Das Lebensministerium



Klimawandel und C-Sequestrierung

Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Heft 23/2009

Freistaat Sachsen

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Auswirkungen differenzierter Land- und Bodenbewirtschaftung auf den C- und N-Haushalt der Böden unter Berücksichtigung konkreter Szenarien der prognostizierten Klimaänderung im Freistaat Sachsen

Dr. Hartmut Kolbe

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 1

2 Material und Methoden ... 3

2.1 C-Umsatz Modelle ... 3

2.1.1 Modellsystem Carbon and Nitrogen Dynamics – CANDY ... 3

2.1.2 Regressionsanalytische Verfahren zur C_{org}- und N_t-Bilanzierung ... 5

2.1.3 Methode zur standortangepassten Humusbilanzierung ... 6

2.1.4 VDLUFA-Methode zur Humusbilanzierung ... 9

2.2 Datengrundlage ... 9

2.2.1 Boden ... 9

2.2.2 Klima ... 12

2.2.2.1 Klimaprognosen ... 12

2.2.2.2 WEREX-Daten ... 13

2.2.3 Bewirtschaftung ... 19

2.2.3.1 Szenarien ... 19

Szenarienkomplex 1 → Beibehaltung der aktuellen landwirtschaftlichen Methoden und Anbauverhältnisse des konventionellen Landbaus und des ökologischen Landbaus ... 24

Szenarienkomplex 2→ Berücksichtigung von Entwicklungstendenzen in der Landwirtschaft ... 25

Szenarienkomplex 3 – Umstellung auf Ökolandbau ... 25

Szenarienkomplex 4 – Energiefruchtfolgen ... 25

Szenarienkomplex 5 – Durchschnittliche viehlose Marktfruchtbetriebe sowie bei Zukauf von organischen Düngemitteln (z.B. Sekundärrohstoffdünger wie Kompost) ... 26

Szenarienkomplex 6 – Veredlungsbetriebe mit hohem Viehanteil ... 27

Szenarienkomplex 7 – 20 % Ackerfutter als Stilllegung mit Kleearten in der Fruchtfolge ... 29

Szenarienkomplex 8 – 50 % Kleegras in der Fruchtfolge (Ersatz von mineralischen N-Düngemitteln durch legume N-Bindung) ... 29

Szenarienkomplex 9 – Änderung der Grundbodenbearbeitung – Direktsaat und Mulchsaaten ... 30

Szenarienkomplex 10 – 100 % Direktsaat, 20 % Klee in mindestens zweijährigen Beständen, 30 % Leguminosen insgesamt ... 35

Szenarienkomplex 11 – Änderung der Nutzungsart auf bestimmten Flächenanteilen (von Ackerland nach Grünland) ... 36

2.2.3.2 Parameteranpassung ... 36

2.2.4 Modellierung ... 37

2.2.5 Energiebilanzierung ... 37

3 Ergebnisse ... 41

3.1 D-Standort (Torgau) ... 41

3.1.1 Ergebnisse zur Spannweite der C_{org}- und N_t-Entwicklung der modellierten Szenarien ... 41
3.1.2 Szenarien der Ertragserhöhung und Umstellung auf Ökolandbau ... 45
3.1.3 Szenarien zu Energiefruchtfolgen, viehlosen Marktfruchtbetrieben und viehreicher Veredlung ... 50
3.1.4 Szenarien zu Ackerfutter und Grünland ... 57
3.2 Lö-Standort (Leipzig) ... 63
3.2.1 Ergebnisse der Spannweite der C_{org}- und N_t-Veränderung der modellierten Szenarien ... 63
3.2.2 Szenarien der Ertragserhöhung und Umstellung auf Ökolandbau ... 67
3.2.3 Szenarien zu Energiefruchtfolgen, viehlosen Marktfruchtbetrieben und viehreicher Veredlung ... 72
3.2.4 Szenarien zu Ackerfutter und Grünland ... 78
3.3 V-Standort (Chemnitz) ... 83
3.3.1 Ergebnisse zur Spannweite der C_{org}- und N_t-Entwicklung der modellierten Szenarien ... 83
3.3.2 Szenarien der Ertragserhöhung und Umstellung auf Ökolandbau ... 86
3.3.3 Szenarien zu Energiefruchtfolgen, viehlosen Marktfruchtbetrieben und viehreicher Veredlung ... 91
3.3.4 Szenarien zu Ackerfutter und Grünland ... 96
4 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse im Durchschnitt der Standorte ... 101
4.1 Klimaszenarien und Bewirtschaftungsalternativen ... 101
4.2 Bodenbearbeitung (Lö-Standort) ... 107
4.3 Energiebilanzierung ... 111
4.4 Eignung der Berechnungsverfahren ... 113
5 Zusammenfassung ... 119
5.1 Einfluss des Klimawandels ... 119
5.2 Ausgleichspotenzial durch Landbewirtschaftung ... 120
6 Literatur- und Quellenverzeichnis ... 122
7 Anhang ... 130

1 Einleitung

Dem Boden als C-Speicher wird im Rahmen der globalen Diskussion zum Klimawandel seit einigen Jahren verstärkte Aufmerksamkeit gewidmet. Dies erfolgt einerseits im Hinblick auf seine Funktion zur Akkumulation von Kohlenstoff und Stickstoff und der damit verbundenen Verbesserung der Bilanzen klimarelevanter Spurengase. Andererseits kommt der organischen Substanz eine zentrale Rolle bei der Aufrechterhaltung wichtiger biologisch-physikalischer Bodenfunktionen und als Nährstoffspeicher zu. So wird der Verlust organischer Substanz als ein wesentlicher „thread“ im Rahmen der EU-weiten Bodenschutzdiskussion identifiziert.

In diesem Zusammenhang ist es von größtem Interesse zu untersuchen,

a) welche Folgen ein Klimawandel für die Humusvorräte in landwirtschaftlich genutzten Böden haben würde, wenn eine Weiterführung der bisherigen Landnutzung unterstellt wird und
b) welche Handlungsoptionen bestehen, um einen möglichen Humusverlust zu kompensieren, zusätzlichen Kohlenstoff im Boden zu speichern oder einer alternativen Nutzung zuzuführen.

Eine wichtige Option besteht darin, der Ursache des Klimawandels dadurch entgegenzuwirken, indem das Potenzial regenerierbarer Energiequellen genutzt wird. Bei einer verstärkten Zuführung von Biomasse zur Energiegewinnung könnten unter Umständen die zur Reproduktion der Humusvorräte notwendigen Kohlenstoffquellen nicht mehr zur Verfügung stehen. Weitere Handlungsoptionen können in einer Ausdehnung des ökologischen Landbaus und Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung gesehen werden. Beide Optionen verdienen im Sinne des Bodenschutzes hohe Aufmerksamkeit. Nach FLIESSBACH (2007) und HÜLSBERGEN & KÜSTERMANN (2007) kommt dem ökologischen Landbau sowohl bei der Energieeinsparung als auch bei der Kohlenstoffanreicherung im Boden eine hohe Bedeutung zu.

Insbesondere die Reduktion der Bodenbearbeitung wurde in den letzten Jahren – vor allem durch Arbeiten aus den USA – als probates Mittel zur Verbesserung der Treibhausgasbilanz ausgewiesen. Die Umstellung der Ackerbewirtschaftung auf konservierende Bodenbearbeitung wird aufgrund der Aggregatstabilisierung als ein effektiver Prozess zur Speicherung von Kohlenstoff in Ackerböden angesehen (RASMUSSEN & COLLINS 1991; REEVES 1997; LAL 1997; PAUSTIAN et al. 1998). Dabei hängt die Menge des gespeicherten Kohlenstoffs von der Textur des Bodens ab (NEEDELMAN et al. 1999). Zusammenfassend postulieren SMITH et al. (1997), dass europäische Böden mit verbessertem Management und alternativer Landnutzung zur Landwirtschaft als Nettosenke von 0,8 % des momentan weltweit aus fossiler Verbrennung stammenden Kohlenstoffdioxids dienen könnten.

Generell wird die Humusreproduktion durch das Wachstum der Biomasse in den Agrargebieten bestimmt. Die Potenzialgrenzen des Anbaus von Biomassepflanzen werden neben politischen

(HEINZ 2006; HENKE 2006), volkswirtschaftlichen bzw. agrarökonomischen (HENKE 2006; GÖMANN et al. 2006) sowie betriebswirtschaftlichen (TOEWS & KUHLMANN 2006) Faktoren auch durch eine Reihe von pflanzenbaulichen Faktoren bestimmt. Neben Fruchtfolgeaspekten (STÜLPNAGEL 2006; VETTER & GÖDEKE 2006) sind dies insbesondere eine ausreichende Wasserversorgung, eine nachhaltige Nährstoffversorgung, eine ausgeglichene Humusbilanz und eine gute ökologische Standortanpassung der angebauten Biomassepflanzen (VETTER 2006).

Die Menge der verfügbaren Biomasse ist neben Standortfaktoren wesentlich von der Fruchtfolgegestaltung abhängig und wird hinsichtlich der Verwendung zur Humusreproduktion auch maßgeblich von der Betriebsstruktur bestimmt, die viehlosen Betrieben andere Optionen als Veredlungsbetrieben ermöglicht. Eine möglichst genaue Abschätzung der künftigen Entwicklung der Humusvorräte ist jedoch nicht einfach vorzunehmen, da neben der Vielfalt möglicher agrarstruktureller Veränderungen auch eine Reihe weiterer Unsicherheiten zu bedenken sind.

Die globalen Klimamodelle (GCM) ermöglichen Szenariorechnungen für ein sehr grobes globales Netz, können aber für lokale Entwicklungen, die für die Simulation von Agrarsystemen relevant sind, nur eingeschränkte Aussagen liefern. Deshalb wurden von verschiedenen Arbeitsgruppen Untersuchungen zum Down-Scaling der GCM-Ergebnisse durchgeführt. Für das sächsische Gebiet liegen hierzu u. a. die Daten aus dem WEREX Projekt vor. Für eine Reihe von Wetterstationen wurden aus den GCM-Daten Szenarien zur lokalen Entwicklung einer Reihe meteorologischer Elemente aufgestellt, die den Anforderungen zur Simulation von Agrarszenarien genügen.

Auch hinsichtlich der Modelle zur Abbildung von Agrarszenarien und der Simulation des Humushaushaltes gibt es eine Reihe von alternativen, teilweise sehr verschiedenen Konzepten. Generell muss festgestellt werden, dass eine Kalibrierung bzw. Validierung der Modelle sehr kompliziert ist, da die Veränderungen im C-Haushalt sehr langsam ablaufen und lange Zeitreihen genauer Messergebnisse erforderlich sind. Diese liegen aus verschiedenen Dauerversuchen vor, decken aber nur einen Teil der Standortbedingungen ab und sind oft nur zu einem geringen Umfang mit den zu untersuchenden Handlungsoptionen kompatibel.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst in einer Pilotstudie für drei unterschiedliche Standorte in Sachsen und für eine weite Spanne möglicher Entwicklungsalternativen eine zeitliche Simulation der Veränderungen des Kohlenstoffhaushaltes im Boden bis zum Jahr 2050 durchgeführt. Dazu wurde das CANDY Modell eingesetzt, für das aus einer Reihe vorangegangener Arbeiten sehr umfangreiche Parametersätze vorliegen. Auf Grund der hohen Unsicherheit der zu erwartenden Ergebnisse wurden darüber hinaus weitere Variantenberechnungen mit anderen, meistens wesentlich einfacheren statischen Methoden angestellt. Neben der Möglichkeit des Modellvergleichs wurde hierdurch eine höhere Sicherheit und Aussagefähigkeit der Ergebnisse angestrebt.

Auch für andere Regionen wurden bereits experimentelle Arbeiten mit vergleichbarem Inhalt mit verschiedenen Modellen durchgeführt, die an dieser Stelle kurz erwähnt werden sollen (SMITH et al. 2005a, b; SLEUTEL et al. 2006; MÜLLER et al. 2007; SMITH et al. 2007, 2007a, c; ZAEHLE et al. 2007).

Die im folgenden Bericht dargestellten Ergebnisse dokumentieren die verwendete Datengrundlage für einen D-, Lö- und V-Standort in Sachsen und zeigen die ermittelten Resultate der Veränderung der Kohlenstoffvorräte in Folge des postulierten Klimawandels und der landwirtschaftlichen Handlungsoptionen auf. Daneben erfolgten vereinfachte Betrachtungen zur parallel stattfindenden Veränderung der N_t-Vorräte des Bodens und zum Zusammenhang zwischen Energiebilanz und C-Reproduktion.

2 Material und Methoden

2.1 C-Umsatz Modelle

2.1.1 Modellsystem Carbon and Nitrogen Dynamics – CANDY

CANDY simuliert die Dynamik von Kohlenstoff und Stickstoff in der ungesättigten Zone agrarisch genutzter Böden. Vorzugsweise erfolgt die Berechnung für tiefgründige, vertikal entwässernde Standorte mit beliebiger Tiefe. Das Bodenprofil wird für die numerische Lösung der Modellgleichungen in homogene Schichten von jeweils 10 cm unterteilt. Die zeitliche Auflösung der Simulation erfolgt in Tagesschritten. Folgende Teilprozesse werden in unterschiedlicher Detailliertheit durch das Modell beschrieben:

- meteorologische Bedingungen (Zugriff auf Datenbanken oder Generierung von Datensätzen, Korrektur der gemessenen Niederschläge),
- Bodenwasserdynamik (potenzielle und aktuelle Evapotranspiration, Versickerung),
- Bodentemperaturdynamik,
- Umsatz von organischer Substanz (Mineralisierung und Humifizierung),
- Stickstoffdynamik (Mineralisierung, Immobilisierung, Aufnahme durch den Bestand, Auswaschung, gasförmige Verluste, symbiotische N-Bindung),
- Pestiziddynamik (Abbau, Transport mit dem Sickerwasser).

Außerdem werden die Wirkungen verschiedener Management-Aktivitäten wie

- Bodenbearbeitung, und Umbruch,
- mineralische und organische Düngung,
- agrochemische Behandlung,
- Beregnung,
- Beweidung,
- Aufgang und Ernte

abgebildet.

Das Modell verarbeitet dazu für ein definiertes Bodenprofil ausgehend von Startwerten zu den betrachteten Zustandsgrößen (Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Pestizide, organische Substanz und Mineralstickstoff), Bewirtschaftungsdaten und Wetterablauf. Das System besteht aus einem in eine Bedieneroberfläche eingebetteten Simulationsmodell und umgebenden Datenbanken, die Informationen zu den erforderlichen Parametern, zum Modellantrieb und zu Anfangswerten und eventuell vorhandenen ergänzenden Messreihen enthalten (Abb. 1).

Jede im Bodenprofil definierte Schicht (Horizont) wird durch die Parameter Trockenrohdichte (TRD), Trockensubstanzdichte (TSD), permanenter Welkepunkt (PWP), Feldkapazität (FKAP), Feinanteilgehalt (FAT) (Ton + Feinschluffgehalt) und der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (kf) beschrieben.

Der Antrieb des Modells erfolgt über die Bewirtschaftungsdaten sowie über folgende meteorologische Daten:

- Lufttemperatur in 2 m,
- Globalstrahlung,
- Niederschlag,

die als Tageswerte vorliegen müssen.

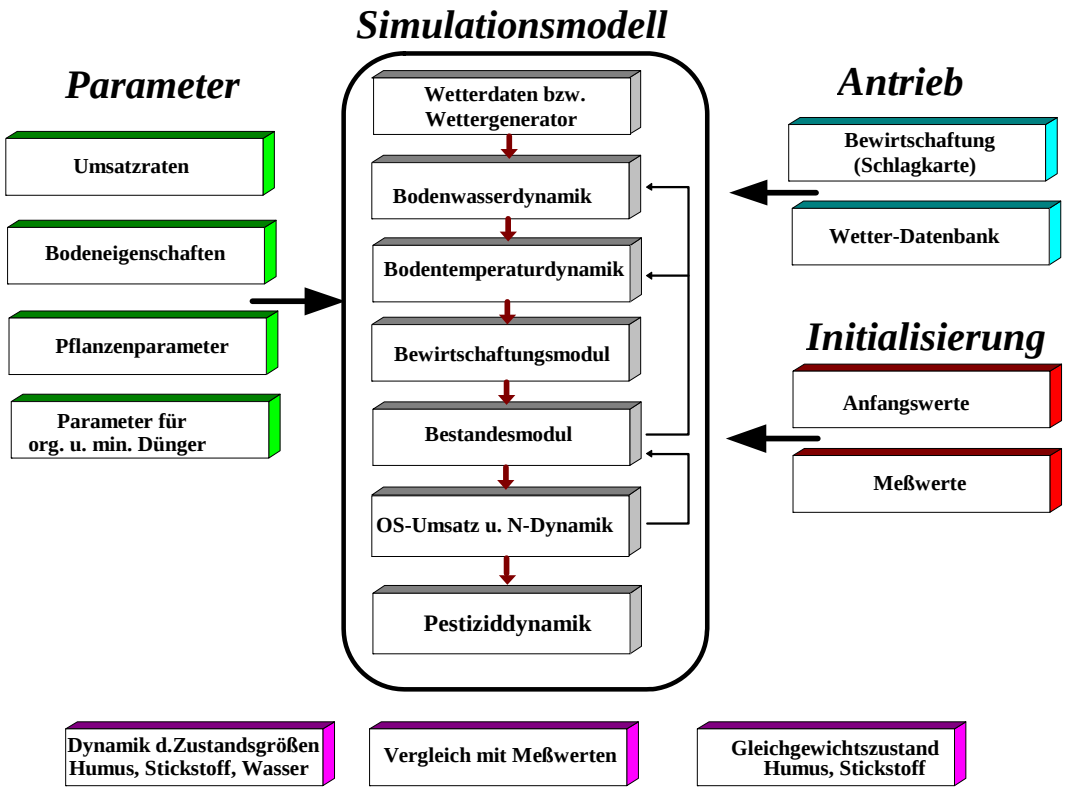


Abbildung 1: Aufbau des Simulationssystems CANDY

Die Humusdynamik wird nach dem in Abbildung 2 dargestellten Schema beschrieben. Eine vom N-Entzug des Pflanzenbestandes abhängige Menge an Ernte- und Wurzelrückständen bzw. eine vorgegebene Menge an organischen Düngern wird in den Boden eingebracht und zu AOS und CO_2 umgesetzt. In einem inneren Kreislauf erfolgt ein Stoffaustausch zwischen AOS und SOS, wobei nur im AOS-Pool eine Mineralisierung stattfindet. Der Pool an inerter OS bleibt während der gesamten Zeit konstant. Weitere erläuternde Informationen zum Modell CANDY finden sich in FRANKO (1997), FRANKO et al. (1997), FRANKO & OELSCHLÄGEL (1993) und in FRANKO et al. (1995 a, b).

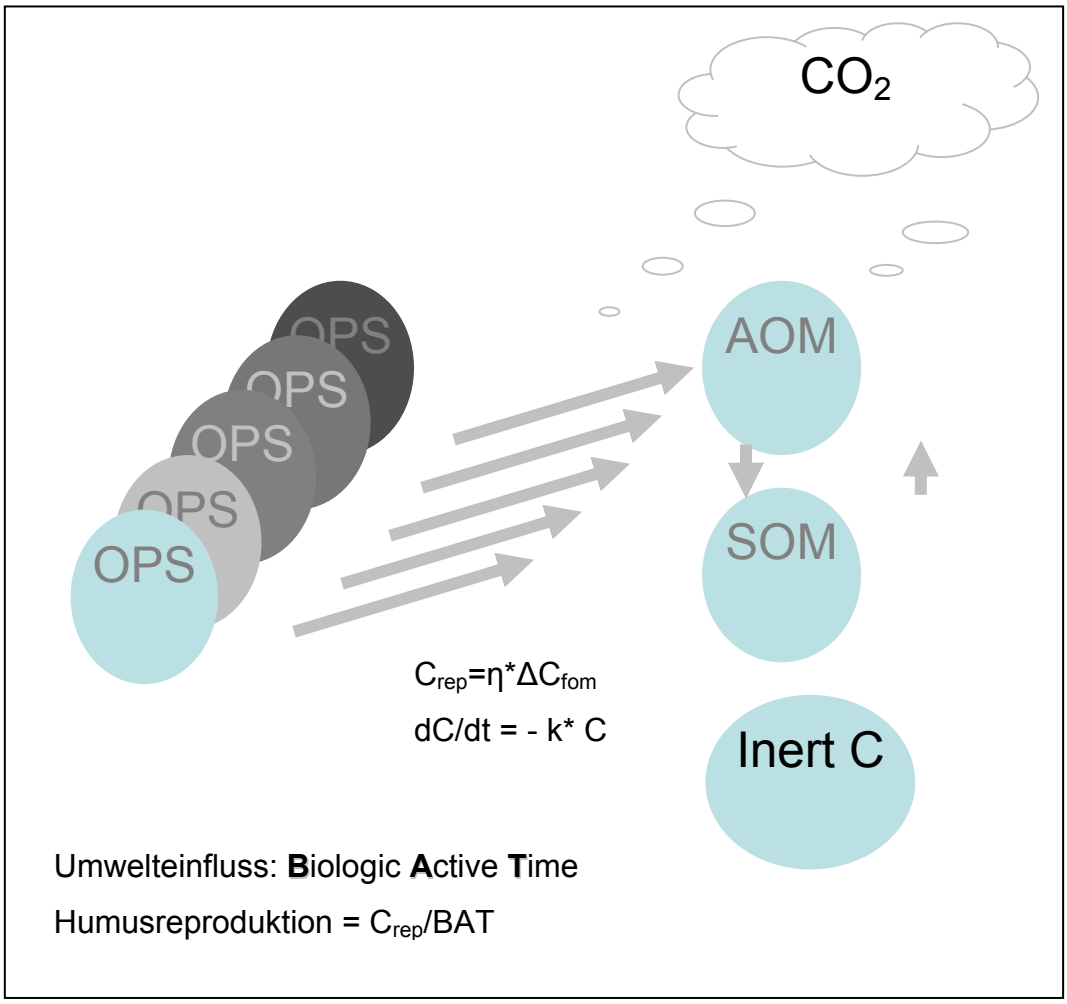


Abbildung 2: Humusdynamik im Simulationssystem CANDY

2.1.2 Regressionsanalytische Verfahren zur C_{org}- und N_t-Bilanzierung

Diese Verfahren sind Ergebnis einer statistischen Auswertung von Meta-Daten aus 240 Dauerversuchen und max. 2442 Versuchsvarianten aus dem mitteleuropäischen Raum mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse (KOLBE 2007a; 2009). Eingangsdaten sind folgende Merkmale: mittlere Temperatur, mittlere Niederschlagssumme, Bodenart, Tongehalt, pH-Wert, C/N-Verhältnis des

Bodens, TM-Zufuhr, mineralische N-Düngung, Gesamt-N-Zufuhr, N-Abfuhr, N-Saldo, Getreideanteil der Fruchtfolge, Hackfruchtanteil der Fruchtfolge, Leguminosenanteil der Fruchtfolge. Ausgabedaten der Modelle sind: C_{org}-Gehalt, N_t-Gehalt sowie C/N-Verhältnis (berechnet).

Die Verfahren wurden lediglich mit einer Anpassung der Temperatur angewendet, indem von den jeweils aktuellen Temperaturen ein Wert von 1,5 °C abgezogen worden ist. Diese Korrektur musste vorgenommen werden, da die Anwendung der Modelle nur eine sichere Temperaturbewertung im mittleren Bereich (ca. 6 – 9 °C) erlauben. Die Klimaszenarien wiesen jedoch bereits Temperaturen oberhalb des aufgezeigten Bereichs auf. Die Ergebnissicherheit von Regressionsmodellen ist jeweils in ihrem Randbereich der Gleichungen deutlich ungenauer zu bewerten als in ihrem Hauptanwendungsbereich. Von den bestehenden insgesamt 9 C_{org}- und N_t-Gleichungssystemen wurden Mittelwerte von 6 C_{org}- und von 7 N_t-Gleichungen jeweils ohne Verwendung des Merkmals „C/N-Verhältnis“ verwendet.

Diese statischen Verfahren sind grundsätzlich geeignet, sowohl Fragestellungen mit differenzierten Wetterdaten, Bodendaten und einfachen Bewirtschaftungsdaten zu lösen. Die Verfahren haben zur direkten Berechnung der C_{org}- und N_t-Gehalte eines Standortes durch Eingabe der o.a. Merkmale eine Methodensicherheit bei Werten unterhalb 1 % C_{org} von ±0,46 % C_{org}, bei Werten über 1 % C_{org} von ±0,54 % C_{org} sowie von durchschnittlich ±0,045 % N_t ($p = 0,05$). Die Methodensicherheit zur Absicherung von Variantenunterschieden wird besser sein als die angegebenen Werte, eine Bestimmung wurde allerdings bisher nicht erbracht (Abkürzung: REGRESS I für Klimaszenario LfUG, REGRESS II für Szenario PIK).

Diese Methode ist dazu geeignet, mit Hilfe der aufgeführten Eingabemerkmale einen für den Standort typischen C_{org}- und N_t-Wert zu berechnen. Wichtige Justierungsarbeiten sind aber hierzu noch nicht abgeschlossen worden. Wie aus Abbildung 3 zu sehen ist, können besonders die C_{org}-Werte der drei zu untersuchenden Standorte relativ genau berechnet werden. Bei den N_t-Gehalten gibt es im Vergleich zu den gemessenen Werten der Standorte allerdings eine Tendenz zur Berechnung etwas zu niedriger Werte.

2.1.3 Methode zur standortangepassten Humusbilanzierung

Bei dieser Methode zur statischen, halbquantitativen Berechnung von Humusbilanzen können Standortfaktoren in Abhängigkeit von Standortgruppen berücksichtigt werden. Zur Unterscheidung der Gruppen gehen sowohl Bodendaten (Bodenart, Feingehalt, C/N-Verhältnis) als auch klimatische Daten (Temperatur, Niederschlag) ein (KOLBE 2007b). Aus diesem Grund ist es möglich, eine qualitative Unterscheidung zwischen Klimaszenarien zu berechnen. Schwerpunkt dieser Methode liegt jedoch auf einer genaueren Analyse von bodenbürtigen und besonders von bewirtschaftungsbedingten Faktoren. Es stellt eine Weiterentwicklung der VDLUFA-Methode zur Humusbilanzierung dar. Es wurde insbesondere eine Kalibrierung der berechneten Saldowerte auf die Veränderung der C_{org}-Werte des Bodens vorgenommen. Der Variationskoeffizient der Methode liegt bei

ca. ±0,21 % C_{org} zur Bestimmung von Variantenunterschieden. Ausgabedaten sind die berechneten Humusäquivalente (kg C/ha u. Jahr). Diese Werte wurden mit dem bei KOLBE (2005) beschriebenen Verfahren in % C_{org} des Bodens umgerechnet (Abkürzung: STAND).

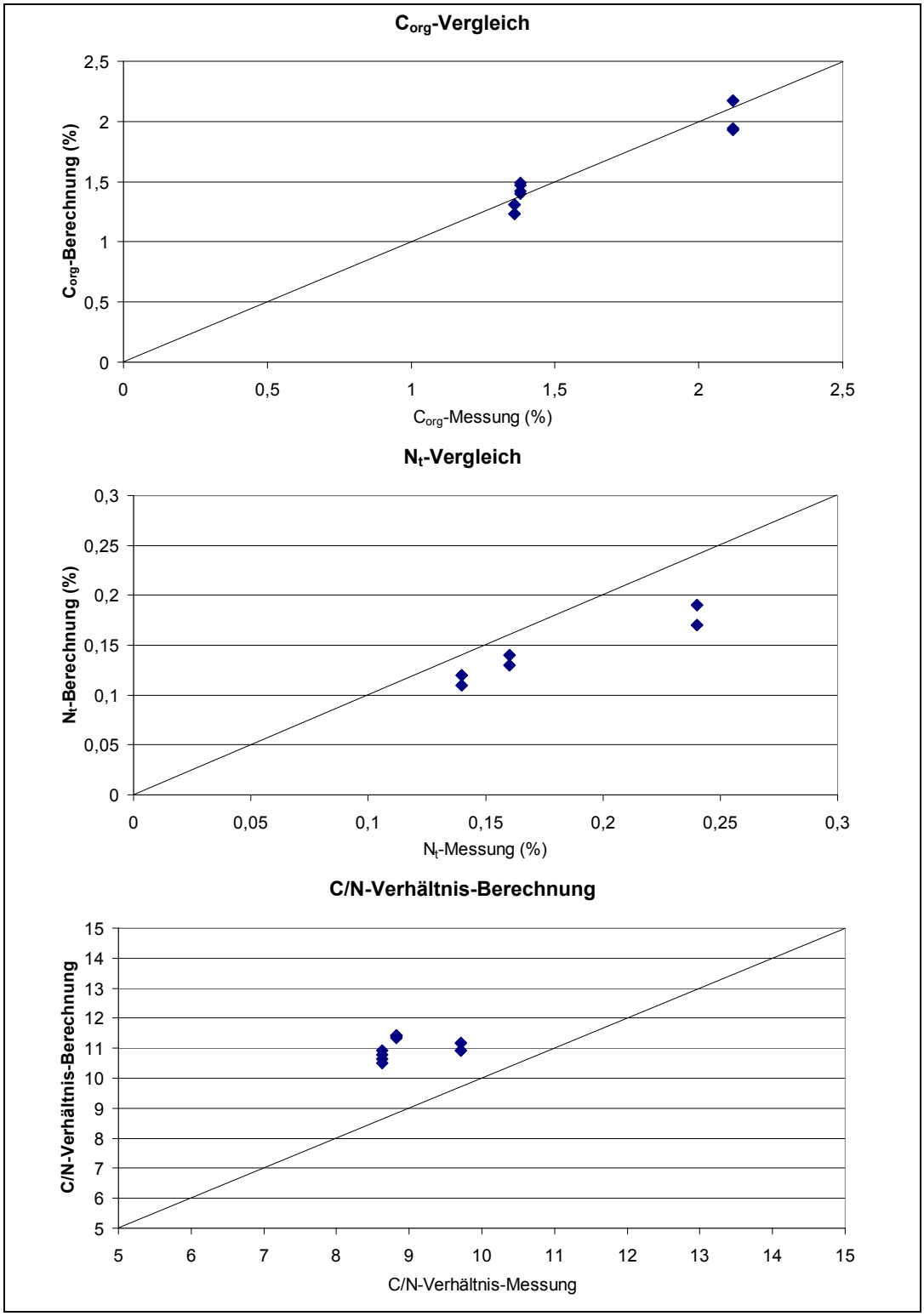


Abbildung 3: **Vergleich der Gehalte an C_{org}, N_t- und der C/N-Verhältnisse zwischen den gemessenen und mit Hilfe des REGRESS-Verfahrens berechneten Werten**

2.1.4 VDLUFA-Methode zur Humusbilanzierung

Diese Methode dient zur statischen, überschlagsmäßigen Bestimmung des Versorgungsgrades an organischer Substanz auf Grund von Angaben der Bewirtschaftungsdaten und wurde von KÖRSCHENS et al. (2004) erarbeitet und beschrieben. Eine Bewertung von bodenbürtigen und klimatischen Unterschieden ist nicht möglich. In dieser Arbeit wurden daher nur die Bewirtschaftungsunterschiede der Szenarien mit den unteren Werten der Methode verwendet, da sie eine genauere Analyse erlauben als die oberen Werte der Fruchtartenkoeffizienten (KOLBE & PRUTZER 2004). Die Methode hat eine statistische Sicherheit zur Absicherung von Variantenunterschieden von ca. 0,35 % C_{org}. Die Umrechnung von Saldowerten der Humusbilanzierung wurde mit dem von KOLBE (2005) beschriebenen Verfahren vorgenommen (Umrechnungsfaktor von kg C HÄQ/ha u. J. in % C_{org} [ca. 25 – 30 cm Bodenkrume, spezifisches Gewicht um 1,5] = 0,0005672, Abkürzung: LUFA).

2.2 Datengrundlage

Von den insgesamt fünf Agrarstrukturgebieten (ASG) Sachsens wurden folgende Gebiete ausgewählt (siehe Abb. 4):

- ASG 1 – Sächsische Heidegebiete/Riesaer-Torgauer-Elbtal
  als D-Standort (anlehmiger Sand),
- ASG 3 – Mittelsächsisches Lößgebiet
  als Lö-Standort (sandiger Lehm),
- ASG 4 – Erzgebirgsvorland/Vogtland/Elsterbergland
  als V-Standort (sandiger Lehm).

2.2.1 Boden

Basis für die Ableitung der Standorte D, Lö und V stellte die Bodenübersichtskarte 1:200.000 (LfULG 2009 - BÜK200_SN-) für Sachsen dar. Die BÜK200_SN wurde mit einer Karte der Agrarstrukturgebiete (ASG) Sachsens (WINKLER et al. 1999) verschnitten. In einem ersten Schritt wurden die Böden selektiert, die einer ackerbaulichen Nutzung unterliegen. Anschließend wurde der Flächenanteil der einzelnen Leitbodenformen (LBF) der Ackerböden an der Gesamtfläche der ASG ermittelt (Tab. 1).

Tabelle 1: Verwendete Leitbodenformen (LBF)

Standort	LBF	Bodenart	Horizonttiefe [cm]	Tongehalt [Masse-%]	Schluffgehalt [Masse-%]
D	98	Su2	30	3	18
		Su2	60	3	18
		Sl2	110	7	18
Lö	40	Uls	30	13	58
		Uls	40	13	58
		Uls	60	13	58
		Ls4	100	21	23
		Ls4	130	21	23
V	43	Slu	20	13	45
		Slu	60	13	45
		Sl4	110	15	25

Bei dem D-Standort handelt es sich um einen kiesführenden (Kryo)Sand über Schmelzwasserkiessand, bei dem Lö-Standort um einen kiesführender (Kryo)Sandlöss über kiesführendem Moränenlehm (Geschiebelehm) und der V-Standort ist ein grusführender (Kryo)Lehm über (Kryo)Lehm-Schutt. Die Verteilung der Böden in den ASG zeigt Abbildung 4.

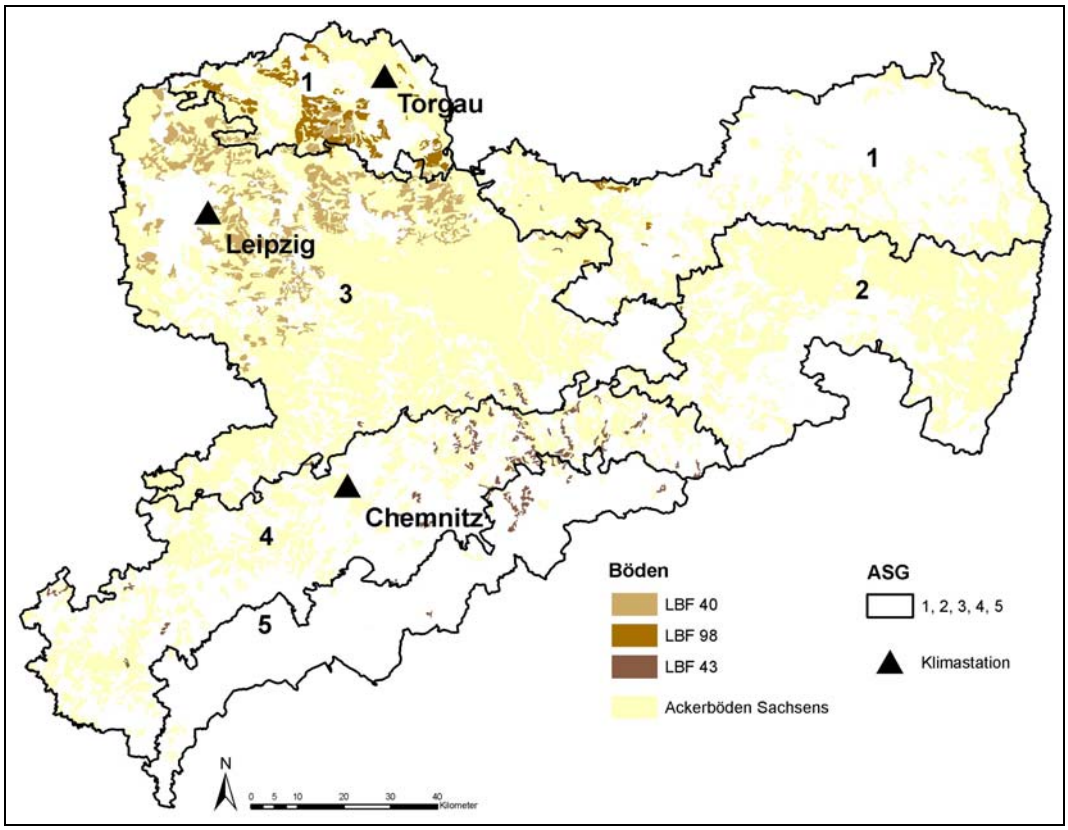


Abbildung 4: Verteilung der ackerbaulich genutzten Leitbodenformen 40, 43, 98 im Vergleich zur gesamten Ackerfläche und Lage der verwendeten Klimastationen Torgau, Leipzig und Chemnitz

Für die CANDY-Simulation wurden folgende Bodenparameter benötigt:

- Feldkapazität,
- Permanenter Welkepunkt,
- Gesättigte Wasserleitfähigkeit,
- Trockenrohdichte,
- Trockensubstanzdichte,
- Feinanteilgehalt (Ton + Feinschluffgehalt).

Von diesen Parametern standen die Feldkapazität und die Trockenrohdichte direkt aus der BÜK200 zur Verfügung. Die Parameter permanenter Welkepunkt, Trockensubstanzdichte, gesättigte Wasserleitfähigkeit und der Feinanteil mussten jedoch abgeleitet werden. Eine ausführliche Beschreibung der Ableitung der für die CANDY-Simulation benötigten Bodenparameter ist in FRANKO & LIESS (2006) zu finden.

2.2.2 Klima

2.2.2.1 Klimaprognosen

Die weltweit vorhandenen Prognosen bezüglich der Klimaänderung in den nächsten Jahrzehnten basieren auf Ergebnissen globaler Klimamodelle. Aufgrund der dabei gegebenen Auflösung der Daten, können regionale Unterschiede schlecht aufgezeigt werden. Hierfür wurden Regionalisierungsverfahren entwickelt, die auf die Ergebnisse der globalen Klimamodelle zurückgreifen und sich grundlegend unterscheiden. Zum einen existieren dynamische Verfahren und zum anderen gibt es statistische Verfahren (KÜCHLER & SOMMER 2005; UBA, 2007a). Beim dynamischen Verfahren erfolgt eine Klimasimulation mit einem zeitlich und räumlich höher aufgelösten Modell. Bei den statistischen Verfahren werden Beziehungen zwischen Großwetterlagen (Modellergebnisse des Globalen Modells) und lokalen Messgrößen ermittelt. In Deutschland wird für Klimaprognosen als dynamisches Verfahren das Modell REMO (Regional Model) verwendet. Nähere Erläuterungen hierzu finden sich in JACOB & PODZUN (1997), JACOB (2001) und SCHRUM et al. (2003). Als statistisches Verfahren wird für die Vorhersage das Modell WETTREG (Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode) eingesetzt. Erläuterungen zu diesem Modell finden sich in UBA (2007b).

Neben den deutschlandweit eingesetzten Modellen gibt es speziell für Sachsen ein statistisches Verfahren zur Prognostizierung des zukünftigen Klimas. Dieses Modell (WEREX – Wetterlagenbedingte Regression für Extremwerte) ist direkt an die sächsischen Verhältnisse angepasst und ermöglicht vor allem Voraussagen hinsichtlich des Auftretens von Klimaextremen. Weitere Informationen zum WEREX-Verfahren sind in KÜCHLER & SOMMER (2005) zu finden.

Außer den WEREX-Simulationen vom LfUG in Sachsen sind Szenarien vom PIK für den gleichen Zeitraum verwendet worden. Diese Daten beruhen auf dem Szenario A1B des IPCC und repräsentieren eine moderate „business-as-usual“-Entwicklungsmöglichkeit (WERNER & GERSTENGARBE 1997; GERSTENGARBE et al. 2003). Die verwendeten Ausgangsdaten für das Jahr 2000 (LfUG: 1961 – 2000; PIK: 1961 – 2000) und die Szenariendaten für das Jahr 2050 (LfUG: 2001 – 2050; PIK: 2046 – 2055) wurden in der Tabelle 2 zusammengestellt. Die vom PIK unterstellten Veränderungen in dem zu erwartenden Abfall der Niederschläge und Anstieg an Temperaturen sind demnach deutlicher ausgeprägt als beim Vergleichsszenario des LfUG.

Tabelle 2: Wetterdaten über die beobachteten und prognostizierten Zeiträume

	LfUG				PIK			
	2000	2050	Abs.-Diff.	Relativ-Diff.	2000	2050	Abs.-Diff.	Relativ-Diff.
Torgau: D-Standort								
Niederschlag (mm)	503	497	-6	-1,2	549	423	-126	-23,0
Temperatur (°C)	9,1	10,0	0,9	9,9	8,9	11,0	2,1	23,6
Leipzig: Lö-Standort								
Niederschlag (mm)	594	569	-25	-4,2	597	543	-53,9	-9,0
Temperatur (°C)	9,7	10,7	1,0	10,3	9,4	11,7	2,3	24,5
Chemnitz: V-Standort								
Niederschlag (mm)	688	657	-31	-4,5	719	600	-118	-16,5
Temperatur (°C)	8,2	9,2	1,0	12,2	7,8	10,2	2,4	30,8

2.2.2.2 WEREX-Daten

Im Hauptteil der Arbeit wurden für die Modellierung der heutigen und zukünftigen klimatischen Situation die für Sachsen vorhandenen und abgestimmten WEREX-Daten verwendet. Diese wurden durch das Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) Sachsen für drei Klimastationen und einen Zeitraum von 1961 – 2060 zur Verfügung gestellt. Die Daten umfassten die für das CANDY-System notwendigen Parameter: Niederschlag, Temperatur und Sonnenscheindauer in täglicher Auflösung. Bei den drei Klimastationen handelt es sich um Chemnitz, Leipzig und Torgau (Abb. 5 – 7). Die Zuordnung der Stationen zu den drei Standorten erfolgte nach Tabelle 3.

Tabelle 3: Standortzuordnung der Klimastationen

Klimastation	Bodenstandort
Torgau	D
Leipzig	Lö
Chemnitz	V

In Vorbereitung der Simulation erfolgte eine Aufbereitung der Klimadaten. Da die Daten in Form von Standardjahren (365 Tage) geliefert wurden, mussten Schaltjahre geschaffen werden. Dazu wurde in den entsprechenden Jahren der 29. Februar eingefügt. Um die Monatsmittelwerte bzw. die Niederschlagssumme nicht zu verändern, wurden anschließend bei der Temperatur und der Sonnenscheindauer der Monatsmittelwert und beim Niederschlag eine Null ergänzt.

Bei der Betrachtung der Klimadaten in den Zeitschnitten 1961 - 2000 und 2001 - 2050 für die einzelnen Stationen wird deutlich, dass an allen drei Stationen ein Anstieg der winterlichen Tempera-

turen zu verzeichnen ist. Zusätzlich kommt es zu einer Erhöhung der Winterniederschläge. Im Sommer dagegen ist neben einem leichten Anstieg der Temperaturen eine Verringerung der Niederschläge zu beobachten. Generell ist zu erwähnen, dass Chemnitz, aufgrund seiner Lage, die niedrigsten Durchschnittstemperaturen und die höchsten Niederschläge aufweist. Leipzig und Torgau weisen ähnliche Temperaturen auf, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer Niederschläge. Generell ist festzustellen, dass sich bei allen drei Stationen im 50jährigen Mittel die Temperatur um rund 1 °C erhöht. Die Niederschläge zeigen dagegen ein etwas differenzierteres Bild. Die langjährigen Niederschläge in Chemnitz verringern sich um 31 mm, die der Klimastation in Leipzig um 25 mm und die geringste Verringerung, mit einer Abnahme von 6 mm, ist in Torgau zu verzeichnen (Abb. 5 – Abb. 7).

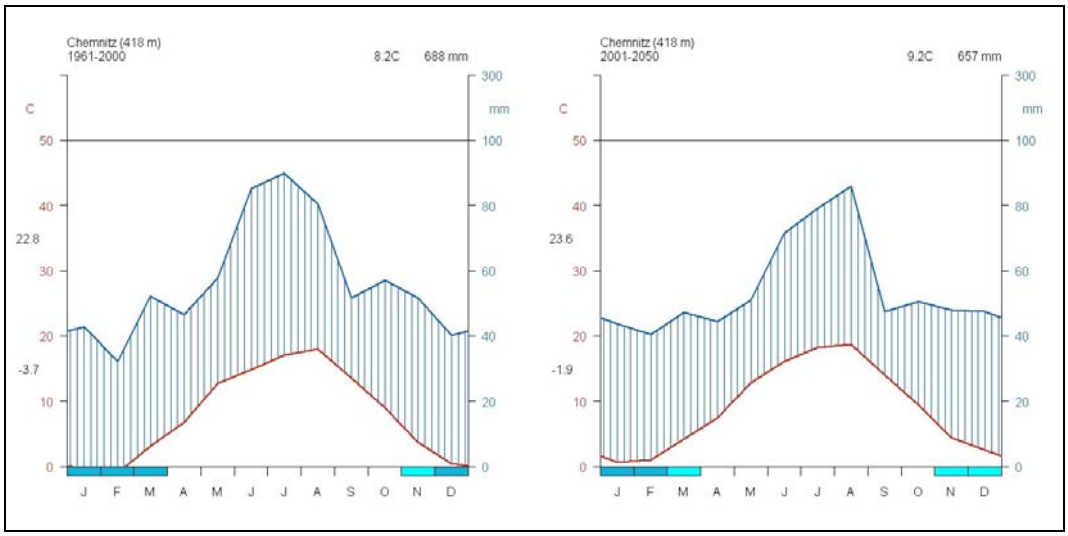


Abbildung 5: Klimadiagramme (WEREX-Simulation) der Klimastation Chemnitz für die Zeiträume 1961 - 2000 (links) und 2001 - 2050 (rechts)

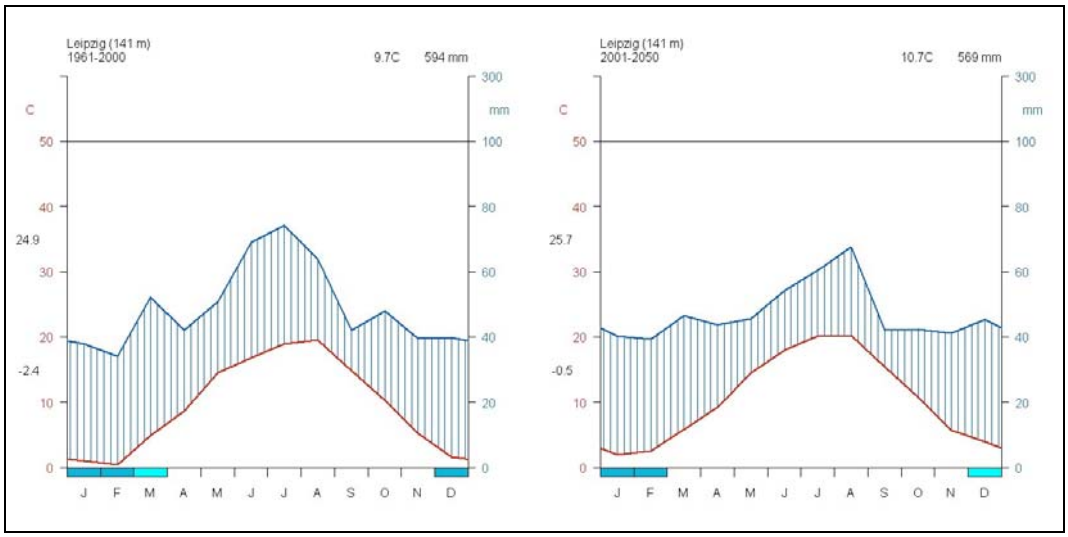


Abbildung 6: Klimadiagramme (WEREX-Simulation) der Klimastation Leipzig für die Zeiträume 1961 - 2000 (links) und 2001 - 2050 (rechts)

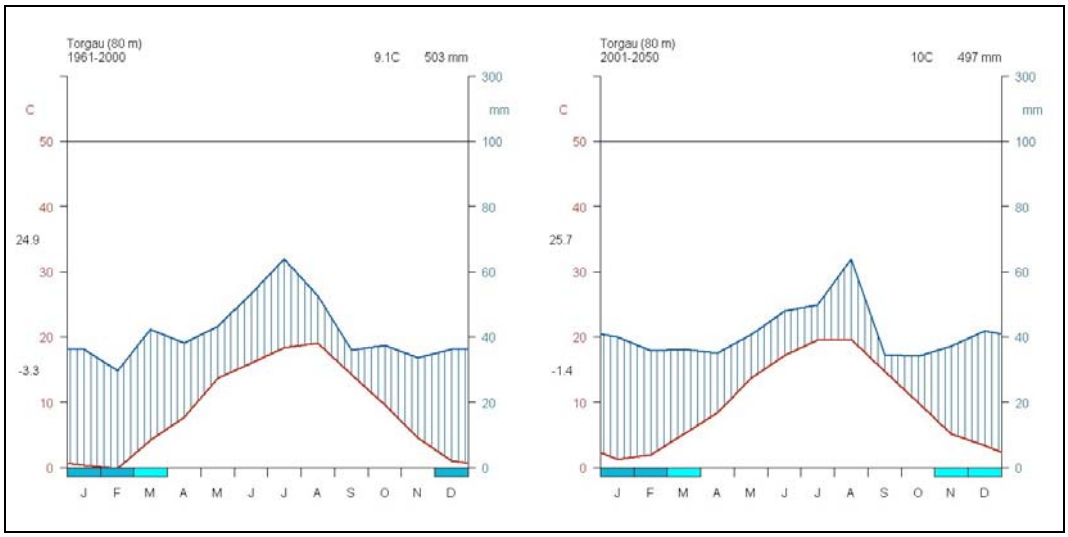


Abbildung 7: Klimadiagramme (WEREX-Simulation) der Klimastation Torgau für die Zeiträume 1961 - 2000 (links) und 2001 - 2050 (rechts)

An allen drei Stationen sind hinsichtlich des Trends der klimatischen Veränderungen für den Zeitraum 1961 - 2050 folgende Aussagen zu treffen:

- es erfolgt eine Niederschlagsabnahme,
- es erfolgt ein Anstieg der Temperatur,
- es erfolgt ein Anstieg der Sonnenscheindauer und damit verbunden eine Erhöhung der Globalstrahlung.

Diese Aussagen werden durch die folgenden Abbildungen 8 – 16 verdeutlicht.

Klimastation Chemnitz:

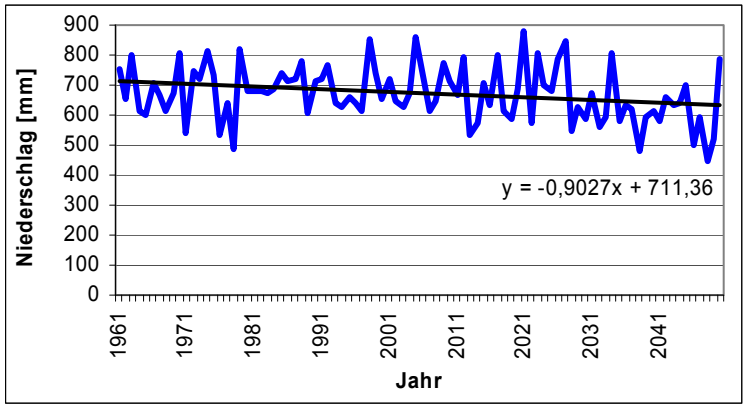


Abbildung 8: Niederschlagsentwicklung 1961 - 2050 in Chemnitz

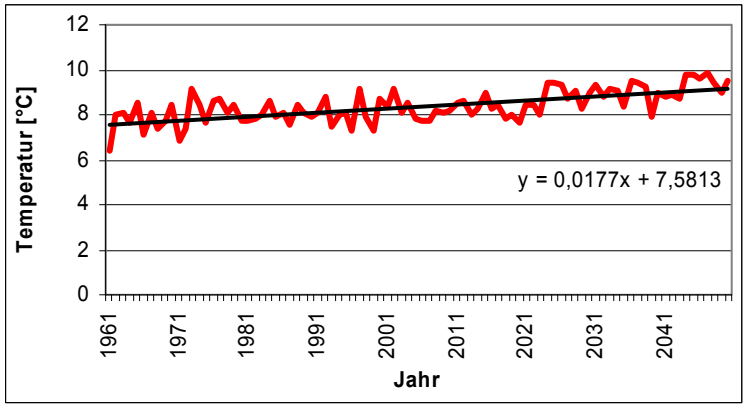


Abbildung 9: Temperaturentwicklung 1961-2050 in Chemnitz

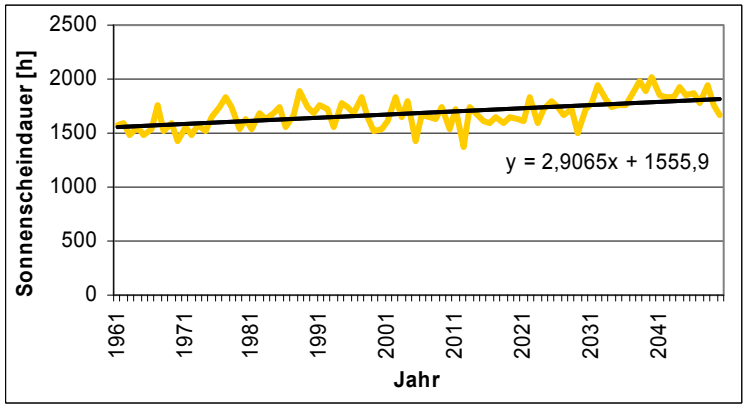


Abbildung 10: Entwicklung der Sonnenscheindauer 1961 - 2050 in Chemnitz

Klimastation Leipzig:

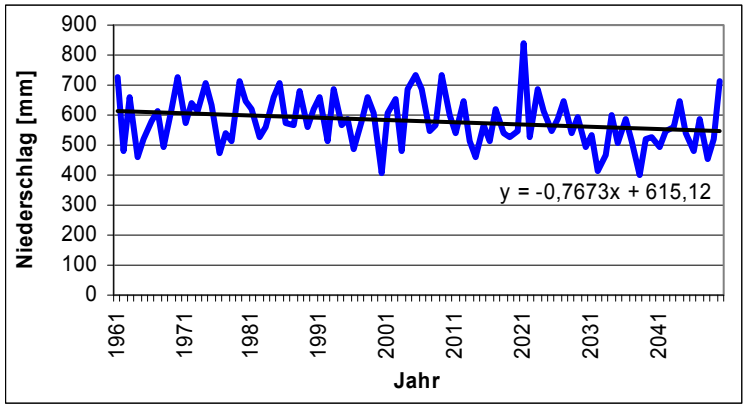


Abbildung 11: Niederschlagsentwicklung 1961 - 2050 in Leipzig

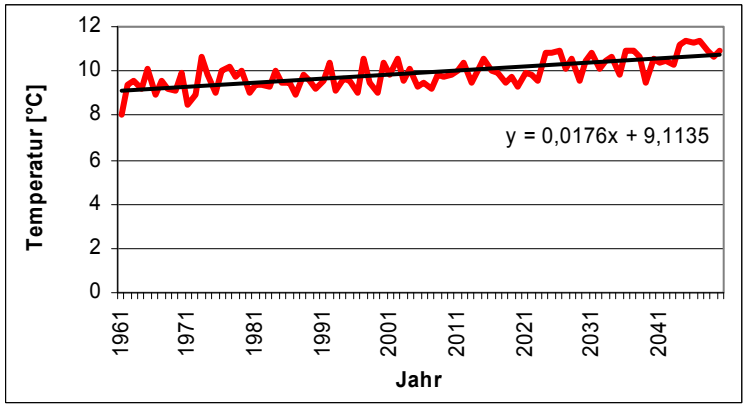


Abbildung 12: Temperaturentwicklung 1961 - 2050 in Leipzig

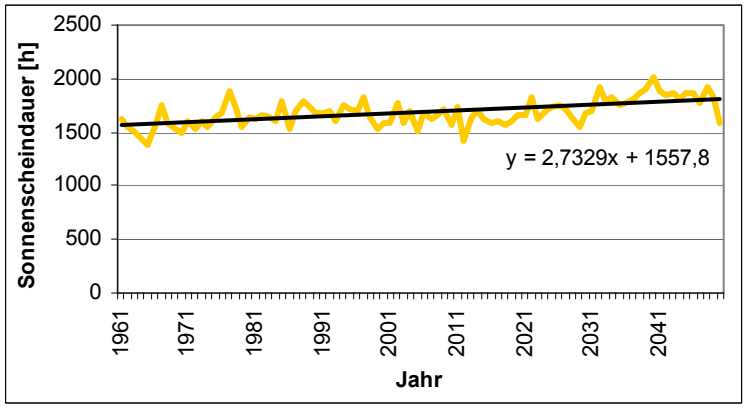


Abbildung 13: Entwicklung der Sonnenscheindauer 1961 - 2050 in Leipzig

Klimastation Torgau:

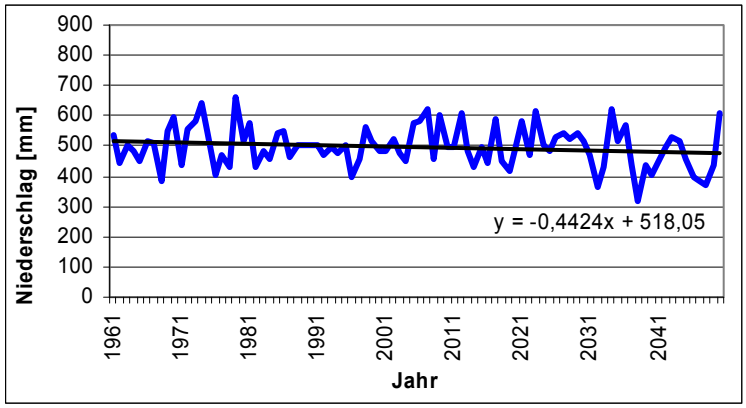


Abbildung 14: Niederschlagsentwicklung 1961 - 2050 in Torgau

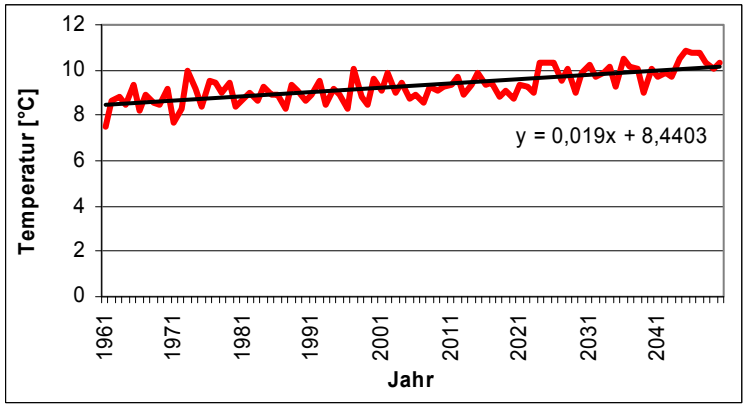


Abbildung 15: Temperaturentwicklung 1961 - 2050 in Torgau

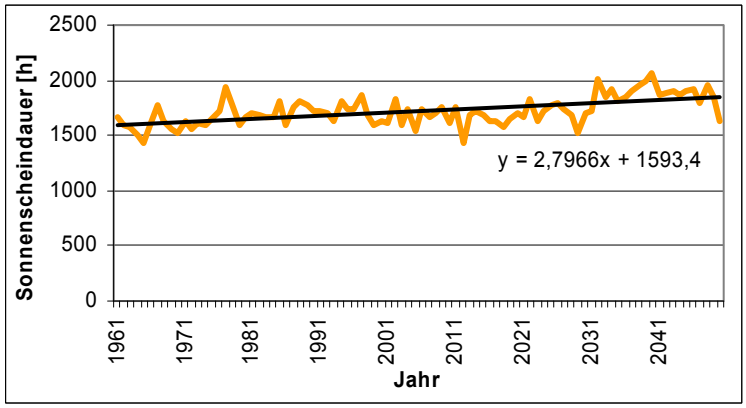


Abbildung 16: Entwicklung der Sonnenscheindauer 1961 - 2050 in Torgau

2.2.3 Bewirtschaftung

2.2.3.1 Szenarien

Als Grundlage für die Szenarienerstellung dienten detaillierte Vorlagen über die Fruchtfolgen und Düngungsregime, die die Entwicklungstendenzen in der Landwirtschaft der drei Strukturgebiete genau beschreiben. Basis hierfür stellen zum einen die Ist-Situation in den drei Agrarstrukturgebieten als auch Annahmen hinsichtlich möglicher Entwicklungen im konventionellen und ökologischen Landbau dar.

Die Ist-Situation wurde mittels eines agrarstrukturgebietsspezifischen Grundszenarios (s. Var. 11) beschrieben. Dieses Szenario diente gleichzeitig als Grundlage für alle anderen Szenarios (s. Szenarioaufbau, Tab. 5 u. 6). Die Bewirtschaftung wurde spezifisch zu den Szenariovorgaben erstellt, wobei versucht wurde, eine fachlich sinnvolle Abfolge des Fruchtartenanbaus zu beachten. Für die Szenarienerstellung wurden Regeln aufgestellt, die im Folgenden beschrieben werden.

Aufgangs- und Erntetermine

Die Aufgangs- und Erntetermine wurden im Wesentlichen agrarstrukturgebiets- und fruchtartenspezifisch aus FRANKO & LIESS (2006) übernommen. Aufgrund der erstellten Fruchtfolgen wurden jedoch Anpassungen der Aufgangs- und Erntetermine vorgenommen.

Zwischenfrucht

Als Zwischenfrucht (ZF) wurde in allen Szenarien Senf modelliert.

Bodenbearbeitung

Die Bodenbearbeitung vor dem Aufgangstermin entspricht der Saatbettbereitung wobei von einer Bearbeitungstiefe von 10 cm ausgegangen wurde. Die Saatbettbereitung erfolgte bei Getreide, Raps, Senf, Silomais, Körnermais, Erbse und Kleegras 10 Tage, bei Zuckerrübe 14 Tage und bei Kartoffeln 21 Tage vor dem Aufgang. Vor der Saatbettbereitung erfolgt in der Regel eine tiefere Bodenbearbeitung die beim konventionellen Landbau eine Bearbeitungstiefe von 30 cm und beim ökologischen Landbau eine Bearbeitungstiefe von 20 cm umfasst. Die Bodenbearbeitung nach der Ernte entspricht einer Stoppelbearbeitung. Nach Zwischenfruchtanbau und Kleegrasanbau erfolgt ein Umbruch, der im konventionellen Landbau 30 cm und im ökologischen Landbau 20 cm beträgt. Die Bearbeitungszeitpunkte und -tiefen wurden aus FRANKO et al. (2005) und FRANKO & LIESS (2006) entnommen.

Mineralische Düngung

Die mineralische Düngung erfolgte auf Basis des in das CANDY integrierten Düngemoduls. Dieses Modul berechnet die notwendige N-Düngemenge auf Basis des N_{min}-Gehaltes im Boden. Eine Ausnahme hinsichtlich der mineralischen Düngung stellt der Weißkohl dar. Für diese Fruchtart wurde direkt eine N_{min}-abhängige Düngung angegeben.

Die Düngetermine (und -menge für Weißkohl) für die einzelnen Kulturarten wurden auf Basis von FRANKO et al. (2005), HEYN (2006), LATTAUSCHKE & KRIEGHOFF (2002) und WONNEBERGER et al. (2004) ermittelt.

Organische Düngung

Die organische Düngung erfolgte im Herbst und im Frühjahr, wobei die Grenzwerte der Düngeverordnung beachtet wurden. Nach einer organischen Düngung erfolgte am selben Tag eine Einarbeitung. Bei einer organischen Düngung im Frühjahr wurde bei Winterkulturen auf die erste mineralische Düngung verzichtet. Die Düngerarten und -mengen wurden für die Grundszenarien entsprechend der Ist-Situation zusammengestellt. Für alle anderen Szenarien wurden die Düngermengen aus dem jeweiligen Szenario abgeleitet.

Erträge

Die konventionellen Erträge der einzelnen Kulturarten entsprechen ebenfalls der Ist-Situation (Tab. 4). Zusätzlich wurden zur Berechnung der Erträge des Ökolandbaus Fruchtarten-spezifische Faktoren benannt, die sich an den in der Praxis bestehenden Ertragsunterschieden orientieren. Diese Ertragsunterschiede wurden aus vielen Untersuchungen aus der landwirtschaftlichen Praxis zusammengestellt (u. a. OFFERMANN & NIEBERG 2000).

Tabelle 4: Standortspezifische Erträge und Umrechnungsfaktoren verschiedener Fruchtarten

Fruchtart	**Ertrag – konventionell** [dt FM/ha] **D |Lö| V**	**Ertrag – ökologisch** [dt FM/ha] **D |Lö| V**	**Faktor D |Lö| V**	**HP/NP-Verhältnisse** konventionell | ökologisch
Winterweizen (WW)	60 | 72 | 62	34 | 43 | 37	0,56 | 0,59 | 0,59	0,8 | 1,1
Winterroggen (WR)	44 | 63 | 51	25 | 37 | 30	0,56 | 0,59 | 0,59	0,8 | 1,3
Triticale (TR)	43 | 59 | 53	29 | 42 | 38	0,68 | 0,71 | 0,71	0,9 | 1,2
Wintergerste (WG)	54 | 68 | 57	27 | 36 | 30	0,5 | 0,53 | 0,53	0,7 | 1,1
Sommergerste (SG)	42 | 50 | 47	24 | 30 | 28	0,56 | 0,6 | 0,6	0,8 | 1,0
Silomais (SM)	375 | 450 | 415	281 | 351 | 324	0,75 | 0,78 | 0,78	- | -
Erbsen (ER)	24 | 35 | 28	18 | 26 | 21	0,73 | 0,75 | 0,75	1,0 | 1,0
Winterraps (RA)	29 | 34 | 33	22 | 27 | 26	0,74 | 0,78 | 0,78	1,7 | 2,0
Kartoffeln (KA)	380 | 388 | 390	205 | 210 | 211	0,54 | 0,54 | 0,54	0,2 | 0,3
Zuckerrübe (ZR)	528 | 568 | -	475 | 540 | -	0,9 | 0,95 | 0,95	0,7 | 0,7
Kleegras (KG)	333 | 472 | 494	316 | 472 | 494	0,95 | 1 | 1	- | -

Szenarioaufbau

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Szenarien (Tab. 5 u. 6) wurde davon ausgegangen, dass eine einheitliche Bewirtschaftung (standortabhängiges Grundszenario (Sz. 11)) bis in das Jahr 2000 erfolgte. Im Jahr 2000 wurde jedes Szenario auf die neue Fruchtfolge umgestellt.

Tabelle 5: Kennzeichnung (Szenarionummer, Kürzel) der simulierten Szenarien

Szenario-komplex	Szenario	Beschreibung	Kürzel
1	11	Grundfruchtfolge	GRD
	12	Einheitsfruchtfolge	EFF
	13	Ertragsanstieg bei GRD	EGA
	15	Einheitsfruchtfolge Ökolandbau (ab 2000)	OEF
3	31	Umstellung auf Ökolandbau 2000	UOE
	32	Ertragsanstieg bei UOE	UEG
4	41	Ausdehnung von Energiemais auf 50 % in der Fruchtfolge	ASM
	42	Abfuhr sämtlicher Koppelprodukte bei ASM	ASK
5	51	100 % Getreide (GET)	GET
	52	30 % Hackfrucht in der Fruchtfolge	HAC
	52a	30 % Hackfrucht in der Fruchtfolge + 100 dt/ha Kompost	HACa
	53	GET + jährlich 100 dt ha^{-1} Kompost	KOM
	54	GET + jährlich 170 kg N ha^{-1} Hühnertrockenkot	HTK
6	61	Viehbetrieb (Rind) + Gülleausbringung	VR_Guelle
	62	Viehbetrieb (Rind) + Biogasgülleausbringung	VR_BGGuelle
	63	Viehbetrieb (Rind) + Stallmistausbringung	VR_Mist
	64	Viehbetrieb (Schwein) + Gülleausbringung	VS_Guelle
7	71	20 % Ackerfutter in Fruchtfolge	AFU
8	81	50 % Kleegras in der Fruchtfolge	AKG
	82	Abfuhr sämtlicher Koppelprodukte aus AKG	AKK
9	91	Direktsaat	DIS
	92	Grubber	RED
	93	Direktsaat Ertragsanstieg	DSA
	94	Grubber Ertragsanstieg	GRA
10	101	Direktsaat mit Kleegras und Erbse in der Fruchtfolge	DKG
	102	Grubber mit Kleegras und Erbse in der Fruchtfolge	DKE
11	111	Mähweide	GIV
	112	Weide	GEV
	113	Wiese	GIO
	11X	Grünland mit Abfuhr	GAB
	11Z	Grünland als Dauerstilllegung	GDA

Tabelle 6: Zusammenfassender Überblick über die Varianten der Bewirtschaftungsverfahren (ohne Varianten der reduzierten Bodenbearbeitung

Variante	Verfahren	Fruchtfolge	Getreide (%)	Hackfrüchte (%)	Leguminosen (%)	Düngung/Düngemittel (kg N/ha*a)
11	Grundfruchtfolge (Ist-Zustand Kon.)	D: WW-WG*-RA-WW-WR(ZF)-SM-TR-ER	75	13	12	103 N; 38 R/ST; 12 L
		Lö: WW-WG-RA-WW(ZF)-ZR-WW-TR-ER	75	13	12	122 N; 39 S/R; 17 L
		V: WW-WG*-RA-WW(ZF)-SM-TR(ZF)-SG-KG	75	13	12	106 N; 64 R/S/ST; 30 L
13	Ertragsanstieg Kon	Siehe Var. 11	75	13	12	Siehe Var. 0
31	Umstellung Öko	D: KG-KG-WW*-WR(ZF)-ER-KA-WR*(ZF)-SG	50	13	37	28 ST/R; 37 L
		Lö: KG-KG-WW*(ZF)-SM-WR(ZF)-ER-WW-WG	50	13	37	28 ST/R; 78 L
		V: KG-KG-WW*-SG(ZF)-ER-RA-WR-WG*	63	0	37	46 R/ST; 74 L
32	Ertragsanstieg Öko	Siehe Var. 31	50	13	37	Siehe Var. 2
41	Energiemais 50 %	WW-SM-TR-SM-WR/WW/SG-SM-ER(ZF)-SM	37	50	13	103 N; 75 Rückführg. Bio-G; 14 L
42	Energiemais+Abfuhr	WW*-SM-TR*-SM-WR/WW/SG*-SM-ER(ZF)*-SM	37	50	13	103 N; 75 Rückführg. Bio-G; 14 L
51	Getreide 100 %	WW(ZF)-SG-WR-WG	100	0	0	110 N;
52	Hackfrucht 30 %	WR-ER(ZF)-WK-WW-WG-ZR-SG-RA-KA	56	33	11	150 N; 13 L
52a	Hackfrucht+Kompost	WR-ER(ZF)-WK-WW-WG-ZR-SG-RA-KA	56	33	11	85 N; 65 K; 13 L
53	Getreide+Kompost	WW(ZF)-SG-WR-WG	100	0	0	80 N; 65 K
54	Getreide+Hühnerkot	WW(ZF)-SG-WR-WG	100	0	0	170 H
61	Rindergülle 2 GVE	WW-SM-TR-SM-WR/WW/SG-SM-ER(ZF)-SM	38	50	12	66 N; 112 R; 14 L
62	Biogasgülle 2 GVE	WW-SM-TR-SM-WR/WW/SG-SM-ER(ZF)-SM	38	50	12	66 N; 112 Bio-G; 14 L
63	Stalldung 2 GVE	WW*-SM-TR*-SM-WR/WW/SG*-SM-ER(ZF)*-SM	38	50	12	57 N; 121 ST; 14 L
64	Schweinegülle 2 GVE	WW-ER-WG-RA-TR-WW(ZF)-KM-SG	75	13	12	20 N; 128 S; 14 L

Tabelle 6: (Fortsetzung)

Vari-ante	Verfahren	Fruchtfolge	Getrei-de (%)	Hack-früchte (%)	Legumi-nosen (%)	Düngung/Düngemittel (kg N/ha*a)
71	Ackerfutter als Stillle-gung 20 %	D: WR(ZF)-SM-WW-WG*-RA-WW-KG-KG-TR-ER	60	10	30	68 N; 30 ST/R; 35 L
		Lö: WW-WG-RA-WW(ZF)-ZR-WW-KG-KG-TR-ER	60	10	30	69 N; 31 R; 53 L
		V: TR-WG*-RA-WW-SM-ER-WW(ZF)WG-KG-KG	60	10	30	57 N; 51 ST/R; 53 L
81	Legum.-Gras 50 % (ohne N-Mineraldüngg.)	KG-KG-WW-WG-KG-KG-TR(ZF)-SG	50	0	50	46 R; 109 L
82	Legum.-Gras+Abfuhr (ohne N-Mineraldüngg.)	KG-KG-WW*-WG*-KG-KG-TR(ZF)*-SG*	50	0	50	46 R; 109 L
11X	Grünland+Abfuhr	KG			100	46 R; 218 L
11Z	Grünland-Stilllegung	KG			100	178 L
111	Mähweide	Dauergrünland				-
112	Weide	Dauergrünland				-
113	Wiese	Dauergrünland				-

Standorte/Bodenart: D = Diluvial-Boden aus anlehmigem Sand; Lö = Löß aus sandigem Lehm; V = Verwitterungsboden aus sandigem Lehm; Zuordnung: D/Lö/V = XX/XX/XX

Fruchtfolge: WW = Winterweizen; WR = Winterroggen; TR = Triticale; WG = Wintergerste; SG = Sommergerste; SM = Silomais; KM = Körnermais; ER = Erbse; RA = Winter-raps; KA = Kartoffeln; ZR = Zuckerrüben; KG = Kleegras; WK = Weißkohl; ZF = Zwischenfrucht (als Gründüngung);

Düngung: N = mineral. N; R = Rindergülle; S = Schweinegülle; ST = Stalldung; Bio-G = Biogasgülle; K = Kompost; H = Hühnerkot; L = legum. N-Bindg. * = Stroh-Abfuhr

Szenarienkomplex 1 → Beibehaltung der aktuellen landwirtschaftlichen Methoden und Anbauverhältnisse des konventionellen Landbaus und des ökologischen Landbaus

Der Szenarienkomplex 1 beschreibt im Wesentlichen die momentanen mittleren Anbauverhältnisse der drei ASG für den konventionellen und den ökologischen Landbau. Der Fruchtfolgenaufbau, die organische Düngung sowie der Verbleib der Koppelprodukte (Stroh, Rübenblatt etc.) wurden entsprechend der Ist-Situation festgelegt. Generell wurde unterstellt, dass sich die Anbauverhältnisse von 1961 bis 2050 nicht verändern bzw. sich nicht wesentlich verändert haben werden.

Das Grundszenario (Sz. 11) umfasst die ASG-spezifische Fruchtarten-Zusammensetzung und die damit verbundene Fruchtfolge (FF) bei einem konstanten Ertragsniveau für den Simulationszeitraum von 1961 bis 2050. Neben dem Grundszenario wurde, um einen direkten Vergleich der drei Standorte zu ermöglichen, ein Einheitsszenario (Sz. 12) entworfen, bei dem auf allen drei Standorten dieselbe Fruchtfolge betrachtet wurde. Auch hier wurde von einem konstanten Ertragsniveau ausgegangen. Der Aufbau der Fruchtfolgen ist standortspezifisch in Tabelle 7 aufgelistet worden.

Tabelle 7: Fruchtfolgen des Grund- (Var. 11) und Einheitsszenarios (Var. 12) des konventionellen Landbaus für die drei Standorte

Standort	Var. 11			Var. 12
	D	Lö	V	D |Lö| V
Fruchtfolge	WW	WW	WW	WW
	WG	WG	WG	WG
	RA	RA	RA	RA
	WW	WW (ZF)	WW (ZF)	WW (ZF)
	WR (ZF)	ZR	SM	SM
	SM	WW	TR (ZF)	ER
	TR	TR	SG	
	ER	ER	KG	

Neben dem konventionellen Landbau umfasste dieser Szenarienkomplex auch den ökologischen Landbau. Wie beim konventionellen Landbau, wurde auch für den Ökolandbau ein Einheitsszenario (Var. 15) aufgestellt. Die Fruchtfolgen beider Szenarien sind in Tabelle 8 zu finden.

Tabelle 8: Fruchtfolgen des ökologischen Landbaus für das Grundszenario (Var. 31/32) und das Einheitsszenario (Var. 15)

Standort	Var. 31 / Var. 32			Var. 15
	D	Lö	V	D |Lö| V
Fruchtfolge	KG	KG	KG	KG
	KG	KG	KG	KG
	WW	WW (ZF)	WW	WW
	WR (ZF)	SM	SG (ZF)	KA
	ER	WR (ZF)	ER	WR (ZF)
	KA	ER	RA	SG
	WR (ZF)	WW	WR	
	SG	WG	WG	

Szenarienkomplex 2→ Berücksichtigung von Entwicklungstendenzen in der Landwirtschaft

Der Szenarienkomplex 2 zur Berücksichtigung von zu erwartenden Entwicklungstendenzen in der Landwirtschaft bis zum Jahr 2050 ist auf Grund von Schwierigkeiten in der konkreten Ausgestaltung im Verlauf des Projekts weggefallen.

Szenarienkomplex 3 – Umstellung auf Ökolandbau

Bei diesem Szenarienkomplex wurde unterstellt, dass bis 2050 eine Umstellung des konventionellen Anbaus auf den ökologischen Landbau erfolgt:

- *Konstantes Ertragsniveau,*
- *Lineare Ertragserhöhung (wie unter Szenarienkomplex 1 beschrieben).*

Zur Simulation wurden dazu die Fruchtfolgen aus Tabelle 8 verwendet, die Umstellung auf den Ökolandbau erfolgte im Jahr 2000. Mittels Sz. 31 wird das konstante Ertragsniveau beschrieben. In Sz. 32 wird der lineare Ertragsanstieg betrachtet, die Fruchtfolge ist jedoch unverändert.

In einigen Varianten wurde ein linearer Ertragsanstieg von 25 % auf dem D-Standort, 50 % auf dem Lö-Standort und 75 % auf dem V-Standort unterstellt.

Szenarienkomplex 4 – Energiefruchtfolgen

Vor dem Hintergrund des in den letzten Jahren stetig steigenden Bedarfes an Energieträgern für Biogasanlagen beschreibt dieser Szenarienkomplex die Ausdehnung des Anbaus von Energiepflanzen, speziell von Mais, auf 50 % in der Fruchtfolge. Es wurde angenommen, dass der Mais nach der Ernte zur Biogaserzeugung verwendet wird. Entsprechend den Erträgen (es wurden hier die Ertragsniveaus des Silomaises unterstellt) wurden die Biogüllemengen der Biogaserzeugung berechnet und im vollen Umfang auf die Fläche zurückgeführt. Die Biogüllegabe erfolgte jeweils zum Anbau des Energiemaises (EM).

Generell wurden in diesem Szenario zwei Annahmen simuliert. In Variante 41 blieben sämtliche Koppelprodukte der anderen angebauten Kulturarten auf der Fläche. Im Gegensatz dazu wurde in Variante 42 eine komplette Abfuhr der Koppelprodukte (z.B. Stroh) der anderen Kulturpflanzen angenommen. Die Fruchtfolge war bei Var. 41 und 42 identisch (Tab. 9).

Tabelle 9: Fruchtfolge mit 50 % Energiemais – Var. 41 und Var. 42

Standort	Var. 41 / 42		
	D	Lö	V
Fruchtfolge	WW	WW	WW
	EM	EM	EM
	TR	TR	TR (ZF)
	EM	EM	EM
	WR	WW	SG
	EM	EM	EM
	ER (ZF)	ER (ZF)	ER (ZF)
	EM	EM	EM

Szenarienkomplex 5 – Durchschnittliche viehlose Marktfruchtbetriebe sowie bei Zukauf von organischen Düngemitteln (z.B. Sekundärrohstoffdünger wie Kompost)

Ausgehend von Marktfruchtbetrieben ohne Viehhaltung wurden hier zwei unterschiedlich wirtschaftende Betriebe vorausgesetzt. Einer der beiden Betriebe sollte zu 100 % Getreide anbauen, der andere einen hohen Anteil an Hackfrüchten mit $^1/_3$ Gemüse, $^1/_3$ Zuckerrüben und $^1/_3$ Kartoffeln in der Fruchtfolge aufweisen. Bei beiden Betrieben wurde davon ausgegangen, dass die Koppelprodukte (Stroh, Rübenblatt etc.) auf dem Feld verbleiben.

Für den ersten Betrieb (Getreideanbau) wurden 3 unterschiedliche Szenarien aufgestellt, die sich jedoch nicht in der Fruchtfolge unterscheiden. Das erste Szenario (Var. 51) beschreibt den Betrieb ohne Zukauf jeglicher organischer Dünger, d.h. es erfolgt nur eine mineralische Düngung. Im zweiten Szenario (Var. 53) wird neben der mineralischen Düngung jährlich 100 dt/ha Kompost zugekauft und auf die Fläche verbracht. Im dritten Szenario (Var. 54) erfolgt der Zukauf von Hühnertrockenkot, wobei eine Menge von 170 kg N/ha pro Jahr auf die Fläche ausgebracht wird.

Beim zweiten Betrieb (Var. 52) (hoher Anteil an Hackfrüchten) wurde ebenfalls davon ausgegangen, dass kein Zukauf organischer Dünger erfolgt und somit nur eine mineralische Düngung auf der Fläche durchgeführt wird. Neben Zuckerrübe und Kartoffel wurde als dritte Hackfrucht Weißkohl (WK) in die Fruchtfolge eingebaut. Die notwendigen Erträge wurden aus Angaben in LATTAUSCHKE (2006) ermittelt. Hierzu wurde der mittlere Ertrag der 90 Tage im Feld stehenden Sorten gebildet und es wurde davon ausgegangen, dass auf allen drei Standorten dieselben Erträge erzielt werden. Die Weißkohl-spezifische mineralische N-Düngung wurde aus LATTAUSCHKE & KRIEGHOFF (2002) abgeleitet. Da neben den Weißkohlerträgen auch keine Ertragsangabe für die

Zuckerrübe auf dem V-Standort zur Verfügung stand, wurde dieser ebenfalls berechnet (Tab. 10). Dazu wurde aus den Erträgen der Hackfrüchte in Sachsen ein Faktor berechnet, der mit dem Zuckerrübenertrag des Lö-Standorts multipliziert wurde.

Tabelle 10: Erträge von Weißkohl (D-, Lö- und V-Standort) und Zuckerrübe (V-Standort)

	Weißkohl D |Lö| V	**Zuckerrübe V**
Ertrag [dt FM/ha]	854	545

Der Aufbau der für den Szenarienkomplex 5 erstellten Fruchtfolgen ist in Tabelle 11 aufgelistet worden. Beide Fruchtfolgen wurden ohne Veränderungen auf allen drei Standorten verwendet.

Tabelle 11: Fruchtfolgen – Var. 51 - 54

Standort	**Var. 51 / 53 / 54 D |Lö| V**	**Var. 52 D |Lö| V**
Fruchtfolge	WW (ZF) SG WR WG	WR ER (ZF) WK WW WG ZR SG RA KA

Szenarienkomplex 6 – Veredlungsbetriebe mit hohem Viehanteil

Auch in diesem Szenarienkomplex wurde von zwei unterschiedlich wirtschaftenden Betrieben ausgegangen. Beim ersten Betrieb ist eine Rindviehhaltung mit 2 GV/ha berechnet worden. Auf dieser Basis erfolgte die Erstellung einer Fruchtfolge mit hohem Silomaisanbau. Die bei der Viehhaltung entstehenden Exkremente sollten als organische Düngemittel zurück auf die Fläche gebracht werden. Dazu wurden drei verschiedene Szenarien entworfen, die bei gleicher Fruchtfolge unterschiedliche organische Dünger enthielten. In Var. 61 wurde dabei Rindergülle, bei Var. 62 Biogasgülle aus Rindergülle und bei Var. 63 Festmist als organischer Dünger in die Fruchtfolge eingebaut.

Im zweiten Betrieb wurde von einer Schweinehaltung, ebenfalls mit 2 GV/ha ausgegangen. Auch hier wurden die Exkremente als organische Dünger auf die Fläche gebracht. In Var. 64 erfolgte die Verwendung von Schweinegülle als organischer Dünger in der Fruchtfolge. Da für den in der Fruchtfolge eingebauten Körnermais (KM) keine Erträge vorrätig waren, wurde dieser standortabhängig berechnet. Aus HAASE & BÖHME (2002) konnte für den Lö-Standort ein Ertrag ermittelt werden (Mittelwert der Erträge des Versuchsstandortes Salbitz) und anschließend auf die Standor-

te D und V übertragen. Dabei wurden die Ertragsverhältnisse des Silomaises der drei Standorte zu Grunde gelegt (Tab. 12).

Tabelle 12: Körnermaiserträge der einzelnen Standorte

	Körnermais		
	D	**Lö**	**V**
Ertrag [dt FM/ha]	102	123	113

Bei beiden Betrieben verblieben die Koppelprodukte der Kulturpflanzen auf der Fläche. Dagegen wurden in der Variante der Düngung mit Stallmist (Var. 63) sämtliche Koppelprodukte vom Getreide abgefahren. Die Fruchtfolgen des Szenarienkomplexes 6 sind in Tabelle 13 aufgelistet worden.

Tabelle 13: Fruchtfolgen – Var. 61 - 64

Standort	**Var. 61 / 62 / 63**			**Var. 64**
	D	**Lö**	**V**	**D |Lö| V**
Fruchtfolge	WW	WW	WW	WW
	SM	SM	SM	ER
	TR	TR	TR (ZF)	WG
	SM	SM	SM	RA
	WR	WW	SG	TR
	SM	SM	SM	WW (ZF)
	ER (ZF)	ER (ZF)	ER (ZF)	KM
	SM	SM	SM	SG

Die durch die Viehhaltung entstehenden Mengen an Stallmist und Gülle wurden aus FRANKO et al. (2005) entnommen, deren Berechnungen auf Basis des Merkblattes ATV-M 702 (ATV, 1995) beruhen. Hier wird davon ausgegangen, dass 1 GV Rind im Jahr

- 110 dt Stallmist,
- 16 m^3 Gülle,

produziert, während durch 1 GV Schwein im Jahr

- 12,1 m^3 Gülle,

entstehen.

Szenarienkomplex 7 – 20 % Ackerfutter als Stilllegung mit Kleearten in der Fruchtfolge

Auf Basis der Grundfruchtfolge (Var. 11) wurde eine neue standortabhängige Fruchtfolge erstellt, die 20 % Kleegrasanteil besitzt. Die Fruchtfolgen sind in der folgenden Tabelle 14 verzeichnet.

Tabelle 14: Fruchtfolge – Var. 71

Standort	Sz. 71		
	D	Lö	V
Fruchtfolge	WR (ZF)	WW	TR
	SM	WG	WG
	WW	RA	RA
	WG	WW (ZF)	WW
	RA	ZR	SM
	WW	WW	ER
	KG	KG	WW (ZF)
	KG	KG	WG
	TR	TR	KG
	ER	ER	KG

Szenarienkomplex 8 – 50 % Kleegras in der Fruchtfolge (Ersatz von mineralischen N-Düngemitteln durch legume N-Bindung)

Für diesen Szenarienkomplex erfolgte die Aufstellung einer einheitlichen Fruchtfolge für alle drei Standorte, wobei von einem zweijährigen Kleegrasanbau ausgegangen wurde. Auf den Einsatz von mineralischen N-Düngern wurde verzichtet. Durch den Anbau einer Zwischenfrucht und einer organischen Düngung mit Rindergülle (Höhe wurde aus der konventionellen Einheitsfruchtfolge – Var. 12 entnommen) wurde versucht, den N-Bedarf der jeweiligen zweiten Nachfrucht nach dem Kleegras zu decken. Dieser Szenarienkomplex umfasst zwei Varianten. In Var. 81 verbleiben alle Koppelprodukte auf dem Feld, während in Var. 82 sämtliche Koppelprodukte abgefahren werden. Beide Szenarien basieren auf der gleichen Fruchtfolge (Tab. 15).

Tabelle 15: Fruchtfolge – Var. 81 – 82

Standort	Var. 81 / 82
	D |Lö| V
Fruchtfolge	KG
	KG
	WW
	WG
	KG
	KG
	TR (ZF)
	SG

Szenarienkomplex 9 – Änderung der Grundbodenbearbeitung – Direktsaat und Mulchsaaten

Der Szenarienkomplex 9 beschreibt die Änderung der Grundbodenbearbeitung (konservierende Bodenbearbeitung mit dem Grubber bzw. Direktsaat).

Angepasst an die unterschiedlichen Zielvorstellungen hat sich eine Vielfalt von Kombinationsgeräten für die Bodenbearbeitung und Saat entwickelt und es wurden zahlreiche Begriffe für die jeweiligen Verfahren geprägt (ESTLER & KNITTEL 1996). Diese Verfahren werden u.a. als Minimal-Bestelltechnik, reduzierte Bodenbearbeitung, Lockerboden- oder Festbodenwirtschaft bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird die Untergliederung nach KTBL (1993) verwendet. Demnach werden 3 Bodenbearbeitungskonzepte nach ihrer Art, Intensität und Häufigkeit der mechanischen Eingriffe in das Bodengefüge unterschieden: die konventionelle Bodenbearbeitung mit Pflug, die konservierende Bodenbearbeitung mit dem Einsatz nichtwendender Bodenbearbeitungsgeräte sowie die Direktsaat ohne Bodenbearbeitung. Bei der Bodenbearbeitung mit dem Pflug wird eine Lockerung und Wendung des Bodens bis auf Krumentiefe durchgeführt. Dabei werden organische Reststoffe und Unkraut in den Boden eingearbeitet. Diese Bodenbearbeitung hinterlässt eine von Reststoffen freie Ackeroberfläche als Voraussetzung für die störungsfreie Funktion herkömmlicher Sätechnik.

Die konservierende Bodenbearbeitung beschreibt eine Bearbeitung ohne Pflugeinsatz. Die Bearbeitungsintensität dieses Verfahrens liegt zwischen der Bearbeitung mit Pflug und der Direktsaat. Das Konzept der konservierenden Bodenbearbeitung beruht auf zwei Grundgedanken. Einmal wird die übliche Intensität der Primärbodenbearbeitung nach Art, Häufigkeit und Tiefe des mechanischen Eingriffs reduziert. Durch diese nichtwendende Bodenbearbeitung und die längere Bodenruhe wird ein stabileres, tragfähigeres Bodengefüge geschaffen. Ein zweiter Grundgedanke ist das Belassen von Pflanzenreststoffen der Vor- und/oder Zwischenfrucht nahe oder auf der Bodenoberfläche. Die Direktsaat ist ein Bestellverfahren ohne jegliche Bodenbearbeitung seit der Ernte der vorangegangenen Hauptfrucht. In den Systemen konventionelle und konservierende Bodenbearbeitung besteht die Möglichkeit alle Arbeitsgänge getrennt durchzuführen, Saatbettbereitung und Saat zu kombinieren oder auch sämtliche Arbeitsgänge für die Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Saat zusammenzufassen (ESTLER & KNITTEL 1996). Die Bodenbearbeitung beeinflusst durch Änderungen des Bodengefüges, der Belüftung und der Platzierung von Pflanzenrückständen den Stoffkreislauf im Boden. Zusammenfassende Auswertungen hierzu finden sich in HOLLAND (2004), ITADA (2006), TEBRÜGGE & DÜRING (1999) und WALD (2003).

Unterschiedlich komplexe Modellierungsansätze hinsichtlich des C-N-Haushaltes bei konservierender Bodenbearbeitung finden sich u. a. in KARLEN et al. (1998) mit dem Model RZWQM, bei NG et al. (2000) mit dem Modell LEACHM, bei OORTS et al. (2007) mit dem Modell PASTIS, in SCHOMBERG & CABRERA (2001) mit dem Modell CERES sowie in WALD (2003) mit dem Modell CANDY. Speziell mit der Modellierung der Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik bei einer Bodenbedeckung mit Mulchmaterial beschäftigen sich FINDELING et al. (2006) in ihren Untersuchungen.

Eine Abbildung der Effekte einer konservierenden Bodenbearbeitung auf den N-Haushalt im Boden konnte mit dem Modell CANDY bisher nicht durchgeführt werden. In dem bearbeiteten Projekt können deshalb nur vereinfachte Annahmen für die Simulation einer veränderten Bodenbearbeitungsintensität für die Modellierungen verwendet werden. An einer Umsetzung der durch die Bodenbearbeitungsintensität veränderten Stoffflüsse im Modell wird gegenwärtig im Rahmen einer Dissertation (THIEL) gearbeitet.

Annahmen

Nachfolgend werden die für die Modellierungen mit CANDY getroffenen Annahmen vorgestellt. Die Annahmen beruhen auf Auswertungen eines langjährigen Bodenbearbeitungsversuches der Südzucker AG und des Institutes für Zuckerrübenforschung (IfZ) in Göttingen. Der für das Agrarstrukturgebiet 3 (Lö-Standort) ausgewählte Untersuchungsschlag Lüttewitz wird u. a. in SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT [LfL] (2002) und THIEL (2002) ausführlich beschrieben. Dieser Standort wurde ausgewählt, da hierfür langjährige Untersuchungsreihen (LfL, IfZ) hinsichtlich relevanter Bodenparameter und Ertragsdaten vorlagen und sich so annähernd verallgemeinerbare Aussagen für die Lößregion treffen lassen.

Untersuchungen der SÄCHSISCHEN LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2002) zur Umsetzung von konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren in anderen Regionen Sachsens (Leipziger Tiefland, Erzgebirge) zeigen erste Trends auf. Für generelle Aussagen hinsichtlich der Modellierbarkeit unterschiedlicher Bearbeitungsintensitäten für D- und V-Standorte sind jedoch längere Zeitreihen notwendig. Deshalb konnten für den D- und V-Standort keine Modellierungen durchgeführt werden.

Standortcharakteristik

Der für die Untersuchungen ausgewählte Praxisschlag Lüttewitz (Abb. 17) befindet sich im Mittelsächsischen Lößhügelland. Die Fläche ist Subregion der Lommatzscher Pflege. Das Gebiet des Mittelsächsischen Lößhügellandes weist nach HAASE (1995) eine Jahresmitteltemperatur von 8,3 - 8,8 °C und eine durchschnittliche Niederschlagssumme von 600 mm auf. Auf dem Untersuchungsschlag treten nach TEIWES (1997) Ranker, Kolluvien und Parabraunerden als Bodentypen auf. Der Untersuchungsschlag wurde bis 1992 konventionell mit dem Pflug bearbeitet. Im Laufe des Jahres 1992 wurden vier Großparzellen eingerichtet. Von West nach Ost wurden die Varianten Pflug, Direktsaat, konservierende Bearbeitung (Grubber) und konservierende Bearbeitung (Grubber) mit Tiefenlockerung angelegt. Die Großparzellen haben eine durchschnittliche Fläche von ca. 6 ha. Die Bodenbearbeitungsvarianten auf dem Schlag Lüttewitz wurden im Zeitraum 1999 – 2001 intensiv untersucht (SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2002). Daran schlossen sich Untersuchungen in Form von Diplomarbeiten (THIEL 2002; KELLER 2006) und einer Dissertation (DIECKMANN 2007) an. Weiterhin wurde ein Projekt zum Nährstoff- und Pestizidaustrag bei unterschiedlicher Bodenbearbeitungsintensität auf dem Schlag Lüttewitz als Untersuchungsobjekt durchgeführt (MACHULLA 2007).

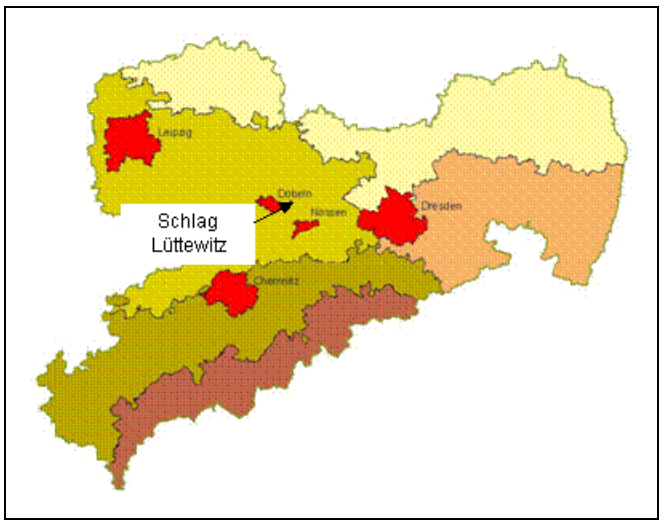


Abbildung 17: Lage des Praxisschlages Lüttewitz in Sachsen

In der Tabelle 16 sind die aus den Auswertungen für den Standort Lüttewitz abgeleiteten Parameter aufgeführt. Die für die Modellierungen relevanten Parameter (organischer Kohlenstoffgehalt (C_{org}), Trockenrohdichte (TRD), Luftkapazität (LK) und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (K_s) wurden als Mittelwerte nur für die umsatzintensivste Schicht 0 – 30 cm abgeleitet. In der Tabelle 16 ist auch die der Auswertung zugrunde liegende Anzahl (n) von Messwerten und deren Variationskoeffizient (VarK) vermerkt. Ertragsunterschiede konnten nur für die in der Fruchtfolge am Standort Lüttewitz vorkommenden Kulturarten Zuckerrüben (ZR) und Winterweizen (WW) ausgewiesen werden. Für die Winterfrucht Wintergerste (WG) wurden die Ertragsunterschiede des Winterweizens (WW) angenommen. Anhand der Auswertungen eines Gemeinschaftsprojektes des IfZ und der Südzucker AG, bei welchem relevante Parameter in 10 Praxisversuchen mit Parzellen von 3 bis 10 ha (unterschiedliche Böden, Klimazonen, Geländeformen, Technik) erfasst wurden, konnte RÜHL (2007) aufzeigen, dass sich im Mittel über die 10 Standorte bei Getreide keine Ertragsunterschiede zwischen den Varianten Pflug und Konservierend ergeben, die Direktsaat dagegen durchschnittliche Ertragsverluste von 5 % gegenüber der Pflugvariante aufweist. Für Zuckerrüben lagen die Ertragsverluste bei Direktsaat bei 15 %, während es zwischen den Varianten Pflug und Konservierend keine Unterschiede gab (RÜHL 2007).

In der Tabelle 16 sind die Änderungen relativ im Vergleich zur konventionellen Grundbodenbearbeitung dargestellt. Bei den Anpassungen der Modellparameter aus dem Bereich Bodenphysik sowie Acker- und Pflanzenbau kennzeichnen negative Vorzeichen Verringerungen, positive Vorzeichen Erhöhungen im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung.

Da es sich bei der Änderung des Bewirtschaftungssystems um mehr als nur den Austausch eines Bodenbearbeitungsgerätes handelt, kommt es oft zu Modifikationen in den Fruchtfolgen. Nach KORNMANN et al. (2004) ist die Fruchtfolgegestaltung (häufiger Wechsel zwischen Blatt- und Halmfrucht bzw. Winterungen und Sommerungen, Zwischenfruchtanbau) eine elementare Maß-

nahme, um den acker- und pflanzenbaulichen Problemen, welche bei konservierender Bodenbearbeitung oder Direktsaat auftreten können, zu begegnen. Darauf weist auch eine aktuelle Literaturauswertung hin (ITADA 2006)**.** Der Aufbau der modellierten Fruchtfolgen (Var. 91, Var. 92, Var. 101, Var. 102) ist in den Tabellen 17 und 18 aufgelistet. Für die unterschiedlichen Grundbodenbearbeitungen wurden verschiedenen Bearbeitungstiefen modelliert.

Der Einfluss der unterschiedlichen Bodenbearbeitung wurde folgender Maßen herausgearbeitet. Von den vier Varianten wurden entsprechend deren Fruchtfolgen die Parametersätze jeweils für konventionelle (Pflug), reduzierte (Grubber) Bodenbearbeitung und für Direktsaat mit und ohne veranschlagten Ertragsveränderungen verwendet und der Szenarieneinfluss auf die C_{org}-Gehalte durch das CANDY-Modell berechnet.

Tabelle 16: Änderung der Bodenparameter (%) im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung hinsichtlich der Modellierung der konservierenden Bodenbearbeitung und Direktsaat auf dem Lö-Standort

Region	**Lö-Standort**	**Lö-Standort**	**Lö-Standort**
Agrarstrukturgebiet	**3**	**3**	**3**
Bodenbearbeitung	**konventionell (Pflug)**	**konservierend (Grubber)**	**konservierend (Direktsaat)**
Referenzbetrieb	Lüttewitz (Sächsisches Lößhügelland)	Lüttewitz (Sächsisches Lößhügelland)	Lüttewitz (Sächsisches Lößhügelland)
Bodenphysik			
C_{org} 0 -10 cm	-	+21 % | n = 5 | VarK = 13 %	+23 % | n = 5 | VarK = 10 %
C_{org} 10-20 cm	-	-20 % | n =5 | VarK = 11 %	-26 % | n = 5 | VarK = 08 %
C_{org} 20-30 cm	-	-12 % | n=5 | VarK = 14%	-26 % | n = 5 | VarK =22 %
TRD 0 - 10 cm	-	+03 % | n = 5 | VarK = 07 %	+12 % | n = 3 | VarK = 0 %
TRD 10 - 20 cm	-	+14 % | n = 5 | VarK = 05 %	+11 % | n = 5 | VarK = 03 %
TRD 20 - 30 cm	-	+11 % | n = 5 | VarK = 03 %	+08 % | n = 4 | VarK = 01 %
LK 0 -10 cm	-	-05 % | n = 2 | VarK = 05 %	-57 % | n = 2 | VarK = 06 %
LK 10 - 20 cm	-	- 16 % | n = 3 | VarK =07 %	-53 % | n = 3 | VarK = 06 %
LK -20 -30 cm	-	-20 % | n = 3 | VarK = 07 %	-41 % | n = 3 | VarK = 05 %
FK 0 -10 cm	-	-05 % | n = 2 | VarK = 06 %	+07 % | n = 2 | VarK = 02 %
FK 10 - 20 cm	-	-09 % | n = 3 | Var = 02 %	-04 % | n = 3 | VarK = 07 %
FK -20 -30 cm	-	-09 % | n = 3 | VarK = 03 %	-04 % | n = 3 | VarK =07 %
K_s 0 - 10 cm	-	-04 % | n = 2 | VarK = 87 %	-37 % | n = 2 | VarK = 37 %
K_s 10 - 20 cm	-	-27 % | n = 3 | VarK = 64 %	+41 % | n = 3 | VarK = 100 %
K_s 20 - 30 cm	-	+56 % | n = 3 | VarK = 50 %	+52 % | n = 3 | VarK = 46 %
Acker- und Pflanzenbau			
Bearbeitungstiefe [cm]	30	10	-
Ertrag ZR	-	-02 % | n=4 | VarK = 05 %	-06 % | n =4 | VarK = 04 %
Ertrag WW	-	-01 % | n =7 | VarK = 04 %	-08 % | n =7 | VarK = 10 %

Tabelle 17: Fruchtfolgen des Szenarios 9 für den Lö-Standort bei konventioneller Bodenbearbeitung, konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat

Standort	Var. 91 Lö Direktsaat	Var. 92 Lö konservierende Bodenbearbeitung (Grubber)
Fruchtfolge	ZR	ZR
	WW	WW
	KG	KG
	KG	KG
	WG (ZF)	WG (ZF)

Für die Szenarien 91 und 92 wurde ein konstantes Ertragsniveau modelliert.

Szenarienkomplex 10 – 100 % Direktsaat, 20 % Klee in mindestens zweijährigen Beständen, 30 % Leguminosen insgesamt

Der Szenarienkomplex 10 beschreibt die Änderung der Grundbodenbearbeitung (konservierende Bodenbearbeitung mit dem Grubber bzw. Direktsaat). Im Vergleich zum Szenariokomplex 9 wurden hier die Fruchtfolgen durch den Anbau von Erbsen erweitert (Tab.18).

Tabelle 18: Fruchtfolgen des Szenarios 10 für den Lö-Standort bei konservierender Bodenbearbeitung und Direktsaat

Standort	Var. 101 Lö Direktsaat	Var. 102 Lö konservierende Bodenbearbeitung (Grubber)
Fruchtfolge	ZR	ZR
	WW	WW
	KG	KG
	KG	KG
	WG	WG
	ER	ER
	WW (ZF)	WW (ZF)

Szenarienkomplex 11 – Änderung der Nutzungsart auf bestimmten Flächenanteilen (von Ackerland nach Grünland)

Dieser Szenarienkomplex beschäftigt sich mit der Umwandlung von Ackerland in verschiedene Grünlandvarianten. Bei diesen Varianten handelt es sich um Mähweide, Weide und Wiese. Zusätzlich wurden Varianten mit Abfuhr und ohne Abfuhr des Aufwuchses berücksichtigt (Stilllegung).

2.2.3.2 Parameteranpassung

Harvest-Index (HI)

Im Zuge der Anpassung des CANDY-Systems auf die sächsischen Verhältnisse erfolgte eine Anpassung des Parameters Harvest-Index (HI) mit sächsischen Daten. Der Harvest-Index beschreibt das Korn-Stroh-Verhältnis der einzelnen Kulturarten. Folgende Werte wurden angepasst (Tab. 19):

Tabelle 19: Geänderter Harvest-Index für die simulierten Fruchtarten

Fruchtart	Harvest-Index
Winterroggen	1,29
Winterweizen	0,93
Wintergerste	0,94
Sommergerste	1,03
Zuckerrübe	0,7
Winterraps	1,7
Erbse	1,3

Die Daten wurden aus RÖHRICHT & GROSS-OPHOFF (2003, 2006) entnommen. Bei der Erbse wurde basierend auf einem generellen Vergleich zwischen den in KTBL (2005) angegebenen Werten und den sächsischen Werten ein Faktor ermittelt, der mit dem in KTBL (2005) angegebenen Korn-Stroh-Verhältnis für Erbse multipliziert wurde.

Zwischenfrüchte

Für die Zwischenfrucht Senf wurde nach SCHLIEPHAKE & ALBERT (2003) der N-Entzug der Pflanze für Sachsen neu berechnet. Der nun verwendete Wert ist für den N-Gehalt 2,25.

Maisgülle

Bei der Produktion von Mais zur Energiegewinnung und der dazu gehörigen Rückführung des Biogas-Substratrestes (BSR) wird von folgenden Parametern ausgegangen: Der Mais hat einen N-Gehalt in der Frischmasse von 0,4 % und 30 % Trockensubstanzgehalt. Die Trockensubstanz enthält 30 % organische Substanz und 30 % mineralische Substanz. Nach dem Gärprozess, für den ein Abbaufaktor für die OS von 0,889 unterstellt wird, erhält man einen Substratrest mit folgenden Eigenschaften: 29 % C-Gehalt in der TS, C/N = 4,84 mit einem N_{min}/N_{org} Verhältnis von 1,79.

Für den Trockensubstanzgehalt wurde ein Wert von 6,5 % angenommen. Daraus ergibt sich, dass pro kg des mit der Mais-Biomasse abgefahren Stickstoffs 4,35 kg C als BSR auszubringen sind.

Optimierung der Startparameter

Hinsichtlich der Vorgaben der Zielwerte der C_{org}-Gehalte für das Jahr 2000 wurden mehre Simulationsläufe durchgeführt, um diese Zielwerte im Jahr 2000 mit den Modellprognosen zu treffen. Die ermittelten Startwerte des C_{org}-Gehaltes für das Startjahr 1961 sind in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Start- und Zielwerte für den C_{org}-Gehalt der Standorte Lö, D, V

Standort	Startwert C_{org} [M.%] 1961	Zielwert C_{org} [M.%] 2000
Lö	1,05	1,38
D	1,60	1,36
V	2,00	2,12

2.2.4 Modellierung

Ausgehend von den unter dem Punkt „Optimierung der Startparameter“ ermittelten Ausgangswerten an organischem Kohlenstoff (0 - 30 cm) für das Jahr 1961 war der 01.01.1961 für die Szenarien der Simulationsstart. Dabei wurde bis zum Jahresende 1999 die Grundfruchtfolge (Var. 11) des jeweiligen Standortes als Vorlauf modelliert. Am Jahresanfang 2000 schloss sich dann die jeweilige Fruchtfolge der zu untersuchenden Szenarien an. Zu diesem Übergangstermin wurden auch die Werte an organischem Kohlenstoff (0 - 30 cm), an mineralischem Stickstoff (0 - 30 cm, 30 - 60 cm, 60 - 90 cm) sowie die Wassergehalte als neue Startparameter für das Anschlussszenario übergeben.

Für die Szenarien 91, 92, 93, 94 sowie 101 und 102 erfolgte beim beschriebenen Wechsel vom Vorlauf (1961 - 1999) zum Anschlussszenario (2000 - 2050) auch ein Wechsel der unter der Szenarienbeschreibung Var. 9 definierten Bodenparameter. Die Simulationsroutinen wurden über Batch-Dateien organisiert. Die verwendeten Modellparameter für den Bereich Boden (Tab. A4 – A5), Pflanzen (Tab. A6 – A7) und organische Dünger (Tab. A8) sind im Anhang dokumentiert. Die Ergebnisaufzeichnung der eingesetzten CANDY-Version 2.7.0.5 (wcandy) erfolgte in einer Access-Datenbank.

2.2.5 Energiebilanzierung

Für ausgewählte Szenarien wurde eine vereinfachte Energiebilanz durchgeführt. Dazu wurden die mit dem Erntegut als Biomasse abgefahrenen Energiemengen berechnet. Diese wurden anschließend den jeweiligen Energieeinträgen über Mineraldünger, organische Dünger (soweit sie in das System importiert wurden und nicht als Koppelprodukte auf dem Feld verblieben) und Pflanzenschutz gegenübergestellt. In diesem vereinfachten Ansatz wurden weitere Größen wie Saatgut, Dieselaufwand zum Transport und zur Bodenbearbeitung sowie indirekte Energieeinträge durch die Infrastruktur des Betriebes vernachlässigt, da diese Daten einer großen Variabilität unterliegen und sehr stark von den speziellen Ausprägungen der Betriebe bestimmt sind. Für den Vergleich der

Energieaufwendungen der einzelnen Szenarien wurde zunächst angenommen, dass die Energieeinträge in der Summe überall gleich sind. Folgende Gleichung wurde zur Berechnung verwendet:

$$B = \left(E_{ÄHP} + E_{ÄNP}\right) - \left(E_{ÄmD} + E_{ÄoD} + E_{ÄPSM}\right) + E_{\mathrm{Re}st} \qquad \textbf{(Gleichung 1)}$$

mit B Energiebilanz
$E_{ÄHP}$ Energieäquivalent Hauptprodukt
$E_{ÄNP}$ Energieäquivalent Nebenprodukt
$E_{ÄmD}$ Energieäquivalent mineralische Düngung (NPK)
$E_{ÄoD}$ Energieäquivalent organische Düngung
$E_{ÄPSM}$ Energieäquivalent Pflanzenschutzmittel
E_{Rest} Energieäquivalent Rest (Konstante)

Für eine bessere Abschätzung des Energiemehr- oder -minderaufwandes in Abhängigkeit des Szenarios wurde die Differenz aus dem betrachteten Szenario und dem Standard-Szenario gebildet. Dabei wurde unterstellt, dass die Energieeinträge in der Summe gleich sind und durch Differenzbildung zwischen den hier geprüften Szenarien und dem Standard-Szenario, gemessen an der Unsicherheit der Daten, vernachlässigbar sind (Gleichung 2). Die so berechneten Ergebnisse weisen also nicht einen Absolutwert, sondern die Veränderungen im Vergleich zum Standard aus.

$$B_D = \left(\underbrace{\left(E_{ÄHP} + E_{ÄNP}\right) - \left(E_{ÄmD} + E_{ÄoD} + E_{ÄPSM}\right) + E_{\mathrm{Re}st}}_{SZE} \right) - \left(\underbrace{\left(E_{ÄHP} + E_{ÄNP}\right) - \left(E_{ÄmD} + E_{ÄoD} + E_{ÄPSM}\right) + E_{\mathrm{Re}st}}_{GRD} \right)$$

Gleichung 2

mit B_D Differenz der Energiebilanzen
SZE betrachtetes Szenario
GRD Standard-Szenario

Die für die Berechnungen erforderlichen Parameter basieren auf den im Modell REPRO verwendeten Datensätzen (HÜLSBERGEN 2002). Die für die Trockenmasse (TM) der zu untersuchenden Agrarprodukte genutzten Energieinhalte sind in Tabelle 23 aufgelistet. Die Energieaufwendungen für den Pflanzenschutz (PSM) wurden ebenfalls spezifisch für die einzelnen Fruchtarten zusammengestellt. Für den ökologischen Landbau wurde der Energieinput für den Pflanzenschutz vernachlässigt. Für die Mineraldünger wurden folgende Energieäquivalente angesetzt (Tab. 21):

Tabelle 21: Energieäquivalente der Mineraldünger (nach HÜLSBERGEN 2002)

mineralische Dünger	Energieäquivalent [MJ/kg]
Stickstoff (N)	35,3
Phosphor (P)	36,2
Kalium (K)	11,2

Der Stickstoffaufwand wurde im CANDY-Modell in Anlehnung an die N_{min}-Methode auf der Basis simulierter N_{min}-Werte zum ersten Düngetermin berechnet. Hinsichtlich der P- und K-Düngung wurde eine einfache Reproduktion unterstellt, in dem die Nährstoffentzüge des Ertrages durch Mineraldünger ersetzt wurden. Abweichend von der bei HÜLSBERGEN (2002) angegeben Methodik wurden die Energieeinträge über organische Dünger in Abhängigkeit von der zugeführten C-Menge bewertet (Tab. 22).

Tabelle 22: Energieäquivalent der organischen Dünger in Abhängigkeit von der C-Menge

organische Dünger	Energieäquivalent [MJ/kg]
Kohlenstoff (C)	41,2

Tabelle 23: Fruchtarten und zur Energiebilanzierung verwendete Parameter

CANDY index	Fruchtart	Energie-input über PSM [GJ/ha/a]	Energieäquivalent [MJ/kg TM]		Trockensubstanzgehalt [%]		NP-index FM_{NP}/FM_{HP}
			HP	NP	HP	NP	
160	Erbsen	1,49	19,0	18,1	88	85	1,33
161	Kartoffel	2,52	17,2	-	23	-	0
163	Winterweizen	0,85	18,6	17,7	86	85	0,93
165	Winterroggen	0,83	18,3	18,3	86	85	1,29
166	Wintergerste	0,86	18,6	18,1	86	85	0,94
168	Sommergerste	0,58	18,4	18,1	86	85	1,03
169	Triticale	0,83	18,5	18,0	86	85	1,1
170	Winterraps	0,76	28,3	18,0	90	85	1,7
171	Körnermais	0,29	19,0	17,6	66	85	1
172	Silomais	0,29	18,4	-	21	-	0
174	Zuckerrüben	1,30	16,8	16,0	23	18	0,7
231	Winterweizen (öko)	0	18,6	17,7	86	86	0,93
232	Wintergerste (öko)	0	18,6	18,1	86	85	0,94
233	Sommergerste (öko)	0	18,4	18,1	86	85	1,03
235	Winterroggen (öko)	0	18,3	18,3	86	85	1,29
238	Futtererbse	0	19,0	18,1	88	85	1,33
239	Kartoffel (öko)	0	17,2	-	23	-	0
240	Silomais (öko)	0	18,4	-	21	-	0
249	Kleegras	0	18,3	-	18	-	0
502	Senf	0	16,6	-	15	-	0
506	Grünmais	0,29	18,2	-	18	-	0

3 Ergebnisse

3.1 D-Standort (Torgau)

3.1.1 Ergebnisse zur Spannweite der C_{org}- und N_t-Entwicklung der modellierten Szenarien

Nachfolgend werden die berechneten Modellergebnisse für den Parameter organischer Kohlenstoff (C_{org}) und Gesamt-N-Gehalt (N_t) des Bodens für den Bereich der Ackerkrume (0 - 30 cm) vorgestellt. Die erweiterten Ergebnistabellen mit Angaben zur BAT, Crep und N im System finden sich im Anhang (Tab. A1 – A3).

Eine Berechnung von Auswirkungen von Klimaszenarien auf die Veränderung der C_{org}-Gehalte des Bodens ist grundsätzlich mit den Modellen CANDY, REGRESS und STAND möglich. Wie die Ergebnisse der CANDY-Simulation zeigen (Abb. 18), fällt auf dem D-Standort bei Beibehaltung der im Durchschnitt um das Jahr 2000 üblichen Fruchtfolgen und Bewirtschaftung bis zum Jahr 2050 der Gehalt an C_{org} stetig ab. Dieser Trend kann durch verschiedene Szenarien einer Änderung der Bewirtschaftung entweder noch etwas verstärkt werden oder durch andere Szenarien auch abgeschwächt werden. Es ist zu sehen, dass bei Bewirtschaftungsänderung im Jahr 2000 es zunächst immer zu deutlicheren Änderungen der C_{org}-Gehalte kommt (Anstieg u. Abfall). Erst im Laufe der Zeit flachen diese Trends ab und die Änderungen sind nicht mehr so groß.

Dieser beschriebene Verlauf kann grundsätzlich durch die anderen eingesetzten Verfahren bestätigt werden (Abb. 19). Bei Beibehaltung der Bewirtschaftung fällt der C_{org}-Gehalt zwischen -0,07 % (STAND) und -0,167 % (REGRESS) (Mittelwert -0,11 %) C_{org} in Variante 12 ab. Im Szenario 11 beträgt der Abfall zwischen -0,06 % (STAND) und -0,167 % (REGRESS) (Mittelwert -0,12 %) C_{org} und wird am besten durch das CANDY-Verfahren repräsentiert. Nach den REGRESS-Analysen ist der Abfall beim extremeren Klimaszenario des PIK etwas deutlicher als nach dem Szenario des LfUG. Auch die Einflussmöglichkeiten durch eine unterschiedliche Bewirtschaftung werden zwischen den Modellen CANDY und STAND relativ einheitlich bewertet, indem der maximale Anstieg bzw. Abfall durch ähnliche Entwicklungstendenzen des C_{org}-Gehaltes gekennzeichnet wird. Lediglich die REGRESS-Berechnungen fallen etwas anders aus. Durch Bewirtschaftungsänderung kann hiernach kaum eine deutliche Erhöhung der C_{org}-Werte erreicht werden. Dagegen kann ein deutlicherer Abfall aufgezeigt werden, als mit den beiden anderen Verfahren berechnet wurde.

Parallel zum Abfall der C_{org}-Gehalte ist bei Beibehaltung der augenblicklichen Bewirtschaftung auch eine Abnahme der N_t-Werte verbunden, wie aus den REGRESS-Berechnungen zu ersehen ist (Abb. 20). Da der Abfall ähnlich hoch ist wie beim C_{org}-Gehalt, wird sich nach diesen Berechnungen das C/N-Verhältnis in der organischen Substanz kaum verändern. Durch bestimmte Bewirtschaftungsänderungen ist es auch hiernach möglich, jeweils z. T. stark abfallende N_t-Werte oder stark zunehmende C/N-Verhältnisse zu erlangen. Das Ausmaß sollte allerdings nicht überbewertet werden, da bei Vorlage von Extremvarianten auch unrealistische Werte berechnet werden können (Randbereiche der Gleichungen der Regressionsanalyse, siehe Kap. 2.1.2).

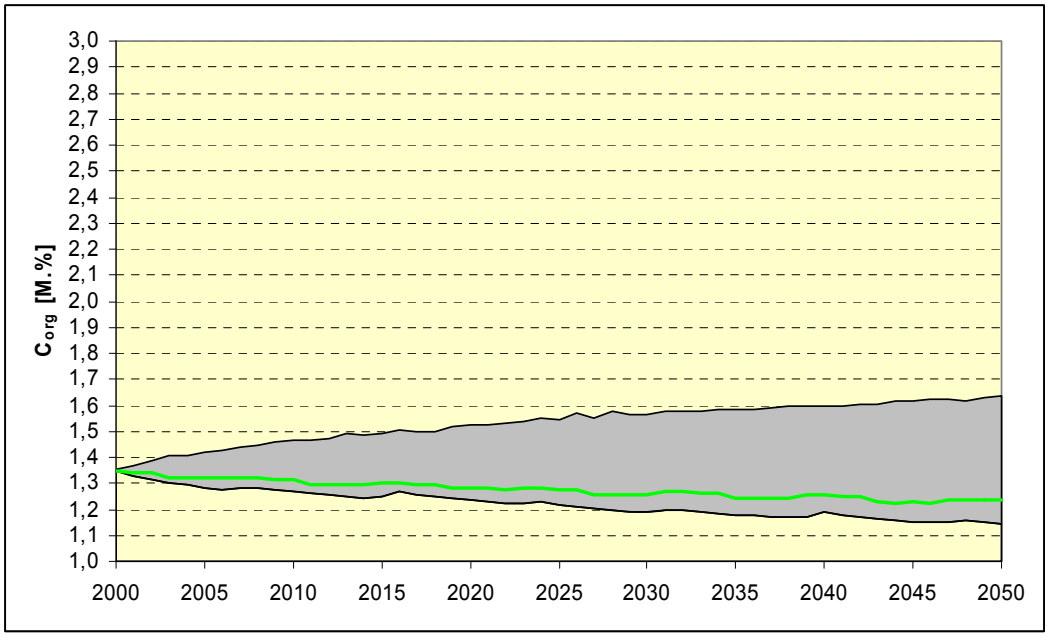


Abbildung 18: Spannweite der C_{org}-Entwicklung der modellierten Szenarien im Zeitraum 2000 - 2050 für den D-Standort

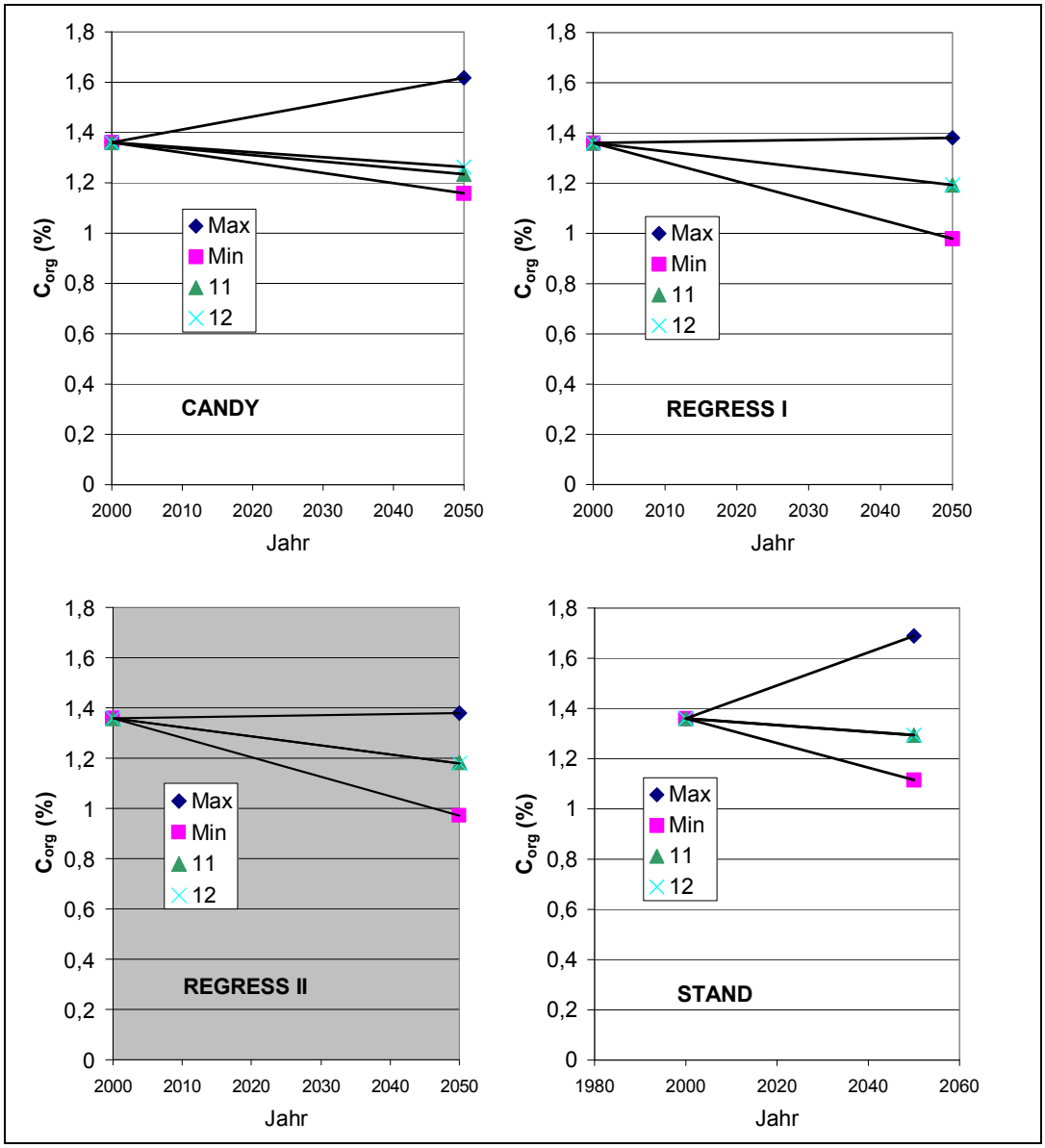


Abbildung 19: **Vergleich der Spannweite der C_{org}-Entwicklung der modellierten Szenarien im Zeitraum 2000 – 2050 mit den Modellen CANDY, REGRESS und STAND für den D-Standort**

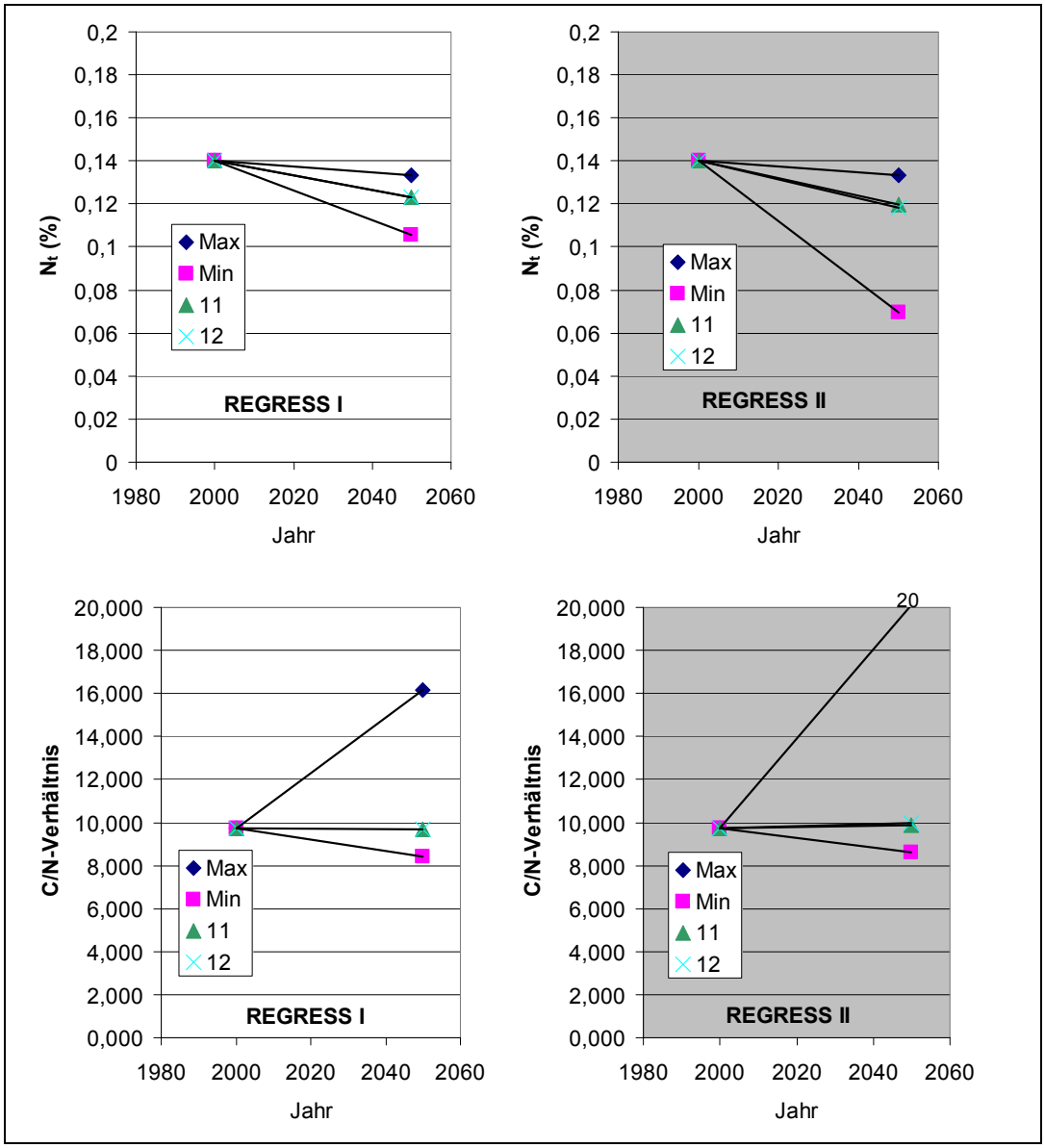


Abbildung 20: **Vergleich der Spannweite der Entwicklung der N_t-Gehalte und der C/N-Verhältnisse der modellierten Szenarien im Zeitraum 2000 – 2050 mit dem Modell REGRESS I und II für den D-Standort**

3.1.2 Szenarien der Ertragserhöhung und Umstellung auf Ökolandbau

Der mit dem CANDY-Verfahren simulierte Verlauf der Ertragserhöhung und Umstellung auf Ökolandbau kann der Abbildung 21 entnommen werden. Der Sinn der Einheitsfruchtfolge ist es, dass ein und dasselbe Anbauverhältnis, allerdings mit angepassten Erträgen, an den drei Standorten geprüft wird. Damit sollte ein besserer Vergleich zwischen den Standorten gewährleistet werden. Als Einheitsfruchtfolgen wurden eine konventionelle (Var. 12) und eine ökologische Fruchtfolge (Var. 15) geprüft (Abb. 22). Auf der rechten Seite der Abbildung ist die konventionelle (Var. 11; Var. 13 = Ertragsanstieg) und ökologische (Var. 31; Var. 32 = Ertragsanstieg) Grundfruchtfolge dargestellt. Die Variante 0 stellt jeweils die Ausgangslage im Jahr 2000 im Verhältnis zur Var. 11 bzw. Var. 12 im Jahr 2050 dar und drückt den Einfluss des Klimawandels aus. Die absoluten Werte für Var. 11 und 12 sind jeweils von allen ausgewiesenen Varianten abgezogen worden und stellen somit eine Vergleichsbasis dar (= 0,0 % C_{org}). Alle anderen Varianten werden als Differenzen zu der jeweiligen Vergleichsvariante ausgewiesen. Es wurde auf dem Sandboden ein durch Züchtung und agrotechnische Maßnahmen erlangter Ertragsanstieg von lediglich 25 % unterstellt.

In Abbildung 22 ist der Abfall des C_{org}-Gehaltes im Vergleich zu den beiden Vergleichsvarianten 11 bzw. 12 nochmals dargestellt worden. Im Vergleich hierzu führt eine Umstellung auf Ökolandbau (Var. 15 u. Var. 31) bei Beibehaltung der Ertragsniveaus vom Jahr 2000 auf dem D-Standort zu unterschiedlichen Ergebnissen. Während nach den CANDY- und REGRESS-Berechnungen es zu einer leichten Abnahme bzw. zu einer leichten Zunahme der C_{org}-Gehalte kommen kann, sind nach den STAND- und LUFA-Berechnungen geringe Zunahmen zu verzeichnen. Die REGRESS-Berechnungen weisen mit einem leichten Anstieg der C_{org}-Gehalte von 0,021 % eine gewisse Mittelstellung in der Reaktion aus.

Der angenommene Ertragsanstieg von 25 % bewirkt eine Zunahme der C_{org}-Werte zwischen lediglich 0,01 – 0,04 % C_{org}. Im konventionellen Landbau wird eine mittlere Zunahme von 0,026 % und im ökologischen Landbau um 0,021 % C_{org} berechnet, was durch die CANDY- und STAND-Verfahren bzw. dem REGRESS-Verfahren am besten repräsentiert wird. Diese Unterschiede zwischen konventionellen und ökologischen Anbaubedingungen beruhen nach diesen Ergebnissen zunächst auf dem im Ökolandbau üblichen niedrigeren Ertragsniveau, die sich entsprechend dem zu erwartenden Nährstoffbedingungen einstellen. Da im Ökolandbau keine deutliche Zufuhr von außen erlaubt ist, wird auf dem leichten D-Standort nur ein den Standortbedingungen angepasstes, verhältnismäßig niedriges Ertragsniveau erreicht. Im konventionellen Landbau hingegen kann über die Zufuhr von Düngemitteln auch auf dem leichten Boden ein relativ hohes Ertragsniveau erzielt werden, allerdings mit dem Nachteil der Erreichung z. T. deutlich erhöhter Nährstoffsalden.

So wurde für die konventionellen REGRESS-Szenarien in Var. 11 ein N-Saldo von 53 kg, und in Var. 13 incl. Ertragsanstieg von 57 kg veranschlagt. In den ökologischen Var. 31 betrug der N-Saldo -12 kg und incl. Ertragsanstieg in Var. 32 dann noch -2 kg N/ha u. Jahr (jeweils ohne N-Deposition über die Atmosphäre, die sich für Sachsen um ca. 30 kg bewegen dürfte). An diesen Zahlen ist zu erkennen, dass es zwar auf Grund des höheren Ertragsniveaus im konventionellen

Anbau über die dann höheren Mengen an anfallenden Ernte- und Wurzelrückständen es zu günstigen Wirkungen auf den Humusgehalt kommen kann. Die mit der höheren Düngung einhergehenden deutlich höheren Nährstoffsalden auf diesem leichten D-Standort weisen allerdings auf negative Wirkungen im Wasserschutz hin. Diese für den Standort ungünstigen Effekte dürften dann in Zukunft mit dem zu erwartenden Ertragsanstieg noch zunehmen.

Im Verlauf des postulierten Klimawandels kann es nach den REGRESS-Berechnungen zu einer der Entwicklung der C_{org}-Gehalte parallelen Abnahme der N_t-Gehalte des Bodens kommen, während das C/N-Verhältnis im konventionellen Landbau davon kaum berührt wird (Abb. 23). Im Ökolandbau tritt dieser Abfall besonders stark auf, so dass der Anstieg der C/N-Verhältnisse deutlich ausgeprägt ist. Diese Ergebnisse weisen auf eine relative N-Knappheit bzw. eine gute Kohlenstoff-Versorgung hin, wie sie gewöhnlich in diesen mehr extensiven Anbauverfahren zu verzeichnen ist. Auch in Versuchen zum Ökolandbau kann diese spezifische Reaktion oft beobachtet werden (BECKMANN et al. 2001).

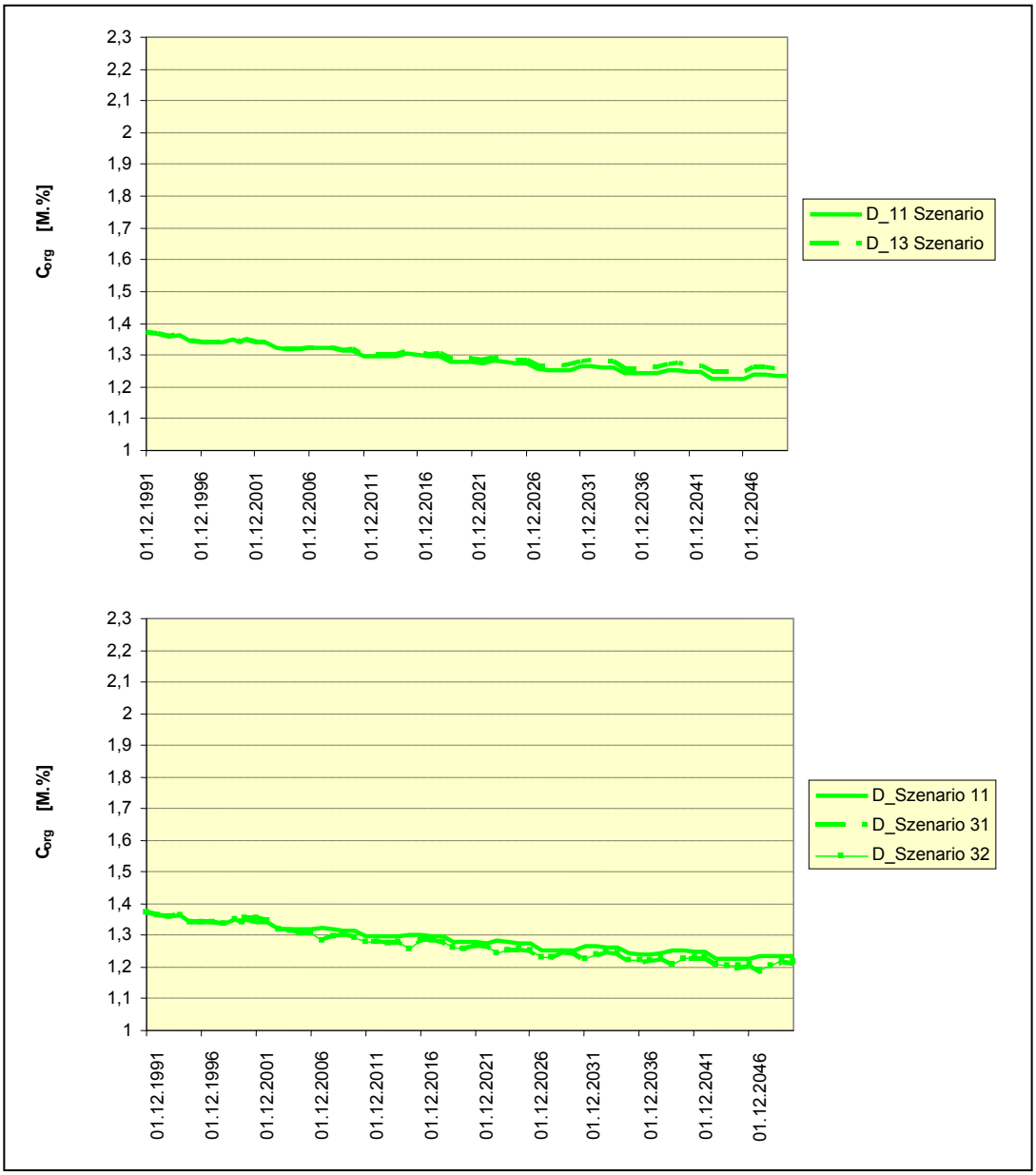


Abbildung 21: **Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), die Grundfruchtfolge mit Ertragsanstieg (Var. 13, oben) sowie des ökologischen Landbaus (unten) für den D-Standort**

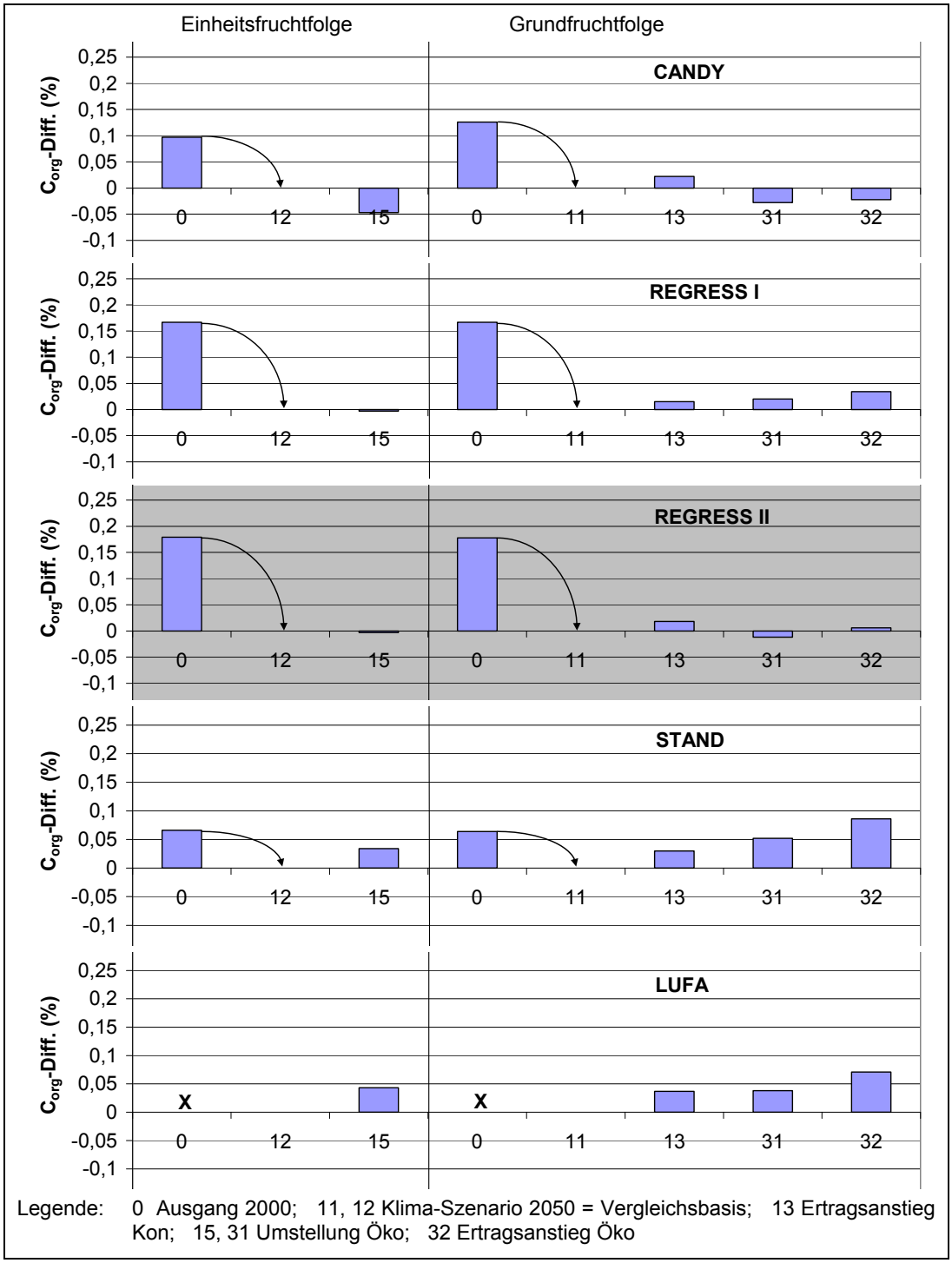


Abbildung 22: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ertragsanstieg sowie Umstellung auf Ökolandbau auf die zu erwartende Änderung der C_{org}-Gehalte des Bodens des D-Standortes bei einer Einheitsfruchtfolge (links) und einer Grundfruchtfolge (rechts)

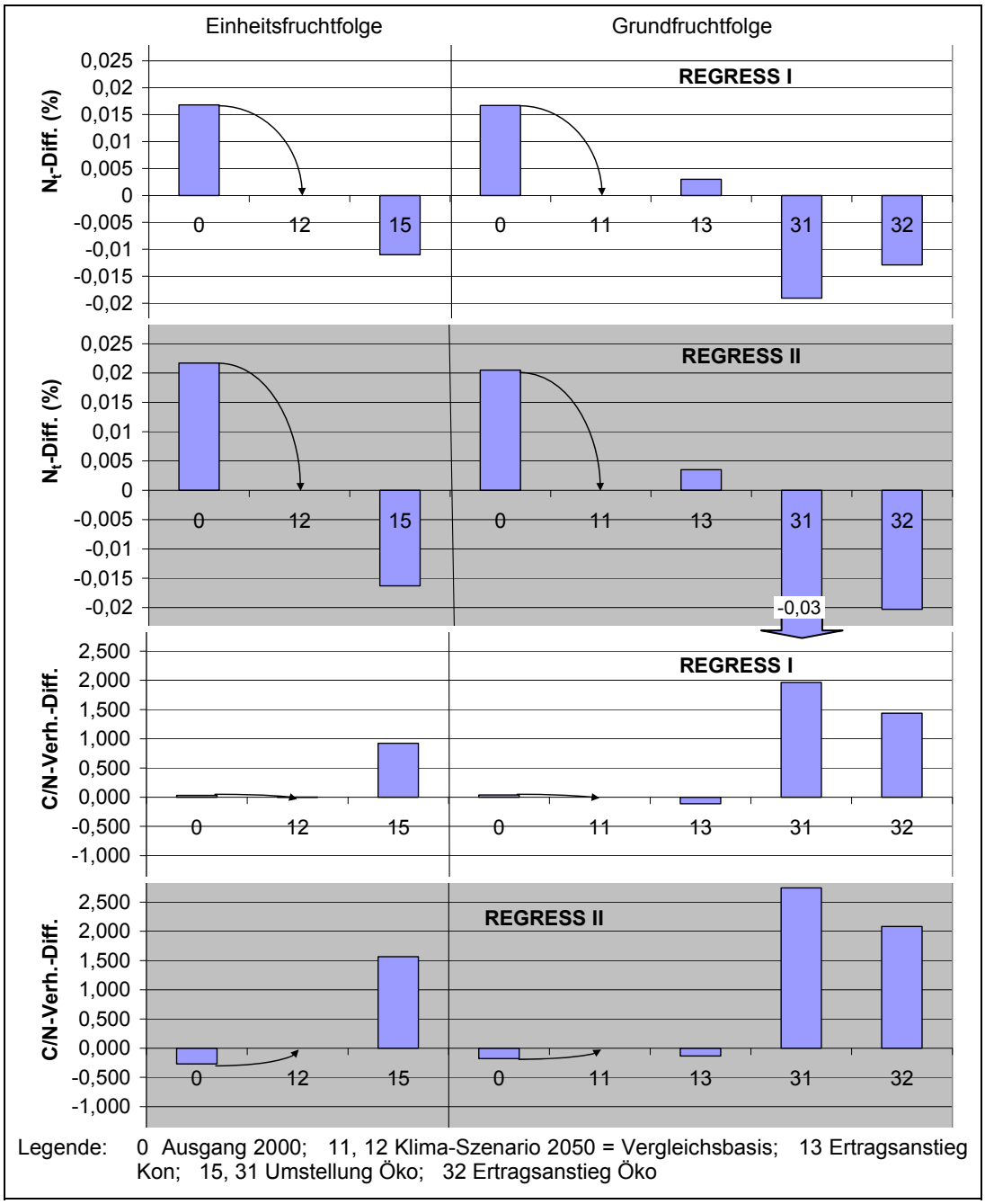


Abbildung 23: Ergebnisse der REGRESS-Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ertragsanstieg sowie Umstellung auf Ökolandbau auf die zu erwartende Änderung der N_t-Gehalte und der C/N-Verhältnisse des Bodens des D-Standortes bei einer Einheitsfruchtfolge (links) und einer Grundfruchtfolge (rechts)

3.1.3 Szenarien zu Energiefruchtfolgen, viehlosen Marktfruchtbetrieben und viehreicher Veredlung

Bei den Energiefruchtfolgen wird die Ausdehnung des Silomaisanbaus bis auf 50 % der Fruchtfolge simuliert (Var. 41). In Var. 42 werden zusätzlich alle möglichen Koppelprodukte (Stroh) abgefahren. Die Ergebnisse der CANDY-Simulation können der Abbildung 24 entnommen werden. Zu diesen Szenarien werden nur noch die Ergebnisse der mehr an die Standorte angepassten Grundfruchtfolgen weitergeführt (Var. 11 = 0 % C_{org}). Diese Fruchtfolge ohne Ertragsanstieg stellt die Vergleichsbasis dar, zu der alle anderen Varianten gegenübergestellt werden (Abb. 25).

Eine deutliche Ausdehnung des Anbaus von Silomais hat auf dem D-Standort eine geringe (CANDY: -0,01 % C_{org}) bis mittlere negative Wirkung (REGRESS: -0,14 % C_{org}) auf die Veränderung der C_{org}-Werte des Bodens zur Folge. Im Durchschnitt kann mit einer Abnahme um 0,09 % C_{org} gerechnet werden. Bei Abfuhr aller Koppelprodukte kommt es zu einer deutlichen Abnahme der C_{org}-Werte zwischen 0,08 % (CANDY) und 0,21 % C_{org} (LUFA), der Mittelwert liegt bei 0,17 % C_{org} im Vergleich zur Var. 11. Die STAND-Berechnungen geben diese mittleren Werte für beide Varianten recht gut wieder, während bei den REGRESS-Kalkulationen wahrscheinlich zu hohe Abnahmen unterstellt werden, da bei dieser Methode nicht zwischen den einzelnen Hackfrüchten unterschieden werden kann (Mais wird dazugezählt).

Ähnlich wie bei der organischen Substanz aufgeführt, kommt es nicht nur im Verlauf des postulierten Klimawandels, sondern auch nach Zunahme des Maisanbaus bzw. nach Abfuhr der Koppelprodukte zu einer Abnahme der N_t-Werte im Boden (Abb. 26). Nach diesen Berechnungen kann darüber hinaus eine relative Kohlenstoff-Knappheit oder ein gewisser Stickstoff-Überfluss festgestellt werden, da sich die C/N-Verhältnisse dieser Anbauvarianten z.T. deutlich verengen. Diese Varianten stellen von allen untersuchten Möglichkeiten die deutlichste Abnahme der C_{org}-Werte und Verengung der C/N-Verhältnisse dar.

Die Marktfruchtvarianten stellen viehlose Getreide- und Hackfruchtfolgen dar, sowie Möglichkeiten eines Zukaufs von Kompost und Hühnertrockenkot (CANDY-Simulation siehe Abb. 27). Die reinen Marktfruchtbetriebe können anscheinend in der gewählten Ausformung im Vergleich zur Var. 11 weitgehend ihre Humusgehalte stabilisieren (CANDY) oder es findet ein geringer Abfall an C_{org} (Var. 51: Getreideanbau) bzw. ein deutlicherer Abbau der C_{org}-Werte statt (Abb. 25, Hackfruchtanbau). Während mit CANDY und REGRESS kaum Unterschiede zwischen diesen beiden Varianten gefunden worden sind, waren bei STAND und LUFA eine deutlich negative Wirkung auf die C_{org}-Werte nach reinem Hackfruchtanbau berechnet worden. Offenbar kann dieser bekannte Unterschied zwischen Getreide- und Hackfruchtanbau insbesondere mit dem REGRESS-Verfahren nicht überzeugend nachgewiesen werden. Der mittlere Abfall beträgt in Var. 51 um 0,03 % C_{org} und in Var. 52 genau 0,08 % C_{org}. Die STAND-Simulationen und in abgeschwächter Form auch die LUFA-Berechnungen scheinen hierbei diesen Trend am besten wiederzugeben.

Die nächsten Varianten stellen Möglichkeiten des Zukaufs an Handelsdüngemitteln dar. Bei allen angewendeten Verfahren wurde die gleiche Rangfolge der Anreicherung gefunden: Getreideanbau + Kompost (Var. 53) ≥ Hackfruchtanbau + Kompost (Var. 52) ≥ Getreideanbau + Hühnerkot (Var. 54). Die mittlere Anreicherung an C_{org} beträgt 0,10 % C_{org} bei Var. 54, gefolgt von Var. 52a mit 0,24 % C_{org} und Var. 43 mit 0,28 % C_{org}. Diese Varianten können am besten durch die LUFA-Verfahren sowie auch durch das STAND- und REGRESS-Verfahren abgebildet werden.

Es fällt auf, dass die CANDY- und REGRESS-Schätzungen auf der einen sowie die STAND- und LUFA-Werte auf der anderen Seite jeweils relativ dicht zusammen liegen. STAND und LUFA weisen den veranschlagten Düngemitteln jeweils spezifische Koeffizienten mit relativ hohem Wirkungsgrad zu, während bei REGRESS die Zufuhrmenge an Trockenmasse für jede Art an organischen Materialien einer mittleren Bewertung unterzogen wird. Somit erfolgt bei dieser Methode eine Gleichbewertung aller organischen Materialien. Weil Kompost eine relative hohe Humuswirkung zukommt, könnte diese Wirkung im REGRESS-Verfahren zu niedrig angesetzt worden sein. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass es durch eine Zufuhr mit diesen organischen Düngemitteln (100 dt/ha an Kompost bzw. 170 kg N/ha an Hühnertrockenkot) gelingen kann, die klimabedingte Humusverringerung in voller Höhe auszugleichen.

Die N_t-Gehalte des Bodens wurden durch die Klimaszenarien der REGRESS-Berechnung in ähnlichem Umfang verändert wie die C_{org}-Gehalte. Auf das C/N-Verhältnis hatten diese Szenarien daher keinen Einfluss (Abb. 26). Auch der verstärkte Getreideanbau (Var. 51) und Hackfruchtanbau (Var. 52) hat hierauf nur einen geringen Einfluss. Eine zusätzliche Zufuhr an den ausgewiesenen organischen Düngemitteln führt nach dieser Berechnung zu einer Anhebung der N_t-Werte des Bodens, insbesondere durch den N-reichen Hühnerkot (Var. 54), wodurch es gelingt, die klimatisch bedingte Reduzierung um bis zu höchstens 2/3 wieder auszugleichen.

Bei Anwendung dieser Dünger können dann auch die C/N-Verhältnisse nicht nur unverändert bleiben, sondern eher etwas enger werden. Wie die Kalkulationen weiterhin ergeben haben, erfordert diese Variante 54 (Hühnerkot) eine Reduzierung der mineralischen N-Düngung auf Null kg N/ha. Trotzdem würde dann der N-Saldo auf 86 kg N/ha (ohne D-Deposition) ansteigen, was auf dem leichten Boden des D-Standortes aus Gründen des Wasserschutzes Probleme bereiten würde. Der eingesetzte Kompost führt dagegen auf Grund der guten Humuswirkung zu einer Erweiterung der C/N-Verhältnisse im Boden des D-Standortes. Die mineralische N-Düngung wurde um 20 % reduziert und die N-Salden bleiben im Vergleich zu Var. 11 mit 53 kg N/ha unverändert.

Eine Anhebung der Rindviehhaltung bis auf 2 GVE/ha führt zu einer Anhebung der N-Zufuhr aus organischen Düngemitteln auf ca. 110 – 120 kg N/ha in Form von Rindergülle (Var. 61), vergärter Rindergülle (Var. 62) und Stalldung (Var. 63). Die Fruchtfolge der Variante 61 ist mit der Energiefruchtfolge der Var. 41 und die Var. 63 mit der Energiefolge incl. Koppelproduktabfuhr der Var. 42 vergleichbar. Eine Anhebung der Schweinehaltung auf 2 GVE/ha hat eine Anhebung der N-Zufuhr

aus Gülle auf ca. 128 kg N/ha zur Folge (Var. 64). Die CANDY-Simulationen zu diesen Varianten mit intensiver Tierhaltung können der Abbildung 28 entnommen werden.

Durch die intensive Viehhaltung und entsprechende Rückführung der tierischen Exkremente in Form von Gülle oder Stalldung gelingt es wesentlich besser einen ausgeglichenen Humushaushalt zu gewährleisten als mit den ausgewiesenen Energiefruchtfolgen (Abb. 25). Von allen Modellarten wurde zwar die gleiche Abstufung zwischen den Tierhaltungs-Varianten berechnet, jedoch auf unterschiedlichem Niveau. Insgesamt etwas niedrigere Werte in der C_{org}-Veränderung wurden durch die Methode REGRESS gefunden, offenbar weil wiederum der relativ hohe Humifizierungswert der Gülle etwas unterbewertet wird. Die höchsten Werte wurden durch das CANDY-Verfahren den Flüssigdüngern zugewiesen.

Im Durchschnitt der Verfahren führt die intensive Tierhaltung mit Rindergülle noch zu einer weiteren geringen Absenkung der zu erwartenden Humusgehalte um 0,014 % (Var. 61). Noch etwas deutlicher ist der Abfall mit 0,050 % C_{org} im Tierhaltungssystem mit Biogasvergärung ausgeprägt (Var. 62). Dagegen ist im System mit Festmistausbringung ein mittlerer Anstieg von 0,072 % C_{org} berechnet worden (Var. 63) und im Schweinehaltungssystem mit Gülleausbringung steigt der Humusgehalt sogar um 0,083 % C_{org} an. Die ausgewiesenen Mittelwerte kommen dem STAND-Verfahren sehr nahe. Hiernach ist es lediglich mit einer Rinderhaltung auf Festmistbasis sowie bei Schweinehaltung auf Güllebasis möglich, den Humusabfall im Verlauf des veranschlagten Klimawandels um ca. 50 % aufzuhalten.

Da die N_t-Gehalte des Bodens sich nach Anwendung von Rindergülle im Vergleich zur Var. 11 kaum verändern, fällt auf Grund des relativ höheren N-Angebots das C/N-Verhältnis auf diesen Varianten etwas ab (Abb. 26). Dagegen steigt nach Schweinegülle-Anwendung der N-Gehalt des Bodens parallel zur C_{org}-Veränderung etwas an, so dass das C/N-Verhältnis gleich hoch bleibt.

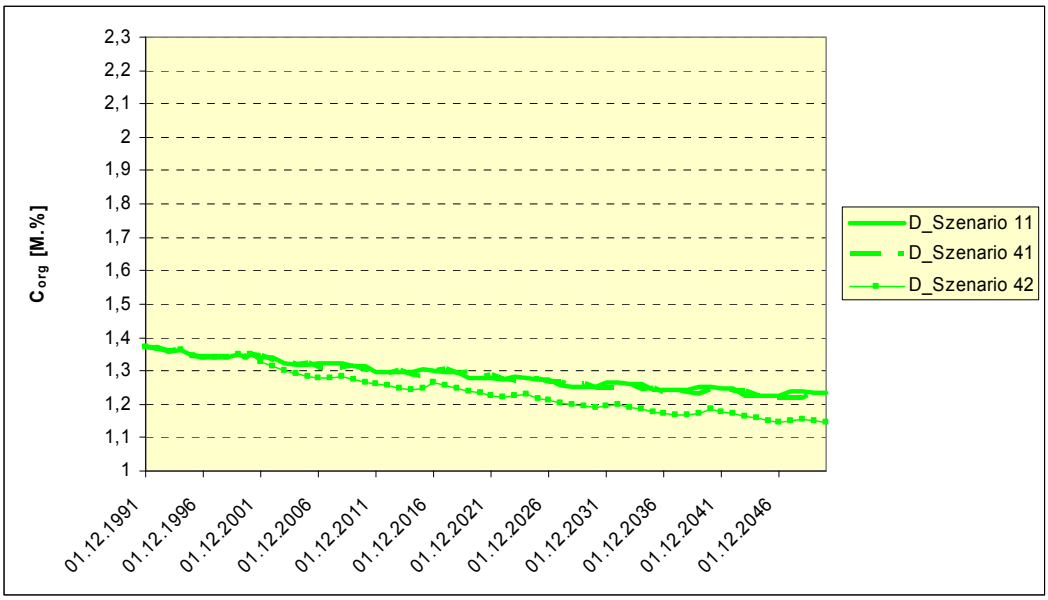
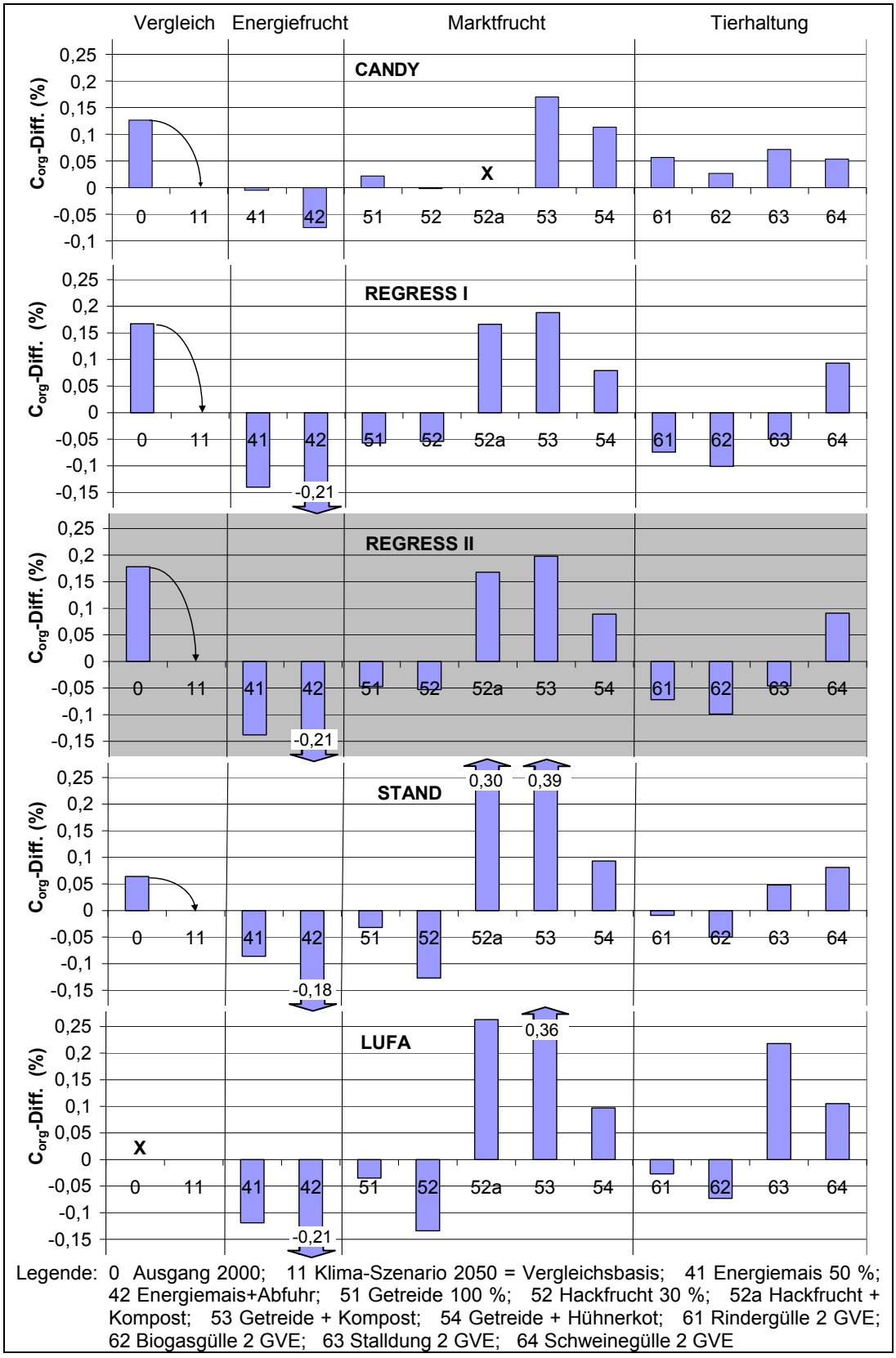
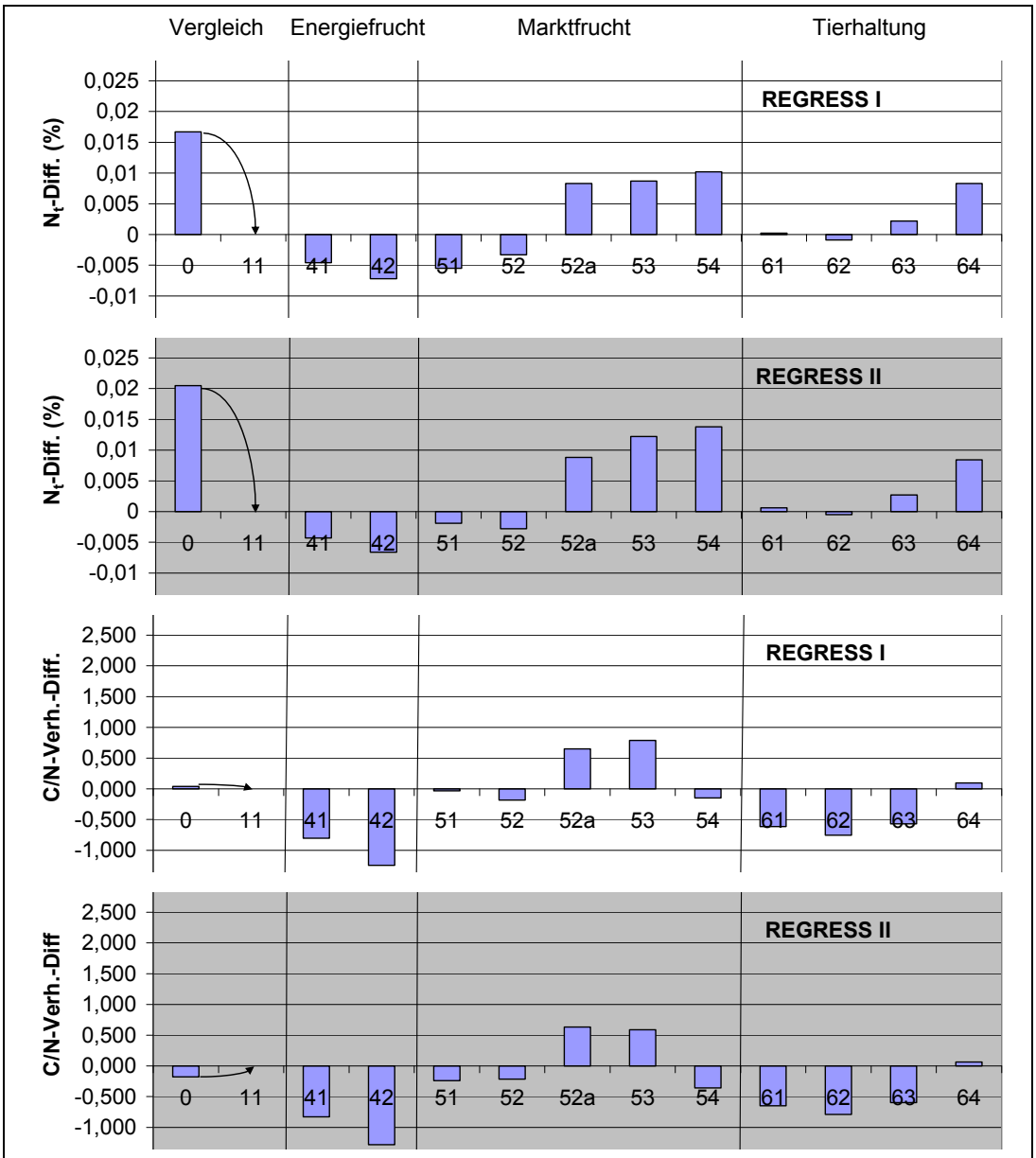


Abbildung 24: **Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 4, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), die Grundfruchtfolge mit Ausdehnung des Silomaisanbaus (Var. 41), die Grundfruchtfolge mit Abfuhr sämtlicher Koppelprodukte (Var. 42) für den D-Standort**



Legende: 0 Ausgang 2000; 11 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 41 Energiemais 50 %; 42 Energiemais+Abfuhr; 51 Getreide 100 %; 52 Hackfrucht 30 %; 52a Hackfrucht + Kompost; 53 Getreide + Kompost; 54 Getreide + Hühnerkot; 61 Rindergülle 2 GVE; 62 Biogasgülle 2 GVE; 63 Stalldung 2 GVE; 64 Schweinegülle 2 GVE

Abbildung 25: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Energiefruchtfolgen, Marktfrucht und tierischer Veredlung auf die zu erwartende Änderung der C_{org}-Gehalte des Bodens des D-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0 % C_{org})



Legende: 0 Ausgang 2000; 11 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 41 Energiemais 50 %; 42 Energiemais + Abfuhr; 51 Getreide 100 %; 52 Hackfrucht 30 %; 52a Hackfrucht + Kompost; 53 Getreide + Kompost; 54 Getreide + Hühnerkot; 61 Rindergülle 2 GVE; 62 Biogasgülle 2 GVE; 63 Stalldung 2 GVE; 64 Schweinegülle 2 GVE

Abbildung 26: Ergebnisse der REGRESS-Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Energiefruchtfolgen, Marktfrucht und tierischer Veredlung auf die zu erwartende Änderung der N_t-Gehalte und der C/N-Verhältnisse des Bodens des D-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0)

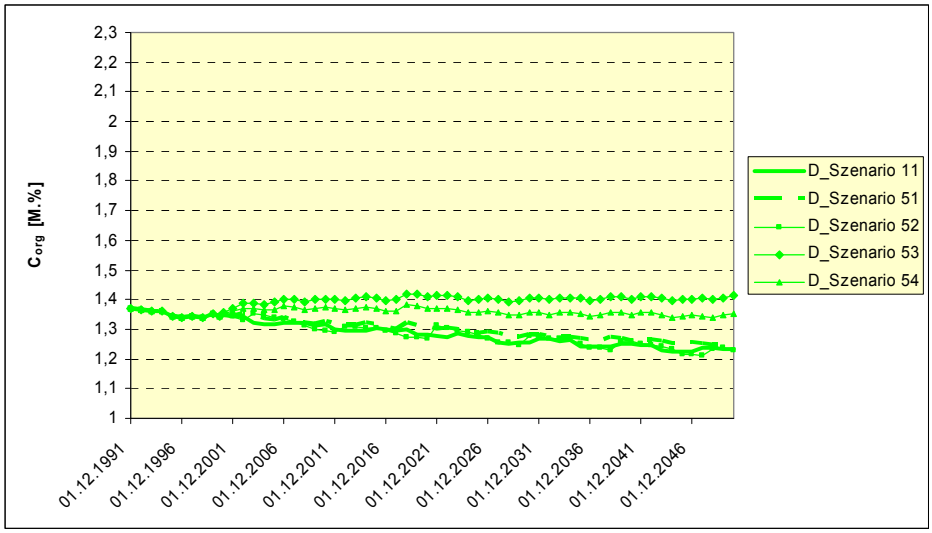


Abbildung 27: Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 5, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), Fruchtfolge mit 100 % Getreideanteil (Var. 51), Fruchtfolge mit 30 % Hackfruchtanteil (Var. 52), Fruchtfolge mit 100 % Getreideanteil + 100 dt ha^{-1} a^{-1} Kompost (Var. 53), Fruchtfolge mit 100 % Getreideanteil + 170 kg ha^{-1} a^{-1} Hühnertrockenkot (Var. 53) für den D-Standort

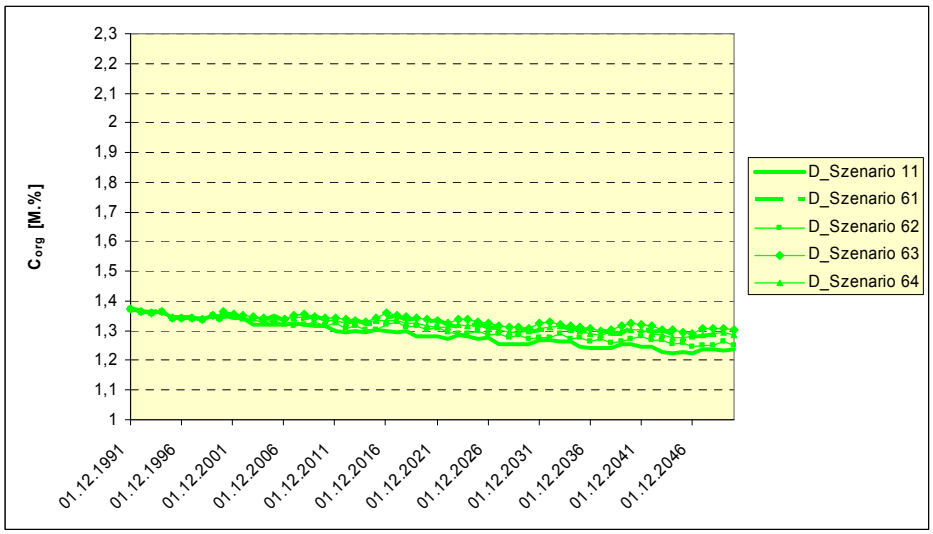


Abbildung 28: Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 6, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Rind) mit Gülleausbringung (Var. 61), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Rind) mit Gülleausbringung nach Biogaserzeugung (Var. 62), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Rind) mit Stallmistausbringung (Var. 63), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Schwein) mit Gülleausbringung (Var. 64) für den D-Standort

3.1.4 Szenarien zu Ackerfutter und Grünland

Bei den Varianten mit steigenden Ackerfutter-Anteilen in den Fruchtfolgen geht es darum, sowohl den humusaufbauenden Wert mit dem N-zuführenden Charakter der legumen Futterpflanzen zu kombinieren. Hierbei war auch die Absicht verbunden, im Rahmen der zunehmenden Energiepreise die energieintensive Produktion und Anwendung der mineralischen N-Düngung durch regenerierbare N-Quellen zu ersetzen (vgl. GOCHT & SCHMIDTKE 2007). Die für diese Varianten durchgeführten CANDY-Simulationen können den Abbildungen 29 und 30 entnommen werden.

Bei Einführung von 20 % Futterleguminosen als Stilllegung konnte der Einsatz mineralischer N-Düngung um ca. 30 % reduziert werden (Abb. 31, Var. 71), bei Erhöhung auf 50 % Leguminosengras wurde auf die N-Mineraldüngung ganz verzichtet (Var. 81). Bei diesem Szenario konnte dann auch eine deutliche Reduzierung der N-Salden auf -9 bis -19 kg N/ha erlangt werden (REGRESS-Analysen). Durch die Einführung von Ackerfutter auf 20 % wurde eine Anhebung der C_{org}-Werte im Vergleich zur Variante 11 mit unterschiedlichem Ausmaß berechnet. Die geringsten Auswirkungen waren durch die CANDY-Berechnungen und die höchsten Auswirkungen mit der STAND-Berechnung zu verzeichnen.

Der klimatisch bedingte Abfall der C_{org}-Werte kann durch diese Maßnahmen um ⅓ bis ½ reduziert werden. Am besten kann dieses Ergebnis durch Anbau von 50 % Kleegras incl. Verbleib der Koppelprodukte (Var. 81) erreicht werden. Für diese Variante wurde eine mittlere Anreicherung von 0,12 % C_{org} ermittelt. Die geringste Anreicherung wurde in Var. 82 bei Abfuhr sämtlicher Koppelprodukte mit 0,035 % C_{org} ermittelt. Nach der CANDY- und REGRESS-Berechnung wurden für diese Variante bereits negative C_{org}-Werte ermittelt, die im extremeren PIK-Klimaszenario sogar noch deutlicher hervortraten. Die LUFA-Berechnungen kamen den ermittelten Mittelwerten in diesem Fall am Nächsten.

Infolge der REGRESS-Kalkulationen ist in diesen Varianten dann mit einem Abfall der N_t-Gehalte des Bodens zu rechnen, besonders ausgeprägt in den Varianten mit 50 % Kleegras (Abb. 32). Auf Grund der teilweise gegensätzlichen Entwicklung von C_{org} und N_t wurde dann eine Erweiterung der C/N-Verhältnisse des Bodens um 1,4 – 1,8 Einheiten verzeichnet. Auch hierbei kann die relative N-Knappheit erkannt werden, die in diesen beiden Varianten bereits mit leicht negativen Werten in der N-Bilanz (ohne N-Deposition) ausgewiesen worden sind. Der Anstieg ist bei dem extremeren Klimaszenario etwas stärker ausgeprägt als bei dem moderateren LfUG-Szenario.

Die verbliebenen Varianten des D-Standortes stellen verschiedene Szenarien einer Umstellung von Ackerland auf Grünlandbewirtschaftung dar. Eine genaue Simulation der Grünlandbewirtschaftung kann nur mit dem CANDY-Modell vorgenommen werden, weil hierfür geeignete Koeffizienten vorhanden sind (siehe Abb. 30). Bei den statischen Methoden wurden hierzu die Bedingungen für einen 100%igen Ackerfutter-Anbau eingestellt und einer Dauergrünlandbewirtschaftung gleich gesetzt. Bei dem REGRESS-Verfahren gelang dies auf dem D-Standort nur durch Einstellung einer

Fruchtfolge-Kombination mit 30 % Getreide und 70 % Leguminosen, die einen derartigen Leguminosen-Gras-Bestand simulieren sollte. Bei den anderen Standorten wurde ein 100%iger Leguminosenbestand eingestellt (siehe dort).

Wie den Ergebnissen zu entnehmen ist, wurden auch für diese Varianten mit den CANDY-Berechnungen durchaus vergleichbare Werte in der C_{org}-Veränderung erreicht (Abb. 31). Da verschiedene Szenarien ausgewählt worden sind, können die Werte jedoch nicht variantengleich verglichen werden. Im Durchschnitt der Grünland-Var. 11X (mit Abfuhr) wurde eine C_{org}-Anreicherung von 0,25 % ermittelt, in der Var. 11Z (ohne Abfuhr = Dauer-Stilllegung) eine Anreicherung von sogar 0,31 % C_{org}. Diese Varianten der Dauerstilllegung können gut durch das STAND- und REGRESS-Verfahren repräsentiert werden. Im Durchschnitt der drei CANDY-Varianten unterschiedlicher Grünlandbewirtschaftung wurde ein Anstieg von 0,24 % C_{org} ermittelt (0,13 – 0,38 % C_{org}). Bei einem zu erwartenden klimabedingten Abfall der C_{org}-Werte zwischen 0,13 – 0,17 % C_{org} im moderaten Szenario und von 0,18 % C_{org} im extremeren Szenario ist es somit möglich, auf den leichten D-Standorten durch Umstellung auf Grünland den Abfall nicht nur auszugleichen, sondern es gelingt sogar darüber hinaus eine Anreicherung um ca. 100 % der klimatisch bedingten C_{org}-Änderung.

Insgesamt gesehen weichen die CANDY-Berechnungen in der Weise von allen anderen Verfahren ab, indem hier deutlich niedrigere Veränderungen in den C_{org}-Gehalten beim Ackerfutter ermittelt werden. Es hat den Anschein, als ob der Einfluss des Ackerfutters auf die C_{org}-Entwicklung zu niedrig eingeschätzt wird.

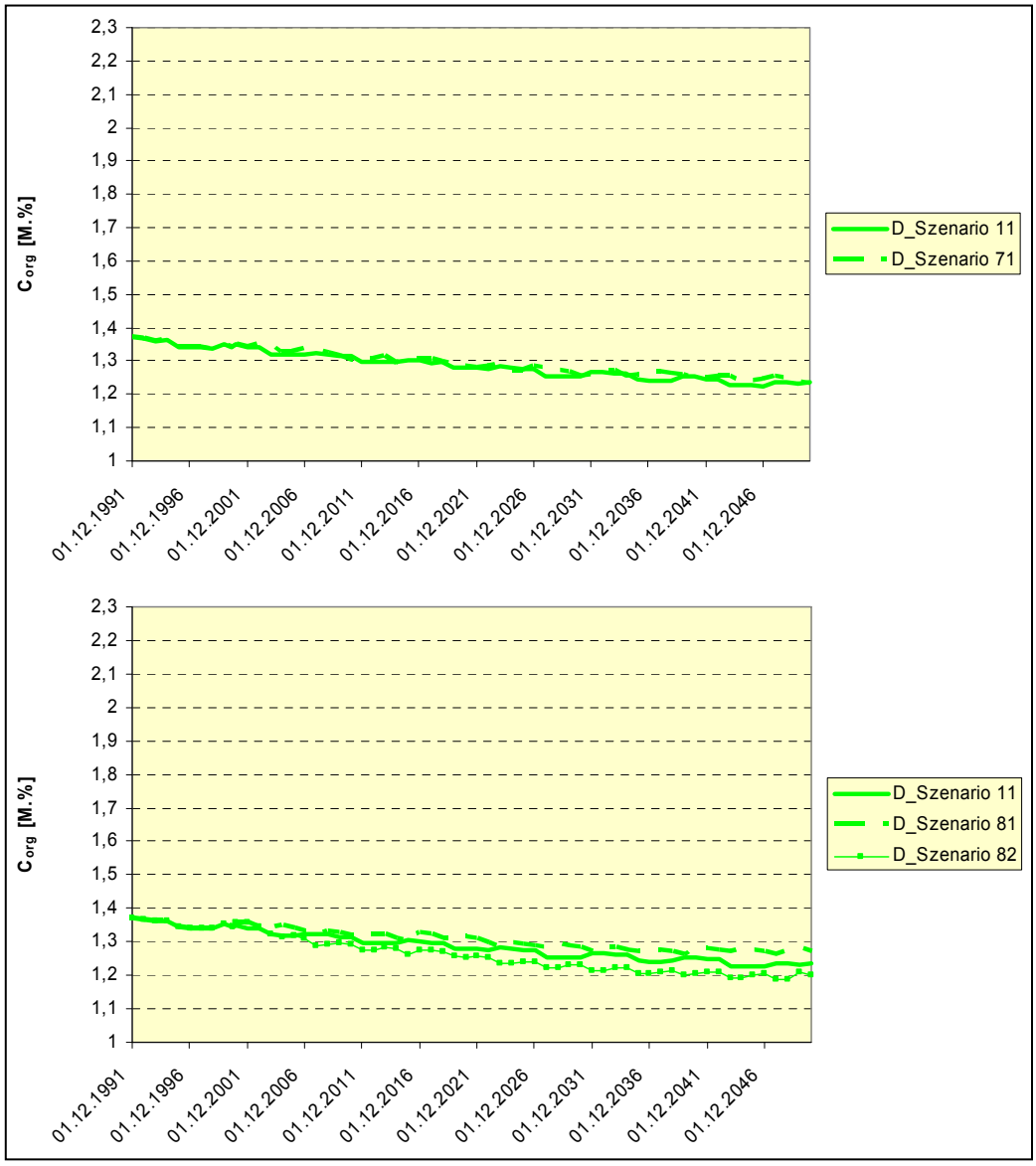


Abbildung 29: **Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 8, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), die Grundfruchtfolge mit 20 % Ackerfutter (Var. 71, oben) sowie mit 50 % Kleegras (Var. 81), die Grundfruchtfolge mit 50 % Kleegras und Abfuhr aller Koppelprodukte (Var. 82, unten) für den D-Standort**

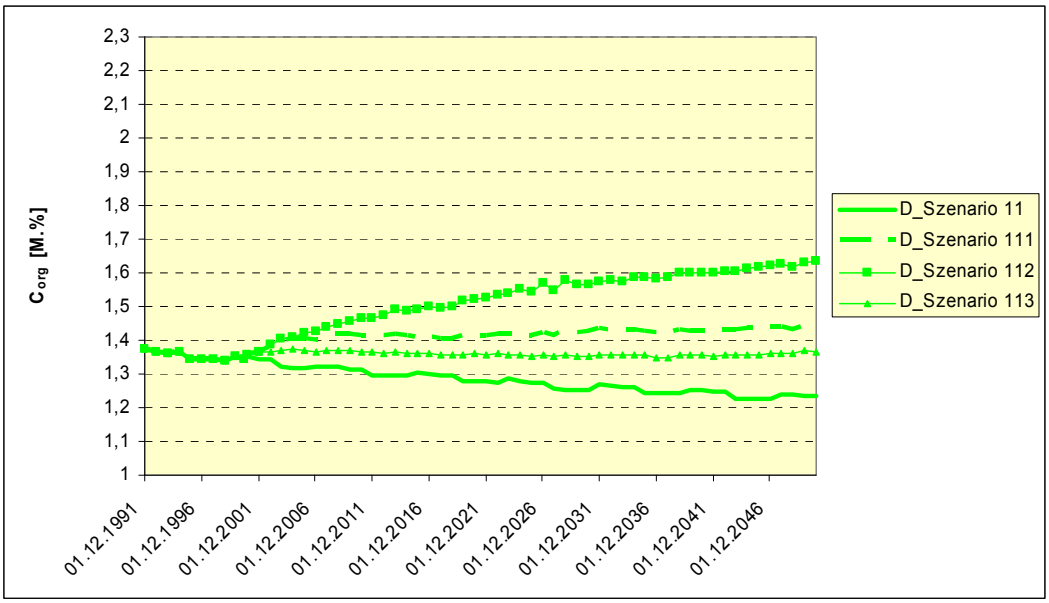


Abbildung 30: Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 11, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), für Mähweide (Var. 111), für Weide (Var. 112), für Wiese (Var. 113) für den D-Standort

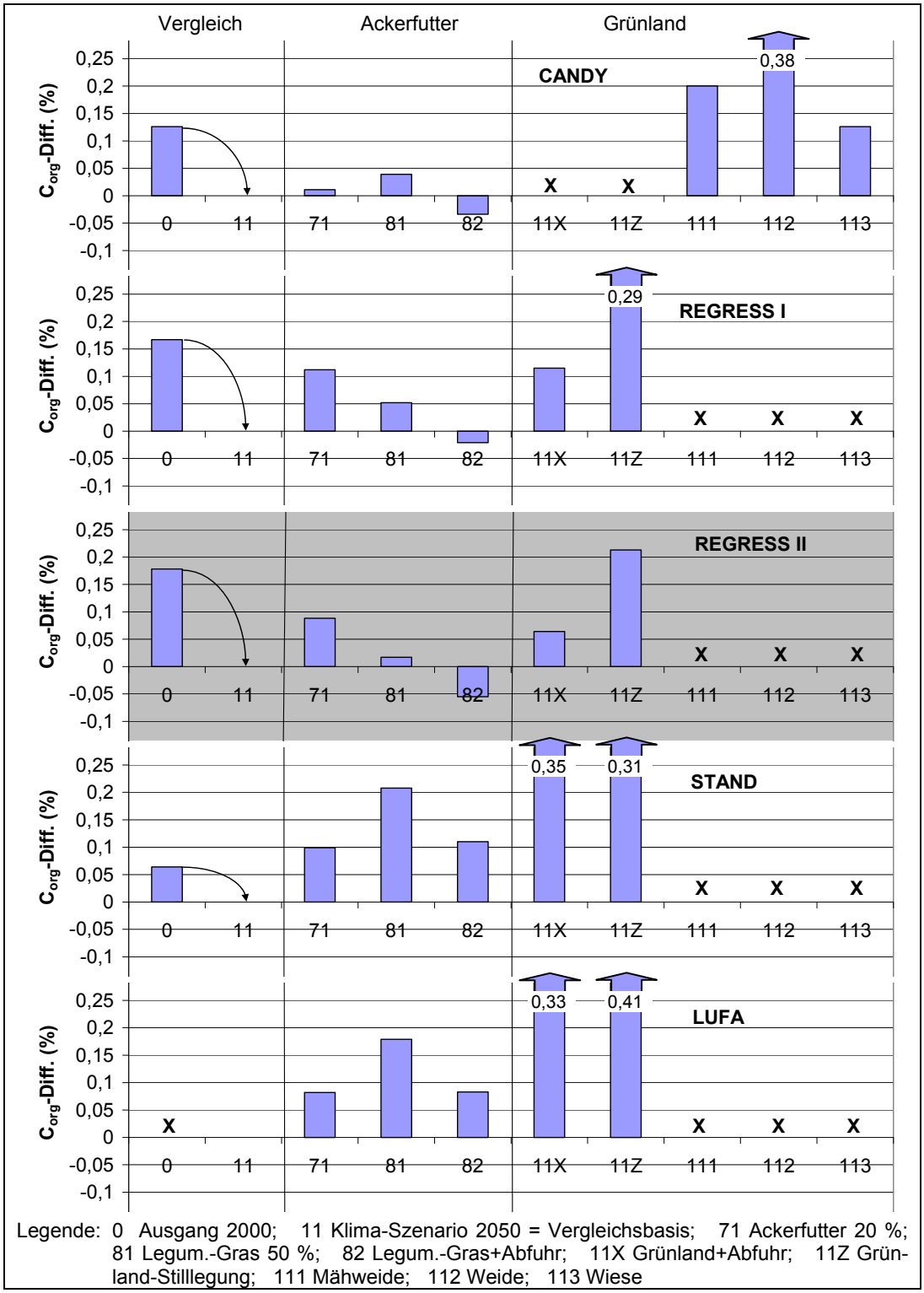
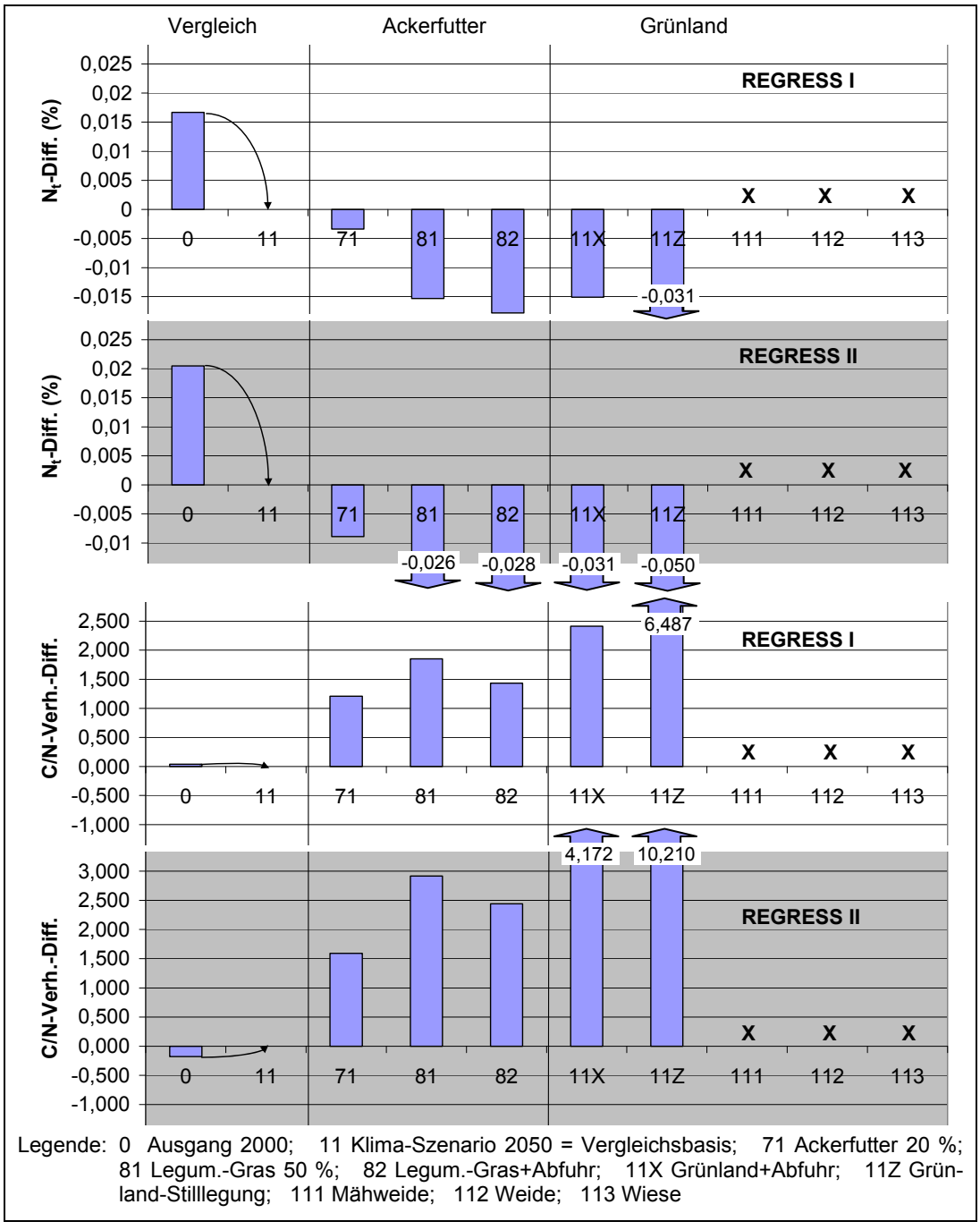


Abbildung 31: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ackerfutter und Grünland auf die zu erwartende Änderung der C_{org}-Gehalte des Bodens des D-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0 % C_{org})



Legende: 0 Ausgang 2000; 11 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 71 Ackerfutter 20 %; 81 Legum.-Gras 50 %; 82 Legum.-Gras+Abfuhr; 11X Grünland+Abfuhr; 11Z Grünland-Stilllegung; 111 Mähweide; 112 Weide; 113 Wiese

Abbildung 32: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ackerfutter und Grünland auf die zu erwartende Änderung der N_t-Gehalte und C/N-Verhältnisse des Bodens des D-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0 %)

3.2 Lö-Standort (Leipzig)

3.2.1 Ergebnisse der Spannweite der C_{org}- und N_t-Veränderung der modellierten Szenarien

Auf dem sandigen Lehm des Lö-Standortes kommt es nach der CANDY-Simulation zu keiner deutlichen Änderung des C_{org}-Gehaltes, wenn die hiesige Bewirtschaftung (Var. 11 u. 12) in die Zukunft fortgeführt wird (Abb. 33). Durch die einzelnen Szenarien ist darüber hinaus sowohl ein Abfall als auch ein ausgeprägter Anstieg der C_{org}-Werte im Vergleich zum Ausgangsjahr 2000 möglich.

Diese Spannbreite in den Handlungsmöglichkeiten wird zwischen den drei verschiedenen Berechnungsverfahren auch mit relativ hoher Übereinstimmung ausgewiesen (Abb. 34), so dass keines der Verfahren besonders anzusprechen ist. Die mittlere Spannbreite beträgt 0,52 % C_{org}, die sich im Vergleich zu den Ausgangsbedingungen im Jahr 2000 relativ gleichmäßig auf Möglichkeiten zu einer weiteren Reduzierung oder einer entsprechenden Anreicherung bis zum Jahr 2050 aufteilt. Dagegen bestehen kaum Möglichkeiten durch bestimmte Bewirtschaftung eine weitere Anreicherung der N_t-Werte des Bodens zu erreichen (Abb. 35). Durch entsprechende Auswahl an Bewirtschaftungsmöglichkeiten kann es aber zu einer z.T. deutlichen Abnahme der N_t-Werte und Erweiterung der C/N-Verhältnisse kommen. Nach Beibehaltung der augenblicklichen Bewirtschaftung durch Var. 11 und 12 würde es nach diesen REGRESS-Berechnungen zu einer leichten Abnahme der N_t-Werte kommen, dagegen werden die C/N-Verhältnisse auch an dem Lö-Standort durch die veranschlagte Klimaänderung zwischen dem Jahr 2000 und 2050 weitgehend gleich hoch bleiben.

Eine sichere Beurteilung der Veränderung der C_{org}-Werte in Folge der prognostizierten Klimaänderung in Richtung Temperaturanstieg und Niederschlagsabfall kann jedoch nicht erstellt werden, da zwischen den Berechnungsverfahren unterschiedliche Ergebnisse erzielt worden sind (Abb. 34). Nach den CANDY-Ergebnissen ist mit einem leichten Anstieg und mit dem REGRESS- und dem STAND-Verfahren jeweils eher mit einem geringen Abfall zu rechnen, der sich zudem bei Zugrundelegung des extremeren Klimaszenarios noch abschwächen könnte. Im Durchschnitt der drei Verfahren wäre ein rechnerischer Wert von -0,04 % C_{org} zu verzeichnen. Nach diesen Ergebnissen dürften sich daher keine bedeutenden Veränderungen der C_{org}- und N_t-Gehalte des Bodens auf dem Lö-Standort ereignen.

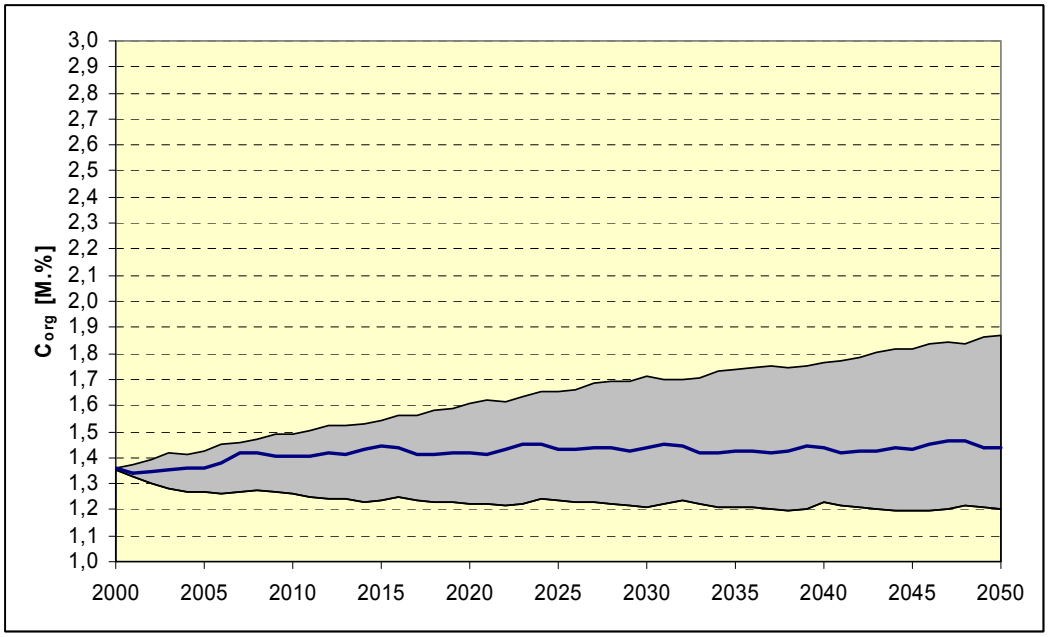


Abbildung 33: Spannweite der C_{org}-Entwicklung der modellierten Szenarien (2000 - 2050) für den Lö-Standort

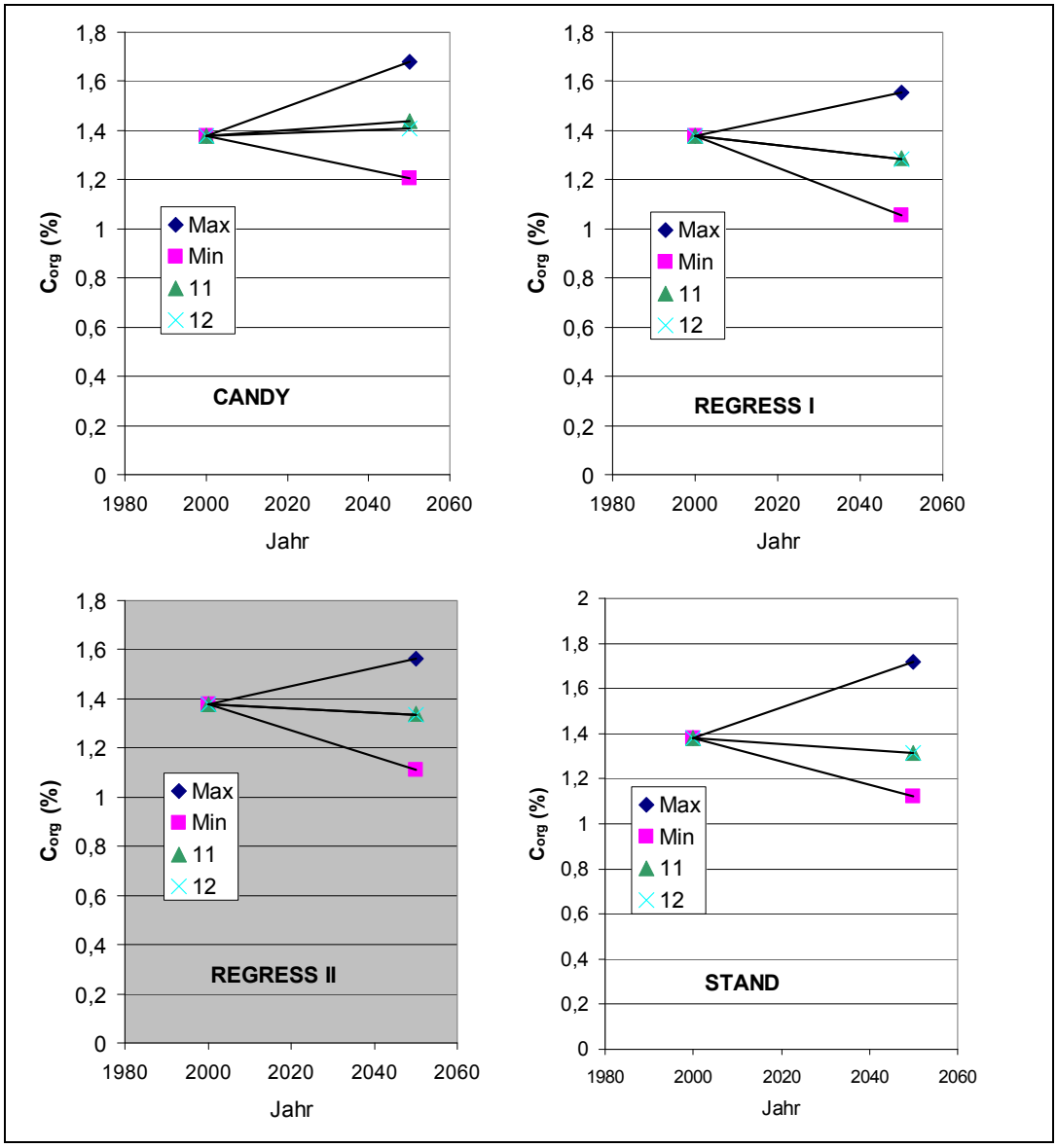


Abbildung 34: **Vergleich der Spannweite der C_{org}-Entwicklung der modellierten Szenarien im Zeitraum 2000 – 2050 mit den Modellen CANDY, REGRESS und STAND für den Lö-Standort**

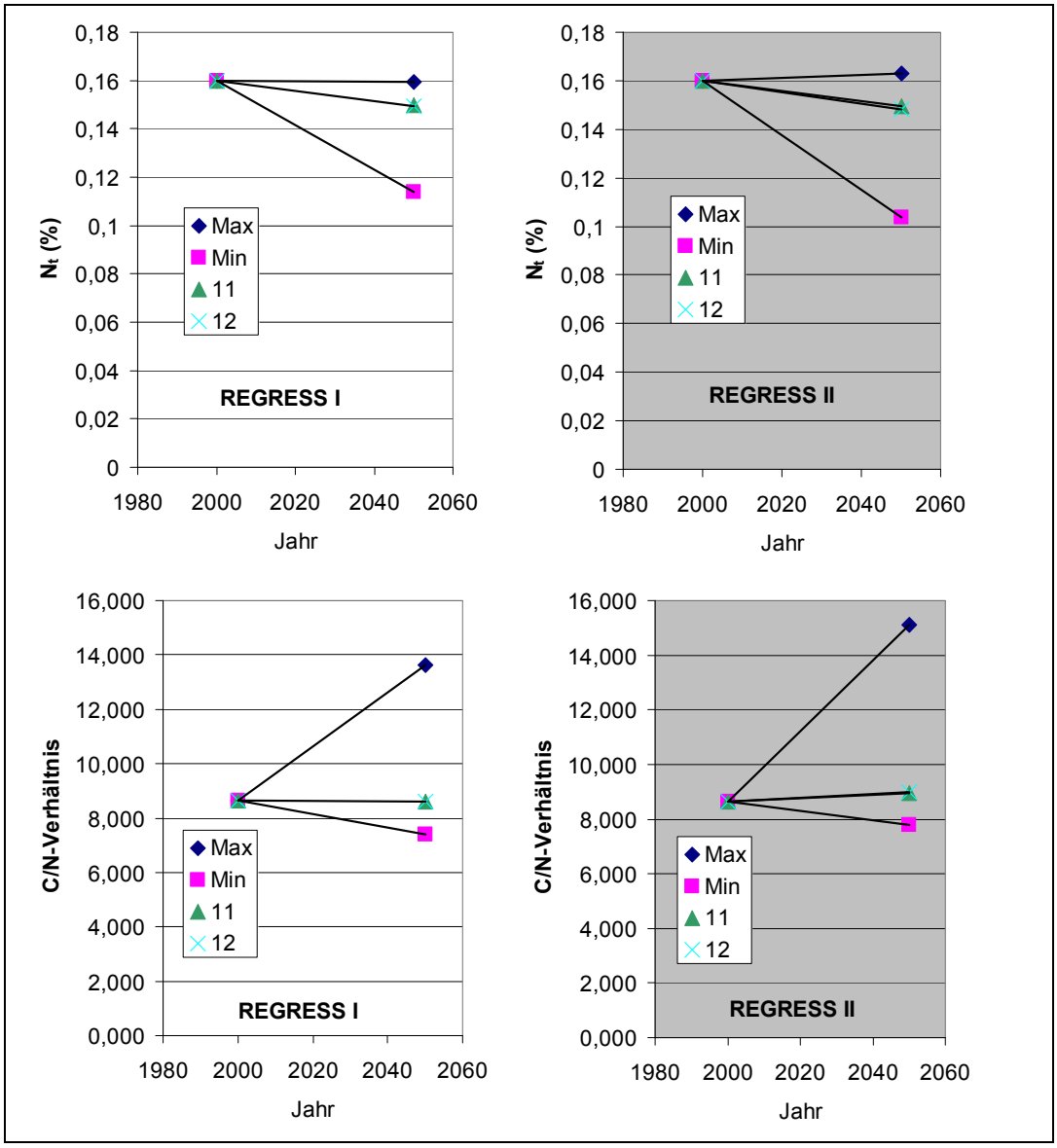


Abbildung 35: **Vergleich der Spannweite der Entwicklung der N_t-Gehalte und der C/N-Verhältnisse der modellierten Szenarien im Zeitraum 2000 – 2050 mit dem Modell REGRESS I und II für den Lö-Standort**

3.2.2 Szenarien der Ertragserhöhung und Umstellung auf Ökolandbau

Der simulierte Verlauf der C_{org}-Entwicklung für die Ertragserhöhung und Umstellung auf Ökolandbau kann der Abbildung 36 entnommen werden. Die differenzierte Bewertung des klimatischen Einflusses auf die C_{org}-Entwicklung des Bodens am Lö-Standort kann auch aus der Abbildung 37 erkannt werden. Der CANDY-Simulation zufolge würde ein leichter Anstieg zwischen 0,06 % und 0,03 % C_{org} (Var. 11 u. 12) erfolgen und nach den anderen Verfahren ein Abfall zwischen 0,06 - 0,07 % (STAND) sowie zwischen 0,09 – 0,10 % (REGRESS) zu verzeichnen sein. Auf jeden Fall werden an dem Standort mit den bisher schon höchsten Durchschnittstemperaturen keine großen Auswirkungen auf die C_{org}-Gehalte zu verzeichnen sein.

Eine Umstellung auf Anbauverfahren des Ökolandbaus wird ebenfalls z. T. deutlich unterschiedlich bewertet. Nach der CANDY-Berechnung fällt der C_{org}-Gehalt um bis zu 0,13 – 0,15 % ab, während bei den anderen Verfahren entweder geringe positive Effekte (REGRESS) oder genauso deutlich positive Wirkungen zu verzeichnen sind. So wird beim STAND-Verfahren eine Anreicherung zwischen 0,03 – 0,10 % C_{org} berechnet. Ein Vergleich von Berechnungen zu anderen Varianten, die ebenfalls einen relativ hohen Anteil an Ackerfutter in der Fruchtfolge zu verzeichnen haben, zeigt auf, dass für das Ackerfutter anscheinend beim CANDY-Verfahren eine zu geringe Humus bildende Wirkung veranschlagt wird. Im Durchschnitt der anderen Verfahren wird ein Wert um 0,057 % C_{org} ermittelt, der am besten durch das LUFA-Verfahren repräsentiert wird.

Auch Ergebnisse aus entsprechend vergleichenden Dauerfeldversuchen belegen eindeutig Vorteile der ökologischen Anbauverfahren bei der Humusanreicherung des Bodens (ANON., 1995; RAUPP, 2001). Zudem wurde aus Praxiserhebungen z.B. von CAPRIEL (2006) ein Unterschied von durchschnittlich 0,06 % C_{org} zwischen konventionellem und ökologischem Anbau ermittelt, der genau in dem Bereich liegt, der jetzt auch durch die eigenen Berechnungen (z.B. STAND) belegt wird.

Allerdings können unzureichende Wirkungen des Ökolandbaus auch auf das oft geringere Ertragsniveau zurückgeführt werden. Zu den vorliegenden Untersuchungen wurden experimentell abgesicherte Relationen zwischen den konventionellen und ökologischen Erträgen separat für alle Fruchtarten ermittelt (siehe Kap. 2.2.3). Im Durchschnitt der Einheitsfruchtfolge beträgt hiernach das Ertragniveau im Ökolandbau 72 % und in der Grundfruchtfolge auf dem Lö-Standort 73 % (und auf dem D-Standort jedoch ca. weitere 5 %) weniger als das konventionelle Niveau. Auf der anderen Seite ist jedoch zu bedenken, dass wiederum im Ökolandbau die HP/NP-Verhältnisse etwas zugunsten der Nebenprodukte, wie z.B. Stroh, verschoben sind (siehe Tab. 4; ALBERT et al., 2007).

Bei dem zu simulierenden Ertragsanstieg, der in der Zukunft bis zum Jahr 2050 zu verzeichnen sein könnte, wurden diese experimentell abgesicherten HP/NP-Verhältnisse nicht verändert. Hierbei ist zu bedenken, dass insbesondere der Züchtungsfortschritt der letzten Jahrzehnte sich nicht so sehr in einer Zunahme der absoluten TM-Produktion einer Fruchtart zu erkennen gegeben hat,

sondern in einer Zunahme des Hauptproduktes, was auf Kosten der TM-Produktion des Nebenproduktes geschehen ist. Das gesamte TM-Produktions-Potenzial konnte demgegenüber nicht deutlich angehoben werden (EWERT et al., 2005).

Durch diese gerichtete Veränderung des HP/NP-Verhältnisses zu ungunsten des Nebenproduktes würde die Humuswirkung, die weitgehend auf die Ernte- und Wurzelreste und somit auch auf das Nebenprodukt zurückzuführen ist, im Zuge des Ertragsanstiegs der Fruchtarten nur unterproportional zunehmen. Diese Zusammenhänge können allerdings bei den simulierten Ertragseffekten durch die Berechnungsverfahren nicht abgebildet werden. Somit sind die ausgewiesenen Ertragseffekte auf die Veränderung der Humusgehalte lediglich als potenziell mögliche Effekte einzustufen.

Wie aus Abbildung 37 zu entnehmen ist, wird für den postulierten Ertragsanstieg von 50 % im Vergleich zum Ausgangsjahr 2000 auf dem Lö-Standort im Vergleich zur konventionellen Vergleichsvariante 11 ein Anstieg der C_{org}-Gehalte des Bodens um ca. 0,10 % in Var. 11 (konv.) und im Vergleich zur Variante 31 um ca. 0,06 % C_{org} (Var. 32) für den ökologischen Landbau ausgewiesen. Der Durchschnittswert aller Verfahren von 0,080 % C_{org} wurde am besten durch die Verfahren REGRESS (0,085 %) und STAND (0,072 %) erreicht, während CANDY mit 0,063 % am unteren und LUFA mit 0,099 % C_{org} am oberen Ende positioniert waren. Insgesamt lagen alle Verfahren mit ihren Schätzungen sehr eng beieinander.

Eine Umstellung auf Ökolandbau geht weiterhin damit einher, dass die C/N-Verhältnisse auf Grund der relativen Knappheit leicht verfügbarer N-Quellen im Vergleich zur Kohlenstoffzufuhr etwas erweitert werden. Es kommt zu einer Abnahme der N-Gehalte im Boden, wie weiterhin auf Grund von REGRESS-Berechnungen ausgewiesen werden konnte (Abb. 38). Durch den postulierten Ertragszuwachs wird demgegenüber dieses Verhältnis kaum verändert bzw. durch die relativ höhere Zufuhr an Stickstoff kann sich das C/N-Verhältnis wieder etwas verengen. Dies wird auch deutlich in den veranschlagten N-Salden, die auf Grund der deutlich höheren N-Mineraldüngung dann noch etwas ansteigen werden. Es ist allerdings einschränkend anzumerken, dass gleich bleibende HP-/NP-Verhältnisse unterstellt worden sind. Wenn der zukünftig zu erwartende Ertragseffekt lediglich durch einen relativ deutlicheren Anstieg des Hauptproduktes erfolgt, wird aller Voraussicht nach die Zunahme der N-Düngung dann niedriger ausfallen.

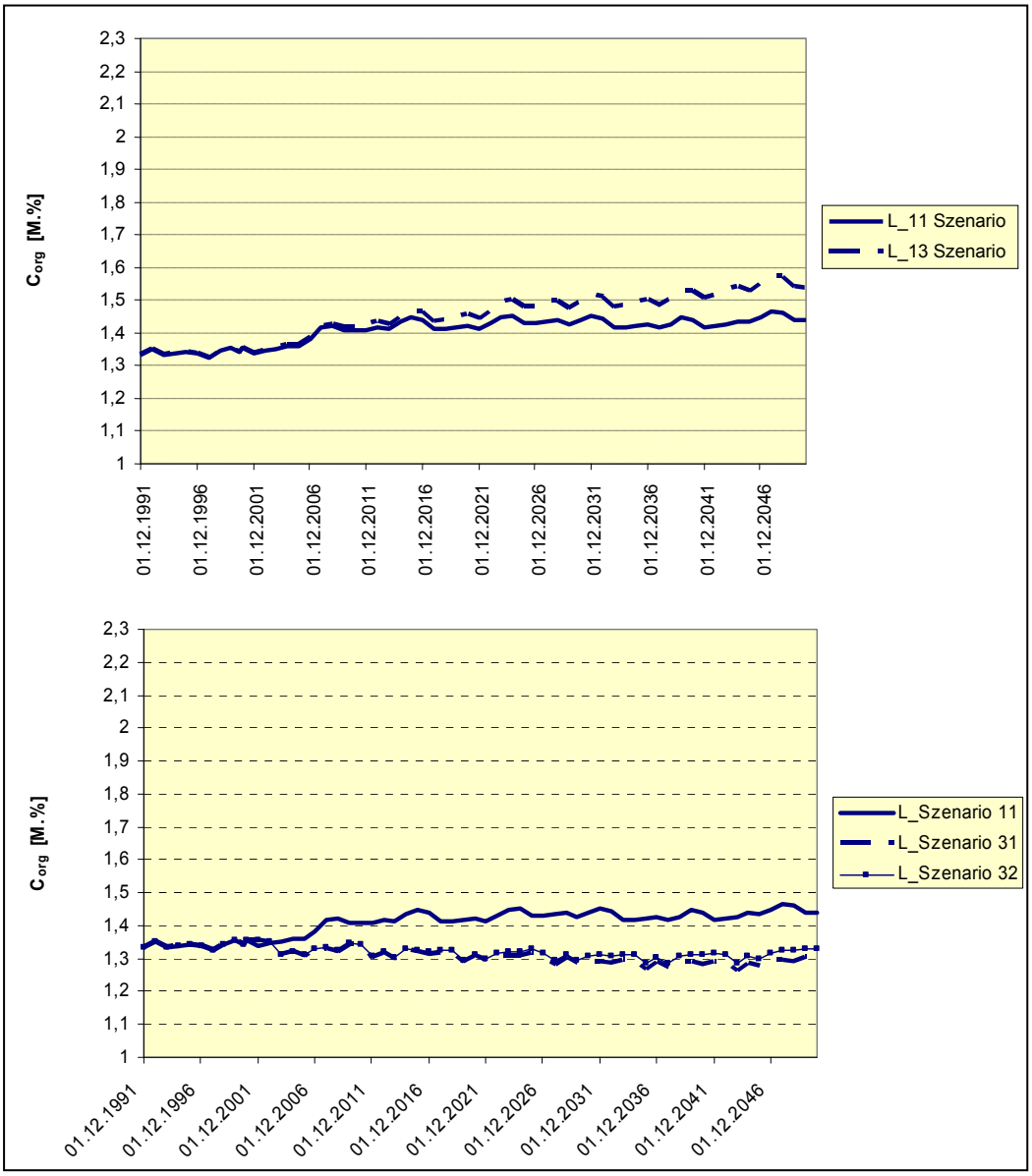


Abbildung 36: **Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11) und die Grundfruchtfolge mit Ertragsanstieg (Var. 13, oben) sowie des ökologischen Landbaus (unten) für den Lö-Standort**

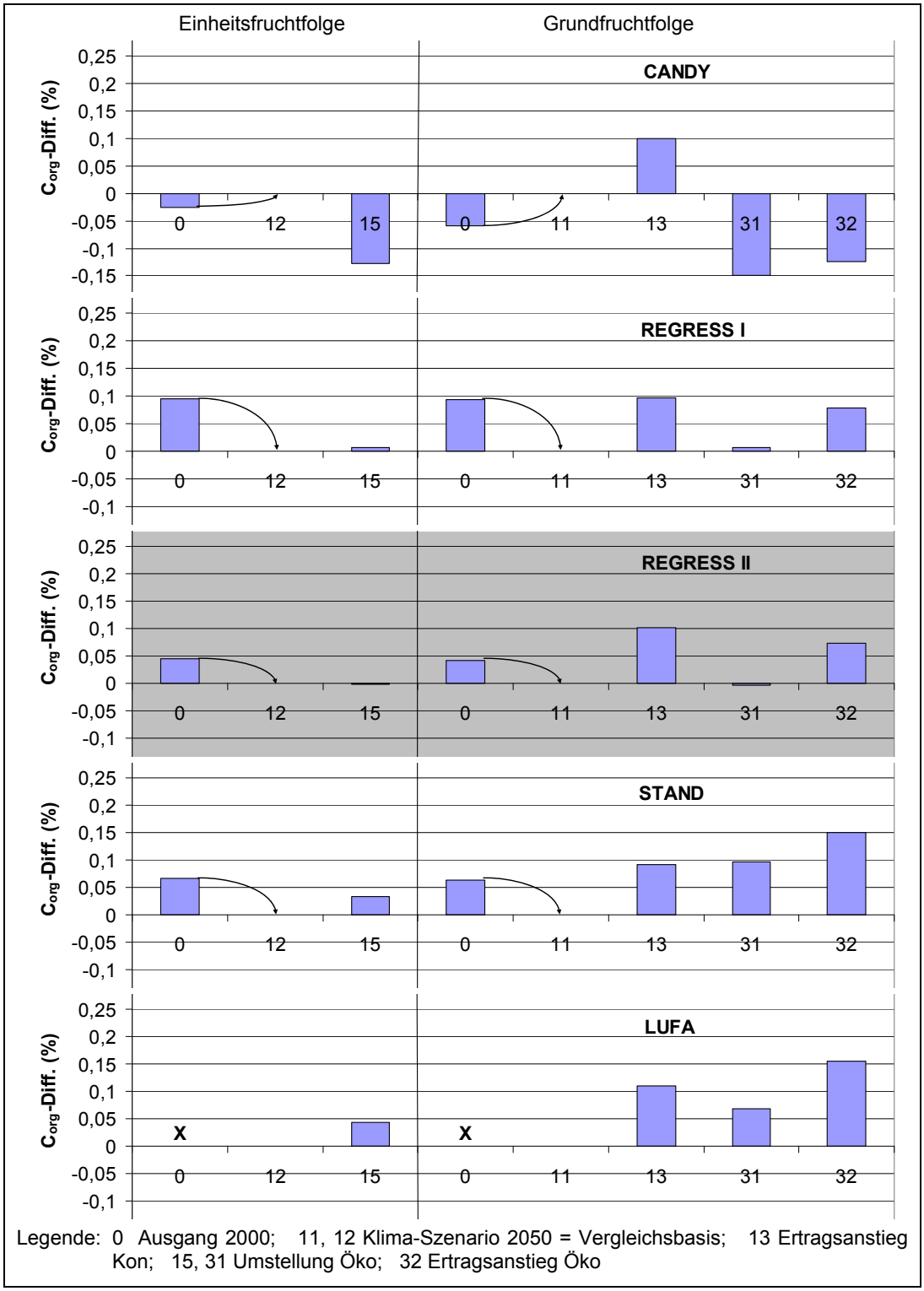


Abbildung 37: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ertragsanstieg sowie Umstellung auf Ökolandbau auf die zu erwartende Änderung der C_{org}-Gehalte des Bodens des Lö-Standortes bei einer Einheitsfruchtfolge (links) und einer Grundfruchtfolge (rechts)

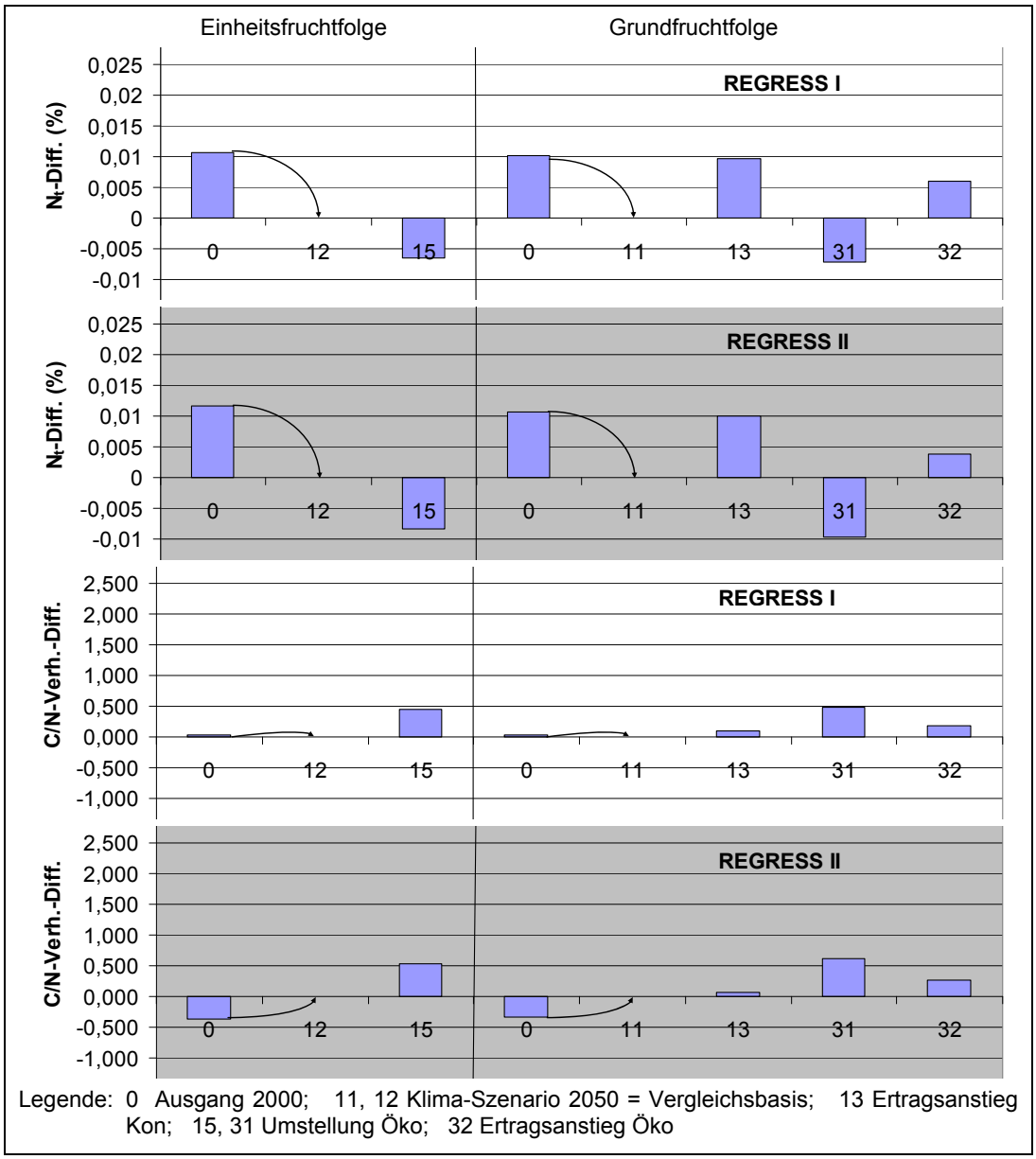


Abbildung 38: Ergebnisse der REGRESS-Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ertragsanstieg sowie Umstellung auf Ökolandbau auf die zu erwartende Änderung der N_t-Gehalte und der C/N-Verhältnisse des Bodens des Lö-Standortes bei einer Einheitsfruchtfolge (links) und einer Grundfruchtfolge (rechts)

3.2.3 Szenarien zu Energiefruchtfolgen, viehlosen Marktfruchtbetrieben und viehreicher Veredlung

Eine Ausdehnung des Silomaisanbaus auf 50 % der Fruchtfolge (Var. 41) sowie eine zusätzliche Abfuhr aller Koppelprodukte (Var. 42) kann durch alle Verfahren mit relativ hoher Übereinstimmung simuliert werden (CANDY-Simulation, Abb. 39 sowie Abb. 40). Im Vergleich zur Variante 11 wurde ein mittlerer Abfall von 0,103 % C_{org} veranschlagt, der in hoher Übereinstimmung mit den Verfahren CANDY und LUFA ermittelt worden ist, während durch STAND ein relativ niedriger Wert mit -0,07 % und mit REGRESS wiederum mit -0,13 % C_{org} ein etwas zu großer Abfall berechnet worden ist.

Die Abfuhr der Koppelprodukte bewirkt eine weitere Abnahme der C_{org}-Werte, so dass wiederum in dieser Variante die niedrigsten C_{org}-Werte des Lö-Standortes registriert worden sind. Der Durchschnittswert von -0,222 % C_{org} wurde von den Verfahren REGRESS, LUFA und CANDY am besten erreicht, während die STAND-Berechnungen einen geringfügig zu geringen Abfall aufweisen.

Auf Grund der relativ gut übereinstimmenden Ergebnisse ist daher mit der Ausdehnung des Maisanbaus und einer verstärkten Abfuhr der Koppelprodukte zur Energieerzeugung mit einem Abfall der C_{org}-Werte auf dem Hochertragsstandort des sächsischen Lößgebietes zu rechnen. Dieser Abfall kann (je nach zugrunde liegender modellierter klimatischer Reaktion) auf die C_{org}-Werte des Bodens nicht ausgeglichen bzw. bei weitem übertroffen werden.

Wie weiterhin den REGRESS-Berechnungen entnommen werden kann, kommt es zwar zu einer Abnahme der N_t-Werte des Bodens durch die anvisierten Energiefruchtfolgen (Abb. 41). Da der Abfall der C_{org}-Gehalte aber deutlicher in Erscheinung tritt, werden sich die C/N-Verhältnisse im Boden entsprechend verengen, insbesondere bei zusätzlicher Abfuhr der meistens kohlenstoffreichen Koppelprodukte (Stroh). Diese Ergebnisse werden auch dadurch gestützt, dass die Gesamtzufuhr an N-Düngemitteln (auf Grund der Zunahme an Biogasgülle) deutlich ansteigen wird.

Eine Ausdehnung des Getreideanbaus auf 100 % der Fruchtfolge sowie eine starke Ausdehnung des Hackfruchtanbaus incl. bzw. ohne zusätzliche organische Düngung wurde in den folgenden Var. 51 – 54 untersucht (Abb. 40 und Abb. 42). Die Getreidefruchtfolge (Var. 51) hat je nach angewendetem Berechnungs-Verfahren eine etwas abweichende Reaktion auf die C_{org}-Werte zur Folge als die anderen Varianten. Der Durchschnitt von -0,038 % C_{org} wurde am besten durch die STAND-Berechnung ermittelt. Die REGRESS-Berechnungen wiesen einen deutlicheren Abfall aus, während die CANDY-Analyse zu einem weitgehend ausgeglichenen Wert gelangte.

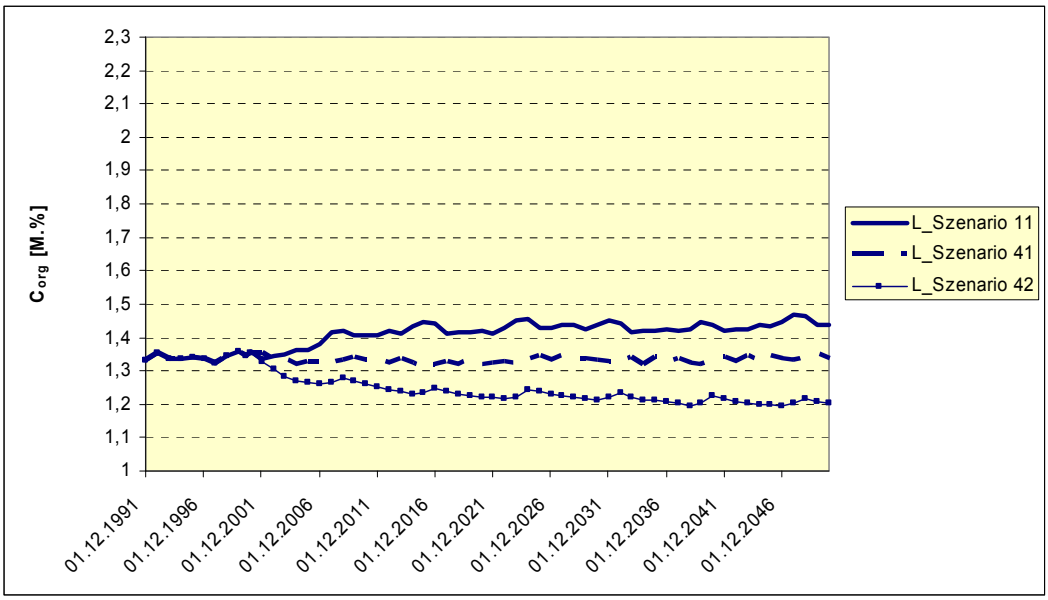


Abbildung 39: Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 4, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), die Grundfruchtfolge mit Ausdehnung des Silomaisanteils (Var. 41), die Grundfruchtfolge mit Abfuhr sämtlicher Koppelprodukte (Var. 42) für den Lö-Standort

Eine zusätzliche Kompostdüngung mit 100 dt/ha jedes Jahr (Var. 53) bewirkt demgegenüber dann eine starke Zunahme der Werte um durchschnittlich 0,29 % C_{org}. Dieses Ergebnis kann zwar durch alle Verfahren ausgewiesen werden. Doch lagen die Berechnungen zwischen 0,14 % (Basis Var. 11) bzw. 0,24 % (Basis Var. 51) durch die REGRESS-Berechnungen am unteren Ende und mit 0,40 % (Basis Var. 11) bzw. 0,43 % (Basis Var. 51) mit den STAND-Berechnungen am oberen Ende der Variationsbreite. Den mittleren Wert hat am besten das CANDY-Verfahren ermittelt.

Der nächste Komplex an Varianten stellen Möglichkeiten der Ausdehnung der Tierhaltung dar, wobei außerdem der Anbau an Silomais entsprechend den Var. 41 bzw. 42 berücksichtigt worden ist (siehe Abb. 40 sowie Abb. 43). Durch die Berechnungs-Verfahren wurden diese Varianten in einer fast identischen Rangfolge abgebildet. Nur im Niveau gibt es z.T. deutliche Unterschiede. Die REGRESS-Berechnungen liegen etwas auf zu niedrigem Niveau, da für die organischen Materialien auf Grund der Verwendung der Trockenmasse eine Unterbewertung der Humuswirkung erfolgen kann. Im Durchschnitt der Var. 61 (Rindergülle) und Var. 62 (Biogasgülle) gelingt es offenbar nicht, das Niveau der Vergleichsvariante 11 einzuhalten. Im Durchschnitt (ohne REGRESS) wurde ein Wert für Var. 61 von -0,019 % C_{org} (incl. REGRESS von -0,037 %) und für Var. 62 von -0,064 % C_{org} (incl. REGRESS von -0,0775 %) ermittelt. Die mittleren Werte wurden vom CANDY-Verfahren am besten getroffen, insgesamt bestehen aber kaum Unterschiede zwischen den drei Verfahren.

In der Festmistvariante 63 bestehen deutlichere Unterschiede zwischen den Berechnungsverfahren in der Weise, dass außer der bekannten Unterbewertung durch REGRESS eine deutliche Überbewertung durch das LUFA-Verfahren gegeben ist, die auf einer zu hohen Humuswirkung von hohen Zufuhrmengen beruht. Im Durchschnitt aller Verfahren wird eine positive Wirkung von 0,025 % C_{org} ermittelt, die am besten mit dem STAND-Verfahren übereinstimmt. Bei diesem Verfahren erfolgt eine der Zufuhrhöhe angepasste Bewertung der Humuswirkung der organischen Materialien.

In Variante 64 erfolgt eine Düngung entsprechend 2 GVE/ha Schweinegülle in einer getreidereichen Fruchtfolge incl. Anbau von Körnermais. Alle Verfahren können dieses Anbausystem mit relativ hoher Übereinstimmung ermitteln. Im Durchschnitt wird eine C_{org}-Anreicherung von 0,077 % ausgewiesen, dieser Wert wird am besten durch das REGRESS- und das STAND-Verfahren getroffen. Auf der Grundlage der REGRESS-Berechnungen kommt es in den Varianten mit Rindviehhaltung kaum zu Veränderungen in den N_t-Werten des Bodens (Abb. 41). Da die Humuswirkung in diesen Varianten etwas zu niedrig angesetzt wird, ist daher auch mit keiner großen Veränderung der C/N-Verhältnisse zu rechnen.

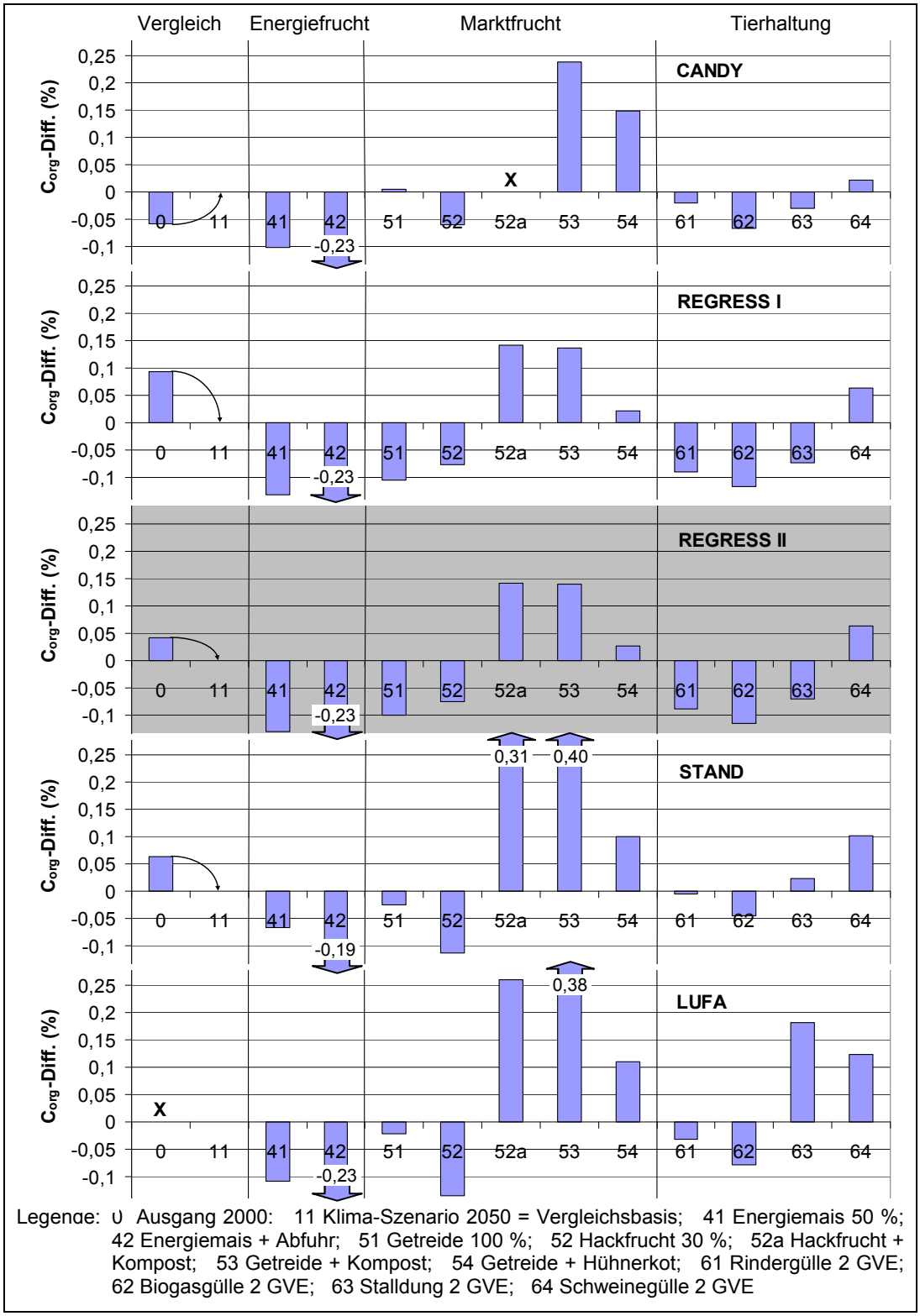
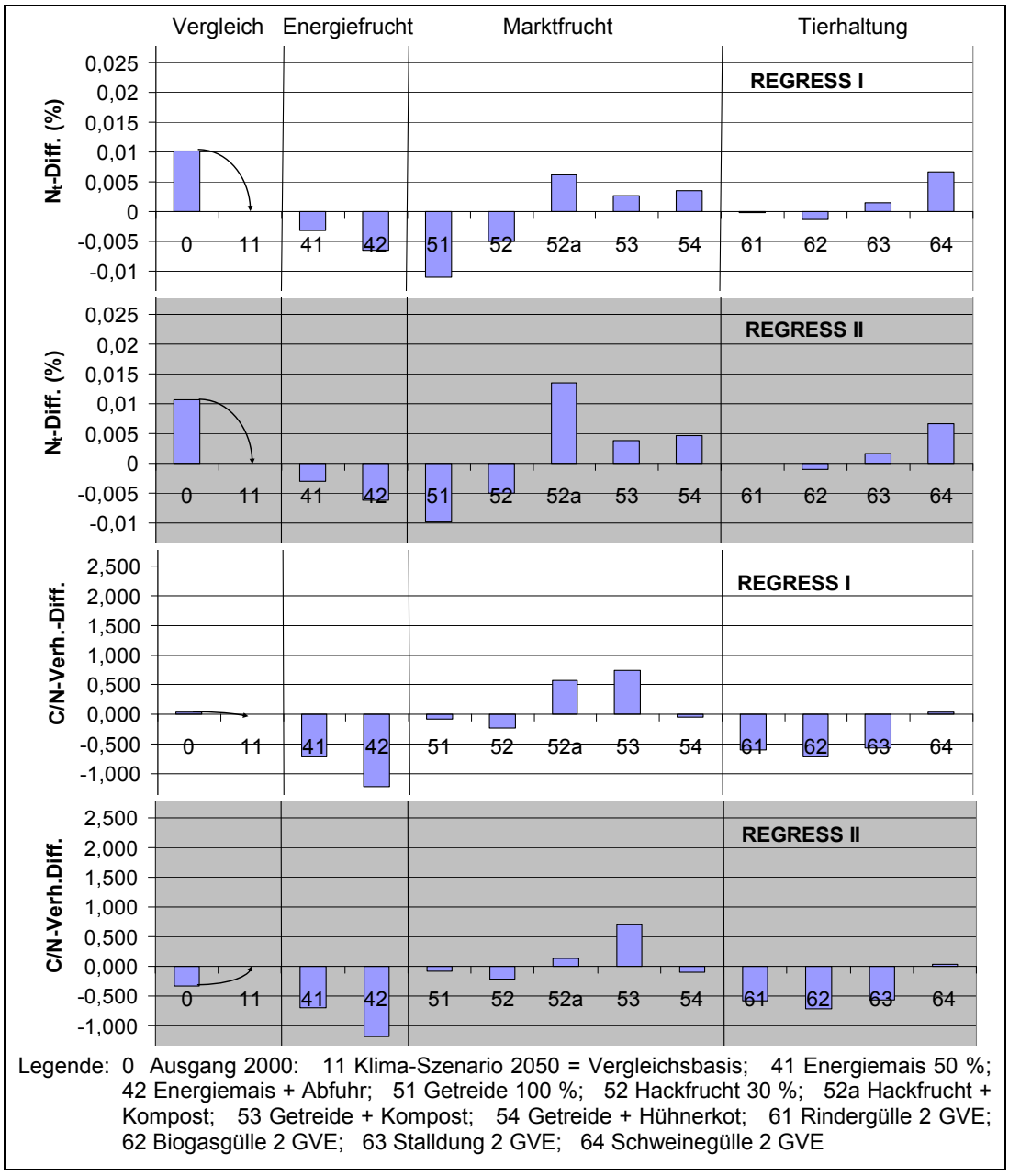


Abbildung 40: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Energiefruchtfolgen, Marktfrucht und tierische Veredlung auf die zu erwartende Änderung der C_{org}-Gehalte des Bodens des Lö-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0 % C_{org})



Legende: 0 Ausgang 2000: 11 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 41 Energiemais 50 %; 42 Energiemais + Abfuhr; 51 Getreide 100 %; 52 Hackfrucht 30 %; 52a Hackfrucht + Kompost; 53 Getreide + Kompost; 54 Getreide + Hühnerkot; 61 Rindergülle 2 GVE; 62 Biogasgülle 2 GVE; 63 Stalldung 2 GVE; 64 Schweinegülle 2 GVE

Abbildung 41: Ergebnisse der REGRESS-Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Energiefruchtfolgen, Marktfrucht und tierische Veredlung auf die zu erwartende Änderung der N_t-Gehalte und der C/N-Verhältnisse des Bodens des Lö-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0)

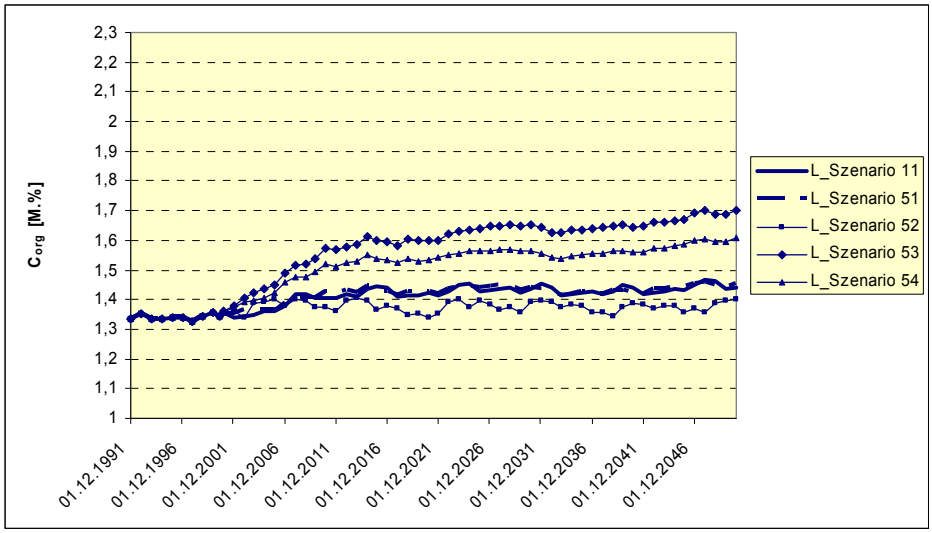


Abbildung 42: **Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 5, 1991 – 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), Fruchtfolge mit 100 % Getreideanteil (Var. 51), Fruchtfolge mit 30 % Hackfruchtanteil (Var. 52), Fruchtfolge mit 100 % Getreideanteil + 100 dt ha^{-1} a^{-1} Kompost (Var. 53), Fruchtfolge mit 100 % Getreideanteil + 170 kg ha^{-1} a^{-1} Hühnertrockenkot (Var. 53) für den Lö-Standort**

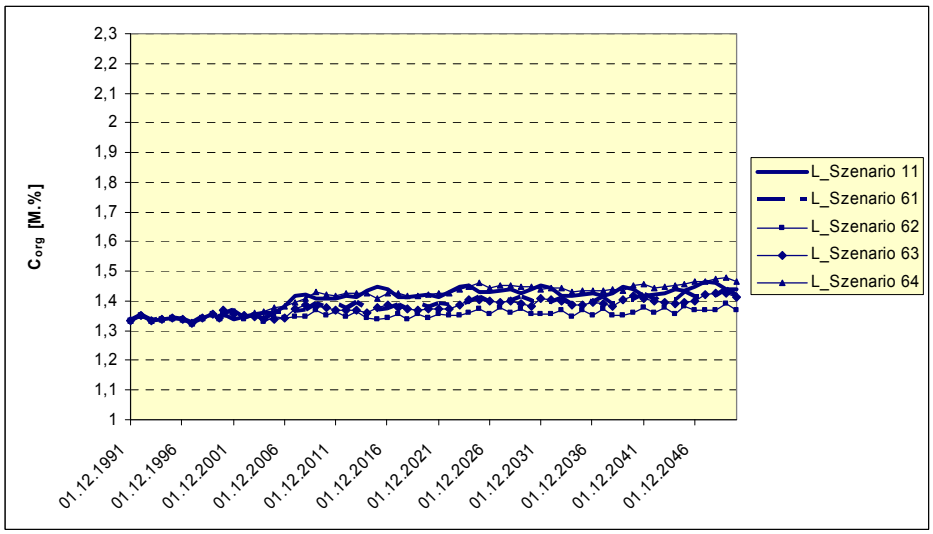


Abbildung 43: **Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 6, 1991 – 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Rind) mit Gülleausbringung (Var. 61), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Rind) mit Gülleausbringung nach Biogaserzeugung (Var. 62), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Rind) mit Stallmistausbringung (Var. 63), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Schwein) mit Gülleausbringung (Var. 64) für den Lö-Standort**

3.2.4 Szenarien zu Ackerfutter und Grünland

Auf den Ackerfuttervarianten erfolgt eine Ausdehnung des Futterleguminosenanbaus, wobei der günstige Einfluss auf die Humuswirkung mit der zukünftig möglichen legumen N-Zufuhr als regenerierbare N-Zufuhrquelle als Ersatz für die N-Mineraldüngung verknüpft werden sollte (Abb. 44 sowie Abb. 45). Zwischen den Varianten 71 (20 % Leguminosengras als Stilllegung), 81 (50 % Leguminosengras, Koppelprodukte verbleiben) und 82 (50 % Leguminosengras, Koppelprodukt-Abfuhr) wird durch die angewendeten Berechnungsmethoden zwar eine relativ hohe übereinstimmende Rangfolge gefunden, doch z.T. auf deutlich unterschiedlichem Niveau. Während CANDY im Vergleich zur Var. 11 nur negative Entwicklungen berechnen konnte, wurden bei den anderen Verfahren immer positive Entwicklungen der C_{org}-Werte kalkuliert. Es gibt eine ganze Reihe an Ergebnissen aus Felddauerversuchen, die eindeutig die ausgesprochen positive Wirkung einer Einführung von Leguminosengras in die Fruchtfolge auf die C_{org}-Gehalte des Bodens belegen (KÖRSCHENS & EICH 1990; WICKE et al. 1990). Daher kann hier angenommen werden, dass in den CANDY-Berechnungsgrundlagen zur Bewertung des Legumiosengrases und des Ackerfutters ein Fehler vorliegen dürfte.

Im Durchschnitt der Verfahren wird ein Anstieg der C_{org}-Werte um 0,096 % (ohne CANDY von 0,133 %) in Variante 71 berechnet, was recht gut durch das STAND-Verfahren repräsentiert werden kann. Bei diesem Verfahren werden hohe Zufuhrmengen insbesondere an Gründüngung durch relativ geringe Humifizierungskoeffizienten dargestellt. Die Variante 81 weist einen Anstieg um durchschnittlich 0,101 % (0,159 %) C_{org} auf, was wiederum dem berechneten Wert des REGRESS-Verfahrens entspricht (bzw. dem LUFA-Verfahren Nahe kommt). Auch für Var. 82 mit einem Mittelwert von 0,053 % C_{org} (ohne CANDY) eignet sich das LUFA-Verfahren gut.

Nach Umstellung auf Grünland liegt der Anstieg an C_{org} in der Var. 113 bei den CANDY-Berechnungen bei 0,218 % C_{org} im Boden (siehe auch Abb. 46). Im Durchschnitt der anderen Verfahren wurde ein Wert von 0,28 % C_{org} für Var. 11X bzw. von 0, 33 % für Var. 11Z ermittelt, was recht gut übereinstimmt mit dem LUFA- bzw. dem STAND-Verfahren (Abb. 45).

Eine Einführung von Ackerfutter und Umstellung auf Grünland hat weiterhin nach den REGRESS-Analysen in der Regel eine Abnahme der N_t-Werte im Boden zur Folge, so dass das C/N-Verhältnis z.T. drastisch ansteigen kann (Abb. 47). Es ist bekannt, dass das C/N-Verhältnis von Grünlandböden meistens weiter ist als das auf Ackerböden (siehe z.B. DIEPOLDER et al. 2006).

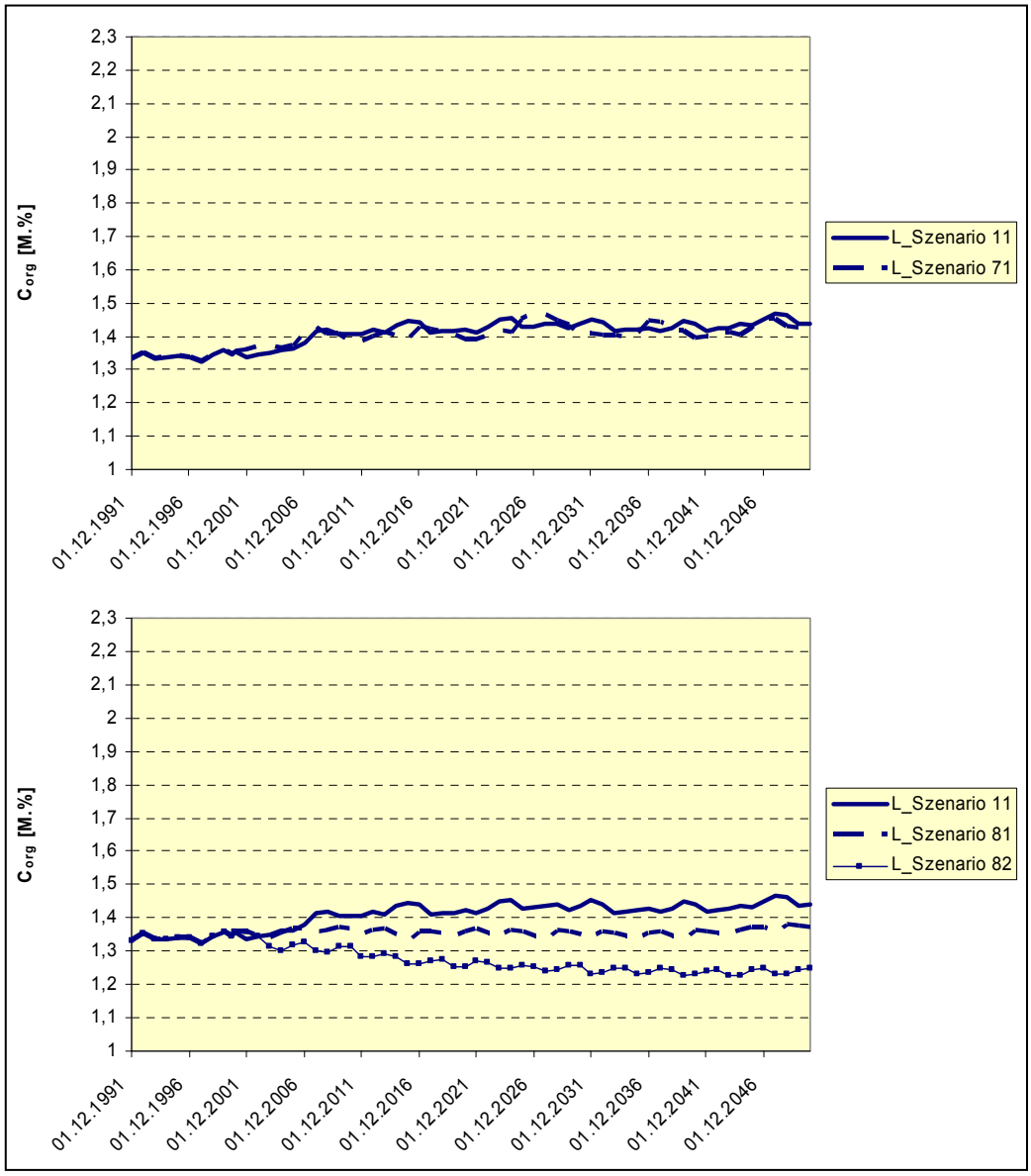
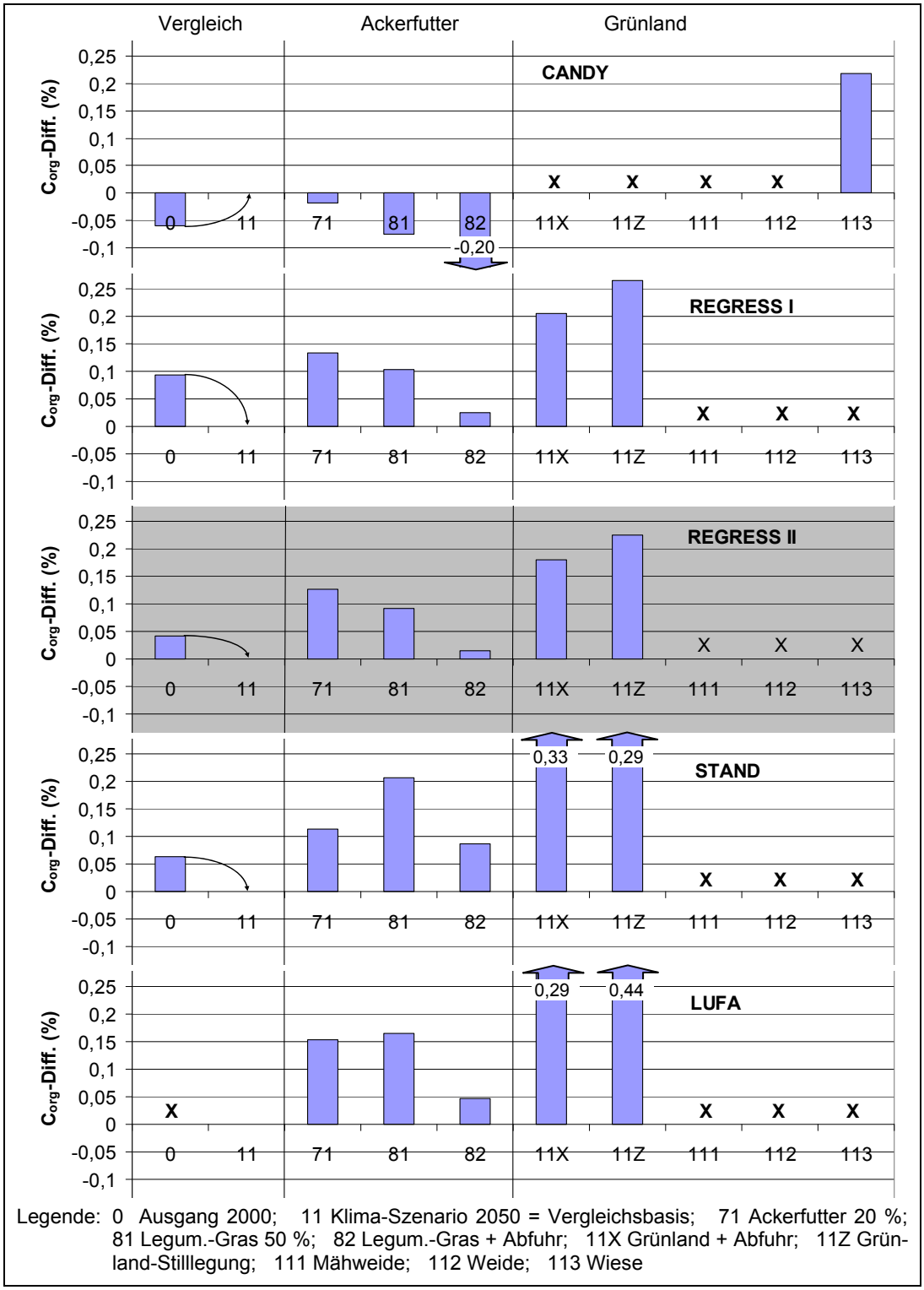


Abbildung 44: **Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 8, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), die Grundfruchtfolge mit 20 % Ackerfutter (Var. 71, oben), 50 % Kleegras (Var. 81) sowie bei Abfuhr aller Koppelprodukte (Var. 82, unten) für den Lö-Standort**



Legende: 0 Ausgang 2000; 11 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 71 Ackerfutter 20 %; 81 Legum.-Gras 50 %; 82 Legum.-Gras + Abfuhr; 11X Grünland + Abfuhr; 11Z Grünland-Stilllegung; 111 Mähweide; 112 Weide; 113 Wiese

Abbildung 45: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ackerfutter und Grünland auf die zu erwartende Änderung der C_{org}-Gehalte des Bodens des Lö-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0)

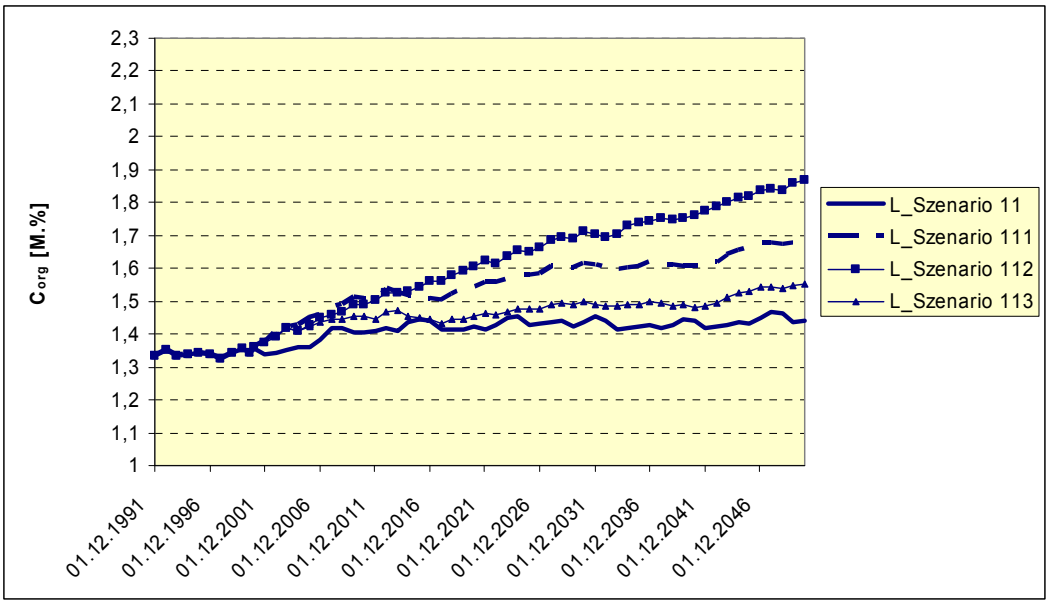
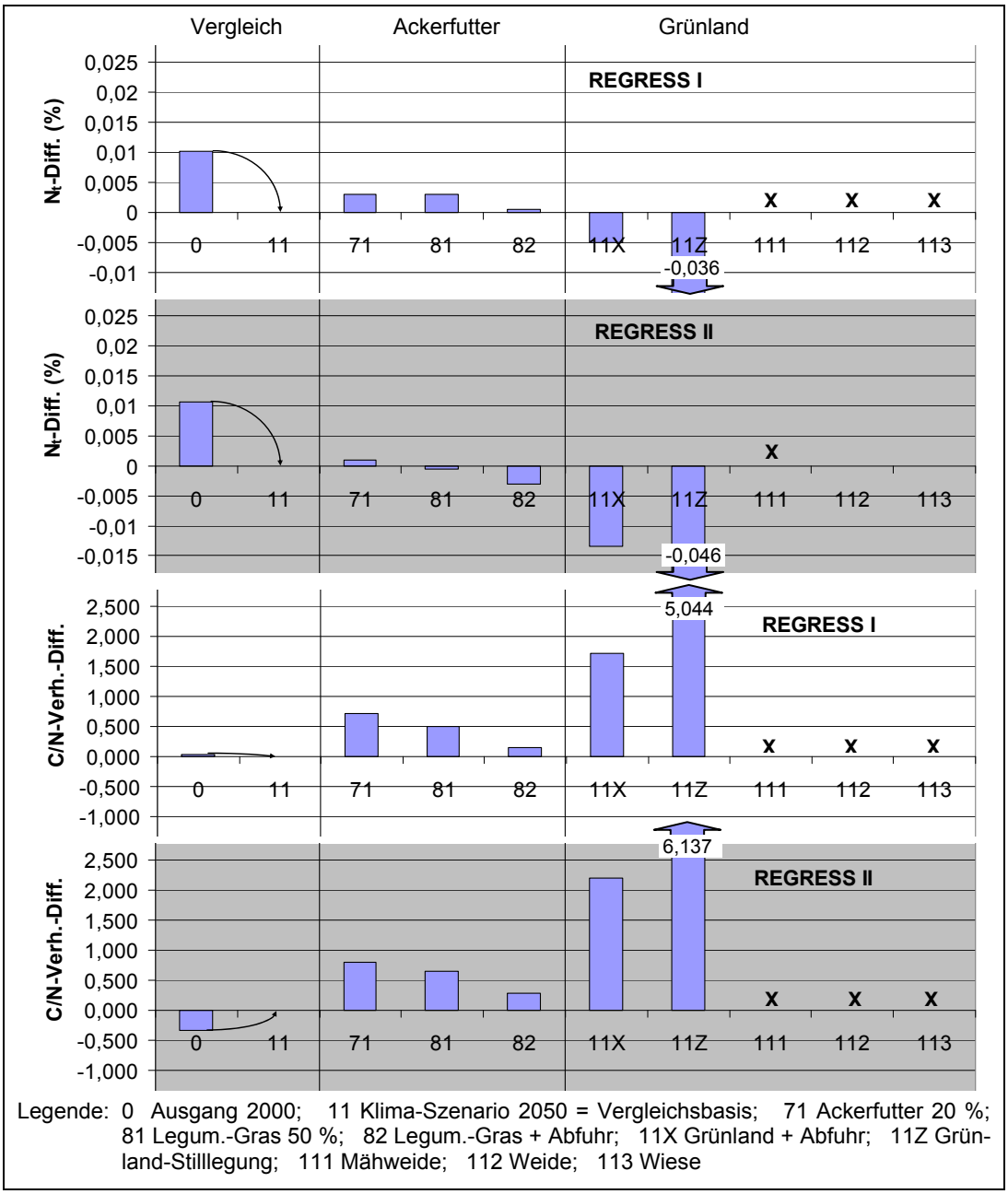


Abbildung 46: Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 11, 1991 – 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), für Mähweide (Var. 111), für Weide (Var. 112), für Wiese (Var. 113) für den Lö-Standort



Legende: 0 Ausgang 2000; 11 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 71 Ackerfutter 20 %; 81 Legum.-Gras 50 %; 82 Legum.-Gras + Abfuhr; 11X Grünland + Abfuhr; 11Z Grünland-Stilllegung; 111 Mähweide; 112 Weide; 113 Wiese

Abbildung 47: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ackerfutter und Grünland auf die zu erwartende Änderung der N_t-Gehalte und C/N-Verhältnisse des Bodens des Lö-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0)

3.3 V-Standort (Chemnitz)

3.3.1 Ergebnisse zur Spannweite der C_{org}- und N_t-Entwicklung der modellierten Szenarien

Nach den CANDY-Berechnungen wird am V-Standort ein enorm großer Handlungsspielraum durch landwirtschaftliche Aktivitäten insbesondere zur C_{org}-Anreicherung sichtbar (Abb. 48). Dagegen wird durch die prognostizierte Klimaänderung an diesem Vorgebirgsstandort offenbar kaum ein Einfluss auf die C_{org}-Werte des Bodens ausgehen (von ausgangs 2,12 % in Var. 11 im Jahr 2000 auf 2,11 % bzw. in Var. 12 auf 2,14 % C_{org} im Jahr 2050).

Nach diesen Ergebnissen liegt die Spannbreite der Handlungsmöglichkeiten für das CANDY-Modell bei 1,08 % C_{org}. Dieser hohe Wert wird von den anderen Verfahren bei weitem nicht erreicht (Abb. 49). Hiernach beträgt die Spannweite für das REGRESS-Verfahren 0,65 %, für das STAND-Verfahren 0,58 % und für das LUFA-Verfahren 0,69 % C_{org} (Mittelwert 0,64 % C_{org}). Auch die Entwicklung der C_{org}-Gehalte in Folge des postulierten Klimawandels wird von diesen Verfahren anders bewertet. Während das STAND-Verfahren, welches lediglich eine qualitative Bewertung erlaubt, bereits einen leichten Abfall ausweist, kommt das REGRESS-Verfahren insbesondere im extremeren PIK-Klimaszenario, zu einem deutlichen Abfall der C_{org}-Gehalte des Bodens auf diesem sandigen Lehm des Vorgebirges.

Nach den Vorgaben der beiden Klimaszenarien wird beim REGRESS-Verfahren ein Abfall von 0,43 % bzw. im extremeren Szenario um 0,86 % C_{org} im Zeitrahmen bis 2050 erwartet. Diese Veränderung erscheint zunächst als sehr übertrieben, doch folgende Zusammenhänge sind dabei zu bedenken. Wie aus Tabelle 2 entnommen werden kann, wird sich das Klima am V-Standort mit der Wetterstation Chemnitz im Jahr 2050 zumindest in den Durchschnittswerten der Temperatur und der Niederschlagsmenge weitgehend den klimatischen Bedingungen des Lö-Standortes um die Wetterstation Leipzig im Jahr 2000 anpassen. Im Durchschnitt beträgt die Temperatur in Leipzig im Jahr 2000 um 9,6 °C mit Niederschlägen um ca. 596 mm. Im Raum Chemnitz werden für das Jahr 2050 eine Temperatur um 9,7 °C und Niederschläge um 629 mm erwartet.

Da für beide Standorte weitgehend ähnliche Bodenverhältnisse zu Grunde gelegt werden (sandiger Lehm), liegt es nahe anzunehmen, dass sich die Humusgehalte entsprechend den zu erwartenden klimatischen Bedingungen ebenfalls anpassen werden. Diese Vermutung kann durch die REGRESS-Analysen auch bestätigt werden. Hiernach wird der heute im Raum Leipzig auf sandigem Lehm festgestellte durchschnittliche C_{org}-Gehalt von 1,38 % am Standort Chemnitz zwischen 1,69 % (LfUG-Szenario) und 1,26 % (PIK-Szenario) und als Mittelwert zwischen beiden Szenarien mit 1,48 % C_{org} in etwa erreicht.

Aus der nachfolgenden Abbildung 50 kann außerdem entnommen werden, dass die N_t-Werte ebenfalls bis zum Jahr 2050 in den Böden des V-Standortes abfallen werden. Nach diesen REGRESS-Berechnungen dürfte der Abfall aber nicht so stark sein, wie bei den C_{org}-Gehalten, so dass die C/N-Verhältnisse sich etwas verengen werden.

Aus diesen Analysen kann die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass auf Standorten mit Vorgebirgsklima (niedrige Temperaturen, relativ hohe Niederschläge) sich im Allgemeinen mit der Zeit vergleichsweise hohe Gehalte an Humus und hohe Werte an N_t einstellen. Diese Zusammenhänge sind auch schon seit langer Zeit bekannt und gut dokumentiert (JENNY 1980). Für die relativ hohen Gehalte ist in erster Linie die niedrigere Durchschnittstemperatur verantwortlich. Erhöhte Niederschläge tragen darüber hinaus ebenfalls zu einer Anhebung der Humusgehalte bei. Diese einzelnen Zusammenhänge können durch die statistischen Gleichungen des REGRESS-Verfahrens sehr gut wiedergegeben werden. Nach diesen Berechnungen erscheint es daher sehr plausibel, dass bei Erhöhung der Temperatur (und Abfall der Niederschläge) es dann zu einer stärker ausgeprägten Abnahme der C_{org}- und N_t-Werte des Bodens von Vorgebirgslagen kommt als in Gebieten, in denen bereits eine höhere Durchschnittstemperatur vorherrscht, da mit steigenden Temperaturen der Abfall im Humusgehalt und auch im N_t-Gehalt immer geringer wird. Neben der Freisetzung von erheblichen Kohlenstoffmengen, dürfte hierbei vor allem auch die Freisetzung an Stickstoff zu beachten sein. Es gilt daher zu klären, welchen Umfang diese Nährstofffreisetzung haben wird, welche Reaktionen darauf die Pflanzenernährung nehmen muss und welche Einflüsse auf Umweltbedingungen (Wasserschutz) zu erwarten sind.

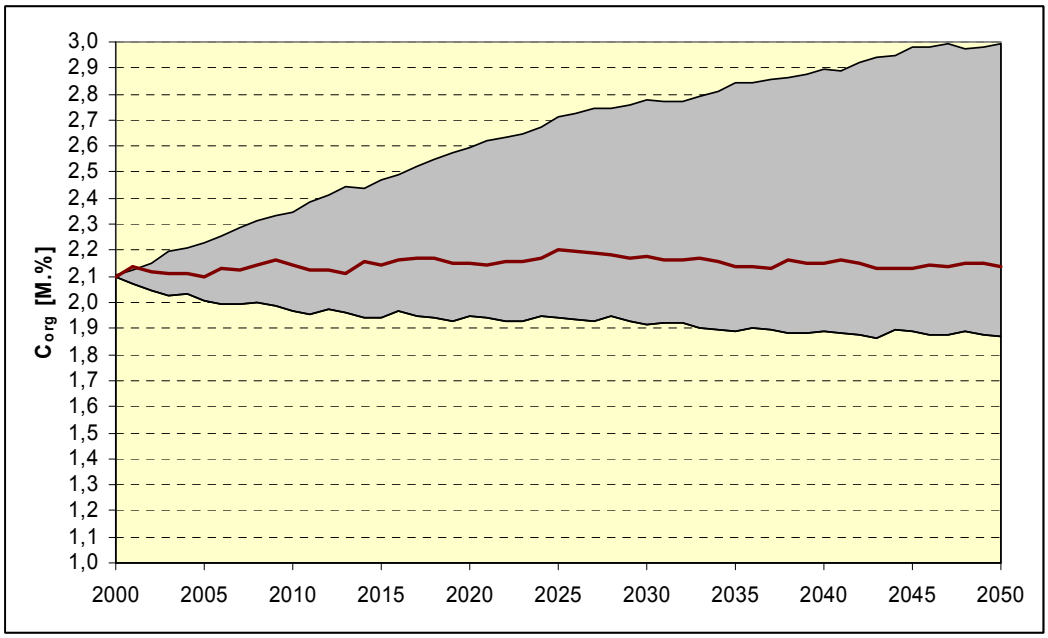


Abbildung 48: Spannweite der C_{org}-Entwicklung der modellierten Szenarien (2000 - 2050) für den V-Standort

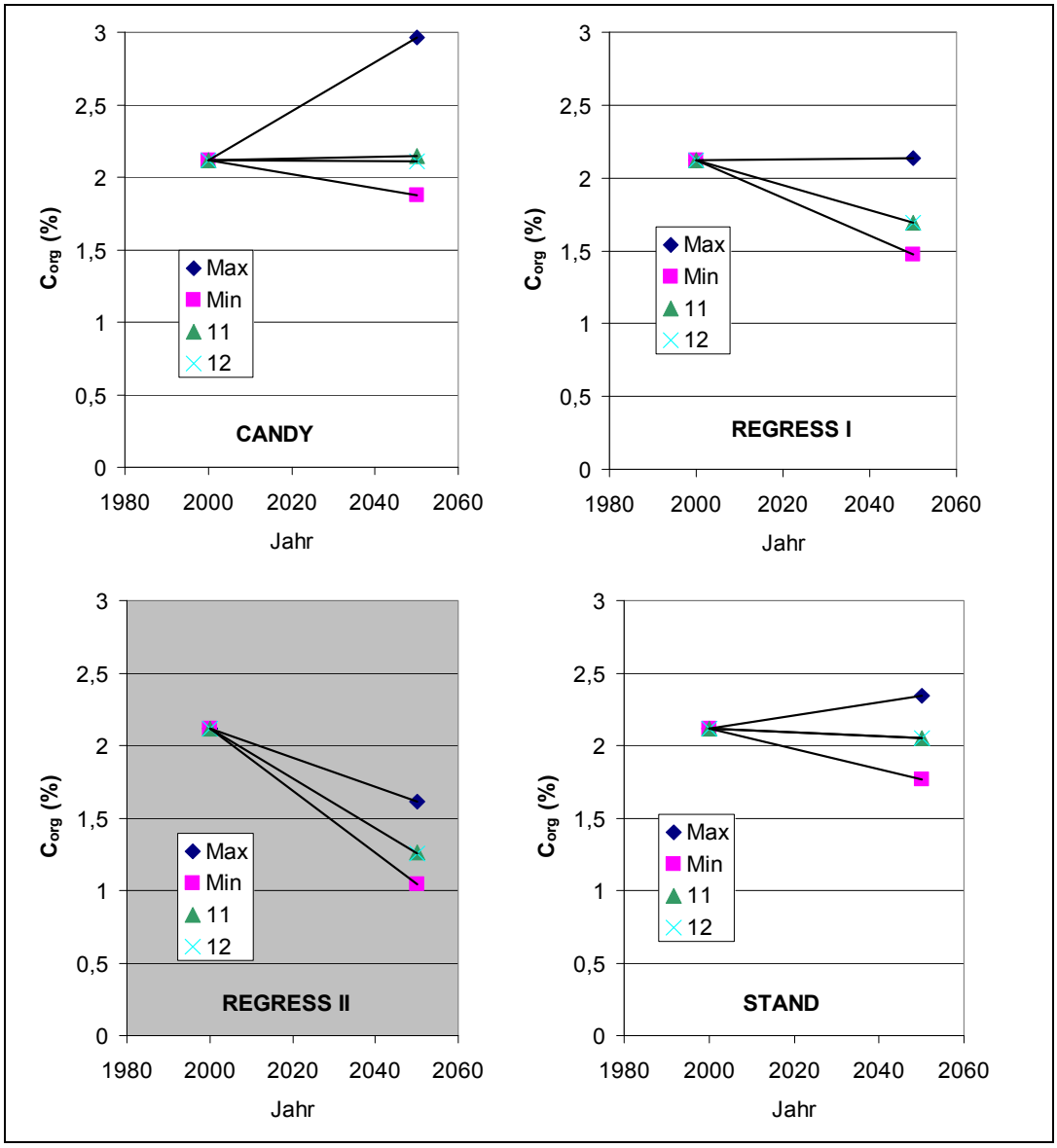


Abbildung 49: **Vergleich der Spannweite der C_{org}-Entwicklung der modellierten Szenarien im Zeitraum 2000 – 2050 mit den Modellen CANDY, REGRESS und STAND für den V-Standort**

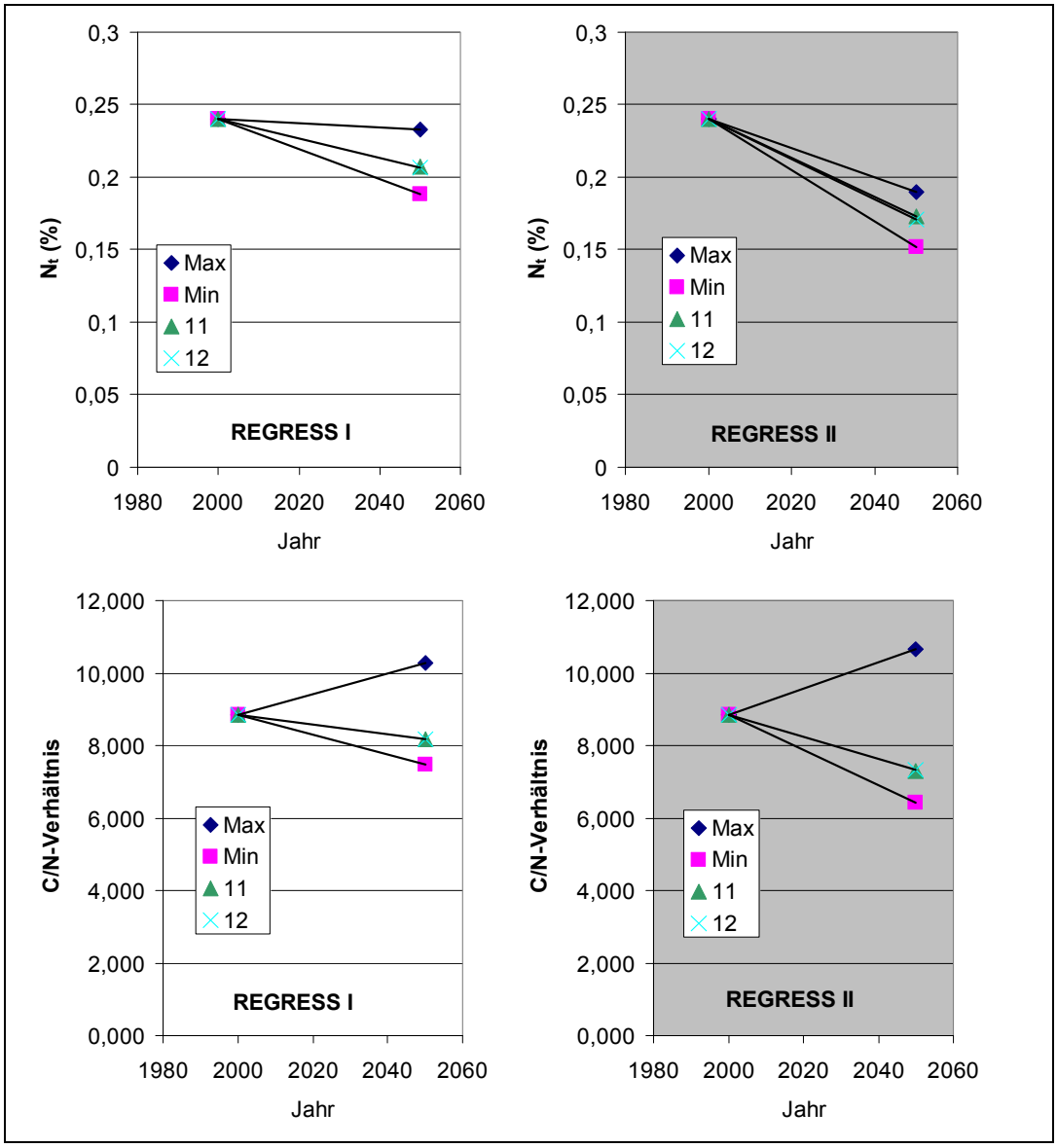


Abbildung 50: Vergleich der Spannweite der Entwicklung der N_t-Gehalte und der C/N-Verhältnisse der modellierten Szenarien im Zeitraum 2000 – 2050 mit dem Modell REGRESS I und II für den V-Standort

3.3.2 Szenarien der Ertragserhöhung und Umstellung auf Ökolandbau

Abbildung 51 zeigt den Verlauf der CANDY-Simulationen für den Einfluss der Umstellung auf Ökolandbau und für den Ertragsanstieg auf die Entwicklung der C_{org}-Gehalte des Bodens am Standort Chemnitz. Auf dem Niveau der Erträge um das Jahr 2000 wird der Einfluss einer Umstellung auf Ökolandbau von den Varianten 15 und 31 repräsentiert (Abb. 52). Wie an den beiden anderen Standorten ebenfalls hervortrat, werden zwischen der CANDY-Analyse und den anderen Verfahren divergierende Ergebnisse erzielt, die weitgehend auf die unterschiedliche Bewertung des Legumi-

nosengrasanbaus zurückgeführt werden kann. So ist in der Einheitsfruchtfolge dieser negative Einfluss (bzw. der positive Einfluss bei den anderen Verfahren) in der Öko-Variante 15 auf den geringeren Anteil an Leguminosen zurückzuführen: Hackfrucht(H)/Getreide(G)/**Leguminosengras(L)**-Verhältnis 17/50/**33** im Vergleich zu Variante 12 mit einem Verhältnis von 17/67/**16**. Dagegen wird in der Grundfruchtfolge durch das CANDY-Verfahren eine deutlich negativere Wirkung berechnet (und bei den anderen Verfahren ein deutlich positives Ergebnis erzielt), da die Öko-Var. 31 mit einem Verhältnis von 12,5/50/**37,5** (V-Standort sogar 0/62,5/**37,5**) im Vergleich zur Standard-Variante 11 mit einem Verhältnis von 12,5/75/**12,5** einen deutlich höheren Leguminosengras-Anteil aufweist.

Ohne Berücksichtigung des CANDY-Verfahrens (mit Berücksichtigung) wird ein Mittelwert von 0,035 % (0,020 %) C_{org} nach Umstellung auf Ökolandbau in Variante 12 ausgewiesen, was recht gut mit dem STAND-Ergebnis übereinstimmt. In Variante 31 hingegen wird ein mittleres Ergebnis von 0,080 % (0,037 %) C_{org} ermittelt, was dem LUFA-Ergebnis am nächsten kommt. Neben der Erzielung eines angemessen hohen Ertrages dürfte im Vergleich zu dem D- und Lö-Standort der Varianten des Ökolandbaus auch der höhere Leguminosengras-Anteil am V-Standort für die ermittelten deutlich positiven C_{org}-Werte des Bodens zurückzuführen sein. Auf der organischen Düngung und vor allem auf dem Leguminosen enthaltenden Futterbau beruht die günstige Wirkung auf die C_{org}-Entwicklung des Bodens. Zu den ungünstigen Aspekten zählt die relativ niedrige Ertragserwartung auf den leichten D-Standorten, die sich auch negativ auf die C_{org}-Entwicklung des Bodens auswirken kann.

Für den V-Standort wurde ein relativ hoher Ertragsanstieg von 75 % bis zum Jahr 2050 veranschlagt, weil es anzunehmen ist, dass diese Vorgebirgsstandorte durch den Klimawandel zunächst noch eine Gunstwirkung erfahren könnten. Einschränkend muss angemerkt werden, dass Auswirkungen auf veränderte HP/NP-Verhältnisse nicht untersucht worden sind. Der postulierte deutliche Ertragsanstieg kann durch alle Berechnungsverfahren recht gut abgebildet werden (Abb. 52). In der konventionellen Variante 13 wird ein mittlerer Anstieg des C_{org}-Gehaltes von 0,095 % berechnet, was dem CANDY- und REGRESS-Verfahren entspricht. In der ökologischen Variante 32 wird ein mittlerer C_{org}-Anstieg um 0,109 % erwartet. Dieses Ergebnis stimmt mit dem REGRESS-Wert gut überein.

Auch auf dem V-Standort führten die Umstellung auf Ökolandbau sowie die Varianten des Ertragsanstiegs zu einer Anhebung der N_t-Gehalte im Boden (Abb. 53). Insgesamt gesehen ist diese Anreicherung aber etwas geringer als die berechnete C_{org}-Entwicklung, sodass die C/N-Verhältnisse entweder gleich bleiben oder etwas weiter werden. Nach diesen REGRESS-Analysen kann der postulierte deutlich negative klimabedingte Einfluss auf die C_{org}- und N_t-Gehalte des Bodens auf dem V-Standort zu ¼ bzw. höchstens zu ½ durch Umstellung auf Ökolandbau bzw. durch den Ertragsanstieg aufgehalten werden.

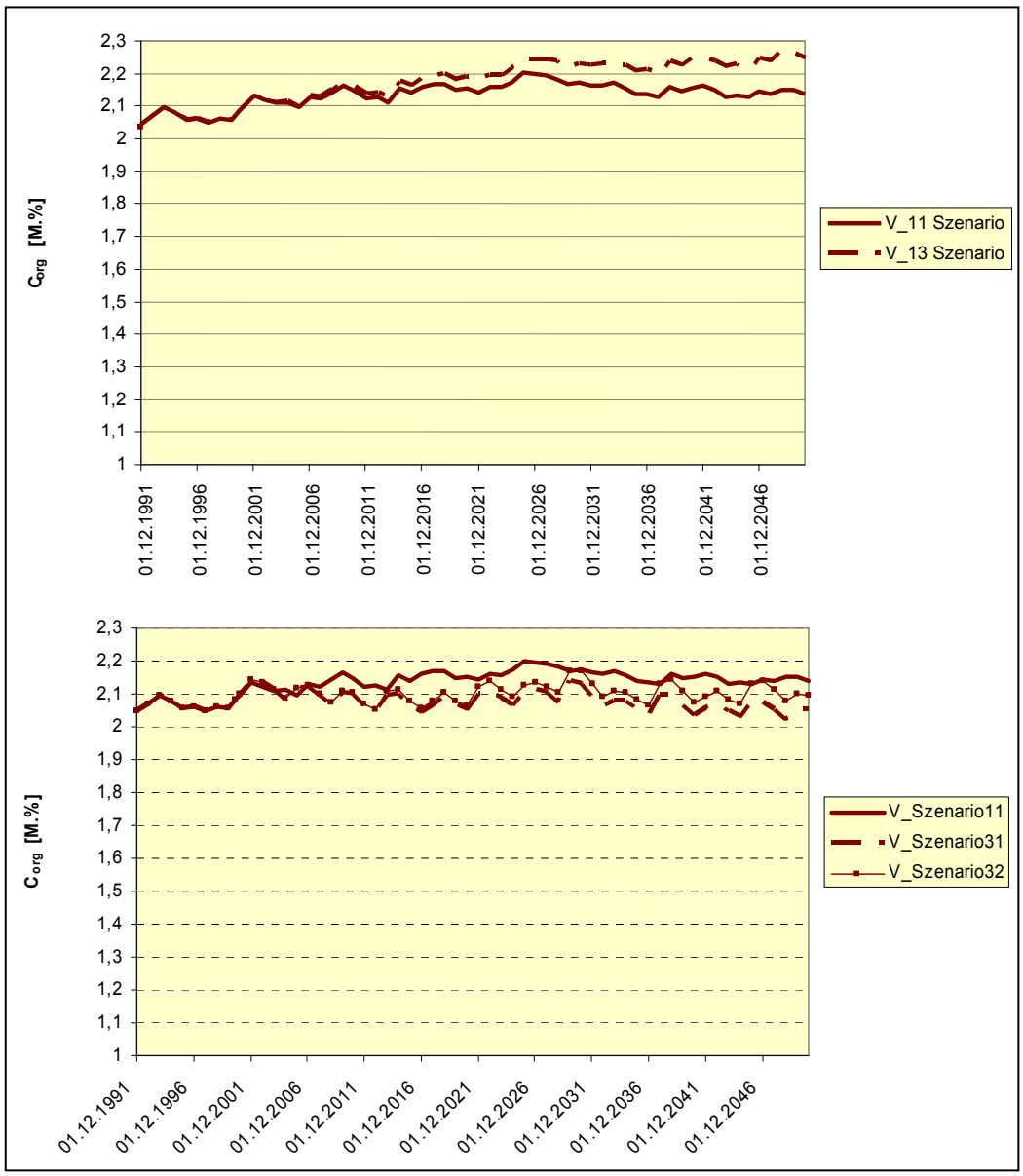


Abbildung 51: Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11) und die Grundfruchtfolge mit Ertragsanstieg (Var. 13, oben) sowie des ökologischen Landbaus (unten) für den V-Standort

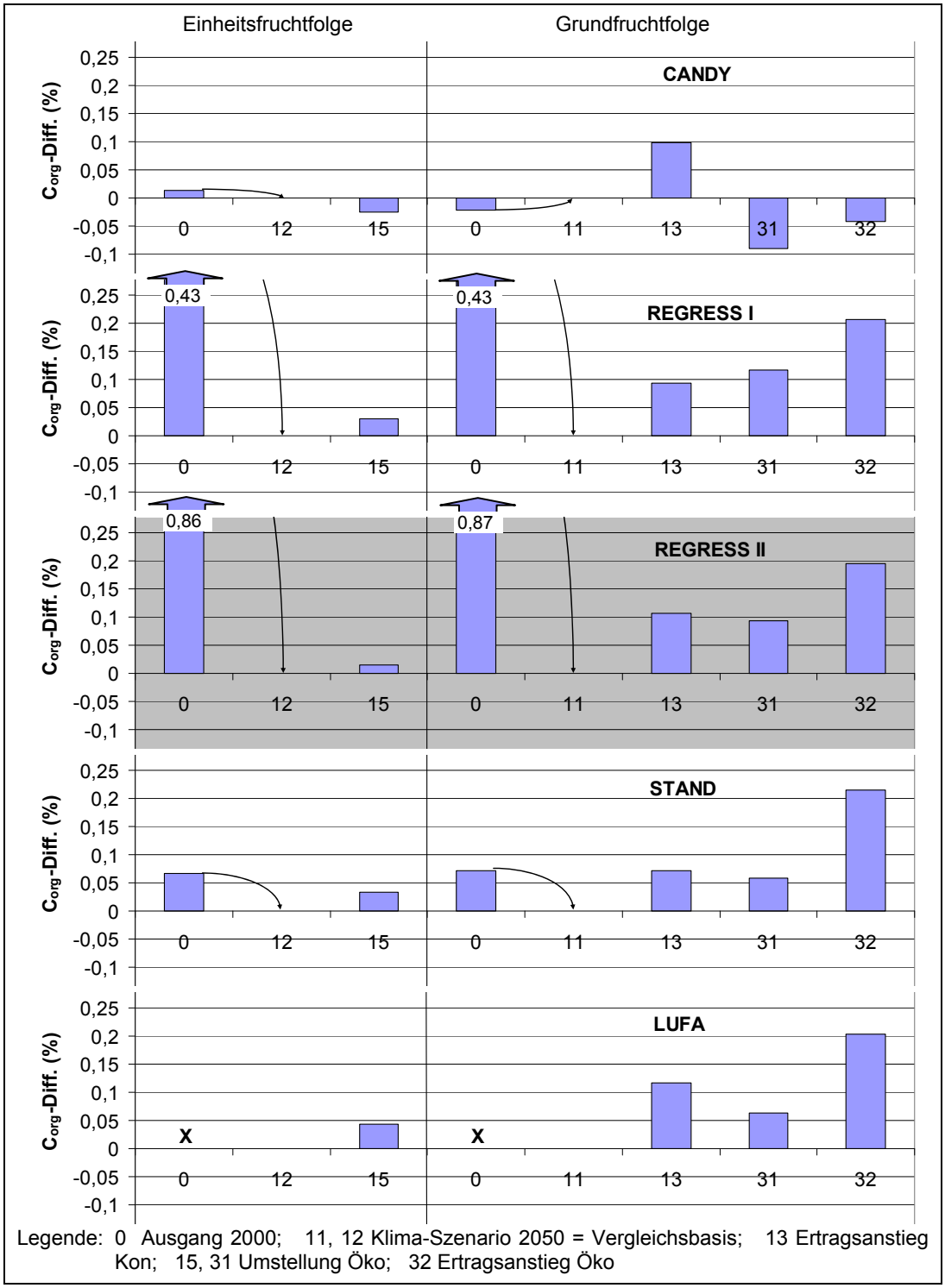
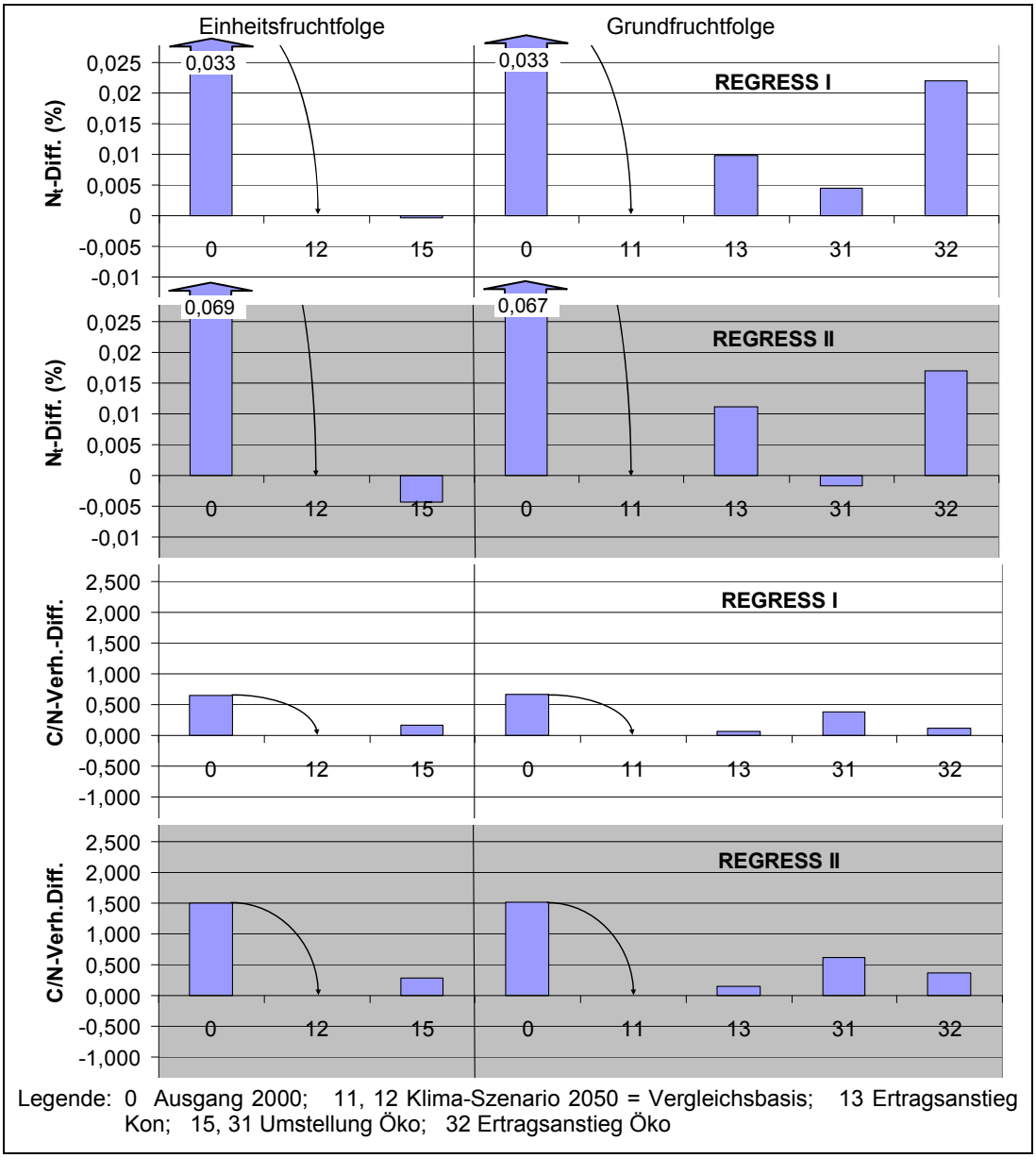


Abbildung 52: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ertragsanstieg sowie Umstellung auf Ökolandbau auf die zu erwartende Änderung der C_{org}-Gehalte des Bodens des V-Standortes bei einer Einheitsfruchtfolge (links) und einer Grundfruchtfolge (rechts)



Legende: 0 Ausgang 2000; 11, 12 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 13 Ertragsanstieg Kon; 15, 31 Umstellung Öko; 32 Ertragsanstieg Öko

Abbildung 53: Ergebnisse der REGRESS-Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ertragsanstieg sowie Umstellung auf Ökolandbau auf die zu erwartende Änderung der N_t-Gehalte und der C/N-Verhältnisse des Bodens des V-Standortes bei einer Einheitsfruchtfolge (links) und einer Grundfruchtfolge (rechts)

3.3.3 Szenarien zu Energiefruchtfolgen, viehlosen Marktfruchtbetrieben und viehreicher Veredlung

Die Ausdehnung des Silomaisanbaus inkl. Biogasgewinnung (Var. 41) hat auch auf dem V-Standort eine weitere Absenkung des C_{org}-Gehaltes zur Folge, wie in relativ guter Übereinstimmung mit allen Methoden ermittelt werden konnte (Abb. 54 u. Abb. 55). Auch die zusätzliche Abfuhr aller Koppelprodukte (Stroh) durch Var. 42 wird von allen Verfahren in hoher Übereinstimmung ermittelt. Das CANDY-Verfahren kann die ermittelten Mittelwerte von -0,165 % C_{org} in Var. 41 sowie von -0,264 % C_{org} in Var. 42 recht gut dokumentieren. Auch die STAND-Berechnungen kommen diesen Werten recht nahe. Durch diese Varianten, insbesondere aber bei Abfuhr der Koppelprodukte, würde nach den REGRESS-Analysen der negative klimabedingte Effekt noch um ½ überboten.

Da die C_{org}-Werte im Vergleich zu den N_t-Werten deutlicher abfallen, kann es auch auf dem V-Standort zu einer Verengung des C/N-Verhältnisses besonders nach zusätzlicher Strohabfuhr kommen (Abb. 56). Der Abfall der N_t-Werte ist darüber hinaus durch die Ausdehnung des Getreideanbaus auf 100 % der Fruchtfolge (Var. 51) noch deutlicher ausgeprägt. Dies hat aber keine Auswirkung auf die C/N-Verhältnisse des Bodens. Lediglich durch die zusätzliche Zufuhr von Kompost wird ein weitergestelltes C/N-Verhältnis berechnet. Die anderen Varianten der Marktfrucht und Tierhaltung haben keine großen Auswirkungen auf die Veränderung der N_t-Gehalte und die zu erwartenden C/N-Verhältnisse.

Die Ausdehnung des Getreideanbaus in Var. 51 zieht nach allen Berechnungsverfahren eine Abnahme der C_{org}-Werte des Bodens nach sich, die am deutlichsten im STAND- und REGRESS-Verfahren und am geringsten im CANDY-Verfahren ausgeprägt ist. Der Mittelwert von -0,101 % C_{org} wird am besten durch das LUFA-Verfahren repräsentiert. Die Ausdehnung des Hackfruchtanbaus auf 30 % der Fruchtfolge hat dagegen eine etwas uneinheitliche Wirkung auf die C_{org}-Werte zur Folge. Während das REGRESS-Verfahren zu einer geringeren Absenkung als in der Variante mit 100 % Getreideanbau kommt, ist der Abfall bei den anderen Verfahren stärker ausgeprägt. Die durchschnittliche Absenkung des C_{org}-Gehaltes des Bodens von 0,149 % wird am besten durch das STAND-Verfahren wiedergegeben.

Nach zusätzlicher Ausbringung von 100 dt Kompost je Hektar sind wiederum von allen Verfahren deutlich positive Wirkungen auf die Humusgehalte berechnet worden (Abb. 55 u. Abb. 57). Im Durchschnitt der Var. 52a (der Var. 53) wird eine Anhebung der C_{org}-Werte um 0,14 % (um 0,23 %) erwartet. Dies kann durch die REGRESS-Berechnung (CANDY-Berechnung) am besten repräsentiert werden. Eine zusätzliche Ausbringung von 170 kg N/ha in Form von Hühnertrockenkot bewirkt bei 100 % Getreideanbau (Var. 53) lediglich nach dem CANDY-Verfahren noch eine Anreicherung an C_{org} im Boden. Nach den anderen Verfahren wird gegenüber der Vergleichsvariante 11 kaum eine Wirkung festgestellt. Der Mittelwert von 0,034 % C_{org} kommt der LUFA- und REGRESS-Bewertung am nächsten.

Die Varianten 61 bis 64 stellen Verfahren mit intensiver Tierhaltung dar (Abb. 55 u. Abb. 58). Bei 2 GVE/ha Rindviehhaltung auf Güllebasis in Var. 61 (Biogasgülle in Var. 62) wird ein Abfall der C_{org}-Gehalte von durchschnittlich 0,09 % (0,132 %) ermittelt, der durch das REGRESS-Verfahren (STAND-, REGRESS-Verfahren) am besten repräsentiert werden kann. Alle Verfahren kommen zu einer relativ eindeutig negativen Bewertung.

Für das Stalldungsystem (Var. 63) wird demgegenüber lediglich im LUFA-Verfahren eine hiervon deutlich unterschiedliche positive Wirkung unterstellt, während alle anderen Verfahren zu einer relativ gleich hohen, geringfügig negativen Wirkung kommen. Im LUFA-Verfahren könnte wiederum auf Grund einer Überbewertung hoher Zufuhrmengen an organischer Substanz eine zu hohe Humuswirkung berechnet worden sein. Im Durchschnitt aller Verfahren (ohne LUFA-Verfahren) wird eine mittlere Wirkung von -0,005 % (-0,050 %) C_{org} ermittelt, was durch die CANDY-Analyse (REGRESS- u. STAND-Berechnung) am besten bestätigt werden konnte. Im Schweinehaltungsbetrieb (Var. 64) mit hohem Anteil an Körnerfrüchten (incl. Körnermais) hingegen kann offensichtlich durch eine Güllezufuhr in Höhe von 2 GVE/ha auch ein geringfügig positiver Humussaldo erreicht werden, der im Durchschnitt der Verfahren um 0,034 % C_{org} anzusiedeln ist und mit der STAND-Methode am besten fixiert werden konnte.

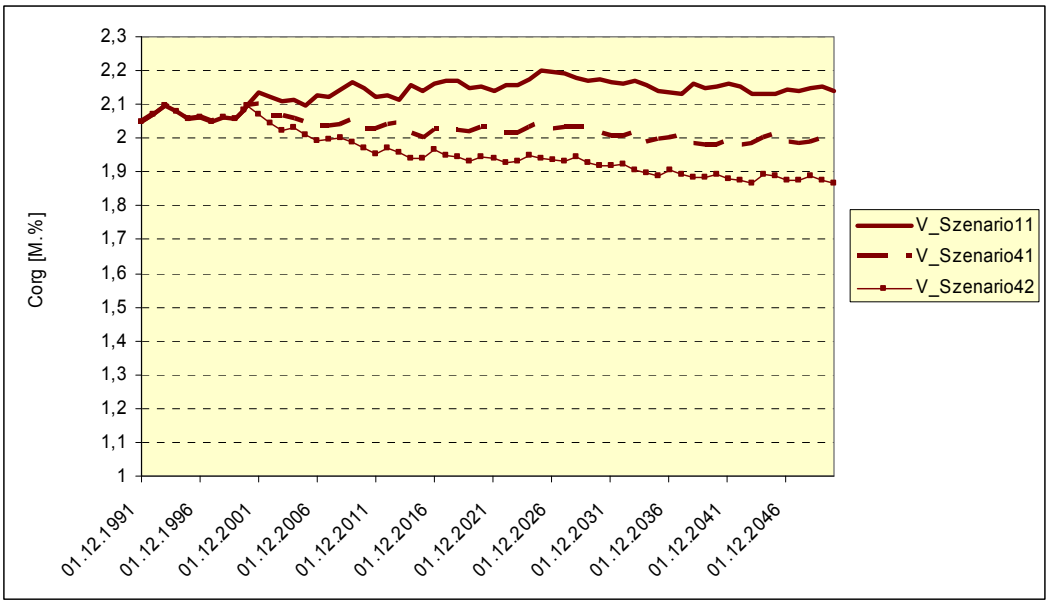
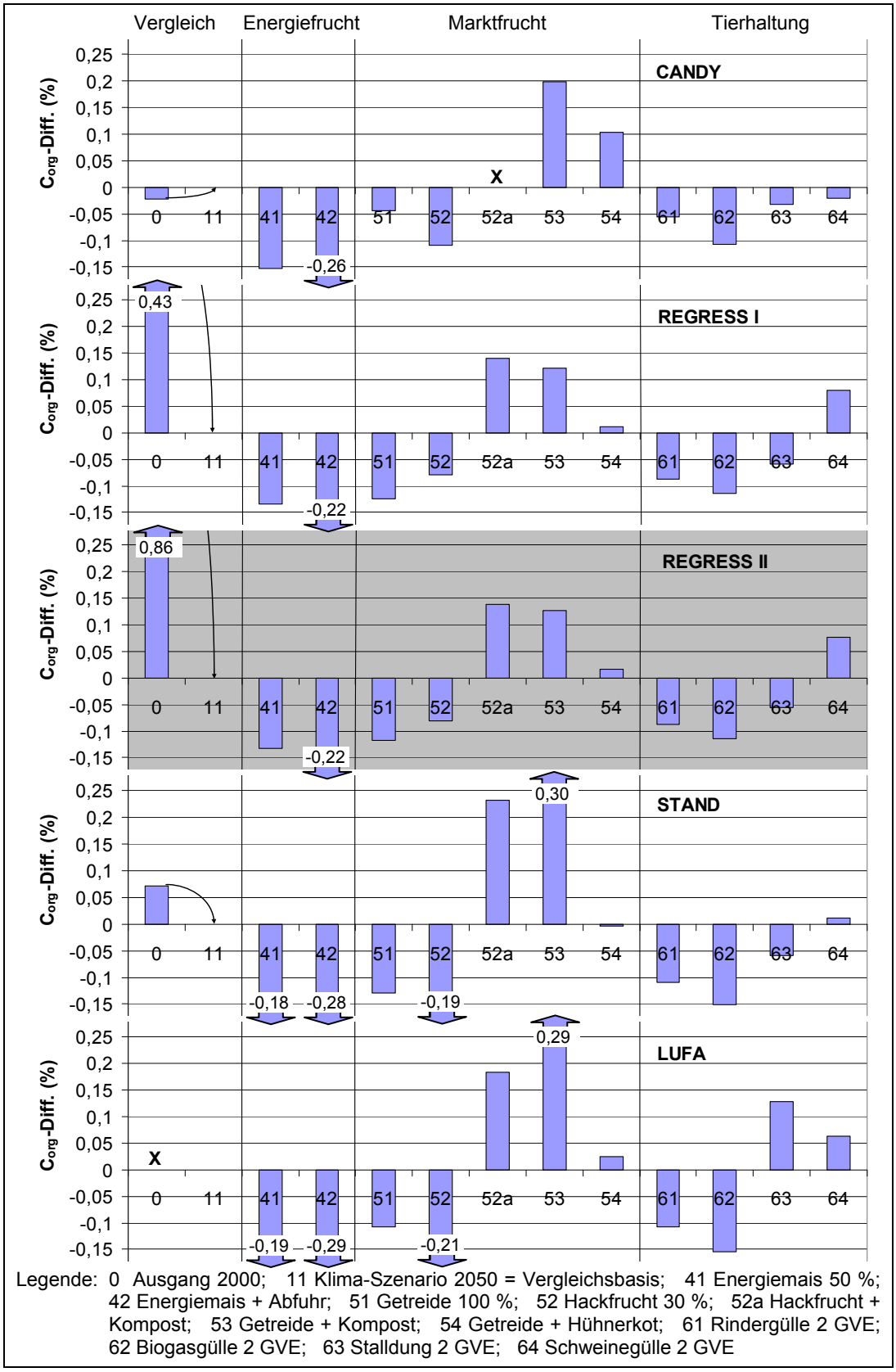
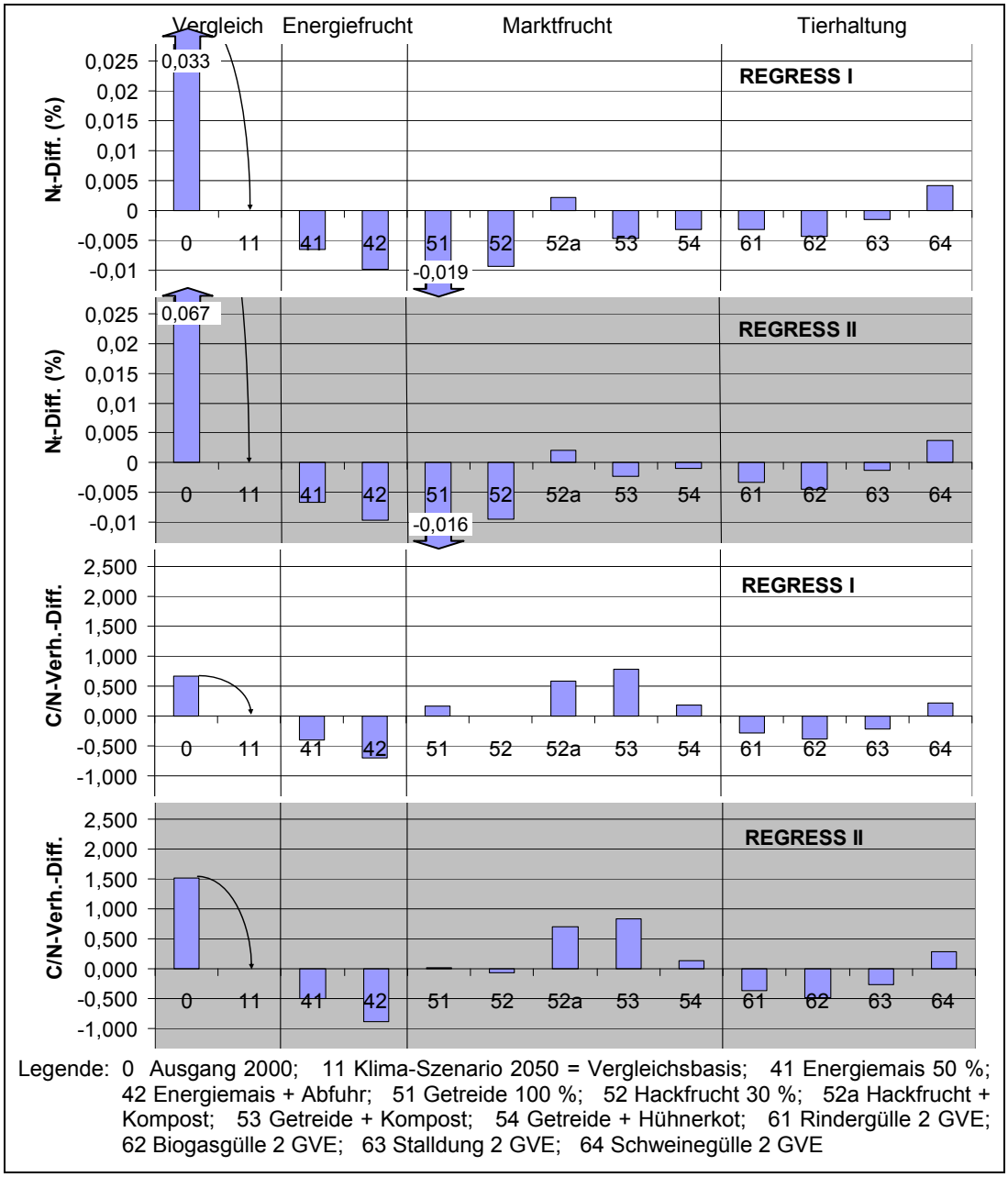


Abbildung 54: Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 4, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), die Grundfruchtfolge mit Ausdehnung des Anteiles Silomais (Var. 41), die Grundfruchtfolge mit Abfuhr sämtlicher Koppelprodukte (Var. 42) für den V-Standort



Legende: 0 Ausgang 2000; 11 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 41 Energiemais 50 %; 42 Energiemais + Abfuhr; 51 Getreide 100 %; 52 Hackfrucht 30 %; 52a Hackfrucht + Kompost; 53 Getreide + Kompost; 54 Getreide + Hühnerkot; 61 Rindergülle 2 GVE; 62 Biogasgülle 2 GVE; 63 Stalldung 2 GVE; 64 Schweinegülle 2 GVE

Abbildung 55: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Energiefruchtfolgen, Marktfrucht und tierischer Veredlung auf die zu erwartende Änderung der C_{org}-Gehalte des Bodens des V-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0 % C_{org})



Legende: 0 Ausgang 2000; 11 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 41 Energiemais 50 %; 42 Energiemais + Abfuhr; 51 Getreide 100 %; 52 Hackfrucht 30 %; 52a Hackfrucht + Kompost; 53 Getreide + Kompost; 54 Getreide + Hühnerkot; 61 Rindergülle 2 GVE; 62 Biogasgülle 2 GVE; 63 Stalldung 2 GVE; 64 Schweinegülle 2 GVE

Abbildung 56: Ergebnisse der REGRESS-Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Energiefruchtfolgen, Marktfrucht und tierischer Veredlung auf die zu erwartende Änderung der N_t-Gehalte und der C/N-Verhältnisse des Bodens des V-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0)

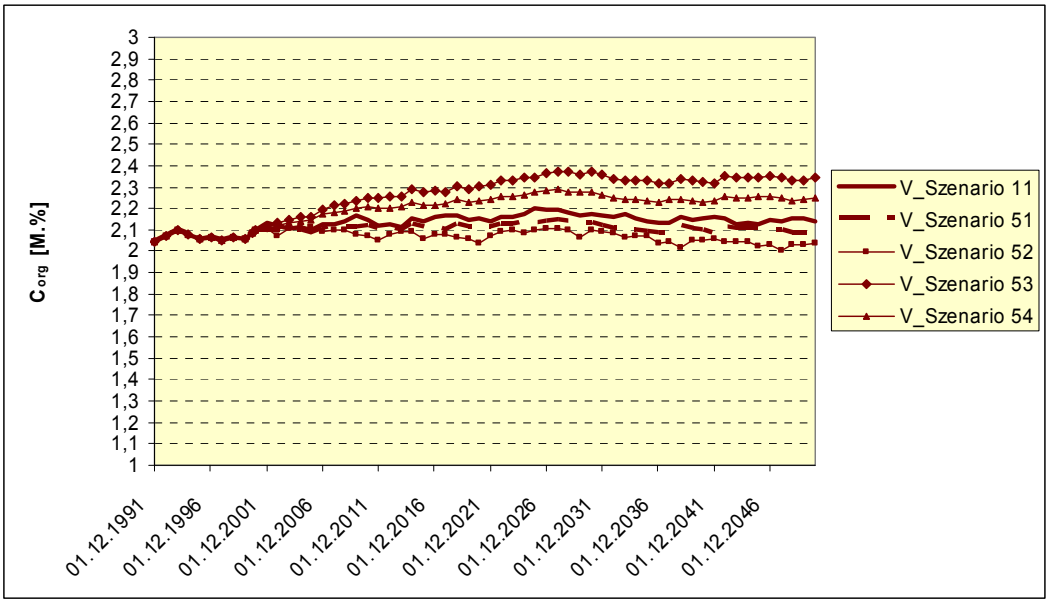


Abbildung 57: **Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 5, 1991 – 2050) für die Grundfruchtfolge (Var.. 11), Fruchtfolge mit 100 % Getreideanteil (Var. 51), Fruchtfolge mit 30 % Hackfruchtanteil (Var. 52), Fruchtfolge mit 100 % Getreideanteil + 100 dt ha^{-1} a^{-1} Kompost (Var. 53), Fruchtfolge mit 100 % Getreideanteil + 170 kg ha^{-1} a^{-1} Hühnertrockenkot (Var. 54) für den V-Standort**

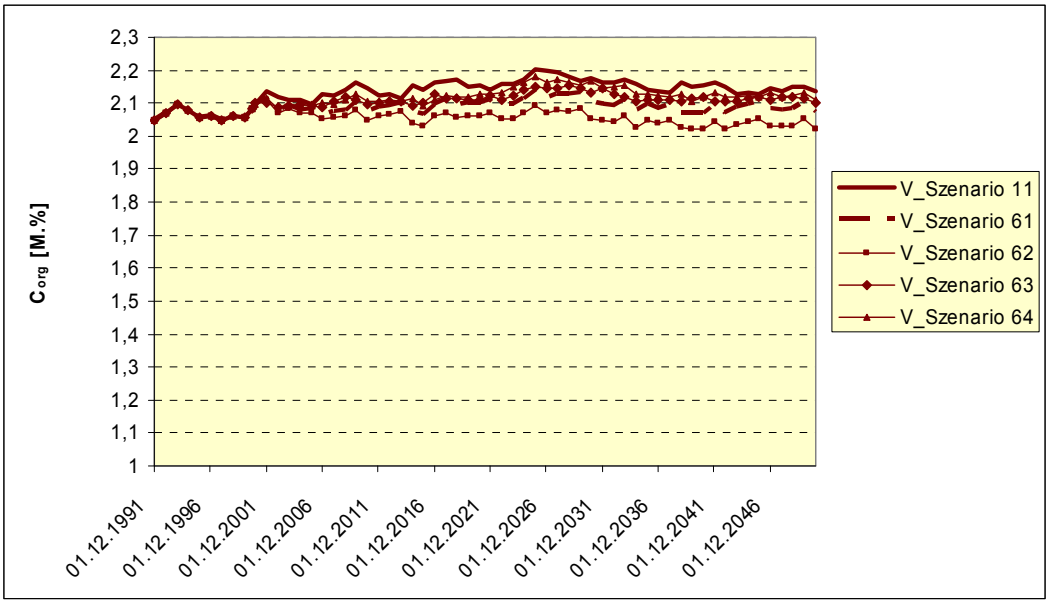


Abbildung 58: Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 6, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Rind) mit Gülleausbringung (Var. 61), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Rind) mit Gülleausbringung nach Biogaserzeugung (Var. 62), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Rind) mit Stallmistausbringung (Var. 63), Fruchtfolge eines Veredlungsbetriebes (Schwein) mit Gülleausbringung (Var. 64) für den V-Standort

3.3.4 Szenarien zu Ackerfutter und Grünland

Bei den Ackerfuttervarianten 71 – 82 werden wieder im Vergleich zu den anderen Verfahren die völlig entgegengesetzten Ergebnisse der CANDY-Analysen sichtbar (vgl. Abb. 59 u. Abb. 60). Eine Ausdehnung des Leguminosengrasanbaus auf 20 % der Fruchtfolge (Var. 71) bewirkt im Durchschnitt der drei anderen Bewertungsverfahren (aller Verfahren) einen Anstieg um 0,092 % (um 0,068 %) C_{org} im Boden des V-Standortes. Diese Werte stimmen am besten mit dem LUFA-Verfahren (STAND-Verfahren) überein.

Eine weitere Ausdehnung des Ackerfutters auf 50 % der Fruchtfolge incl. Ersatz der N-Mineraldüngung (Var. 81) kommt zu dem Ergebnis, dass der durchschnittliche Anstieg der C_{org}-Werte bei 0,121 % (0,075 %) liegt, was am besten durch das STAND-Verfahren (LUFA-Methode) gewährleistet werden kann. Werden ausgehend von dieser Variante alle Koppelprodukte abgefahren (Var. 82), so werden durch alle Verfahren geringere Werte erzielt. Im Durchschnitt der REGRESS-, STAND- und LUFA-Verfahren wird eine geringe Anreicherung von 0,026 % C_{org} ermittelt, die am besten durch die Methode STAND repräsentiert werden kann. Im Durchschnitt aller Verfahren wird hingegen ein geringfügig negativer Wert von -0,03 % festgestellt, der mit dem LUFA-Verfahren gut übereinstimmt.

Die Ausweitung des Ackerfutteranteils in der Fruchtfolge sowie auch eine Umstellung auf Dauergrünlandsysteme geht in der Regel zugleich mit einer Anhebung der N_t-Werte im Boden einher, wie den REGRESS-Analysen entnommen werden kann (Abb. 61). Da die N_t-Anreicherung aber im Verhältnis zur Anhebung der C_{org}-Werte geringer ausfällt, wird das C/N-Verhältnis etwas weiter, was offenbar im Grünlandverfahren ohne Aufwuchsabfuhr (Dauerstilllegung) besonders ausgeprägt ist. Insgesamt kann der durch den veranschlagten Klimawandel verursachte deutliche Abfall im N_t-Gehalt des Bodens durch Ausweitung des Ackerfutteranbaus um bis zu ⅓ aufgehalten werden. Bei Umstellung auf Grünlandbewirtschaftung kann dieser Abfall um bis zu ⅔ aufgehalten werden, allerdings offenbar nur dann, wenn der Aufwuchs abgeerntet wird. Wird der Aufwuchs nicht abgefahren, so verbleibt eine deutlich höhere Menge an Stickstoff (und anderen Nährstoffen) auf der Fläche.

Aus den Abbildungen 60 und 62 geht hervor, dass bei allen simulierten Grünlandvarianten es zu einem sehr starken Anstieg der C_{org}-Werte kommen wird. Dieser Anstieg ist mit 0,61 % C_{org} besonders im CANDY-Verfahren ausgeprägt und kann im REGRESS-Verfahren durchaus den klimabedingten Abfall völlig wieder aufheben. Im Durchschnitt der Verfahren beträgt der Anstieg um 0,38 % C_{org} und liegt nahe den Werten, die durch das REGRESS-Verfahren ermittelt worden sind. Da aber die Berechnungsbasis bei den meisten Verfahren nicht abgesichert erscheinen (sie gelten außer für das CANDY-Modell nur für Ackerland), ist eine sichere Fixierung nicht möglich.

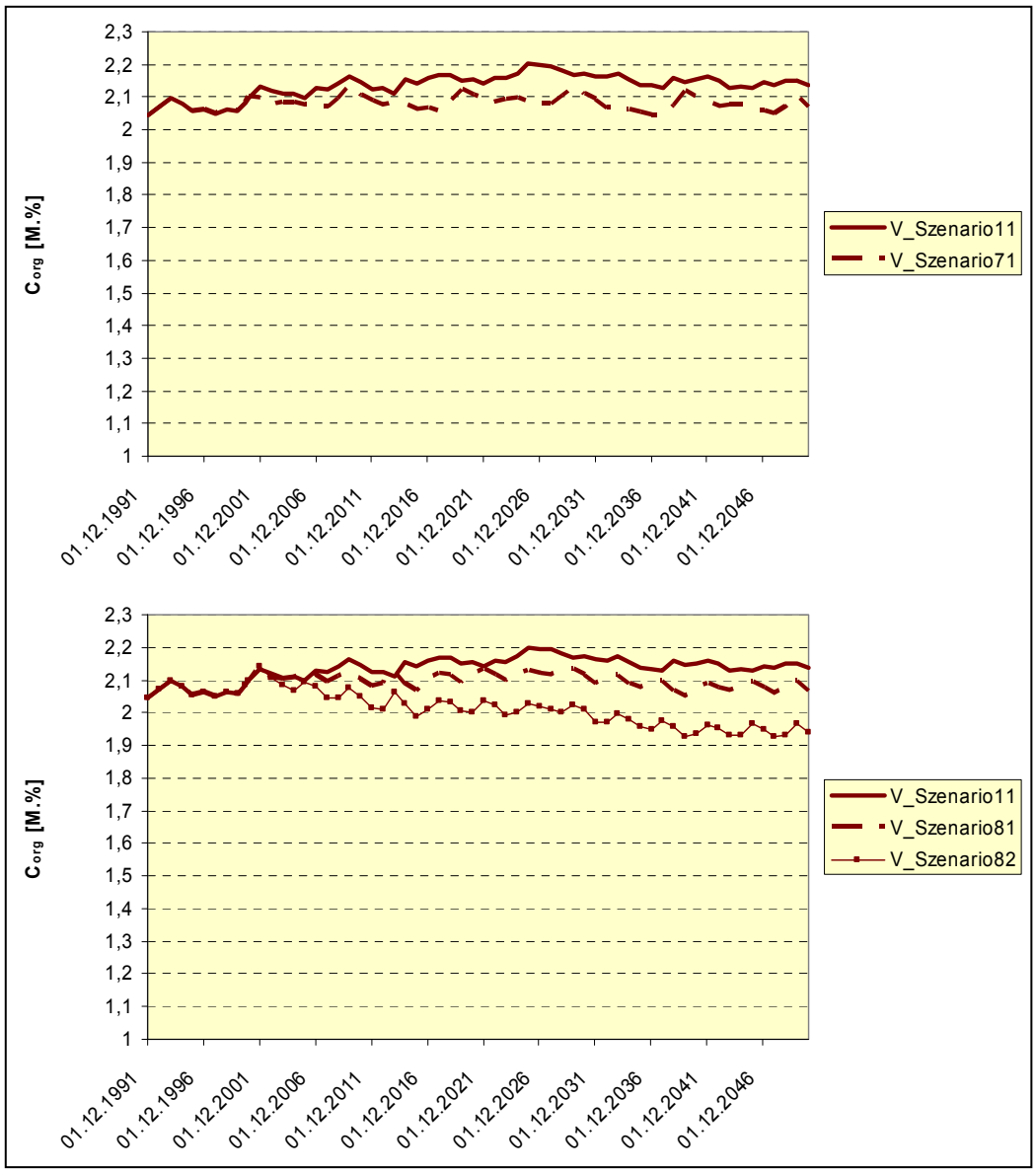
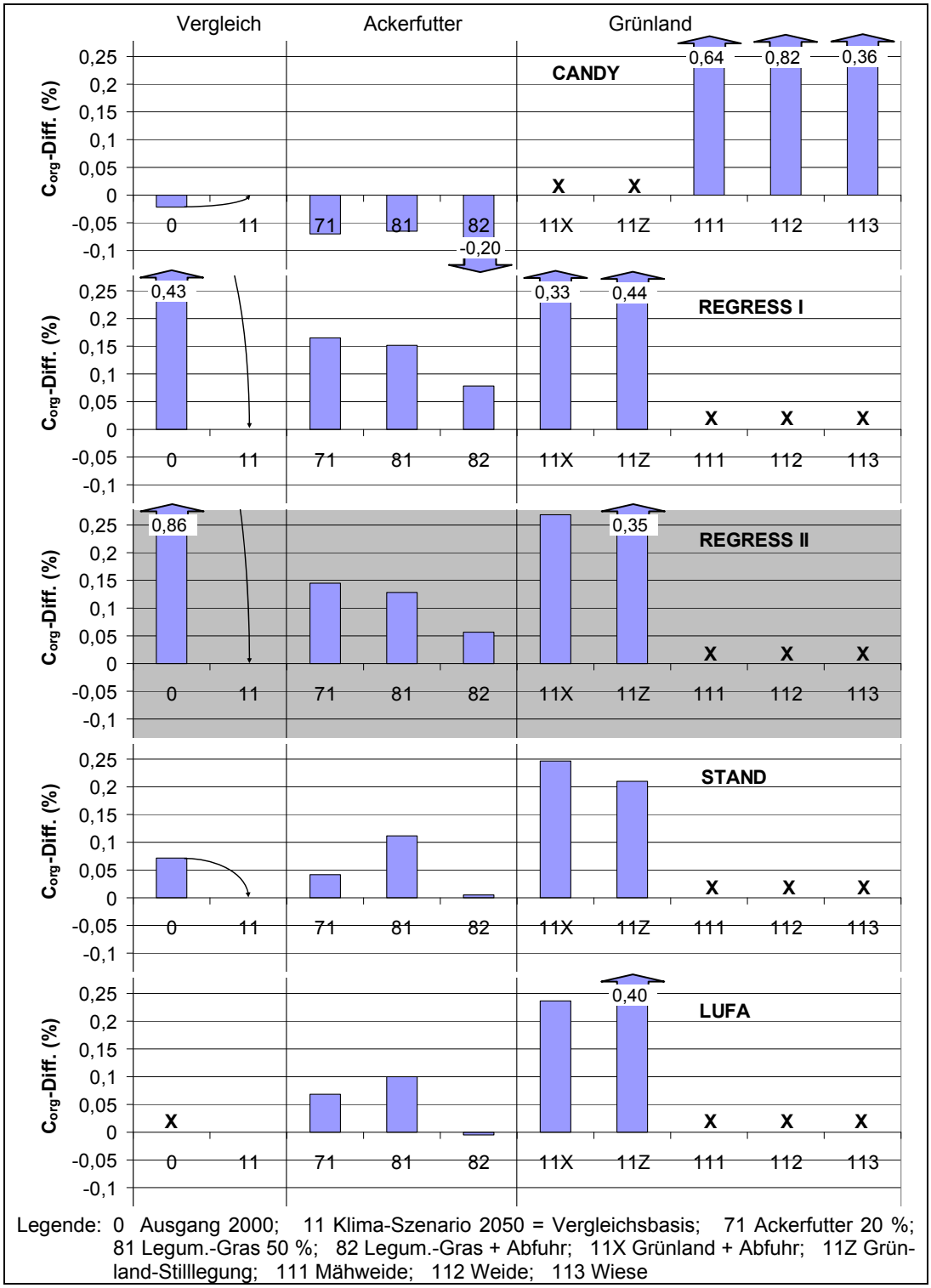
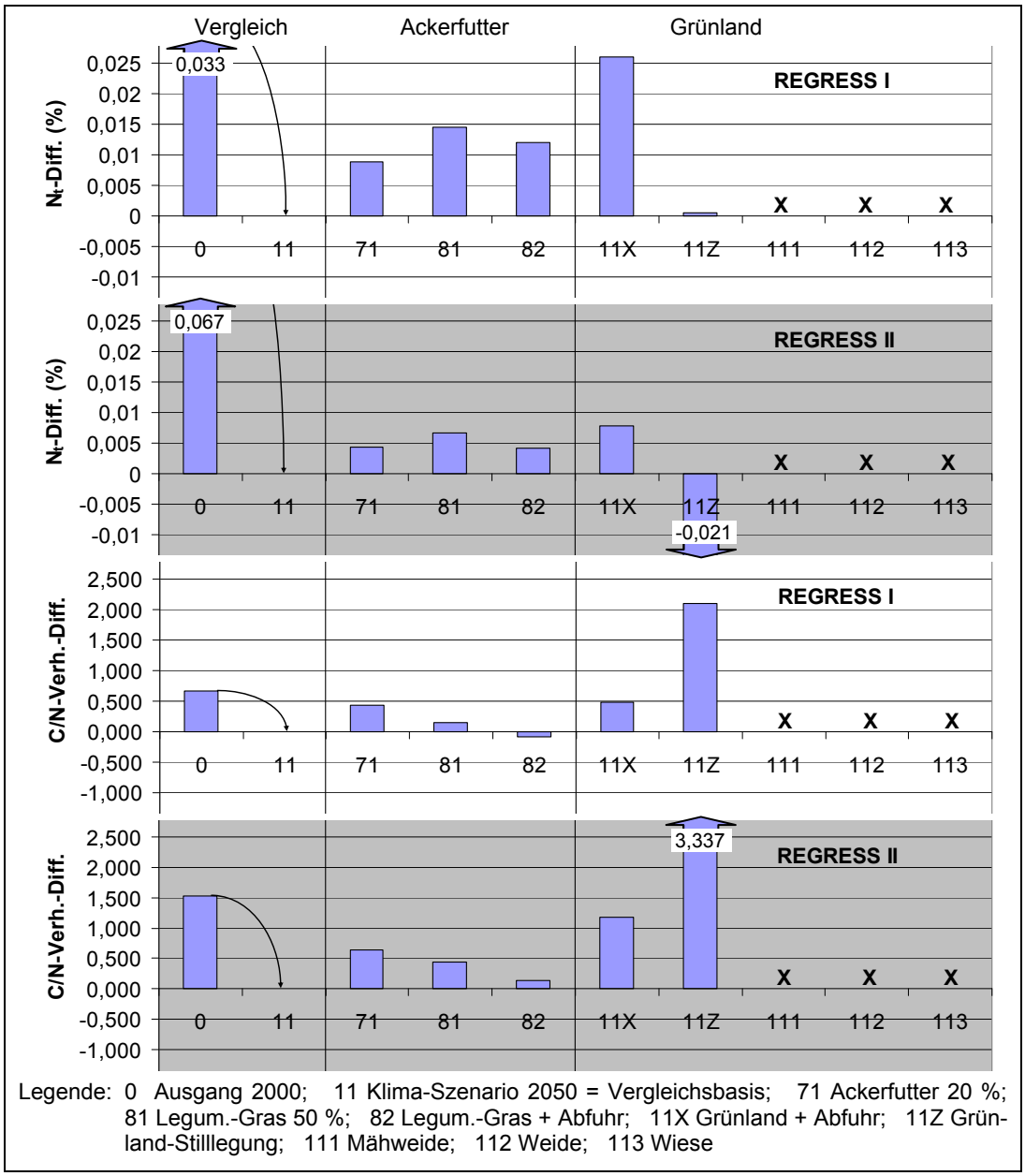


Abbildung 59: **Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 8, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), die Grundfruchtfolge mit 20 % Ackerfutter (Var. 71, oben), mit 50 % Kleegras (Var. 81) sowie mit 50 % Kleegras bei Abfuhr aller Koppelprodukte (Var. 82, unten) für den V-Standort**



Legende: 0 Ausgang 2000; 11 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 71 Ackerfutter 20 %; 81 Legum.-Gras 50 %; 82 Legum.-Gras + Abfuhr; 11X Grünland + Abfuhr; 11Z Grünland-Stilllegung; 111 Mähweide; 112 Weide; 113 Wiese

Abbildung 60: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ackerfutter und Grünland auf die zu erwartende Änderung der C_{org}-Gehalte des Bodens des V-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0 % C_{org})



Legende: 0 Ausgang 2000; 11 Klima-Szenario 2050 = Vergleichsbasis; 71 Ackerfutter 20 %; 81 Legum.-Gras 50 %; 82 Legum.-Gras + Abfuhr; 11X Grünland + Abfuhr; 11Z Grünland-Stilllegung; 111 Mähweide; 112 Weide; 113 Wiese

Abbildung 61: Ergebnisse der Modellberechnungen zum Szenarienkomplex Ackerfutter und Grünland auf die zu erwartende Änderung der N_t-Gehalte und C/N-Verhältnisse des Bodens des V-Standortes im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11 = 0)

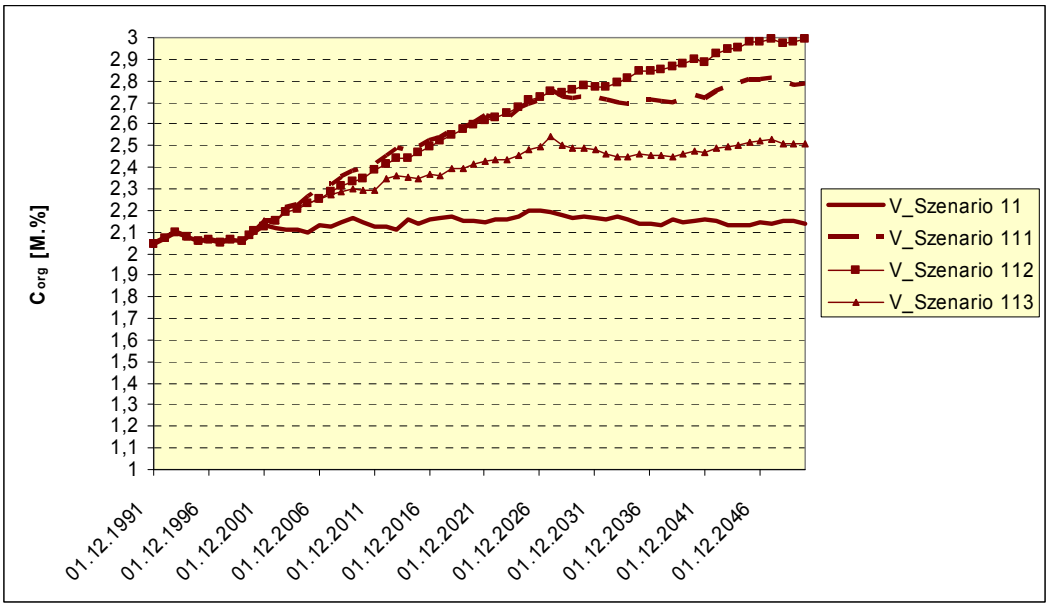


Abbildung 62: Modellergebnisse (Szenarienkomplex 1, 11, 1991 - 2050) für die Grundfruchtfolge (Var. 11), für Mähweide (Var. 111), für Weide (Var. 112), für Wiese (Var. 113) für den V-Standort

4 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse im Durchschnitt der Standorte

4.1 Klimaszenarien und Bewirtschaftungsalternativen

Auf der Basis der Variante 11 bzw. 12 (= Vergleichsbasis 0,0 % C_{org} bzw. N_t) wurden die Bewirtschaftungsalternativen der Rangfolge entsprechend angeordnet und dem postulierten Einfluss des LfUG-Klimaszenarios gegenübergestellt (Tab. A9 u. Tab. 24, Abb. 63). Da die CANDY-Berechnungen zur Klimaänderung teilweise widersprüchliche und für den V-Standort kaum realistische Werte lieferten, wurden die REGRESS-Analysen als Vergleichsmaßstab abgebildet. Danach kommt es zu einer durchschnittlichen Abnahme der C_{org}-Gehalte von 0,23 % (D = 0,17 %, Lö = 0,09 %, V = 0,43 %) durch den Klimawandel in Sachsen. Auch durch andere Untersuchungen kann dieser negative Trend für viele Regionen der Erde bestätigt werden (JONES et al. 2005; SMITH et al. 2005; 2007a, 2007c). Besonders alter Kohlenstoff unterliegt auf Grund hoher Temperatur-Sensibilität einem verstärkten Abbau (VANHALA et al. 2007). Steigende Temperaturen haben einen umso deutlicheren C_{org}-Abbau zur Folge, je niedriger die ausgehenden Temperaturen waren (KIRSCHBAUM 1995; FISSORE et al. 2008).

Wie aus Tabelle 24 zu entnehmen ist, werden bereits die Ausgangsbedingungen der Varianten 11 und 12 in der Versorgung mit organischer Substanz mit der STAND-Methode der Humusgruppe D zugeordnet. Damit befinden beide Varianten sich in einem recht guten Versorgungszustand. Im Vergleich zu einer aktuellen Untersuchung an Dauertestflächen in Sachsen repräsentiert die Gruppe D in etwa 34 % der untersuchten Flächen (SEIBT 2007). Danach ist in Sachsen folgende Verteilung des Versorgungszustandes mit der Methode STAND ermittelt worden: A = 8 %, B = 11 %, C =

35 %, D = 34 %, E = 12 %. Der mittlere Abstand zwischen konventionellen und ökologischen Flächen beträgt je nach verwendeter Methode zwischen 40 HÄQ und 120 HÄQ/ha und beträgt in den hier vorgestellten Ergebnissen 59 HÄQ bzw. 122 HÄQ/ha.

Tabelle 24: **Rangfolge der Ergebnisse der Humusbilanzierung der Bewirtschaftungsvarianten auf den drei Standorten (Humusäquivalente in kg C/ha u. Jahr) ermittelt mit der standortangepassten Methode (STAND)**

Variante		D-Standort	Lö-Standort	V-Standort	Mittelwert	Humusgruppe[1)]
Energiemais+Abfuhr	42	-175,1	-206,5	-219,5	-200	A
Hackfrucht 30 %	52	-79,9	-70,8	-64,3	-72	C
Energiemais 50 %	41	-7,6	12,1	-41,4	-12	C
Biogasgülle 2 GVE	62	55,8	50,9	9,8	39	C
Getreide 100 %	51	87,6	86,2	48,6	74	C
Rindergülle 2 GVE	61	128,1	123,2	82,1	111	D
Einheitsfruchtfolge	**12**	**217**	**159**	**159**	**178**	**D**
Grundfruchtfolge	**11**	**144,0**	**132**	**276**	**184**	**D**
Stalldung 2 GVE	63	228,6	172,6	172,0	191	D
Umstellung Öko	15	276,9	217,2	217,2	237	C/E
Getreide+Hühnerkot	54	308,0	308,3	268,9	295	E
Ertragsanstieg Kon	13	196,9	292,4	401,2	297	E
Schweinegülle 2 GVE	64	286,8	310,1	295,4	297	E
Legum.-Gras+Abfuhr	82	337,9	283,6	283,1	302	E/C
Umstellung Öko	31	235,7	303,0	378,3	306	C/E
Ackerfutter 20 %	71	318,6	331,2	350,1	333	E/C
Ertragsanstieg Öko	32/31	295,6	396,5	656,8	450	D/E
Legum.-Gras 50 %	81	510,7	497,0	471,7	493	E/D
Grünland-Stilllegung	11Z	681,8	646,8	648,0	659	-
Hackfrucht+Kompost	52a	671,2	680,3	686,8	679	E
Grünland+Abfuhr	11X	761,1	712,1	711,5	728	-
Getreide+Kompost	53	836,9	837,3	797,9	824	E

[1)] Bewertung nach VDLUFA-Standpunkt zur Humusbilanzierung (KÖRSCHENS et al. 2004), Öko-Varianten (rot) nach KOLBE (2007b)

Zwischen der Rangfolge der Ergebnisse der Humusbilanzierung (Tab. 24) und der berechneten C_{org}-Entwicklung (Abb. 63) besteht im Allgemeinen eine relativ gute Überreinstimmung. Im Vergleich zur Variante 11, die eine Grundfruchtfolge darstellt, deren Zusammensetzung in etwa dem Ist-Zustand im Jahr 2000 entspricht, können Bewirtschaftungsvarianten mit unterschiedlicher Wirkung abgeleitet werden. Zunächst sind Varianten zu erkennen, deren Wirkung durch einen weiteren Abfall der C_{org}-Gehalte des Bodens charakterisiert wird. Hierunter befinden sich Varianten mit 50 % Maisanbau bei Rückführung des Gärsubstrates, aber Abfuhr aller Koppelprodukte (Stroh) zur Energiegewinnung (Var. 42). Unter diesen Verhältnissen ist mit einem z. T. deutlichen Absinken der C_{org}-Werte zu rechnen (vgl. KÄTTERER et al. 2004). Entsprechend der Ergebnisse der Humusbilanzierung (Tab. 24) wird diese Variante der Humusgruppe A zugeordnet. Auf dieser Variante wäre dann keine ordnungsgemäße Bewirtschaftung mehr möglich, da ein standort- und bewirtschaftungstypischer Humusgehalt nicht mehr eingehalten werden könnte. Auch von SMITH et al. (2007a) werden das Abernten aller Aufwüchse und der Übergang von der Festmist- zur Flüssigmistwirtschaft als Ursachen für einen C_{org}-Abbau im Boden genannt.

Im Vergleich zu den heutigen relativ günstigen Bedingungen der Variante 11 würden auch Varianten mit intensivem Hackfruchtbau (Var. 41), intensiver Rinderhaltung bei Güllezufuhr (Var. 62, 61) und selbst noch ein 100%iger Getreideanbau (Var. 51) zwar zu einer leichten Absenkung der C_{org}-Werte führen. Diese Varianten werden allerdings bereits der Humusgruppe C zugeordnet und entsprechen einer optimalen Versorgung. Einer tendenziell positiven Wirkung kommt hiernach der intensiven Rindviehhaltung bei Stalldungzufuhr zu (Var. 63). Diese Varianten werden bereits der Humusgruppe D zugeordnet und zeigen auch nach dem Bewertungsschlüssel dann den Beginn von Humusversorgungsgraden an, ab denen eine Zunahme der Bodengehalte zu erwarten ist. Der positive Einfluss des Stalldungs auf die C_{org}-Gehalte des Bodens ist durch Versuchsergebnisse sehr gut dokumentiert (KÖRSCHENS & EICH 1990; ANON. 1995; HOLEPLASS et al. 2004).

Es schließen sich Bewirtschaftungsvarianten an, bei denen entweder Leguminosengras in die Fruchtfolge eingegliedert wird oder bei denen eine hohe organische Düngung mit Schweinegülle oder Hühnerkot erfolgt. Auch nach Modellberechnungen von SMITH et al. (2007b) führt eine Abnahme an Hackfrüchten und eine Zunahme des Anteils an Ackergras in den Fruchtfolgen zu einem Anstieg der C-Sequestrierung. Diese Varianten weisen einen durchschnittlichen Anstieg der C_{org}-Werte bis 0,1 % auf und zeigen nach dem Ergebnis der Humusbilanzierung bereits einen Übergang zur Humusgruppe E auf. Bei dieser Versorgungsgruppe kommt es im konventionellen Landbau unter Beibehaltung der mineralischen N-Düngung durch hohe N-Salden bereits zu Problemen im Wasserschutz (vgl. LfUG 2008). Hierzu könnten in Zukunft ebenfalls Varianten zählen, bei denen ein relativ hohes Maß an Ertragsanstieg (durch agrotechnischen und genetischen Fortschritt sowie durch die CO_2-Düngewirkung) veranschlagt wurde. Über steigende Ernte- und Wurzelrückstände kommt es dann zu höheren C_{org}-Werten im Boden (KÄTTERER et al. 2004; JASTROW et al. 2005; LOBELL & FIELD 2008). Einschränkend sollte hinzugefügt werden, dass der Züchtungsfortschritt im Wesentlichen durch eine Veränderung der Harvest-Indices zugunsten des Kornertrages und zu

ungunsten des Stroh- und Stoppelanteils verwirklicht worden ist (EWERT et al. 2005). In bestimmten Regionen mit leichten Böden (D-Standorte) könnte dieser Ertragsanstieg nicht mehr ausgeschöpft werden, ohne dass es auf dem Gebiet des Wasserschutzes zu Problemen kommt.

Zu diesen Varianten mit einem moderaten Anstieg an Humus im Bereich bis 0,1 % C_{org} sind auch die Anbauverfahren des Ökolandbaus (Var. 31, 32) einzugliedern. Da bei diesen Anbausystemen auf eine mineralische N-Düngung verzichtet wird, können sie höhere Humussalden aufweisen als im konventionellen Landbau. Daher können in extensiven Verfahren ohne N-Mineraldüngung die Ergebnisse der Humusbilanzierung einem speziellen Bewertungsschema unterzogen werden, so dass Anbauvarianten des ökologischen Landbaus dann lediglich eine Einstufung in die Gruppen C - D erreichen. Die anderen konventionellen Varianten lassen sich nur realisieren, wenn gleichzeitig die N-Mineraldüngung deutlich reduziert wird, wie das bei den Var. 71 und Var. 81 bereits vorgesehen ist. Daher können dann auch diese konventionellen Bewirtschaftungsvarianten noch in die Humusgruppen C und D eingestuft werden, d.h. sie würden dann noch zur „guten fachlichen Praxis“ zu zählen sein.

Auch die anderen aufgeführten Varianten mit deutlicher Zunahme der C_{org}-Gehalte durch hohe jährliche Kompostzufuhr (Var. 52a u. 53) sind wahrscheinlich nur noch bei reduzierter N-Mineraldüngung praktizierbar. Bewirtschaftungsvarianten mit intensiver Kompostwirtschaft führen zu einer Anreicherung zwischen 0,2 – 0,3 % C_{org} und können sowohl nach konventionellen, als auch nach ökologischen Anbaugrundsätzen geführt werden (siehe auch ANON. 1995; DIEZ & KRAUSS 1997; LTZ 2008). Nach den REGRESS-Analysen weisen diese Varianten einen Anstieg der Humusgehalte auf, der dann sicher über den veranschlagten klimatisch bedingten Humusabbau hinausgehen wird. Hiermit ist dann auch das Ende ackerbaulicher Möglichkeiten zur C-Anreicherung gegeben. Eine weitere Anhebung ist nur noch mit einer Umstellung auf verschiedene Varianten der Dauergrünlandnutzung möglich. Für diese Grünlandstandorte gibt es keine Humusversorgungsgruppen. Bei Umnutzung von Ackerland zu Grünland und Forst kann die C-Sequestrierungswirkung erheblich ansteigen (POST & KWON 2000).

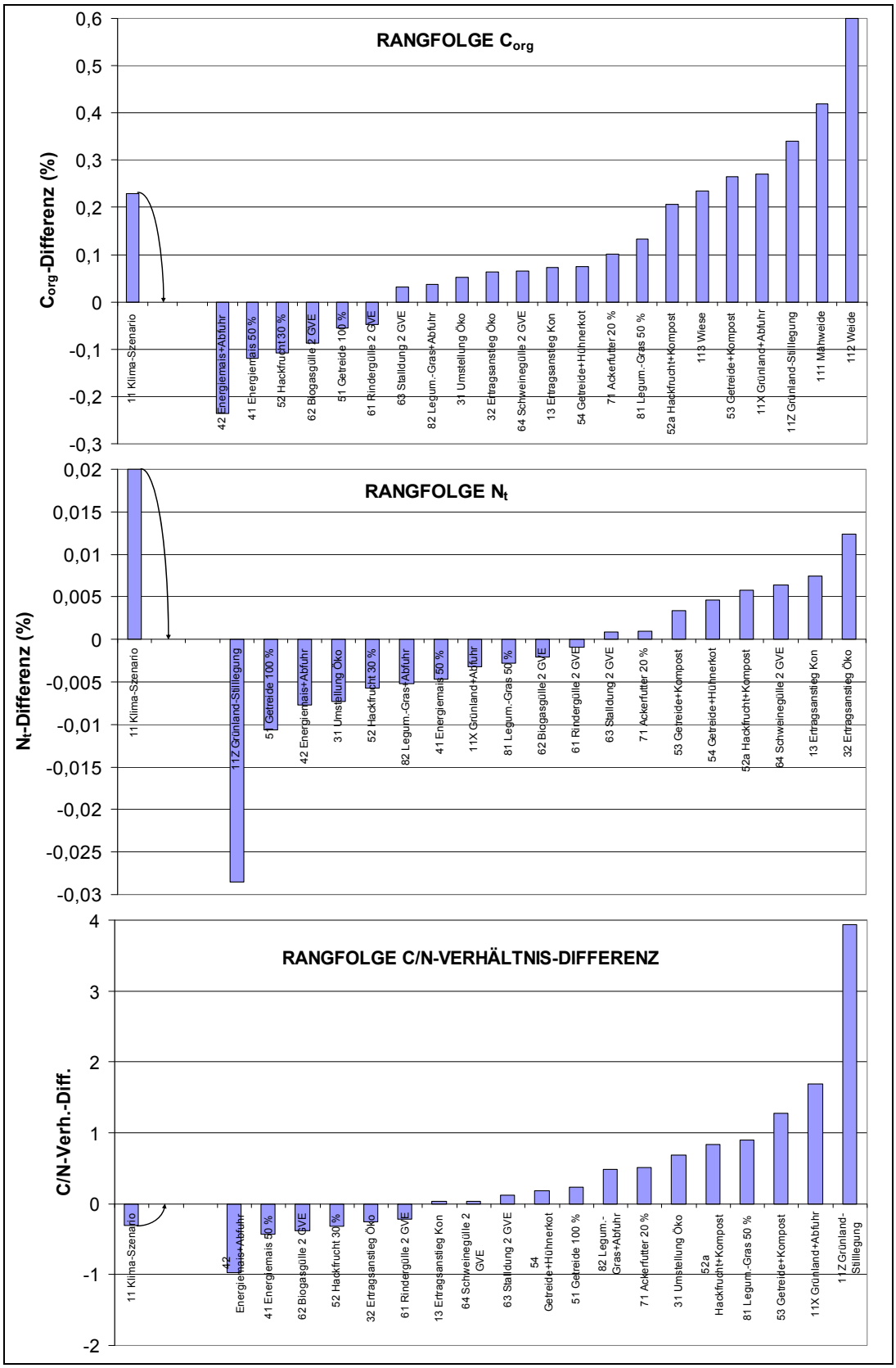


Abbildung 63: Rangfolge der mittleren Ergebnisse der Verfahrensberechnungen zum Einfluss der Bewirtschaftungsvarianten auf die C_{org}-, N_t- und C/N-Verhältnis-Entwicklung im Vergleich zur Grundfruchtfolge 11 (Tabellenwerte siehe Anhang Tab. A9)

Der Einfluss des Klimawandels ist auf das C/N-Verhältnis des Bodens relativ gering ausgeprägt (Abb. 63). Die Bewirtschaftungsvarianten haben aber demgegenüber einen deutlichen Einfluss, wobei in der Rangfolge besonders in den Extrempositionen eine hohe Übereinstimmung mit der C_{org}-Entwicklung zu erkennen ist. Bei Varianten mit relativ geringer Kohlenstoffzufuhr und gleichzeitig relativ hoher N-Versorgung wird eine Verengung und bei umgekehrten Verhältnissen wird eine z.T. deutliche Erweiterung der C/N-Verhältnisse des Bodens eintreten. So ist bei den postulierten Varianten mit Kompostdüngung und Umstellung auf Dauergrünland mit einer deutlichen Erweiterung der C/N-Verhältnisse zu rechnen, bis sich Zahlenwerte einstellen, die auch auf Grünland üblich sind (siehe DIEPOLDER et al., 2006). Selbst die CO_2-Düngewirkung kann im Boden zu einem erhöhten C_{org}-Umsatz führen und so das C/N-Verhältnis beeinflussen (PERALTA & WANDER 2008). Daher sollte in Zukunft die Untersuchung der C_{org}- und N_t-Dynamik im Boden eine höhere Bedeutung erhalten (vgl. FISSORE et al. 2008).

4.2 Bodenbearbeitung (Lö-Standort)

Der Einfluss von Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung wurde an Fruchtfolgen mit Kleegrasanbau untersucht (Var. 91, 92, 101, 102, vgl. Kap. 2.2.3.1). Hierbei wurden die Verfahren Grubber und Direktsaat mit dem Verfahren Pflug unter Zugrundelegung der Ertragsniveaus bei Pflug und bei dem entsprechenden reduzierten Verfahren veranschlagt (Abb. 64 u. 65).

Im Vergleich zum Pflugeinsatz wird durch stetige Anwendung des Grubbers sowie der Direktsaat eine Umschichtung der Humusgehalte im Tiefenprofil bewirkt. Mit Grubber und Direktsaat erfolgt eine z.T. deutliche Anreicherung von Humus in der Schicht 0 – 10 cm Bodentiefe. In den darunter liegenden 20 cm Tiefe wird dagegen in unterschiedlichem Ausmaß eine Abreicherung an Humus bewirkt, während bei Pflugarbeit diese Schichtung unterbleibt und sich ein mittleres Niveau an Humus im Profil einstellt.

Im Durchschnitt des gesamten Profils (0 – 30 cm Tiefe) sind demgegenüber zwischen den drei Verfahren kaum Unterschiede zu erkennen. Im Vergleich zum Pflug kommt es nach dem Einsatz des Grubbers nach diesen mit dem CANDY-Verfahren ermittelten Berechnungen zu einer geringen Abnahme der Humusgehalte von 0,029 % C_{org} im Durchschnitt der Varianten 92 und 102, nach Direktsaat beträgt die Abnahme rechnerisch sogar nur noch 0,014 % C_{org} im Durchschnitt der Varianten 91 und 101.

In den Abbildungen wurden die Szenarienläufe jeweils mit dem Ertragsniveau des Pfluges (100 %) sowie mit dem jeweils festgelegten geringeren Ertragsniveau der reduzierten Verfahren durchgeführt. Hierdurch kann der Ertragseffekt auf die Humusentwicklung herausgerechnet werden. Im Vergleich zum Pflugeinsatz beträgt die Abnahme des Humusgehaltes beim Einsatz des Grubbers auf Grund der geringen Abnahme des Ertrages nur 0,002 % C_{org}, während bei Direktsaat auf Grund der deutlicheren Ertragsabnahme bereits um 0,10 % C_{org} verringerte Werte berechnet worden sind.

Zusammenfassend kann aus diesen CANDY-Berechnungen abgeleitet werden, dass auf Grund des augenblicklichen Kenntnisstandes des Wirkungsgefüges der reduzierten Bodenbearbeitung im Vergleich zum Pflugeinsatz es zwar zu einer deutlichen Schichtung der Humusgehalte im Tiefenprofil des Bodens kommt. Die mittleren Mengen bzw. Konzentrationen an Humus in der Ackerkrume verändern sich aber kaum. In den Szenarien bestand die Tendenz zu niedrigeren Werten, obwohl beim CANDY-Verfahren bei reduzierter Bodenbearbeitung etwas geringere Beträge in den BAT-Werten ausgewiesen wurden als nach dem Pflugeinsatz (Pflug = 32,1 BAT; Grubber = 30,4 BAT; Direktsaat = 25,2).

Entscheidend für die zu erwartende Entwicklung der Humusvorräte dürfte nach diesen Berechnungen die Veränderung der Erträge sein. Wenn es mit dem Einsatz der reduzierten Bodenbearbeitung gelingt, ein dem Pflugeinsatz mindestens vergleichbares Ertragsniveau dauerhaft zu sichern, so werden die Humusgehalte sich kaum verändern, auch ein geringer Anstieg ist dann durchaus vorstellbar. Nimmt aber das Ertragsniveau besonders nach Direktsaat ab, wie es bei diesem Verfahren oft in der Praxis zu beobachten ist, so können auch abfallende Humusgehalte die Folge sein. Auf Grund dieser relativ geringen Gesamteffekte auf die Humusgehalte des Bodens kann von den Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung kaum ein Beitrag zur C-Sequestrierung unter mitteleuropäischen Bedingungen erwartet werden. Nur unter günstigen Ertragsvoraussetzungen kann es zu einer geringen Humusanreicherung kommen. Vergleichbar geringe Auswirkungen der reduzierten Bodenbearbeitung wurden auch von NITZSCHE (2007), HÜLSBERGEN & KÜSTERMANN (2007) und APPEL (2008) beschrieben, während aus amerikanischen Versuchen oft von deutlich positiveren Auswirkungen auf die C_{org}-Gehalte des Bodens berichtet wird (RASMUSSEN & COLLINS 1991; ZIBILSKE et al. 2002).

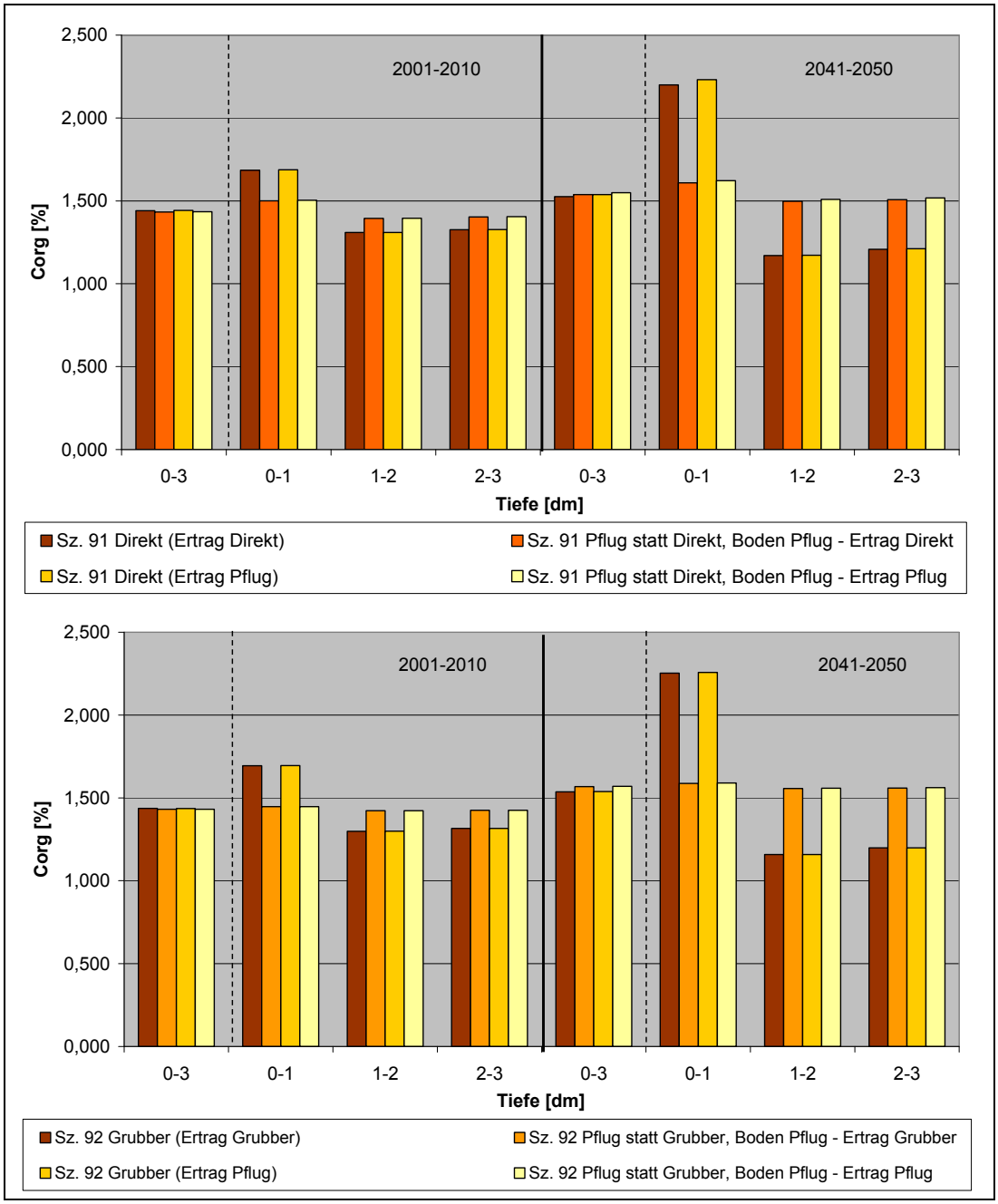


Abbildung 64: Einfluss verschiedener Verfahren der Bodenbearbeitung auf die Humusgehalte des Bodens auf dem Lö-Standort im Durchschnitt der Jahre 2001 – 2010 sowie 2041 – 2050: Var. 91 mit Direktsaat (oben) und Var. 92 mit Grubbereinsatz (unten), jeweils im Vergleich zum Pflugeinsatz bei unterschiedlichem Ertragsniveau

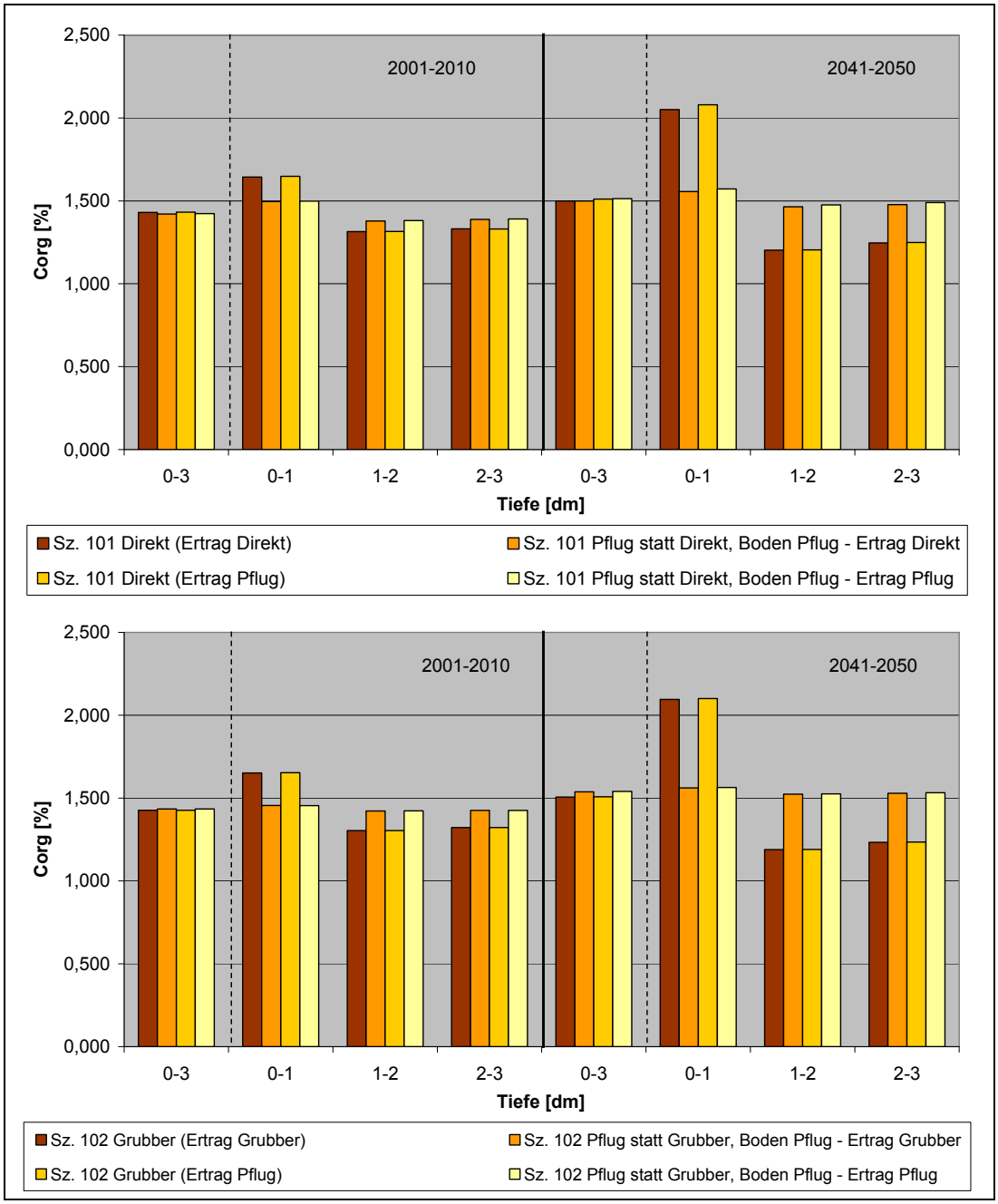


Abbildung 65: Einfluss verschiedener Verfahren der Bodenbearbeitung auf die Humusgehalte des Bodens auf dem Lö-Standort im Durchschnitt der Jahre 2001 – 2010 sowie 2041 – 2050: Var. 101 mit Direktsaat (oben) und Var. 102 mit Grubbereinsatz (unten), jeweils im Vergleich zum Pflugeinsatz bei unterschiedlichem Ertragsniveau

4.3 Energiebilanzierung

Von einigen Bewirtschaftungsszenarien sind vereinfachte Energiebilanzen erstellt worden (Tab. 25). Für alle Standorte sind positive und je nach Variante stark unterschiedliche Energiebilanzen festgestellt worden. Der D-Standort weist die niedrigsten und der Lö-Standort die höchsten Durchschnittswerte auf.

In Tabelle 26 sind von jeder Variante die Energiebilanzen des Standard-Szenarios Var. 11 abgezogen worden. Die erhaltenen Werte sind dann den mittleren C_{org}-Differenzen gegenübergestellt worden (Abb. 66).

Tabelle 25: Mittlere jährliche Energiebilanzen in GJ/ha der Szenarien für den Zeitraum 2001-2050

Standort	Variante								
	11	31	41	42	51	53	61	62	$\overline{X}$
D	73,6	31,2	78,3	114,5	74,7	22,5	67,4	78,7	67,6
Lö	96,8	55,1	101,6	147,6	95,1	43,1	95,1	106,5	92,6
V	67,9	26,8	87,6	125,6	80,7	29,1	78,9	90,2	73,4

Tabelle 26: Mittlere jährliche Energie-Mehrerträge in GJ/ha im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11) für den Zeitraum von 2001 bis 2050

Standort	Variante						
	31	41	42	51	53	61	62
D	-42,4	4,7	40,9	1,0	-51,1	-6,3	5,0
Lö	-41,8	4,8	50,8	-1,8	-53,7	-1,7	9,7
V	-41,1	19,7	57,7	12,8	-38,7	11,0	22,3

Die Gegenüberstellung der Energie-Mehrerträge und der entsprechenden zusätzlichen C_{org}-Sequestrierung im jeweiligen Vergleich zum Standard-Szenario 11 zeigt einen relativ engen Zusammenhang zwischen beiden Größen. Der zusätzliche Energiegewinn – realisiert durch höhere Biomasseabfuhr – bedeutet in den meisten Fällen eine reduzierte C-Sequestrierung im Boden.

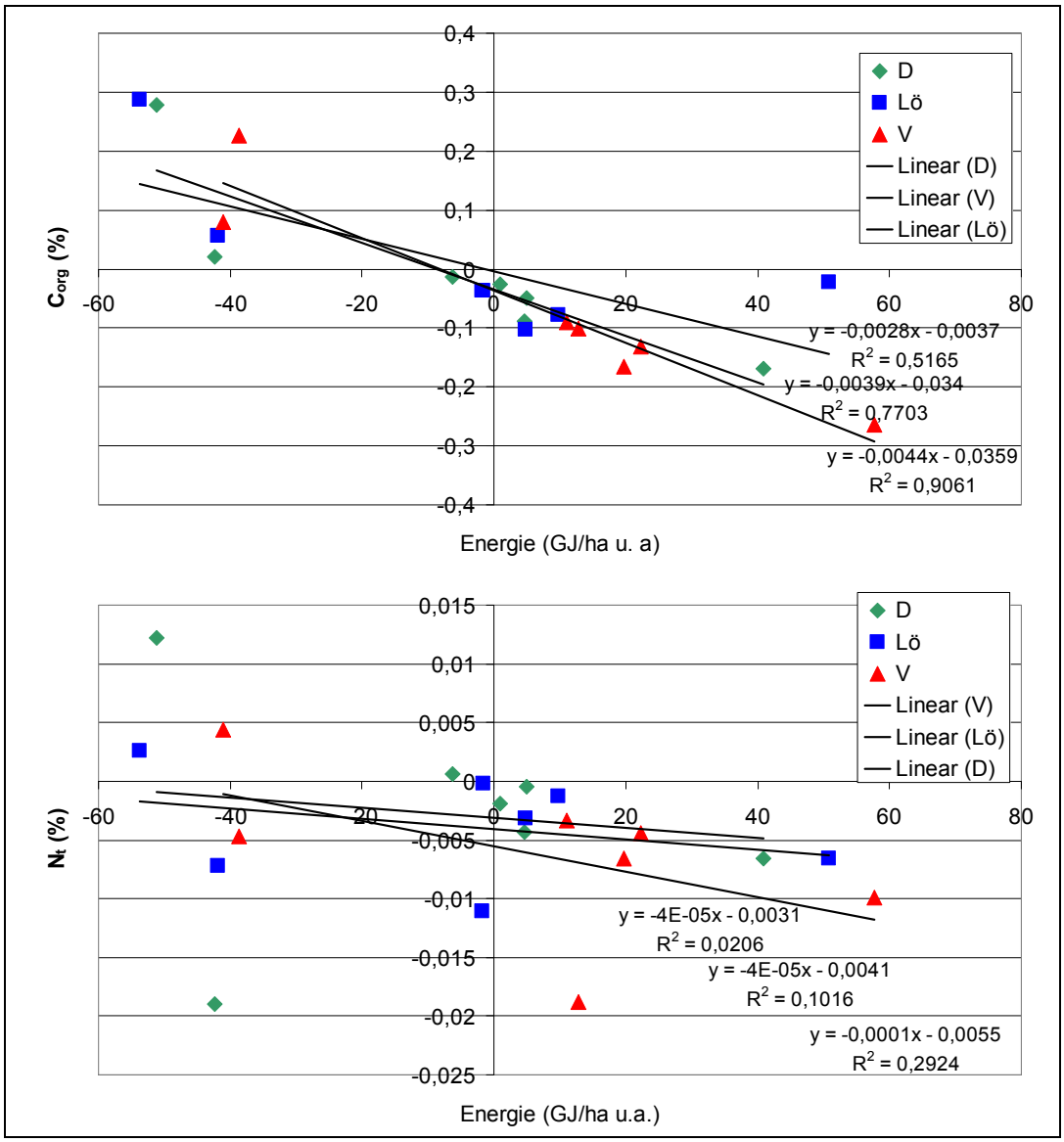


Abbildung 66: Gegenüberstellung der Energie-Mehrerträge und der zusätzlichen C_{org}-Sequestrierung (oben) und N_t-Entwicklung (unten) im Vergleich zur Grundfruchtfolge (Var. 11)

4.4 Eignung der Berechnungsverfahren

CANDY

Die CANDY-Methode besteht aus einem mathematischen Modell, das seine Gültigkeit in einer großen Zahl von Validierungsuntersuchungen bestätigt hat. Die Simulation konkreter Szenarien erfordert die Angabe von Anfangswerten sowie Wetter-, Boden- und Bewirtschaftungsdaten, deren Qualität ebenso Einfluss auf das Ergebnis haben wie die verwendeten Parameter zur Abbildung der Fruchtarten und Dünger. Das Simulationsverfahren CANDY ist sehr gut zur Beschreibung eines Prozesses im Zeitverlauf einsetzbar. So konnten die Besonderheiten zwischen verschiedenen Varianten, die durch die stetige Variation der Eingabefaktoren entstehen, plausibel dargestellt werden. Die Stärken des Modells liegen sowohl in der quantitativen Abbildung von klima- und bodenbedingten Einflüssen als auch bei der Wiedergabe von Bewirtschaftungseffekten (Tab. 27).

Im Vergleich zu den anderen eingesetzten Methoden haben sich diese Vorteile des CANDY-Verfahrens im Allgemeinen bestätigt. In bestimmten Fällen bestehen jedoch z.T. deutlich unterschiedliche Bewertungen, auf die kurz eingegangen werden soll. Zunächst muss angemerkt werden, dass auf Grund eines Methodenvergleichs es streng genommen nicht möglich ist, die Güte des Verfahrens beurteilen zu wollen. Wenn aber lediglich ein Verfahren im Vergleich zu den anderen Verfahren zu einem deutlich unterschiedlichen Ergebnis kommt und zudem die erlangten Ergebnisse der anderen Methoden fachlich deutlich plausibler erscheinen als die des abweichenden Verfahrens, so steigt die Wahrscheinlichkeit für eine richtige Bewertung an und es können die daraus abgeleiteten Indizien für spezifische Vor- oder Nachteile des zu bewertenden Verfahrens genutzt werden.

Bei der Bewertung des Einflusses der Bodenfaktoren fiel auf, dass auf dem D-Standort (anlehmiger Sand - lehmiger Sand) entsprechend den CANDY-Bewertungen etwas zu hohe C_{org}-Gehalte und auf dem Lö-Standort entsprechend der Textur des Standortes (sandiger Lehm) etwas zu niedrige C_{org}-Werte postuliert worden sind als aus den sächsischen Dauertestflächen ermittelt worden sind. Auf Grund dieser Vorgaben werden im Modell CANDY Tendenzen zur weiteren Verringerung der C_{org}-Werte des D-Standortes und Tendenzen zur weiteren Erhöhung der C_{org}-Werte des Lö-Standortes berechnet (s. Tab. 20). Diese Bewertung der C_{org}-Ausgangswerte der Standorte konnte durch die REGRESS-Methode nur tendenziell bestätigt werden.

Im Allgemeinen besteht eine relativ hohe Übereinstimmung zwischen den experimentell ermittelten und den mit dem REGRESS-Verfahren berechneten C_{org}-Werten (s. Abb. 3). Das Verfahren gelang zu dem Ergebnis, dass die ermittelten Werte einer lang andauernden durchschnittlichen Bewirtschaftung der veranschlagten Standorte in etwa entsprechen. Dieses Ergebnis dürfte aller Voraussicht nach auch für die Realität der zu betrachtenden Gebiete zutreffen. Daher konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die natürliche Variationsbreite in den C_{org}-Werten eines Standortes bei Voraussetzung einer relativ gleich bleibenden, lang andauernden ackerbaulichen Vorgeschichte anscheinend höher sein kann als im CANDY in den Anfangsbedingungen hinterlegt wor-

den ist. Auf Grund dieser Ergebnisse sollten die Prozesse, ab denen ausgleichende Wirkungen auf einen C_{org}-Wert eines Standortes ausgeübt werden, in der Strenge deutlich zurückgenommen werden.

Zu den weiteren kritischen Punkten zählen die Ergebnisse der Wirkung der klimatischen Veränderungen auf die C_{org}-Gehalte des Bodens an den drei Standorten. Hierbei bestanden deutliche Unterschiede zur Bewertung der Veränderungen insbesondere zwischen dem sandigen Lehm des V-Standortes im Vergleich zu dem des Lö-Standortes. Auf Grund der kaum plausiblen Ergebnisse auf dem V-Standort musste das CANDY-Verfahren hier deutlich abgewertet werden. Die Ursachen für diese unterschiedliche Bewertung müssen einer Klärung zugeführt werden bevor ein abschließendes Urteil möglich wird. Nach der Faktenlage erscheint es zurzeit plausibel zu sein, dass sich ein ähnlicher Boden auf Grund einer Angleichung der klimatischen Verhältnisse (Temperatur, Niederschlag) in der Zukunft auf dem V-Standort bis zum Jahr 2050 und der augenblicklichen Situation des Lö-Standortes im Jahr 2000 im Allgemeinen auch in den C_{org}-Werten weitgehend angleichen wird. Auch in anderen Modellvergleichen wurde diese Fehlerquelle des CANDY-Verfahrens diskutiert und u.a. auf Schwächen bei der Festsetzung des an dem Humusumsatz nicht beteiligten C_{inert}-Pools zurückführt (SMITH et al. 2007b). Da besonders alter Kohlenstoff durch Temperaturänderungen betroffen ist (VANHALA 2007), können Fehlkalkulationen erhebliche Ausmaße annehmen.

Bei der Interpretation von CANDY-Ergebnissen sind allerdings die speziellen Bedingungen für die Anwendung dynamischer Modelle zu beachten. Eine einzelne Simulationsrechnung charakterisiert genau ein System aus Boden, Wetterverlauf, konkretem Bewirtschaftungsablauf und Anfangsbedingungen (insbes. Kohlenstoff, Stickstoff, Wasser aber auch Temperatur). Entsprechen die Anfangsbedingungen den übrigen Daten, dann befindet sich das System in „steady state“. Dies wäre der ideale Ausgangspunkt, um den Einfluss von Veränderungen in Klima und/oder Bewirtschaftung zu untersuchen. Durch regionale Mittelwertbildung der C-Gehalte wird nicht immer der typische Wert für die hier als Referenz dienende Grundfruchtfolge generiert. Dabei können also untypische Kombinationen vor allem für den V-Standort zu Schwierigkeiten bei der Interpretation der modellierten C_{org}-Verläufe führen, die wegen der geringen BAT am V-Standort sehr lange und mit großer Wichtung durch die Startwerte (die für das betrachtete System nicht im Gleichgewicht sind) beeinflusst werden. Ohne die Analyse konkreter schlagbezogener Daten kann nicht eingeschätzt werden, ob diese Situation für konkrete Flächen zutrifft oder nur durch die Mittelwertbildung und die Annahme von Bewirtschaftungsabläufen auf einem gegebenen Pedon entstanden ist. Die Simulationsergebnisse zeigen eindeutig eine sehr große Trägheit dieses Standortes auf Änderung in der Bewirtschaftung, wie sie wahrscheinlich auch hier mit Beginn der 1990er-Jahre stattgefunden haben.

Für die meisten Faktoren einer landwirtschaftlichen Bewirtschaftung (Fruchtfolge- incl. Ertragseffekten, Zufuhr organischer Materialien verschiedener Qualität und Quantität) scheinen die CANDY-Analysen mit den anderen Verfahren vergleichbare Wirkungen zu ermitteln. Es wird allerdings nicht

die hohe Übereinstimmung der Werte erreicht, die mit den Verfahren ermittelt worden sind, die für die Berechnung von Bewirtschaftungsunterschieden entwickelt worden sind (LUFA, STAND). Darüber hinaus werden Verfahren mit steigenden Leguminosengras-Anteilen in der Fruchtfolge mit dem CANDY-Verfahren deutlich anders bewertet. Da aber diese Wirkungen aus Dauerversuchen recht gut dokumentiert werden können (z.B. KUNZMANN 1972; KÖRSCHENS & EICH 1990; WICKE et al. 1990; HOLEPLASS et al. 2004), zudem alle weiteren Verfahren zu deutlich anderen Ergebnissen kommen, sollten hierzu die Modellvoraussetzungen im CANDY-Verfahren nochmals überprüft werden (Parameteranpassung). Bei Ausgleich dieser zu unterstellenden Schwächen des Modells würden negative Bewertungen wegfallen und auch die Güte der Bewirtschaftungsfaktoren deutlich besser zu bewerten sein (s. Tab. 27).

Die nachfolgend genannten Methoden können Veränderungen der C_{org}-Gehalte nicht im Zeitverlauf darstellen. Es bestehen daher Schwierigkeiten mit diesen Verfahren Prozesse abzubilden, deren Wirkung sich im Zeitverlauf stark ändert und dessen Gesamtprozess in der zu untersuchenden Zeitperiode noch nicht abgeschlossen ist. So ist es nicht möglich, die Wirkung einer stetigen Zufuhr von z.B. 100 dt/ha*a an Kompost genau für 5 oder 10 Jahre berechnen zu wollen. Wird aber ein längerer Betrachtungshorizont von z.B. 50 Jahren zugrunde gelegt, wie in der vorliegenden Arbeit, so ist eine quantitative Berechnung mit diesen Verfahren möglich, da der Prozess der jährlichen Zufuhr an Kompost auf die C_{org}- und N_t-Gehalte des Bodens nach dieser Zeit dann weitgehend abgeschlossen ist.

REGRESS

Das auf Ergebnissen der multiplen nichtlinearen Regressionsanalyse beruhende REGRESS-Verfahren ist zu dem Zweck erstellt worden, um einerseits komplexe Einzelfaktoren z.B. des Bodens oder des Klimas auf die C_{org}- und N_t-Werte des Bodens quantitativ zu ermitteln, um deren Wirkungsgefüge besser verstehen zu können. Ein anderer Grund für die Erstellung dieses Verfahrens war es, eine relativ einfach zu handhabende Methode zu erlangen, um einen standort- und bewirtschaftungsbedingten durchschnittlichen C_{org}- und N_t-Gehalt eines Standortes zu berechnen.

Einflussgrößen des Bodens und des Klimas können anscheinend mit diesem Verfahren recht gut abgebildet werden, wie die Analysen des Methodenvergleichs zum C_{org}-Gehalt ergeben haben (Tab. 27). Darüber hinaus ist auch eine Bewertung von Variantenunterschieden in den N_t-Gehalten offenbar mit ähnlich hoher Sicherheit möglich. Eine quantitative Analyse der N_t-Gehalte des Bodens (und daher auch der C/N-Verhältnisse) ist mit den anderen Verfahren bisher nicht möglich. Lediglich mit dem CANDY-Verfahren kann die N_t-Veränderung mit festem Umrechnungsfaktor zwischen Kohlenstoff und Stickstoff berechnet werden. Für die Zukunft könnte ein Schwerpunkt der Anwendung des REGRESS-Verfahrens auf den o. a. Gebieten der C_{org}- und N_t-Bestimmung liegen. Darüber hinaus scheinen bei dieser Methode noch relativ hohe Verbesserungsmöglichkeiten zu bestehen.

Tabelle 27: Eignung der Berechnungsverfahren auf den untersuchten Standorten (+ = positive; - = negative Bewertung; X = Bewertung nicht möglich)

Verfahren	Variante	Standort	CANDY	REGRESS	STAND	LUFA
Klima-Szenario	11	D	+	+	+	X
		Lö	+	+		X
		V	-	+		X
Ertragsanstieg Kon	13	D	+		+	
		Lö		+	+	
		V	+	+		
Umstellung Öko	31	D		+		
		Lö	-			+
		V	-		+	+
Ertragsanstieg Öko	32/31	D		+		
		Lö		+	+	
		V		+		
Energiemais 50 %	41	D		-	+	
		Lö	+			+
		V	+		+	
Energiemais + Abfuhr	42	D		-	+	+
		Lö	+	+		+
		V	+		+	
Getreide 100 %	51	D			+	+
		Lö			+	
		V				+
Hackfrucht 30 %	52	D		-	+	
		Lö		+	+	
		V			+	
Hackfrucht + Kompost	52a	D		+	+	+
		Lö				+
		V		+		
Getreide + Kompost	53	D		+	+	+
		Lö	+			
		V	+			
Getreide + Hühnerkot	54	D		+	+	+
		Lö			+	+
		V		+		+
Rindergülle 2 GVE	61	D			+	
		Lö	+	-		
		V		+		
Biogasgülle 2 GVE	62	D			+	
		Lö	+	-	+	
		V		+	+	
Stalldung 2 GVE	63	D			+	
		Lö		-	+	-
		V		+	+	-
Schweinegülle 2 GVE	64	D			+	
		Lö		+	+	
		V			+	

Tabelle 27: (Fortsetzung)

Verfahren	Variante	Standort	CANDY	REGRESS	STAND	LUFA
Ackerfutter 20 %	71	D	-			+
		Lö	-		+	
		V	-			+
Legum.-Gras 50 %	81	D	-			+
		Lö	-	+		+
		V	-		+	
Legum.-Gras+Abfuhr	82	D	-			+
		Lö	-			+
		V	-		+	
Grünland+Abfuhr	11X	D				+
		Lö			+	+
		V				+
Grünland-Stilllegung	11Z	D		+	+	
		Lö			+	
		V			+	
Grünland (insgesamt)		D	+		+	
		Lö			+	
		V	+		+	
Summe (+)			**14**	**22**	**38**	**22**
Summe (-)			**12**	**6**	**0**	**2**

Die Ergebnisse lassen jedoch erkennen, dass die Bewirtschaftungsfaktoren mit diesem Verfahren nicht so gut abgebildet werden können. Da die TM-Zufuhr durch die verschiedenen organischen Materialien nicht mit ihrer differenzierten Humuswirkung bewertet wird, kann mit diesem Verfahren keine genaue, fein abgestimmte Wirkung der organischen Materialien erfolgen. Daher musste eine Abwertung für alle organischen Materialien mit stark vom Mittelwert abweichender Humuswirkung (z.B. Gülle im Vergleich zur Gründüngung) vorgenommen werden. Darüber hinaus können alle extremen Bewirtschaftungsverhältnisse, die auf organische Materialien, stark einseitige Fruchtfolgen und extreme klimatische Verhältnissen beruhen, mit diesem Verfahren nicht gut abgebildet werden.

LUFA und STAND

Mit dem LUFA-Verfahren können keine Berechnungen zu unterschiedlichen Boden- und Klimawirkungen vorgenommen werden. Der Schwerpunkt liegt eindeutig im Bereich der Bewirtschaftungsfaktoren. Zu diesem Zweck ist diese Methode auch entwickelt worden und auf Grund Jahrzehnte langer Erfahrungen ist sie auf diesen Gebieten immer weiter optimiert worden. Daher war es auch nicht überraschend, dass mit diesem sehr einfachen Verfahren insgesamt vergleichsweise recht gut übereinstimmende Berechnungsergebnisse erzielt worden sind (Tab. 27).

Als erster Vorteil kann angemerkt werden, dass bei dieser Methode es sehr wohl möglich ist, die erlangten Bilanzergebnisse an Humusäquivalenten in Humusgehalte des Bodens umzurechnen.

Die erlangten Ergebnisse lagen insgesamt gesehen nicht höher oder niedriger als die der anderen Methoden. Diese Berechnung hat sich besonders für die STAND-Methode bewährt, sodass auch in Zukunft entsprechende Umrechungsfaktoren genannt werden können.

Ein weiterer Vorteil ist die hohe Präzision, mit der Bewirtschaftungsfaktoren der Fruchtfolge incl. Ertragseffekten und der organischen Materialien abgebildet werden können. Insgesamt wurden mittlere bis gute Werte auf diesem Sektor erzielt. Lediglich extremere Landbauvarianten, bei denen z.B. stark unterschiedlich hohe Zufuhrmengen an organischen Materialien zu verrechnen waren, wurden bei dieser Methode deutlich ungenau berechnet. Hierbei zahlten sich Arbeiten zur Weiterentwicklung der Methode aus, da mit dem STAND-Verfahren eine deutlich genauere Berechnung dieser Varianten möglich geworden ist (Tab. 27).

Auf Grund des Modellaufbaus sind LUFA- und STAND-Verfahren miteinander verwandte Methoden. Durch die Weiterentwicklung einer Berücksichtigung von Standortfaktoren (Klima, Boden) ist das Verfahren auch geeignet, qualitative Unterschiede (Bodenart, unterschiedliche Temperaturen) in diesem Bereich aufzudecken, wie durch die hier präsentierten Ergebnisse bestätigt werden konnte. Insbesondere durch die Einfügung von Abstufungen der Fruchtarten-Koeffizienten in Standortgruppen sowie der Koeffizienten für die Zufuhrmengen an organischen Materialien brachten im Vergleich zu den anderen Methoden eine höhere Übereinstimmung mit den mittleren Werten in den C_{org}-Gehalten. Daher wurden im Vergleich zu den anderen Verfahren insgesamt die höchsten Übereinstimmungen gefunden. Diese Arbeiten zur Weiterentwicklung des Verfahrens haben sich bewährt. Das STAND-Verfahren ist daher besonders für die Bewertung von standort- und bewirtschaftungsbedingten Unterschieden geeignet.

5 Zusammenfassung

In dieser Studie wurden die für Sachsen zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die C_{org}- und N_t-Gehalte des Bodens sowie potenzielle Möglichkeiten der Gegensteuerung durch landwirtschaftliche Bewirtschaftungs- und Nutzungsänderungen für folgende drei Standorte im Zeitraum 2000 – 2050 untersucht:

- Agrarstrukturgebiet 1, D-Standort (anlehmiger Sand), 1,36 % C_{org}, 0,14 % N_t, um 135 m NN, 9,1 °C Durchschnittstemperatur, 503 mm Jahresniederschlag
  erwartete Klimaänderung: Temperatur +0,9 bis +2.1 °C
  Niederschlag -6 bis -126 mm.

- Agrarstrukturgebiet 3, Lö-Standort (sandiger Lehm), 1,38 % C_{org}, 0,16 % N_t, um 200 m NN, 9,7 °C Durchschnittstemperatur, 594 mm Jahresniederschlag
  erwartete Klimaänderung: Temperatur +1,0 bis +2,3 °C
  Niederschlag -25 bis -54 mm.

- Agrarstrukturgebiet 4, V-Standort (sandiger Lehm), 2,12 % C_{org}, 0,24 % N_t, um 420 m NN, 8,2 °C Durchschnittstemperatur, 688 mm Jahresniederschlag
  erwartete Klimaänderung: Temperatur +1,0 bis +2,4 °C
  Niederschlag -31 bis -118 mm.

5.1 Einfluss des Klimawandels

Unter Beibehaltung der augenblicklichen landwirtschaftlichen Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Düngung, Ertragsniveau) ist auf den Sandböden des D-Standortes durch den prognostizierten Klimawandel (Anstieg der Temperatur, Abfall der Niederschläge) zu erwarten, dass die Humus-Gehalte von Ausgangs im Jahr 2000 von ca. 1,36 % C_{org} bis zum Jahr 2050 um 0,15 % C_{org} (0,06 – 0,17 % je nach Berechnungsverfahren) abnehmen werden. Auf dem Lö-Standort des Mittelsächsischen Lößgebietes sind die zu erwartenden Auswirkungen insgesamt nicht sehr groß. Bei einem durchschnittlichen Gehalt von 1,38 % C_{org} wird ein leichter Abfall von 0,04 % (+0,06 bis -0,09 %) C_{org} erwartet.

Entsprechend den postulierten Klimaszenarien wird sich das Klima der Vorgebirgslagen am V-Standort im Jahr 2050 in den Durchschnittswerten der Temperatur und der Niederschlagsmenge immer mehr den klimatischen Bedingungen des Lö-Standortes von heute im Jahr 2000 anpassen. Da für beide Standorte weitgehend ähnliche Bodenverhältnisse zu Grunde gelegt werden (sandiger Lehm), liegt es nahe anzunehmen, dass sich die Humusgehalte entsprechend den zu erwartenden klimatischen Bedingungen ebenfalls angleichen werden.

Heute wird im Agrarstrukturgebiet 4 ein durchschnittlicher Gehalt von 2,12 % C_{org} vorgefunden. Durch den Klimawandel werden sich diese Gehalte aller Voraussicht nach deutlich reduzieren. Je

nach zugrunde gelegtem Klimaszenario und dem verwendeten Berechnungsverfahren beträgt die Spannbreite der Gehaltsänderung von weitgehender Aufrechterhaltung (+0,02 % C_{org}) bis zu einer Abnahme um 0,43 % C_{org}, bzw. einer Abnahme von bis zu 0,86 % C_{org} bei Zugrundelegung von etwas deutlicheren klimatischen Veränderungen. Weiterhin ist zu bedenken, dass es in Folge dieses Klimawandels zu einer weitgehend parallelen Entwicklung der N_t-Gehalte des Bodens kommen wird.

5.2 Ausgleichspotenzial durch Landbewirtschaftung

Der Ist-Zustand der Bewirtschaftung entspricht den Ausgangsbedingungen auf den drei untersuchten Gebieten in Sachsen um das Jahr 2000. Es sind getreidebetonte Fruchtfolgen, in denen organische Dünger von ca. 0,6 GVE/ha*a ausgebracht werden. Mit mehreren Methoden der Humusbilanzierung wurde zunächst der Einfluss auf die C_{org}- und N_t-Gehalte unter Beibehaltung dieser durchschnittlichen Bewirtschaftung auf den drei Standorten bis zum Jahr 2050 berechnet. Von den erhaltenen Ergebnissen wurden dann jeweils alle weiteren Bewirtschaftungsvarianten abgezogen.

Zunächst sind Bewirtschaftungsvarianten untersucht worden, bei denen im Vergleich zum Ausgangsniveau eine deutlich niedrigere Versorgung mit organischer Substanz vorliegt. Diese Varianten führen zu einem über das Ausmaß des Klimawandels noch hinausgehenden Abbau an Humus. Hierzu zählen bestimmte Energiefruchtfolgen mit hohen Maisanteilen in den Fruchtfolgen und Abfuhr aller Koppelprodukte sowie auch eine einseitige Ausdehnung von Getreide oder Hackfrüchten in den Fruchtfolgen.

Keine oder kaum Veränderungen gegenüber der augenblicklichen Situation der Bewirtschaftung wird erwartet durch Ausdehnung der Tierhaltung (Rind) auf 2 GVE/ha und Gülledüngung oder durch Verfahren der reduzierten Bodenbearbeitung (Grubber, Direktsaat). Ein leichter zusätzlicher Anstieg der Humusgehalte kann durch den bis zum Jahr 2050 zu erwartenden Ertragsanstieg (unter Berücksichtigung des genetischen und technischen Fortschritts und der CO_2-Düngewirkung) von 25 % (D-), 50 % (Lö-) und 75 % (V-Standort) erwartet werden. Hiernach wäre es allein durch den Ertragsanstieg möglich, erhebliche Anteile des klimabedingten Humusabbaus auf den D- und Lö-Standorten zu kompensieren.

Eine leichte bis deutliche Anhebung der Humusgehalte, wodurch der klimabedingte Abfall teilweise bis weitgehend ausgeglichen wird, kann unter Beachtung des Ertragsanstiegs durch eine Umstellung auf Ökologischen Landbau erreicht werden. Eine ähnliche Erhöhung der Humusgehalte wird auch durch eine Ausdehnung der Schweinehaltung auf Güllebasis auf 2 GVE/ha, eine hohe organische Düngung mit Stalldung, Hühnerkot oder Kompost sowie durch Ausdehnung des Leguminosengrasanbaus (Futterbau) auf 20 – 50 % der Fruchtfolgen im konventionellen Landbau veranschlagt.

Eine deutlich über den zu erwartenden klimabedingten Abbau an Humus hinausgehende Kompensation besteht auf den D- und Lö-Standorten lediglich dann, wenn in großflächigem Rahmen eine Flächenumwidmung in Richtung Dauergrünland vorgenommen wird. Auf den V-Standorten des Vorgebirges dürfte jedoch eine vollständige Kompensation kaum erreicht werden können. Ein weitgehend über den klimabedingten Abbau des Humusgehaltes hinausgehendes C-Sequestrierungspotential kann durch die Landwirtschaft daher nicht erwartet werden.

Im Prinzip erfolgt eine den C_{org}-Gehalten parallele Entwicklung der N_t-Gehalte des Bodens. Da aber das Niveau der relativen N-Versorgung auch das C/N-Verhältnis des Bodens beeinflussen kann, werden in Bewirtschaftungsvarianten mit vergleichsweise reichlicher N-Zufuhr die C/N-Verhältnisse etwas verengt. Bei relativ geringer N-Versorgung werden die C/N-Verhältnisse etwas erweitert, d. h. im Vergleich zur Humusanreicherung erfolgt dann eine geringere Anhebung der N_t-Gehalte des Bodens.

Eine Gegenüberstellung der erlangten Änderungen in den C_{org}-Gehalten mit den berechneten vereinfachten Energiebilanzen der untersuchten Bewirtschaftungsvarianten ergab eine verhältnismäßig enge Beziehung. Hieraus ist zu entnehmen, dass mit ansteigendem Energiegewinn, z.B. durch Anbau von nachwachsenden Rohstoffen, immer eine deutliche Abnahme der Humusgehalte einhergeht. Es gibt nach diesen Ergebnissen also keine Anbauvarianten, wobei ein hoher Energiegewinn gleichzeitig mit einer hohen positiven C_{org}-Änderung verbunden ist.

Aus den berechneten Ergebnissen einer Reihe von Bewirtschaftungs- und Flächennutzungsänderungen kann ein Handlungsrahmen abgeleitet werden, um den Auswirkungen des Klimawandels für eine Zeitperiode von ca. 30 – 50 Jahren zu begegnen. Hierbei ist zu bedenken, dass mit der Zeit die C-sequestrierende Wirkung immer geringer wird und nach dem ausgewiesenen Zeithorizont schließlich ganz ausbleibt, obwohl die spezifischen Bewirtschaftungsmaßnahmen weitergeführt werden müssen. Bei vorzeitiger Beendigung der Maßnahmen kann es zu einer Nettofreisetzung an Kohlenstoff kommen, bis sich wiederum ein neues Gleichgewicht eingestellt hat. Daher sind alle Maßnahmen nur von sehr begrenzter Auswirkung und Dauer, um in der Zeitperiode einer weltweit stark ansteigenden CO_2-Freisetzung in die Atmosphäre eine gewisse zwischenzeitliche Entspannung zu bewirken.

Mitwirkung

Ein herzliches Dankeschön gilt Uwe Franko, Katrin Kuka, Ekkehard Liess und Enrico Thiel (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Department Bodenphysik, AG C-N Dynamik, Halle) für die Durchführung der CANDY-Berechnungen, die Diskussionsbeiträge und für ihr Engagement zur Abfassung des Manuskriptes.

6 Literatur- und Quellenverzeichnis

ALBERT, E., FÖRSTER, F., ERNST, H., KOLBE, H., DITTRICH, B., LABER, H., HANDSCHACK, M., KRIEGHOFF, G., HEIDENREICH, T., RIEHL, G., HEINRICH, S. & W. ZORN (2007): Umsetzung der Düngeverordnung. Hinweise und Richtwerte für die Praxis. Broschüre. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, 164 Seiten

ANON. (1995): DOK-Versuch: Vergleichende Langzeit-Untersuchungen in den drei Anbausystemen biologisch-dynamisch, organisch-biologisch und konventionell, 1. und 2. Fruchtfolgeperiode. Schweizerische landwirtschaftliche Forschung, Sonderausgabe 1995. Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, Liebefeld, Schweiz

ATV (1995): Merkblatt ATV-M 702 – Wirtschaftsdünger, Abfälle und Abwässer aus landwirtschaftlichen Betrieben. Hennef

BECKMANN, U., KOLBE, H., MODEL, A. & R. RUSSOW (2002): Ackerbausysteme im ökologischen Landbau. Initiativen zum Umweltschutz 35. Erich Schmidt Verlag, Berlin

CAPRIEL, P. (2006): Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 16., Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising

DIECKMANN, J. (2006): Vergleich von Verfahren konservierender Bodenbearbeitung unter Praxisbedingungen (Gemeinschaftsprojekt Bodenbearbeitung IfZ/ Südzucker)

DIEPOLDER, M., JAKOB, B. & R. SCHWERTFIRM (2006): Monitoring im Intensiv-Grünland Teil2: Bodenproben. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising. Internet: http://www.lfl.bayern.de/iab/gruenland/17205/index.php

DIEZ, T. & M. KRAUSS (1997): Wirkung langjähriger Kompostdüngung auf Pflanzenertrag und Bodenfruchtbarkeit. Agribiological Research 50, 78-84

ESTLER, M. & H. KNITTEL (1996): Praktische Bodenbearbeitung. DLG-Verlag, Frankfurt (Main)

EWERT, F., ROUNSEVELL, M. D. A., REGINSTER, I., METZGER, M. & R. LEEMANS (2005): Future scenarios of European agricultural land use. I: estimating changes in crop productivity. Agriculture, Ecosystems and Environment 107, 101–116

FINDELING, A., GARNIER, P., COPPENS, F., LAFOLIE, F. & S. RECOUS (2006): Modelling water, carbon and nitrogen dynamics in soil covered with decomposing mulch. European Journal of Soil Sciences, doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00826.x

FISSORE, C., GIARDINA, C. P., KOLKA, R. K., TRETTIN, C. C., KING, G. M., JURGENSEN, M. F., BARTON C. D. & S. D. MCDOWELL (2008): Temperature and vegetation effects on soil organic carbon quality along a forested mean annual temperature gradient in North America. Global Change Biology 14, 193-205

FRANKO, U. & B. OELSCHLÄGEL (1993): CANDY - Carbon Nitrogen Dynamics. In: REINER, L., GEIDEL, H. & A. MANGSTL (EDS.), Agrarinformatik. Eugen Ulmer, Stuttgart, 99-110

FRANKO, U. & B. OELSCHLÄGEL (1995): Einfluss von Klima und Textur auf die Biologische Aktivität beim Umsatz der organischen Bodensubstanz. Arch. Acker- Pfl. Boden. 39, 155-163

FRANKO, U., OELSCHLAGEL, B. & S. SCHENK (1995 a): Simulation of temperature-, water- and nitrogen dynamics using the model CANDY. Ecological Modelling 81, 213-222

FRANKO, U., OELSCHLAGEL, B. & S. SCHENK (1995 b): Modellierung von Bodenprozessen in Agrarlandschaften zur Untersuchung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen. Sektion Bodenforschung, UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Bad Lauchstädt

FRANKO, U. (1997): Modellierung des Umsatzes der organischen Bodensubstanz. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 41, 527-547

FRANKO, U., CROCKER, G. J., GRACE, P. R., KLIR, J., KÖRSCHENS, M., POULTON, P. R. & D. D. RICHTER (1997): Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the CANDY model. Geoderma 81, 109-120

FRANKO, U., PUHLMANN, M., RINGE, H., PRUTZER, I., BÖHME, F., SEEGER, J., PETERSOHN, P. & O. SPOTT (2005): Integrierte Methodik zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Entwicklung landwirtschaftlicher Bodennutzung im Bundesland Sachsen-Anhalt. Zwischenbericht, Halle (unveröffentlicht)

FRANKO, U. & E. LIESS (2006): Erstellung und Prüfung von Verfahren zur Abschätzung des N-Umsatzes im Rahmen der Humusreproduktion im Ökologischen Landbau. Abschlussbericht, Halle (unveröffentlicht)

FREYER, B. (2003): Fruchtfolgen. Eugen Ulmer, Stuttgart

GERSTENGARBE, F.-W. et al. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK-Report No. 83, PIK, Potsdam

GOCHT, R. & K. SCHMIDTKE (2007): Ermittlung des Schwellenpreises für den Einsatz biologisch-regenerativer Verfahren der Stickstoffversorgung im konventionellen Landbau in Sachsen. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft H. 31, 160-177

GÖMANN, H., KREINS, P., OSTERBURG, B. & T. BREUER (2006): Nutzungskonkurrenzen durch die Förderung von Biogas und anderen Energieträgern. Wissenschaftliche Tagung „Energie aus Biomasse – weltwirtschaftliche, ressourcenökonomische und produktionstechnische Perspektiven“. Dachverband Agrarforschung, Braunschweig

HAASE, D. & M. BÖHME (2003): Körnermais – Landessortenversuche 2002 (Reifegruppe früh und mittelfrüh). Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden

HAASE, G. (1995): Das Mittelsächsische Lößhügelland. In: RICHTER, H. & K. MANNSFELD (Hrsg.) (1995): Naturräume in Sachsen. Forschungen zur Deutschen Landeskunde 238, Trier

HENKE, J. (2006): Volkswirtschaftliche Einordnung der Energierzeugung aus Biomasse. Wissenschaftliche Tagung „Energie aus Biomasse – weltwirtschaftliche, ressourcenökonomische und produktionstechnische Perspektiven“. Dachverband Agrarforschung, Braunschweig

HEYN, J. (2006): Aktuelle N_{min}-Bodengehalte für die wichtigsten Ackerfrüchte im Vergleich zu langjährigen Mittelwerten. Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, Kassel

HOLEPLASS, H., SINGH, B. R. & R. LAL (2004): Carbon sequestration in soil aggregates under different crop rotations and nitrogen fertilization in an inceptisol in southeastern Norway. Nutrient Cycling in Agroecosystems 70, 167–177

HOLLAND, J. M. (2004): The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. Agriculture Ecosystems & Environment 103 (1), 1-25

HÜLSBERGEN, K. J. (2002): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Habilitationsschrift MLU Halle, Shaker Verlag, Aachen

HÜLSBERGEN, K. J. & B. KÜSTERMANN (2007): Überzogene Erwartungen. DLG-Mitteilungen Nr. 11, 58–61

IPCC (2007): IPCC WG1 AR4 Report. Internet: http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html

ITADA (2006): Erstellung und Überprüfung einer regionalen Datensammlung zur reduzierten Bodenbearbeitung (Alternativen zum Pflug). Abschlußbericht Projekt 01. Institut Transfrontalier d´ Application et de Développement Agronomique, Colmar

JACOB, D. (2001): A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. Meteorol. Atmos. Phys. 77, 61-73

JACOB, D. & R. PODZUN (1997): Sensitivity Studies with the Regional Climate Model REMO. Meteorol. Atmos. Phys. 63, 119-129

JASTROW, J. D., MILLER, R. M., MATAMALA, R., NORBY, R. J., BOUTTON, T. W., RICE, C. W. & C. R. OWENSBY (2005): Elevated atmospheric carbon dioxide increases soil carbon. Global Change Biology 11, 2057–2064

JENNY, H. (1980): The soil resource: Origin and behaviour. Ecological Studies No. 37. Springer, New York

JONES, C., MCCONNELL, C., COLEMAN, K., COX, P., FALLOON, P., JENKINSON, D. & D. POWLSON (2005): Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. Global Change Biology 11, 154–166

KÄTTERER, T., ANDREN, O. & J. PERSSON (2004): The impact of altered management on long-term agricultural soil carbon stocks – a Swedish case study. Nutrient Cycling in Agroecosystems 70, 179–187

KARLEN, D. L., KUMAR, A., KANWAR, R. S., CAMPARDELLA, C. A. & T. S. COLVIN (1998): Tillage systems effects on 15-year carbon based and simulated N budgets in a tile-rained Iowa field. Soil & Tillage Research 48 (3), 155-164

KELLER, T. (2006): Vergleich unterschiedlicher, landwirtschaftlicher Bearbeitungsmethoden hinsichtlich der Akkumulation von Humus, organischem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff innerhalb der Ackerkrume, nach langjährig differenzierter Bewirtschaftung. Diplomarbeit, Universität Leipzig

KIRSCHBAUM, M. U. F. (1995): The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. Soil Biol. Biochem. 27, 753–760

KÖRSCHENS, M. & D. EICH (1990): Der Statische Versuch Lauchstädt. In: Dauerfeldversuche. 2. Auflage, Akademie d. Landw.-Wissensch., Berlin, 7–23

KÖRSCHENS, M., ROGASIK, J., SCHULZ, E., BÖNING, H., EICH, D., ELLERBROCK, R., FRANKO, U., HÜLSBERGEN, K.-J., KÖPPEN, D., KOLBE, H., LEITHOLD, G., MERBACH, J., PESCHKE, H., PRYSTAV, W., REINHOLD, J. & J. ZIMMER (2004): Humusbilanzierung. Me-

thode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Internet: http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/08-humusbilanzierung.pdf

KOLBE, H. & I. PRUTZER (2004): Überprüfung und Anpassung von Bilanzierungsmodellen für Humus an Hand von Langzeitversuchen des Ackerlandes. Verification of humus balance methods using arable land long-term field trials. 71 Seiten. Internet: http://orgprints.org/00003130

KOLBE, H., SCHUSTER, M., HÄNSEL, M., GRÜNBECK, A., SCHLIESSER, I., KÖHLER, A., KARALUS, W., KRELLIG, B., POMMER, R. & B. ARP (2004): Zwischenfrüchte im ökologischen Landbau. Broschüre. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig

KOLBE, H. (2005): Prüfung der VDLUFA-Bilanzierungsmethode für Humus durch langjährige Dauerversuche. Archives of Agronomy and Soil Science 51, No. 2, 221–239

KOLBE, H. (2007a): Establishing multiple pedotransfer functions from long-term field trials for use in site specific soil C_{org} and N_t content determination. Practical Solutions for Managing Optimum C and N Content in Agricultural Soils 4, Book of Abstracts, 29. Crop Research Institute, Prague

KOLBE, H. (2007b): Methode zur standortangepassten Humusbilanzierung von Ackerland unterschiedlicher Anbauintensität. Infodienst für Beratung und Schulung der Sächsischen Agrarverwaltung Nr. 5, 35–39

KOLBE, H. (2009): C_{org}-N_t-Rechner REGRESS: Einsatz von multiplen mathematisch-statistischen Funktionen ermittelt aus Ergebnissen von Langzeit-Dauerversuchen zur quantitativen Berechnung der standort- und bewirtschaftungsbedingten Einflüsse auf die C_{org}- und N_t-Gehalte sowie das C/N-Verhältnis des Bodens. EXCEL-Programm. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden. Internet: http://www.landwirtschaft.sachsen.de/ Landwirtschaft/index.html (in Vorbereitung)

KUNZMANN, R. (1972): Quantifizierung der Wirkung ein- und mehrjähriger Leguminosen auf die Nachfruchterträge und den C- und N-Gehalt des Bodens anhand von Ergebnissen langjähriger Fruchtfolgedüngungsversuche auf Lehmstaugley. Dissertation. Universität, Halle-Wittenberg

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL) (1993): Definition und Einordnung von Verfahren der Bodenbearbeitung und Bestellung. Landtechnik 48 (1/2), 50–53

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL) (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft. KTBL, Darmstadt

KORNMANN, M., SCHMIDT, W. & O. NITZSCHE (2004): Fruchtfolgen bei Pflugverzicht. Fruchtfolgegestaltung ist das Kernstück erfolgreicher konservierender Bodenbearbeitung. Neue Landwirtschaft 11, 36-38

KÜCHLER, W. & W. SOMMER (2005): Klimawandel in Sachsen. LfUG, Dresden

LATTAUSCHKE, G. (2006): Hohe Erträge und Qualität bei Weißkohl im Sommeranbau. Versuche im deutschen Gartenbau. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Fachbereich Gartenbau, Dresden-Pillnitz

LATTAUSCHKE, G. & G. KRIEGHOFF (2002): Hinweise zur Düngung im integrierten Freilandgemüseanbau und bei Erdbeeren. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden

LfL (2002): Entwicklung von dauerhaft umweltgerechten Landbewirtschaftungsverfahren im sächsischen Einzugsgebiet der Elbe. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 03395588, Berichtzeitraum 01.09.1998 – 31.03.2002. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig

LfULG (2009): Fachinformationssystem Boden – BÜK200_SN

LOBELL, D. B. & C. B. FIELD (2008): Estimation of the carbon dioxide (CO_2) fertilization effect using growth rate anomalies of CO_2 and crop yields since 1961. Global Change Biology 14, 39–45

LTZ (2008): Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe, 1–142. Internet: http://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Anwendung/ltz_Abschlussbericht---Nachhaltige-Kompostanwendung-in-der-Landwirtschaft_BG K.pdf

MACHULLA, G. (2007): Veränderte Pflanzenschutzmittel- und Nährstoffausträge bei bodenschonender Bewirtschaftung – Risikoanalyse und –vorsorge. Forschungsvorhaben-Nr. 050 126 003. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig

MÜLLER, C., EICKHOUT, B., ZAEHLE, S., BONDEAU, A., CRAMER, W. & W. LUCHT (2007): Effects of changes in CO_2, climate, and land use on the carbon balance of the land biosphere during the 21st century. Journal of Geophysical Research 112, G03032, 1–14

NEEDELMAN, B. A., WANDER, M. M., BOLLERO, G. A., BOAST, C. W., SIMS, G. K. & D. G. BULLOCK (1999): Interaction of tillage and soil texture: biologically active soil organic matter in Illinois. Soil Science Society of America Journal 56, 476-488

NG, H. Y. F., DRURY, C. F., SEREM, V. K., TAN, C. S. & J. D. GAYNOR (2000): Modeling and testing of the effects of tillage, cropping and water management practices on nitrate leaching in clay loam soil. Agricultural Water Management 43 (1), 111-131

NITZSCHE, O. (2007): Entwicklung der C-Masse und C-Verteilung in der Ackerkrume in Abhängigkeit einer langjährig differenzierten Bodenbearbeitung. VDLUFA-Schriftenreihe, Kongressband 2006, 62, 128-135

OFFERMANN, F. & H. NIEBERG (2000): Economic performance of organic farms in Europe. Organic Farming in Europe: Economics and Policy 5, Universität Hohenheim, Stuttgart-Hohenheim

OORTS, K., GARNIER, P., FINDELING, A., MARY, B., RICHARD, G. & B. NICOLARDOT (2007): Modeling Soil Carbon and Nitrogen Dynamics in No-till and Conventional Tillage Using PASTIS Model. Soil Science Society of America Journal 71 (2), 336-346

PERALTA, A. L. & M. M. WANDER (2008): Soil organic matter dynamics under soybean exposed to elevated [CO_2]. Plant and Soil 303, 69–81

POST, W. M. & K. C. KWON (2000): Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. Global Change Biology 6, 317–327

RASMUSSEN, P. E. & H. P. COLLINS (1991): Long-term impacts of tillage, fertilizer and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. Adv. Agron. 45, 93-134

RAUPP, J. (2001): Forschungsthemen und Ergebnisse eines Langzeitdüngungsversuchs in zwei Jahrzehnten; ein Beitrag zur Bewertung von pflanzenbaulichen Langzeitversuchen. Bericht über Landwirtschaft 79, 71-93

REEVES, D. W. (1997): The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. Soil and Tillage Research 43, 131-167

RÖHRICHT, C. & A. GROSS-OPHOFF (2003): Potenzial an Biomasse in der Landwirtschaft des Freistaates Sachsen zur stofflich-energetischen Nutzung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): Infodienst für Beratung und Schulung der Sächsischen Agrarverwaltung Nr. 7, 7-31

RÖHRICHT, C. & A. GROSS-OPHOFF (2006): Landwirtschaftliche Biomasse. Potenziale an Biomasse aus der Landwirtschaft des Freistaates Sachsen zur stofflich-energetischen Nutzung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden

RÜHL, R. (2007): Ergebnisse langjähriger Bodenbearbeitungsversuche im Geschäftsbereich Landwirtschaft der Südzucker AG. Workshop Direktsaat. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Leipzig

SCHLIEPHAKE, W. & E. ALBERT (2003): Vermeidung von Stickstoffverlusten. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 8, Heft 9. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden

SCHOMBERG, H. H. & M. L. CABRERA (2001): Modeling in situ N mineralization in conservation tillage fields: comparison of two versions of the CERES nitrogen submodel. Ecological Modelling 145 (1), 1-15

SCHRUM, C., HÜBNER, U., JACOB, D. & R. PODZUN (2003): A coupled atmosphere/ice/ocean model for the North Sea and Baltic Sea. Climate Dynamics 21, 131-151

SEIBT, P. (2007): Anwendung einer neuen standortabhängigen Methode zur Humusbilanzierung an sächsischen Dauertestflächen und Vergleich mit anderen üblichen Methoden zur Feststellung des Versorgungsgrades mit organischer Substanz im Hinblick auf Sicherung der Nachhaltigkeit der Betriebe im konventionellen und ökologischen Landbau. Diplomarbeit, Institut für Bodenkunde und Standortlehre, Technische Universität, Dresden

SLEUTEL, S., DE NEVE, S., BEHEYDT, D., LI, C. & G. HOFMAN (2006): Regional simulation of long-term organic carbon stock changes in cropland soils using DNDC model: 2. Scenario analysis of management options. Soil Use and Management 22, 352–361

SMITH, P., POWLSON, D. S., GLENDINING, M. J. & J. U. SMITH (1997): Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments. Global Change Biol. 3, 67-79

SMITH, J., SMITH, P., WATTENBACH, M., ZAEHLE, S., HIEDERER, R., JONES, R. J. A., MONTANARELLA, L., ROUNSEVELL, M. D. A., REGINSTER, I. & F. EWERT (2005a): Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990 – 2080. Global Change Biology 11, 2141–2152

SMITH, P., ANDREN, O., KARLSSON, T., PERÄLÄ, P., REGINA, K., ROUNSEVELL, M. & B. VAN WESEMAEL (2005b): Carbon sequestration potential in European croplands has been overestimated. Global Change Biology 11, 2153–2163

SMITH, J., SMITH, P., WATTENBACH, M., GOTTSCHALK, P., ROMANENKOV, V. R., SHEVTSOVA, L. K., SIROTENKO, O. D., RUKHOVICH, D. I., KOROLEVA, P. V., ROMANENKO, I. A. & N. V. LISOVOI (2007): Projected changes in the organic carbon stocks of cropland mineral soils of European Russia and the Ukraine, 1990 – 2070. Global Change Biology 13, 342-356

SMITH, P. S., CHAPMAN, J., SCOTT, W. A., BLACK, H. I. J., WATTENBACH, M., MILNE, R., CAMPBELL, C. D., LILLY, A., OSTLE, N., LEVY, P. E., LUMSDON, D. G., MILLARD, P., TOWERS, W., ZAEHLE, S. & J. U. SMITH (2007a): Climate change cannot be entirely responsible for soil carbon loss observed in England and Wales, 1978 – 2003. Global Change Biology 13, 2605–2609

SMITH, P., SMITH, J. U., FRANKO, U., KUKA, K., ROMANENKOV, V. A., SHEVTSOVA, L. K., WATTENBACH, M., GOTTSCHALK, P., SIROTENKO, O. D., RUKHOVICH, D. I., KOROLEVA, P. V., ROMANEKO, I. A. & N. V. LISOVOI (2007b): Changes in mineral soil organic carbon stocks in the croplands of European Russia and the Ukraine, 1990 – 2070; comparison of three models and implications for climate mitigation. Reg. Environ. Change 7, 105–119

STUELPNAGEL, R. (2006): Anforderungen an Energiepflanzen zur Eignung im Zweikultur-Nutzungssystem. Forum Energiepflanzen, Dornburg

TEBRÜGGE, F. & R.-A. DÜRING (1999): Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. Soil and Tillage Research 53 (1), 15-28

TEIWES, K. (1997): Bodenkundliche Bestandsaufnahme auf Feldversuchsflächen der Südzucker AG zur Bodenbearbeitung. Bericht. Südzucker AG, Mannheim

THIEL, E. (2002): Stickstoffhaushalt und sickerwassergebundener Stickstoffaustrag bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung. Diplomarbeit, Universität Leipzig

TOEWS, T. & F. KUHLMANN, (2006): Ökonomische Bewertung des Anbaus und der Nutzung von Energiepflanzen. Forum Energiepflanzen, Dornburg

UBA (Umweltbundesamt Deutschland) (Hrsg.) (2007a): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen – Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG. Umweltbundesamt, Dessau

UBA (2007b): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit E-CHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Umweltbundesamt, Dessau

VANHALA, P., KARHU, K., TUOMI, M., SONNINEN, E., JUNGNER, H., FRITZE, H. & J. LISKI (2007): Old soil carbon is more temperature sensitive than the young in an agricultural field. Soil Biology & Biochemistry 39, 2967–2970

VETTER, A. (2006): Standortgerechte und umweltverträgliche Produktion von Energiepflanzen. Wissenschaftliche Tagung „Energie aus Biomasse – weltwirtschaftliche, ressourcenökonomische und produktionstechnische Perspektiven“, Dachverband Agrarforschung, Braunschweig

VETTER, A. & K. GÖDEKE (2006): Standortangepasste Systeme für Energiepflanzen. Wissenschaftliche Tagung „Energie aus Biomasse – weltwirtschaftliche, ressourcenökonomische und produktionstechnische Perspektiven“, Dachverband Agrarforschung, Braunschweig

WALD, F. (2003): Einfluss der Bearbeitungsintensität beim Umbruch von Luzerne-Kleegras auf die Stickstoffmineralisation zur Folgefrucht Winterweizen im organischen Landbau. Dissertation. Institut für Pflanzenbau und Grünland der Universität, Hohenheim

WERNER, P. C. & F.-W. GERSTENGARBE (1997): A proposal for the development of climate impact szenarios. Climate Research 8, 3, 171–182

WICKE, H.-J., MICHEL, D., LEITHOLD, G. & H. MATTHIES (1990): Fruchtfolgedüngungsversuch Seehausen. Dauerfeldversuche. 2. Auflage, 139-154, Akademie d. Landw.-Wissensch., Berlin

WINKLER, B., PLEINER, I., LORENZ, H., FLEMIG, H., MATTHES, E. & H. NUSCHE (1999): Die landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete im Freistaat Sachsen. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden

WONNEBERGER, C., KELLER, F., BAHNMÜLLER, H., BÖTTCHER, H., GEYER, B. & J. MEYER (2004): Gemüsebau. Ulmer, Stuttgart

ZAEHLE, S., BONDEAU, A., CARTER, T. R., CRAMER, W., ERHARD, M., PRENTICE, I. C., REGINSTER, I., ROUNSEVELL, M. D. A., STICH, S., SMITH, B., SMITH, P. C. & M. SYKES (2007): Projected changes in terrestrial carbon storage in Europe under climate and land-use change, 1990 – 2100. Ecosystems 10, 380–401

ZIBILSKE, L. M., BRADFORD, J. M. & J. R. SMART (2002): Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. Soil & Tillage Research 66, 153–163

7 Anhang

Tabelle A1: Modellierungsergebnisse (N im System, BAT, C_{rep}, C_{org}) für den Lö-Standort

	Anfangsdekade: 2001-2010				Enddekade: 2041-2050				rel. Änderung in % bezogen auf die Anfangsdekade			
Szenario	N im System [kg/ha]	BAT [d/a]	C-REP [kg/ha/a]	Corg [%]	N im System [kg/ha]	BAT [d/a]	C-REP [kg/ha/a]	Corg [%]	N im System	BAT	C-REP	Corg
11	3995	23,9	1800	1,379	4503	30,8	1788	1,439	12,7	28,89	-0,62	4,39
12	3997	24,2	1738	1,379	4320	31	1809	1,406	8,08	27,68	4,03	1,96
13	3995	23,9	1850	1,382	4629	30,8	2225	1,539	15,85	28,89	20,3	11,34
14	3335	25,3	1465	1,243	3529	31,5	1499	1,253	5,82	24,21	2,34	0,79
15	3839	25,2	1488	1,333	3690	32,2	1521	1,279	-3,88	27,77	2,22	-4,06
31	3807	24,9	1502	1,331	3734	32,2	1554	1,289	-1,93	29,27	3,46	-3,17
32	3800	24,9	1521	1,333	3567	32,2	1642	1,315	-6,14	29,28	7,95	-1,35
41	3821	26,1	1466	1,333	3830	30,8	1510	1,337	0,24	17,94	2,98	0,36
42	3704	26,1	946	1,278	3287	30,8	971	1,206	-11,25	17,93	2,63	-5,66
51	3910	24,4	1936	1,384	4345	30,8	1913	1,443	11,13	25,89	-1,18	4,27
52	3963	23,6	1668	1,38	3996	30,5	1615	1,378	0,83	29,4	-3,14	-0,15
53	4415	24,4	2820	1,473	6254	30,9	2784	1,678	41,66	26,63	-1,29	13,93
54	4610	24,4	2522	1,441	7151	30,7	2457	1,588	55,11	25,85	-2,61	10,15
61	4039	26,1	1789	1,364	4552	30,8	1818	1,419	12,7	17,63	1,6	4,01
62	3983	26,1	1616	1,348	4253	30,8	1641	1,372	6,78	17,65	1,52	1,78
63	4181	26,2	1715	1,36	4692	31,5	1744	1,408	12,23	20,33	1,66	3,53
64	4195	24,4	1922	1,386	5232	30,9	1946	1,46	24,73	26,83	1,24	5,37
71	4019	24,6	1847	1,387	4400	32,2	1868	1,422	9,49	31,11	1,17	2,47
81	3779	24,7	1655	1,358	3772	32,4	1737	1,365	-0,18	31,18	4,91	0,51
82	3637	24,7	1302	1,319	3193	32,4	1316	1,238	-12,21	31,16	1,06	-6,08
91	3762	18,6	1752	1,443	4336	25,9	1981	1,536	15,25	39,27	13,07	6,41
92	3482	24,3	1916	1,439	4007	31	2110	1,546	15,08	27,74	10,09	7,44
93	3760	18,6	1756	1,443	4488	25,9	2207	1,58	19,36	39,15	25,67	9,45
94	3480	24,3	1923	1,439	4158	30,9	2345	1,591	19,47	27,57	21,98	10,54
101	3706	19,3	1730	1,433	4241	24,3	1658	1,507	14,45	25,73	-4,21	5,15
102	3451	24,7	1894	1,429	3976	29,7	1842	1,512	15,21	19,91	-2,74	5,76
111	4198	23,7	2949	1,453	5123	30,6	3402	1,657	22,05	29,14	15,33	14,05

Tabelle A2: Modellierungsergebnisse (N im System, BAT, C_{rep}, C_{org}) für den D-Standort

	Anfangsdekade: 2001-2010				Enddekade: 2041-2050				rel. Änderung in % bezogen auf die Anfangsdekade			
Szenario	N im System [kg/ha]	BAT [d/a]	C-REP [kg/ha/a]	Corg [%]	N im System [kg/ha]	BAT [d/a]	C-REP [kg/ha/a]	Corg [%]	N im System	BAT	C-REP	Corg
11	4031	47,7	1460	1,324	3640	47,2	1466	1,234	-9,71	-1,05	0,42	-6,78
12	4108	48,4	1557	1,334	3784	46,7	1642	1,263	-7,88	-3,44	5,48	-5,28
13	4030	47,7	1481	1,325	3700	47,2	1641	1,256	-8,20	-1,05	10,83	-5,21
14	3792	47,6	1399	1,296	3332	46,2	1407	1,195	-12,13	-2,93	0,58	-7,85
15	3973	47,3	1411	1,322	3442	45,5	1414	1,216	-13,37	-3,84	0,17	-8,00
31	3945	47,2	1272	1,312	3391	45,3	1351	1,206	-14,03	-3,88	6,22	-8,14
32	3944	47,2	1278	1,313	3386	45,3	1396	1,212	-14,15	-3,88	9,23	-7,68
41	4009	45,9	1290	1,318	3544	45,2	1316	1,228	-11,60	-1,62	2,00	-6,85
42	3893	45,9	861	1,290	3174	45,2	890	1,158	-18,47	-1,62	3,37	-10,25
51	4025	48,4	1656	1,334	3652	47,2	1632	1,255	-9,27	-2,50	-1,45	-5,98
52	4011	48,3	1440	1,329	3508	47,8	1392	1,232	-12,56	-1,18	-3,35	-7,26
53	4455	48,4	2541	1,392	4770	47,6	2520	1,405	7,08	-1,48	-0,83	0,93
54	4527	48,4	2229	1,369	4796	47,2	2181	1,348	5,94	-2,49	-2,15	-1,58
61	4171	46,0	1655	1,340	3996	45,2	1693	1,290	-4,19	-1,74	2,28	-3,69
62	4118	46,0	1478	1,330	3804	45,2	1513	1,260	-7,64	-1,74	2,32	-5,26
63	4338	46,0	1696	1,347	4226	45,7	1744	1,305	-2,58	-0,58	2,84	-3,15
64	4207	47,7	1743	1,342	4089	46,9	1750	1,287	-2,80	-1,67	0,45	-4,07
71	4070	47,9	1507	1,331	3709	46,1	1505	1,245	-8,86	-3,57	-0,12	-6,46
81	3939	47,7	1602	1,335	3556	45,4	1723	1,273	-9,72	-4,91	7,59	-4,65
82	3851	47,7	1271	1,313	3132	45,4	1371	1,200	-18,67	-4,92	7,81	-8,63
111	4308	50,2	2946	1,400	4586	49,1	3003	1,434	6,46	-2,09	1,95	2,45
112	4379	49,8	3434	1,422	5586	48,5	4211	1,617	27,56	-2,66	22,62	13,71
113	4221	51,0	2389	1,369	4309	50,3	2641	1,360	2,08	-1,47	10,54	-0,61

Tabelle A3: Modellierungsergebnisse (N im System, BAT, C_{rep}, C_{org}) für den V-Standort

	Anfangsdekade: 2001-2010				Enddekade: 2041-2050				rel. Änderung in % bezogen auf die Anfangsdekade			
Szenario	N im System [kg/ha]	BAT [d/a]	C-REP [kg/ha/a]	Corg [%]	N im System [kg/ha]	BAT [d/a]	C-REP [kg/ha/a]	Corg [%]	N im System	BAT	C-REP	Corg
11	5678	18,0	1970	2,128	5886	24,9	1918	2,143	3,65	38,55	-2,61	0,70
12	5540	17,6	1635	2,104	5694	24,9	1854	2,107	2,78	41,67	13,39	0,11
13	5677	18,0	2019	2,132	6149	24,9	2368	2,241	8,31	38,55	17,25	5,14
14	4779	17,9	1320	2,038	4773	25,8	1379	2,044	-0,12	44,19	4,43	0,27
15	5457	17,7	1577	2,125	4897	25,9	1534	2,082	-10,26	46,72	-2,72	-2,03
31	5467	17,7	1460	2,107	4951	26,1	1461	2,053	-9,45	47,30	0,11	-2,56
32	5467	17,7	1479	2,110	4986	26,1	1631	2,101	-8,80	47,29	10,24	-0,42
41	5333	20,0	1383	2,053	5025	25,3	1507	1,990	-5,77	26,51	9,01	-3,07
42	5194	20,0	1012	2,012	4527	25,3	1085	1,879	-12,84	26,51	7,21	-6,60
51	5476	17,8	1729	2,104	5568	24,3	1771	2,099	1,69	36,99	2,42	-0,22
52	5472	18,1	1537	2,094	5236	25,2	1519	2,033	-4,31	39,58	-1,22	-2,91
53	5969	17,9	2530	2,183	6994	24,4	2630	2,341	17,18	36,41	3,96	7,20
54	5986	17,7	2275	2,161	6853	24,3	2315	2,247	14,48	37,33	1,74	3,97
61	5508	20,0	1683	2,084	5601	25,3	1843	2,088	1,68	26,76	9,52	0,20
62	5451	20,0	1537	2,071	5341	25,3	1655	2,036	-2,03	26,72	7,66	-1,66
63	5707	19,9	1822	2,098	5876	25,7	1862	2,111	2,96	28,63	2,20	0,61
64	5586	18,7	1767	2,102	5856	25,0	1864	2,123	4,84	33,26	5,49	0,99
71	5483	18,1	1684	2,090	5499	25,4	1706	2,072	0,31	40,08	1,26	-0,87
81	5466	17,8	1743	2,114	5305	25,5	1812	2,078	-2,95	42,96	3,94	-1,68
82	5324	17,8	1416	2,078	4666	25,5	1401	1,946	-12,35	42,94	-1,08	-6,35
111	5857	15,6	2749	2,275	7029	23,2	3474	2,780	20,01	48,77	26,40	22,19
112	5752	15,8	2493	2,244	7547	23,8	4275	2,961	31,21	50,93	71,48	31,94
113	5769	14,9	2330	2,237	6212	22,5	2650	2,504	7,68	50,89	13,71	11,97

Tabelle A4: Verwendete Bodenparameter (CDYHRZN) der CANDY-Modellierung (Teil 1)

NAME	CIM	BOART	PV	TRD	TSD	FKAP	PWP
3900001	PS	Uls	53,00	1,246	2,650	40,85	13,85
3900001_1_dir	PS	Uls	53,00	1,390	2,629	43,70	13,85
3900001_1_gru	PS	Uls	53,00	1,280	2,629	38,80	13,85
3900001_2_dir	PS	Uls	53,00	1,380	2,637	39,20	13,85
3900001_2_gru	PS	Uls	53,00	1,410	2,636	37,20	13,85
3900001_3_dir	PS	Uls	53,00	1,340	2,637	39,20	13,85
3900001_3_gru	PS	Uls	53,00	1,380	2,635	37,20	13,85
3900002		Uls	39,50	1,603	2,650	31,35	9,35
3900002_dir		Uls	39,50	1,603	2,650	31,35	9,35
3900002_gru		Uls	39,50	1,603	2,650	31,35	9,35
3900003		Uls	39,50	1,603	2,650	31,35	9,35
3900003_dir		Uls	39,50	1,603	2,650	31,35	9,35
3900003_gru		Uls	39,50	1,603	2,650	31,35	9,35
3900004		Ls4	32,50	1,789	2,650	26,60	14,10
3900004_dir		Ls4	32,50	1,789	2,650	26,60	14,10
3900004_gru		Ls4	32,50	1,789	2,650	26,60	14,10
3900005		Ls4	32,50	1,789	2,650	26,60	14,10
3900005_dir		Ls4	32,50	1,789	2,650	26,60	14,10
3900005_gru		Ls4	32,50	1,789	2,650	26,60	14,10
510001	PS	Su2	41,00	1,564	2,650	24,23	6,23
510002		Su2	35,00	1,723	2,650	20,43	4,43
510003		Sl2	29,50	1,868	2,650	12,30	2,70
56990001	PS	Slu	50,50	1,312	2,650	38,95	11,88
56990002		Slu	38,00	1,643	2,650	29,93	9,98
56990002_k	PS	Slu	38,00	1,643	2,650	29,93	9,98
56990003		Sl4	31,00	1,829	2,650	15,30	6,60

Tabelle A5: Verwendete Bodenparameter (CDYHRZN) der CANDY-Modellierung (Teil 2)

NAME	kf	FAT	TON	SCHLUFF	CT	HKAP	KRUME	RELROOTRES	stone_cont
3900001	287	19,63	13	58		0,16	1	0	6
3900001_1_dir	181	19,63	13	58		0,16	1	0	6
3900001_1_gru	276	19,63	13	58		0,16	1	0	6
3900001_2_dir	405	19,63	13	58		0,16	1	0	6
3900001_2_gru	210	19,63	13	58		0,16	1	0	6
3900001_3_dir	436	19,63	13	58		0,16	1	0	6
3900001_3_gru	448	19,63	13	58		0,16	1	0	6
3900002	192	19,63	13	58		0,16	0	0,24	6
3900002_dir	192	19,63	13	58		0,16	0	0,24	6
3900002_gru	192	19,63	13	58		0,16	0	0,24	6
3900003	192	19,63	13	58		0,16	0	0,24	6
3900003_dir	192	19,63	13	58		0,16	0	0,24	6
3900003_gru	192	19,63	13	58		0,16	0	0,24	6
3900004	158	23,60	21	23		0,16	0	0,42	6
3900004_dir	158	23,60	21	23		0,16	0	0,42	6
3900004_gru	158	23,60	21	23		0,16	0	0,42	6
3900005	158	23,60	21	23		0,16	0	0,7	6
3900005_dir	158	23,60	21	23		0,16	0	0,7	6
3900005_gru	158	23,60	21	23		0,16	0	0,7	6
510001	1017	5,95	3	18		0,16	1	0,16	6
510002	883	5,95	3	18		0,16	0	0,54	6
510003	817	9,76	7	18		0,16	0	0,54	37,5
56990001	299	18,28	13	45		0,16	1	0,04	6
56990002	209	18,28	13	45		0,16	0	0,36	6
56990002_k	209	18,28	13	45		0,16	1	0,36	6
56990003	481	18,10	15	25		0,16	0	0,42	37,5

Tabelle A6: Verwendete Pflanzenparameter (CDYPFLAN) der CANDY-Modellierung (Teil 1)

ITEM_IX	old_item	NAME_engl	NAME	NAME_lat	HI	ART	MODELL	TRANSK	ALGO	STEIL	VEGDAU	NBOK	LNUB	WTMAX	WWG
21		white cabbage	white cabbage	Brassica oleracea		1	CANDY_S	0,5	1	1,43	150	0	0	9	10
160		pea (grain)	pea (grain) old EWR	Pisum sativum	1,33	3	CANDY_S	1	1	2,66	115	0,4	0,15	12	6
161		potato	potato 0.45 (0.35)	Solanum tuberosum		1	CANDY_S	1,25	1	2,09	120	0	0	15	5,5
163	0	winter wheat 15%RP	w. wheat 2.66	Triticum aestivum	0,93	2	CANDY_S	1,47	2	1,22	165	0	0	20	5,5
165	0	winter rye 11%RP	w. rye 1.96	Secale cereale	1,29	2	CANDY_S	0,8	2	1,3	165	0	0	17	5,5
166	0	winter barley 13%RP	w. barley 2.19	(Hordeum vulgare)?	0,94	2	CANDY_S	0,8	2	2,09	160	0	0	16	5,5
168	0	sp. barley brewing 11%RP	sp. barley brew 1.86		1,03	1	CANDY_S	1,35	1	3,03	125	0	0	15	5,5
169	0	w. triticale 13%RP	triticale 2.24		1,1	2	CANDY_S	0,8	2	1,26	165	0	0	19	5,5
170	0	winter rape-seed 23%RP	w. rape 4.47	Brassica napus	1,7	2	CANDY_S	0,8	2	1,8	165	0	0	16	6
171	0	grain-maize 11%RP	maize grain 2.41	Zea mays	1	1	CANDY_S	1	1	3,03	150	0	0	16	5
172	0	silo maize	maize silo 0.38	Zea mays		1	CANDY_S	1	1	3,2	132	0	0	16	5
174	0	sugar beet	sugar beet 0.46	Beta vulgaris	0,7	1	CANDY_S	1,39	1	2,36	180	0	0	20	5,5
231	0	öko winter wheat 11%RP	w. wheat öko 2.02	Triticum aestivum	0,93	2	CANDY_S	1,47	2	1,22	165	0	0	20	5,5
232	0	öko winter barley 10%RP	w. barley öko 1.74	(Hordeum vulgare)?	0,94	2	CANDY_S	0,8	2	2,09	160	0	0	16	5,5
233	0	öko sp. barley 10%RP	sp. barley öko 1.7		1,03	1	CANDY_S	1,35	1	3,03	125	0	0	15	5,5
235	0	öko winter rye 9.5%RP	w. rye öko 1.71	Secale cereale	1,29	2	CANDY_S	0,8	2	1,3	165	0	0	17	5,5
238	0	öko pea fodder (grain)	pea fodder (grain) öko	Pisum sativum	1,33	3	CANDY_S	1	1	2,66	120	0,32	0,3	12	6
239	0	öko potato	potato öko 0.44 (0.34)	Solanum tuberosum		1	CANDY_S	1,25	1	2,09	120	0	0	15	5,5
240	0	öko silo maize	maize silo öko 0.32	Zea mays		1	CANDY_S	1	1	3,2	132	0	0	16	5
243	0	öko w. rape-seed 21%RP	w. rape öko 3.69	Brassica napus	1,7	2	CANDY_S	0,8	2	1,8	165	0	0	16	6
249	0	clover-gras (permanent)	clover-gras (50:50 perm)			5	CDYDGRN	0,65	3	1,5	240	0,69	0,3	13	6
502	0	Mustard	Mustard		1,9	2	ZALF_ZF	0,8	2	2	120	0	0	18	6
506	0	energy maize	maize energy 0.4	Zea mays		1	CANDY_S	1	1	3,2	132	0	0	16	5

Tabelle A7: Verwendete Pflanzenparameter (CDYPFLAN) der CANDY-Modellierung (Teil 2)

ITEM_IX	DBHMAX	BHMAX	MATANF	TEMPANF	BGMAX	DBGMAX	CEWR	FEWR	N_GEHALT	Czep	Zetb	EWR_IX	GRD_IX	TK_MIN	TS1	TS2	SBA_ID	KOP_IX
21	100	50	0	30	0,9	90	0	0,66	0,4	0,025	0	39	9					
160	63	65	28	28	1	49	35	0,0392	5,1	0,025	0	45	86				160	
161	51	50	14	21	1	35	3,2	0,264	0,35	0,025	0	22	9				161	
163	109	90	30	14	1	86	8	0,0601	2,66	0,025	0	30	88				163	78
165	106	110	30	16	1	84	8	0,0816	1,96	0,025	0	29	88				165	83
166	103	80	30	28	1	88	8	0,073	2,19	0,025	0	28	88				166	82
168	75	70	30	35	1	60	5,2	0,0699	1,86	0,025	0	26	88				168	79
169	108	100	30	21	1	85	8	0,0715	2,24	0,025	0	52	88				169	84
170	140	160	45	21	1	100	6,6	0,0984	4,47	0,025	0	40	9				170	81
171	72	200	30	28	1	50	27	0,0498	2,41	0,025	0	42	88				171	76
172	72	200	0	28	1	50	23,1	0,0292	0,38	0,025	0	31	88				172	
174	87	60	0	35	1	52	8	0,087	0,46	0,025	-0,5	19	9				174	80
231	109	95	30	14	1	86	8	0,0792	2,02	0,025	0	30	88				163	78
232	103	85	30	28	1	88	8	0,092	1,74	0,025	0	28	88				166	82
233	75	70	30	35	1	60	5,2	0,0765	1,7	0,025	0	26	88				168	79
235	106	135	30	16	1	84	8	0,0936	1,71	0,025	0	29	88				165	83
238	63	65	28	28	1	49	2,92	0,2558	4,3	0,025	0	50	86				160	59
239	51	50	14	21	1	35	3,2	0,1176	0,34	0,025	0	22	9				161	
240	72	200	0	28	1	50	23,1	0,0348	0,32	0,025	0	31	88				172	
243	140	160	45	21	1	100	6,6	0,1192	3,69	0,025	0	40	9				170	81
249	50	70	0	35	1	40	105	0	0,52	0,025	0	54	69	0,25	600	1500		
502	45	40	0	1	1	14	20	0	2,25	0,025	0	40	9	0	0	0	0	9
506	72	200	0	28	1	50	23,1	0,0292	0,4	0,025	0	31	88				172	

Tabelle A8: Verwendete Parameter der organischen Dünger (CDYOPSPA) der CANDY-Modellierung

ITEM_IX	SBA_ID	NAME	CROP_IX	OD	K	ETA	CNR	CNR_ALT	TS_GEHALT	C_GEH_TS	MOR
9		green manuring(6%C)	0	WAHR	0,2	0,5	14,4	12	0,14	0,429	0,2
19		sugar beet	1	FALSCH	0,4	0,35	20	20	1	1	0
22		potato	4	FALSCH	0,35	0,5	40	40	1	1	0
26		spring barley	8	FALSCH	0,1	0,55	60	60	1	1	0
28		winter barley	10	FALSCH	0,1	0,55	50	50	1	1	0
29		winter rye	11	FALSCH	0,1	0,55	50	50	1	1	0
30		winter wheat	12	FALSCH	0,1	0,55	50	50	1	1	0
31		maize for silage	13	FALSCH	0,1	0,58	45	45	1	0	0
39		white cabbage	21	FALSCH	0,2	0,65	16	30	1	0	0
40		winter rape	22	FALSCH	0,3	0,4	30	30	1	1	0
42		grain maize	24	FALSCH	0,1	0,62	50	50	1	1	0
45		pea old EWR	27	FALSCH	0,15	0,55	50	50	1	1	0
50		pea EWR roots	179	FALSCH	0,35	0,5	20	20	1	1	0
52		triticale	169	FALSCH	0,1	0,55	50	50	1	1	0
54		clover-grass	221	FALSCH	0,25	0,4	23,5	23,5	1	1	0
59	0	straw pea	179	WAHR	0,3	0,45	38	38	0,86	0,46	0
69		clover-gras-cut (50:50)	0	WAHR	0,18	0,43	18,15	16,5	0,21	0,42	0,1
78		straw wheat BDF	0	WAHR	0,15	0,52	95	95	0,86	0,44	0
79		straw sp barley BDF	0	WAHR	0,15	0,55	85	85	0,8	0,44	0
80		leaves s beet BDF	0	WAHR	0,2	0,65	19,8	18	0,18	0,36	0,1
81		straw rape BDF	0	WAHR	0,2	0,46	43	43	0,81	0,44	0
82		straw w. barley BDF	0	WAHR	0,15	0,5	85	85	0,8	0,43	0
83		straw w. rye BDF	0	WAHR	0,15	0,5	85	85	0,8	0,44	0
84		straw triticale BDF	0	WAHR	0,15	0,5	90	90	0,86	0,44	0
86		alfalfa cut	0	WAHR	0,2	0,4	15,4	14	0,2	0,42	0,1
88		grass 2 cuts	0	WAHR	0,15	0,5	20,2	18,4	0,22	0,415	0,1
200	90	Stallmist Rind	0	WAHR	0,1	0,6	18	14,07	0,25	0,31	0,28
206	92	Gülle normal Rind	0	WAHR	0,05	0,65	16	7,77	0,08	0,34	1,06
207	92	Gülle normal Schwein	0	WAHR	0,05	0,65	13	4,66	0,08	0,31	1,79
208	92	Biogasgülle Rind (Uwe)	0	WAHR	0,05	0,65	13,17	5,72	0,07	0,26	1,3
209	92	Biogasgülle Mais (Uwe)	0	WAHR	0,05	0,65	13,47	4,84	0,065	0,29	1,79
330	90	Hühnertrockenkot	0	WAHR	0,1	0,6	8,7411	5,2446	0,55	0,267	0,6667
340	90	Kompost	0	WAHR	0,05	0,65	16,84210526	16	0,64	0,21	0,052631579
380	92	Biogasgülle (MARK O.)	0	WAHR	0,1	0,6	18,5185	6,4815	0,05	0,35	1,8571

Tabelle A9: Einfluss von Klimawandel (LfUG-Szenario) und Bewirtschaftungsverfahren auf die C_{org}- und N_t-Entwicklung im Durchschnitt der Berechnungsverfahren

Verfahren	Vari-ante	C_{org}-Entwicklung (% TM)				N_t-Entwicklung (% TM)			
Standort:		**D**	**Lö**	**V**	**Mittelwert**	**D**	**Lö**	**V**	**Mittelwert**
Klima-Szenario (Var. 11)	C R	-0,126 -0,167	0,059 -0,093	0,023 -0,428	-0,015 -0,229 **-0,122**	-0,017	-0,0102	-0,0329	-0,0200
Ertragsanstieg Kon	13	0,026	0,0995	0,0945	0,0733	0,003	0,0096	0,0098	0,00747
Umstellung Öko	31	0,021	0,0573	0,080	0,0528	-0,019	-0,0072	0,0044	-0,00727
Ertragsanstieg Öko	32/31	0,021	0,0595	0,109	0,0632	0,0062	0,0132	0,0177	0,0124
Energiemais 50 %	41	-0,088	-0,1033	-0,1648	-0,1187	-0,0043	-0,0032	-0,0066	-0,00470
Energiemais+Abfuhr	42	-0,170	-0,2215	-0,2638	-0,2356	-0,0066	-0,0066	-0,0099	-0,00770
Getreide 100 %	51	-0,026	-0,0375	-0,1013	-0,0549	-0,0019	-0,0111	-0,0188	-0,0106
Hackfrucht 30 %	52	-0,079	-0,09725	-0,1490	-0,1084	-0,0028	-0,0051	-0,0094	-0,00577
Hackfrucht+Kompost	52a	0,243	0,2380	0,1393	0,2068	0,0088	0,0062	0,0022	0,00573
Getreide+Kompost	53	0,279	0,2875	0,2260	0,2642	0,0122	0,0026	-0,0047	0,00337
Getreide+Hühnerkot	54	0,096	0,0953	0,0338	0,0750	0,0138	0,0035	-0,0033	0,00467
Rindergülle 2 GVE	61	-0,014	-0,0373	-0,09	-0,0471	0,0006	-0,0002	-0,0033	-0,00097
Biogasgülle 2 GVE	62	-0,050	-0,0775	-0,1315	-0,0863	-0,0005	-0,0013	-0,0044	-0,00207
Stalldung 2 GVE	63	0,072	0,0250	-0,0053	0,0306	0,0027	0,0014	-0,0015	0,00087
Schweinegülle 2 GVE	64	0,083	0,077	0,0338	0,0646	0,0084	0,0066	0,0041	0,00637
Ackerfutter 20 %	71	0,076	0,133	0,092	0,1003	-0,0089	0,0029	0,0088	0,00093
Legum.-Gras 50 %	81	0,120	0,159	0,121	0,1333	-0,0259	0,003	0,0145	-0,00280
Legum.-Gras+Abfuhr	82	0,035	0,0527	0,0260	0,0379	-0,0281	0,0005	0,0120	-0,00520
Grünland+Abfuhr	11X	0,264	0,275	0,270	0,2697	-0,0309	-0,005	0,0261	-0,00327
Grünland-Stilllegung	11Z	0,337	0,332	0,349	0,3393	-0,0501	-0,0359	0,0005	-0,0285
Mähweide	111	0,20	-	0,637	0,4185				
Weide	112	0,383	-	0,818	0,6005				
Wiese	113	0,126	0,218	0,361	0,2350				

C = CANDY; R = REGRESS

Impressum

Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Internet: www.smul.sachsen.de/lfulg

Autor: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilung Pflanzliche Erzeugung
Dr. Hartmut Kolbe
Gustav-Kühn-Straße 8
04159 Leipzig
Telefon: 0341 9174-149
Telefax: 0341 9174-111
E-Mail: hartmut.kolbe@smul.sachsen.de

Redaktion: siehe Autor

Foto Titelseite: Dr. Uwe Franko, UFZ Halle

Endredaktion: Öffentlichkeitsarbeit
Präsidialabteilung

ISSN: 1867-2868

Redaktionsschluss: Juli 2009

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:
Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

Verteilerhinweis
Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.