes* (Masse-%) auf die Bilanzergebnisse (Abb. 40). Hierzu wurden acht Varianten herangezogen (ohne Puch). Der Korrelationskoeffizient zeigt einen leicht positiven Wert von 0,350. Das heißt es besteht eine Tendenz der unteren Bilanzwerte, die gemessenen jährlichen Veränderungen mit zunehmendem Schluffgehalt besser einzuschätzen. Die tatsächlichen Bodenkohlenstoffwerte werden bei Standorten mit geringen Schluffgehalten, wie z. B. in Berlin-Dahlem, Rakičan und Speyer, mehr unterschätzt als bei den Standorten mit höheren Schluffgehalten. Das Ergebnis zu den oberen Bilanzwerten ist ähnlich und bringt daher ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse.

Die Korrelation zwischen dem *Feinanteilgehalt* (Masse-%) der untersuchten Böden mit den Ergebnissen bezüglich der unteren Bilanzwerte ergibt mit r = 0,293 ebenfalls eine leicht positive Korrelation (Abb. 41). Knapp 9 % der Abweichung kann durch den Feinanteil erklärt werden. Hier gilt das gleiche wie bei den Untersuchungen bezüglich des Ton- und Schluffgehaltes: Mit Zunahme des Feinanteils werden auch die Schätzungen mit den unteren Bilanzwerten genauer. Das Korrelationsergebnis zu den oberen Bilanzwerten ist mit r = 0,249 ähnlich.

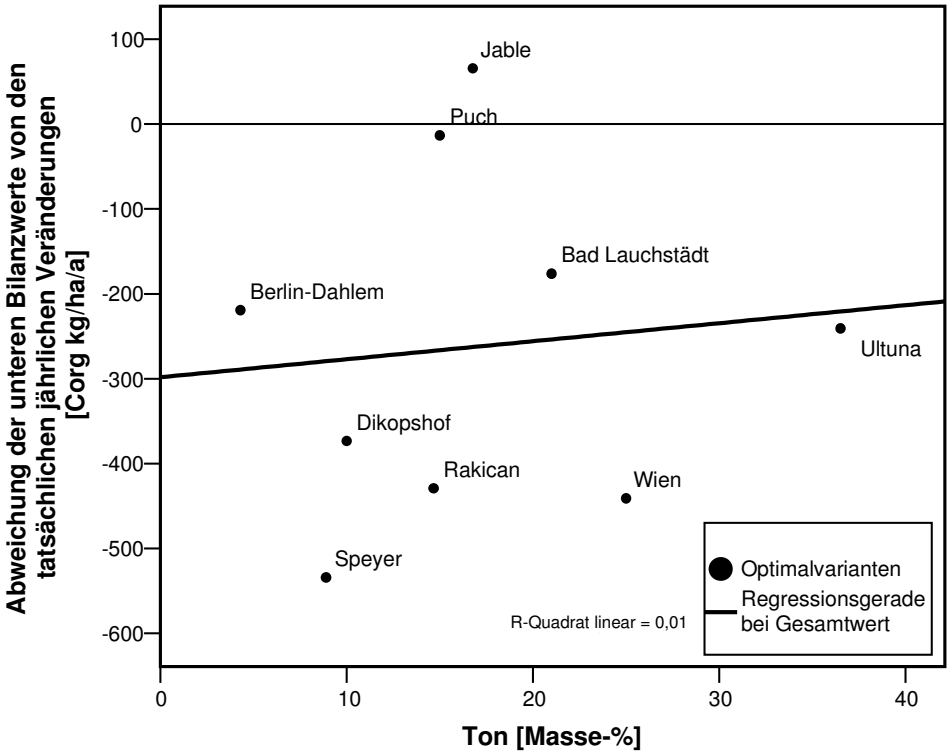

Abb. 39: Einfluss des Tongehaltes (Masse-%) auf die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes (= 0 kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der neun „optimal“ gedüngten Varianten (s. Tab. A49).

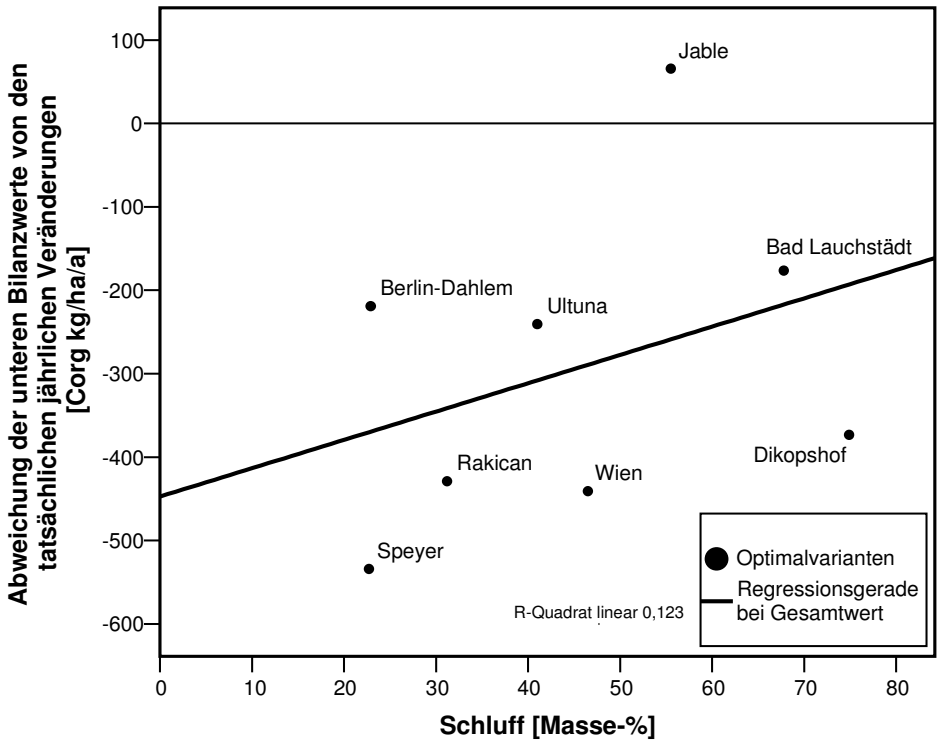

Abb. 40: Einfluss des Schluffgehaltes (Masse-%) auf die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes (= 0 kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der acht „optimal“ gedüngten Varianten (ohne Puch und Thyrow) (s. Tab. A49).

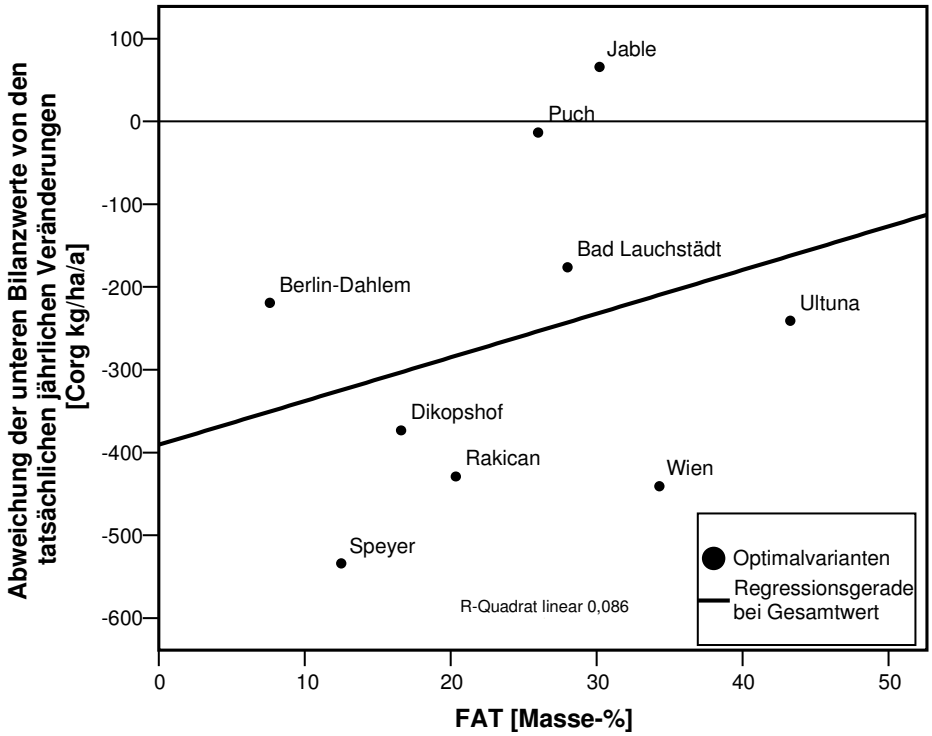

Abb. 41: Einfluss des Feinanteilgehaltes (Masse-%) auf die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes (= 0 kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der neun „optimal“ gedüngten Varianten (s. Tab. A49).

Die Korrelation zwischen dem *Sandgehalt* (Masse-%) und den Abweichungen der unteren Bilanzwerte zu den tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha/a) zeigen entgegengesetzt zu den Ton-, Schluff- und FAT-Untersuchungen eine negative Tendenz (Abb. 42). Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,418, das heißt es werden 17,4 % der Abweichung durch den Sandgehalt erklärt. Die oberen Bilanzwerte ergeben ähnliche Ergebnisse (r = -0,384). Mit zunehmendem Sandanteil der Böden nimmt die Genauigkeit der Berechnungen mit den unteren Bilanzwerten ab. Diese Aussage ist aber nicht signifikant.

Werden die Standorte in zwei Gruppen aufgeteilt, zum einen in die Gruppe der *Sandböden*, zum anderen in die Gruppe der *Schluff- und Lehmböden*, fällt auf, dass die tatsächlichen jährlichen Veränderungen (Corg kg/ha) der „schweren" Böden geringer sind als die der leichten „Böden". Die tatsächliche Corg-Bilanz der „schweren" Böden beträgt in der Summe 57 kg/ha/a Corg, bei den „leichten" Böden sind es 922 kg/ha/a Corg (s. Tab. A50). Die unteren Werte der Bilanzierungsmethode unterschätzen die leichten Böden um durchschnittlich 211 kg/ha/a Corg, die oberen Bilanzwerte um 401 kg/ha/a Corg, die „schweren" Böden werden um 41 kg/ha/a durch die unteren Werte unterschätzt, durch die oberen Werte um 233 kg/ha/a Corg (Abb. 43). Hierbei wurden der Standort Dikopshof und Thyrow außer Acht gelassen.

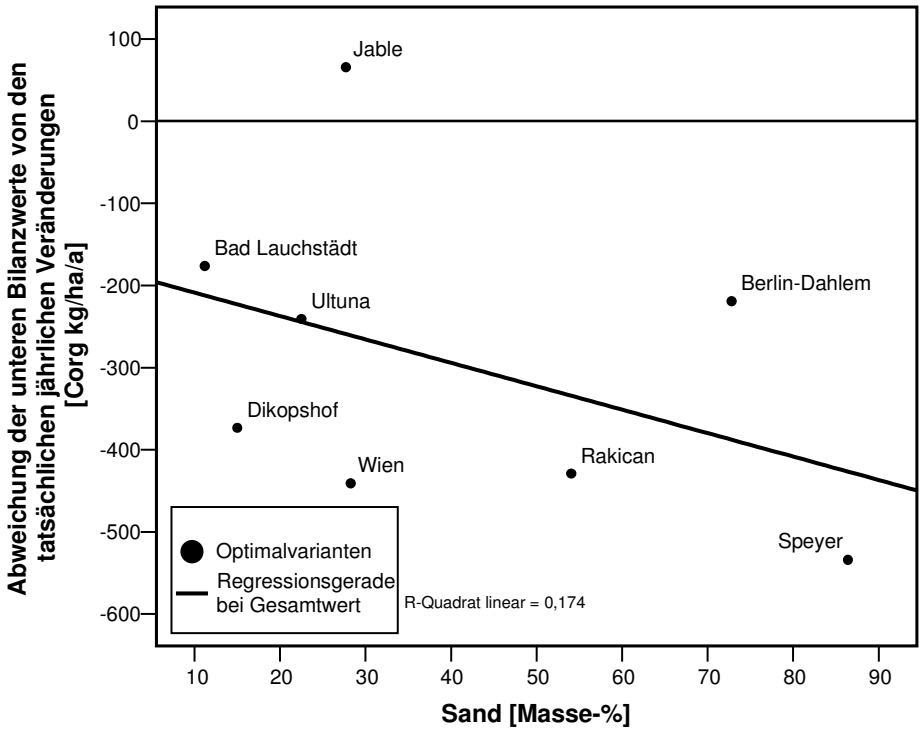

Abb. 42: Einfluss des Sandgehaltes (Masse-%) auf die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes (kg/ha) im Boden zu den unteren Bilanzwerten (kg/ha/a) der acht „optimal" gedüngten Varianten (ohne Puch und Thyrow) (s. Tab. A49).

Zusammengefasst kann zu dem Einfluss der Bodenarten auf die Bilanzergebnisse gesagt werden, dass bei den neun untersuchten Varianten von neun verschiedenen Standorten leichte Tendenzen der Bilanzwerte vorhanden sind, die tatsächlichen organischen Kohlenstoffgehalte der „schweren“ Böden mit einem hohen Ton-, Schluff- bzw. Feinanteilgehalt besser einzuschätzen als den Corg-Gehalt der Böden mit hohen Sandanteilen. Durch die unteren sowie oberen Bilanzwerte wird die tatsächliche Corg-Bilanz der sandigen Böden in einem höheren Maße unterschätzt als die Corg-Werte der „schweren“ Böden.

5.5 Ergebnisüberblick hinsichtlich Dünge- und Bodenartengruppen

Um einen zusammenfassenden Überblick der Ergebnisse zu gewinnen, werden in Abb. 43 verschiedene Bilanzauswertungen gegenübergestellt. Dazu werden die optimalen *Stallmist-, Gülle- und Strohvarianten* sowie die Varianten der *Sandböden* und *Schluff-/Lehmböden* in Gruppen aufgeteilt. Bei den Bodenartengruppen handelt es sich ausschließlich um optimale Stallmistversuche. Der Strohdüngungsversuch von Ultuna und der Stallmistversuch vom Dikopshof wurden außer Acht gelassen. Die unteren Bilanzwerte schätzen die gemessenen Corg-Verhältnisse über alle Gruppen hinweg besser ein als die oberen Bilanzwerte. Alle Gruppen werden von der Bilanz unterschätzt. Die beste Einschätzung der Düngegruppen erfolgt durch die unteren Bilanzwerte bei den Strohvarianten, gefolgt von der Stallmistgruppe, dann erst von den Güllevarianten. Schluff- und Lehmstandorte werden von den unteren Werten bezüglich aller Gruppen am besten eingeschätzt, Sandstandorte demgegenüber um mehr als die fünffache Menge unterschätzt.

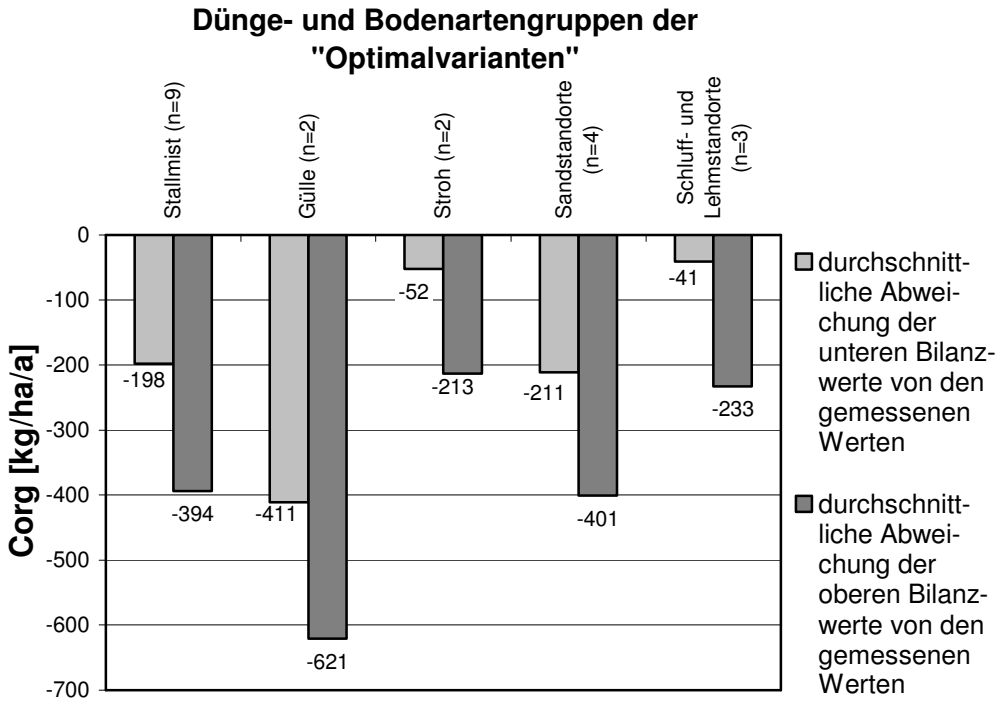

Abb. 43: Sortierung der „Optimalvarianten“ in Dünge- und Bodenartengruppen. Vergleich hinsichtlich der durchschnittlichen Abweichung der Bilanzergebnisse (untere und obere Werte) von der gemessenen Corg-Bilanz (kg/ha/a) im Boden (s. Tab. A51).

6. Diskussion

6.1 Unter- bzw. Überschätzung der Humusan- bzw. -abreicherung der Humusbilanz

Im Mittelpunkt der vorliegenden Untersuchung steht die Überprüfung der Humusbilanzierungsmethode (KÖRSCHENS et al. 2004) hinsichtlich ihrer Eignung für die Bemessung von Wirtschaftsdüngergaben unter Berücksichtigung von Bodenschutzaspekten.

Die Analyse der *Düngevarianten* Stallmist, Gülle und Stroh, jeweils kombiniert mit einer Stickstoffmineraldüngergabe, hat gezeigt, dass die unteren Bilanzwerte die optimalen Düngemengen der untersuchten Varianten im Durchschnitt besser einschätzen als die oberen Bilanzwerte. Das gilt hinsichtlich der experimentell ermittelten Düngegabe sowie bezüglich der Auswertung nach den tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg und deckt sich mit den Anwendungsempfehlungen der Humusbilanzierung.

Der errechnete *Düngungsbedarf auf Basis der gemessenen jährlichen Veränderungen* des Corg-Gehaltes im Boden ergibt Stallmistmengen von -2,4 bis 20,2 t/ha/a FM, Güllemengen von -20 und 20 t/ha/a und Strohmengen von 0,9 und 5,1 t/ha/a. Diese Werte sind nicht deckungsgleich mit den experimentell anhand von Dauerversuchen ermittelten Werten, die sich bei der Stallmistdüngung zwischen 10 bis 15 t/ha/a Stallmist FM bewegen, bei Gülle 16,7 und 20 t/ha/a Gülle FM und bei Stroh 3,5 und 4,4 t/ha/a Stroh FM betragen. Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse ist zu bedenken, dass der berechnete Düngungsbedarf auf Basis der gemessenen jährlichen Veränderungen der Corg-Mengen im Boden die organische Kohlenstoffbilanz für den Zeitpunkt der Probenentnahme widerspiegelt. Sie dient als Vergleichswert und gibt aktuelle Tendenzen an. Als Basis einer dauerhaften Düngeempfehlung scheint sie dagegen nicht geeignet. So würde die Corg-Menge ohne Düngung abnehmen, wie anhand der Entwicklung der Nullparzellen nachgewiesen wurde (s. Kap. 5.2.1). Eine einmalige Corg-Zufuhr in Form von z. B. Stallmist in Höhe der rein rechnerisch die Bilanz ausgleichende Menge an Corg kann aufgrund der hinzukommenden Mineralisationsvorgänge die Bilanz in der Praxis nicht ausgleichen (SAUERBECK 1992). Hinzu kommen jahreszeitlich bedingte Schwankungen von bis zu 0,3 Masse-% Corg im Boden (LÜTZOW V. 1993, WACHENDORF 1996). Nach KÖRSCHENS & SPITZL (1978) betragen die Schwankungen des Corg-Gehaltes bis zu 0,2 Masse-% innerhalb eines Jahres.

Die *experimentell ermittelten „optimalen“ Düngemengen* basieren auf Empfehlungen der jeweiligen Versuchsansteller. Die Kriterien waren meistens der höchste Ertrag bei einer „umweltverträglichen“ Stickstoffbilanz („*hohe N-Effizienz und ausgewogenen N-Salden*“, KÖRSCHENS et al. 2004, S. 4). Die

organischen Kohlenstoffwerte spielten außer in Bad Lauchstädt (vgl. RATHKE/KÖRSCHENS/DIEPENBROCK 2002) keine direkte Rolle (KÖRSCHENS 2005, mündl. Mitteilungen). Vergleicht man die darauf basierenden Stallmistmengen, so stellt man fest, dass bei sieben von neun Varianten die gleiche Düngermenge von 10 t/ha/a Stallmist FM gedüngt wurde, bei unterschiedlichsten Boden- und Klimaverhältnissen z. T. aber bei den gleichen Fruchtfolgen. Diese Düngemengen müssen noch hinsichtlich der Kohlenstoffbilanz angeglichen werden.

Die Analyse der *„optimalen" Stallmistdüngung* (Stallmist und mineralischer Stickstoff) hat gezeigt, dass nach dem experimentell ermittelten Humusbedarf die unteren Bilanzwerte im Mittel der Versuche eine sehr genaue Schätzung angeben, die oberen Werte hingegen die experimentell ermittelten Werte im Mittel um 4,5 t/ha/a Stallmist FM überschätzen. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Bilanzmethode (untere Werte) die Humusverhältnisse der überprüften Stallmistversuche sehr gut trifft und der Humusreproduktionsfaktor von 40 diesbezüglich angemessen ist. Der Vergleich mit den gemessenen Werten zu Versuchende ergibt allerdings im Mittel einen Corg-Überschuss von 215 kg/ha/a. Die unteren Werte verschätzen sich diesbezüglich um durchschnittlich -198 kg/ha/a Corg, die oberen Werte um -394 kg/ha/a Corg. Daraus folgt, dass im Mittel der Versuche zu diesem Zeitpunkt zu viel gedüngt wurde und die unteren Bilanzwerte eine zu geringe Reduktion des Düngemittels Stallmist ermitteln. Die Anwendung der oberen Bilanzwerte würde sogar zu einer Düngungserhöhung um durchschnittlich 4,5 t/ha/a Stallmist-FM führen.

Unter den neun „optimal" mit Stallmist und N-Mineraldüngung gedüngten Standorten deuten die *Analysen für Thyrow* darauf hin, dass hier nach dem oberen Wert gedüngt werden müsste. Hier stellt sich die Frage, warum nicht der untere Wert ausreichend ist, da der Standort mindestens 21 Jahre mit 15 t/ha/a Stallmist FM und 75 kg/ha/a N (+PKCa) gedüngt wurde, also den Anforderungen der unteren Werte der Humusbilanzierungsmethode (KÖRSCHENS et al. 2004) entspricht. Hier muss der Grund in der Ursache der tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes dieses Standortes gesucht werden. Die Daten von 1975 bis 1995 weisen eine defizitäre Corg-Bilanz aus. Dieser Trend ist erst seit 1965 zu beobachten (Versuchsanlage 1937) und könnte an der erhöhten mittleren Bodentemperatur liegen, deren Auslöser wiederum die kontinuierliche Erhöhung der Jahresmitteltemperatur am Standort Thyrow ist (BAUMECKER/ELLMER/CHMIELEWSKI 2002).

Beim *Standort Dikopshof* soll laut den unteren Bilanzwerten 7,4 t/ha/a Stallmist FM gedüngt werden, nach den oberen Werten 11,5 t/ha/a. Die tatsächliche Corg-Bilanz ergibt einen erheblichen Corg-Überschuss an, so dass die Parzelle

theoretisch zu Versuchsende nicht gedüngt werden müsste. Die tatsächliche Düngemenge von 12 t/ha/a Stallmist scheint somit zu hoch zu sein und kann nicht als „optimale“ Düngemenge angenommen werden. Dieses Ergebnis deuten auch SCHELLBERG/KÖRSCHENS/HÜGING (1999) an, die als optimale Düngemenge hinsichtlich Ertrag und N-Bilanz beim Dikopshof 10 t/ha/a Stallmist (+ NPK) annehmen. Somit kommt der obere Bilanzwert einer längerfristigen Düngung von 10 t/ha/a näher, für eine kurzfristige Dezimierung des Überschusses an Corg scheint der untere Bilanzwert angemessener zu sein. An diesem Beispiel lässt sich gut erkennen, dass mit ausschließlichem Blick auf die Bilanzergebnisse der Humusgehalt des Bodens nicht nachhaltig gesichert werden kann. Eine dauerhafte Düngung von 7,4 t/ha/a würde dem Standort langfristig wahrscheinlich eine negative Corg-Bilanz bescheren, die Düngung mit 11,5 t/ha/ha eine Corg-Anreicherung.

Die Analyse der beiden *Güllevarianten* hat gezeigt, dass sowohl die unteren als auch die oberen Bilanzwerte den Humusbedarf des Bodens extrem überschätzen. Die unteren Bilanzwerte verschätzen sich bezüglich der gemessenen Werte um durchschnittlich -411 kg/ha/a Corg, die oberen Werte um -621 kg/ha/a Corg. Nach den unteren Werten der Bilanz sollte mehr als die doppelte Menge gedüngt werden, nach den oberen Werten sogar mehr als die dreifache Menge, bezogen auf die gemessenen Werte sowie auf die experimentell ermittelten Werte. Die Ergebnisse von Puch deuten darauf hin, dass ein Humusreproduktionskoeffizient von 9 bei einer Gülle–Trockenmasse von 7 % zu gering ist. Erst bei einem Koeffizienten von 18 würden gemessene und berechnete Werte annähernd übereinstimmen. Bei der Diskussion der Ergebnisse aus Wien muss beachtet werden, dass dieser Standort viele Ausreißer beherbergt. Es fällt auf, dass die Corg-Messungen der insgesamt 15 Varianten sehr heterogene Entwicklungen zeigen, die z. T. nicht dem Stand der Forschung und den sonstigen Ergebnissen dieser Arbeit entsprechen. Das wird z. B. an der Nullvariante deutlich, die eine Zunahme des Corg-Gehaltes verzeichnet, obwohl die Variante vor Versuchsbeginn ortsüblich gedüngt wurde. Erwartungsgemäß müsste hier eine Abnahme eintreten (SAUERBECK 1992, ASMUS 1992, LEITHOLD 1991, s. Kap. 5.2.1). Hier scheint die einmalige Probennahme zu Versuchende den tatsächlichen Verlauf nicht richtig zu beschreiben, so dass das Bilanzergebnis nicht genau interpretiert werden kann. Diese Problematik, die Corg-Dynamik anhand eines Wertes zu beschreiben, sehen auch eine Vielzahl anderer Autoren (u. a. KÖRSCHENS & SCHULZ 1999, LETTAU & ELLMER 1997). Die tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg am Standort Wien sind insgesamt positiv, die Bilanzergebnisse stets negativ.

Die *Analyse der zwei Strohdüngungsvarianten* ergibt im Mittel der Versuche eine Abweichung der unteren Bilanzwerte von den gemessenen Werten um

-52 kg/ha/a Corg, der oberen Werte um -213 kg/ha/a. Die Untersuchung zeigt aber im Einzelnen deutlich unterscheidbare Ergebnisse, wobei in Ultuna der obere Bilanzwert, in Puch hingegen der untere Bilanzwert der experimentell ermittelten Düngemenge am nächsten kommt. Beim Standort Ultuna stellt sich die Frage warum die oberen Werte eine bessere Übereinstimmung zeigen als die unteren. Der Standort wurde über Jahrzehnte optimal mit Stickstoffmineraldünger gedüngt und ist bei insgesamt positiver Humusbilanz auch nicht an Humus unterversorgt. Hier könnte der Temperatureinfluss eine wichtige Rolle spielen. Bei einer geringen Jahresdurchschnittstemperatur von 5,5 °C gegenüber 7,9 °C am Standort Puch überwiegt auf dem mittel tonigen Lehmboden die Humusakkumulation gegenüber der Mineralisation, da diese bei geringen Temperaturen langsamer verläuft (SCHEFFER 2002, OADES 1988). Somit müsste der standorttypische Humusspiegel höher sein als in Klimaregionen mit einer höheren Jahresdurchschnittstemperatur und kann auch nur durch höhere Düngermengen gehalten werden. Außerdem könnten die relativ hohen Düngergaben wichtig sein, um die für die Vegetation, in der für kontinentale Regionen typischen kurzen Wachstumsphase, notwendigen Nährstoffe bereitstellen zu können. Daraus folgt, dass wahrscheinlich auch die Temperatur ein Kriterium für die Anwendung der unteren oder oberen Werte der Corg-Bilanz sein müsste.

Die optimale Strohvariante von Puch wird im Unterschied zu Ultuna nach den experimentell ermittelten Düngegaben von den unteren Werten nur um 5 % überschätzt. Nach den tatsächlichen jährlichen Veränderungen liegt eine höhere negative Humusbilanz vor, die den oberen Wert widerspiegelt. Daraus leitet sich die Frage ab, welcher Bilanzwert die Humusbilanz in Puch tatsächlich besser einschätzt. Bei Betrachtung der tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes der einzelnen Düngevarianten von Puch wird deutlich, dass alle Strohvarianten, also auch die mit einer relativ hohen Stickstoffmineraldüngung, gegenüber dem Ausgangswert einen geringeren Corg-Gehalt zu Versuchende aufweisen. Die tatsächliche Bilanz ist in allen Fällen negativ. Eine Begründung der Abreicherung liegt scheinbar an der Bewirtschaftung vor Versuchsanfang, durch die der Humusspiegel im Boden einen höheren Gehalt erzielte als durch die verschiedenen Strohdüngungsvarianten. Um dieses Humusniveau zu erreichen, müsste kurzfristig die Düngungsmenge angehoben werden und nach den oberen Bilanzwerten gedüngt werden. Ob langfristig die unteren Bilanzwerte richtig sind oder ob diese zu einer weiteren Abreicherung führen würden, kann anhand der vorhandenen Daten nicht geklärt werden. Dazu sind Beobachtungen der weiteren Corg-Entwicklung über viele Jahre notwendig. Nach LEINWEBER/KAHLE/SCHULTEN (1991) sind Veränderungen der Humusqualität

noch im 34. Versuchsjahr festzustellen, KÖRSCHENS (2003) sieht die größten Veränderungen an der Quantität der organischen Substanz bis zum 30. Versuchsjahr.

Der positive *Einfluss der Stickstoffmineraldüngung* auf den Corg-Gehalt des Bodens konnte u. a. anhand der ausschließlich mit Stickstoffmineraldüngung gedüngten Varianten und deren Differenz zu Versuchende nachgewiesen werden. Die in vier Stickstoffmineraldüngungsklassen aufgeteilten Varianten mit verschieden hohen Düngegaben hatten alle einen höheren Corg-Gehalt als die Nullvarianten. Im Mittel der Klassen erhöhte sich der Humusgehalt des Bodens um 2,2 t/ha bzw. 0,05 Masse-% Corg. Dies ist nach SAUERBECK (1992) indirekt auf die vermehrten Erträge und die höheren Ernte- und Wurzelreste zurückzuführen. Doch im Durchschnitt der Klassen konnte der Ausgangsgehalt, der jeweils auf einer kombinierten organisch-mineralischen Düngung beruht, nicht gehalten werden. Daraus leitet sich ab, dass die kombinierte Düngungsweise gegenüber der rein auf Mineraldünger beruhenden Düngung höhere Humusgehalte erzielt. Zu diesem Ergebnis kommen auch u. a. DEBRUCK & BOGUSLAWSKI (1980) und ASMUS (1992).

Auch der größere *Einfluss der kombinierten Düngung (organisch–mineralisch)* gegenüber der rein organischen Düngung konnte bei den analysierten Düngern Stallmist, Gülle und Stroh festgestellt werden. Dies entspricht den zusammengetragenen Ergebnissen von SAUERBECK (1992). Diesbezügliche Analysen vom Standort Puch haben ergeben, dass eine ausschließliche Betrachtung der Endwerte bei der relativ kurzen Versuchslaufzeit von zwölf Jahren nicht ausreicht um auf dieses Ergebnis zu kommen, da das Fließgleichgewicht nach zwölf Jahren noch nicht erreicht wurde. Um o. g. Ergebnis aufdecken zu können, mussten die jährlichen Abreicherungsraten miteinander verglichen werden.

Der *Einfluss der Temperatur* (°C) auf den absoluten Corg-Gehalt des Bodens konnte anhand der Standorte dieser Arbeit nicht belegt werden. Jedoch wurde die Tendenz festgestellt, dass mit Zunahme der Temperatur auch eine jährliche Zunahme des Corg-Gehaltes im Boden eintritt und somit auch die Bilanzergebnisse die Tendenz zeigen, mit einer Erhöhung der Temperatur den tatsächlichen Corg-Bedarf des Bodens zu unterschätzen. Dies widerspricht aber dem derzeitigen Forschungsstand (SCHEFFER 2002), der eine Humusabnahme mit zunehmender Temperatur prognostiziert. Hier liegt wahrscheinlich eine Scheinkorrelation vor, die mit den zur Verfügung stehenden Variablen nicht aufgedeckt werden konnte. Es besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich des Einflusses der Temperatur auf die Corg-Gehalte der Böden, v. a. hinsichtlich des Temperaturbereiches < 8,5 °C und > 10 °C.

Der *Einfluss des Jahresdurchschnittsniederschlags* auf den Corg-Gehalt der Böden konnte ab einer Niederschlagshöhe von 690 mm nachgewiesen werden, wobei mit zunehmendem Niederschlag (mm) der Corg-Gehalt der Böden zunimmt. Unterhalb dieser Niederschlagshöhe dominiert hingegen der Einfluss der Bodenarten, wobei sandige Böden gegenüber den ton- und schluffreichen Böden geringere Corg-Gehalte aufweisen. Bei den sandigen Böden scheinen die Pflanzen bei dem geringeren Niederschlag unter Wasserstress zu stehen. Das wird durch die im Gegensatz zu den Schluff- und Lehmböden geringere nutzbare Feldkapazität und den geringeren effektiven Wurzelraum verursacht. Die Kulturarten der ton- und schluffreichen Böden scheinen den klimatisch bedingten Wasserstress durch die höhere nutzbare Feldkapazität besser abpuffern zu können (vgl. SCHEFFER 2002). Die daraus resultierende höhere Biomassenproduktion fördert wiederum den Corg-Gehalt im Boden. Nach den Ergebnissen der Regressionsanalyse zu urteilen, besteht die Tendenz der unteren Bilanzwerte, die tatsächlichen Corg-Verhältnisse der Böden mit zunehmendem Niederschlag besser vorherzusagen. Dieses Ergebnis beruht allerdings lediglich auf Messungen von drei Dauerversuchsstandorten mit Niederschlagswerten > 690 mm/a und steht im Widerspruch zu der Annahme, dass mit zunehmendem Niederschlag eine Verminderung der C-Mineralisierung einhergeht (SCHEFFER 2002). Folgt man den Beobachtungen unterhalb von 690 mm/a Niederschlag scheint eine monokausale Betrachtung insgesamt nicht zielführend. Vielmehr müssen Bodenart und Temperaturregime ebenso mitberücksichtigt werden, wie der Einfluss anderer Mechanismen auf die C-Speicherung im Boden, wie z.B. der Grad der C-Sättigung, die C-Mineralisierung und die Rolle verschiedener C-Fraktionen für die C-Fixierung im Boden (u. a. MATUS & MAIRE 2000, RAUBUCH & JOERGENSEN 2002, OADES 1995, HAIDER 1999, EKSCHMITT et al. (2005), EUSTERHUES et al. 2003, JENKINSON & RAYNER 1977, SPRINGOB et al. 2001).

Die *Untersuchungen der Bodenarten* haben gezeigt, dass der Tongehalt und der Feinanteil der Böden einen signifikanten Einfluss auf den Humusgehalt der Böden haben. Unter gleich bleibenden Standortbedingungen bewirken diese Anteile einen höheren Humusgehalt als feinanteilarme Böden, da 95 % des Corg an Mineralpartikeln sorbiert ist und zwar v. a. an der Tonfraktion, aber auch an der Schlufffraktion, v. a. an Feinschluffpartikeln (JENNY 1980, ANDERSON et al. 1981, PARTON et al. 1987, KÖRSCHENS 1980b, KUNTZE/ ROESCHMANN/SCHWERDTFEGER 1994, GALANTINI et al. 2004). Mit Zunahme des Tongehaltes oder des Feinanteiles im Boden steigt der Corg-Gehalt der Nullvarianten sowie der optimal gedüngten Varianten. Aber auch der Schluffgehalt bewirkt eine Zunahme des Humusgehaltes, was anhand der Optimalvarianten zu Versuchende auf einem signifikanten Niveau nachgewiesen

werden konnte. Das liegt wahrscheinlich v. a. an dem Fein- und Mittelschluffgehalt der Böden (SCHULTEN/LEINWEBER/SORGE 1993). Entsprechend zeigen die Analysen, dass mit Zunahme des Sandgehaltes der Böden auch der Humusgehalt sinkt. Diese Ergebnisse widersprechen Untersuchungen von SPRINGOB et al. (2001) in Norddeutschland. Sie stellten dort höhere Gehalte an Corg auf tonarmen, sandigen Böden fest als auf tonreicheren Lössböden. Als mögliche Ursache wird der hohe Gehalt an refraktärer organischer Substanz gesehen, die nicht aufgrund der Assoziation mit Mineralpartikeln, sondern an sich stabil sind.

Im Bezug auf die Ergebnisse der Bilanzierung ist ein Trend festzustellen, dass mit zunehmendem Sandgehalt die Differenz zwischen den tatsächlichen jährlichen Veränderungen und den Bilanzwerten zunimmt. Die Corg-Gehalte der schluff- und tonreichen Böden werden weniger unterschätzt als die Sandböden. Bei den Sandböden unterschätzt sich die Bilanzierungsmethode mit den unteren Werten um durchschnittlich -211 kg/ha/a Corg, bei den Schluff- und Lehmböden sind es nur -41 kg/ha/a Corg. Eine Erklärung hierfür könnte der unterschiedliche Sättigungsgrad der Böden sein, der nach MATUS & MAIRE (2000) einen größeren Einfluss auf die Mineralisation hat als die Bodenarten. Die tatsächlichen jährlichen Veränderungen sind bei den Sandböden größer als bei den „schweren“ Böden. Eine Sättigung scheint hier noch nicht erreicht zu sein. Die Böden scheinen mehr Corg aufnehmen zu können als unter landwirtschaftlicher Nutzung zur Verfügung steht. Die Bilanzwerte würden eine zu geringe Reduktion des Düngers oder eine zu hohe Düngung vorhersagen.

Die *Fruchtartenkoeffizienten* konnten anhand der Versuche dieser Arbeit nicht beurteilt werden. Einzig Versuche des Standortes Puch standen dazu zur Verfügung wodurch keine signifikanten Ergebnisse erzielt werden konnten.

Die Analysen haben gezeigt, dass der *Standort Keszthely* nur Ausreißervarianten hat. Die Bilanzwerte unterschätzten die tatsächliche Corg-Bilanz um mehr als 1,6 t/ha/a. Auffällig sind wieder die tatsächlichen jährlichen Veränderungen, selbst die Nullvariante zeigte eine Corg-Erhöhung um 0,29 Masse-%. Das Problem besteht scheinbar im Ausgangswert. Dieser wurde für alle Varianten des Standortes genannt (HOFFMANN/KISMÁNYOKY/BALÁZS 1997, HOFFMANN 2005 pers. Mitteilungen). Er ist aber nach KISMÁNYOKY (2005 pers. Mitteilungen) ein Mittelwert von gänzlich ungedüngten Flächen der Region.

Die schwere Interpretierbarkeit eines einzelnen Corg-Wertes macht auch folgende Untersuchung deutlich: Der *Standort Ultuna* befindet sich seit 1987 im Fließgleichgewicht (KÖRSCHENS & SCHULZ 1999), trotzdem unterliegt die „optimale“ Strohdüngungsvariante noch Schwankungen von 0,25 Masse-% Corg. Innerhalb von fünf Jahren nimmt der Corg-Gehalt im Fließgleichgewicht um einen höheren Wert zu, als im jährlichen Mittel des Zeitraumes von 36

Jahren, obwohl vor Versuchsbeginn eine scheinbar nicht gleichwertige Bewirtschaftungsweise vorlag. Hier wird die hohe Dynamik des Corg-Gehaltes im Boden deutlich und die Betrachtung von Dauerversuchen unerlässlich (vgl. LETTAU & ELLMER 1997). Hinzu kommt das Problem, dass jahreszeitlich bedingte Schwankungen von bis zu 0,2 Masse-% (KÖRSCHENS & SPITZL 1978) bzw. bis zu 0,3 Masse-% Corg (LÜTZOW V. 1993, WACHENDORF 1996) im Boden normal sind.

6.2 Möglichkeiten der Verbesserung oder Anpassung an verschiedene Boden- und Klimaeigenschaften

Die geringe Anzahl an Versuchen dieser Arbeit und die z. T. nicht signifikanten Ergebnisse lassen bezüglich einer Verbesserung der Bilanzierungsmethode (KÖRSCHENS et al. 2004) nur erste Empfehlungen zu. So sollte die Bilanzierungsmethode die Reproduktionskoeffizienten der Wirtschaftsdünger bei sehr sandigen Böden mehr anheben, als bei den Ton- und Schluffböden bzw. die unteren Bilanzwerte der Fruchtarten auf sandigen Böden mehr erhöhen, als bei den Ton- und Schluffböden. Die Folge wäre in beiden Fällen eine Reduzierung der Düngemenge.

Eine niederschlagsabhängige Anpassung der Koeffizienten zeichnet sich für Niederschlagswerte oberhalb ca. 700 mm/a ab. Bei trockenen Verhältnissen hingegen wird der Einfluss des Niederschlages auf die Humusbilanz durch andere Einflussgrößen, insbesondere die Bodenart, kompensiert.

Ebenso wie für den Niederschlag deutet sich auch für die Temperatur die Notwendigkeit einer Kompensation durch Anpassung der Koeffizienten an, obwohl auch hier für statistisch reliable Aussagen keine ausreichende Anzahl von Dauerversuchen mit unterschiedlichen Temperaturregimen vorliegt. Beim Standort Thyrow scheinen die zunehmenden Bodentemperaturen einen entscheidenden Einfluss auf die Abnahme des Humusgehaltes des Bodens zu haben. Auch die einschlägige Literatur (SCHEFFER 2002, OADES 1988) deutet auf eine gesteigerte Mineralisation gegenüber der Humifizierung mit zunehmender Temperatur hin.

Insgesamt erscheint eine Klassifizierung der Humusreproduktionskoeffizienten nach den Kriterien der Boden- und Klimaeigenschaften notwendig, um eine höhere Präzision dieser Art der Düngeempfehlung zu erreichen. Die oberen Bilanzwerte könnten, nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, bei Anwendung im konventionellen Landbau außer Acht gelassen werden. Auch OVERESCH/BROLL/HÖPER (2003) errechneten bei Kompostversuchen in Nord-

westdeutschland ein überdurchschnittlich hohes Humusdefizit mit der HE-Methode (LEITHOLD et al. 1997).

6.3 Ökologische Beurteilungen

Die Humusbilanzierungsmethode (KÖRSCHENS et al. 2004) spiegelt in vielen der überprüften Fälle die ungefähren Tendenzen des Humushaushaltes wider. Die Methode ist leicht handhabbar und die dazu notwendigen Bewirtschaftungsdaten stehen jedem Landwirt zur Verfügung. Aus landwirtschaftlicher Sicht ist diese Bilanzierung sicher empfehlenswert. Eine exakte Vorhersage des Kohlenstoffgehalts der Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung kann hierdurch aber nicht erfolgen, denn außer der Fruchtfolge und den Düngermengen fließen sonstige Mechanismen wie Klima- und Bodenkriterien, die den Humusgehalt beeinflussen, nicht in die Berechnung mit ein. Diese Aussage stimmt mit KÖGEL-KNABNER et al. (2005) überein, die zurzeit eine eindeutige Prognose der Entwicklung der C-Pools unter landwirtschaftlicher Nutzung als unmöglich ansehen.

Bei Betrachtung der Güllevarianten hätten die Bilanzwerte, die einen niedrigen bis sehr niedrigen Humussaldo errechnen, theoretisch eine dauerhafte Überdüngung des Bodens zur Folge. Besonders auf sandigen Böden könnte sich dies aufgrund der ungünstigen N-Bilanz umweltschädigend auswirken (GISI 1990). Gülle, die in zu hohen Mengen und zur falschen Zeit ausgebracht wurde, ist ein wesentlicher Verursacher von NH_3-Emissionen in die Atmosphäre und einer NO_3^--Belastung des Grundwassers (KERSCHBERGER & ECKERT 1994). Eine Überdüngung durch Stickstoff wird durch die DÜNGEVERORDNUNG (1996/2003) unterbunden. Bei der Einbringung der Wirtschaftsdünger Stallmist und Gülle gibt es aber noch keine ausreichende Nachweispflicht, was deren Gehalt an Schwermetallen und organischen Schadstoffen betrifft. Auch finden bisher die standortspezifischen Eigenschaften der Böden (Pufferkapazität etc.) noch keine Berücksichtigung (EURICH-MENDEN/WEGENER/HACKENBERG 1996). BEISECKER/GÄTH/FREDE (1996, zit. nach EURICH-MENDEN/WEGENER/HACKENBERG 1996) fordern daher eine Verordnung in der die gesetzlich zulässigen Schadstoffgehalte des Bodens regionalisiert eingeteilt werden sollten.

Eine besondere Problematik eventueller Fehleinschätzungen der Humusbilanzierungsmethode besteht v. a. bei der Unterversorgung der Böden an Humus, die bisher in keiner Weise durch Gesetze oder Verordnungen geregelt ist, sieht man von der guten fachlichen Praxis nach dem BBODSCHG (§ 17,

1998) ab. So würde der Humussaldo der Standorte Thyrow, Jable und wahrscheinlich auch Ultuna nach der Düngeempfehlung der Humusbilanzierungsmethode dauerhaft negativ sein, d. h. der standort- und bewirtschaftungstypische Humusgehalt könnte dadurch nicht aufrechterhalten werden. Sämtliche positiven Eigenschaften, die der Humus auf die physikalischen, chemischen und biologischen Bodenfunktionen hat, würden damit auch reduziert. Nicht zuletzt würde der größte Kohlenstoff-Pool der Erde abgebaut werden, wodurch der globale Kohlenstoffkreislauf erheblich beeinflusst wird (§17 BBODSCHG 1998). Somit sollte diese Methode von Seiten des Bodenschutzes noch geeicht werden. Dazu können nicht nur Dauerversuche aus den unterschiedlichsten Klima- und Bodenregionen betrachtet werden. Es können auch sämtliche Versuche in Betracht gezogen werden, von denen organische Kohlenstoffwerte aus der Vergangenheit vorliegen, die Bewirtschaftungsweise bekannt ist und der aktuelle Humusstatus noch beprobt werden kann. Hier wäre es auch wünschenswert den § 3 Abs. 4 der DIREKTZAHLVERPFLV (2004) dahingehend zu ändern, dass die Humusergebnisse der Landwirte länger als sieben Jahre, mindestens zehn Jahre, aufzubewahren sind. Dann könnte man, bei freiwilliger Bereitstellung seitens der Landwirte, aus einem größeren Datenpool schöpfen. Um Fehlerquellen bezüglich der Corg-Messungen zu reduzieren wäre es sinnvoll eine zentrale Messung durch eine unabhängige Stelle einzuführen. Diese Messungen sollten nach KÖRSCHENS (1982) und CAPRIEL (2003) immer zur gleichen Jahreszeit (am besten im Frühjahr) erfolgen, um jahreszeitlich bedingte Schwankungen weitgehend ausschließen zu können. So sollte auch nicht unmittelbar nach einer Düngegabe die Probenentnahme stattfinden, um die von u. a. HAMER & MARSCHNER (2005) und GISI (1990) aufgeführten positiven „Priming Effects“ auszuschließen.

Die Anlage zu § 3 Abs. 4 und 5 der DIREKTZAHLVERPFLV (2004) nennen einen Grenzwert von > 1 % Humus, die Böden mit < 13 % Ton nicht unterschreiten dürfen. Diese Forderung bedarf nach den Ergebnissen dieser Arbeit einer Korrektur nach unten, da die Sandstandorte Thyrow und Berlin mit einem Tongehalt < 13 Masse-% auch mit der höchsten kombinierten organisch-mineralischen Düngevariante diesen Humusgehalt nicht erreicht haben.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Humusbilanzierungsmethode stellt ein einfach handhabbares Verfahren zur Abschätzung des Humushaushaltes von landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von Düngung und Fruchtfolge dar. Die besten Ergebnisse wurden für mit Stallmist gedüngte Fruchtfolgevarianten erzielt. Die sehr viel deutlichere Unterschätzung der Humusmengen der Böden für Güllevarianten legt eine weitere Prüfung der entsprechenden Bilanzierungskoeffizienten nahe.
Ein ebensolcher Bedarf besteht für die Strohvarianten. Da die Humusbilanzmethode hier allerdings sowohl Über- wie auch Unterschätzungen zeigt, erscheint ein größeres Spektrum verschiedener Strohgaben zur Verbesserung der Vorhersageleistung der Methode notwendig.
Die Humusprognosen der oberen Werte fallen im Durchschnitt der Standorte und Düngemittel zu hoch aus und können nach Erkenntnissen dieser Arbeit im konventionellen Landbau außer Acht gelassen werden. Durch sie würde im Durchschnitt zu viel gedüngt.
Hinsichtlich der Temperatur (°C) deutet sich die Notwendigkeit einer Kompensation durch Anpassung der Koeffizienten an unterschiedliche Temperaturbereiche an, obwohl auch hier für statistisch reliable Aussagen keine ausreichende Anzahl von Dauerversuchen mit unterschiedlichen Temperaturregimen zur Verfügung stand. Von großem Wert wäre die Einbeziehung weiterer Standorte mit langjährigen Jahresmitteltemperaturen < 8,5 °C und > 10 °C.
Hinsichtlich der Beeinflussung der Corg-Gehalte durch unterschiedlich hohe Niederschläge (mm/a) besteht die Tendenz der unteren Bilanzwerte, die tatsächlichen Corg-Verhältnisse der Böden mit zunehmendem Niederschlag besser vorherzusagen. Zur Absicherung dieser Aussage bedarf es allerdings weiterer Beobachtungen. Unter einem Schwellenwert von 690 mm/a Niederschlag scheint eine monokausale Betrachtung nicht zielführend. Offensichtlich spielen Mechanismen des C-Umsatzes und der C-Speicherung im Boden eine große Rolle, z. B. der Grad der C-Sättigung, die C-Mineralisierung, die Rolle verschiedener C-Fraktionen für die C-Fixierung im Boden und die Entstehung refraktärer organischer Substanzen (u. a. MATUS & MAIRE 2000, RAUBUCH & JOERGENSEN 2002, OADES 1995, HAIDER 1999, EKSCHMITT et al. 2005, EUSTERHUES et al. 2003, SPRINGOB et al. 2001). Diese können mit der Humusbilanzmethode in der vorliegenden Form nur indirekt über die Kalibrierungsfaktoren berücksichtigt werden. Auch hier besteht weiterer Forschungsbedarf.
Betrachtet man den Einfluss der Textur, sticht die deutliche Unterschätzung der Bilanzierungsmethode für sandige Böden ins Auge, die den Bilanzfehler für Schluff- und Tonböden um das Fünffache übersteigt. Als eigenständige Gruppe

mit überdurchschnittlich hohen Corg-Gehalten sollten die Schwarzerden eingestuft werden.
Zusammenfassend kann man also hinsichtlich der Rolle der Standortfaktoren Temperatur, Niederschlag und Bodenart sagen, dass eine entsprechende Klassifizierung der Bilanzkoeffizienten der Humusbilanzierungsmethode, wie es z. B. bei dem Humusbilanzierungsprogramm CANDY erfolgt, sehr wünschenswert wäre. Obwohl die Korrelationsberechnungen signifikante Korrelationen zwischen Bodenparametern und Bodenkohlenstoffgehalten über alle Dauerversuche ausweisen, enthalten diese auch regionale Komponenten. In Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen (z. B. SPRINGOB et al. 2001, KOLBE 2004) ist daher der Schluss zu ziehen, dass auch regional abzugrenzende Standortgruppen mit unterschiedlichen Humusreproduktionskoeffizienten gebildet werden sollten. Hinzu kommt die adäquate Berücksichtigung des ökologischen Landbaus.

Ausblickend kann gesagt werden, dass eine verstärkte Diskussion über Möglichkeiten und Verfahren zur In-Wert-Setzung des Landschaftsraumes notwendig ist. Dies würde unter anderem die Nennung nachhaltiger Kriterien für den „optimalen“ Humusgehalt von Böden erfordern. Aus landwirtschaftlicher Sicht unterliegt er z. T. anderen Kriterien, wie z. B. hohem Ertrag und Bodenfruchtbarkeit (vgl. KÖRSCHENS et al. 2004) als aus Sicht des Bodenschutzes, der die einzelnen Bodenfunktionen in den Mittelpunkt stellt (BBODSCHG 1998). Hinsichtlich der Bewertung einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Bewirtschaftung spielt auch die weithin diskutierte N-Bilanz eine entscheidende Rolle (SCHRÖDER 2003), die auch bei der VDLUFA-Humusbilanzmethode ein Kriterium darstellt und je nach Standort ein anderes Optimum hat.
Bei Betrachtung des globalen Klimawandels könnte die Abnahme der Humusgehalte der Böden den Abbau einer CO_2-Senke bedeuten (SCHEFFER 2002). Durch reduzierte und den Ap-Horizont nur allmählich vertiefende Bewirtschaftungsmaßnahmen können selbst sandige und humusarme Böden in ihrem Humusspiegel angehoben werden (MAKOWSKI 2004). So besteht die Möglichkeit, die landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen um 5-14 % zu reduzieren (NEUFELDT 2005). Bezüglich des Einflusses einer reduzierten Bodenbearbeitung auf den Corg-Gehalt des Bodens besteht weiterer Forschungsbedarf (LEITHOLD 2004).
Die aktuelle Biodiversitätsforschung, die durch die Konvention über biologische Vielfalt (CBD) erste gesetzliche Rahmenbedingungen erhielt, stellt die organische Substanz des Bodens indirekt auch in den Blickpunkt. Es ist unumstritten, dass zwischen Humusgehalt und biologischer Aktivität ein enger

Zusammenhang besteht, allein schon als Nährmedium der meisten heterotrophen Organismen (SCHEFFER 2002). Die Biodiversität wird nicht nur von einer bestimmten Humusmenge entschieden, sondern auch von z. B. der Düngerart. Bei einer Stallmistdüngung ist die Diversität der Boden-Mikroflora z. B. höher als bei der alleinigen Mineraldüngung (RAUPP/NIEHUS/OLTMANNS 2004). Häufige Gülleanwendung hingegen führt langfristig zu einer Reduktion der Artenzahl (GISI 1990).

Abschließend bleibt festzuhalten, dass mit der Entwicklung der Humusbilanzierungsmethode ein erster wichtiger Schritt getan ist, um die Bemessung von Düngergaben mit überschaubarem Arbeitsaufwand in Relation zum Corg-Gehalt von Böden zu setzen und damit einen wertvollen Beitrag zur boden- und klimaschutzrelevanten Nachhaltigkeitsdiskussion zu leisten. In ihrer derzeitigen Ausbaustufe legen die festgestellten Prognoseunsicherheiten allerdings zunächst eine Weiterentwicklung der Methode nahe, bevor sie als Instrument im Rahmen der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft etabliert wird.

.

8. Zusammenfassung

Für die Überprüfung der VDLUFA-Humusbilanzierungsmethode wurden Datensätze von 13 verschiedenen landwirtschaftlichen Dauerversuchen mit einem weiten Spektrum der Parameter Niederschlag, Temperatur und Bodenart ausgewertet.

Hierzu wurden in einem ersten Schritt für alle Varianten die Bilanz nach der VDLUFA-Methode mit den unteren und oberen Werten berechnet und diese anschließend mit den tatsächlichen (gemessenen) Corg-Salden der Böden verglichen. Die unteren Werte schätzen im Durchschnitt aller Varianten (ohne Ausreißer) die Corg-Mengen der Böden um 126 kg/ha/a Corg besser ein als die Berechnung mit den oberen Werten. Die unteren Bilanzwerte unterschätzen die Bodenkohlenstoffmengen in 60 % aller Fälle, die oberen Werte unterschätzen die Mengen in 92 %. Die kombinierte organisch-mineralische Düngung bewirkte im Durchschnitt der Varianten eine höhere Corg-Menge in den Böden gegenüber den Nullvarianten zu Versuchsende als die alleinige organische Düngung. Die Stickstoffmineraldüngung bewirkte die geringsten Corg-Zunahmen gegenüber den Nullvarianten.

Die durchschnittliche Abweichung der unteren Bilanzwerte zu den gemessenen Corg-Werten der optimal mit Stallmist gedüngten Varianten beträgt -198 kg/ha/a Corg, bei den oberen Werten sind es schon -394 kg/ha/a Corg. Das ergäbe eine durchschnittliche Düngeempfehlung mit den unteren Werten von ca. 10 t/ha/a Stallmist, ca. 4 t/ha/a Stallmist mehr als nach den Corg-Messungen gedüngt werden müsste. Die Abweichung zwischen den experimentell anhand von Langzeitversuchen ermittelten Stallmistdüngemengen und den mit den unteren Bilanzwerten ermittelten Mengen beträgt hingegen nur 0,4 t/ha/a Stallmist, die oberen Bilanzwerte verschätzen sich demgegenüber um im Mittel 4,5 t/ha/a Stallmist.

Durch den Vergleich der Bilanzwerte mit den experimentell ermittelten Gülledüngemengen sowie zu den tatsächlichen jährlichen Veränderungen an Corg wird deutlich, dass der tatsächliche Humusbedarf durch die Bilanzwerte deutlich überschätzt wird, das heißt, es würde nach den Bilanzwerten um das Doppelte bzw. Dreifache zu viel gedüngt.

Die Analyse der zwei Strohdüngungsvarianten ergibt im Mittel der Versuche eine Abweichung der unteren Bilanzwerte von den gemessenen Werten um -52 kg/ha/a Corg, der oberen Werte um -213 kg/ha/a. Der Vergleich mit den experimentell ermittelten Daten ergibt ein gegensätzliches Ergebnis, sodass keine allgemeine Aussage darüber getroffen werden kann, ob die unteren oder oberen Bilanzwerte die Humusmengen der Strohdüngungsversuche besser einschätzen.

Die Untersuchungen bezüglich des Niederschlags haben ergeben, dass die Niederschlagsmenge den absoluten Corg-Gehalt (Masse-%) des Bodens zwar beeinflusst, dies jedoch erst ab ca. 690 mm/a Niederschlag. Mit Zunahme des Niederschlages über diesen Wert steigt der Corg-Gehalt der Böden an. Darunter ist der Einfluss anderer Variablen, wie des Tongehaltes (Masse-%) der Böden stärker. Die tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes werden vom Niederschlag nur tendenziell, aber nicht signifikant beeinflusst. Ab einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge von ca. 750 mm/a werden die Bilanzierungsergebnisse mit den unteren Bilanzwerten im Vergleich zu den tatsächlichen jährlichen Veränderungen zunehmend genauer. Bei Standorten mit einer Niederschlagshöhe von 480 mm bis 750 mm werden die Berechnungen mit den unteren Bilanzwerten hingegen immer ungenauer. Hier überlagert der Einfluss weiterer Faktoren den des Niederschlags.

Die Analysen hinsichtlich der Bedeutung der Temperatur (° C) auf die Bilanzergebnisse ergaben, dass die Bilanzwerte sich mit zunehmender Temperatur unterschätzen. Ein Zusammenhang zwischen den absoluten Temperaturwerten und dem Corg-Gehalt der Böden konnte nicht konstatiert werden, wohl aber eine Zunahme der tatsächlichen jährlichen Veränderungen des Corg-Gehaltes mit Erhöhung der Temperatur.

Mit Zunahme des Ton-, Schluff- und Feinanteilgehaltes (Masse-%) der Böden konnte ein signifikanter Zusammenhang mit der Zunahme des Corg-Gehaltes (Masse-%) festgestellt werden. Der Feinanteil, aber auch der ausschließliche Tongehalt, hat unter den Bodenarten den größten Einfluss auf den Corg-Gehalt der untersuchten Varianten. Mit Zunahme des Sandgehaltes (Masse-%) der Böden wurde eine gleichzeitige Abnahme der Corg-Gehalte der Böden festgestellt.

Bezüglich der Bilanzauswertungen sind leichte Tendenzen der Bilanzwerte vorhanden, die tatsächlichen organischen Kohlenstoffmengen der „schweren“ Böden mit einem hohen Ton-, Schluff- bzw. Feinanteilgehalt besser einzuschätzen als die Corg-Mengen der Böden mit hohen Sandanteilen. Durch die unteren sowie oberen Bilanzwerte wird die tatsächliche Corg-Bilanz der sandigen Böden stärker unterschätzt (-211 kg/ha/a Corg unterer Wert / -401 kg/ha/a Corg oberer Wert) als die Corg-Werte der „schweren“ Böden (-41 kg/ha/a unterer Wert / -233 kg/ha/a Corg oberer Wert).

Insgesamt erscheint eine Klassifizierung der Humusreproduktionskoeffizienten nach den Kriterien der Boden- und Klimaeigenschaften notwendig, um eine höhere Präzision der Düngeempfehlung nach der VDLUFA-Humusbilanzmethode zu erreichen.

Literaturverzeichnis

AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl., Hannover

AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., Hannover

ANDERSON, D. W., SAGGAR, S., BETTANY, J. R., STEWART, J. W. B. (1981): Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen and sulphur. In: Soil Sci. Soc. Am. J. 45, S. 767 – 772.

ASMUS, F., HERRMANN, V. (1977): Reproduktion der organischen Substanz des Bodens. Fortschrittsberichte für die Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft, Berlin, Bd. 15, H. 11.

ASMUS, F. (1992): Einfluß organischer Dünger auf Ertrag, Humusgehalt des Bodens und Humusreproduktion. Bd. 4 Humushaushalt. Berichte über Landwirtschaft / Sonderheft, S. 127-139, Hamburg, Berlin

BALESDENT, J, CHENU, C., BALABANE, M. (2000): Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. In: Soil and Tillage Research 53, S. 215 – 230.

BAUMANN, E., SCHMIDT, N. (1979): Zum gegenwärtigen Stand der Bilanzierung des Bedarfs an organischer Substanz für die Reproduktion des Humusgehaltes der Böden bei der Freilandgemüseproduktion. In: Arch. Gartenbau, Berlin 27, H. 7, S. 349-356.

BAUMECKER, M., ELLMER, F., CHMIELEWSKI, F.-M. (2002): Langfristige Entwicklung der Humusgehalte eines Sandbodens unter dem Einfluss von Düngung und Klima. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 48, S. 533-542.

BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR BODENKULTUR UND PFLANZENBAU (Hrsg.) (1997): Bodendauerbeobachtungs–Flächen – Bericht nach 10-jähriger Laufzeit 1985 – 1995. Teil III: Boden: Gefüge, Organische Substanz, Bodenorganismen – Vegetation. Bodenkultur und Pflanzenbau, Freising, München

BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, INSTITUT FÜR AGRARÖKOLOGIE, ÖKOLOGISCHEN LANDBAU UND BODENSCHUTZ (Hrsg.) (2003): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland, 7. Aufl., Freising

BBODSCHG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. (Bundes- Bodenschutzgesetz – BBodSchG). Vom 17. März 1998. BGBl I 1998, 502.

BEISECKER, R., GÄTH, S., FREDE, H.-G. (1996): Flächenhafte Verwertung von organischen Abfällen einschließlich der landwirtschaftlichen Wirtschaftsdünger im Spannungsfeld von Bodenschutz und Kreislaufwirtschaft - Studie im Auftrag des Deutschen Bundestages, Gesellschaft für Boden- und Gewässerschutz e. V. (Hrsg.), 55 S. In: EURICH-MENDEN, B., WEGENER, H.-R., HACKENBERG, S. (1996): Humuswirtschaft in Deutschland – Literaturstudie zur vergleichenden Darstellung des Kreislaufs organischer Substanz im Naturhaushalt unter Berücksichtigung des Umfelds in der Industrie-Gesellschaft Deutschlands. Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung, Universität Gießen, Gießen.

BENKENSTEIN, H., KÖHN, W., PAGEL, H., KRÜGER, W. (1999): Einfluss organischer Düngung auf Erträge und Bodenkennwerte im internationalen organischen Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) in Berlin-Dahlem nach 12 Versuchsjahren. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 44, S. 563-578.

BISCHOFF, R. (1995): Der Internationale organische Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) Speyer. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 39, S. 461–471.

BISCHOFF, R., EMMERLING, R. (1997): Der Internationale organische Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) Speyer – Nährstoffbilanzen und Stickstoffdynamik. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 42, S. 57 – 65.

BLUME, H.-P. (Hrsg.) (2004): Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und –belastung. Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen, Landsberg am Lech.

BUYANOVSKY, G. A., ASLAM, M., WAGNER, G. H. (1994): Carbon Turnover in Soil Physical Fractions. In: Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 58, S. 1167-1173.

CAPRIEL, P. (2003): Humusversorgung der Böden. Unterlagen zur FÜAK-Fortbildungsmaßnahme „Grundsätze der guten fachlichen Praxis in der landwirtschaftlichen Bodennutzung“. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Freising.

DEBRUCK, J., BOGUSLAWSKI V., E. (1980): Die Wirkung der Kombination von organischer und mineralischer Düngung auf Grund von langjährigen Versuchen. In: Landw. Forschung, SH 36, S. 405-419.

DEBRUCK, J. (1981): Der Einfluß der Fruchtfolge auf die Bodenfruchtbarkeit. In: Die Bodenkultur, H. 3, S. 207-225, Wien.

DIEZ, T., KRAUSS, M. (1992): Berechnung von Humusbilanzen. In: Schule und Beratung, München, H. 6, S. III-9 – III-11.

DIEZ, T., KRAUSS, M. (1996): Erträge, Produktqualität und N-Bilanzen im Internationalen organischen Stickstoff-Dauerversuch (IOSDV) Puch. In: Arch. Acker- Pfl. Boden. Vol. 40, S. 107-113.

DIEZ, T., BECK, T., BRANDHUBER, R., CAPRIEL, P., KRAUSS, M. (1997): Veränderungen der Bodenparameter im Internationalen organischen Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) Puch nach 12 Versuchsjahren. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 41, S. 113-121.

DIREKTZAHLVERPFLV (2004): Verordnung über die Grundsätze der Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand (Direktzahlungen – Verpflichtungenverordnung – DirektZahlVerpflV). Vom 4. November 2004. BGBl I 2004, 58.

DÜNGEV (1996): Verordnung über die Grundsätze der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung). Vom 26. Januar 1996. BGBl I 1996, 118, zuletzt geändert durch Verordnung vom 14. Februar 2003 (BGBl I S. 235).

EKSCHMITT, K., LIU, M., VETTER, S., FOX, O., WOLTERS, V. (2005): Strategies used by soil biota to overcome soil organic matter stability – why is dead organic matter left over in the soil?. In: Geoderma, Vol. 128, S. 167-176.

ELLMER, F , BAUMECKER, M. (2002): 65 Jahre Dauerversuche. Ergebnisse für nachhaltigen Pflanzenbau auf sandigen Böden. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 48, S. 521-531.

EURICH-MENDEN, B., WEGENER, H.-R., HACKENBERG, S. (1996): Humuswirtschaft in Deutschland – Literaturstudie zur vergleichenden Darstellung des Kreislaufs organischer Substanz im Naturhaushalt unter Berücksichtigung des Umfelds in der Industrie-Gesellschaft Deutschlands. Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung, Universität Gießen, Gießen.

EUSTERHUES, K., RUMPEL, C., KLEBER, M., KÖGEL-KNABNER, I. (2003): Stabilisation of soil organic matter by interactions with minerals as revealed by mineral dissolution and oxidative degradation. In: Organic Geochemistry, Vol. 34, S. 1591-1600.

FINCK, A. (1992): Dünger und Düngung: Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen, Weinheim.

FRANKO, U., ÖLSCHLÄGEL, B., SCHECK, S. (1995): Simulation of temperature-, water-, and nitrogen dynamics using the model CANDY. In: Ecol. Model., Vol. 81, S. 213-222.

FRANKO, U. (1997): Modellierung des Umsatzes der organischen Bodensubstanz. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 41, S. 527-547.

FRÜCHTENICHT, K., HOFFMANN, G., VETTER, H. (1979): Düngen wir richtig im Hinblick auf Bodenfruchtbarkeit, Ertrag und Gewinn? In: Landwirtschaftliche Forschung, SH. 35, S. 152-168.

GALANTINI, J. A., SENESI, N., BRUNETTI, G., ROSELL, R. (2004): Influence of texture on organic matter distribution and quality and nitrogen and sulphur status in semiarid Pampean grassland soils of Argentina. In: Geoderma, Vol. 123, S. 143-152.

GISI, U. (1990): Bodenökologie, Stuttgart, New York

GREENLAND, D. J. (1965a): Interactions between clay and organic compounds in soils. 1. Mechanisms of interaction between clays and defined organic compounds. In: Soils Fert., Vol. 28, 415-425. In: SCHULZ, E. (2000): Einfluss von Bodenart und langjährig differenzierter Düngung auf die Akkumulation und Stabilisierung organischer Bodensubstanz (OBS) in unterschiedlichen Bodenfraktionen. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, 45, S. 365-380.

GREENLAND, D. J. (1965b): Interactions between clay and organic compounds in soils. 2. Adsorption of soil organic compounds and its effects on soil properties. In: Soils Fert., Vol. 28, S. 521-532. In: SCHULZ, E. (2000): Einfluss von Bodenart und langjährig differenzierter Düngung auf die Akkumulation und Stabilisierung organischer Bodensubstanz (OBS) in unterschiedlichen Bodenfraktionen. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, 45, S. 365-380.

GROSS, E. (1983): Die chemischen Bodeneigenschaften des Dikopshofer Dauerdüngungsversuches nach 75 Jahren Versuchsdauer. Diss., Universität Bonn.

HAIDER, K. (1999): Von der toten organische Substanz zum Humus. In: Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 162, S. 363-71.

HAMER, U., MARSCHNER, B. (2005): Priming effects in soils after combined and repeated substrate additions. In: Geoderma, Vol. 128, S. 38-51.

HÖSCH, J., DERSCH, G. (1997): Der internationale Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) Wien nach neun Versuchsjahren. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 42, S. 67-77.

HÖSCH, J., DERSCH, G. (2002): Der internationale organische Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) Wien – Nährstoffbilanzen und Bodenkennwerte. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 48, S. 471-484.

HOFFMANN, S., KISMÁNYOKY, T., BALÁZS, J. (1997): Der internationale organische Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) Keszthely nach 12 Versuchsjahren. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 41, S. 123-132.

HOFFMANN, S., KISMÁNYOKY, T., BALÁZS, J. (1999a): Einfluss langjähriger organischer und mineralischer N-Düngung auf Gehalt an Corg und N-Verlagerung. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 44, S. 69-79.

HOFFMANN, S., KISMÁNYOKY, T., BALÁZS, J. (1999b): Ertragsleistung, N-Bilanz und N-Ausnutzung in Abhängigkeit von organischer und mineralischer N-Düngung. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 44, S. 81-92.

HOLZ, J. (1983): Zur Ertragsleistung, Ertragsentwicklung und Ertragssicherheit auf dem Dauerdüngungsversuch Dikopshof. Diss., Universität Bonn.

http://www.bundesprogramm-oekolandbau.de/projekt_03oe084_1.html vom 12.12.2005

http://www.bundesprogramm-oekolandbau.de/projekt_03oe084_2.html vom 12.12.2005

HUANG, P. M., SCHNITZER, M. (Eds.) (1986): Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. SSSA Publ. Inc., Madison. In: SCHULZ, E. (2000): Einfluss von Bodenart und langjährig differenzierter Düngung auf die Akkumulation und Stabilisierung organischer Bodensubstanz (OBS) in unterschiedlichen Bodenfraktionen. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 45, S. 365-380.

JENKINSON, D. S., RAYNER, J. H. (1977): The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. In: Soil Science, Vol. 123, Nr. 5, S. 298-305.

JENNY, H. (1980): The soil resource - Origin and behaviour. Ecological Studies 37, New York.

KERSCHBERGER, M., ECKERT, H. (1994): Kritische Umweltbelastungen Landwirtschaft (KUL)-Analyse und Bewertung der Kategorie Düngung. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 38, S. 361-371.

KIRCHMANN, H., PERSSON, J., CARLGREN, K. (1994): The Ultuna long-term Soil Organic Matter Experiment, 1956 – 1991. Department of Soil Sciences Reports and Dissertations, 17, Uppsala

KÖGEL-KNABNER, I., LÜTZOW VON, M., FLESSA, H., GUGGENBERGER, G., MARSCHNER, B., MATZNER, E., EKSCHMITT, K. (2005): Mechanisms and regulation of organic matter stabilisation in soils. In: Geoderma, Vol. 128, S. 1-2.

KÖHN, W., LIMBERG, P. (1996): Der internationale organische Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) Berlin-Dahlem nach drei Rotationen. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 40, S. 75-95.

KÖRSCHENS, M., SPITZL, M. (1978): Methodische Untersuchungen zur Bestimmung des C_t- und N_t-Gehaltes im Boden. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 22, S. 705-711.

KÖRSCHENS, M. (1980a): Die Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz von Standortfaktoren und acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen, ihre Beziehungen zu Bodeneigenschaften und Ertrag sowie Ableitung von ersten Bodenfruchtbarkeitskennziffern für den Gehalt des Bodens an organischer Substanz. Diss. B, Akad. d. Landw.-Wiss., FZB Müncheberg. In: KÖRSCHENS, M., SCHULZ, E., KLIMANEK, E.-M., FRANKO, U. (1997): Die organische Bodensubstanz – Bedeutung, Definition, Bestimmung. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, 41, S. 427-433.

KÖRSCHENS, M. (1980b): Beziehung zwischen dem Feinanteil, C_t- und N_t-Gehalt des Bodens. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, 24, S. 585-592.

KÖRSCHENS, M. (1982): Untersuchungen zur zeitlichen Variabilität der Prüfmerkmale C_t und N_t auf Löß-Schwarzerde. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 26, S. 9-13.

KÖRSCHENS, M. (1992): Simulationsmodelle für den Umsatz und die Reproduktion der organischen Substanz im Boden. Bd. 4 Humushaushalt. Berichte über Landwirtschaft / Sonderheft, S. 140-154, Hamburg, Berlin.

KÖRSCHENS, M., STEGEMANN, K., PFEFFERKORN, A., WEISE, V., MÜLLER, A. (1994): Der statische Düngungsversuch Bad Lauchstädt nach 90 Jahren. Stuttgart, Leipzig.

KÖRSCHENS, M. (1997): Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) von Standort und Bewirtschaftung sowie ihr Einfluss auf Ertrag und Bodeneigenschaften. Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 41, S. 435-463.

KÖRSCHENS, M., SCHULZ, E., KLIMANEK, E.-M., FRANKO, U. (1997): Die organische Bodensubstanz – Bedeutung, Definition, Bestimmung. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, 41, S. 427-433.

KÖRSCHENS, M., WEIGEL, A., SCHULZ, E. (1998): Turnover of Soil Organic Matter (SOM) and Long-Term Balances – Tools for Evaluating Sustainable Productivity of Soils. In: Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 161, S. 409-424.

KÖRSCHENS, M, SCHULZ, E. (1999): Die organische Bodensubstanz. Dynamik – Reproduktion – ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte. UFZ-Bericht Nr. 13, Leipzig, Halle.

KÖRSCHENS, M., MERBACH, I., SCHULZ, E. (2002): 100 Jahre Statischer Düngungsversuch Bad Lauchstädt. Herausgegeben anlässlich des Internationalen Symposiums vom 5. bis 7. Juni 2002. UFZ, Leipzig - Halle.

KÖRSCHENS, M. (2003): Die Rolle der organischen Bodensubstanz für Bodenfruchtbarkeit und Umwelt. In: Bundesarbeitskreis Düngung (Hrsg.): Bodenfruchtbarkeit und multifunktionale Landwirtschaft, S. 51-80, Frankfurt.

KÖRSCHENS, M., ROGASIK, J., SCHULZ, E., BÖNING, H., EICH, D., ELLERBROCK, R., FRANKO, U., HÜLSBERGEN, K.-J., KÖPPEN, D., KOLBE, H., LEITHOLD, G., MERBACH, I., PESCHKE, H., PRYSTAV, W., REINHOLD, J., ZIMMER, J. (2004): Humusbilanzierung – Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. VDLUFA Standpunkt vom 30.4.2004, 12 Seiten, Bonn.

KÖRSCHENS, M., ROGASIK, J., SCHULZ, E. (2005): Bilanzierung und Richtwerte organischer Bodensubstanz. In: Landbauforschung Völkenrode, Vol. 55, S. 1-10.

KOLBE, H. (2004): Überprüfung und Anpassung von Bilanzierungsmodellen für Humus an Hand von Langzeitversuchen des Ackerlandes. Abschlussbericht zum Projekt. Fachmaterial Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig.

KOLBE, H. (2005): Anforderungen an die Humusbilanzierung in der Praxis des ökologischen Landbaus. http://orgprints.org/3516/01/Humusbilanzierg_OeL_2005Internet.pdf

KOM (2002): Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss sowie an den Ausschuss der Regionen – Hin zu einer spezifischen Bodenschutzstrategie. Endfassung vom 16.4.2002, Brüssel.

KONONOVA, M. M. (1958): Die Humusstoffe des Bodens.- Dt. Verl. D. Wiss., Vol. 36, Berlin. In: KÖRSCHENS, M., SCHULZ, E., KLIMANEK, E.-M., FRANKO, U. (1997): Die organische Bodensubstanz – Bedeutung, Definition, Bestimmung. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 41, S. 427-433.

KORTLEVEN, J. (1963): Kwantitatieve Aspecten van Humusopbouw en Humusafbraak. Verlagen van landbouwkundige onderzoekingen, Wageningen, Vol. 69, S. 1-109. In: LEITHOLD, G. (1984): Untersuchung der Beziehung zwischen ackerbaulichen Maßnahmen, Ertrag und Humusreproduktion sowie Erarbeitung einer Methode zur Berechnung des Bedarf des Bodens an organischer Primärsubstanz. Universität Halle, Landw. Fakultät, Diss.

KRAUSS, M., POMMER, G., BECK, R., BRANDHUBER, R., CAPRIEL, P. (1997): Dauerversuche mit Fruchtfolgen und Düngung am Staatsgut Puch, Oberbayern. Auswirkungen auf Bodenmerkmale. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 42, S. 193-199.

KRAUSS, M., HEGE, U. (1999): Erträge und N-Verbleib im internationalen organischen Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) Puch. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 44, S. 457-471.

KUNDLER, P., EICH, D., KÖRSCHENS, M., KORIATH, H., ASMUS, F., GÖRLITZ, H., BAUMANN, E. (1977): Empfehlungen zur effektiven Versorgung der Böden mit organischer Substanz. Akad. d. Landw.-Wissensch. d. DDR (Hrsg.): Ackerkultur - Empfehlungen für die Praxis, agra, Markkleeberg, Leipzig.

KUNDLER, P., EICH, D., LISTE, J., RAUHE, K. (1981): Mehr tun als nur ersetzen. Neue Deutsche Bauernzeitung, Berlin 22, Nr. 36, S. 8-9.

KUNTZE, H., ROESCHMANN, G., SCHWERDTFEGER, G. (1994): Bodenkunde. 5. Aufl., Stuttgart.

KWAST, A. (1996): Vorstellung des internationalen organischen Stickstoff-Dauerdüngungsversuchs (IOSDV) Dülmen und Auswertung der Erträge und N- Entzüge. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 40, S. 133-143.

LANG, M. (1995): Berechnung der Humusbilanz. In: Schule und Beratung, München, H. 5, S. IV-11 - IV-12.

LEINWEBER, P., KAHLE, P., SCHULTEN, H.-R. (1991): Einfluß der Qualität der organischen Substanz auf die Konsistenz landwirtschaftlicher Böden. In: Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 154, S. 169-170.

LEITHOLD, G. (1984): Untersuchung der Beziehung zwischen ackerbaulichen Maßnahmen, Ertrag und Humusreproduktion sowie Erarbeitung einer Methode zur Berechnung des Bedarf des Bodens an organischer Primärsubstanz. Universität Halle, Landw. Fakultät, Diss.

LEITHOLD, G. (1991): Humus und Stickstoff- wichtige Einzelmerkmale der Bodenfruchtbarkeit und bestimmende Kriterien für die Analyse, Beurteilung und Gestaltung von Landbewirtschaftungssystemen. In: LEITHOLD, G. (Hrsg.): Stoffkreisläufe – Grundlagen umweltgerechter Landbewirtschaftung: (2. Stoffkreislauf-Symposion am 26.09.1991). Halle, S. 31-40.

LEITHOLD, G., HÜLSBERGEN, K.-J., MICHEL, D., SCHÖNMEIER, H. (1997): Humusbilanzierung – Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. In: DIEPENBROCK, W. (Hrsg.): Umweltverträgliche Pflanzenproduktion. Initiativen zum Umweltschutz, Bd. 5, S. 43-54, Osnabrück.

LEITHOLD, G., HÜLSBERGEN, K.-J. (1998): Humusbilanzierung im ökologischen Landbau. Ökologie und Landbau, 105, S. 32-35.

LEITHOLD, G. (2004): Humusbilanzausgleich durch organische Düngemittel – Chancen für Bioabfallkomposte. In: WIEMER, K., KERN, M. (Hrsg.). Bio- und Restabfallbehandlung VIII, S. 408-420, Witzenhausen-Institut. Neues aus Forschung und Praxis, Gießen.

LETTAU, T., ELLMER, F. (1997): Kohlenstoffgehalte und –bilanzen nach langjährig differenzierter Düngung eines Sandbodens – Ergebnisse aus einem Dauerversuch. VDLUFA-Schriftenreihe 46, Kongressband, Leipzig, S. 387-390.

LÜTZOW VON, M. (1993): Jahreszeitliche Fluktuation der mikrobiellen Biomasse und ihres Stickstoff-Gehaltes in konventionell und biologisch-dynamisch bewirtschafteten Parabraunerden der Friedberger Wetterau. Reihe Agrarwissenschaft, Dissertation, Universität Giessen.

LYKOV, A. M. (1977): Sovremennoe sostojanie i puti ulučšenija gumusovogo balansa pachotnych počv Nečernozemoj zony RSFSR. Izvest. Timirjazevskoj sel'skochoz. Akad. Moskva, Vol. 3, S. 21-28. In: LEITHOLD, G. (1984): Untersuchung der Beziehung zwischen ackerbaulichen Maßnahmen, Ertrag und Humusreproduktion sowie Erarbeitung einer Methode zur Berechnung des Bedarf des Bodens an organischer Primärsubstanz. Universität Halle, Landw. Fakultät, Diss.

MAKOWSKI, N. (2004): Getreideanbau auf Sandböden. In: Getreide Magazin, 9, S.180-183.

MATTSSON, L., CARLGREN, K. (2000): The soil fertility experiment at Kungsgängen and the Ultuna soil organic matter experiment – Sweden. In: KÖRSCHENS, M. (Hrsg.): IOSDV Internationale organische Stickstoffdauerdüngungsversuche. Bericht der Internationalen Arbeitsgemeinschaft Bodenfruchtbarkeit in der Internationalen Bodenkundlichen Union (IUSS). UFZ – Bericht 15, Sektion Bodenforschung, S. 179-189, Leipzig, Halle.

MATUS, F. J., MAIRE G. C. R. (2000): Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. In: Agricultura Técnica (Chile), Vol. 60, S. 112-126.

MERBACH, W., SCHMIDT, L., WITTENMAYER, L. (Hrsg.) (1999): Die Dauerdüngungsversuche in Halle (Saale) – Beiträge aus der Hallenser Pflanzenernährungsforschung. Stuttgart, Leipzig.

MIKUTTA, R., KLEBER, M., JAHN, R. (2005): Poorly crystalline minerals protect organic carbon in clay subfractions from acid subsoil horizons. In: Geoderma, Vol. 128, S. 106-115.

MOLINA, E. J.-A., SMITH, P. (1998): Modeling carbon and nitrogen processes in soils. In: Adv. in Agr. 62, S. 253-298.

MÜCKENHAUSEN, E. (1993): Die Bodenkunde, Frankfurt am Main

MÜLLER, G. (1980): Bodenkunde. Pflanzenproduktion, VEB - Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.

NEUFELDT, H. (2005): Carbon stocks and sequestration potentials of agricultural soils in the federal state of Baden-Württemberg, SW Germany. In: J. Plant Nutr. Soil Sci., Vol. 168, S. 202-211.

NIESCHLAG, F., MÜLLER, M., WESTERHOFF, H. (1956): Der Einfluss einer Aufkalkung auf die Humusversorgung verschiedener Ackerböden. Landwirtschaftliche Forschung, Bd. VIII., H. 3, S. 163-171.

OADES, J. M. (1988): The retention of organic matter in soils. In: Biogeochemistry, 5, S. 35-70.

OADES, J. M. (1995): An overview of processes affecting the cycling of organic carbon in soils. In: ZEPP, R. G., SONNTAG, CH. (Hrsg.): The role of nonliving organic matter in the earth's carbon cycle, S. 293-304, Chichester.

OVERESCH, M., BROLL, G., HÖPER, H. (2003): Humusversorgung von ackerbaulich genutzten Dauerflächen in Niedersachsen – Möglichkeiten des Einsatzes von Kompost, ISPA, Vechta.

PARTON, W. J., SCHIMEL, D. S., COLE, C. V., OJIMA, D. S. (1987): Division S-3-Soil Microbiology and Biochemistry – Analysis of Factors controlling Soil Organic Matter Levels in Great Plains Grasslands. In: Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 51, S. 1173-1179

PESCHKE, H. (1997): 60 Jahre statische Versuche in Thyrow – Bedeutung, Ergebnisse und Ausblick. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 42, S. 169-179.

RASMUSSEN, P. E., COLLINS, H. P. (1991): Long-Term Impacts of Tillage, Fertilizer and Crop Residue on Soil Organic Matter in Temperate Semiarid Regions. In: Advances in Agronomy, Vol. 45. In: KÖRSCHENS, M., SCHULZ, E., KLIMANEK, E.-M., FRANKO, U. (1997): Die organische Bodensubstanz – Bedeutung, Definition, Bestimmung. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, 41, S. 427-433.

RATHKE, G.-W., KÖRSCHENS, M., DIEPENBROCK, W. (2002): Substance and energy balances in the „Static Fertilisation Experiment Bad Lauchstädt". In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 48, S. 423-433.

RAUBUCH, M., JOERGENSEN, R. G. (2002): C and net N mineralisation in a coniferous forest soil: the contribution of the temporal variability of microbial biomass C and N. In: Soil Biology and Biochemistry, Vol. 34, S. 841-849.

RAUHE, K., SCHÖNMEIER, H. (1966): Über die Bedeutung des Humusersatzes beim Übergang zu industriemäßigen Produktionsmethoden. Wiss. Zeitschr. Karl-Marx-Universität Leipzig, math.-naturwiss. Reihe 15, H. 1, S. 1-5.

RAUPP, J., NIEHUS, A., OLTMANNS, M. (2004): Die Diversität der Boden-Mikroflora ist bei Rottemistdüngung höher als bei Mineraldüngung. In: Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss., Vol. 16, S. 149-150.

RIEK, W. (1995): Standorteigenschaften, Wuchsleistung und Schädigung von Kiefern- und Eichenforsten im Berliner Raum. Diss. In: Bodenökologie und Bodengenese, TU Berlin, Institut für Ökologie, Vol. 16, Berlin. In: KÖRSCHENS, M., SCHULZ, E., KLIMANEK, E.-M., FRANKO, U. (1997): Die organische Bodensubstanz – Bedeutung, Definition, Bestimmung. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 41, S. 427-433.

ROGASIK, J., SCHROETTER, S., SCHNUG, E., KUNDLER, P. (2001): Langzeiteffekte ackerbaulicher Maßnahmen auf die Bodenfruchtbarkeit. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 47, S. 3-17.

SAUERBECK, D. (1992): Funktionen und Bedeutung der organischen Substanzen für die Bodenfruchtbarkeit – ein Überblick. Bd. 4 Humushaushalt. Berichte über Landwirtschaft/ Sonderheft, S. 13-29, Hamburg, Berlin.

SCHEFFER, F. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde / Scheffer/Schachtschabel. - 15. Aufl., Heidelberg.

SCHELLBERG, J., HÜGING, H. (1997): Die Entwicklung der Erträge von Getreide, Hackfrüchten und Klee im Dauerdüngungsversuch Dikopshof von 1906 bis 1996. In: Arch. Acker- Pfl. Boden, Vol. 42, S. 303-318.

SCHELLBERG, J., KÖRSCHENS, M., HÜGING, A. (1999): Einfluß unterschiedlicher organischer und mineralischer Düngung auf den C- und N-Gehalt des Bodens im Dauerdüngungsversuch Dikopshof. In: MERBACH, W., KÖRSCHENS, M. (Hrsg.): Dauerdüngungsversuche als Grundlage für nachhaltige Landnutzung und Quantifizierung von Stoffkreisläufen. UFZ-Bericht 24, S. 45-50, Leipzig-Halle.

SCHNIEDER, E. (1990): Die Dauerversuche in Thyrow. In: KÖRSCHENS, M. (Autorenkollektiv) (1990): Dauerfeldversuche: Übersicht, Entwicklung und Ergebnisse von Feldversuchen mit mehr als 20 Jahren Versuchsdauer. Akad. d. Landw.- Wissensch. (Hrsg.), Berlin, S. 205-229.

SCHROEDER, D. (1992): Bodenkunde in Stichworten, Berlin, Stuttgart.

SCHRÖDER, D. (2003): Nachhaltigkeitsindikatoren für die Landwirtschaft und EU-Agrarpolitik. In: Schule und Beratung, H. 2, S. II-2 - II-6.

SCHULTEN, H.-R., LEINWEBER, P., SORGE, C. (1993): Composition of organic matter in particle-size fractions of an agricultural soil. In: Journal of Soil Science, Vol. 44, S. 677-691.

SCHULZ, E. (1990): Die heißwasserextrahierbare C-Fraktion als Kenngröße zur Einschätzung des Versorgungszustandes der Böden mit organischer Substanz (OS). Tag.-Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss., Berlin 295, S. 269-275.

SHEVTSOVA, L., ROMANENKOV, V., SIROTENKO, O., SMITH, P., SMITH, JO U., LEECH, P., KANZYVAA, S., RODIONOVA, V. (2003): Effect of natural and agricultural factors on long-term soil organic matter dynamics in arabel soddy-podzolic soils – modelling and observation. In: Geoderma, Vol. 116, S. 165-189.

SPRINGOB, G., BRINKMANN, S., ENGEL, N., KIRCHMANN, H., BÖTTCHER, J. (2001): Organic C levels of Ap horizons in North German Pleistocene sands as influenced by climate, texture and history of land-use. In: J. Plant Nutr. Soil Sci., Vol 164, S. 681-690.

SPRINGOB, G. (2005): C- und N-Freisetzungen bzw. Festlegungen in sandigen Böden Norddeutschlands nach Nutzungsänderungen – Grundlagen und ein praktischer Ansatz zur Prognose. http://www.lwk-we.de/pdf/Vortrag-Springob.pdf (19.5.2005).

STUMPE, H., GARZ, J., HAGEDORN, E. (1984): Die Dauerdüngungsversuche auf dem Versuchsfeld in Halle. In: KÖRSCHENS, M. (Autorenkollektiv): Dauerfeldversuche der DDR, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Bad Lauchstädt, S. 25-66.

STUMPE, H., GARZ, J., HAGEDORN, E. (1990): Die Dauerdüngungsversuche auf dem Versuchsfeld in Halle. In: KÖRSCHENS, M. (Autorenkollektiv) (1990): Dauerfeldversuche: Übersicht, Entwicklung und Ergebnisse von Feldversuchen mit mehr als 20 Jahren Versuchsdauer. Akad. d. Landw.-Wissensch., Berlin, S. 25-71.

TAJNŠEK, A., ŠANTAVEC, I. (1997): Ertragsbildung und Stickstoffbilanz im IOSDV Ljubljana-Jable nach der ersten Fruchtfolgerotation. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 41, S. 143-153.

TAJNŠEK, A., ŠANTAVEC, I. (1999): Ergebnisse der ersten zwei Fruchtfolgerotationen des IOSDV Rakičan. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 44, S. 473-487.

TAJNŠEK, A. (2003): Vsebnost humusa in nekatere fizikalne lastnosti tal v odvisnosti od gnojenja z organskimi gnojili in dušikom v IOSDV Jable in IOSDV Rakičan. In: ZALEC: Zbornik posveta Deset let trajnih poskusov IOSDV v Sloveniji, Jable in Rakičan 1993-2003. Slovensko agronomosko društvo, S. 112-118, ISBN 961-90884-2-5.

TJURIN, I. W. (1956): Der Bodenbildungsprozeß, die Bodenfruchtbarkeit und das Stickstoffproblem in der Bodenkunde und im Ackerbau. Počvovedenie, 3, S. 1-17 (russ.). In: RAUHE, K., SCHÖNMEIER, H. (1966): Über die Bedeutung des Humusersatzes beim Übergang zu industriemäßigen Produktionsmethoden. Wiss. Zeitschr. Karl-Marx-Universität Leipzig, math.-naturwiss. Reihe 15, H. 1, S. 1-5.

WACHENDORF, C. (1996): Eigenschaften und Dynamik der organischen Bodensubstanz ausgewählter Böden unterschiedlicher Nutzung einer norddeutschen Moränenlandschaft. EcoSys Suppl. – Beiträge zur Ökosystemforschung, Bd. 13.

WALTHER, U., WEISSKOPF, P., OBERHOLZER, H.-R., KNECHT, K. (2001): 50 Jahre organische und mineralische Düngung: Humusgehalte, N-Ausnutzung und N-Bilanzen. In: Arch. Acker- Pfl. Boden., Vol. 46, S. 265-280.

WELTE, E. (1955): Fragen zur praktischen Humusforschung. Die deutsche Landwirtschaft, H. 9, 5, S. 433-438. In: LEITHOLD, G. (1984): Untersuchung der Beziehung zwischen ackerbaulichen Maßnahmen, Ertrag und Humusreproduktion sowie Erarbeitung einer Methode zur Berechnung des Bedarf des Bodens an organischer Primärsubstanz. Universität Halle, Landw. Fakultät, Diss.

WICKE, H.-J., MICHEL, D., LEITHOLD, G., MATTHIES, H. (1990): Fruchtfolgedüngungsversuch Seehausen. In: KÖRSCHENS, M. (Autorenkollektiv) (1990): Dauerfeldversuche: Übersicht, Entwicklung und Ergebnisse von Feldversuchen mit mehr als 20 Jahren Versuchsdauer. Akad. d. Landw.-Wissensch., Berlin, S. 139-154.

Anhang

Tab. A1: Standort- und Bewirtschaftungsdaten zweier IOSD-Versuche aus Puch in Bayern

Standort Nr. 1: Puch, Bayern; Versuche: IOSDV

Anlagejahr	1983
betrachteter Zeitraum / Jahre	1983 - 1994 / 12
nördliche Breite / östliche Länge	48°11" / 11°25"
Höhe (m) über NN	580
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	922
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	7,9
Bodenart	Lu
Tongehalt (Masse-%)	15
Feinschluffgehalt (Masse-%)**	11
Schluffgehalt (Masse-%)	n. v.
Sandgehalt (Masse-%)	n. v.
FAT (Masse-%)	26
Ap-Tiefe (cm)	30
Ld (g/cm³)*	1,6
pH ($CaCl_2$)	6,2
Bodentyp	Parabraunerde (mäßig pseudovergleyt)
N-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	0,124
C/N	8
Anbauverhältnis (%)	Versuch 1a (var 1a.1-1a.8.5): 33,3 Silomais, 33,3 Winterweizen, 33,3 Wintergerste Versuch 1b (var1b.1-1b.4.5): 33,3 Zuckerrüben, 33,3 Winterweizen, 33,3 Wintergerste
Anbau-, Ernte- und Düngeinformation	Zwischenfrüchte wurden nach Wintergerste angebaut und unter-gepflügt Kalkdüngung nur 1984 Gülle: Rindergülle mit Ø 7,5 % TS (Schwankungen bis zu 6,29 %)
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen und N-Bilanz	var1a6.3. Gülle + N 80 kg/ha/a alle anderen Varianten erhielten höchste Erträge bei organischer Düngung mit 160 kg/ha/a N (höchste N Stufe!)
Bewirtschaftung vor der Anlage	Vor 1983 wurden die Parzellen ganz "normal" bewirtschaftet und mit organischem und mineralischem Dünger gedüngt.
Bemerkungen	*nach SCHEFFER (2002, S. 164) gemittelt **FAT (Masse-%) - T (Masse-%) = fU (Masse-%)
Literatur	DIEZ & KRAUSS (1996), KRAUSS et al. (1997), DIEZ et al. (1997), KRAUSS & HEGE (1999), HEGE (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A2: Versuch Nr. 1a (Puch) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Silomais, Winterweizen, Wintergerste und deren Corg-Gehalte (Masse-%) von Versuchsanfang und -ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt/ha/3a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/3a)	Corg (Masse-%) 1983 (Versuchs-beginn)	Corg (Masse-%) 1994 (Versuchs-ende)
var1a.1	ohne	ohne	1,12	1,01
var1a.2.1	ohne	120 (+PK)	1,12	1,02
var1a.2.2	ohne	240 (+PK)	1,12	1,03
var1a.2.3	ohne	360 (+PK)	1,12	1,03
var1a.2.4	ohne	480 (+PK)	1,12	1,03
var1a.3.1	Stallmist 300	ohne	1,08	1,1
var1a.3.2	Stallmist 300	120 (+PK)	1,08	1,07
var1a.3.3	Stallmist 300	240 (+PK)	1,08	1,09
var1a.3.4	Stallmist 300	360 (+PK)	1,08	1,07
var1a.3.5	Stallmist 300	480 (+PK)	1,08	1,11
var1a.4.1	Stroh 105, Wicken-Erbsen-Gemenge 160 FM	ohne	1,05	1,02
var1a.4.2	Stroh 105, Wicken-Erbsen-Gemenge 160 FM	120 (+PK)	1,05	1,01
var1a.4.3	Stroh 105, Wicken-Erbsen-Gemenge 160 FM	240 (+PK)	1,05	1,04
var1a.4.4	Stroh 105, Wicken-Erbsen-Gemenge 160 FM	360 (+PK)	1,05	1,06
var1a.4.5	Stroh 105, Wicken-Erbsen-Gemenge 160 FM	480 (+PK)	1,05	1,04
var1a.5.1	Stroh 105	ohne	1,06	1,02
var1a.5.2	Stroh 105	120 (+PK)	1,06	0,99
var1a.5.3	Stroh 105	240 (+PK)	1,06	1,02
var1a.5.4	Stroh 105	360 (+PK)	1,06	1,04
var1a.5.5	Stroh 105	480 (+PK)	1,06	1,04
var1a.6.1	Gülle (60m³)	ohne	1,06	1,07
var1a.6.2	Gülle (60m³)	120 (+PK)	1,06	1,06
var1a.6.3	Gülle (60m³)	240 (+PK)	1,06	1,06
var1a.6.4	Gülle (60m³)	360 (+PK)	1,06	1,07
var1a.6.5	Gülle (60m³)	480 (+PK)	1,06	1,1
var1a.7.1	Stroh 105, Gülle (60m³)	ohne	1,08	1,11
var1a.7.2	Stroh 105, Gülle (60m³)	120 (+PK)	1,08	1,08
var1a.7.3	Stroh 105, Gülle (60m³)	240 (+PK)	1,08	1,13
var1a.7.4	Stroh 105, Gülle (60m³)	360 (+PK)	1,08	1,11
var1a.7.5	Stroh 105, Gülle (60m³)	480 (+PK)	1,08	1,13
var1a.8.1	Stroh 105, Gülle (60m³), Raps 160 FM	ohne	1,06	1,09
var1a.8.2	Stroh 105, Gülle (60m³), Raps 160 FM	120 (+PK)	1,06	1,08
var1a.8.3	Stroh 105, Gülle (60m³), Raps 160 FM	240 (+PK)	1,06	1,11
var1a.8.4	Stroh 105, Gülle (60m³), Raps 160 FM	360 (+PK)	1,06	1,1
var1a.8.5	Stroh 105, Gülle (60m³), Raps 160 FM	480 (+PK)	1,06	1,13

Quelle: DIEZ et al. (1997)

Tab. A3: Versuch Nr. 1b (Puch) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Zuckerrüben, Winterweizen, Wintergerste und deren Corg-Gehalte (Masse-%) von Versuchsanfang und -ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt/ha/3a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/3a)	Corg (Masse-%) 1983 (Versuchs-beginn)	Corg (Masse-%) 1994 (Versuchs-ende)
var1b.1	ohne	ohne	1,08	1,01
var1b.2.1	ohne	120 (+PK)	1,08	0,98
var1b.2.2	ohne	240 (+PK)	1,08	1
var1b.2.3	ohne	360 (+PK)	1,08	0,99
var1b.2.4	ohne	480 (+PK)	1,08	0,99
var1b.3.1	Stroh 105, Rübenblatt 350	ohne	1,08	1,06
var1b.3.2	Stroh 105, Rübenblatt 350	120 (+PK)	1,08	1,07
var1b.3.3	Stroh 105, Rübenblatt 350	240 (+PK)	1,08	1,06
var1b.3.4	Stroh 105, Rübenblatt 350	360 (+PK)	1,08	1,08
var1b.3.5	Stroh 105, Rübenblatt 350	480 (+PK)	1,08	1,08
var1b.4.1	Stroh 105, Wicken-Erbsen-Gemenge 160, Rübenblatt 350	ohne	1,14	1,15
var1b.4.2	Stroh 105, Wicken-Erbsen-Gemenge 160, Rübenblatt 350	120 (+PK)	1,14	1,14
var1b.4.3	Stroh 105, Wicken-Erbsen-Gemenge 160, Rübenblatt 350	240 (+PK)	1,14	1,15
var1b.4.4	Stroh 105, Wicken-Erbsen-Gemenge 160, Rübenblatt 350	360 (+PK)	1,14	1,15
var1b.4.5	Stroh 105, Wicken-Erbsen-Gemenge 160, Rübenblatt 350	480 (+PK)	1,14	1,18

Quelle: DIEZ et al. (1997)

Tab. A4: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des IOSD-Versuches von Dülmen in Nordrhein-Westfalen

Standort Nr. 2: Dülmen, Nordrhein-Westfalen; Versuch: IOSDV

Anlagejahr	1984
betrachteter Zeitraum	2001
nördliche Breite / östliche Länge	51°51" / 7°16"
Höhe (m) über NN	75-80
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	878
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	9,1
Bodenart	Sl2
Tongehalt (Masse-%)	5
Feinschluffgehalt (Masse-%)	n. v.
Schluffgehalt (Masse-%)	14
Sandgehalt (Masse-%)	81
FAT (Masse-%)	n. v.
Ap-Tiefe (cm)	26
Ld (g/cm³)*	1,56
pH ($CaCl_2$)	6,2
Bodentyp (FAO)	Podsol-Pseudogley
Corg-Gehalt Versuchsbeginn (Masse-%)	n. v.
N-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	0,08
C/N	12,1
Anbauverhältnis (%)	33,3 Mais 33,3 Winterweizen 33,3 Wintergerste
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen	höchste Erträge brachte die kombinierte Stallmist-düngung mit 215 kg/ha/a N
Anbau-, Ernte- und Düngeinformation	Ernterückstände wurden jeweils abgefahren
Bemerkungen	* mittlere Lagerungsdichte der Sandböden dieser Diplomarbeit n. v. = Daten nicht vorhanden alle Varianten mit mineralischer Grunddüngung (P, K, Mg, Ca)
Literatur	KWAST (1996), KWAST (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A5: Versuch Nr. 2 (Dülmen) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Mais, Winterweizen, Wintergerste und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsende

Varianten Nr.	organische Düngung dt/ha/3a	mineralische N-Düngung (kg /ha/3a)	Corg (Masse-%) 2001 (Versuchsende)
var2.1	ohne	ohne	0,97
var2.2	ohne	520	0,83
var2.3.1	Stallmist, 300	ohne	1,05
var2.3.2	Stallmist, 300	520	0,94

Quelle: KWAST (1996), KWAST (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A6: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des IOSD-Versuches von Berlin-Dahlem in Berlin

Standort Nr. 3: Berlin-Dahlem, Berlin; Versuch: IOSDV

Anlagejahr	1984
betrachteter Zeitraum /Jahre	1986-1997 / 12
nördliche Breite / östliche Länge	52°28" / 13°18"
Höhe (m) über NN	51
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	550
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	9,3
Bodenart	Su2
Tongehalt (Masse-%)	4,3
Feinschluffgehalt (Masse-%)	3,3
Schluffgehalt (Masse-%)	22,9
Sandgehalt (Masse-%)	72,8
FAT (Masse-%)*	7,6
Ap-Tiefe (cm)	25
Ld (g/cm³)	1,72
pH ($CaCl_2$)	5,4
Bodentyp (FAO)	Albic Luvisol
N-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	n. v.
C/N	10,6
Anbauverhältnis (%)	33,3 Kartoffeln 33,3 Winterweizen 33,3 Sommergerste var3.4.1 u. 3.4.2: + Zwischenfrucht Ölrettich 33,3
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen und N-Bilanz	var3.3.2 führt zu den höchsten Erträgen bei der Stallmistdüngung mit differenzierter N-Düngung var3.4.2 Beide Düngevarianten werden mit der höchsten Stickstoffmineraldüngungsmenge gedüngt und daher auf dem Sandboden als problematisch angesehen, da die Gefahr einer N- Auswaschung und P- Eutrophierung nicht auszuschließen ist. Die optimale Variante liegt somit um eine N-Düngungsstufe niedriger. Diese Optimalvariante bzgl. Ertrags und Umweltschutzes mit 290 kg/ha/3a N liegt hier jeweils nicht vor (fehlende Corg-Werte)
Bewirtschaftung vor der Anlage	für pflanzenbauliche Versuche oder über Jahrzehnte als normaler Produktionsschlag mit jährlichem Wechsel von Blattfrüchten (v. a. Futterrüben und Kartoffeln) und Halmfrüchten (Roggen, Gerste, Weizen); Düngung im ortsüblichen Bereich (60-120 kg N-Min./ha/a und 20-30 t/ha/2a Stallmist
Bemerkungen	alle Varianten mit mineralischer Grunddüngung (P, K) * FAT (Masse-%) = T (Masse-%) + fU (Masse-%) inerter Corg-Anteil: 0,35-0,4 Masse-% Corg (benachbarte Jahrzehnte lang ungedüngte Parzelle)
Literatur	KÖHN & LIMBERG (1996), BENKENSTEIN et al. (1999), KÖHN (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A7: Versuch Nr. 3 (Berlin-Dahlem) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Kartoffeln, Winterweizen, Wintergerste und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und -ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt FM/ha/3a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/3a)	Corg (Masse-%) 1986 Versuchs-beginn	Corg (Masse-%) 1997 (Versuchs-ende)
var3.1	ohne	ohne	0,51	0,43
var3.2	ohne	430	0,51	0,49
var3.3.1	Stallmist, 300	ohne	0,51	0,55
var3.3.2	Stallmist, 300	430	0,51	0,56
var3.4.1	Stroh, 120 Rübenblatt, 250 Ölrettich nach Aufwuchs, ca. 250	ohne	0,51	0,49
var3.4.2	Stroh, 120 Rübenblatt, 250 Ölrettich nach Aufwuchs, ca. 250	430	0,51	0,53

Quellen: KÖHN & LIMBERG (1996), BENKENSTEIN et al. (1999)

Tab. A8: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des IOSD-Versuches von Speyer in Rheinland-Pfalz

Standort Nr. 4: Speyer, Rheinland-Pfalz; Versuch: IOSDV

Anlagejahr	1984
betrachteter Zeitraum / Jahre	1984 - 1995 / 12
nördliche Breite / östliche Länge	49°22" / 8°25"
Höhe (m) über NN	99
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	583
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	9,8
Bodenart	Sl3
Tongehalt (Masse-%)	8,9
Feinschluffgehalt (Masse-%)	3,6
Schluffgehalt (Masse-%)	22,7
Sandgehalt (Masse-%)	86,4
FAT (Masse-%)*	12,5
Ap-Tiefe (cm)	30
Ld (g/cm³)	1,52
pH ($CaCl_2$)	6,9
Bodentyp (FAO)	Braunerde-Gley
N_t-Gehalt 0-Parzelle Versuchsende (Masse-%)	0,6
C/N	10,4
Anbauverhältnis (%)	33,3 Zuckerrüben 33,3 Winterweizen 33,3 Wintergerste (im 1. Jahr Sommergerste)
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen	im Mittel der organischen Düngungsvarianten liegt das Ertragsoptimum bei 340 kg/ha/3a N, das betrifft var4.3.2
Anbau-, Ernte- und Düngeinformation	alle Varianten: Abfuhr Stroh und Rübenblatt, in Trockenperioden Beregnung, mit mineralischer Grunddüngung (P, K)
Bewirtschaftung vor der Anlage	seit 1958 (25 Jahre) in normaler Fruchtfolge (1/3 Blattfrucht) bewirtschaftet, Ap 25-28 cm, organische Düngung (Ernterückstände und Gründüngung) sowie bedarfsgerechte mineralische Düngung.
Bemerkungen	* FAT (Masse-%) = T (Masse-%) + fU (Masse-%)
Literatur	BISCHOFF (1995), BISCHOFF & EMMERLING (1997), BISCHOFF (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A9: Versuch Nr. 4 (Speyer) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Zuckerrüben, Winterweizen, Wintergerste und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und -ende

Varianten Nr.	organische Düngung (FM dt/ha/3a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/3a)	Corg (Masse-%) 1984 (Versuchsbeginn)	Corg (Masse-%) 1995 (Versuchsende)
var4.1	ohne	ohne	0,83	0,76
var4.2.1	ohne	340	0,83	0,75
var4.2.2	ohne	680	0,83	0,84
var4.3.1	Stallmist, 300	ohne	0,83	0,78
var4.3.2	Stallmist, 300	340	0,83	0,96
var4.3.3	Stallmist, 300	680	0,83	1,13

Quellen: BISCHOFF (1995), BISCHOFF & EMMERLING (1997)

Tab. A10: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des Dauerversuches „Ewiger Roggenbau“ aus Halle in Sachsen-Anhalt

Standort Nr. 5: Halle, Sachsen-Anhalt; Versuch: Ewiger Roggenbau

Anlagejahr	1878
betrachteter Zeitraum / Jahre	1929 - 1957 / 29 Jahre
nördliche Breite / östliche Länge	51°49" / 11°97"
Höhe (m) über NN	113
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	494
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	9,2
Bodenart	Sl3
Tongehalt (Masse-%)	8
Feinschluffgehalt (Masse-%)	5
Schluffgehalt (Masse-%)	23
Sandgehalt (Masse-%)	69
FAT (Masse-%)	13
Ap-Tiefe (cm)	20
Ld (g/cm³)*	1,57
pH ($CaCl_2$)	6,3
Bodentyp (FAO)	Haplic Phaeozem
N-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	n. v.
C/N	13
Anbauverhältnis (%)	100 Roggen
Bemerkungen	* Ld (g/cm³) = Trockenrohdichte (g/cm³) + 0,009 x T (Masse-%) Ab 1928 nur noch geringfügige Veränderungen im Corg-Gehalt des Bodens. In den 50er und 60er Jahren C-Anstieg durch erhebliche Feinstaubbelastung.
Literatur	STUMPE/GARZ/HAGEDORN (1984), STUMPE /GARZ/ HAGEDORN (1990), MERBACH/SCHMIDT/WITTENMAYER (1999)

Tab. A11: Versuch Nr. 5 (Halle) - Düngungsvarianten zum Roggenanbau und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und -ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt/ha/a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	Corg (Masse-%) 1878 (Anlage)	Corg (Masse-%) 1929 (Versuchs-beginn)	Corg (Masse-%) 1957* (Versuchs-ende)
var5.1	ohne	ohne	1,24	1,15	1,15
var5.2	ohne	40 (+PK)	1,24	1,24	1,28
var5.3	Stallmist 120	ohne	1,24	1,64	1,71

*Mittelwert von 1953 bis 1961

Quelle: STUMPE/GARZ/HAGEDORN (1990)

Tab. A12: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des Statischen Düngungsversuches Bad Lauchstädt in Sachsen-Anhalt

Standort Nr. 6: Bad Lauchstädt, Sachsen-Anhalt; Versuch: Statischer Düngungsversuch

Anlagejahr	1902
betrachteter Zeitraum / Laufzeit (a)	1954 - 1989 / 36
nördliche Breite / östliche Länge	51°24" / 11°53"
Höhe (m) über NN	113
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	480
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	8,8
Bodenart	Ut4
Tongehalt (Masse-%)	21
Feinschluffgehalt (Masse-%)	7
Schluffgehalt (Masse-%)	67,8
Sandgehalt (Masse-%)	11,2
FAT (Masse-%)*	28
Ap-Tiefe (cm)	25
Ld (g/cm³)	1,35
pH ($CaCl_2$)	6,6
Bodentyp (FAO-Klassifikation)	Haplic Chernozem
Nt-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	0,13
C/N	12,2:1
organische Düngung (dt/ha/4a)	var6.3.1, 6.3.2: Stalldung 400 (seit 1902) var6.4.1-6.4.2: Stalldung 600 (seit 1906)
Anbauverhältnis (%)	25 Zuckerrüben 25 Sommergerste 25 Kartoffeln 25 Winterweizen
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen und N-Bilanz	var6.3.2
Bemerkungen	* FAT (Masse-%) = T (Masse-%) + fU (Masse-%)
Literatur	KÖRSCHENS et al. (1994), KÖRSCHENS/MERBACH/SCHULZ (2002), KÖRSCHENS (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A13: Versuch Nr. 6 (Bad Lauchstädt) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Zuckerrüben, Sommergerste, Kartoffeln, Winterweizen und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und -ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt/ha/4a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/4a)*	Corg (Masse-%) 1954 (Versuchs-beginn)	Corg (Masse-%) 1989** (Versuchs-ende)
var6.1	ohne	ohne	1,58	1,61
var6.2	ohne	372 (+PK)	1,79	1,77
var6.3.1	Stallmist 400	ohne	1,95	1,98
var6.3.2	Stallmist 400	280 (+PK)	2,06	2,12
var6.4.1	Stallmist 600	ohne	2,07	2,15
var6.4.2	Stallmist 600	280 (+PK)	2,2	2,27

* Mittelwerte von 1954-1989, ** Mittelwerte von 1989-92

QUELLE: KÖRSCHENS et al. (1994)

Tab. A14: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des Nährstoffmangelversuches von Thyrow in Brandenburg

Standort Nr. 7: Thyrow, Brandenburg; Versuch: Nährstoffmangelversuch

Anlagejahr	1937
betrachteter Zeitraum / Jahre	1975 - 1995 / 21
nördliche Breite / östliche Länge	52°25" / 13°24"
Höhe (m) über NN	40
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	496
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	8,6
Bodenart	Su2
Tongehalt (Masse-%)	2,7
Feinschluffgehalt (Masse-%)	2,2
Schluffgehalt (Masse-%)	14,2
Sandgehalt (Masse-%)	83,1
FAT (Masse-%)	4,9
Ap-Tiefe (cm)	30
Ld (g/cm³)*	1,45
pH (KCl)	4,1
pH ($CaCl_2$)	4,4
Bodentyp (FAO)	Albic Luvisol
N-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	n. v.
C/N	12
Anbauverhältnis (%)	25 Kartoffeln 25 Sommergerste 25 Silomais 25 Sommergerste
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen und Umweltschutz	7.3.2 bedingt optimales standorttypisches Bodenkohlenstoffniveau und die höchsten Erträge im Vergleich zu den anderen Varianten des Nährstoffmangelversuches
Anbau-, Ernte- und Düngeinformation	seit 1960 Fruchtfolge und Düngung unverändert, ab 1975 Traktoreinsatz
Bemerkungen	* Ld (g/cm³) = Trockenrohdichte (g/cm³) + 0,009 x T (Masse-%)
Literatur	SCHNIEDER (1990), PESCHKE (1997), BAUMECKER/ELLMER/CHMIELEWSKI (2002)

Tab. A15: Versuch Nr. 7 (Thyrow) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Kartoffeln, Sommergerste, Silomais, Sommergerste und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und -ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt/ha/4a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/4a)	Corg (Masse-%) 1975 (Versuchs-beginn)	Corg (Masse-%) 1995 (Versuchs-ende)
var7.1	ohne	ohne	0,4	0,37
var7.2	ohne	300 (+PK)	0,47	0,41
var7.3.1	Stallmist 600	ohne	0,59	0,54
var7.3.2	Stallmist 600	300 (+PKCa)	0,73	0,63

Quellen: PESCHKE (1997), SCHNIEDER (1990)

Tab. A16: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des Dauerdüngungsversuches vom Dikopshof in Nordrhein-Westfalen

Standort Nr. 8: Dikopshof, Nordrhein-Westfalen; Versuch: Dauerdüngungsversuch

Anlagejahr	1904
betrachteter Zeitraum / Jahre	1979 - 1996 / 18
nördliche Breite / östliche Länge*	50°49" / 6°59"
Höhe (m) über NN	62
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	635
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	9,7
Bodenart	Ut2
Tongehalt (Masse-%)	10
Feinschluffgehalt (Masse-%)	6,6
Schluffgehalt (Masse-%)	74,9
Sandgehalt (Masse-%)	15
FAT (Masse-%)	16,6
Ap-Tiefe (cm)	30
Ld (g/cm³)	1,52
pH ($CaCl_2$) 1997	6,6
Bodentyp (FAO)	Luvisol
N-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	0,08
C/N	10,6
Anbauverhältnis (%)	20 Zuckerrüben 20 Winterweizen 20 Winterroggen 20 Perserklee 20 Kartoffeln
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen und Umweltschutz	var8.3.2 wird unter den hier vorhandenen Varianten als die optimale angesehen (Stallmist 12,5 t + NPKCa ergaben mehr Erträge, 10 t Stallmist+NPK sind wahrscheinlich ökologisch verträglicher)
Bemerkungen	* Lage von Wesseling, seit 1967 Versuchsaufbau unverändert
Literatur	GROSS (1983), HOLZ (1983), SCHELLBERG & HÜGING (1997), SCHELLBERG/KÖRSCHENS/HÜGING (1999)

Tab. A17: Versuch Nr. 8 (Dikopshof) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Zuckerrüben, Winterweizen, Winterroggen, Perserklee, Kartoffeln und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und -ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt/ha/5a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/5a)	Corg (Masse-%) 1979 (Versuchs-beginn)	Corg (Masse-%) 1996 (Versuchs-ende)
var8.1	ohne	ohne	1,05	0,86
var8.2	ohne	230 (+PK)	1,05	0,88
var8.3.1	Stallmist 600	ohne	1,05	1,21
var8.3.2	Stallmist 600	230 (+PK)	1,05	1,27

Quellen: GROSS (1983), SCHELLBERG & HÜGING (1997), SCHELLBERG/ KÖRSCHENS/HÜGING (1999)

Tab. A18: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des IOSD-Versuches aus Wien (Österreich)

Standort Nr. 9: Wien, Österreich; Versuch: IOSDV

Anlagejahr	1986
betrachteter Zeitraum / Jahre	1986 - 1998 (Frühjahr) / 12
nördliche Breite / östliche Länge	48° / 16°
Höhe (m) über NN	147
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	489
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	9,5
Bodenart	Lt2
Tongehalt (Masse-%)	25,24
Feinschluffgehalt (Masse-%)	9,3
Schluffgehalt (Masse-%)	46,5
Sandgehalt (Masse-%)	28,27
FAT (Masse-%)*	34,54
Ap-Tiefe (cm)	25
Ld (g/cm³)	1,48
pH (CaCl2) (1986)	7,5
Bodentyp	Tschernosem
Nt-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	0,156
C/N	8,2
Anbauverhältnis (%)	33,3 Zuckerrüben 33,3 Winterweizen 33,3 Wintergerste
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen und Umweltschutz	var9.3.3 und var9.4.3 erzielen die signifikant höchsten Erträge
Anbau-, Ernte- und Düngeinformation	var9.1, var9.2.1-9.2.4: Stroh und Rübenblatt abgefahren var9.3.1-9.3.5: Stroh und Rübenblatt abgefahren, NPK Zusatzdüngung zu Zuckerrüben var9.4.1-9.4.5: Stroh und Rübenblatt abgefahren, NPK Zusatzdüngung zu Zuckerrüben und Wintergerste bei Bedarf künstliche Beregnung der Zuckerrübe Rindergülle: TS-Gehalt 7,5 % (Schwankungsbereich 4,5-10,4 %)
Bewirtschaftung vor der Anlage	ortsübliche Düngung, ohne spezielle An- oder Abreicherung Fruchtfolge: Getreide, Zuckerrübe, Kartoffel, Ernterückstände verblieben auf dem Feld
Bemerkungen	*FAT (Masse-%) = T (Masse-%) + fU (Masse-%)
Literatur	HÖSCH & DERSCH (1997), HÖSCH & DERSCH (2002), HÖSCH (2005 pers. Mitteilungen)

Tab. A19: Versuch Nr. 9 (Wien) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Zuckerrüben, Winterweizen, Wintergerste und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und –ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt/ha/3a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/3a)	Corg (Masse-%) 1986 (Versuchs-beginn)	Corg (Masse-%) 1998 (Versuchs-ende)
var9.1	ohne	ohne	1,41	1,63
var9.2.1	ohne	130	1,51	1,42
var9.2.2	ohne	260	1,48	1,66
var9.2.3	ohne	390	1,47	1,51
var9.2.4	ohne	520	1,47	1,73
var9.3.1	Stallmist, 300 FM	ohne	1,41	1,73
var9.3.2	Stallmist, 300 FM	130	1,51	1,44
var9.3.3	Stallmist, 300 FM	260	1,47	1,6
var9.3.4	Stallmist, 300 FM	390	1,57	1,55
var9.3.5	Stallmist, 300 FM	520	1,49	1,66
var9.4.1	Gülle (50m³)	ohne	1,44	1,7
var9.4.2	Gülle (50m³)	130	1,47	1,53
var9.4.3	Gülle (50m³)	260	1,51	1,62
var9.4.4	Gülle (50m³)	390	1,42	1,46
var9.4.5	Gülle (50m³)	520	1,57	1,81

Quellen: HÖSCH & DERSCH (1997), HÖSCH (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A20: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des IOSD-Versuches aus Ljubljana-Jable in Slowenien

Standort Nr. 10: Ljubljana-Jable, Slowenien; Versuch: IOSDV

Anlagejahr	1992
betrachteter Zeitraum / Jahre	1992 - 2001 / 10
nördliche Breite / östliche Länge	46°8" / 14°34"
Höhe (m) über NN	305
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	1397
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	9,7
Bodenart	Uls
Tongehalt (Masse-%)	16,77
Feinschluffgehalt (Masse-%)	13,43
Schluffgehalt (Masse-%)	55,53
Sandgehalt (Masse-%)	27,71
FAT-Gehalt (Masse-%)*	30,2
Ap-Tiefe (cm)	25
Ld (g/cm³)	1,55
pH ($CaCl_2$)	5,4
Bodentyp (FAO)	Dystric Gleysol
N-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	n. v.
C/N	8,5
Anbauverhältnis (%)	33,3 Mais 33,3 Winterweizen 33,3 Sommergerste
Anbau-, Ernte- und Düngeinformation	var10.1: Stroh abgefahren var10.2: Stroh abgefahren var10.3.1-10.3.4: Stroh abgefahren alle Varianten mit mineralischer Grunddüngung (P, K)
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen und N-Bilanz	var10.3.3 (hohe Erträge, aber im Gegensatz zu 10.3.4 keine hohen N-Verluste)
Bewirtschaftung vor der Anlage	viele Jahre lang nach der "guten fachlichen Praxis", ohne Stallmist, aber mit mineralischer Düngung (ca. 146 kg/N/a) gedüngt, Fruchtfolge Mais-Winterweizen-Gerste
Bemerkungen	*FAT (Masse-%) = T (Masse-%) + fU (Masse-%)
Literatur	TAJNŠEK & ŠANTAVEC (1997), TAJNŠEK & ŠANTAVEC (1999), TAJNŠEK (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A21: Versuch Nr. 10 (Jable) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Mais, Winterweizen, Sommergerste und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und –ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt/ha/3a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/3a)	Corg (Masse-%) 1992* (Versuchs-beginn)	Corg (Masse-%) 2001* ** (Versuchs-ende)
var10.1	ohne	ohne	1,41	1,28
var10.2	ohne	660	1,41	1,33
var10.3.1	Stallmist, 300	ohne	1,41	1,38
var10.3.2	Stallmist, 300	220	1,41	1,36
var10.3.3	Stallmist, 300	440	1,41	1,4
var10.3.4	Stallmist, 300	660	1,41	1,36

* Humusgehalt (Masse-%) : 1,72

** gemittelter Wert aus den Jahren 2000-2002

Quellen: TAJNŠEK & ŠANTAVEC (1997), TAJNŠEK (2003)

Tab. A22: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des IOSD-Versuches aus Rakičan in Slowenien

Standort Nr. 11: Rakičan, Slowenien; Versuch: IOSDV

Anlagejahr	1992
betrachteter Zeitraum / Jahre	1992 - 2001 / 10
nördliche Breite / östliche Länge	46°38" / 14°11"
Höhe (m) über NN	184
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	810
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	9,4
Bodenart	Sl4
Tongehalt (Masse-%)	14,67
Feinschluffgehalt (Masse-%)	5,68
Schluffgehalt (Masse-%)	31,2
Sandgehalt (Masse-%)	54,04
FAT-Gehalt (Masse-%)*	20,35
Ap-Tiefe (cm)	25
Ld (g/cm³)	1,52
pH ($CaCl_2$)	7,04
Bodentyp (FAO-Klassifikation)	Gleyic Arenosol
N-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	n. v.
C/N	9,5
Anbauverhältnis (%)	33,3 Mais 33,3 Winterweizen 33,3 Wintergerste var11.4.1-11.4.4: +33,3 Ölrettich (Zwischenfrucht)
Anbau-, Ernte- und Düngeinformation	var11.1: Stroh abgefahren var11.2: Stroh abgefahren var11.3.1-11.3.4: Stroh abgefahren alle Varianten mit mineralischer Grunddüngung (P, K)
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen und N-Bilanz	11.3.2, bei den höheren N-Düngungsstufen sind die N-Bilanzen oberhalb des tolerierbaren Limits, die Erträge sind aber bei var11.3.4 am höchsten
Bewirtschaftung vor der Anlage	viele Jahre lang nach der "guten fachlichen Praxis", ohne Stallmist, aber mit mineralischer Düngung (ca. 146 kg/N/a) gedüngt, Fruchtfolge Mais-Winterweizen-Gerste
Bemerkungen	* FAT (Masse-%) = T (Masse-%) + fU (Masse-%)
Literatur	TAJNŠEK & ŠANTAVEC (1999), TAJNŠEK (2003), TAJNŠEK (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A23: Versuch Nr. 11 (Rakičan) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Mais, Winterweizen, Wintergerste und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und –ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt/ha/3a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/3a)	Corg (Masse-%) 1992* (Versuchs-beginn	Corg (Masse-%) 2001* ** (Versuchs-ende)
var11.1	ohne	ohne	1,04	1,07
var11.2	ohne	660	1,04	1,05
var11.3.1	Stallmist, 300	ohne	1,04	1,11
var11.3.2	Stallmist, 300	220	1,04	1,16
var11.3.3	Stallmist, 300	440	1,04	1,16
var11.3.4	Stallmist, 300	660	1,04	1,14

* Humusgehalt (Masse-%) : 1,72

** gemittelter Wert aus den Jahren 2000-2002

Quellen: TAJNŠEK & ŠANTAVEC (1999), TAJNŠEK (2003)

Tab. A24: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des IOSD-Versuches aus Keszthely in Ungarn

Standort Nr. 12: Keszthely, Ungarn; Versuch: IOSDV

Anlagejahr	1984
betrachteter Zeitraum / Jahre	1984-1992 / 9
nördliche Breite / östliche Länge	46°47" / 17°15"
Höhe (m) über NN	112
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	700
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	10,8
Bodenart	Ls2
Tongehalt (Masse-%)	21,3
Feinschluffgehalt (Masse-%)	7,3
Schluffgehalt (Masse-%)	44,8
Sandgehalt (Masse-%)	33,9
FAT (Masse-%)	28,6
Ap-Tiefe (cm)	30
Ld (g/cm³)	1,53
pH (H_2O)	7,1
pH ($CaCl_2$)	6,5
Bodentyp (FAO)	Eutric Cambisol
N-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	n. v.
C/N	10,1
Anbauverhältnis (%)	33,3 Mais 33,3 Winterweizen 33,3 Wintergerste
Anbau-, Ernte- und Düngeinformation	var12.1: Stroh abgefahren var12.2-12.2.4: Stroh abgefahren alle Varianten mit mineralischer Grunddüngung (P, K)
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen und N-Bilanz	var12.3.3, (bei Winterweizen befand sich das Ertragsmaximum bei var12.3.4, bei Mais bei var12.3.2, bei Wintergerste bei var12.3.3; N-Bilanzen sind bei den Stallmistvarianten ab 480 kg N/ha/3a nicht mehr umweltverträglich)
Bewirtschaftung vor der Anlage	ungenaue Angaben, doch der Boden des IOSDV war nicht abgemagert, Anbau von Getreide, Mais und evtl. Gras, Ausgangswert von 0,81Masse-% Corg entspricht Mittelwert von ungedüngten Parzellen der Region!
Literatur	HOFFMANN/KISMÁNYOKY/BALÁZS (1997), HOFFMANN/KISMÁNYOKY/BALÁZS (1999a), HOFFMANN/KISMÁNYOKY/BALÁZS (1999b), HOFFMANN (2005, pers. Mitteilungen), KISMÁNYOKY (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A25: Versuch Nr. 12 (Keszthely) - Düngungsvarianten zu der Fruchtfolge Mais, Winterweizen, Wintergerste und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und –ende

Varianten Nr.	organische Düngung (dt/ha/3a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/3a)	Corg (Masse-%) 1984 Versuchs-beginn	Corg (Masse-%) 1992 Versuchs-ende
var12.1	ohne	ohne	0,81	1,1
var12.2.1	ohne	160	0,81	1,11
var12.2.2	ohne	320	0,81	1,1
var12.2.3	ohne	480	0,81	1,12
var12.2.4	ohne	640	0,81	1,1
var12.3.1	Stallmist, 350 FM / 118 TM	ohne	0,81	1,19
var12.3.2	Stallmist, 350 FM / 118 TM	160	0,81	1,21
var12.3.3	Stallmist, 350 FM / 118 TM	320	0,81	1,22
var12.3.4	Stallmist, 350 FM / 118 TM	480	0,81	1,28
var12.3.5	Stallmist, 350 FM / 118 TM	640	0,81	1,25

Quellen: HOFFMANN/KISMÁNYOKY/BALÁZS (1997), (1999a), (1999b)

Tab. A26: Standort- und Bewirtschaftungsdaten des Soil organic matter-Versuches (Frame 56) aus Ultuna in Schweden

Standort Nr. 13: Ultuna, Schweden; Versuch: Soil organic matter / Frame 56

Anlagejahr	1957
betrachteter Zeitraum / Jahre	1957-1991 / 35
nördliche Breite / östliche Länge	59° 49" / 17° 39"
Höhe (m) über NN	12
Jahresdurchschnittsniederschlag (mm)	660
Jahresdurchschnittstemperatur (°C)	5,5
Bodenart	Lt3
Tongehalt (Masse-%)	36,5
Feinschluffgehalt (Masse-%)	n. v.
Schluffgehalt (Masse-%)	41
Sandgehalt (Masse-%)	22,5
FAT (Masse-%)	n. v.
Ap-Tiefe (cm)*	20
Ld (g/cm³)	1,34
pH (H_2O)	6,4
pH ($CaCl_2$)	5,8
Bodentyp (FAO)	Eutric Cambisol
N-Gehalt 0-Parzelle (Masse-%)	0,11
C/N**	13,5
Anbauverhältnis (%)	40 Gerste 20 Hafer 11,43 Futterraps 8,57 Futterrüben 5,71 Steckrüben 5,71 Frühlingsweizen 2,86 Winterweizen 2,86 Öl-Raps 2,86 Senf
Bemerkungen	*manuelle Einarbeitung des organischen Düngers in 20 cm Tiefe, sonst keine Angaben zur Ap-Tiefe vorhanden **1,48 : 0,11 = 13,46
Anbau-, Ernte- und Düngeinformation	13.4.1: Stroh wird abgefahren 13.4.2: Stroh wird abgefahren
optimale Düngungsvariante bzgl. Erträgen	keine der Varianten ergibt optimale Erträge, lediglich var13.4.2 erzielt zufrieden stellende Erträge
Bewirtschaftung vor der Anlage	unklar, Fruchtfolge vielleicht Getreide (Gerste, Wi-Weizen, Hafer, evtl. auch Ölpflanzen) und 30 % Klee und Gras; Düngung durch evtl. maximal 6 t/ha/a Stallmist + 50 kg N (+PK)
Literatur	KIRCHMANN/PERSSON/CARLGREN (1994), MATTSSON & CARLGREN (2000), MATTSSON (2005, pers. Mitteilungen)

Tab. A27: Versuch Nr. 13 (Ultuna) - Düngungsvarianten des Dauerversuches „Soil organic matter“ und deren Corg-Gehalte (Masse-%) zu Versuchsbeginn und –ende

Varianten Nr.	organische Düngung (t/ha/a)*	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	Corg (Masse-%) Herbst 1956 (Versuchs-beginn)	Corg (Masse-%) 1987	Corg (Masse-%) 1991 (Versuchs-ende)	Corg (Masse-%) 1999
var13.1	ohne	ohne	1,48	1,04	1,04	1
var13.2.1	ohne	80 Calciumnitrat	1,5	1,34	1,45	1,4
var13.2.2	ohne	80 Ammoniumsulfat	1,56	1,35	1,38	1,31
var13.2.3	ohne	80 Calcium-cyanamid	1,49	1,4	1,48	1,47
var13.3.1	Stallmist (Zersetzter Rindermist) 4,33 TM (17,32 FM**)	ohne	1,49	1,92	2,2	2,12
var13.4.1	Stroh 3,79 TM (4,41 FM***)	ohne	1,51	1,5	1,67	1,55
var13.4.2	Stroh 3,79 TM (4,41 FM***)	80 Calciumnitrat	1,53	1,72	1,98	1,9

* errechnet durch (C*1,72+N+P+K+S+Asche):a
**bei 25 % TM
***bei 86 % TM
Quelle: KIRCHMANN/PERSSON/CARLGREN (1994)

Tab. A28: Vergleich der unteren und oberen Bilanzwerte mit den gemessenen jährlichen Corg-Veränderungen (kg/ha/a). Die Differenzen sind durch den Median, das 25. Perzentil, das 75. Perzentil und den mittlerer Betrag der Abweichung dargestellt. Berücksichtigt werden 123 Varianten von zwölf verschiedenen Standorten. Den Bilanzberechnungen liegt ein Gülle TM-Gehalt von 6 % zugrunde

Variante	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
puc1a1	-373,33	-533,33	-440,00	66,67	-93,33
puc1a21	-373,33	-533,33	-400,00	26,67	-133,33
puc1a22	-373,33	-533,33	-360,00	-13,33	-173,33
puc1a23	-373,33	-533,33	-360,00	-13,33	-173,33
puc1a24	-373,33	-533,33	-360,00	-13,33	-173,33
puc1a31	26,67	-133,33	80,00	-53,33	-213,33
puc1a32	26,67	-133,33	-40,00	66,67	-93,33
puc1a33	26,67	-133,33	40,00	-13,33	-173,33
puc1a34	26,67	-133,33	-40,00	66,67	-93,33
puc1a35	26,67	-133,33	120,00	-93,33	-253,33
puc1a41	19,33	-140,67	-120,00	139,33	-20,67
puc1a42	19,33	-140,67	-160,00	179,33	19,33
puc1a43	19,33	-140,67	-40,00	59,33	-100,67
puc1a44	19,33	-140,67	40,00	-20,67	-180,67
puc1a45	19,33	-140,67	-40,00	59,33	-100,67
puc1a51	-23,33	-183,33	-160,00	136,67	-23,33
puc1a52	-23,33	-183,33	-280,00	256,67	96,67
puc1a53	-23,33	-183,33	-160,00	136,67	-23,33
puc1a54	-23,33	-183,33	-80,00	56,67	-103,33
puc1a55	-23,33	-183,33	-80,00	56,67	-103,33
puc1a61	-253,33	-413,33	40,00	-293,33	-453,33
puc1a62	-253,33	-413,33	0,00	-253,33	-413,33
puc1a63	-253,33	-413,33	0,00	-253,33	-413,33
puc1a64	-253,33	-413,33	40,00	-293,33	-453,33
puc1a65	-253,33	-413,33	160,00	-413,33	-573,33
puc1a71	96,67	-63,33	120,00	-23,33	-183,33
puc1a72	96,67	-63,33	0,00	96,67	-63,33
puc1a73	96,67	-63,33	200,00	-103,33	-263,33
puc1a74	96,67	-63,33	120,00	-23,33	-183,33
puc1a75	96,67	-63,33	200,00	-103,33	-263,33
puc1a81	139,33	-62	120,00	19,33	-182,00
puc1a82	139,33	-62	80,00	59,33	-142,00
puc1a83	139,33	-62	200,00	-60,67	-262,00
puc1a84	139,33	-62	160,00	-20,67	-222,00
puc1a85	139,33	-62	280,00	-140,67	-342,00
puc1b1	-440	-700	-280,00	-160,00	-420,00
puc1b21	-440	-700	-400,00	-40,00	-300,00
puc1b22	-440	-700	-320,00	-120,00	-380,00
puc1b23	-440	-700	-360,00	-80,00	-340,00
puc1b24	-440	-700	-360,00	-80,00	-340,00

Fortsetzung von Tab. A28:

Variante	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
puc1b31	3,33	-256,67	-80,00	83,33	-176,67
puc1b32	3,33	-256,67	-40,00	43,33	-216,67
puc1b33	3,33	-256,67	-80,00	83,33	-176,67
puc1b34	3,33	-256,67	0,00	3,33	-256,67
puc1b35	3,33	-256,67	0,00	3,33	-256,67
puc1b41	46	-214	40,00	6,00	-254,00
puc1b42	46	-214	0,00	46,00	-214,00
puc1b43	46	-214	40,00	6,00	-254,00
puc1b44	46	-214	40,00	6,00	-254,00
puc1b45	46	-214	160,00	-114,00	-374,00
ber31	-440	-600	-286,67	-153,33	-313,33
ber32	-440	-600	-71,67	-368,33	-528,33
ber331	-40	-200	143,33	-183,33	-343,33
ber332	-40	-200	179,17	-219,17	-379,17
ber341	93,33	-33,33	-71,67	165,00	38,34
ber342	93,33	-33,33	71,67	21,66	-105,00
spe41	-440	-700	-266,00	-174,00	-434,00
spe421	-440	-700	-304,00	-136,00	-396,00
spe422	-440	-700	38,00	-478,00	-738,00
spe431	-40	-300	-190,00	150,00	-110,00
spe432	-40	-300	494,00	-534,00	-794,00
spe433	-40	-300	1140,00	-1180,00	-1440,00
hal51	-280	-400	0,00	-280,00	-400,00
hal52	-280	-400	43,31	-323,31	-443,31
hal53	200	80	75,79	124,21	4,21
lau61	-520	-775	18,75	-538,75	-793,75
lau62	-520	-775	-18,75	-501,25	-756,25
lau631	-120	-375	28,12	-148,13	-403,13
lau632	-120	-375	56,25	-176,25	-431,25
lau641	80	-175	75,00	5,00	-250,00
lau642	80	-175	65,62	14,38	-240,63
thy71	-470	-650	-62,14	-407,86	-587,86
thy72	-470	-650	-124,29	-345,71	-525,71
thy731	130	-50	-103,57	233,57	53,57
thy732	130	-50	-207,14	337,14	157,14
dik81	-296	-460	-481,33	185,33	21,33
dik82	-296	-460	-430,67	134,67	-29,33
dik831	184	20	405,33	-221,33	-385,33
dik832	184	20	557,33	-373,33	-537,33
wie91	-440	-700	678,33	-1118,33	-1378,33
wie921	-440	-700	-277,50	-162,50	-422,50
wie922	-440	-700	555,00	-995,00	-1255,00
wie923	-440	-700	123,33	-563,33	-823,33
wie924	-440	-700	801,67	-1241,67	-1501,67
wie931	-40	-300	986,67	-1026,67	-1286,67

Fortsetzung von Tab. A28:

Variante	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
wie932	-40	-300	-215,83	175,83	-84,17
wie933	-40	-300	400,83	-440,83	-700,83
wie934	-40	-300	-61,67	21,67	-238,33
wie935	-40	-300	524,17	-564,17	-824,17
wie941	-340	-600	801,67	-1141,67	-1401,67
wie942	-340	-600	185,00	-525,00	-785,00
wie943	-340	-600	339,17	-679,17	-939,17
wie944	-340	-600	123,33	-463,33	-723,33
wie945	-340	-600	740,00	-1080,00	-1340,00
jab101	-373,33	-533,33	-503,75	130,42	-29,58
jab102	-373,33	-533,33	-310,00	-63,33	-223,33
jab1031	27	-133,33	-116,25	143,25	-17,08
jab1032	27	-133,33	-193,75	220,75	60,42
jab1033	27	-133,33	-38,75	65,75	-94,58
jab1034	27	-133,33	-193,75	220,75	60,42
rak111	-373,33	-533,33	114,00	-487,33	-647,33
rak112	-373,33	-533,33	38,00	-411,33	-571,33
rak1131	27	-133,33	266,00	-239,00	-399,33
rak1132	27	-133,33	456,00	-429,00	-589,33
rak1133	27	-133,33	456,00	-429,00	-589,33
rak1134	27	-133,33	380,00	-353,00	-513,33
kes121	-373,33	-533,33	1479,00	-1852,33	-2012,33
kes1221	-373,33	-533,33	1530,00	-1903,33	-2063,33
kes1222	-373,33	-533,33	1479,00	-1852,33	-2012,33
kes1223	-373,33	-533,33	1581,00	-1954,33	-2114,33
kes1224	-373,33	-533,33	1479,00	-1852,33	-2012,33
kes1231	280	120	1938,00	-1658,00	-1818,00
kes1232	280	120	2040,00	-1760,00	-1920,00
kes1233	280	120	2091,00	-1811,00	-1971,00
kes1234	280	120	2397,00	-2117,00	-2277,00
kes1235	280	120	2244,00	-1964,00	-2124,00
ult131	-337,14	-500	-336,91	-0,23	-163,09
ult1321	-337,14	-500	-38,29	-298,85	-461,71
ult1322	-337,14	-500	-137,83	-199,31	-362,17
ult1323	-337,14	-500	-7,66	-329,48	-492,34
ult1331	355,66	192,8	543,66	-188,00	-350,86
ult1341	103,86	-59	122,51	-18,65	-181,51
ult1342	103,86	-59	344,57	-240,71	-403,57
			Median	-114,00	-340,00
			25. Perzentil	-413,33	-587,86
			75. Perzentil	43,33	-173,33
			Betrag mittlerer Abweichung	374,51	510,98
			n	123,00	123,00

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A29: Alle Varianten, deren mit den unteren und oberen Bilanzwerten bilanzierter Corg-Gehalt (kg/ha/a) um mehr als 1000 kg/ha/a von den gemessenen Ergebnissen abweicht (≙ Ausreißer). 17 von insgesamt 123 Varianten sind Ausreißer. Den Bilanzberechnungen liegt ein Gülle TM-Gehalt von 6 % zugrunde

Variante	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
spe433	-40	-300	1140,00	-1180,00	-1440,00
wie91	-440	-700	678,33	-1118,33	-1378,33
wie922	-440	-700	555,00	-995,00	-1255,00
wie924	-440	-700	801,67	-1241,67	-1501,67
wie931	-40	-300	986,67	-1026,67	-1286,67
wie941	-340	-600	801,67	-1141,67	-1401,67
wie945	-340	-600	740,00	-1080,00	-1340,00
kes121	-373,33	-533,33	1479,00	-1852,33	-2012,33
kes1221	-373,33	-533,33	1530,00	-1903,33	-2063,33
kes1222	-373,33	-533,33	1479,00	-1852,33	-2012,33
kes1223	-373,33	-533,33	1581,00	-1954,33	-2114,33
kes1224	-373,33	-533,33	1479,00	-1852,33	-2012,33
kes1231	280	120	1938,00	-1658,00	-1818,00
kes1232	280	120	2040,00	-1760,00	-1920,00
kes1233	280	120	2091,00	-1811,00	-1971,00
kes1234	280	120	2397,00	-2117,00	-2277,00
kes1235	280	120	2244,00	-1964,00	-2124,00

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A30: Vergleich der Differenzen zwischen den unteren und oberen Bilanzwerten mit den gemessenen Corg-Veränderungen (kg/ha/a) ohne Ausreißer (s. Tab. A29). Berücksichtigt werden 106 Varianten von elf verschiedenen Standorten. Den Bilanzberechnungen liegt ein Gülle TM-Gehalt von 6 % zugrunde

Variante	Differenz zwischen unteren Bilanzwerten (A) und gemessenen Corg-Mengen (kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen oberen Bilanzwerten (B) und gemessenen Corg-Mengen (kg/ha/a) (C)
puc1a1	66,67	-93,33
puc1a21	26,67	-133,33
puc1a22	-13,33	-173,33
puc1a23	-13,33	-173,33
puc1a24	-13,33	-173,33
puc1a31	-53,33	-213,33
puc1a32	66,67	-93,33
puc1a33	-13,33	-173,33
puc1a34	66,67	-93,33
puc1a35	-93,33	-253,33
puc1a41	139,33	-20,67
puc1a42	179,33	19,33
puc1a43	59,33	-100,67

Fortsetzung von Tab. A30:

Variante	Differenz zwischen unteren Bilanzwerten (A) und gemessenen Corg-Mengen (kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen oberen Bilanzwerten (B) und gemessenen Corg-Mengen (kg/ha/a) (C)
puc1a44	-20,67	-180,67
puc1a45	59,33	-100,67
puc1a51	136,67	-23,33
puc1a52	256,67	96,67
puc1a53	136,67	-23,33
puc1a54	56,67	-103,33
puc1a55	56,67	-103,33
puc1a61	-293,33	-453,33
puc1a62	-253,33	-413,33
puc1a63	-253,33	-413,33
puc1a64	-293,33	-453,33
puc1a65	-413,33	-573,33
puc1a71	-23,33	-183,33
puc1a72	96,67	-63,33
puc1a73	-103,33	-263,33
puc1a74	-23,33	-183,33
puc1a75	-103,33	-263,33
puc1a81	19,33	-182,00
puc1a82	59,33	-142,00
puc1a83	-60,67	-262,00
puc1a84	-20,67	-222,00
puc1a85	-140,67	-342,00
puc1b1	-160,00	-420,00
puc1b21	-40,00	-300,00
puc1b22	-120,00	-380,00
puc1b23	-80,00	-340,00
puc1b24	-80,00	-340,00
puc1b31	83,33	-176,67
puc1b32	43,33	-216,67
puc1b33	83,33	-176,67
puc1b34	3,33	-256,67
puc1b35	3,33	-256,67
puc1b41	6,00	-254,00
puc1b42	46,00	-214,00
puc1b43	6,00	-254,00
puc1b44	6,00	-254,00
puc1b45	-114,00	-374,00
ber31	-153,33	-313,33
ber32	-368,33	-528,33
ber331	-183,33	-343,33
ber332	-219,17	-379,17
ber341	165,00	38,34
ber342	21,66	-105,00
spe41	-174,00	-434,00
spe421	-136,00	-396,00
spe422	-478,00	-738,00
spe431	150,00	-110,00
spe432	-534,00	-794,00
hal51	-280,00	-400,00

Fortsetzung von Tab. A30:

Variante	Differenz zwischen unteren Bilanzwerten (A) und gemessenen Corg-Mengen (kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen oberen Bilanzwerten (B) und gemessenen Corg-Mengen (kg/ha/a) (C)
hal52	-323,31	-443,31
hal53	124,21	4,21
lau61	-538,75	-793,75
lau62	-501,25	-756,25
lau631	-148,13	-403,13
lau632	-176,25	-431,25
lau641	5,00	-250,00
lau642	14,38	-240,63
thy71	-407,86	-587,86
thy72	-345,71	-525,71
thy731	233,57	53,57
thy732	337,14	157,14
dik81	185,33	21,33
dik82	134,67	-29,33
dik831	-221,33	-385,33
dik832	-373,33	-537,33
wie921	-162,50	-422,50
wie923	-563,33	-823,33
wie932	175,83	-84,17
wie933	-440,83	-700,83
wie934	21,67	-238,33
wie935	-564,17	-824,17
wie942	-525,00	-785,00
wie943	-679,17	-939,17
wie944	-463,33	-723,33
jab101	130,42	-29,58
jab102	-63,33	-223,33
jab1031	143,25	-17,08
jab1032	220,75	60,42
jab1033	65,75	-94,58
jab1034	220,75	60,42
rak111	-487,33	-647,33
rak112	-411,33	-571,33
rak1131	-239,00	-399,33
rak1132	-429,00	-589,33
rak1133	-429,00	-589,33
rak1134	-353,00	-513,33
ult131	-0,23	-163,09
ult1321	-298,85	-461,71
ult1322	-199,31	-362,17
ult1323	-329,48	-492,34
ult1331	-188,00	-350,86
ult1341	-18,65	-181,51
ult1342	-240,71	-403,57
Betrag mittlerer Abweichung	184,50	310,59
Maximale Abweichung (wie953)	679,17	939,17
n	106,00	106,00

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A31: Gegenüberstellung des Betrags der mittleren Abweichung zwischen dem Bilanzsaldo (unterer und oberer Wert) und der gemessenen Veränderung an Corg (kg/ha/a) bei allen 32 ausschließlich mit Stallmist gedüngten Varianten hinsichtlich der unterschiedlichen Stallmist-Trockenmassegehalte von 25, 35 und 55 %

Variante	Stallmist FM t/ha/a	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	Differenz zwischen der gemessenen Veränderung an Corg und den unteren Bilanzwerten (Corg kg/ha/a)			Differenz zwischen der gemessenen Veränderung an Corg und den oberen Bilanzwerten (Corg kg/ha/a)		
			25 % Trockenmasse	35 % Trockenmasse	55 % Trockenmasse	25 % Trockenmasse	35 % Trockenmasse	55 % Trockenmasse
puc1a31	10	0	-53,33	107,00	506,67	-213,33	-53,33	346,67
puc1a32	10	40	66,67	227,00	626,67	-93,33	66,67	466,67
puc1a33	10	80	-13,33	147,00	546,67	-173,33	-13,33	386,67
puc1a34	10	120	66,67	227,00	626,67	-93,33	66,67	466,67
puc1a35	10	160	-93,33	67,00	466,67	-253,33	-93,33	306,67
ber331	10	0	-183,33	-23,33	376,67	-343,33	-103,33	216,67
ber332	10	143,33	-219,17	-59,17	340,83	-379,17	-139,17	180,83
spe431	10	0	150,00	310,00	710,00	-110,00	50,00	450,00
spe432	10	113,33	-534,00	-374,00	26,00	-794,00	-634,00	-234,00
spe433	10	226,66	-1180,00	-1020,00	-620,00	-1440,00	-1280,00	-880,00
hal53	12	0	124,21	316,21	796,21	4,21	196,21	649,21
lau631	10	0	-148,13	11,88	411,88	-403,13	-243,13	156,88
lau632	10	70	-176,25	-16,25	383,75	-431,25	-271,25	128,75
lau641	15	0	5,00	245,00	845,00	-250,00	-10,00	590,00
lau642	15	70	14,38	254,38	854,38	-240,63	-0,62	599,38
thy731	15	0	233,57	473,57	1073,57	53,57	293,57	893,57
thy732	15	75	337,14	577,14	1177,14	157,14	397,14	997,14
dik831	12	0	-221,33	-29,33	450,67	-385,33	-193,33	286,67
dik832	12	46	-373,33	-181,33	298,67	-537,33	-345,33	134,67
wie931	10	0	-1026,67	-866,67	-466,67	-1286,67	-1126,67	-726,67
wie932	10	43,33	175,83	335,83	735,83	-84,17	75,83	475,83
wie933	10	86,67	-440,83	-280,83	119,17	-700,83	-540,83	-140,83
wie934	10	130	21,67	181,67	581,67	-238,33	-78,33	321,67
wie935	10	173,33	-564,17	-404,17	-4,17	-824,17	-664,17	-264,17
jab1031	10	0	143,25	303,25	703,25	-17,08	142,92	542,92
jab1032	10	73,33	220,75	380,75	780,75	60,42	220,42	620,42
jab1033	10	146,67	65,75	225,75	625,75	-94,58	65,42	465,42
jab1034	10	220	220,75	380,75	780,75	60,42	220,42	620,42
rak1131	10	0	-239,00	-79,00	321,00	-399,33	-239,33	160,67
rak1132	10	73,33	-429,00	-269,00	131,00	-589,33	-429,33	-29,33
rak1133	10	146,67	-429,00	-269,00	131,00	-589,33	-429,33	-29,33
rak1134	10	220	-353,00	-193,00	207,00	-513,33	-353,33	46,67
Betrag der mittleren Abweichung			266,34	276,13	522,69	369,18	282,40	400,48

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A32: Vergleich der Differenz des Corg-Wertes zu Versuchsende (kg/ha) von vier verschiedenen Klassen mit unterschiedlich hohen N-Mineraldüngergaben mit dem Corg-Wert der jeweiligen Nullparzellen (dargestellt in Tab. A32I) zu Versuchsende

I. Nullvarianten:

Variante	Düngung	Corg (kg/ha) zu Versuchsende
puc1a1	ohne	48480,00
puc1b1	ohne	48480,00
ber31	ohne	18490,00
spe41	ohne	34656,00
hal51	ohne	36110,00
lau61	ohne	54337,50
thy71	ohne	16095,00
dik81	ohne	39216,00
jab101	ohne	49600,00
rak111	ohne	40660,00
ult131	ohne	27872,00

I. Klasse 40-50 kg/ha/a N-Min.

Variante	N-Min. (kg/ha/a)	organischer Dünger	Corg (kg/ha) zu Versuchsende (A)	Differenz zwischen (A) und der Corg-Menge zu Versuchsende der Nullparzelle (Corg kg/ha)
puc1a21	40	ohne	48960	480
hal52	40	ohne	40192	4082
dik82	46	ohne	40128	912
			Mittelwert:	1824,67

II. Klasse 75-95 kg/ha/a N-Min.

Variante	N-Min. kg/ha/a	organischer Dünger	Corg (kg/ha) zu Versuchsende (A)	Differenz zwischen (A) und der Corg-Menge zu Versuchsende der Nullparzelle (Corg kg/ha)
puc1a22	80,00	ohne	49440,00	960,00
lau62	93,00	ohne	59737,50	5400,00
thy72	75,00	ohne	17835,00	1740,00
ult1322	80,00	ohne	36984,00	9112,00
			Mittelwert:	4303

III. Klasse 110-130 kg/ha/a N-Min.

Variante	N-Min. kg/ha/a	organischer Dünger	Corg (kg/ha) zu Versuchsende (A)	Differenz zwischen (A) und der Corg-Menge zu Versuchsende der Nullparzelle (Corg kg/ha)
puc1a23	120,00	ohne	49440,00	960,00
ber32	143,33	ohne	21070,00	2580,00
spe421	113,33	ohne	34200,00	-456,00
			Mittelwert:	1028,00

IV. Klasse 160-230 kg/ha/a N-Min.

Variante	N-Min. kg/ha/a	organischer Dünger	Corg (kg/ha) zu Versuchsende (A)	Differenz zwischen (A) und der Corg-Menge zu Versuchsende der Nullparzelle (Corg kg/ha)
puc1a24	160,00	ohne	49440,00	960,00
spe422	226,66	ohne	38304,00	3648,00
jab102	220,00	ohne	51537,50	1937,50
rak112	220,00	ohne	39900,00	-760,00
			Mittelwert:	1446,00

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A33: Einteilung von 31 mit unterschiedlich hohen N-Mineraldüngergaben (einschließlich der Nullvarianten) gedüngten Varianten in fünf Klassen unter Betrachtung der gemessenen jährlichen Veränderung der Corg-Mengen (kg/ha) des Ap (Mittelwert) und dessen Differenz zu den unteren und oberen Bilanzwerten. Die Differenzen sind als mittlerer Betrag der Abweichung angegeben

Klasse I: N 0 kg/ha/a

Variante	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	untere Bilanzwerte (Corg kg//ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
puc1a1	0,00	-373,33	-533,33	-440,00	66,67	-93,33
ber31	0,00	-440,00	-600,00	-286,67	-153,33	-313,33
spe41	0,00	-440,00	-700,00	-266,00	-174,00	-434,00
hal51	0,00	-280,00	-400,00	0,00	-280,00	-400,00
lau61	0,00	-520,00	-775,00	18,75	-538,75	-793,75
thy71	0,00	-470,00	-650,00	-62,14	-407,86	-587,86
dik81	0,00	-296,00	-460,00	-481,33	185,33	21,33
jab101	0,00	-373,33	-533,33	-503,75	130,42	-29,58
rak111	0,00	-373,33	-533,33	114,00	-487,33	-647,33
ult131	0,00	-337,14	-500,00	-336,91	-0,23	-163,09
			Mittelwert	-224,41		
				Betrag der mittleren Abweichung	242,39	348,36

Klasse II: N 40-50 kg/ha/a

Variante	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
puc1a21	40,00	-373,33	-533,33	-400,00	26,67	-133,33
hal52	40,00	-280,00	-400,00	43,31	-323,31	-443,31
dik82	46,00	-296,00	-460,00	-430,67	134,67	-29,33
wie921	43,33	-440,00	-700,00	-277,50	-162,50	-422,50
			Mittelwert	-266,21		
				Betrag der mittleren Abweichung	161,79	257,12

Klasse III: N 75-95 kg/ha/a

Variante	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
puc1a22	80,00	-373,33	-533,33	-360,00	-13,33	-173,33
lau62	93,00	-520,00	-775,00	-18,75	-501,25	-756,25
thy72	75,00	-470,00	-650,00	-124,29	-345,71	-525,71
ult1322	80,00	-337,14	-500,00	-137,83	-199,31	-362,17
			Mittelwert	-160,22		
				Betrag der mittleren Abweichung	264,90	454,37

Klasse IV: N 110-130 kg/ha/a

Variante	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
puc1a23	120,00	-373,33	-533,33	-360,00	-13,33	-173,33
ber32	143,33	-440,00	-600,00	-71,67	-368,33	-528,33
spe421	113,33	-440,00	-700,00	-304,00	-136,00	-396,00
wie923	130,00	-440,00	-700,00	123,33	-563,33	-823,33
			Mittelwert	-153,08		
				Betrag der mittleren Abweichung	270,25	480,25

Klasse V: N 160-230 kg/ha/a

Variante	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
Puc1a24	160,00	-373,33	-533,33	-360,00	-13,33	-173,33
Spe422	226,66	-440,00	-700,00	38,00	-478,00	-738,00
jab102	220,00	-373,33	-533,33	-310,00	-63,33	-223,33
rak112	220,00	-373,33	-533,33	38,00	-411,33	-571,33
			Mittelwert	-148,50		
				Betrag der mittleren Abweichung	241,50	426,50

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A34: Differenzen des Corg-Wertes (kg/ha) zwischen den mit ausschließlich unterschiedlichen Mengen an Stallmist gedüngten Varianten zu Versuchsende und des Corg-Wertes der Nullvarianten zu Versuchsende von zehn Standorten (Nullvarianten s. Tab. A32)

Variante	Stallmist (t/ha/a)	Corg (kg/ha) Versuchsende (A)	Differenz von (A) zur Nullparzelle (Corg kg/ha)
puc1a31	10,00	52800	4320
ber331	10,00	23650	5160
spe431	10,00	35568	912
hal53	12,00	53694	17584
lau631	10,00	66825	12488
thy731	15,00	23490	7395
dik831	12,00	55176	15960
jab1031	10,00	53475	3875
rak1131	10,00	42180	1520
ult1331	17,32	58960	31088
		Mittelwert	10030,15

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A35: Vergleich der gemessenen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha/a) mit den unteren und oberen Bilanzwerten der „optimal“ mit Stallmist und N-Mineraldüngung gedüngten Varianten. Angabe der Differenz der Corg-Mengen (kg/ha) zwischen Versuchsende der Nullparzellen und den Optimalvarianten

Variante	Stallmist-FM (t/ha/a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	Differenz zur Nullparzelle (Corg kg/ha)	gemessene Differenz zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende der optimalen Stallmist + N Variante (Corg kg/ha/a) (A)	gemessene Differenz zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende der Nullvariante (Corg kg/ha/a) (B)	Differenz zwischen A und B (Corg kg/ha/a)	Differenz zwischen A und B umgerechnet in Stallmist (t/ha/a) (Humusreproduktions-koeffizient 40)
dik832	12,00	46,00	18696	557,33	-481,33	1038,67	25,97
lau632	10,00	70,00	17213	56,25	18,75	37,50	0,94
rak1132	10,00	73,33	3420	456,00	114,00	342,00	8,55
thy732	15,00	75,00	11310	-207,14	-62,14	-145,00	-3,63
puc1a33	10,00	80,00	3840	40,00	-440,00	480,00	12,00
spe432	10,00	113,33	9120	494,00	-266,00	760,00	19,00
ber332	10,00	143,33	5590	179,17	-286,67	465,83	11,65
jab1033	10,00	146,67	4650	-38,75	-503,75	465,00	11,63
Mittelwert:	10,88		9230			430,50	
Mittelwert in Stallmist-FM (t/ha/a)							10,76

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A36: Vergleich der neun „optimal“ mit Stallmist und Stickstoffmineraldünger gedüngten Varianten zwischen der gemessenen jährlichen Veränderung an Corg (kg/ha/a) und den unteren und oberen Bilanzwerten. Die mittlere Abweichung der Ergebnisse ist in Betrag angegeben (Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27)

Variante	Stallmist FM t/ha/a	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
dik832	12,00	46,00	184,00	20,00	557,33	-373,33	-537,33
lau632	10,00	70,00	-120,00	-375,00	56,25	-176,25	-431,25
rak1132	10,00	73,33	27,00	-133,33	456,00	-429,00	-589,33
thy732	15,00	75,00	130,00	-50,00	-207,14	337,14	157,14
puc1a33	10,00	80,00	26,67	-133,33	40,00	-13,33	-173,33
wie933	10,00	86,67	-40,00	-300,00	400,83	-440,83	-700,83
spe432	10,00	113,33	-40,00	-300,00	494,00	-534,00	-794,00
ber332	10,00	143,33	-40,00	-200,00	179,17	-219,17	-379,17
jab1033	10,00	146,67	27,00	-133,33	-38,75	65,75	-94,58
					Betrag der mittleren Abweichung	287,65	428,55
		Summe	155	-1605	1938	-1783	-3543
		Mittelwert	17	-178	215	-198	-394

Tab. A37: Experimentell ermittelter und mit den unteren Werten bilanzierter Humusbedarf (verrotteter Stallmist t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Stallmistvarianten (organisch-mineralisch)

Variante	Stallmist-FM (t/ha/a) (≙ experimentell ermittelt)	untere Bilanzwerte (Stallmist t/ha/a) (Corg kg/ha/a*25/1000)	obere Bilanzwerte (Stallmist t/ha/a) (Corg kg/ha/a*25/1000)	Düngungsempfehlung nach den unteren Bilanzwerten (Stallmist t/ha/a)	Düngungsempfehlung nach den oberen Bilanzwerten (Stallmist t/ha/a)	gemessene jährliche Bilanz (Stallmist-FM t/ha; errechnet mit dem Humusreproduktionsfaktor 40)	Düngungsempfehlung nach den gemessenen jährlichen Veränderungen (Stallmist t/ha/a)
dik832	12	4,60	0,50	7,40	11,50	13,9	-1,93
lau632	10	-3,00	-9,38	13,00	19,38	1,4	8,59
rak1132	10	0,68	-3,33	9,32	13,33	11,4	-1,40
thy732	15	3,25	-1,25	11,75	16,25	-5,2	20,20
puc1a33	10	0,67	-3,33	9,33	13,33	1,0	9,00
wie933	10	-1,00	-7,50	11,00	17,50	10,0	0,00
spe432	10	-1,00	-7,50	11,00	17,50	12,4	-2,40
ber332	10	-1,00	-5,00	11,00	15,00	4,5	5,50
jab1033	10	0,68	-3,33	9,32	13,33	-1,0	11,00
Mittelwert	10,78			10,35	15,24		6,08

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A38: Vergleich der Differenz des Corg-Wertes zu Versuchsende (kg/ha) zwischen den mit ausschließlich unterschiedlichen Mengen an Gülle gedüngten Parzellen (Optimalvariante und ausschließlich Gülle) und des Corg-Wertes der Nullparzellen von Puch

Variante	Gülle Düngung (t/ha/a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	untere Bilanzwerte (kg Corg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (kg Corg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (kg Corg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) kg Corg /ha/a	Differenz zwischen (B) und (C) kg Corg/ha/a	Corg (kg/ha) Versuchsende	Differenz zur Nullparzelle (Corg kg/ha) s. Tab. A32
puc1a63	20	80	-193	-353,33	0	-193	-353,33	50880	2400
puc1a61	20	0						51360	2880

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1 + A2

Tab. A39: Humusreproduktionskoeffizient der den optimalen Gülleversuch des Standortes Puch am besten einschätzt

Variante	Gülle FM (t/ha/a)	Humus-reproduktions-koeffizient für Gülle (kg Humus-C/t Gülle)	unterer Bilanzwert (kg/ha)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (kg/ha/a)
puc1a63	20	18	-13,33	0

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1+A2

Tab. A40: Vergleich der zwei „optimal“ mit Gülle und N-Min. gedüngten Varianten zwischen den gemessenen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha) und den unteren und oberen Bilanzwerten. Die mittlere Abweichung der Ergebnisse ist in Betrag angegeben

Variante	Gülle Düngung (t/ha/a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)		Differenz zwischen (A) und (C) Corg kg/ha/a	Differenz zwischen (B) und (C) Corg kg/ha/a
puc1a63	20	80,00	-193	-353,33	0		-193	-353,33
wie943	16,7	86,67	-290	-550	339,17		-629,17	-889,17
		Summe des Betrages	483	903,33	339,17	Betrag der mittleren Abweichung	411,08	621,25
		Summe	-483	-903,33	339,17		-822,17	-1242,5
		Mittelwert	-241,5	-451,66	169,59		-411,08	-621,25

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1, A2, A18 + A19

Tab. A41: Experimentell ermittelter und mit den unteren Werten bilanzierter Humusbedarf (Gülle t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Güllevarianten (organisch-mineralisch)

Variante	Gülle FM t/ha/a (experimentell ermittelt)	untere Bilanzwerte (Gülle t/ha/a) (Corg kg/ha/a*111,11/1000)	obere Bilanzwerte (Gülle t/ha/a) (Corg kg/ha/a*111,11/1000)	Düngungsempfehlung nach den unteren Bilanzwerten (Gülle t/ha/a)	Düngungsempfehlung nach den unteren Bilanzwerten (Gülle t/ha/a)	tatsächliche jährliche Bilanz (Gülle-FM t/ha; errechnet mit dem Humusreproduktionsfaktor 9)	Düngungsempfehlung nach den gemessenen jährlichen Veränderungen (Gülle t/ha/a)
puc1a63	20	-21,44	-39,26	41,44	59,26	0	20
wie943	16,67	-32,22	-61,11	48,89	77,78	37,68	-21
Mittelwert	18,335			45,165	68,52		-0,5

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1, A2, A18 + A19

Tab. A42: Differenz des Corg-Wertes (kg/ha) zu Versuchsende zwischen den mit unterschiedlichen Mengen an Stroh gedüngten Parzellen und dem Corg-Wert der Nullparzellen (s. Tab. A32)

Variante	organische Düngung (t/ha/a)	Corg (kg/ha) Versuchsende (A)	Differenz zwischen (A) und der Nullparzelle zum Versuchsende (Corg kg/ha)
puc1a51	Stroh 3,5	48960,00	480
ult1341	Stroh 4,4	44756,00	16884

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1, A2 + A27

Tab. A43: Vergleich der zwei „optimal“ mit Stroh und N-Min. gedüngten Varianten zwischen der gemessenen jährlichen Veränderung an Corg (kg/ha) und den unteren und oberen Bilanzwerten. Die mittlere Abweichung der Ergebnisse ist in Betrag angegeben. Außerdem Vergleich der Differenzen zu Versuchsende zwischen dem Corg-Gehalt (kg/ha) der Stroh-Optimalvarianten und der jeweiligen Nullvariante

Variante	Stroh (t/ha/a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)		Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)	Corg (kg/ha) Versuchsende	Differenz zur Nullparzelle (Corg kg/ha) s. Tab. A32
puc1a53	3,50	80,00	-23,33	-183,33	-160,00		136,67	-23,33	48960	480
ult1342	4,41	80,00	103,9	-59,00	344,57		-240,71	-403,57	53064	25192
						Betrag der mittleren Abweichung	188,69	213,45		
		Summe	80,53	-242,33	184,57		-104,04	-426,90		
		Mittel-wert	40,27	-121,17	92,29		-52,02	-213,45		12836

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1, A2, A26 + A27

Tab. A44: Unterschied der organischen Bodenkohlenstoffgehalte der Nullvariante und der Strohvarianten mit gestaffelten N-Mineraldüngergaben zwischen Versuchsbeginn (1983) und Versuchsende (1994) des IOSDV(a) von Puch in Bayern

Variante	Stroh t/ha/a	N-Min. kg/ha/a	Corg (t/ha) Versuchsbeginn (1983) (A)	Corg (t/ha) Versuchsende (1994) (B)	jährliche Veränderungen Corg (t/ha) (A-B)/12a
puc1a1	0,0	0	53,8	48,5	-0,44
puc1a22	0,00	80,00	53,8	49,44	-0,36
puc1a51	3,5	0	50,9	49,0	-0,16
puc1a52	3,5	40	50,9	47,5	-0,28
puc1a53	3,5	80	50,9	49,0	-0,16
puc1a54	3,5	120	50,9	49,9	-0,08
puc1a55	3,5	160	50,9	49,9	-0,08

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1 + A2

Tab. A45: Experimentell ermittelter und mit den unteren Werten bilanzierter Humusbedarf (Stroh t/ha/a) für die „optimal“ gedüngten Stallmist-varianten (organisch-mineralisch)

Variante	Stroh-FM (t/ha/a)	untere Bilanzwerte (Stroh t/ha/a) (Corg kg/ha/a*10/1000)	obere Bilanzwerte (Stroh t/ha/a) (Corg kg/ha/a*10/1000)	Düngungsempfehlung nach den unteren Bilanzwerten (Stroh t/ha/a)	Düngungsempfehlung nach den unteren Bilanzwerten (Stroh t/ha/a)	gemessene jährliche Bilanz (Stroh FM t/ha; errechnet mit dem Humusreproduktionsfaktor 100)	Düngungsempfehlung nach den gemessenen jährlichen Veränderungen (t Stroh/ha/a)
puc1a53	3,5	-0,2	-1,8	3,7	5,3	-1,6	5,1
ult1342	4,4	1,0	-0,6	3,4	5,0	3,5	0,9
Mittelwert	4,0			3,6	5,2		3

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1, A2, A26 + A27

Tab. A46: Corg-Gehalte (Masse-%) der Nullvariante und der Optimalvariante (Stroh + N-Min.) des Soil organic matter-Dauerversuches in Ultuna von 16 Jahren im Zeitraum von 1956 bis 1999

Jahr	Corg (Masse-%) von var13.1 (≙ Nullparzelle)	Corg (Masse-%) von var13.4.2 (≙Optimalvariante mit 4,4 t/ha/a Stroh + 80 kg/ha/a N)
1956	1,48	1,53
1967	1,30	1,59
1974	1,25	1,72
1975	1,21	1,70
1977	1,20	1,70
1979	1,21	1,75
1981	1,16	1,73
1983	1,13	1,79
1985	1,09	1,65
1987	1,04	1,72
1989	1,04	1,90
1991	1,04	1,98
1993	1,06	1,78
1995	0,95	1,82
1997	1,00	1,90
1999	1,00	1,90

Quelle: (KIRCHMANN/PERSSON/CARLGREN 1994)

Tab. A47: Vergleich der gemessenen jährlichen Veränderungen an Corg (kg/ha/a) mit den unteren und oberen Bilanzwerten von der „optimal“ mit Stroh und N-Min. gedüngten Variante von Ultuna in unterschiedlichen Zeiträumen

Variante	betrachteter Zeitraum	Stroh (t/ha/a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn 1987 (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
ult1342	1987-1991	4,41	80	161,00	41,00	1393,60	-1232,60	-1352,60
ult1342	1956-1991	4,41	80	103,86	-59,00	344,57	-240,71	-403,57

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A26 + A27

Tab. A48: Corg-Werte (Masse-%) vom Versuchsende, gemessene jährliche Veränderungen an Corg (kg/ha), Bilanzierungsergebnisse (obere und untere Werte), Differenzen zwischen den gemessenen Corg-Mengen (kg/ha/a) und den Bilanzergebnissen sowie Klima- und Bodenparameter der 13 Nullvarianten

Varianten Nr.	Corg (Masse-%) zu Versuchsende	untere Bilanzwerte (Corg kg//ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg kg/ha/a	Differenz zwischen (B) und (C) Corg kg/ha/a	Niederschlag (mm/a)	Temperatur °C	Bodenart	Ton (Masse-%)	FAT (Masse-%)	U (Masse-%)	S (Masse-%)
puc1a1	1,01	-373,3	-533	-440	66,7	-93,33	922	7,9	Lu	15	26	-	-
dul21	0,97	-373,3	-533	-	-	-	878	9,1	Sl2	5	-	14,0	81,0
ber31	0,43	-440	-600	-287	-153	-313,3	550	9,3	Su2	4,3	7,6	22,9	72,8
spe41	0,76	-440	-700	-266	-174	-434	583	9,8	Sl3	8,9	13	22,7	86,4
hal51	1,15	-280	-400	0	-280	-400	494	9,2	Sl3	8	13	23,0	69,0
lau61	1,61	-520	-775	18,8	-539	-793,8	480	8,8	Ut4	21	28	67,8	11,2
thy71	0,37	-470	-650	-62,1	-408	-587,9	496	8,6	Su2	2,7	4,9	14,2	83,1
dik81	0,86	-296	-460	-481	185	21,33	635	9,7	Ut2	10	17	74,9	15,0
wie91	1,63	-440	-700	678	-1118	-1378	489	9,5	Lt2	25	34	46,5	28,3
jab101	1,28	-373,3	-533	-504	130	-29,58	1397	9,7	Uls	16,8	30	55,5	27,7
rak111	1,07	-373,3	-533	114	-487	-647,3	810	9,4	Sl4	14,7	20	31,2	54,0
kes121	1,1	-373,3	-533	1479	-1852	-2012	700	10,8	Ls2	21,3	29	44,8	33,5
ult131	1,04	-337,1	-500	-337	-0,23	-163,1	660	5,5	Lt3	36,5	43	41,0	22,5

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A49: Corg-Werte (Masse-%) vom Versuchsende, gemessene jährliche Veränderungen an Corg (kg/ha), Bilanzierungsergebnisse (obere und untere Werte), Differenzen zwischen den gemessenen Corg-Mengen (kg/ha/a) und den Bilanzergebnissen sowie Klima- und Bodenparameter der 10 „optimal“ gedüngten Varianten

Variante	organischer Dünger (t/ha/a)	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	Corg (Masse-%) zu Versuchsende	untere Bilanzwerte (kg Corg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (kg Corg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (kg Corg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) kg Corg /ha/a	Differenz zwischen (B) und (C) kg Corg/ha/a	Niederschlag (mm/a)	Temperatur °C	Bodenart	Ton (Masse-%)	FAT (Masse-%)	U (Masse-%)	S (Masse-%)
puc1a33	Stallmist 10	80	1,09	27	-133	40	-13	-173	922	7,9	Lu	15	26	-	-
ber332	Stallmist 10	143,3	0,56	-40	-200	179	-219	-379	550	9,3	Su2	4,3	7,6	22,9	72,8
spe432	Stallmist 10	113,3	0,96	-40	-300	494	-534	-794	583	9,8	Sl3	8,9	12,5	22,7	86,4
lau632	Stallmist 10	70	2,12	-120	-375	56	-176	-431	480	8,8	Ut4	21	28	67,8	11,2
thy732	Stallmist 15	75	0,63	130	-50	-207	337	157	496	8,6	Su2	2,7	4,9	14,2	83,1
dik832	Stallmist 12	46	1,27	184	20	557	-373	-537	635	9,7	Ut2	10	16,6	74,9	15
wie933	Stallmist 10	86,67	1,6	-40	-300	401	-441	-701	489	9,5	Lt2	25	34,3	46,5	28,27
jab1033	Stallmist 10	146,7	1,4	27	-133	-39	66	-95	1397	9,7	Uls	16,77	30,2	55,53	27,71
rak1132	Stallmist 10	73,33	1,16	27	-133	456	-429	-589	810	9,4	Sl4	14,67	20,35	31,2	54,04
ult1342	Stroh 4,41	80	1,98	104	-59	345	-241	-404	660	5,5	Lt3	36,5	43,27	41	22,5

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1-A27

Tab. A50: Einteilung ausgewählter „Optimalvarianten“ in die Bodenartengruppen Sandböden („leichte“ Böden) und Schluff- und Lehmböden („schwere“ Böden)

Schluff- und Lehmböden

Variante	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	organischer Dünger	Düngemenge FM (t/ha/a)	Bodenart	untere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (Corg kg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (Corg kg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) Corg (kg/ha/a)	Differenz zwischen (B) und (C) Corg (kg/ha/a)
lau632	70	Stallmist	10	Ut4	-120	-375	56	-176	-431
puc1a33	80	Stallmist	10	Lu	27	-133	40	-13	-173
jab1033	146,67	Stallmist	10	Uls	27	-133	-39	66	-95
				Summe	-66	-641	57	-123	-699
				Mittelwert	-22	-214	19	-41	-233

Sandböden

Variante	mineralische N-Düngung (kg/ha/a)	organischer Dünger	Düngemenge FM (t/ha/a)	Bodenart	untere Bilanzwerte (kg Corg/ha/a) (A)	obere Bilanzwerte (kg Corg/ha/a) (B)	gemessene Differenz zum Versuchsbeginn (kg Corg/ha/a) (C)	Differenz zwischen (A) und (C) kg Corg /ha/a	Differenz zwischen (B) und (C) kg Corg/ha/a
rak1132	73,33	Stallmist	10	Sl4	27	-133	456	-429	-589
thy732	75,00	Stallmist	15	Su2	130	-50	-207	337	157
spe432	113,33	Stallmist	10	Sl3	-40	-300	494	-534	-794
ber332	143,33	Stallmist	10	Su2	-40	-200	179	-219	-379
				Summe	77	-683	922	-845	-1605
				Mittelwert	19,25	170,75	230,50	-211,25	-401,25

Quellen: eigene Berechnungen, Datengrundlage s. Tab. A1 - A27

Tab. A51: Gruppierung der „Optimalvarianten“ nach Dünge- und Bodenartengruppen und Beurteilung hinsichtlich der durchschnittlichen Abweichung der Bilanzergebnisse (untere und obere Werte) zu der gemessenen Corg-Bilanz des Bodens (s. Tab. A36, A40, A43, A50)

Unterteilung der "Optimalvarianten" in Gruppen	Durchschnitt der gemessenen Corg-Bilanz (kg/ha/a)	Durchschnitt der unteren Bilanzwerte (Corg kg/ha/a)	Durchschnitt der oberen Bilanzwerte (kg/ha/a)	durchschnittliche Abweichung der unteren Bilanzwerte von den gemessenen Werten (Corg kg/ha/a)	durchschnittliche Abweichung der oberen Bilanzwerte von den gemessenen Werten (Corg kg/ha/a)
Stallmist	215	17	-178	-198	-394
Gülle	170	-242	-452	-411	-621
Stroh	92	40	-121	-52	-213
Sandstandorte	230	19	-171	-211	-401
Schluff- und Lehmstandorte	57	-66	-641	-41	-233

Dank

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr. D. Schröder für die Überlassung des interessanten Themas und die Unterstützung sehr herzlich danken.

Mein herzlicher Dank gilt ebenso Herrn PD Dr. Ch. Emmerling für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ganz besonders bedanke ich mich bei Prof. Dr. habil. Dr. h. c. M. Körschens, für die Beantwortung von 1001 Fragen, die hohe Diskussionsbereitschaft sowie die Überlassung von Literatur.

Hervorheben möchte ich auch die Unterstützung von Herrn Dr. H. Kolbe, der mich auf zahlreiche Literaturstellen aufmerksam machte und eine sehr freundliche und hilfreiche Kritik schrieb.

Mein besonderer Dank gilt ebenso Prof. Dr. T. Scholten, ohne den ich die zahlreichen IOSD-Versuche nicht mit in meine Arbeit hätte aufnehmen können. Seine fortwährende Diskussionsbereitschaft, die konstruktive Kritik sowie das Mut machen leisteten einen unschätzbaren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr. H.-R. Wegener für die Einladung zur IOSDV-Wintertagung in Rauischholzhausen und für die Kontaktaufnahme mit den spanischen Mitgliedern.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei folgenden Mitgliedern der Internationalen Arbeitsgemeinschaft Bodenfruchtbarkeit in der Internationalen Bodenkundlichen Union (IUSS) für die Überlassung von Datenmaterial ihrer Dauerversuche und die Beantwortung offener Fragen: Herrn Dr. Ulrich Hege (Puch), Frau Anke Kwast (Dülmen), Herrn Dr. Wolfgang Köhn (Berlin-Dahlem), Herrn Dr. Reiner Bischoff (Speyer), Herrn Dipl. Ing. Johannes Hösch (Wien), Herrn Prof. Dr. Anton Tajnšek (Jable und Rakičan), Herrn Dr. Sándor Hoffmann, Herrn Prof. Tamás Kismányoky (Keszthely), Herrn Dr. Lennart Mattsson (Ultuna) und Frau Dra. C. López-Fando (Madrid).

Bei Frau Dr. Jutta Rogasik bedanke ich mich für die Literatur und Herrn Dr. H. Eckert für die Kohlenstoffwerte.

Herzlich danken möchte ich Babsi, die immer für mich da war, mir Mut machte und mich sehr gestärkt hat, Stefan Funk für seinen ständigen Einsatz, v. a. bei Computerproblemen und Maria für die liebevolle Betreuung von Anna.

Mein größter Dank gilt meiner Familie: Meinem Mann Stefan, der kein ruhiges Wochenende mehr hatte, viel Stress ertragen musste und mich trotzdem immer wieder seelisch aufgebaut hat. Meinen Kindern Yannis, Lena und Anna, die im letzten Jahr viel Verständnis für meine Abwesenheit aufbringen mussten, meinen Schwiegereltern, die wann immer möglich mit angepackt haben und nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die mich in jeder Hinsicht unterstützt haben.

Morenhoven, Januar 2006 Karen Beuke

Erklärung zur Diplomarbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken als solche kenntlich gemacht habe. Die Diplomarbeit habe ich bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt. Sie wurde bisher auch nicht veröffentlicht.

Morenhoven, den __16.01.2006_____

_____Karen Beuke_____