

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Autoren:

Dr. agr. Reinhold Stülpnagel
Dr. agr. Christine von Buttlar
Dipl. Ing. agr. Florian Heuser
Prof. Dr. Michael Wachendorf

Datum: 30.06.2009

Verbundvorhaben:

Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands

Teilprojekt 6 (FKZ: 220022805):

**Systemversuch zum Zweikultur-Nutzungssystem
auf sechs Standorten im Bundesgebiet**

Schlussbericht

Versuchszeitraum von Sommer 2005 bis Herbst 2008



Universität Kassel, FB 11, Fachgebiet Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe
Steinstr. 19; 37213 Witzenhausen

www.agrar.uni-kassel.de/gnr/



Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	8
2	MATERIAL UND METHODEN	11
2.1	<i>Versuchsvarianten und Vorgaben zum Anbau</i>	<i>11</i>
2.2	<i>Vorgaben zur Düngung und zum Pflanzenschutz</i>	<i>13</i>
2.3	<i>Durchgeführte Untersuchungen, Statistik, Kostenrechnung</i>	<i>14</i>
3	ERGEBNISSE	18
3.1	<i>Standortbeschreibung</i>	<i>18</i>
3.1.1	Böden an den Versuchsstandorten	18
3.1.2	Witterung an den Versuchsstandorten.....	19
3.1.3	Ertragsniveau an den Versuchsstandorten.....	22
3.2	<i>Erträge im Systemversuch.....</i>	<i>23</i>
3.2.1	Erträge im Gesamtversuch	23
3.2.1.1	Erträge am Standort Dornburg	28
3.2.1.2	Erträge am Standort Gülzow	30
3.2.1.3	Erträge am Standort Haus Düsse.....	31
3.2.1.4	Erträge am Standort Rauischholzhausen.....	33
3.2.1.5	Erträge am Standort Straubing	34
3.2.1.6	Erträge am Standort Werlte.....	36
3.2.1.7	Erträge am Standort Witzenhausen.....	37
3.2.2	Erträge im Standortvergleich.....	39
3.2.2.1	Mais und Sonnenblumen als Hauptfrucht bzw. in Zweikultur-Nutzung.....	39
3.2.2.2	Sorghum-, Sudangras-Hybride und Roggen-GPS im Standortvergleich	40
3.3	<i>Genutzte Vegetationstage und Bestandesentwicklung</i>	<i>42</i>
3.4	<i>Qualität des Erntegutes und berechneter Energieertrag</i>	<i>49</i>
3.4.1	Ergebnisse der Nährstoffanalyse	50
3.4.1.1	Nährstoffentzug und Hinweise für die Düngung	52
3.4.1.2	C:N:P:S – Verhältnis im Erntegut.....	54
3.4.2	Ergebnisse der Weender Analyse.....	54



3.4.3	Methanerträge.....	56
3.4.4	Heiz- und Brennwert.....	58
3.5	<i>Ökonomische Bewertung</i>	60
3.6	<i>Ökologische Bewertung</i>	64
3.6.1	Vergleich zwischen Reinanbau und Gemengeanbau	64
3.6.2	Mengen an N_{\min} im Boden und Wassergehalt des Bodens.....	66
3.6.3	Nährstoffbilanz.....	71
4	DISKUSSION	74
4.1	<i>Faktor Wasser</i>	76
4.2	<i>Faktor Standort</i>	78
4.3	<i>Ökonomie</i>	80
4.4	<i>Ökologie</i>	80
5	ZUSAMMENFASSUNG	81
6	LITERATUR	84



Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabellen

- Tab. 1: Versuchsvarianten im Systemversuch, angebaute Sorte (Name) und angestrebtes Entwicklungsstadium zur Ernte [BBCH-Code]..... 11
- Tab. 2: Kurzübersicht Energiepflanzen-Düngeschema: Abzuziehende N-Menge vom Sollwert als Korrektur für den vorgezogenen Erntezeitpunkt und die Nutzung als Bioenergie 13
- Tab. 3: Übersicht zu den wichtigsten Parametern der Kostenrechnung 17
- Tab. 4: Bodenkundliche Kenndaten der Versuchsstandorte (Quelle: DEUMLICH, 2008)..... 18
- Tab. 5: Jahresniederschlag sowie Jahresmittel der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und der täglichen Globalstrahlung im mehrjährigen Mittel (1998-2007) und Höhe der Versuchsstandorte über NN (Quelle: Angaben der Versuchsansteller)..... 19
- Tab. 6: Übersicht zu den Durchschnittserträgen und ihrer Spannweite an den Versuchsstandorten bzw. in ihrer unmittelbaren Umgebung (Quelle: Angaben der Versuchsansteller) 22
- Tab. 7: Statistische Auswertung zu den Jahreserträgen (adjustierte Mittelwerte einschließlich Standardfehler) zu den Versuchsvarianten über sieben Versuchsstandorte und drei Jahre (Varianten mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% nicht signifikant voneinander)..... 27
- Tab. 8: Übersicht zu den Aussaat- und Ernteterminen sowie BBCH Stadien zur Ernte im Mittel der sieben Standorte und drei Versuchsjahre..... 42
- Tab. 9: Jahres-Deckungsbeiträge der geprüften Varianten an den sieben Versuchsstandorten im Mittel von drei Jahren (€/ha, bezogen auf den Zeitraum eines Jahres) 63
- Tab. 10: Bestimmtheitsmaße der multiplen Regression des Ertrages von Mais und Sonnenblumen mit verschiedenen Kenngrößen der Witterung und des Bodens. Lufttemperatur: Summe der Lufttemperaturen über 6°C von der Saat bis zur Ernte; Strahlung: Summe der Globalstrahlung von der Saat bis zur Ernte; Niederschlag: Niederschlagssumme von der Saat bis zur Ernte; pflanzenverfügbares Wasser im Boden zur Saat in Prozent der nFKWe77
- Tab. 11: Bestimmtheitsmaße der multiplen Regression des Ertrages von Mais und Sonnenblumen mit verschiedenen Kenngrößen der Witterung und des Bodens. Lufttemperatur: Summe der Lufttemperaturen über 6°C von der Saat bis zur Ernte; Strahlung: Summe der Globalstrahlung von der Saat bis zur Ernte; Niederschlag: Niederschlagssumme von der Saat bis zur Ernte; pflanzenverfügbares Wasser im Boden zur Saat in Prozent der nFKWe77



Abbildungen

Abb. 1: Lage der Versuchsstandorte	10
Abb. 2 Jahresniederschlag (mm, oben) und Jahresmittel der Lufttemperatur (°C, unten) im mehrjährigen Mittel und für die Versuchsjahre 2006- 2008 an den Versuchsstandorten ...	20
Abb. 3: Jahres-Trockenmasseerträge der Varianten im Mittel der sieben Standorte im Erntejahr 2006 (oben), 2007 (Mitte) und 2008 (unten), Säule mit Standardabweichung	24
Abb. 4: Jahres-Trockenmasseerträge (oben) und Trockensubstanzgehalte (unten) im Mittel der Standorte und der Erntejahre 2006, 2007 und 2008; Säule mit Standardabweichung	26
Abb. 5: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahre 2006 - 2008 am Standort Dornburg; Säule mit Standardabweichung	29
Abb. 6: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahres 2006 - 2008 am Standort Gülzow; Säule mit Standardabweichung	31
Abb. 7: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahres 2006 - 2008 am Standort Haus Düsse; Säule mit Standardabweichung.....	32
Abb. 8: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahres 2006 - 2008 am Standort Rauischholzhausen; Säule mit Standardabweichung	33
Abb. 9: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahres 2006 - 2008 am Standort Straubing; Säule mit Standardabweichung	35
Abb. 10: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahres 2006 - 2008 am Standort Werlte; Säule mit Standardabweichung.....	37
Abb. 11: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahres 2006 - 2008 am Standort Witzenhausen; Säule mit Standardabweichung	38
Abb. 12: Jahres-Trockenmasseerträge von Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf bzw. in der Zweikultur-Nutzung mit Roggen an den sieben Standorten in den Jahren 2006-2008.....	40
Abb. 13: Jahres-Trockenmasseerträge von Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung nach Senf bzw. in Zweikultur-Nutzung mit Roggen an den sieben Standorten in den Jahren 2006-2008.....	40
Abb. 14: Jahres-Trockenmasseerträge in der Zweikultur-Nutzung mit Roggen und Sorghum-Hybride sowie mit Roggen/Gersten-Gemenge und Sudangras-Hybride an den sieben Versuchsstandorten in den Jahren 2006-2008	41



Abb. 15: Jahres-Trockenmasseerträge der Hauptfrüchte Mais nach Senf im Vergleich zu Roggen-GPS gefolgt von Senf an den sieben Versuchsstandorten in den Jahre 2006-2008.....41

Abb. 16: Entwicklung (BBCH Stadien) von Mais im Hauptfruchtanbau nach Senf (oben) und von Mais als Zweitkultur nach Roggen (unten) an sieben Standorten im Erntejahr 200843

Abb. 17: Anzahl Tage von der Aussaat bis zur Ernte und Reifegrad zur Ernte (BBCH-Stadium) von Mais in Hauptfruchtstellung und als Zweitkultur an den Versuchsstandorten im Mittel der Jahre 2006 – 2008.....45

Abb. 18: Trockenmasseertrag und täglicher Zuwachs für Mais in Hauptfrucht- und Zweitfruchtstellung an den sieben Versuchsstandorten im Mittel der Jahre 2006 – 2008 ..45

Abb. 19: Trockenmasseertrag und mittlerer täglicher Biomassezuwachs von Mais in Hauptfrucht- und in Zweitkultur-Nutzung im Mittel der Standorte für die Jahre 2006, 2007 und 200846

Abb. 20: Anzahl Tage von der Aussaat bis zur Ernte und Reifegrad zur Ernte (BBCH) von Mais in Hauptfruchtstellung und als Zweitkultur im Mittel der Standorte für die Jahre 2006-200846

Abb. 21: Beziehung zwischen der Anzahl Tage von der Aussaat bis zur Ernte und dem Jahresertrag für Mais als Hauptfrucht und als Zweitkultur nach Roggen (oben); Beziehung zwischen dem täglichen Biomassezuwachs und dem Jahresertrag für Mais als Hauptfrucht und Mais als Zweitkultur nach Roggen (Mitte); Beziehung zwischen dem täglichen Biomassezuwachs und dem Ertrag von Mais in Hauptfruchtstellung, Roggen als Erstkultur sowie Mai als Zweitkultur; mit den Ergebnissen von sieben Standorten und aus drei Jahren (unten)48

Abb. 22: Beziehung zwischen dem Jahrestag des Aufgangs und dem Jahresertrag für Mais (oben) und Sonnenblumen (unten) in Hauptfruchtstellung (links) und in Zweitkultur-Nutzung (rechts) mit den Ergebnissen von sieben Standorten und aus drei Jahren [Jahrestag 120 = 1. Mai; 150 = 1. Juni; 180 = 1. Juli].....49

Abb. 23: Aschegehalte im Erntegut der untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren50

Abb. 24: Gehalte an N, P, K (oben), an Ca, Mg, Na (Mitte) und an S und Cl (unten) im Erntegut (TM) der untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Versuchsstandorten und drei Versuchsjahre51

Abb. 25: Mengen (kg/ha) an N, P, K (oben), an Ca, Mg, Na (Mitte) und S, Cl (unten) im Erntegut der untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren53



Abb. 26: C:N:P:S-Verhältnis im Erntegut der untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren sowie angestrebtes Verhältnis (Soll-Verhältnis; rechts)54

Abb. 27: Inhaltsstoffe („erweiterte“ Weender Analyse) im Erntegut der untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren55

Abb. 28: Berechnete spezifische Methanerträge (l_N CH₄/kg oTS) verschiedener Kulturen im Mittel von drei Jahren und sieben Standorten.....56

Abb. 29: Berechnete Jahres-Methanerträge (Nm³ CH₄/ha) der Versuchsvarianten im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren57

Abb. 30: Heiz- und Brennwerte der untersuchten Kulturen (kJ/kg TM) im Mittel der sieben Standorte und drei Jahre58

Abb. 31: Berechnete Jahres-Energieerträge je Hektar bei thermischer Verwertung (Basis Heizwert) für die untersuchten Varianten im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren59

Abb. 32: Berechnete Jahres-Energieerträge je Hektar bei thermischer Verwertung (Basis Heizwert) im Vergleich zu dem berechneten Energieerträgen bei der Biogasbereitung (Basis Heizwert, dargestellt als Relativwert zu den Jahres-Energieerträgen (= 100%) für die untersuchten Varianten im Mittel der sieben Standorte und drei Jahre59

Abb. 33: Arbeiterledigungskosten/ m³ Methan bezogen auf den Jahres-Methanertrag/ha für die untersuchten Varianten im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren61

Abb. 34: Jahres-Deckungsbeiträge (DB) für die untersuchten Varianten (€/ha, bezogen auf den Jahresertrag) im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren62

Abb. 35: Vergleich der Trockenmasseerträge im Rein- und Mischanbau , ausgewählte Varianten im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren65

Abb. 36: N_{min} im Boden (0 – 90cm) nach der Ernte für die untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren67

Abb. 37: N_{min} im Boden (0–90 cm) nach der Ernte von Mais, Sonnenblumen und Roggen in Hauptfruchtstellung mit Senf, von Mais und Sonnenblumen nach Grünroggen sowie Mais nach Roggen/Erbsen-Gemenge für die Jahre 2006, 2007 und 2008 im Mittel von sieben Standorten.....67

Abb. 38: N_{min}-Menge im Boden (0-90cm) im Jahresverlauf von Frühjahr bis zu Vegetationsende im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren. Vergleich von Roggen-GPS mit Mais,



Sonnenblumen und Mais/Sonnenblumen-Gemenge nach Roggen sowie nach Roggen/Erbsen-Gemenge.....68

Abb. 39: Wasserversorgung des Bodens im Frühjahr vor der Saat von Mais und Sonnenblumen als Hauptfrüchte und zur Saat als Zweitkulturen in Prozent der nFK der Bodenschicht 0-30 cm69

Abb. 40: Wassergehalt des Bodens (Gew. %) nach der Ernte von den Kulturen in Hauptfruchtstellung und als Zweitkulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren (oben) und für die einzelnen Versuchsstandorte im Mittel der Kulturen und Jahre (unten)70

Abb. 41: N-Düngung (kg/ha), Ertrag (dt/ha), N-Entzug (kg/ha), N-Jahresbilanz (kg/ha), N-Nachlieferung (kg/ha) und Änderung des Bodenvorrates an pflanzenverfügbarem Stickstoff (kg/ha) für verschiedene Varianten aus Haupt- und Zwischenfrucht bzw. Erst- und Zweitkultur im Mittel der Standorte und Jahre 2006 – 200871

Abb. 42: N-Jahresbilanz der Winterungen und der Sommerungen sowie Jahresbilanz im Mittel der sieben Standorte und drei Jahre72

Abb. 43: N-Jahresbilanz für ausgewählte Varianten im Mittel der Standorte für die Jahre 2006-2008 72

Abb. 44: P-Jahresbilanz (oben) und K-Jahresbilanz (unten) der untersuchten Varianten im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren73

Abb. 45: Relativer Mehrertrag von Roggen und Mais in Zweikultur-Nutzung gegenüber Mais in Hauptfurcht-Nutzung mit Zwischenfrucht an den sieben Standorten (Bp. = Bodenpunkte) in den Jahren 2006-2008 sowie im Mittel für die Gruppe der „Ungunst-„ und „Gunststandorte“78

Abb. 46: Relativer Mehrertrag von Roggen und Sonnenblumen in Zweikultur-Nutzung gegenüber Sonnenblumen in Hauptfurcht-Nutzung mit Zwischenfrucht an den sieben Standorten (Bp. = Bodenpunkte) in den Jahren 2006-2008 sowie im Mittel für die Gruppe der „Ungunst-„ und „Gunststandorte“79



1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Im Rahmen des Verbundvorhabens „Energiepflanzenanbau zur Biogasgewinnung“ hat das Fachgebiet Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe (GNR) an der Universität Kassel im Zeitraum von Sommer 2005 bis Januar 2009 das Teilprojekt 6 „Systemversuch zum Zweikultur-Nutzungssystem auf sechs Standorten im Bundesgebiet“ koordiniert. Abweichend vom Projekttitle umfasst das Vorhaben Feldversuche auf sieben Standorten, da der Versuch an dem hochschuleigenen Versuchsstandort bei Witzenhausen, der in gleicher Weise wie die Versuche an den anderen Standorten durchgeführt wurde, nach der Antragsstellung mit in das Projekt aufgenommen wurde. Somit umfasst der vorliegende Endbericht die Ergebnisse von sieben Versuchsstandorten aus drei Jahren. Gefördert wurde das Vorhaben durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über den Projektträger Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (FNR, 2009; TLL, 2009). Für die Förderung und die sehr gute Begleitung des Vorhabens möchten wir uns an dieser Stelle sehr herzlich bedanken.

Der Schwerpunkt dieses Teilprojektes liegt in der eingehenden Prüfung des Zweikultur-Nutzungssystems, das den Anbau von zwei aufeinander folgenden, vergleichbar ertragreichen Kulturen im Zeitraum eines Jahres mit der Ernte zur Silagebereitung zur Grundlage hat. In dem System werden hohe Flächenerträge mit der Vielfalt der kultivierbaren Arten, dem weitgehenden Verzicht auf Pflanzenschutzmittel und einer nahezu ganzjährige Bodenbedeckung verbunden. Um die Vorzüge und Grenzen dieses Anbaukonzeptes erkennen zu können, wurde in einem dreijährigen **Systemversuch** das **Zweikultur-Nutzungssystem (2cult)** der üblichen **Hauptfrucht-Nutzung**, verbunden mit dem Anbau von Zwischenfrüchten, gegenübergestellt. Neben der Ertragsleistung unterschiedlicher Kulturarten in den Anbausystemen an sieben Standorten in Deutschland steht im vorliegenden Projekt auch die Bewertung der Biomassequalitäten für die energetische Nutzung in Form der Biogasbereitung und der Synthesegasgewinnung im Vordergrund. Gleichzeitig werden in dieser Untersuchung die Umweltauswirkungen des Biomasseanbaus abgeschätzt und die Anbaukonzepte ökonomisch bewertet. Alle Ergebnisse sollen schließlich Eingang in die landwirtschaftliche Beratung finden und somit einen aus ökologischer und ökonomischer Sicht optimierten Anbau von Energiepflanzen unterstützen.

Folgende Versuchsfragen liegen dem Teilprojekt zugrunde:

- Unter welchen Standortbedingungen ist das System der Zweikultur-Nutzung einer Hauptfrucht-Nutzung mit Zwischenfrüchten aus der Sicht des Jahres-Biomasse- und des Jahres-Energieertrages deutlich überlegen?
- Welche Kulturen können zur Realisierung artenreicher Fruchtfolgen an den verschiedenen Standorten für den Anbau in der Zweikultur-Nutzung empfohlen werden?
- Ist im Zweikultur-Nutzungssystem ein Gemengeanbau von ausgewählten Erst- und Zweitkulturen dem Reinanbau dieser Kulturen vorzuziehen?



- Welche Auswirkungen sind bei Anwendung der geprüften Anbausysteme für die Umwelt hinsichtlich Nitratverlagerung, Bodenerosion, Wildpflanzendynamik und Einsparpotenzialen von Pflanzenschutzmitteln zu erwarten?
- Welche qualitativen Eigenschaften hat das Erntegut der Versuchskulturen im Hinblick auf eine energetische Nutzung?
- Welche Schlussfolgerungen sind aus dem ökonomischen Vergleich zwischen der Zweikultur-Nutzung und der Hauptfrucht-Nutzung mit Zwischenfrüchten zu ziehen?

Im Rahmen des vorliegenden Endberichtes wird versucht, alle wesentlichen Versuchsergebnisse mitzuteilen und Schlussfolgerungen zu ziehen. Aus der Sicht der Lesbarkeit werden aus der Vielzahl der Ergebnisse aus drei Versuchsjahren und von sieben Versuchsstandorten Teile ausgegliedert und in dem Anhang zu diesem Bericht eingefügt, auf den an dieser Stelle verwiesen sei.

Gleichzeitig sei angemerkt, dass die bereits erzielten Versuchsergebnisse schon Grundlage für eine Weiterentwicklung der Fragstellung sind. Seit Herbst 2009 werden im Rahmen eines Anschlussprojektes bis Ende 2010 weitere Anbauversuche für ausgewählte Varianten des Zweitkultur-Nutzungssystems durchgeführt (KORB) und parallel hierzu die Biomassebereitstellung unter ökologischen Anbaubedingungen geprüft (ÖKOVERS).

Versuchsstandorte und Projektpartner:

Um möglichst viele Umwelten (unterschiedliche Bodenarten, Wasserversorgung, Temperatur, Vegetationszeit und Einstrahlung) in diesen Vergleich einbeziehen zu können, wurden für die verschiedenen Ackerbauregionen im Bundesgebiet möglichst repräsentative Versuchsstandorte ausgewählt, welche auch über einen langjährigen Erfahrungsschatz im Bereich Nachwachsender Rohstoffe verfügen, der in die Auswertung zur Ergebnisinterpretation mit eingebunden wird. Sie werden an dieser Stelle zunächst kurz aufgezeigt (Abb. 1; im Anhang Nr. 1) und benannt, werden dann aber im Ergebnisteil (Kap. 3.1) eingehender beschrieben:

- **Thüringen:** Thüringische Landesanstalt für Landwirtschaft, Abt. Pflanzenproduktion, Dornburg
- **Nordrhein - Westfalen:** LWK Nordrhein-Westfalen, Lehr- und Versuchsstation Haus Düsse
- **Mecklenburg-Vorpommern:** LFA Mecklenburg-Vorpommern, Versuchsstation Gülzow
- **Niedersachsen:** LWK Niedersachsen; Versuchsstation Werlte
- **Bayern:** Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing
- **Hessen:**
- Justus-Liebig-Universität Gießen, Lehr- und Versuchsbetrieb Rauischholzhausen.
- Universität Kassel, Fachgebiet Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe, Witzenhausen

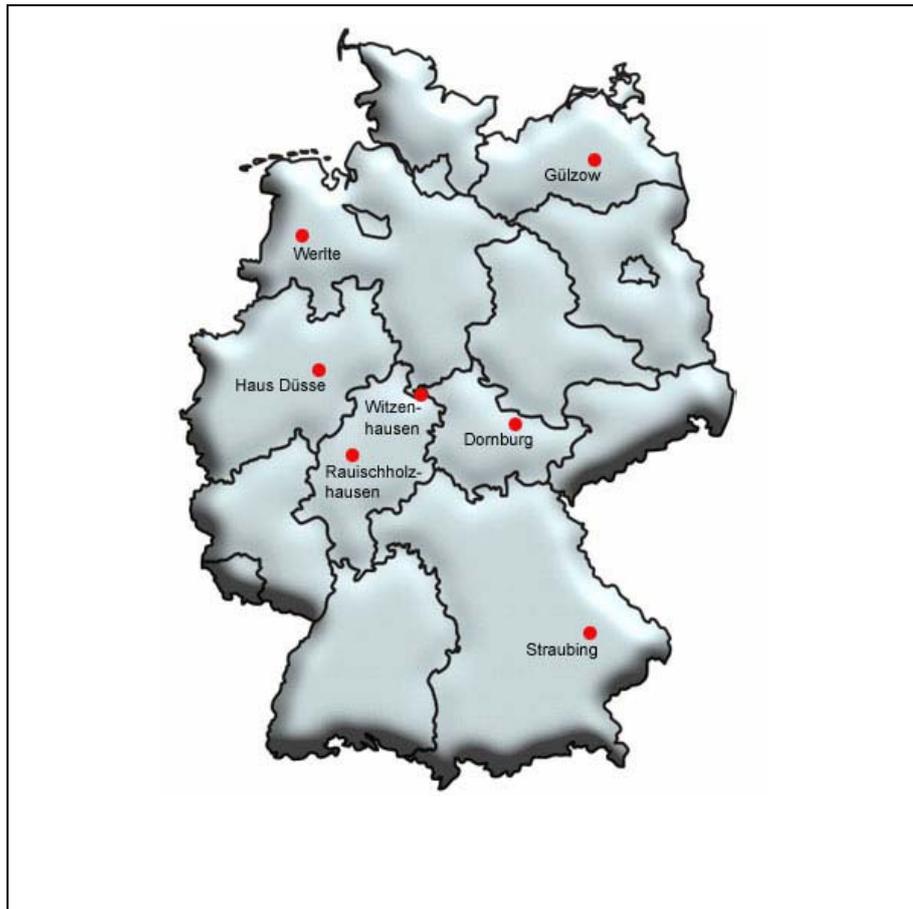


Abb. 1: Lage der Versuchsstandorte

An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Partnern für die gewissenhafte Versuchsdurchführung, die hervorragende Zusammenarbeit und den Teamgeist sowie die Diskussionsbereitschaft und Mithilfe bei der Erstellung der Berichte ganz herzlich bedanken.



2 MATERIAL UND METHODEN

Nach der Benennung der Versuchsstandorte, die im Ergebnisteil umfassender beschrieben werden, werden im Folgenden die wesentlichen Angaben zu der Versuchsdurchführung und zu den verwandten Methoden dargestellt. Für weitere Information wird auch auf den Anhang verwiesen.

2.1 Versuchsvarianten und Vorgaben zum Anbau

Der einheitlich an allen sieben Standorten mit zwei Wiederholungen durchgeführte Systemversuch zur Zweikultur-Nutzung im Vergleich zur Hauptfrucht-Nutzung umfasst 24 Versuchsvarianten, die in Tab. 1 unter Angabe der gewählten Sorten und angestrebten Erntetermine zusammengestellt sind.

Tab. 1: Versuchsvarianten im Systemversuch, angebaute Sorte (Name) und angestrebtes Entwicklungsstadium zur Ernte [BBCH-Code]

Hauptfrucht-Nutzung	Zweikultur-Nutzung	
Haupt- und Zwischenfrucht	Erstkulturen	Zweitkulturen
Senf*) (<i>Setoria</i>) - Mais (<i>Atletico</i>) [BBCH 85]	Winterrübsen (<i>Lenox</i>) [ab BBCH 75]	Mais (<i>Atletico</i>), Sorghum-Hybride (<i>Rona 1</i>), Sonnenblumen (<i>Methasol</i>), Mais/Sonnenblumen-Gemenge (<i>Atletico/Methasol</i>) [BBCH 83]
Senf*) (<i>Setoria</i>) - Sonnenblume (<i>Methasol</i>) [BBCH 83]	Winterroggen _{Grünschnitt} (<i>Vitallo</i>) [ab BBCH 75]	Mais/Sonnenblumen-Gemenge (<i>Atletico/Methasol</i>) [BBCH 83]
Winterroggen _{Energie} (<i>Balistic</i>) [ab BBCH 81]- Senf*) (<i>Setoria</i>)	Winterroggen _{Grünschnitt} /Wintererbsen-Gemenge (<i>Vitallo/EFB 33</i>) [ab BBCH 75]	Mais/Sonnenblumen-Gemenge (<i>Atletico/Methasol</i>) [BBCH 83]
Winterroggen _{Brotgetreide} (<i>Visello</i>) [BBCH 92] – Senf*) (<i>Setoria</i>)	Winterroggen _{Grünschnitt} /Wintergersten-Gemenge (<i>Vitallo/Lomerit</i>) [ab BBCH 75]	Sudangras-Hybride (<i>SUSU</i>), Amarant (<i>Bärnkrafft</i>), Hanf** (<i>Futura</i>), Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenge (<i>Atletico/Methasol/Bärnkrafft</i>) [BBCH 83]

*) Senf als Sommer-Zwischenfrucht **) am Standort Straubing Quinoa anstatt Hanf

In dem Bereitstellungskonzept **Zweikultur-Nutzungssystem** werden nach dem Anbau von Winterkulturen (Erstkulturen), die Ende Mai/Anfang Juni, wenn etwa zweidrittel des potenziellen Gesamtertrages (Korn + Stroh) erreicht sind, geerntet und einsiliert werden, sommerannuelle Zweitkulturen angebaut. Als Erstkulturen kommen nach einer Pflugfurche Winterrübsen, Winterroggen, Winterroggen/Wintererbsen-Gemenge sowie ein Winterroggen/Wintergersten-Gemenge zum Anbau. Nach ihrer Ernte und flacher Bodenbearbeitung folgen dann als Zweitkulturen nach Rübsen, Roggen und dem Roggen/Erbsen-Gemenge jeweils Mais, Sorghum-Hybride, Sonnenblumen und ein Mais/Sonnenblumen-Gemenge, in dem Mais und Sonnenblumen in abwechselnden Reihen ausgesät werden. Nach dem Roggen/Gersten-Gemenge stehen dann als Zweitkulturen Sudangras, Amarant, Hanf (am Standort Straubing stattdessen Quinoa) und ein Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenge, in dem Mais und Sonnenblumen wiederum in getrennten Reihen stehen und der Amarant breitwürfig oder mit einer Drillmaschine ganzflächig und flacher



ausgesät wird. Im Herbst werden dann die Zweitkulturen – vergleichbar den Erstkulturen – als Ganzpflanzen geerntet und zur Ermittlung des Frischmasseertrages gewogen sowie der TS-Gehalt zur Ernte bestimmt und damit der Trockenmasseertrag je Hektar berechnet.

Im Gegensatz zu dieser Vorgehensweise im **Versuch** würden in der **Praxis** Erst- und Zweitkulturen direkt aus dem Stand gehäckselt und mittels Silierung konserviert, um mit dieser Erntetechnologie Kosten zu sparen, Verschmutzungen beim Anwelken der Erstkulturen zu vermeiden und die mit aufgewachsenen Unkräuter möglichst ohne Samenverlust mit vom Feld verbringen zu können. Die gewonnenen Silagen können dann direkt zur Biogasgewinnung genutzt werden, bei einer thermischen Nutzung (Verbrennung, Vergasung, BTL) werden die Silagen entsprechend der von GRASS et al. 2009 beschriebenen Verfahren zunächst mechanisch entwässert und danach getrocknet.

Um einen Vergleich zur Zweikultur-Nutzung zu ermöglichen, wurde auch die übliche **Hauptfrucht-Nutzung** in den Versuch aufgenommen, wie eingangs aufgezeigt wurde. In ihm wird als Winterung Roggen zur Biogasbereitung oder zur thermischen Verwertung angebaut, der in der Praxis Ende Juni vor der Vollreife nahe dem höchsten Gesamtertrag (Korn + Stroh) als Ganzpflanze zur Silierung (GPS) geerntet wird und als Silage direkt (Biogas) oder nach Entwässerung und Trocknung (Verbrennung, Vergasung) verwertet wird. Im Versuch werden die Pflanzen aber nicht als Silage sondern wiederum als Erntegut hinsichtlich Ertrag und TS-Gehalt bewertet. Parallel hierzu wird Winterroggen angebaut, der zur Vollreife geerntet wird. Dieser Roggen kann mit seinem Korn als Brotroggen verwertet werden oder als Trockengut mit Korn und Stroh zur BTL-Herstellung dienen oder anderen thermischen Wandlungswegen zugeführt werden. Neben Winterroggen in der Hauptfrucht-Nutzung werden Mais und Sonnenblumen als sommerannuelle Kulturen nach der Sommer-Zwischenfrucht Senf, die im Herbst ausgesät und als abgefrorener Mulch bis im Frühjahr auf dem Feld verbleibt, angebaut und in den Vergleich aufgenommen (vgl. auch die **Darstellung der Anbausysteme** im Anhang unter Nr. 2).

In Tab. 1 sind neben den Versuchsvarianten und dem angestrebten Entwicklungsstadium zur Ernte der Kulturen auch die angebauten Sorten aufgezeigt, die an allen Standorten und in allen drei Versuchsjahren verwandt wurden. Dies erfolgte vor dem Hintergrund, dass der Versuch, der nur mit zwei Wiederholungen angelegt wurde, auch über alle Standorte und alle Jahre statistisch ausgewertet werden kann und darüber hinaus mit der Wahl derselben Mais- und Sonnenblumen-Sorte in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung ein direkter Vergleich der Anbausysteme ermöglicht wird. Dieses Vorgehen bedingt jedoch auch, dass möglicherweise die gewählten Sorten nicht an allen Standorten die vergleichsweise leistungsstärksten sind. Aus diesem Grund und auch, um der Entwicklung neuer Sorten Rechnung zu tragen, wurden parallel hierzu jährlich wechselnd Zuchtstämme aus aktuellen Zuchtprogrammen in den Versuch integriert, die in einer Übersicht in dem Anhang Nr. 3 und 4 zusammengestellt sind.

Im Rahmen des Anbaus (Übersicht im Anhang Nr. 5) wurde beim Winterroggen in allen Fällen eine Saatstärke von 250 Korn/m² gewählt und den praxisüblichen Reihenabstand, beim Gemenge mit Wintererbsen 170 Korn/m² Roggen und 25 Korn/m² Erbsen, beim Gemenge mit Wintergerste 80 Korn/m² Roggen und 200 Korn/m² Gerste. Mit einem Reihenabstand wie beim Getreide wurde auch der Rübsen (70 Pflanzen/m²), der Senf (25kg/ha), die Sudangras-Hybride (25 kg/ha), der Hanf



(400 Korn/m²) und der Amarant (400-500 g/ha) gesät. Mais, Sonnenblumen und Mais/Sonnenblumen-Gemenge sowie die Sorghum-Hybride wurden bei einer Reihenweite von 75 cm gesät. Um exakt die Bestandesdichte von 10 Pflanzen/m² (Mais, Sonnenblumen, Mais/Sonnenblumen-Gemenge) bzw. 25 Pflanzen/m² (Sorghum-Hybride) realisieren zu können, wurden diese Kulturen mit höherer Saatstärke ausgesät und dann auf die Ziel- Bestandesdichte vereinzelt. Für weitere Details sei auf den Anhang (Nr. 5) verwiesen.

2.2 Vorgaben zur Düngung und zum Pflanzenschutz

Düngung: Energiepflanzen zur Silierung sowie Pflanzen in dem Zweitkultur- Nutzungssystem haben aufgrund des vorgezogenen Erntetermins einen geringeren Nährstoffbedarf als zur Vollreife geerntete Pflanzen oder sommerannuelle Pflanzen in der Hauptfrucht-Nutzung. Ferner sind bei einer energetischen Verwertung – insbesondere bei einer thermischen Verwertung – im Vergleich zu der Verwertung als Nahrungs- oder Futtermittel hohe Nährstoffgehalte im Rohstoff Biomasse unerwünscht. Obwohl für hohe Erträge ausreichende Nährstoffgehalte in der Pflanze vorliegen müssen, kann insbesondere bei der Stickstoffdüngung mit einer Reduktion der Düngergabe im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium diesen qualitativen Anforderungen Rechnung getragen werden. Die für die Versuchsvarianten im Rahmen des Projektes entwickelten Stickstoff-Dünevorgaben hinsichtlich Menge und Aufteilung orientieren sich an den jeweiligen N-Sollwert-Empfehlungen der einzelnen Bundesländer für die verschiedenen Kulturen (BERATUNG, 2009) unter Berücksichtigung der N_{min}-Mengen im Boden zum Zeitpunkt der jeweils ersten Düngung, um für die Beratung der Praxis auf

Tab. 2: Kurzübersicht Energiepflanzen-Düngeschema: Abzuziehende N-Menge vom Sollwert als Korrektur für den vorgezogenen Erntezeitpunkt und die Nutzung als Bioenergie

Kultur und Anbausystem	Korrektur für Bioenergie (Abzug von Sollwert)
Winterroggen-Energie als Hauptkultur (Ernte BBCH 81 - 83)	-20 kg N/ha
Roggen- Grünschnitt als Erstkultur (Ernte BBCH 73-77)	-40 kg N/ha
Roggen/Erbsengemenge als Erstkultur (Ernte BBCH 73-77)	-90 kg N/ha
Winterrüben-Grünschnitt als Erstkultur (Ernte BBCH 75-78)	-40 kg N/ha
Sommerungen als Zweitkulturen nach Winterung ohne Leguminosenanteil	-40 kg N/ha
Sommerungen als Zweitkulturen nach Winterung mit Leguminosenanteil	-60 kg N/ha

vorhandenes Wissen aufbauen zu können. Exemplarisch für das Bundesland Hessen wird im Anhang Nr. 6 diese Vorgehensweise und resultierende Düngempfehlung im Detail dargestellt, in Tab. 2 in einem Ausschnitt hieraus. In der Zweitkultur-Nutzung wurde die verkürzte Vegetationszeit sowie der Anteil an Leguminosen in einzelnen Varianten durch Abschläge im Umfang von 40 bis 90 kg N/ha berücksichtigt. Bei den Winterungen in der Hauptfrucht-Nutzung bzw. als Erstkultur wurde die letzte N-Gabe im Umfang reduziert und teilweise zeitlich vorverlegt bzw. mit der vorangehenden N-Gabe



vereinigt. Für die neuen Kulturarten Sorghum- und Sudangras-Hybride wurden Vorgaben in Anlehnung an den Mais entwickelt. Für die Grundnährstoffe wurde jeweils die Versorgungsstufe C angestrebt.

Pflanzenschutz: Eine an den Energiepflanzenanbau gestellte Forderung seitens der Gesellschaft ist, ihn möglichst umweltfreundliche durchzuführen. Um diese Forderung umzusetzen, wurde in den Versuchen soweit wie möglich auf den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel verzichtet. Damit wird ein gewisser Unkraut- und Krankheitsdruck akzeptiert, der mittels Bonituren ermittelt wurde. Ein Einsatz von Pflanzenschutzmitteln war jedoch zulässig, wenn Totalausfälle drohten. Um den Unkrautdruck in den in weiten Reihen gesäten Zweitkulturen zu begrenzen, wurde zweimalig die Maschinenhacke eingesetzt, und wurde ersatzweise beim Fehlen der Technik durch Handhacke oder durch Jäten realisiert. Nur in der Variante Roggen-Brot wurde der praxisübliche Pflanzenschutz durchgeführt und beim Winterrüben wurde im Herbst ein Herbizid eingesetzt, da hier aus versuchstechnischen Gründen das Striegeln nicht möglich war.

2.3 Durchgeführte Untersuchungen, Statistik, Kostenrechnung

Untersuchungen: Das Untersuchungsprogramm umfasst die Erhebung von Witterungsdaten, von pflanzenbaulichen Parametern, der Bonituren der Wildpflanzenentwicklung, der Krankheiten und Schädlingen im Vegetationsverlauf, von Zeiternten zur Erfassung der Ertragsbildung und die Endernte zur Bestimmung des Ertrages und des TS-Gehaltes in den Pflanzen sowie zur Analyse der Inhalts- und Nährstoffe im Erntegut für die Bewertung der Siliereignung und der Energieausbeuten. Vegetationsbegleitend wurden Bodenproben gezogen und auf ihren Gehalt an pflanzenverfügbarem Stickstoff - N_{\min} - (0–90 cm Tiefe, in 30 cm Abschnitten, $NO_3 + NH_4$) sowie Wassergehalt untersucht.

Pflanzenbauliche Parameter und Ertragerhebung: Die Bestandesdichte (Triebe/m²), Bestandeshöhe (cm), Kulturpflanzen- und Unkrautdichte (Abschätzung nach Braun-Blanquet) wurden zu festgesetzten Entwicklungsstadien in Verbindung mit Zeiternten (Ertrag; 0,5 m²/Variante und Wiederholung; sowie N-Gehalt in der Pflanze und im Boden (N_{\min})) erhoben, um eine ökologische Analyse des Anbaus von Pflanzen zur energetischen Verwertung durchführen zu können (vgl. ZALF, 2009).

Zur Endernte wurde in jedem Prüfglied und jeder Wiederholung die gesamte Ernteparzelle (18 m²) zur Ertragsfeststellung beerntet, das Frischgewicht und der TS-Gehalt (Trocknung bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz) zur Berechnung des Ertrages an Trockenmasse/ha ermittelt. Parallel hierzu wurde aus dem Erntegut eine Mischprobe gezogen und bei 70°C für die Analyse der Inhaltsstoffe getrocknet, die mittels NIRS bzw. nasschemisch sowie mittels RFA (Nährstoffe) durchgeführt wurde.

Biogasausbeute, Heiz- und Brennwert: Auf der Basis der Ergebnisse der Weender-Analyse (Rohasche, Rohprotein, Rohfett, Rohfaser, NfE; BASSLER, 1988) im getrockneten Erntegut in Verbindung mit den Verdauungskoeffizienten für die Inhaltsstoffe für Rinder unter Berücksichtigung des Entwicklungsstadiums (BBCH) zur Ernte (aus den DLG Futterwerttabellen) wurde die Ausbeute an Methan (Nm³ [0°C]); Brennwert = 39,9 MJ/Nm³, Heizwert = 35,9 MJ/Nm³) nach der Formel von Baserga (1998) bzw. FNR (2006) berechnet. In Verbindung mit dem Feldertrag wurde hieraus der



Methanertrag (Nm^3)/ha abgeleitet, bei dem die Verluste im Rahmen von Ernte, Konservierung (Silage), Lagerung und Transport nicht berücksichtigt sind. Parallel hierzu wurde zur erweiterten Charakterisierung des Erntegutes die Gehalte an Stärke, Zucker, ADF, NDF und ADL ermittelt.

Die kalorimetrische Bestimmung des Brenn- und Heizwertes nach DIN 51900 zur Abschätzung des Energieertrages im Rahmen von thermischen Verwertungen schließt die Bestimmung der Gehalte an C, H, N, S und O in der Differenz ein, die auch Grundlage für stöchiometrische Quantifizierung zur Synthesegasgewinnung für die BTL-Herstellung sind (STÜLPNAGEL et al. 2008a). In dieser Publikation wird auch aufgezeigt, dass, entsprechend eines Methodenvergleichs, aus den Ergebnissen der Weender Analyse der Brenn- und Heizwert von Pflanzen hinreichend genau abgeschätzt werden kann.

Nährstoffgehalte: Gleichzeitig wurden in den Pflanzenproben die Nährstoffgehalte (N, P, K, Mg, Ca, Na, S, Cl) zur Berechnung von Nährstoffaufnahme bzw. Nährstoffentzug sowie zur Berechnung der Verhältnisse der Nährstoffe zueinander ermittelt. Im Anhand Nr. 7 sind weitere Informationen zum Untersuchungsprogramm und Methoden der Analytik zusammengestellt.

Statistik: Die statistische Auswertung der Versuche, die aus finanziellen und arbeitstechnischen Gründen nur mit zwei Wiederholungen angelegt wurden, erfolgte mit dem Programmpaket SAS® (Statistical Analysis System) Version 9.1 (SAS®, 2002-2003). Da es sich bei der Versuchsanlage um eine Spaltanlage handelt, wurde die Prozedur MIXED verwendet, um die Großteilstückfehler zu berücksichtigen. Der Versuch umfasst sechs Großteilstücken innerhalb einer Wiederholung (Block), die für die Haupt- und Zweitkulturen in vier Kleinteilstücke unterteilt wurden. Nach der Überprüfung der Normalverteilung der Residuen sowie der Homoskedastizität wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse pro Versuchsjahr über alle Standorte [1] sowie pro Versuchstandort über alle drei Jahre durchgeführt [2]. Auch die Ergebnisse aller 7 Standorte und 3 Jahre wurden paarweise miteinander verglichen sowie auf Interaktionen zwischen Jahreseffekt, Standort und Behandlung überprüft [3]. In den folgenden Modellen nach Piepho et al. (2003) werden fixe (links) und zufällige Effekte (rechts) durch einen Doppelpunkt voneinander getrennt:

$$V : \text{St} + \text{St} \cdot V + \text{St} \cdot B + \text{St} \cdot B \cdot \text{GT} \quad [1]$$

$$V : J + J \cdot S + J \cdot B + J \cdot B \cdot \text{GT} \quad [2]$$

$$V : \text{St} + J + \text{St} \cdot J + \text{St} \cdot V + J \cdot V + \text{St} \cdot J \cdot V + \text{St} \cdot J \cdot B + \text{St} \cdot J \cdot B \cdot \text{GT} \quad [3]$$

Behandlungsfaktor: V : Variante (Abfolge der Kulturpflanzen innerhalb eines Jahres)

Blockfaktoren: St : Standort
J : Jahr
B : Block (Wiederholung)
GT : Großteilstück

Statistisch ausgewertet wurden die Erträge, TS-Gehalte, N-Gehalte der einzelnen Kulturen (Zwischen-, Hauptfrüchte, Erst-, Zweitkulturen) sowie die Jahrestrockenmasse-, Methanerträge und N_{\min} -Mengen in 0-90 cm Tiefe nach der Ernte im Boden. Da bei der Bestimmung des Ertrages von den Erstkulturen (Rübsen, Roggen, Roggen/Erbsen-Gemenge, Roggen/Gersten-Gemenge) und der Zwischenfrucht Senf innerhalb der Großteilstücke lediglich eine Mischprobe erhoben wurde, flossen diese Werte



entsprechend gewichtet in die statistische Auswertung ein (Piepho 1999). Gleiches gilt für die Ergebnisse der N_{\min} -Beprobung und dem Methanertrag.

Die Jahres- und Standorteffekte wurden als zufällige Effekte (RANDOM) betrachtet. Dieses Verfahren liefert neben den Signifikanzen auch Mittelwerte als LSMEANS (least square means). Der fixe Effekt »Variante« wurde mittels F-Test berechnet und die Freiheitsgrade nach Kenward & Roger (1997) über die DDFM Option adjustiert. Die multiplen Mittelwertsvergleiche wurden mit dem t-Test bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ durchgeführt. Da es sich bei dem Datensatz aufgrund des Anbaus von Quinoa statt Hanf am Standort Straubing um einen unsymmetrischen Datensatz handelt, gibt SAS die Auswertung nicht in der Buchstabendarstellung aus. Mit Hilfe eines Makros von Piepho (2004) konnte jedoch eine Buchstabendarstellung erstellt werden, was die Auswertung wesentlich erleichterte.

Um die Einflüsse des pflanzenverfügbaren Bodenwassers zur Saat (H_2O in 0-30 cm abzüglich Totwasser) und der Witterung (Temperatur-, Niederschlag- und Strahlungssumme jeweils von der Saat bis zur Ernte) auf den TM-Ertrag von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht-Nutzung bzw. Zweikultur-Nutzung abschätzen bzw. bewerten zu können, wurden die Ergebnisse mittels multipler Regression analysiert.

Bei der Erarbeitung des Modells für die Statistik und die Darstellung der Auswertung wurden wir von PIEPHO (2009) unterstützt, dem wir hierfür an dieser Stelle von ganzem Herzen Dank sagen möchten.

Ökonomie: Die ökonomische Auswertung der Versuche wurde von TOEWS (2009) von der Universität Gießen durchgeführt und basiert im Rahmen der Berechnung des **Deckungsbeitrages** – ohne Pachtansatz und Agrarbeihilfen - auf folgenden Grundsätzen, Daten und Annahmen, die in Tab. 3 zusammengestellt sind und durch weitere Informationen im Anhang Nr. 8 und 9 ergänzt werden:

- Basis sind die seitens der Versuchsansteller ermittelten Felderträge und TS-Gehalte zur Ernte; es wurden bei der Berechnung keine Ernte, Silier- und Lagerverluste berücksichtigt.
- Weiterhin fließen in die Berechnung die seitens der Versuchsansteller übermittelten Angaben zur Durchführung des Anbaus unter Praxisbedingungen ein, die aus den Erkenntnissen im Rahmen der Versuchsdurchführung abgeleitet wurden. Auf dieser Basis wurden die **Arbeitsleistungskosten** in Anlehnung an die vom **KTBL** (2008a, 2008b) bereitgestellten, aktuellen Daten zur Betriebsplanung in Verbindung mit dem Feldarbeitsrechner ermittelt. Zum Teil abweichend von **KTBL** (2008a, 2008b) wurde mit einem Zinssatz von 5%, einem Stundenlohn von 15 €/h, einem Dieselpreis von 1,20 €/l und einem Heizölpreis von 0,65 €/l gerechnet. Bei allen Arbeiten wurden eine Feld-Hof-Entfernung von 5 km und eine Schlaggröße von 10 ha unterstellt.
- Um jedem Fruchtfolgeglied die entsprechenden Gärrestmengen bzw. hierauf aufbauend die anfallenden **Gärrestausrückführungskosten** zuweisen zu können, wurden die Gärrestmengen vereinfacht als Differenz des Massenverlustes durch die Vergärung zu Methan und Kohlendioxid zur Masse des Ausgangssubstrates berechnet.



Tab. 3: Übersicht zu den wichtigsten Parametern der Kostenrechnung

Parameter	Methode/ Werte
Ertrag	-erfasster Massenertrag und TS-Gehalt nach Versuchsergebnis -Methanertrag wie oben beschrieben, Basis Weender Analyse
Lagerverluste	nicht berücksichtigt
Arbeits erledigungskosten	- nach KTBL Daten zur Betriebsplanung sowie davon abweichend: - Zinssatz: 5% - Stundenlohn: 15€ - Dieselpreis: 1,20 €/l - Heizölpreis: 0,65 €/l - Feld-Hof-Entfernung: 5 km - Schlaggröße: 10 ha
Silomaispreis	28 €/t FM bei 32% TS
Düngebedarfsermittlung	für N, P, K N: Entzug * Faktor 1,2 (zur Berücksichtigung von Verlusten)
Nährstoffe aus dem Gärrest	P, K = 100%; N = 50% Mineraldüngeräquivalent (MDÄ)
Sattbeetbereitung- Besonderheiten	Pflug danach Kreiselegge; Ausnahme Sommerungen der Zweitkulturen mit Grubber

- Die **Erntekosten** für die unterschiedlichen Kulturen (Sonnenblume, Mais, Sudangras, Roggen-GPS etc.) werden weniger durch die zu erntende Pflanzenart als vielmehr durch die Feld-Hof-Entfernung und den Ertrag bestimmt. Deshalb wurde es als zulässig angesehen, die Kosten für die Ernte von Silomais nach KTBL (2009) auch für die anderen Kulturen zu verwenden.
- Es wird ein **Silomaispreis** von 28 €/t (32%TS, angeliefert und verdichtet im Silo an der Biogasanlage, freie Gärrestrücknahme) unterstellt, aus dem sich bei 91 m³ CH₄/t FM ein **Methanpreis** von 31 ct/m³ ableitet. Ihm wird die Biogasausbeute, die in den unterschiedlichen Versuchsgliedern mit Hilfe der Ergebnisse der Weender-Analyse zu dem Erntegut berechnet wurde, zugeordnet. Für die Marktfrüchte wurden die mittleren Marktpreise der letzten drei Jahre (2006-08) zugrunde gelegt (Winterroggen-Korn 136 €/t nach Statistischem Jahrbuch (BMELV, 2007)). Ebenso wurden mittlere Düngerpreise 2005 – 2008 nach (BMELV, 2007) verwandt.
- Bei der **Düngebedarfsermittlung** werden vereinfacht nur N, P und K bewertet. Beim Stickstoff wird der N-Entzug mit dem Faktor 1,2 multipliziert, um die N-Verluste durch Denitrifikation und Auswaschung in der Kalkulation zu berücksichtigen. Der Stickstoff im Gärrest wird mit einem Mineraldüngeräquivalent von 50% bewertet, P und K im Gärrest werden zu 100% angerechnet.



3 ERGEBNISSE

Den an den sieben Standorten in den drei Jahren erzielten Versuchsergebnissen zu den Felderträgen, Energieerträgen, Inhaltsstoffen usw. werden zunächst die Ergebnisse zur Charakterisierung der Versuchsstandorte sowie zur Witterung in den Versuchsjahren vorangestellt. Die sieben Versuchsstandorte wurden zwar einleitend benannt, ihre eingehende Beschreibung, die im Laufe des Versuches durchgeführt wurde, sollte dann in diesem Kapitel aufgezeigt werden.

3.1 Standortbeschreibung

3.1.1 Böden an den Versuchsstandorten

Die bodenkundliche Standortcharakterisierung wurde von den Partnern im Zentrum für Agrarlandschaftsforschung [ZALF] (DEUMLICH, 2008) durchgeführt und sind in Tab. 4 zusammengefasst. Die Angaben zum Humus und zu den Nährstoffen beziehen sich auf den Pflughorizont. Mit den Standorten Werlte und Gülzow sind zunächst zwei Standorte mit vergleichsweise „leichten“, sandigen Böden in den Versuch eingebunden. Die Versuchsorte Dornburg und Rauschholzhausen stellen Standorte mittlerer Bodengüte dar, haben jedoch sehr tiefgründige Böden mit einer vergleichsweise hohen nutzbaren Feldkapazität. An den Standorten Straubing, Haus Düsse und Witzenhausen liegen Böden mit der höchsten Güte vor.

Tab. 4: Bodenkundliche Kenndaten der Versuchsstandorte (Quelle: DEUMLICH, 2008)

Standort/ Bodentyp	Bodenpunkte	Humus	C/N Verh.	pH	P **	K **	Mg **	nFKWe (mm) *	We (cm)
		(Gew.%)								( mg/100 g Boden) und Klasse
Dornburg	65,0	2,6	13,9	7,2	9,2 (C)	17 (D)	11,4 (D)	193	110
Parabraunerde									
Gülzow	45,0	2,2	12,4	5,6	5,6 (C)	24,4 (E)	8,6 (E)	159	70
Kolluvium- Pseudogley									
Haus Düsse	72,0	2,6	9,4	7,0	12,5 (D)	17,0 (B)	10,1 (D)	190	100
Haftpseudogley- Parabraunerde									
Rauschholzhausen	65,0	1,7	10,2	7,0	8,4 (C)	15,4 (C)	7,4 (C)	226	110
Parabraunerde Haftpseudogley									
Straubing	76,0	2,5	14,9	7,0	13-23 (C-D)	14 (C)	7-10 (B-C)	157	90
Parabraunerde									
Werlte	31,0	2,4	14,5	5,2	11,1 (D)	7,3 (C)	3,1 (C)	134	70
Parabraunerde Pseudogley									
Witzenhausen	80,0	1,9	9,1	6,9	7,4 (C)	17,1 (D)	12,3 (D)	200	100
Haftnässe Parabraunerde- Braunerde									

* nFK nach KA5

** Klassenzeichen nach LWK Niedersachsen

Kursiv: Angaben der Versuchsansteller

Die geforderte Versorgung mit Grundnährstoffen im Pflughorizont (Gehaltsklasse C; Klasseneinteilung nach LWK Niedersachsen) ist an fast allen Standorten gegeben; leichte Unterversorgungen wurden durch Düngung ausgeglichen, Überversorgungen (Gehaltsklasse D bzw.



E) sind das Ergebnis früherer Düngungen entsprechend anderer Grenzen für die Gehaltsklassen bzw. geologisch bedingt. Die Humusgehalte im Pflughorizont betragen in Rauischholzhausen und Witzenhausen unter 2 Gew.% und an den anderen Standorten zwischen 2,2 und 2,6 Gew.%.

3.1.2 Witterung an den Versuchsstandorten

In Ergänzung zu den Kenndaten des Bodens sind in Tab. 5 auf der Basis des gleichen Beobachtungszeitraumes (1998-2007) die mehrjährigen Witterungsdaten an den Versuchsstandorten zusammengestellt, die auf den Angaben der Versuchsansteller beruhen. Entsprechend dieser Übersicht

Tab. 5: Jahresniederschlag sowie Jahresmittel der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und der täglichen Globalstrahlung im mehrjährigen Mittel (1998-2007) und Höhe der Versuchsstandorte über NN (Quelle: Angaben der Versuchsansteller)

Parameter	Dornburg	Gülzow	Haus Düsse	Rauischholzhausen	Straubing	Werlte	Witzenhausen
Niederschlag (mm/Jahr)	564	580	827	660	682	794	629
Lufttemperatur (°C)	9,2	9,2	9,7	9,6	8,7	9,9	8,2
rel. Luftfeuchte (%)	75	83	80	80*	86	85	84
Globalstrahlung (Wh/m ² * Tag)	2.524	2.669	2.657	2.588	3.041	2.637	2.712
Höhe über NN (m)	260	10	79	180	340	32	252

* Mittel 2007-2008

zeichnen sich die Standorte Dornburg und Gülzow durch geringe Niederschläge im Jahresverlauf aus, die Standorte Rauischholzhausen, Straubing und Witzenhausen haben im mehrjährigen Mittel eine bessere Versorgung mit Niederschlag, die Standorte Haus Düsse und Werlte haben mit rund 800 mm die meisten Niederschläge; über 200 mm mehr als die Standorte Dornburg und Gülzow. Die niedrigsten Jahresmitteltemperaturen der Luft sind am Standort Witzenhausen und Straubing gegeben, die höchsten an den Standorten Haus Düsse und Werlte. Der Standort Straubing zeichnet sich durch die höchste Einstrahlung aus.

Nach dieser allgemeinen Charakterisierung der Standorte sind in Abb. 2 die Jahrsniederschlagssummen und Jahresmitteltemperaturen für die drei Versuchsjahre 2006 bis 2008 und im Mittel der drei Jahre standortbezogen dargestellt, um die Abweichungen vom mehrjährigen Mittel sowie Gemeinsamkeiten innerhalb der Jahre aufzeigen zu können. Im **Mittel** der Standorte fielen im Jahr 2006 624 mm, 2007 884 mm und 2008 631 mm Niederschlag. Die Jahre 2006 und 2008 waren damit trockener (~ - 50 mm) als im langjährigen Mittel (677 mm). In 2007 fiel dagegen an allen Standorten deutlich überdurchschnittliche Regenmengen (+ 207 mm). Die Lufttemperaturen waren im Mittel der Standorte in allen drei Jahren überdurchschnittlich. Besonderheiten waren im **Jahr 2006** die hohen Temperaturen von Mitte Juni bis Ende Juli sowie im September bis Anfang Oktober. Dies begünstigte die Kulturen mit hohem Wärmebedarf wie Sorghum- und Sudangras-Hybride. Im **Jahr 2007** erschwerte ein sehr trockener und nahezu regenfreier April das Auflaufen der



Sommerungen, während im weiteren Verlauf gerade für wärmeliebende und an trockene Bedingungen angepasste Kulturen wie die Sorghum-Arten durch die hohen Niederschläge suboptimale Bedingungen gegeben waren. Im **Jahr 2008** waren die Monate Februar und März recht nass, der Mai dagegen sehr trocken. Sowohl 2007 als 2008 hatte vor allem der Silomais gute Wachstumsbedingungen.

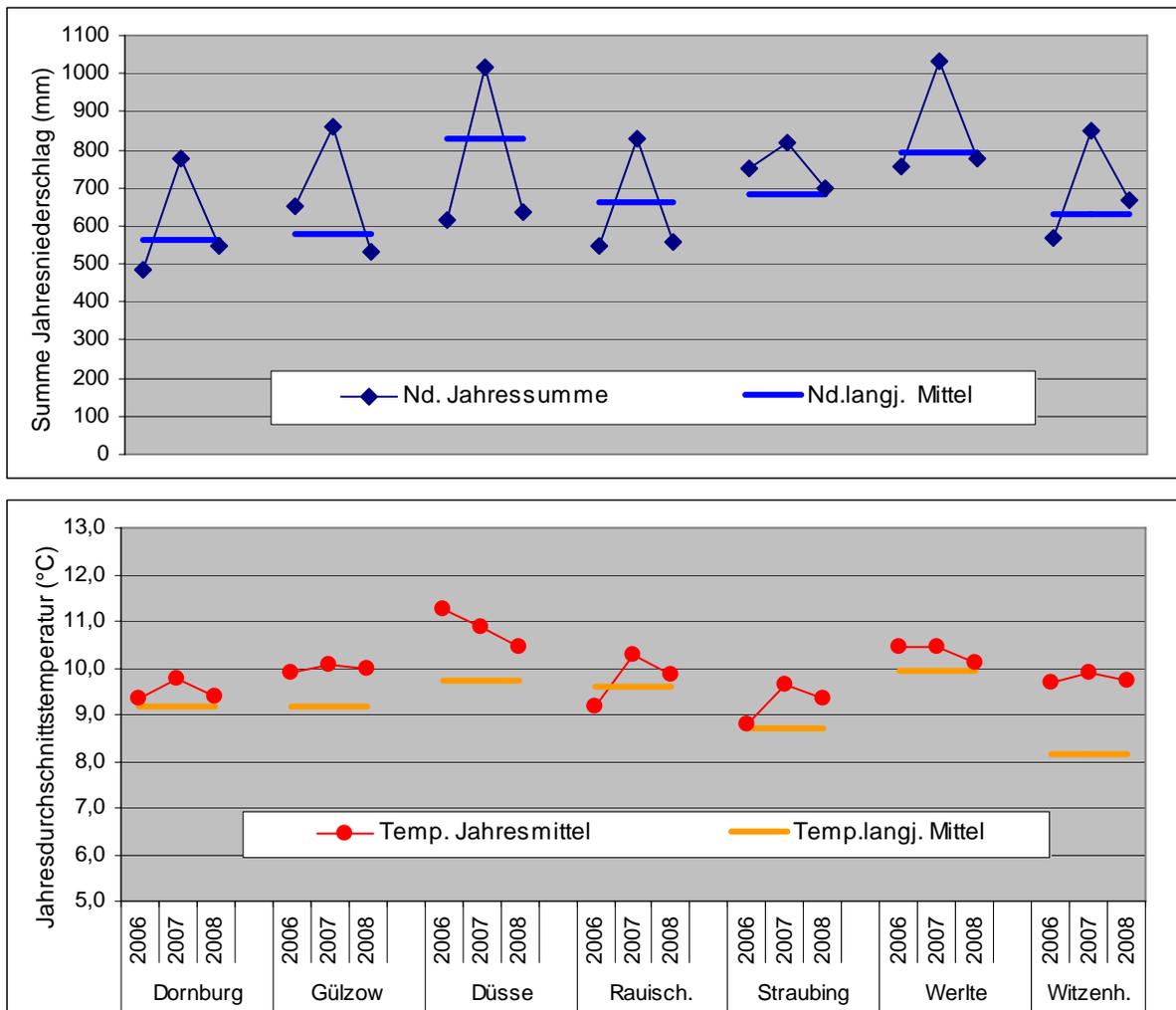


Abb. 2 Jahresniederschlag (mm, oben) und Jahresmittel der Lufttemperatur (°C, unten) im mehrjährigen Mittel und für die Versuchsjahre 2006- 2008 an den Versuchsstandorten

In Verbindung mit Tab. 4, Tab. 5 und Abb. 2 sowie weiteren Detailergebnissen im Anhang Nr. 10 – Nr. 19 werden nachfolgend die Angaben zum Boden sowie zur Witterung standortbezogen erläutert.

Am Standort **Dornburg** ist der Versuch auf einer schluffig-tonigen Parabraunerde mit 65 Bodenpunkten und hoher nutzbarer Feldkapazität (193 mm) im durchwurzelbaren Boden (nFKWe) angelegt worden. Die Versorgung mit Grundnährstoffen entspricht den Gehaltsklassen C und D. Das mehrjährige Mittel der Niederschlagssumme beträgt in Dornburg 564 mm und die mittlere Jahrestemperatur 9,2°C. Im Mittel der drei Versuchsjahre wurden 603 mm Niederschlag und 9,5°C gemessen. Das Jahr 2006 fiel durch ein Niederschlagsdefizit von ~ 80 mm sowie eine um 2° höhere mittlere Jahrestemperatur auf. 2007 war überdurchschnittlich feucht und in 2008 entsprach der Niederschlag dem Durchschnitt. Die Temperaturen waren in 2007 um 0,6°C und in 2008 um 0,2°C



höher als im langjährigen Mittel. Dies beruht wie an den anderen Standorten auf überdurchschnittlichen Temperaturen im Winter.

Der Standort **Gülzow** ist ein Kolluvium-Pseudogley mit hohem Sandanteil und 45 Bodenpunkten und hat mit 159 mm eine eher geringe nFKWe. Die Versorgung mit Grundnährstoffen ist den Versorgungsklassen C (P) und E (K, Mg) zuzuordnen. Das mehrjährige Mittel der Niederschlagssumme beträgt in Gülzow 580 mm und die mittlere Jahrestemperatur 9,2°C. Im Mittel der drei Versuchsjahre wurden höhere Niederschläge (682 mm) und höhere Temperaturen (1,0°C) gemessen. Die Niederschläge der Einzeljahre lagen um 70 mm (2006) und in 2007 sogar um 280 mm über dem langjährigen Mittel. 2008 dagegen fielen ~50 mm weniger Niederschlag als im Mittel. Die Temperaturen lagen in allen drei Jahren mit +0,7 - +0,9°C über den langjährigen Mittel.

Am Standort **Haus Düsse** wird eine Haftpseudogley-Parabraunerde mit überwiegend schluffigen Bestandteilen vorgefunden. Diese weist 72 Bodenpunkte und eine mit 210 mm hohe nFKWe auf. Die Grundnährstoffe Phosphor und Magnesium liegen in der Versorgungsstufe D und die Versorgung mit Kalium entspricht der Versorgungsklasse B. Das mehrjährige Mittel der Niederschlagssumme beträgt in Haus Düsse 827 mm und die mittlere Jahrestemperatur 9,7°C. Im Mittel der drei Versuchsjahre wurden niedrigere Niederschläge (757 mm) und höhere Temperaturen (10,9°C) gemessen. Die Niederschläge der Einzeljahre waren in 2006 und in 2008 unterdurchschnittlich, in 2007 dagegen mit 1018 mm überdurchschnittlich. Die Jahresdurchschnittstemperaturen lagen in allen drei Jahren über dem langjährigen Mittel. Besonders warm fiel das Jahr 2006 mit 11,2°C aus.

Am Standort **Rauischholzhausen** handelt es sich um einen schluffreichen Parabraunerde-Haftpseudogley mit 65 Bodenpunkten und einer hohen nFKWe von 226 mm. Die Versorgung mit Grundnährstoffen entspricht der Klasse C und D. Das mehrjährige Mittel der Niederschlagssumme beträgt in Rauischholzhausen 660 mm und die mittlere Jahrestemperatur 9,6°C. Im Mittel der drei Versuchsjahre wurden niedrigere Niederschläge (644 mm) und höhere Temperaturen (9,8°C) gemessen. Die Niederschläge der Einzeljahre waren 2006 und 2008 unterdurchschnittlich, 2007 dagegen mit 828 mm überdurchschnittlich. Die Jahresdurchschnittstemperaturen lagen 2006 unter und 2007 sowie 2008 über dem mehrjährigen Mittel. Besonders warm war es im Jahr 2007 mit 11,3°C im Mittel.

Am Standort **Straubing** wurde der Versuch auf einer Parabraunerde mit 76 Bodenpunkten aus vorwiegend schluffig-tonigem Substrat angelegt. Die nFKWe liegt mit 157 mm fast im niedrigen Bereich, vergleichbar der des Standortes Gülzow. Die Versorgung mit Grundnährstoffen entspricht in allen Fällen der Versorgungsklasse C. Das mehrjährige Mittel der Niederschlagssumme beträgt in Straubing 682 mm und die mittlere Jahrestemperatur 8,7°C. Im Mittel der drei Versuchsjahre wurden höhere Niederschläge (755 mm) und höhere Temperaturen (9,3°C) gemessen. Die Niederschläge waren auch in den Einzeljahren jeweils überdurchschnittlich, wobei insbesondere 2007 ein nasses (816 mm) aber auch warmes (9,6°C) Jahr war.

Am Standort **Werlte** ist der Versuchsboden ein Parabraunerde-Pseudogley mit hohem Sandanteil (80,3%). Er hat durch den hohen Sandanteil und die geringe Durchwurzelungstiefe mit 134 mm die geringste nFKWe. Die Versorgung mit Grundnährstoffen entspricht der Versorgungsstufe D (P) bzw.



C (K, Mg). Das mehrjährige Mittel der Niederschlagssumme beträgt in Werlte 794 mm und die mittlere Jahrestemperatur 9,9°C. Im Mittel der drei Versuchsjahre wurden höhere Niederschläge (854 mm) und höhere Temperaturen (10,3°C) gemessen. Die Niederschläge im Jahr 2006 und 2008 waren durchschnittlich, im Jahr 2007 mit 1033 mm deutlich überdurchschnittlich. Die Jahresdurchschnittstemperaturen lagen in allen drei Jahren über dem langjährigen Mittel. Besonders warm war das Jahr 2006 mit im Mittel 10,4°C.

Am Standort **Witzenhausen** ist der Versuchsboden eine Haftenäse-Parabraunerde-Braunerde aus schluffig-tonigem Material mit einer hohen nFKWE von 200 mm. Die Versorgung mit Grundnährstoffen entspricht den Versorgungsklassen C und D. Das mehrjährige Mittel der Niederschlagssumme beträgt in Witzenhausen 629 mm und die mittlere Jahrestemperatur 8,2°C. Im Mittel der drei Versuchsjahre wurden höhere Niederschläge (696 mm) und höhere Temperaturen (9,8°C) gemessen. 2006 war ein sehr trockenes Jahr (568 mm) 2007 (851 mm) und 2008 (669 mm) dagegen recht feucht. Die Jahresdurchschnittstemperaturen lagen in allen drei Jahren über dem langjährigen Mittel. Besonders warm war das Jahr 2007 mit im Mittel 9,9°C.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die Monatswerte zu den Niederschlägen usw. im Anhang (Nr. 11-19) aufgezeigt sind, auf die im Rahmen der Interpretation der Erträge zurückgegriffen wird.

3.1.3 Ertragsniveau an den Versuchsstandorten

Zur erweiterten Charakterisierung der Standorte und um die gewonnenen Versuchsergebnisse besser bewerten zu können, wurden die Versuchsansteller gebeten, die repräsentativen Durchschnittserträge

Tab. 6: Übersicht zu den Durchschnittserträgen und ihrer Spannweite an den Versuchsstandorten bzw. in ihrer unmittelbaren Umgebung (Quelle: Angaben der Versuchsansteller)

Durchschnitts- erträge (dt/ha)	Dornbur g	Gülzow	Haus Düsse	Rauisch- holzhausen	Straubing	Werlte	Witzen- hausen
Winterweizen (dt/ha; 86% TS)	102 86-115	98 73-115	90 80-100	85 80-92	95 75 – 105	72 40-85	90 78-100
Wintergerste (dt/ha; 86% TS)	97 89-102	83 73-115	80 70-90	80	80 65-90	62 40-75	85 75-90
Winterroggen (dt/ha; 86% TS)	91 79-105	90 79-104	80 70-90	75 65-80	85 75-95	58 45-70	89 83-94
Winterraps (dt/ha; 91% TS)	44 41-51	55 47-60	40 30-50	45 43-49	40 30-53	33 20-45	43 40-50
Silomais (dt TM/ha)	155 150-160	172 162-185	170 150-200	185	170 150-210	177 130-200	150 138-170
Zuckerrübe (dt/ha FM)	Nicht angebaut	Keine Relevanz	650 500-800	625 550-650	850 600-1.000	Nicht angebaut	550 480-630

verschiedener Kulturen sowie die Spannweiten der Erträge an den Versuchsstandorten bzw. in deren Nähe zu benennen. In Tab. 6 sind die Ergebnisse hierzu für Getreide und Raps (Kornertrag), Silomais und Zuckerrüben zusammengestellt, die verdeutlichen, dass die Unterschiede in der Standortgüte (Bodenpunkte; Tab. 4) größer sind als die Unterschiede in den Erträgen. Dies kann bei mangelnder



Bodengüte durch die Kompensation dieser Kenngröße durch die Witterung - z.B. in Werlte wenig Bodenpunkte und geringe nFKWe aber hohe Niederschläge (Tab. 5) – erklärt werden.

3.2 Erträge im Systemversuch

Der Vergleich der Anbausysteme umfasst den Zeitraum eines ganzen Jahres, er beginnt im Herbst mit der ersten Aussaat und endet im Herbst des darauf folgenden Jahres mit der Ernte der letzten Kultur. Um in beiden Systemen eine ganzjährige Bodenbedeckung mit wachsenden Pflanzen zu erzielen, werden bei der Hauptfrucht-Nutzung auch Zwischenfrüchte angebaut. Somit stehen von allen Versuchsvarianten Ertragsdaten zu zwei Aufwüchsen innerhalb eines Jahres zur Verfügung, der Aufwuchs der Zwischenfrucht und der Hauptfrucht bzw. der Erst- und Zweitkultur. Um das Potenzial an aufgewachsener Biomasse in den Varianten zu verdeutlichen, werden nachfolgend die Aufwüchse als Ertrag bezeichnet, unabhängig davon ob sie erntewürdig sind (Regelfall) oder bei Erträgen unter 4 t TM/ha nicht erntewürdig sind und auf dem Feld verbleiben (zum Teil bei der Zwischenfrucht Senf). Diese Ertragsleistungen innerhalb eines Jahres oder über alle Jahre werden in den folgenden Abbildungen als gestapelte Säule dargestellt, um einen Vergleich der Jahreserträge zwischen den 24 Versuchsvarianten zu erleichtern. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung, die in zahlreichen Tabellen zusammengefasst sind, sind aus der Sicht der Lesbarkeit des Textes im Anhang Nr. 22-32 zu finden, die wichtigsten Ergebnisse hieraus werden aber in dem Text dargestellt. Parallel hierzu werden nur einmalig die Ergebnisse zu den Trockensubstanz-Gehalten der einzelnen Kulturen zur Ernte aufgezeigt, da mit nur einer Darstellung die Erkenntnisse hierzu hinreichend beschrieben werden können.

3.2.1 Erträge im Gesamtversuch

Vor der Präsentation der Ergebnisse von den einzelnen Versuchsstandorten verbunden mit den Bewertungen seitens der Versuchsansteller werden im Folgenden die Jahreserträge der 24 Varianten im Mittel der sieben Standorte getrennt für die Versuchsjahre 2006, 2007 und 2008 dargestellt (Abb. 3), um die jahresbedingten Unterschiede im Ertrag zu verdeutlichen. Eine Darstellung der Erträge und Trockensubstanzgehalte im Mittel der drei Versuchsjahre und sieben Standorte schließt sich zusammenfassend daran an (Abb. 4).

Im **Jahr 2006** waren aufgrund der Sommertrockenheit die Wachstumsbedingungen im Zweikultur-Nutzungssystem, und hier besonderes für die Kulturen Sorghum- und Sudangras-Hybride, recht günstig. Die Variante mit Roggen gefolgt von Mais hatte im Mittel der Standorte mit 25 t TM/ha die höchste Ertragsleistung, die der Ertragsleistung von Mais nach Senf signifikant überlegen war (Anhang Nr. 22). In den Varianten mit Sonnenblume, Sorghum-Hybride, Sudangras-Hybride und dem

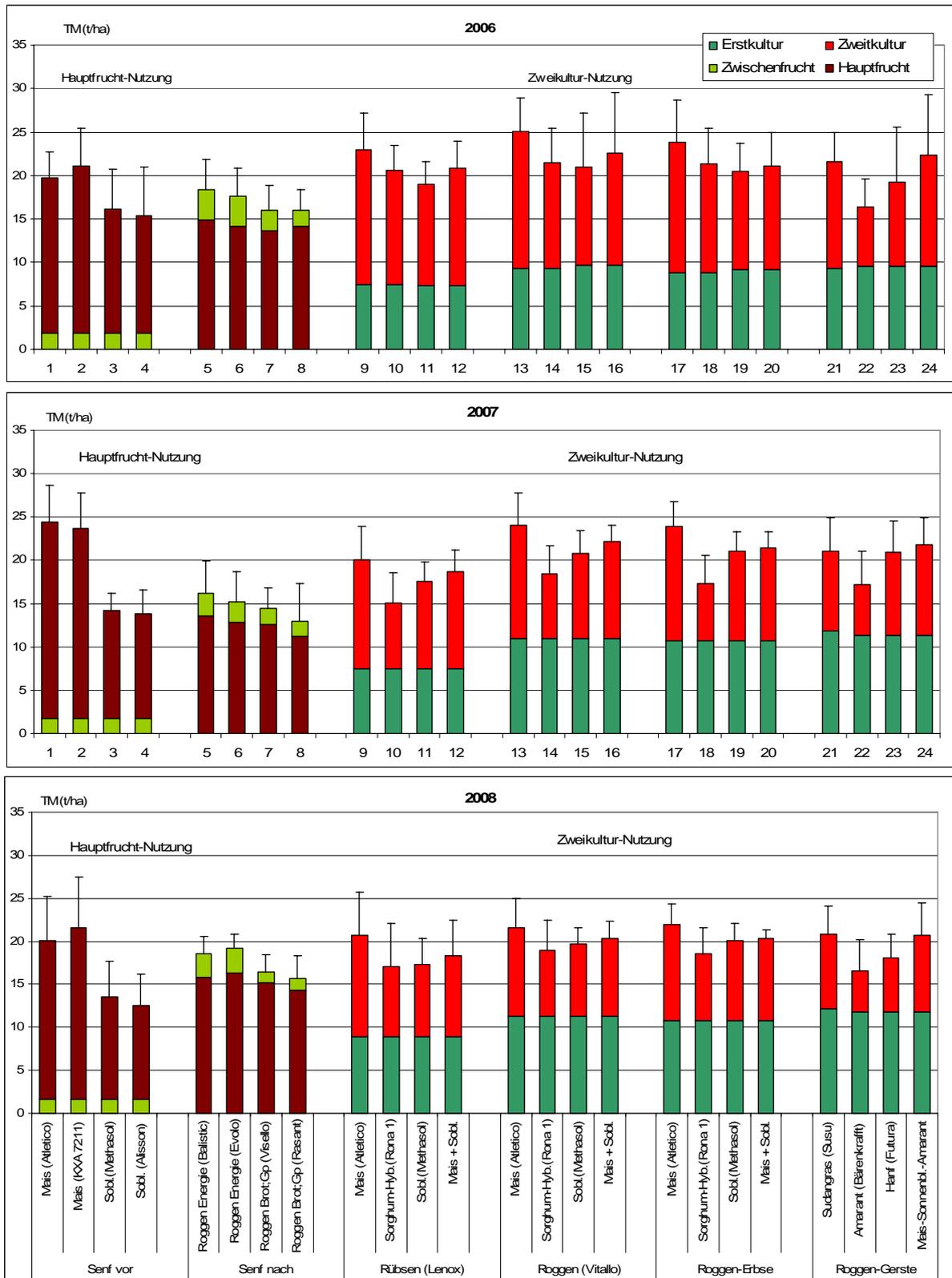


Abb. 3: Jahres-Trockenmasserträge der Varianten im Mittel der sieben Standorte im Erntejahr 2006 (oben), 2007 (Mitte) und 2008 (unten), Säule mit Standardabweichung



Mais/Sonnenblumen-Gemenge, sowie das Gemenge mit Mais, Sonnenblumen und Amarant nach einer Winterung konnte in nahezu allen Fällen Erträge über 20 t TM/ha erzielt werden. Dies entspricht der Jahres-Ertragsleistung von Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf. Die Jahres-Ertragsleistung von Roggen in Hauptfruchtstellung (GPS) war mit 18 t TM/ha niedriger als die von Mais, an der der Senf einen höheren Anteil hatte als im Herbst ausgesäeter Senf vor Mais und Sonnenblumen. Sie übertraf die Jahres-Ertragsleistung von Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung, die mit rund 16 t TM/ha die niedrigste Ertragsleistung hatte und die der Zweikultur-Nutzung um rund 4 t TM/ha unterlegen war. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die Ertragsreduktion beim Anbau als Zweikultur im Vergleich zum Anbau als Hauptfrucht bei der Sonnenblume deutlich geringer ist als beim Mais.

Im **Jahr 2007** waren günstigere Wachstumsbedingungen für den Mais in Hauptfruchtstellung gegeben, die zu einem Jahresertrag von 25 t TM/ha führten. Die Apriltrockenheit erschwerte zudem das Auflaufen der Zweikulturen und führte zu Wachstumsverzögerungen bei ihnen. Die ertragsstarken Roggen-Mais-Varianten konnten dieses Ertragsniveau zwar erreichen, aber nicht übertreffen, und die Jahreserträge der Varianten mit der Sorghum-Hybride waren mit 15 bzw. 17 t TM/ha die niedrigsten. Sonnenblumen nach Roggen und Roggen/Erbsen-Gemenge (21 t TM/ha) stellten sich jedoch auch in 2007 in der Zweikultur-Nutzung leistungsstärker – in 2007 signifikant leistungsstärker (Anhang Nr. 23) - als im Hauptfruchtanbau dar (14 t TM/ha). Mit Roggen-GPS (15,5 t TM/ha) konnte wiederum das Ertragsniveau von Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung übertroffen werden (14 t TM/ha).

Im **Jahr 2008** waren die Anbaubedingungen aufgrund der Trockenheit im Mai wiederum ungünstig für die Zweikultur-Nutzung. Im Mittel der Standorte konnte mit Mais in Hauptfruchtstellung Jahreserträge von 20 t TM/ha erzielt werden, der nur geringfügig in der Zweikultur-Nutzung mit Mais übertroffen wurde. Auffallend ist, dass im Jahr 2008 auch mit den andern Zweikulturen hohe Erträge realisiert wurden. Überdurchschnittlich waren auch die Erträge von Roggen GPS (16 t TM/ha) gefolgt von Senf mit insgesamt 19 t TM/ha. Diese Kultur war wiederum der Sonnenblume mit nur 13 t TM/ha deutlich und in diesem Jahr auch signifikant überlegen (Anhang Nr. 24). Es zeigte sich aber auch in diesem Jahr, dass die Sonnenblume durch ihre Ertragsstärke in der Zweikultur-Nutzung im Vergleich zur Hauptfruchtstellung eine zukünftige Option für dieses System ist, zumal dieser Mehrertrag in 2008 signifikant war.

In Erweiterung zu Abb. 3 werden in Abb. 4 zusammenfassend die Jahrestrockenmasseerträge (oben) und Trockensubstanzgehalte (unten) der **Varianten im Mittel der drei Versuchsjahre und sieben Standorte** dargestellt, gefolgt von der statischen Auswertung der Jahreserträge (Tab. 7). Hiernach konnten im Mittel der Jahre und Standorte mit der Zweikultur-Nutzung von Silomais Jahreserträge von 21 bis 24 t TM/Jahr erzielt werden. Am ertragsstärksten waren die Kombinationen von Roggen bzw. Roggen/Erbsen-Gemenge mit Mais (23-24 t TM/ha), die der Hauptfrucht-Nutzung mit Mais (21 t TM/ha) überlegen war, was sich jedoch statistisch nicht absichern ließ (Tab. 7). Die Kombinationen mit Rübsen als Erstkultur hatten dagegen einen um ca. 2-3 t/ha geringeren Ertrag.

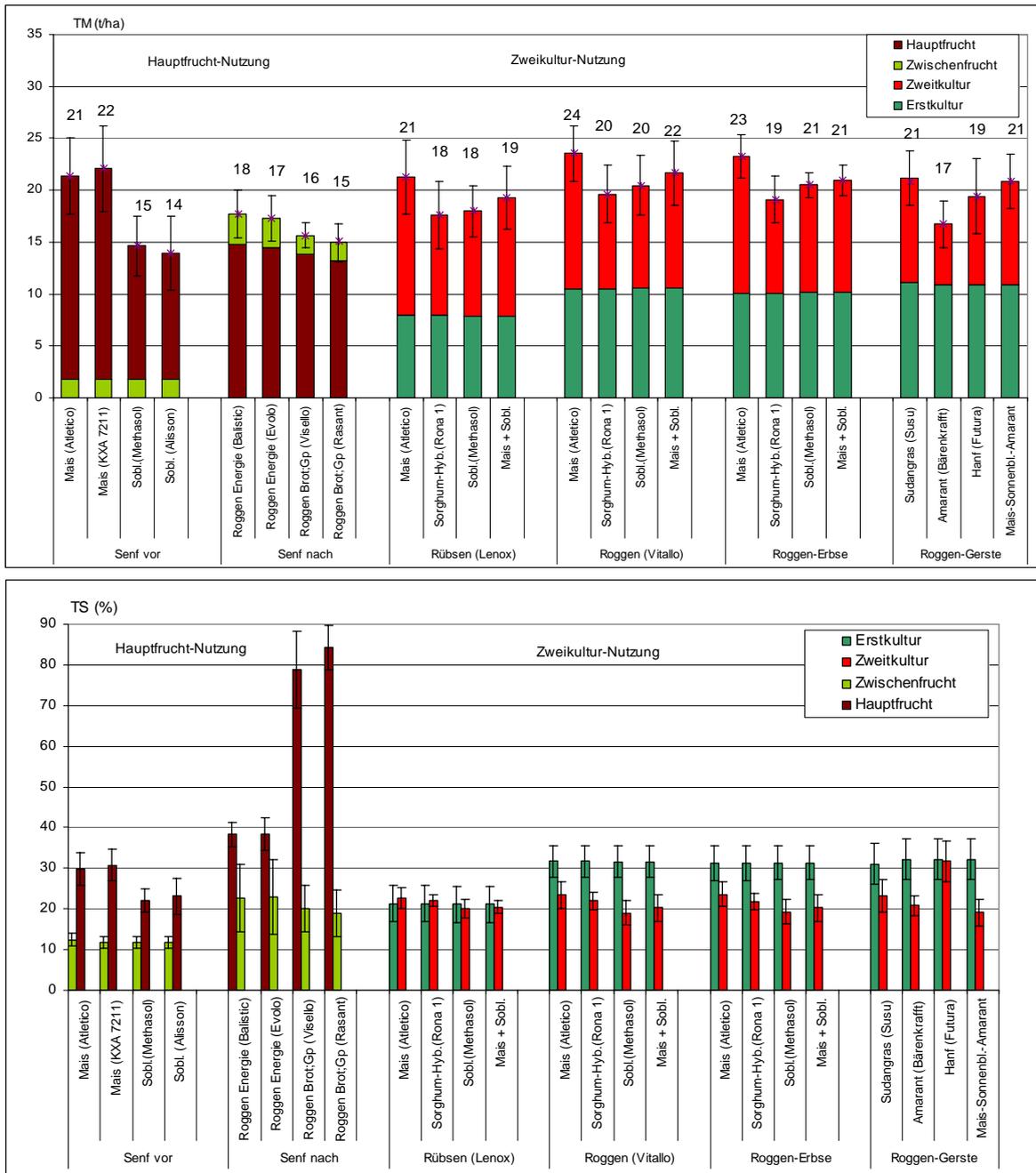


Abb. 4: Jahres-Trockenmasseerträge (oben) und Trockensubstanzgehalte (unten) im Mittel der Standorte und der Erntejahre 2006, 2007 und 2008; Säule mit Standardabweichung

Deutlicher als bei der Vergleichskultur Mais ist die Ertragsüberlegenheit der Zweikultur-Nutzung gegenüber der Hauptfrucht-Nutzung beim Anbau von Sonnenblumen und Roggen. Mit Sonnenblumen als Zweitfrucht konnten Jahreserträge von 18 bis 20,5 t TM/ha erzielt werden, die den Erträgen von Sonnenblumen nach Senf (14,6 t TM/ha) sowie Roggen gefolgt von Senf (17,7 t TM/ha) signifikant überlegen waren. Positiv hervorzuheben ist jedoch das recht hohe und über die Standorte und Jahre auch recht stabile Ertragsniveau von 14,4 bis 14,7 t TM/ha beim Roggen zur Silagebereitung (GPS), das aber zukünftig durch standfestere Sorten weiter verbessert und gefestigt werden muss. Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang auf diesen etwas geringeren Ertrag des



Roggens zur Vollreife, was sortenbedingt sein kann, jedoch auch einer gewissen Ertragsreduktion beim Getreide während der Abreife zuzumessen ist.

Tab. 7: Statistische Auswertung zu den Jahreserträgen (adjustierte Mittelwerte einschließlich Standardfehler) zu den Versuchsvarianten über sieben Versuchsstandorte und drei Jahre (Varianten mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% nicht signifikant voneinander)

Variante	Adj. Mittelw.	St.-Fehler							
Senf; Mais (Atletico)	215,0	11,6	.	.	.	.	e	f	g
Senf; Mais (Stamm)	221,6	11,6	.	.	.	.	e	.	g
Senf; Sonnenblume (Methasol)	147,0	11,6	a	b	.	.	.	.	.
Senf; Sonnenblume (Stamm)	138,0	11,7	a	.	.	.	.	.	.
Roggen-Energie (Balistic); Senf	176,9	11,6	a	.	c	.	e	.	.
Roggen-Energie (Stamm); Senf	173,6	11,6	a	.	c	.	.	f	.
Roggen-Brot (Visello); Senf	148,3	11,6	a	.	c	.	.	.	.
Roggen-Brot (Rasant); Senf	146,3	11,7	a	b	.	.	.	.	.
Rübsen; Mais	212,8	11,6	.	.	.	d	e	f	g
Rübsen; Sorghum	175,7	11,6	a	.	c	.	e	.	.
Rübsen; Sonnenblume	178,1	11,7	a	.	c	.	e	.	.
Rübsen; Mais/Sonnenblume	191,2	11,7	.	b	c	.	.	.	.
Roggen; Mais	235,5	11,6	.	.	.	.	.	.	g
Roggen; Sorghum	195,9	11,6	.	.	c	.	.	.	g
Roggen; Sonnenblume	203,3	11,7	.	.	.	d	e	f	g
Roggen; Mais/Sonnenblume	215,1	11,7	.	.	.	.	e	f	g
Roggen/Erbse; Mais	231,8	11,6	.	.	.	.	.	.	g
Roggen/Erbse; Sorghum	191,6	11,6	.	b	c	.	.	.	g
Roggen/Erbse; Sonnenblume	203,5	11,7	.	.	.	d	e	f	g
Roggen/Erbse; Mais/Sonnenblume	208,2	11,7	.	.	.	d	e	f	g
Roggen/Gerste; Sudangras	206,3	11,8	.	.	.	d	e	f	g
Roggen/Gerste; Amarant	165,8	11,7	a	.	c	d	.	.	.
Roggen/Gerste; Hanf	197,9	12,0	.	.	.	d	e	f	g
Roggen/Gerste; Mais/Sonnenblume/Amarant	207,2	11,7	.	.	.	d	e	f	g

Mit einbezogen in den Versuch waren als Zweitkulturen Sorghum-Hybride und das Mais/Sonnenblumen-Gemenge. Letzteres hatte Jahreserträge, die etwa den Mittelwert zwischen dem Reinanbau der beiden Kulturen entsprachen, was darauf hinweist, dass positive und negative Effekte sich in diesem Gemenge die Waage hielten. Dieses Gemenge ist auch zu empfehlen, da signifikant höhere Erträge als beim Anbau von Sonnenblumen oder Roggen in Hauptfruchtstellung zu erwarten sind (Tab. 7). Mit Jahreserträgen zwischen 17,6 und 19,6 t TM/ha ist die Zweikultur-Nutzung mit der



Sorghum-Hybride eine weitere Option für diese Anbauform, da auch mit ihr signifikant höhere Erträge erzielt werden konnten als mit Sonnenblumen nach Senf, jedoch war sie Mais in Hauptfruchtstellung unterlegen.

Als besonders geeignet stellte sich auch das Gemenge von Roggen und Gerste als Erstkultur heraus (11 t TM/ha), das dem Reinanbau von Roggen um 1,5 t TM/ha überlegen war, was auch in einer verminderten Lagerneigung des Roggens sichtbar wurde. Gefolgt von den Zweitfrüchten Sudangras-Hybride, Amarant, Hanf und dem Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenge waren Sudangras (21 t TM/ha) und Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenge (21 t TM/ha) die ertragsstärksten Zweitkulturen. In der Variante mit Hanf wurde ein Jahresertrag von 19,4 t TM/ha erzielt; diese Kultur soll nicht zur Biogasbereitung dienen, sondern als Festbrennstoff genutzt werden. Am ertragsschwächsten stellte sich Amarant als Zweitkultur (16,7 t TM/ha Jahresertrag) heraus. Allerdings sind bei dieser Kultur mit extrem feinem Saatgut in Zukunft noch Fortschritte durch verbesserte Bestelltechnik und Züchtung zu erwarten.

Festzustellen ist ferner, dass Senf als Zwischenfrucht vor Mais und Sonnenblumen bzw. nach Winterroggen in Hauptfruchtstellung in der Regel keine erntewürdigen Ertragsleistungen (>4 t TM/ha angestrebt) erbrachte. Die Zwischenfrucht würde unter diesen Rahmenbedingungen maßgeblich dem Erosionsschutz und der Humusmehrung dienen und nur in Ausnahmefällen als Rohstoff zur Biogasbereitung genutzt werden. Da aber in manchen Fällen versuchsbedingt die Aussaat von Senf hinsichtlich Saatzeit und Saattechnik unter suboptimalen Bedingungen durchgeführt wurde, ist in der Praxis auch beim Senf bei günstigeren Bedingungen mit erntewürdigen Beständen zu rechnen.

Mais und Roggen in der Hauptfrucht-Nutzung und alle Erstkulturen, mit Ausnahme von Rübsen, hatten zum Erntezeitpunkt aus der Sicht der Siliereignung optimale Trockensubstanzgehalte (>30%). Bei Rübsen als Erstkultur, bei Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung und als Zweitkultur und bei allen anderen Zweitkulturen, mit Ausnahme von Hanf, sowie bei den Zwischenfrüchten war dagegen unabhängig vom Versuchsjahr das Problem der unzureichenden Trockensubstanzgehalte zum Erntezeitpunkt gegeben. Die TS-Gehalte des Erntegutes lagen zwischen 20 und 25% und verfehlten somit den angestrebten TS-Gehalt von 30%. Diesbezüglich ist besonders die Pflanzenzüchtung aufgefordert, bei Sonnenblumen und für die Zweikultur-Nutzung Sorten bereitzustellen, die sich nicht nur durch hohe Erträge sondern auch durch TS-Gehalte zur Ernte von über 30% auszeichnen. Bis zu ihrer Realisierung könnten den mit den niedrigen TS-Gehalten verbundenen erntetechnischen Problemen durch größere Häcksellängen und Nachschnitt in der Biogasanlage begegnet werden.

Da bei der Kenngröße TS-Gehalt keine nennenswerten Standortunterschiede festgestellt wurden, kann im Weiteren auf eine standortbezogene Darstellung der TS-Gehalte im Erntegut verzichtet werden. Somit werden nachfolgend nur die an den einzelnen Versuchsstandorten erzielten Trockenmasseerträge im Mittel der Versuchsjahre vorgestellt.

3.2.1.1 Erträge am Standort Dornburg

Im Mittel der drei Jahre war am Standort Dornburg die Zweikultur-Nutzung von Roggen sowie Roggen/Erbsen-Gemenge gefolgt von Mais mit einem Jahresertrag von 21 t TM/ha dem Mais in



Hauptfruchtstellung nach Senf mit 17,5 t TM/ha deutlich, jedoch nicht signifikant überlegen (Abb. 5; Anhang Nr. 26). An diesem Standort hatte Roggen-GPS mit 19 t TM/ha (bzw. 15,8 t TM/ha ohne Senf) sogar einen leicht höheren Jahresertrag als Mais in Hauptfruchtstellung. Hieraus kann aber noch keine klare Empfehlung für den Roggen als Energiepflanze gefolgt von Senf abgeleitet werden, da die Standfestigkeit der Sorten noch zu gering ist. Es ist an dieser Stelle nochmals darauf hinzuweisen, dass in den Versuchen – außer beim Brotroggen – keine Pflanzenbehandlungsmittel und damit auch keine Wachstumsregulatoren eingesetzt wurden, eine Vorgabe, die zukünftig zu überprüfen ist. Abgeleitet aus den anderen Versuchen an diesem Standort kann aber für Thüringen die Empfehlung ausgesprochen werden, beim Energiepflanzenanbau auf der Basis von Ganzpflanzengetreide den Anbau von Wintergetreide dem Anbau von Sommergetreide vorzuziehen.

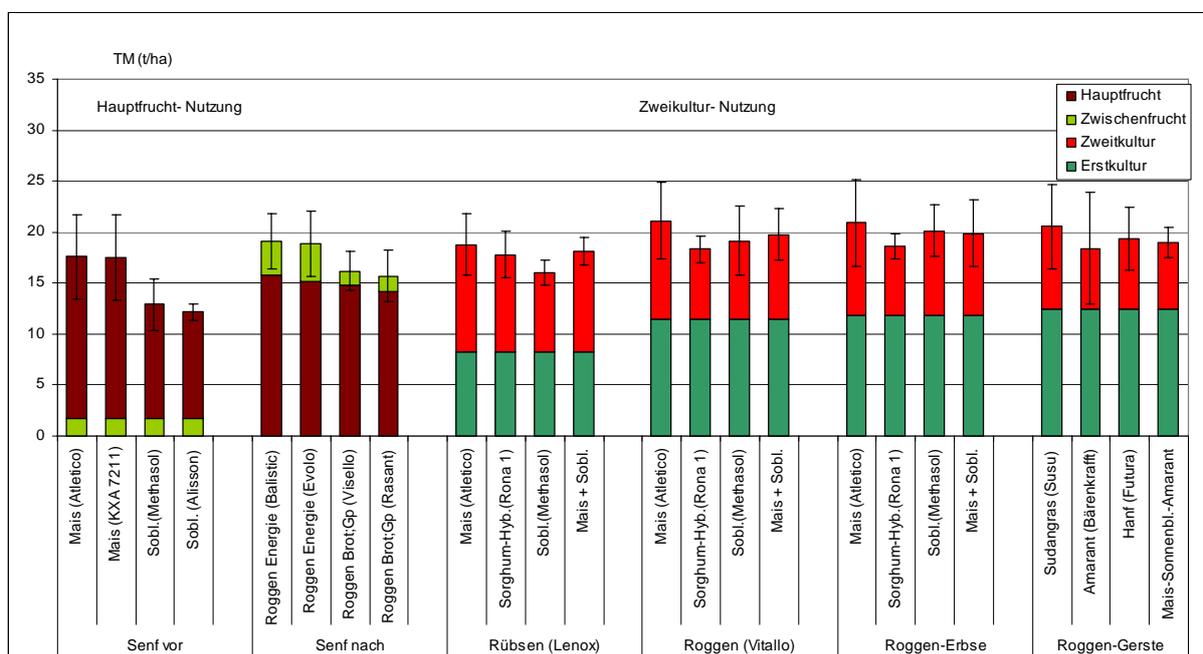


Abb. 5: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahre 2006 - 2008 am Standort Dornburg; Säule mit Standardabweichung

Mit Sonnenblumen nach Roggen bzw. Roggen/Erbsen-Gemenge konnte ein Jahresertrag von 19-20 t TM/ha erzielt werden, der den von Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung mit einem Jahresertrag von 11–13 t TM/ha in hohem Maße, jedoch wiederum nicht signifikant übertraf. Auch hier wird wie im Gesamtversuch deutlich, dass die Ertragsreduktion in der Zweitfruchtstellung im Vergleich zur Hauptfruchtstellung bei der Sonnenblume deutlich geringer ist als beim Mais. Weiterhin ist anzumerken, dass bedingt durch Differenzen zwischen den Wiederholungen, durch Jahresunterschiede und die Anlage aller Versuche in nur zwei Wiederholungen teils große Ertragsunterschiede statistisch nicht abzusichern sind. Ein Nachteil, dem in zukünftigen Versuchen durch die Versuchsanlage mit mehr Wiederholungen begegnet werden sollte, um die Sicherheit in der Aussage für die Praxis verbessern zu können.

Mit der Sorghum-Hybride nach Roggen und Roggen/Erbsen-Gemenge konnten Jahreserträge von 18-19 t TM/ha erzielt werden und sie hatte an diesem Standort eine etwas größere Konkurrenzkraft im Vergleich zum Mais als im Mittel aller Standorte. Mit der Sudangras-Hybride nach Roggen/Gersten-



Gemenge, von dem nur Ernteergebnisse aus 2006 und 2007 verfügbar sind, konnten sogar noch etwas höhere Jahreserträge gewonnen werden. Auch mit Amaranth, Hanf sowie mit Mais/Sonnenblumen/Amaranth-Gemenge konnten an diesem Standort Jahreserträge von 19 t TM/ha und damit höhere Jahreserträge als mit Mais in Hauptfruchtstellung realisiert werden.

Beim Vergleich aller Varianten kann für das Zweikultur-Nutzungssystem festgestellt werden, dass außer beim Rübsen der größere Ertragsanteil aus der Winterung stammt (im Mittel 11 t TM/ha) und der geringere mit der Sommerung (im Mittel 8,1 t TM/ha) erzielt wurde. Daraus ist, ebenso wie aus dem starken Ertragspotenzial von Roggen in Hauptfruchtstellung, abzuleiten, dass sich dieser Standort für den Anbau von Winterungen bestens eignet und diesen ein fester Anteil aus der Vielfalt der Energiepflanzen eingeräumt werden sollte. Als Zweitkulturen sind aus diesem Vergleich neben Mais auch Sonnenblumen und die Sudangras-Hybride für den Anbau zu empfehlen. In Verbindung mit anderen Versuchen wird für Thüringen zunächst eine Präferenz für den Anbau von Mais und Sudangras-Hybride, sowohl in Hauptfruchtstellung als auch in Zweitfruchtstellung ausgesprochen, ebenso wie die Bevorzugung von Wintergetreide gegenüber Sommergetreide bei der Bereitstellung von Ganzpflanzengetreide.

3.2.1.2 Erträge am Standort Gülzow

Im Mittel der drei Jahre war am Standort Gülzow die Zweikultur-Nutzung von Roggen sowie Roggen/Erbsen-Gemenge gefolgt von Mais mit einem Jahresertrag von 22-23 t TM/ha am ertragreichsten (Abb. 6). Mit Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf konnte dagegen nur 17-18,5 t TM/ha erzielt werden. Der Mehrertrag der Zweikultur-Nutzung von bis zu 6 t TM/ha gegenüber Mais in Hauptfruchtstellung konnte jedoch statistisch nicht abgesichert werden (Anhang Nr. 27).

Mit Roggen-GPS gefolgt von Senf konnte ein Jahresertrag von 15 t TM/ha (bzw. 13,8 t TM/ha ohne Senf) gewonnen werden und damit nur 2-3,5 t TM/ha weniger als mit Mais in Hauptfruchtstellung. Damit ist auch am Standort Gülzow Roggen-GPS eine ertragssichere und leistungsstarke Kultur.

Bei Sonnenblumen nach Roggen bzw. Roggen/Erbsen-Gemenge wurden Jahreserträge von 20-21 t TM/ha ermittelt, die die von Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung mit 12-13 t TM/ha signifikant übertrafen. Auch hier waren die Ertragsunterschiede zwischen den Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung (10-11 t TM/ha) und als Zweitkultur (~9,5 t TM/ha) gering. Jedoch wurde an diesem Standort eine gewisse Ertragsdepression beim Anbau des Mais/Sonnenblumen-Gemenges gegenüber dem Reinanbau der Kulturen beobachtet.

An diesem Standort ist eine leichte Vorzüglichkeit der Sudangras-Hybride gegenüber der Sorghum-Hybride zu verzeichnen, beide Kulturen sind aber den anderen Zweitkulturen deutlich unterlegen. Auch der Amaranth scheint sich für den Anbau an diesem Standort nicht zu eignen. Hingegen wurden in den Varianten mit Hanf sowie mit Mais/Sonnenblumen/Amaranth-Gemenge jeweils Jahreserträge von 20,5 t TM/ha erzielt, die nur geringfügig von denen mit Mais als Zweitfrucht übertroffen wurden.

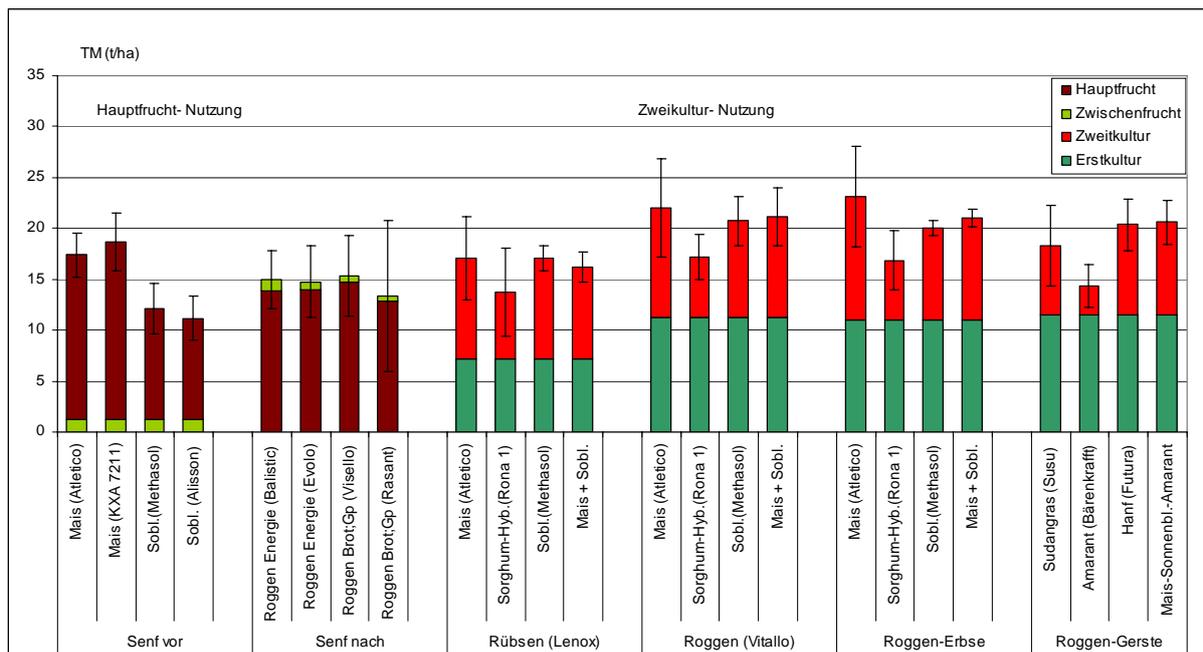


Abb. 6: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahres 2006 - 2008 am Standort Gülzow; Säule mit Standardabweichung

Hinzuweisen ist noch darauf, dass die Ertragsdifferenz zwischen den Erstkulturen Rübsen (7 t TM/ha) einerseits und dem Roggen bzw. den Gemengen mit Roggen (11-11,5 t TM/ha) etwas größer war als an den anderen Standorten. Auch hier hatte das Roggen-Gemenge mit Gerste den höchsten Ertrag (Mehrertrag von 0,5-1 t TM/ha).

Beim Vergleich der Varianten kann für das Zweikultur-Nutzungssystem festgestellt werden, dass wiederum außer beim Rübsen der größere Ertragsanteil aus der Winterung (im Mittel 10,2 t TM/ha) und der kleinere aus der Sommerungen (im Mittel 8,5 t TM/ha) stammte. Daraus ist, ebenso wie aus dem starken Ertragspotenzial von Roggen in Hauptfruchtstellung, abzuleiten, dass an diesem Standort neben dem Mais diese Winterungen mit in die Palette der anzubauenden Energiepflanzen aufgenommen werden sollten. Als weitere Sommerung neben Mais sind Sonnenblumen in Zweikultur-Nutzung zu empfehlen. Insbesondere Probleme bei der Aussaat und damit in der Jugendentwicklung haben bei Sorghum-Hybride, Sudangras-Hybride und Amarant dazu geführt, dass das übliche Ertragspotenzial dieser Kulturen an diesem Standort nicht ausgeschöpft wurde. Hier ist mit einer optimierten Aussaat sicher noch eine Leistungssteigerung möglich.

3.2.1.3 Erträge am Standort Haus Düsse

Im Mittel der drei Jahre waren am Standort Haus Düsse in der Zweikultur-Nutzung die Varianten Roggen sowie Roggen/Erbsen-Gemenge vor Mais mit einem Jahresertrag von 26-27 t TM/ha zwar am ertragreichsten (Abb. 7), der Jahresertrag war aber nur um ~1 t TM/ha höher als der von Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf (2 t TM/ha). Der Mehraufwand der Zweikultur-Nutzung mit Mais ist somit im Mittel der Jahre nicht gerechtfertigt. Eine Ausnahme war das Jahr 2006 mit den hohen Temperaturen im Sommer, in dem mit der Zweikultur-Nutzung mit 30 t TM/ha ein um 7 t TM/ha höherer Jahresertrag gemessen wurde als mit Mais in der Hauptfruchtstellung.

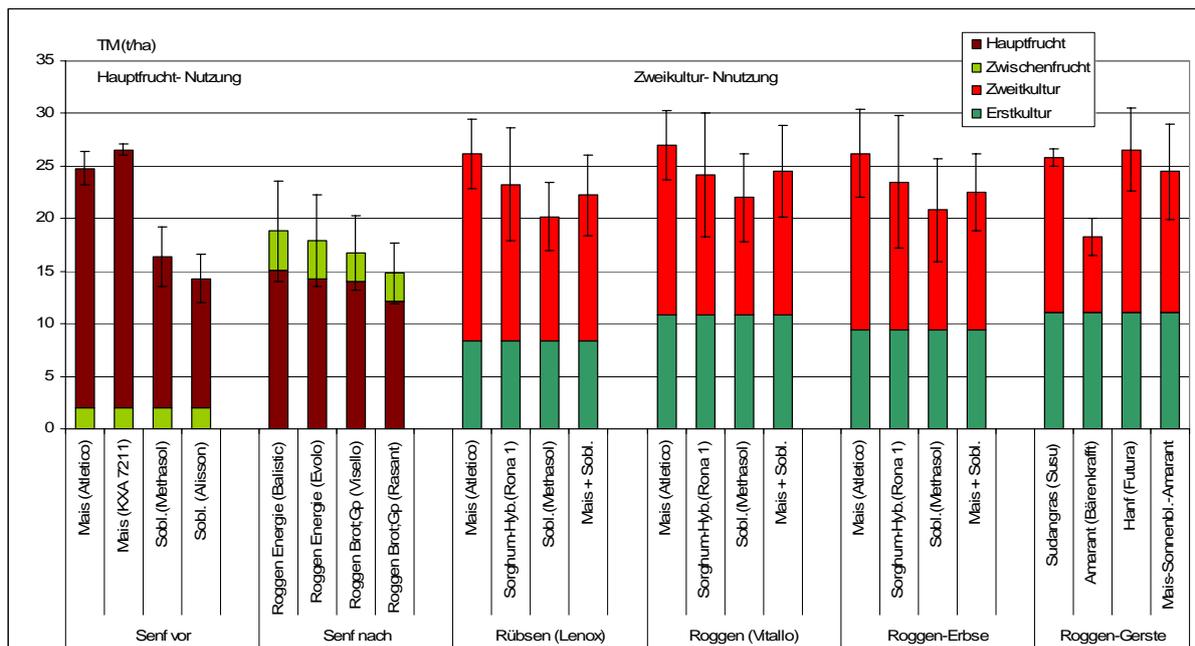


Abb. 7: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahre 2006 - 2008 am Standort Haus Düsse; Säule mit Standardabweichung

Mit Roggen-GPS gefolgt von Senf konnte Jahreserträge von 17,5 t TM/ha erzielt werden, wovon der Senf einen erntewürdigen Ertrag von rund 4 t TM/ha hatte, jedoch mit den typischen geringen TS-Gehalten von nur 24 %. Mit dem Anbau von Roggen-GPS war aber ein höherer Jahresertrag verbunden als mit Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung. Wenn Sonnenblumen an diesem Standort mit in die Fruchtfolge eingebunden werden sollen, dann in der Zweikultur-Nutzung mit Roggen, Roggen/Erbsen-Gemenge aber auch mit Rübsen als Erstkultur, da hier zum Teil signifikante Mehrerträge von über 5 t TM/ha erzielt werden konnten (Anhang Nr. 28).

Im Vergleich zum Anbau von Sonnenblumen konnte an diesem Standort mit der Sorghum-Hybride nach Rübsen, Roggen und Roggen/Erbsen-Gemenge ein Jahresertrag von rund 23,5 t TM/ha realisiert werden und damit ein signifikanter Mehrertrag von rund 8 t TM/ha (Hauptfruchtstellung) bzw. von rund 2,5 t TM/ha (Zweikultur-Nutzung). Dieser Jahresertrag wurde beim Anbau des Roggen/Gersten-Gemenges gefolgt von der Sudangras-Hybride mit 26 t TM/ha noch übertroffen. Damit sind die Sorghum-Hybride und die Sudangras-Hybride auf diesem Standort der Sonnenblume als Zweikultur vorzuziehen. Auch der Hanf nach Roggen/Gersten-Gemenge stellt mit einem Jahresertrag von 27 t TM/ha eine empfehlenswerte Bereicherung der Fruchtfolge an diesem Standort dar, wogegen mit Amarant ein nicht konkurrenzfähiger Ertrag von nur 18 t TM/ha erzielt werden konnte.

Zwar hatte der Rübsen als Erstkultur an diesem Standort wiederum einen niedrigeren Ertrag (8,4 t TM/ha) als der Roggen im Rein- bzw. Gemengeanbau (9,4-11 t TM/ha), jedoch konnten hier die Zweikulturen diesen geringeren Ertrag durch höhere Erträge der Zweikulturen nahezu ausgleichen.

Beim Vergleich aller Varianten kann für das Zweikultur-Nutzungssystem festgestellt werden, dass der deutlich größere Ertragsanteil am Jahresertrag aus der Zweikultur (im Mittel 13,7 t TM/ha) und der geringere aus der Erstkultur (im Mittel 9,9 t TM/ha) resultiert. Daraus ist, ebenso wie aus dem starken Ertragspotenzial von Mais in Hauptfruchtstellung, abzuleiten, dass sich dieser Standort im besonderen



Maße für den Anbau von Sommerungen eignet. Der Mais in Hauptfruchtstellung hat aus der Sicht des Ertrages hier zwar eine große Bedeutung. Zur Fruchtfolgeerweiterung und Stabilisierung der Erträge z.B. in Trockenjahren sind als weitere Sommerung neben Mais Sudangras-Hybride und Sorghum-Hybride für eine Zweikultur-Nutzung zu empfehlen. Weiterhin eignet sich an diesem Standort auch Roggen-GPS als früh räumende Kultur z.B. vor Raps.

3.2.1.4 Erträge am Standort Rauischholzhausen

Am Standort Rauischholzhausen war im Mittel der drei Versuchsjahre die Zweikultur-Nutzung mit Mais unabhängig von der Erstkultur mit einem Jahresertrag von 23-24 t TM/ha die ertragreichste Variante (Abb. 8). Sie war aber nicht signifikant ertragreicher als Mais in Hauptfruchtstellung (19-20,5 t TM/ha) nach Senf (1,5 t TM/ha) mit insgesamt 20-22 t TM/ha (Anhang Nr. 29). Der Mehraufwand der Zweikultur-Nutzung scheint somit bezüglich des Aspektes Ertragsleistung im Mittel der Jahre nicht gerechtfertigt. Auch im Jahr 2006 wurden hier bis zu 4 t TM/ha an Mehrertrag durch die Zweikultur-Nutzung erzielt.

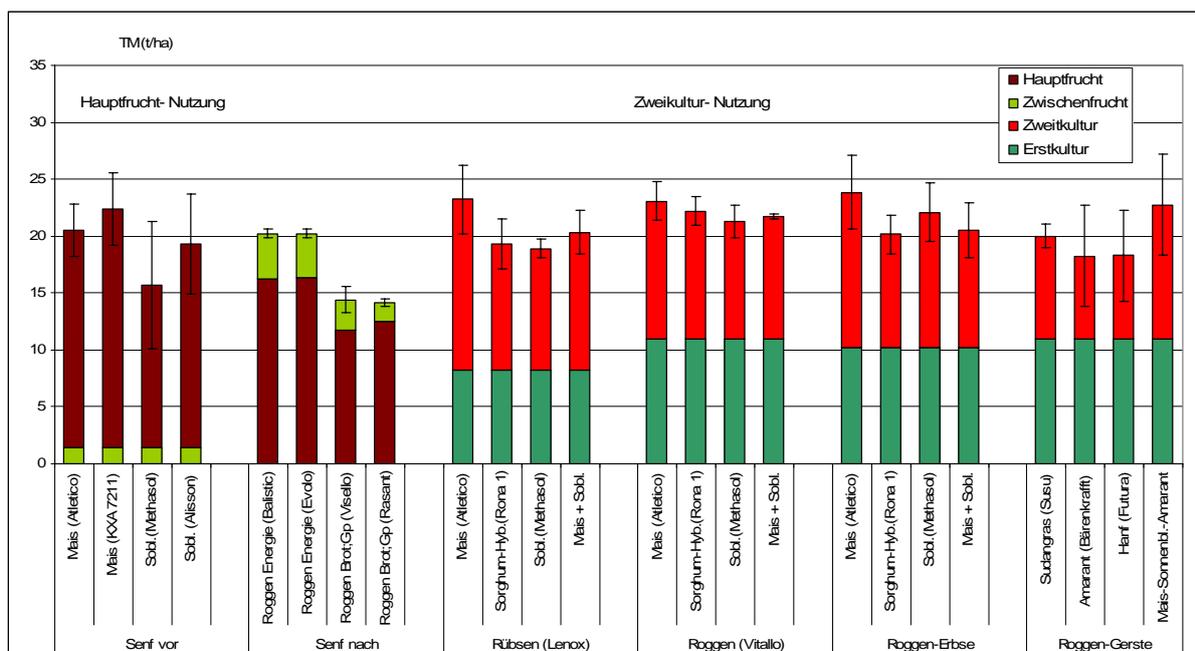


Abb. 8: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahre 2006 - 2008 am Standort Rauischholzhausen; Säule mit Standardabweichung

Beim Roggen-GPS gefolgt von Senf waren Jahreserträge von 20 t TM/ha zu verzeichnen, die im Mittel der Jahre Senferträge von fast 4 t TM/ha beinhalten. Damit ist die Ertragsleistung dieser Kultur fast ebenbürtig mit der Ertragsleistung von Mais. In der Praxis würden die Landwirte an diesem Standort nach der GPS-Ernte anstatt Senf den Winterraps anbauen, um hier die Vorzüge durch die frühere Ernte und das Fehlen von Ernteresten sowie durch einen geringeren Druck durch Ausfallgetreide zu nutzen. Sicherlich sorten- und anbaubedingt war hingegen Roggen zur Vollreife geerntet die Variante mit der geringsten Ertragsleistung.

Mit Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung konnten an diesem Standort mit einem Jahresertrag von 16-19 t TM/ha überdurchschnittliche Erträge erzielt werden, die nur im geringeren Umfang



(3 t TM/ha) durch eine Zweikultur-Nutzung mit einem Jahresertrag von 19-22 t TM/ha übertroffen wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier die Ertragsreduktion beim Anbau als Zweikultur etwas größer ist als an den anderen Standorten.

Die Sorghum- und Sudangras-Hybride nach Rübsen, Roggen und den Gemengen mit Roggen. waren mit einem Jahresertrag von 20-22 t TM/ha der Zweikultur-Nutzung mit Sonnenblumen ebenbürtig und sollte in den Anbau von Energiepflanzen aufgenommen werden, um zumindest die Vielfalt der Pflanzenarten zu nutzen. Hingegen ist der Ertragsvorteil von der Zweikultur-Nutzung mit Amaranth und Hanf gegenüber einer Hauptfrucht-Nutzung von Mais, Sonnenblumen und Roggen geringer und damit nicht empfehlenswert.

Der Rübsen als Erstkultur (8,3 t TM/ha) war auch an diesem Standort dem Roggen bzw. den Gemengen mit Roggen als Erstkultur unterlegen, nach ihm waren aber höhere Zweikultureerträge festzustellen als nach den Erstkulturen mit Roggen, worauf eine Anbauempfehlung gestützt wird. Diese Ertragskompensation wurde auch am Standort Haus Düsse festgestellt.

Beim Vergleich aller Varianten kann für die Zweikultur-Nutzung festgestellt werden, dass der Jahresertrag an diesem Standort zu nahezu gleichen Anteilen auf dem Ertrag der Sommerung (im Mittel 10,9 t TM/ha) und der Winterung (im Mittel 10,1 t TM/ha) beruht. Hohe Erträge in der Hauptfrucht-Nutzung und dieser Sachverhalt führen dazu, dass der Mehrertrag in der Zweikultur-Nutzung zu gering ist, sie uneingeschränkt zu empfehlen. Dennoch sollten neben Mais und Roggen in Hauptfruchtstellung zur Realisierung artenreicherer Fruchtfolgen Sonnenblumen und Sorghum- sowie Sudangras-Hybride in der Zweikultur-Nutzung angebaut werden. In diesem Zusammenhang sollte sich immer wieder vor Augen geführt werden, dass mit der Erstkultur in der Zweikultur-Nutzung neben erntewürdigen Aufwüchsen die ökologischen Leistungen „kostenfrei“ mit realisiert werden, die Ziel des Anbaus von Zwischenfrüchten sind, der aber zum Teil nicht zu erntewürdigen Aufwüchsen führt. Dies ist bei der gewählten Ergebnisdarstellung in Form von Jahreserträgen und die Ableitung von Empfehlungen hieraus für die Praxis zu beachten.

3.2.1.5 Erträge am Standort Straubing

Am Standort Straubing war im Mittel der drei Versuchsjahre der Mais in Hauptfruchtstellung mit Jahreserträgen von 27-28 t TM/ha (Anteil von Senf 3,7 t TM/ha) die ertragreichste Kulturpflanze (Abb. 9; Anhang Nr. 30). Dieser Ertrag konnte nicht von Mais in Zweikultur-Nutzung mit Roggen (27 t TM/ha) übertroffen werden. Deutliche Unterschiede zeigten sich jedoch in den Einzeljahren, z.B. führte die Zweikultur-Nutzung im trocken-warmen Jahr 2006 zu einem Mehrertrag von 6 t TM/ha gegenüber Mais in Hauptfruchtstellung, in 2007 mit optimalen Bedingungen für das Maiswachstum dagegen zu einem um 4,5 t TM/ha geringeren Ertrag.

Mit Sonnenblumen nach den Winterungen konnte ein Jahresertrag von 19,5-21 t TM/ha und ein Ertragsanteil durch die Sonnenblume von ~10-11,6 t TM/ha realisiert werden, der dem mit Mais als Zweikultur deutlich unterlegen ist. Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung erzielten lediglich einen Jahresertrag von 17 – 19 t TM/ha (ohne Senf 13-15,6 t TM/ha), was zu der Empfehlung führt, aus der Sicht des erntbaren Ertrages (rund 5 t mehr) bei Sonnenblumen die Zweikultur-Nutzung der



Hauptfrucht-Nutzung vorzuziehen sowie das Gemenge aus Mais und Sonnenblumen bzw. aus Mais, Sonnenblumen und Amarant für den Anbau vorzusehen. Wie auch an den anderen Standorten muss hierbei berücksichtigt werden, dass die TS-Gehalte bei diesen Varianten im Mittel unter 25% liegen und deswegen bei konventioneller Silagebereitung mit Sickersaftbildung zu rechnen ist.

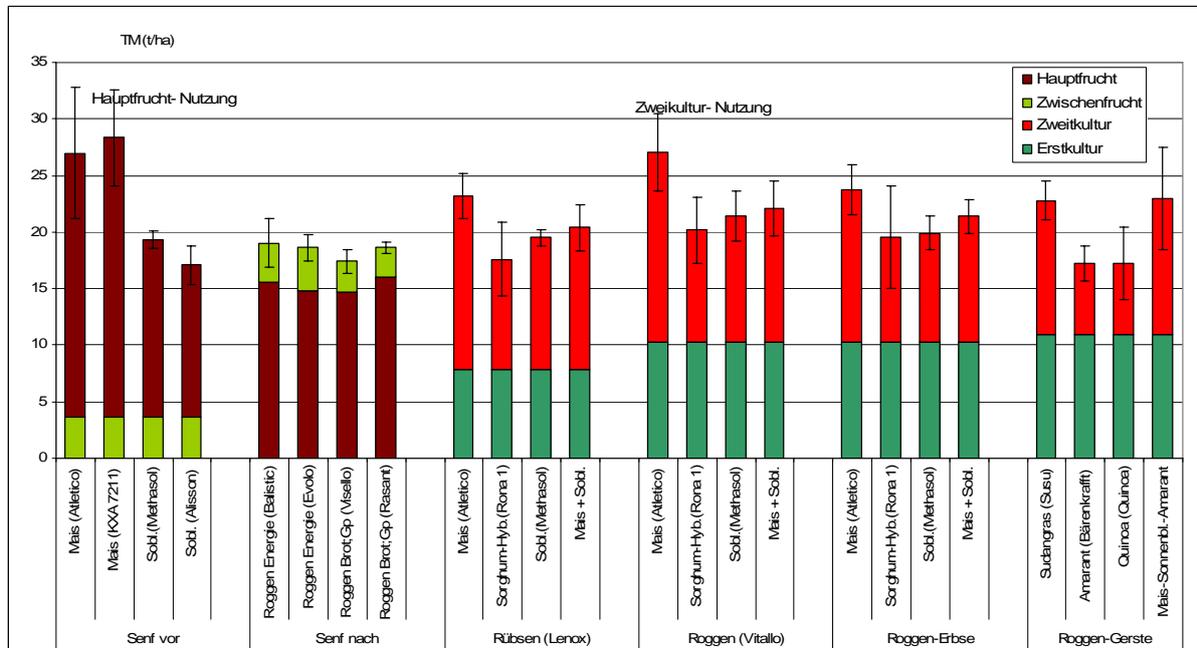


Abb. 9: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahre 2006 - 2008 am Standort Straubing; Säule mit Standardabweichung

Vergleichbare Erträge zu Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung waren beim Roggen-GPS gefolgt von Senf mit ~19 t TM/ha (bzw. 15,5 t TM/ha ohne Senf) zu verzeichnen. Da der Roggen früher geerntet wird als die Sonnenblumen und mit TS-Gehalten, die eine verlustarme Silagebildung erlauben, bietet es sich an, ihn in Fruchtfolgen mit früh auszusäenden Kulturen wie z. B. Raps einzubeziehen.

Noch überlegen ist an diesem Standort die Sonnenblume der Sorghum-Hybride als Zweitkultur, mit der nach Roggen und Roggen/Erbsen-Gemenge ein Jahresertrag von 20 t TM/ha erzielt werden konnte. Da mit der Sudangras-Hybride nach Roggen/Gersten-Gemenge ein Jahresertrag von 23 t TM/ha realisiert wurde, ist anzunehmen, dass zukünftig an diesem „Mais“- Standort mit anderen bzw. verbesserten Sorten und Saattechniken diese Kulturen zu höheren Erträgen befähigt sein werden.

Anstatt Hanf, der hier nicht angebaut werden durfte, wurde Quinoa als Zweitkultur ausgesät. Wie beim Amarant konnten nur Jahreserträge von 17,2 t TM/ha erzielt werden, wobei die kürzere Entwicklungszeit diese Kultur eine um vier Wochen frühere Ernte bei TS-Gehalten um 28% erlaubte. Amarant dagegen konnte sein Ertragspotenzial aufgrund eines zögernden Feldaufgangs und mangelnder Konkurrenzkraft während der Jugendentwicklung nicht voll ausschöpfen.

Aus dem Vergleich der Varianten kann für die Zweitkultur-Nutzung festgestellt werden, dass der etwas größere Ertragsanteil am Jahresertrag aus der Zweitkultur (im Mittel 11,2 t TM/ha) und der geringere aus der Erstkultur (im Mittel 9,8 t TM/ha) entstammt. Obwohl hieraus und dem hohen Ertragspotenzial von Mais in Hauptfruchtstellung für diesen Standort eine Vorzüglichkeit für den



Anbau von Sommerungen abzuleiten ist, sollte dem Roggen zur Silagebereitung auch ein fester Anteil in der Fruchtfolge zugemessen werden. Während beim Maisanbau eindeutig der Hauptfruchtstellung der Vorzug gegeben werden sollte, sollten die Sonnenblumen und sicherlich auch die Sorghum- und Sudangras-Hybride als Zweitkulturen angebaut werden. Hinsichtlich der Sortenwahl muss bei der Zweikultur-Nutzung aber auf frühe Sorten geachtet werden, da sonst, wie im Versuch beobachtet, keine ausreichenden Trockensubstanzgehalte zur Ernte erreicht werden.

3.2.1.6 Erträge am Standort Werlte

Am Standort Werlte hatte im Mittel der drei Jahre die Zweikultur-Nutzung von Roggen und Roggen/Erbsen-Gemenge gefolgt von Mais mit 20 t TM/ha zwar den höchsten Jahresertrag (Abb. 10; Anhang Nr. 31), die Ertragsleistung lag damit jedoch nur 1 t TM/ha über dem Jahresertrag von Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf (Anteil von Senf 0,8 t TM/ha). Dieses Ergebnis beinhaltet aber deutliche Jahresunterschiede: im trocken-warmen Jahr 2006 war bei der Zweikultur-Nutzung Mehrertrag von 5 t TM/ha zu verzeichnen, während im Jahr 2007 mit optimalen Bedingungen für das Maiswachstum die Hauptfrucht-Nutzung um 3 t TM/ha überlegen war.

Deutlichere Differenzen im Jahresertrag zwischen den Anbausystemen als beim Mais ergaben sich bei der Sonnenblume. Im der Hauptfrucht-Nutzung wurden Jahreserträge von 9-11 t TM/ha (Anteil Senf 0,8 t TM/ha) gemessen, bei der Zweikultur-Nutzung von 13-18 t TM/ha. Der Anteil der Sonnenblumen in diesem Jahresertrag betrug ~7,6-10 t TM/ha und war nur etwas geringer als der Ertrag der Sonnenblume in Hauptfruchtstellung. Es sei erwähnt, dass die Ertragshöhe und auch Ertragsschwankungen in den Versuchen mit durch Vogelfraß gemindert bzw. verursacht wurden, denen durch Anbau auf größeren Flächen begegnet werden kann. Die Sonnenblumen, die neben Mais als Energiepflanze in die Fruchtfolge aufgenommen werden sollte, sollte dann bevorzugt in der Zweikultur-Nutzung angebaut werden, da hier der erntbare Ertrag um bis zu 7 t höher ist als in Hauptfruchtstellung.

Vergleichbare Erträge wie die Sonnenblume haben die Sorghum-Hybride (16-17 t TM/ha), etwas höhere Erträge die Sudangras-Hybride (19 t TM/ha), die fast denen von Mais entsprechen. Auch an diesem Standort wurde deutlich, dass diese Kulturen besonders im trockenen Jahr 2006 ihr hohes Ertragspotenzial entfalten konnten und einen Mehrertrag von 3,5 t TM/ha gegenüber Mais in Hauptfruchtstellung hatten. Demgegenüber konnte mit Amarant und Hanf nur geringe Jahreserträge erzielt werden und sind zunächst nicht für den Anbau als Zweitkulturen an diesem Standort zu empfehlen.

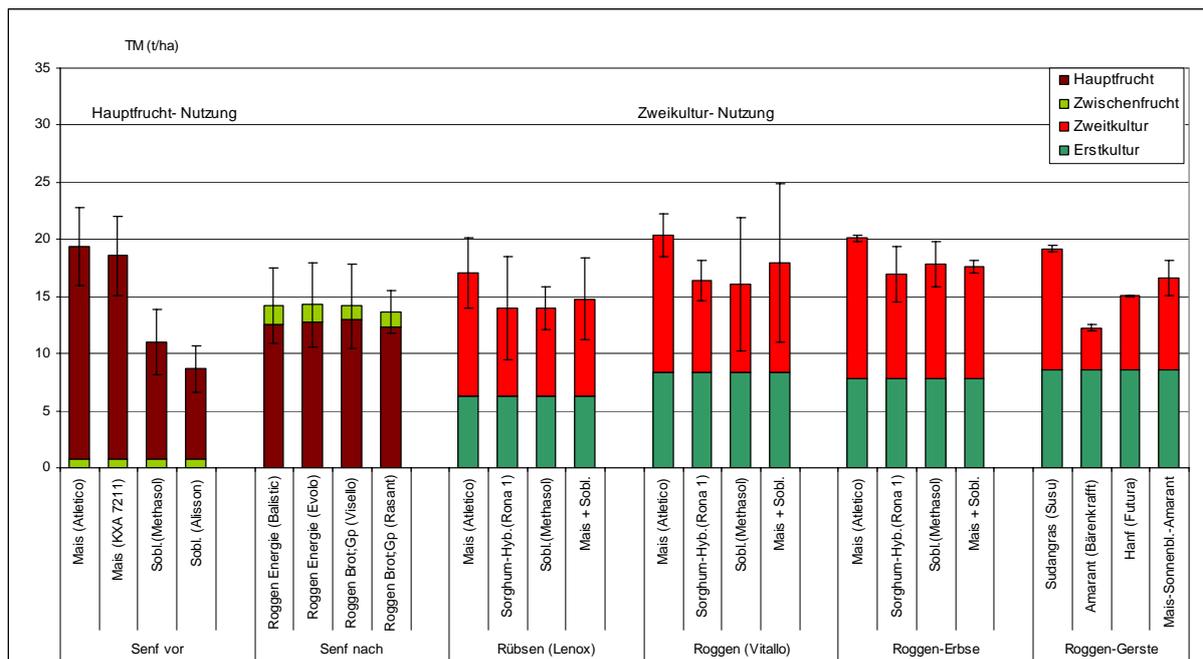


Abb. 10: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahre 2006 - 2008 am Standort Werthe; Säule mit Standardabweichung

Hingegen kann eine klare Empfehlung für den Anbau von Roggen-GPS gefolgt von einer Zwischenfrucht ausgesprochen werden, um ihm einen Anteil an der Fruchtfolge zuzumessen, da hiermit Erträge von 12,5 t TM/ha (ohne Senf) realisiert werden können. Diese Kultur ist zwar Mais in Hauptfruchtstellung unterlegen, jedoch der Sonnenblume als Hauptfrucht überlegen. In der Praxis würde an diesem Standort als Folgefrucht nach Roggen-GPS nicht Senf gewählt sondern Gras, das im Herbst noch ein- bis zweimal und im folgenden Frühjahr vor der Saat von Mais noch einmal geschnitten würde.

Als Erstkultur ist der Rübsen (6,2 t TM/ha) den Erstkulturen Roggen bzw. Gemengen mit Roggen unterlegen (8,4 t TM/ha). An diesem Standort wurde dieser Minderertrag bei der Erstkultur nicht durch einen Mehrertrag bei der Zweitkultur kompensiert. Eine Empfehlung für den Rübsen kann nur aus der Sicht der Artenvielfalt, eines Erosionsschutzes und der Begegnung von Nitratauswaschungen durch seine Frühsaat ausgesprochen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass an diesem Standort die Hauptfrucht-Nutzung von Mais ihren festen Anteil in der Fruchtfolge haben sollte sowie ergänzend zum Roggen-GPS gefolgt von Gras auch Sonnenblumen, Sorghum und Sudangras in der Zweitkultur-Nutzung angebaut werden sollten.

3.2.1.7 Erträge am Standort Witzhausen

Im Mittel der drei Jahre war am Standort Witzhausen die Zweitkultur-Nutzung mit Roggen/Erbsen-Gemenge gefolgt von Mais mit einem Jahresertrag von 25 t TM/ha am ertragreichsten (Abb. 11). Hiermit konnte ein um 2 t TM/ha höherer Jahresertrag als mit Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf mit 23 t TM/ha (Anteil von Senf 1,5 t TM/ha) erzielt werden, die Ertragsdifferenz war jedoch nicht signifikant (Anhang Nr. 32). Im trockenen Jahr 2006 war auch hier der Jahresertrag der Zweitkultur-



Nutzung deutlich höher (4 t TM/ha) als in der Hauptfrucht-Nutzung, während er im Jahr 2007 in gleichem Maße unter dem Jahresertrag in der Hauptfrucht-Nutzung lag. Im Gegensatz zum Mais kann bei der Sonnenblume die Zweikultur-Nutzung empfohlen werden, da hier mit Roggen und Roggen/Erbsen-Gemenge Jahreserträge von 20-21 t TM/ha und damit signifikante Mehrerträge von 5-6 t TM/ha gegenüber der Hauptfruchtstellung mit 15 t TM/ha (Senf 1,5 t TM/ha) zu verzeichnen waren. Im Vergleich hierzu hatten die Sonnenblumen als Zweikultur einen Ertrag von ~10-11 t TM/ha.

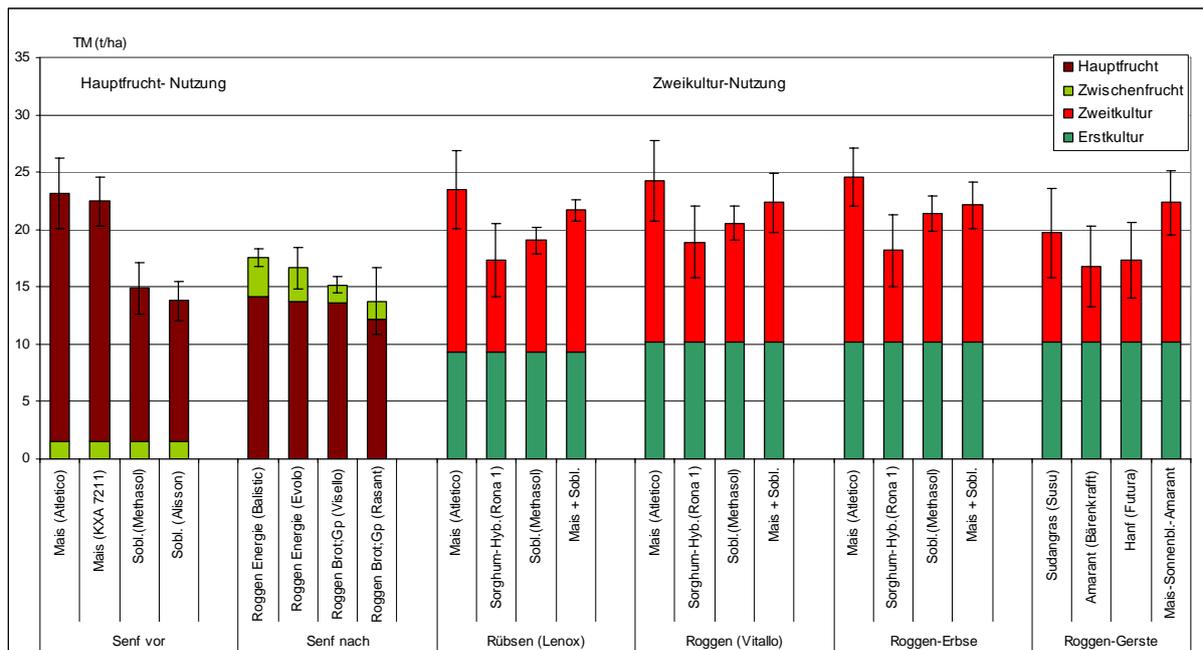


Abb. 11: Jahres-Trockenmasseerträge der Versuchsvarianten im Mittel der Jahre 2006 - 2008 am Standort Witzenhausen; Säule mit Standardabweichung

Unter den geprüften Rahmenbedingungen für den Anbau von der Sorghum- und der Sudangras-Hybride (Sorte, Saatstärke, Reihenweite) sind diese Kulturen noch der Sonnenblume im Ertrag unterlegen, wobei wiederum mit der Sudangras-Hybride (19,7 t TM/ha) ein höherer Jahresertrag zu verzeichnen war als mit der Sorghum-Hybride (18-19 t TM/ha). Hier gibt es sicher noch Optimierungspotenzial im Rahmen des Anbaus und durch Züchtung, sodass zukünftig vermutlich auch ihr Anbau als Zweikultur auf diesem recht kühlen Standort empfohlen werden kann. Hingegen bieten Amarant (6,8 t TM/ha) und Hanf (7,3 t TM/ha) als Zweikulturen an diesem Standort noch keine Perspektive.

Im Mittel aller Varianten kann zusammenfassend für das Zweikultur-Nutzungssystem festgestellt werden, dass die Erstkulturen (im Mittel 10 t TM/ha) und die Zweikulturen (im Mittel 10,7 t TM/ha) zu etwa gleichen Anteilen zum Jahresertrag beigetragen haben.

Mit Roggen-GPS gefolgt von Senf konnte Jahreserträge von 17,5 t TM/ha (Anteil Senf 3,4 t TM/ha) erzielt werden und stellt somit als früh räumende Frucht eine gute Ergänzung zum Mais in Hauptfruchtstellung in der Fruchtfolge dar. Ob hierbei die Zwischenfrucht einen erntewürdigen Ertrag von über 4 t TM/ha hat oder eine Gründüngung darstellt, ist in den Einzeljahren im Herbst rechtzeitig zu ermitteln bzw. abzuschätzen.



Der Rübsen als Erstkultur (9,3 t TM/ha) hatte im Vergleich zu den drei Erstkulturen mit Roggen (10 t TM/ha) einen etwas geringeren Ertrag. Im Gegensatz zu den Erkenntnissen von den anderen Standorten ist hier keine Kompensation des Minderertrages bei der Erstkultur durch einen Mehrertrag bei der Zweitkultur zu verzeichnen. Aus Aspekten der Fruchtfolge usw. sollte dieser Kultur dennoch Raum gegeben werden.

3.2.2 Erträge im Standortvergleich

3.2.2.1 *Mais und Sonnenblumen als Hauptfrucht bzw. in Zweikultur-Nutzung*

Herausgelöst aus dem Gesamtversuch werden nachfolgend die Ertragsunterschiede von Mais (Abb. 12) und Sonnenblumen (Abb. 13) in Hauptfruchtstellung im Vergleich zum Anbau als Zweitkultur nach der Erstfrucht Roggen aufgezeigt, um die Standortunterschiede zu verdeutlichen. Diese Ergebnisse werden für die drei Versuchsjahre sowie im Mittel der Jahre dargestellt.

Mais (Abb. 12): Die Standorte Haus Düsse und Straubing hatten insgesamt das höchste Ertragspotenzial, mit Abstand gefolgt von dem Standort Witzenhausen. Deutlich werden hier die zuvor erwähnten großen Jahresunterschiede im Ertrag in beiden Nutzungssystemen. Im Jahr 2006 konnte an allen Standorten mit dem Mais nach Roggen ein Mehrertrag erzielt werden. Insbesondere in Gülzow, Haus Düsse und Straubing waren die Ertragsunterschiede überdurchschnittlich. In 2007 war der Mais in Hauptfruchtstellung dem Zweikulturanbau an fünf Standorten überlegen. Nur in Dornburg und Gülzow führte die Erstkultur zu einer Ertragsstabilisierung und zu Mehrerträgen gegenüber der Mais-Hauptfruchtnutzung. Vergleichbares war im Jahr 2008 gegeben. An den Standorten Dornburg, Gülzow und Werlte, den Standorten mit geringerer Bodengüte waren geringe bis mittlere Mehrerträge zu verzeichnen, während auf den besseren Standorten der Mais in Hauptfruchtstellung überlegen war.

Sonnenblumen (Abb. 13): Im Mittel der Standorte und Jahre lag das Ertragsniveau von Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung um 7 t und in Zweitfruchtstellung um 3,5 t TM/ha unter dem von Mais in Haupt- bzw. Zweikultur-Nutzung. An allen Standorten und in allen drei Jahren konnte mit der Sonnenblume im Zweikultur-Nutzungssystem ein höherer Ertrag erzielt werden, jedoch waren die Ertragsunterschiede an den Standorten Werlte und Straubing geringer als an den anderen Standorten. Die großen Ertragsunterschiede an einzelnen Standorten zwischen den Jahren sind nicht nur auf

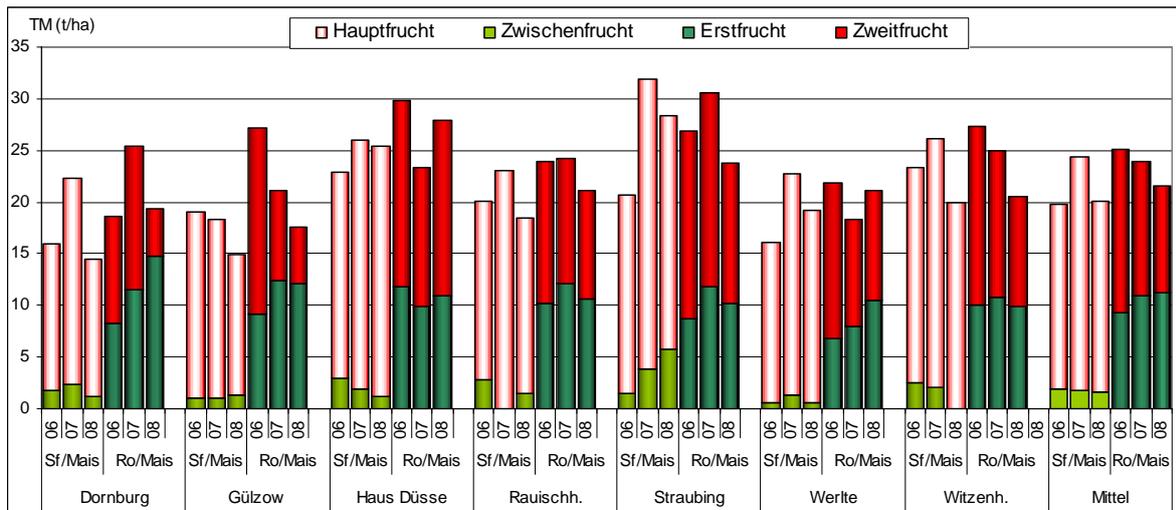


Abb. 12: Jahres-Trockenmasseerträge von Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf bzw. in der Zweikultur-Nutzung mit Roggen an den sieben Standorten in den Jahren 2006-2008

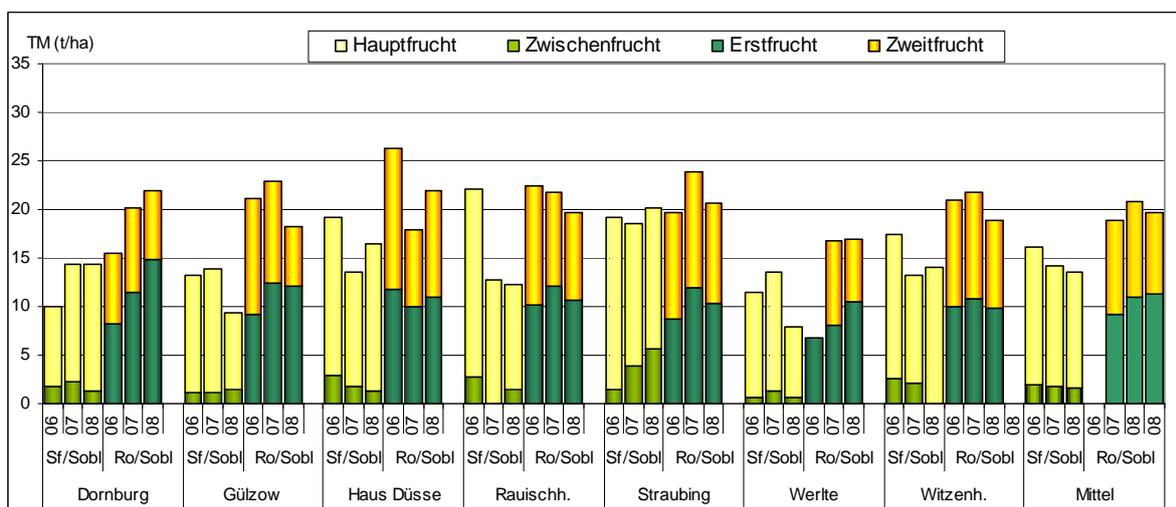


Abb. 13: Jahres-Trockenmasseerträge von Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung nach Senf bzw. in der Zweikultur-Nutzung mit Roggen an den sieben Standorten in den Jahren 2006-2008

Witterungseinflüsse usw. zurückzuführen, sondern u. a. auch auf den Verlust von Pflanzen durch Vogelfraß nach der Saat und den Verlust von Körnern während der Abreife durch Vogelfraß.

3.2.2.2 Sorghum-, Sudangras-Hybride und Roggen-GPS im Standortvergleich

Sorghum und Sudangras: Die folgende Abb. 14 stellt den Vergleich der Jahreserträge von Sorghum-Hybride (Sorte *Rona 1*) nach Roggen sowie Sudangras-Hybride (Sorte *SUSU*) nach Roggen/Gersten-Gemenge für alle Versuchsstandorte und Versuchsjahre dar. In beiden Varianten wurden im Mittel der Jahre einen Gesamtertrag von 19 t TM/ha erzielt, wozu die Zweitkulturen 9 t TM/ha beigetragen haben. Nur im Jahr 2006 konnten um rund 2 t TM/ha höhere Erträge als beim Mais in Hauptfruchtstellung (siehe Abb. 12) realisiert werden, ein Spitzenertrag von 30 t TM/ha und damit ein Mehrertrag von 6 t TM/ha gegenüber Mais wurde mit Sorghum am Standort Haus Düsse erzielt. Deutliche Unterschiede zwischen den Hybriden von Sorghum und Sudangras konnten an



keinem der Standort festgestellt werden. Bedeutend ist jedoch, dass diese Feinsämereien hohe Ansprüche an die Saatbettbereitung sowie die Wasserverfügbarkeit und Temperatur zum Auflaufen stellen. Welches Ertragspotenziale sie haben, wurde im Jahr 2006 sichtbar. Eine züchterische Weiterbearbeitung im Hinblick auf die Schaffung standortangepasste Sorten ist somit geboten, um das Ertragspotenzial dieser Kulturen zu sichern, und damit mittelfristig eine weitere Alternative zum Mais zu erhalten.

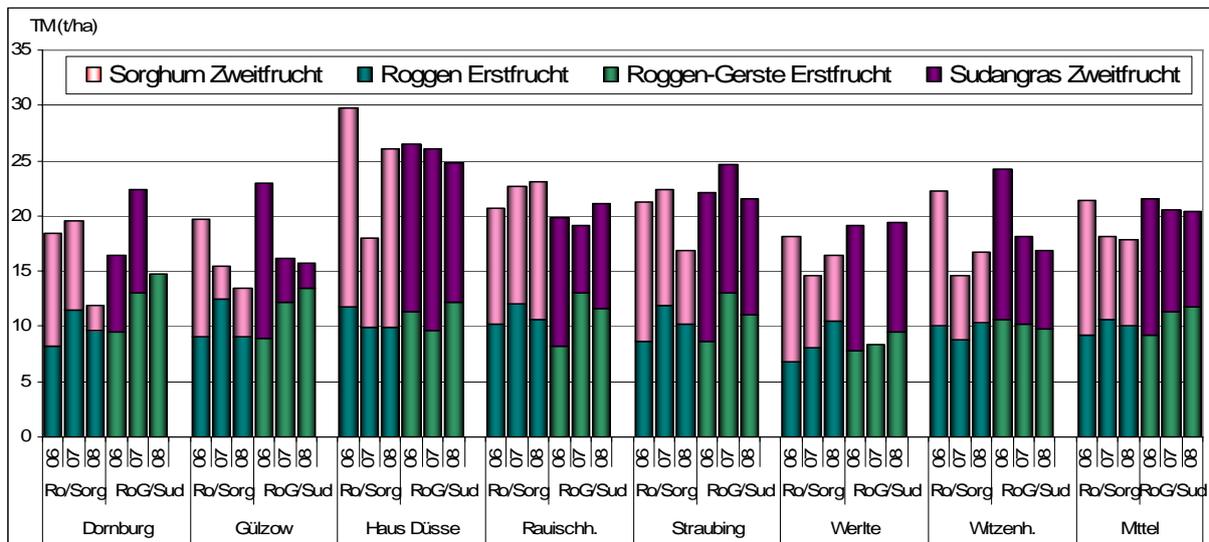


Abb. 14: Jahres-Trockenmasseerträge in der Zweikultur-Nutzung mit Roggen und Sorghum-Hybride sowie mit Roggen/Gersten-Gemenge und Sudangras-Hybride an den sieben Versuchsstandorten in den Jahren 2006-2008

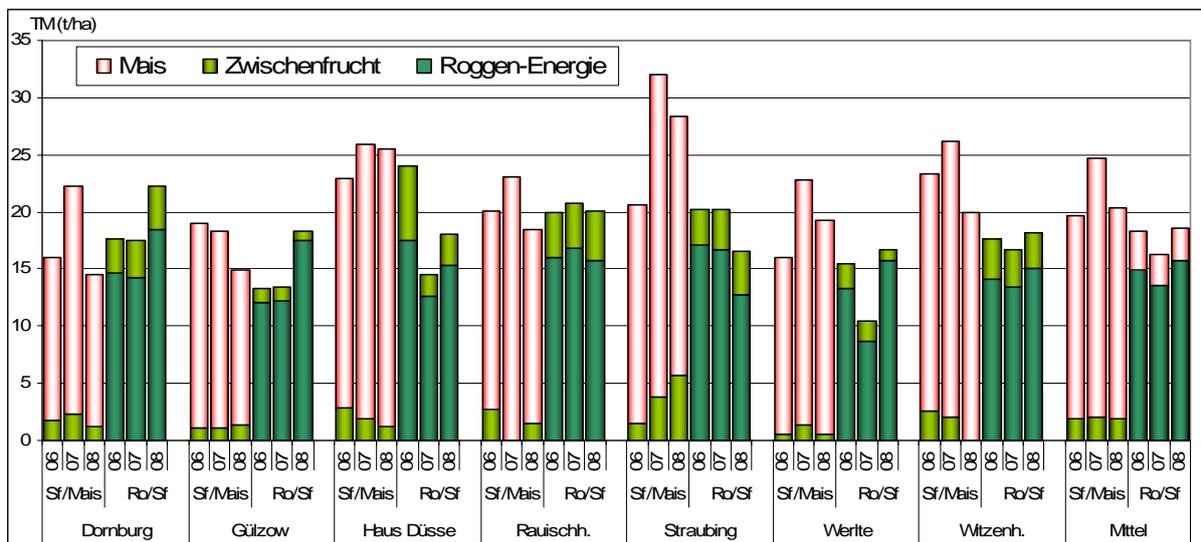


Abb. 15: Jahres-Trockenmasseerträge der Hauptfrüchte Mais nach Senf im Vergleich zu Roggen-GPS gefolgt von Senf an den sieben Versuchsstandorten in den Jahre 2006-2008

Roggen-GPS: Um auch einen direkten Vergleich zwischen Roggen-GPS und Mais in Hauptfruchtstellung zu ermöglichen, sind in Abb. 15 die Jahreserträge dieser Varianten im Standort- und Jahresvergleich dargestellt. Hervorzuheben ist das hohe Ertragspotenzial von Roggen-GPS am Standort Dornburg mit einem Mehrertrag gegenüber dem Mais von im Mittel 3 t TM/ha, sowie am



Standort Rauischholzhausen, an dem beide Kulturen mit 20 t TM/ha das gleiche Ertragsniveau hatten. An diesen Standorten ist der Roggen eine gute Ergänzung zum Silomais und ihm sollte ein fester Anteil in der Fruchtfolge zur Bereitstellung von Energiepflanzen zugemessen werden. An den Gunststandorten für Mais (Haus Düsse, Straubing, Witzenhausen) waren die Ertragsunterschied wie zu erwarten größer und führten zu einer klaren Präferenz von Mais. Dennoch bleibt auch für diese Standorte der Roggen eine ertragsstabile und früh räumende Kulturpflanze, die zur Auflockerung der Fruchtfolgen und als Ergänzung zum Silomais genutzt werden sollte.

3.3 Genutzte Vegetationstage und Bestandesentwicklung

Das gewählte Anbausystem beeinflusst zusammen mit den Standort- und Klimabedingungen die Bestandesentwicklung der Kulturen und ihren Biomasseertrag. Im Folgenden werden daher die Entwicklung der Kulturen und die genutzte Vegetationszeit dargestellt sowie die Beziehung zwischen täglichem Biomassezuwachs und Gesamtertragsleistung für die Systeme Hauptfrucht-Nutzung und Zweikultur-Nutzung analysiert. Hierzu wurde die Entwicklung der Kulturen mittels wöchentlicher Bonitur (BBCH-Stadien) erfasst und zusammen mit dem Saat- und Erntetermin sowie dem Ertrag der tägliche Zuwachs berechnet.

Tab. 8: Übersicht zu den Aussaat- und Ernteterminen sowie BBCH Stadien zur Ernte im Mittel der sieben Standorte und drei Versuchsjahre

Kultur	Aussaattermin	Erntetermin	BBCH zur Ernte
Winterungen			
Roggen GPS Hauptkultur	28.9.	23.6.	80
Roggen Erstkultur	28.9.	3.6.	71
Roggen-Erbesen Erstkultur	28.9.	3.6.	71
Roggen-Gerste Erstkultur	28.9.	3.6.	71
Sommerungen			
Mais Hauptkultur	24.4.	17.9.	84
Sobl. Hauptkultur	27.4.	14.9.	83
Mais Zweitkultur	12.6.	15.10.	78
Sonnenblume als Zweitkultur	11.6.	15.10.	81
Mais-Sobl. Zweitkultur	12.6.	14.10.	77
Sudangras Zweitkultur	12.6.	13.10.	70
Sorghum Zweitkultur	12.6.	15.10.	68
Amaranth Zweitkultur	12.6.	9.10.	80
Hanf Zweitkultur	12.6.	1.10.	78

Entsprechend Tab. 8, in der die mittleren Aussaat- und Erntetermine sowie die zur Endernte erzielten BBCH-Stadien der untersuchten Kulturen im Mittel der Standorte und Jahre zusammengetragen sind, wurden der Winterrüben Ende August gesät und der Roggen bzw. Gemenge mit Roggen Ende September. Die Aussaat der Sommerungen Mais und Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung fand gegen Ende April statt. Die Aussaat der Sommerungen als Zweitkulturen erfolgte rund sechs Wochen später Mitte Juni, etwa eine Woche nach der Ernte der Erstkulturen zu BBCH 71. Versuchstechnisch bedingt wurde dieser Zeitraum für das Räumen des Feldes, die flache Bodenbearbeitung, die Saattbettbereitung und Saat der Zweitkulturen benötigt. Hingegen wurde die Ernte des Energie-



Roggens zu BBCH 83 (Roggen-GPS) rund 3 Wochen später Ende Juni durchgeführt. Bis zur Ernte des Brot-Roggens (BBCH 92) vergingen weitere vier bis fünf Wochen (vgl. auch im Anhang Nr. 20).

Die Ernte der Sommerungen in Hauptfruchtstellung erfolgte Mitte September. Die Zweitkulturen wurden dagegen erst Mitte Oktober, also fast einen Monat später geerntet, und nicht in jedem Fall konnte zur Ernte der gewünschte Reifegrad (BBCH 83) erzielt werden.

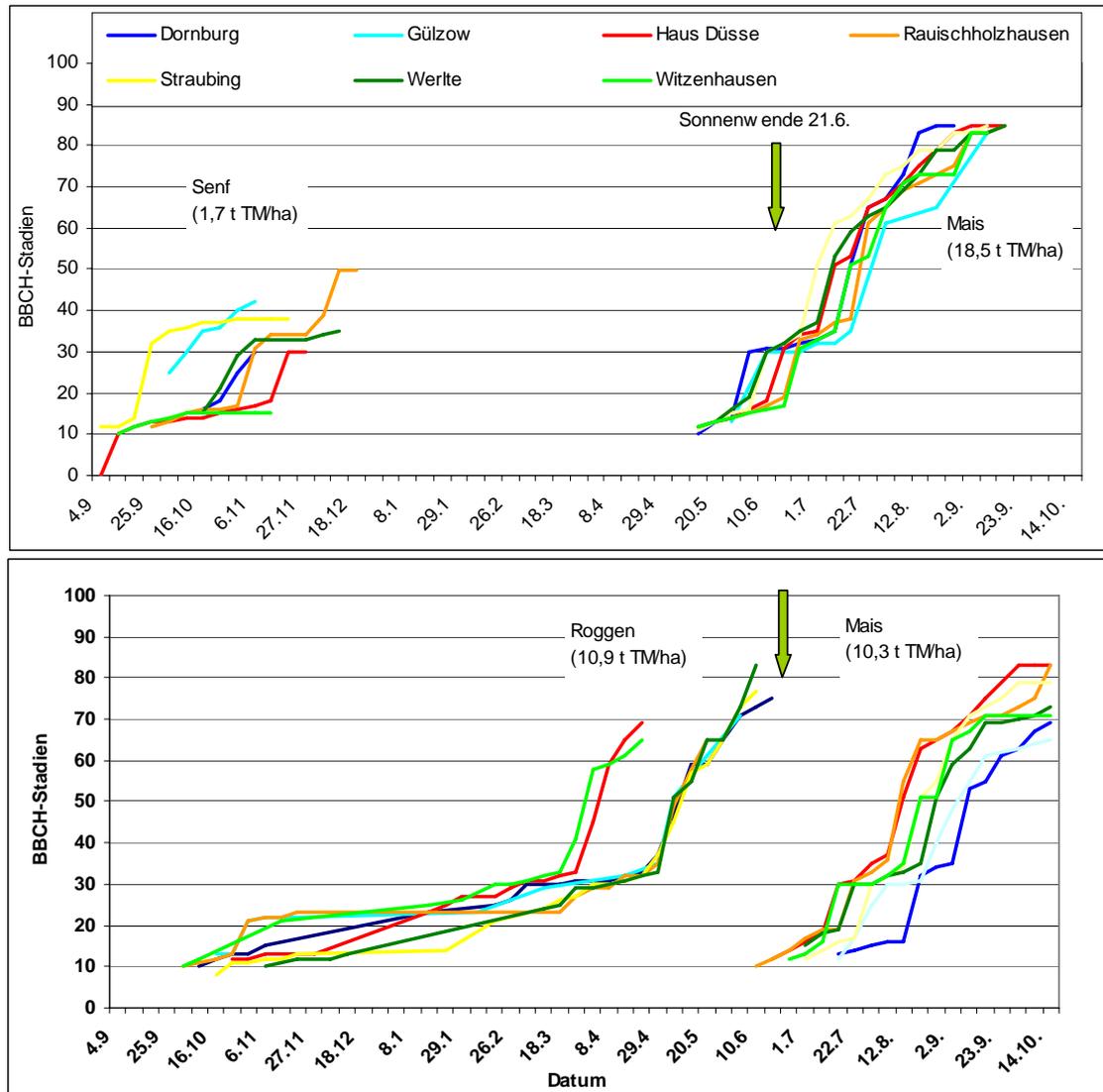


Abb. 16: Entwicklung (BBCH Stadien) von Mais im Hauptfruchtanbau nach Senf (oben) und von Mais als Zweitkultur nach Roggen (unten) an sieben Standorten im Erntejahr 2008

Um die Unterschiede in der Entwicklung der Kulturen zwischen den Standorten aufzuzeigen, werden in Abb. 16 exemplarisch für das Erntejahr 2008 die Ergebnisse der Bonituren zum Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf (oben) und Mais als Zweitkultur nach Grünroggen (unten) dargestellt.

Hauptfrucht-Nutzung: Nach etwa vergleichbaren Saatzeiten entwickelte sich der Senf als Zwischenfrucht in unterschiedlichem Maße bis zu Beginn der Vegetationsruhe, starb danach während des Winters ab und blieb als Mulch bis ins Frühjahr erhalten (Abb. 16 oben). Der nachfolgende Mais in Hauptfruchtstellung entwickelte sich an den einzelnen Standort in nahezu gleichem Maße. Die



Unterschiede zwischen den Standorten im Eintritt des gleichen Stadiums von bis zu 10 Tagen beruhen maßgeblich auf den Unterschieden in der Saatzeit.

Zweikultur-Nutzung: Der Roggen als Erstkultur erreichte trotz Unterschiede in der Herbstentwicklung bis zum Vegetationsbeginn an den sieben Standorten scheinbar das nahezu gleiche Entwicklungsstadium, danach war aber an den Standorten Haus Düsse und Witzenhausen im Vergleich zu den anderen Standorten einen deutlichen Entwicklungsvorsprung zu verzeichnen (Abb. 16 unten). Möglicherweise ergaben sich an diesen Standorten während des Winters und im zeitigen Frühjahr Rahmenbedingungen, die, im Rahmen der Bonitur nicht erkennbar, zu einem viel früheren Eintritt in die generative Phase führten. Vergleichbare, aber weniger ausgeprägte Unterschiede zwischen den Standorten waren auch im ersten Versuchsjahr zu verzeichnen. Ein Aspekt, dem im Rahmen der weiteren Versuchstätigkeit Beachtung geschenkt wird.

Beim nachfolgenden Mais als Zweikultur bestanden zwischen den Standorten Unterschiede im Saatdatum von bis zu 4 Wochen, was auf die Entwicklungsunterschiede bei der Erstkultur aber auch auf witterungsbedingte und damit versuchstechnische Verzögerungen an den Standorte Dornburg und Gülzow zurückzuführen ist. Diese Unterschiede in der Entwicklung blieben bis zur Ernte erhalten und resultieren in zu geringen Reifegraden zur Ernte. Hieraus sollte das Ziel für einen ausreichenden Reifegrad der Zweikultur abgeleitet werden, nicht zu spät, möglichst nicht später als Anfang Juni die Zweikultur Mais zu säen (vgl. Abb. 22).

Zur weiteren Beschreibung der Unterschiede zwischen den Anbausystemen sind in Abb. 17 für die Leitkultur Mais in Hauptfrucht- und Zweifruchtstellung die Anzahl Tage von der Aussaat bis zur Ernte sowie die BBCH-Stadien zur Ernte im Mittel der Standorte und drei Versuchsjahre dargestellt. Ihr kann entnommen werden, dass der Mais als Hauptfrucht 139 Tage der Vegetationszeit zur Ertragsbildung nutzte, die mit der Ernte Ende September noch nicht in vollem Umfang ausgeschöpft war. Hingegen nutzte der Mais als Zweikultur, der Mitte bis Ende Oktober geerntet wurde, in einem Zeitraum von 123 Tagen die noch verfügbare Vegetationszeit in vollem Umfang aus. An den Standorten Dornburg und Gülzow war die Anzahl genutzter Vegetationstage am geringsten, an den anderen Standorten vergleichbar groß. Während der Mais als Hauptfrucht zur Ernte im Schnitt die Teigreife erreichte, konnte der Mais als Zweikultur, der jeweils zum spätest möglichen Termin geerntet wurde, nur die frühe Milchreife erlangen, die mit einem zu geringen TS-Gehalt verbunden war.

Aus dem jeweiligen Maisertrag und der genutzten Vegetationszeit wurde der tägliche Zuwachs an Biomasse für beide Anbausysteme berechnet und in Abb. 18 für die Standorte sowie in Abb. 19 für die Jahre dargestellt. In Verbindung mit Abb. 17 wird hieraus deutlich (Abb. 18), dass die hohen Erträge insbesondere an den Standorten Haus Düsse, Straubing und Witzenhausen nicht nur auf der etwas größeren Anzahl genutzter Vegetationstage beruht sondern insbesondere auf dem deutlich höheren täglichen Zuwachs. Bei nahezu vergleichbarem täglichem Zuwachs am Standort Werlte wie an den Standorten Dornburg, Gülzow und Rauschholzhausen sind die höheren Erträge in Rauschholzhausen und Werlte auf die höhere Anzahl genutzter Vegetationstage zurückzuführen. Die Unterschiede im täglichen Zuwachs zwischen den aus bodenkundlicher und/oder klimatischer Sicht als „Ungunststandorte“ bezeichneten Standorte Dornburg, Gülzow und Werlte und den



„Gunststandorten“ Haus Düsse, Rauschholzhausen, Straubing und Witzenhäuser können sicherlich im ersten Ansatz diesen Standortunterschieden zugeordnet werden, bedürfen aber noch der weiteren Analyse und der Fortsetzung der Versuchstätigkeit.

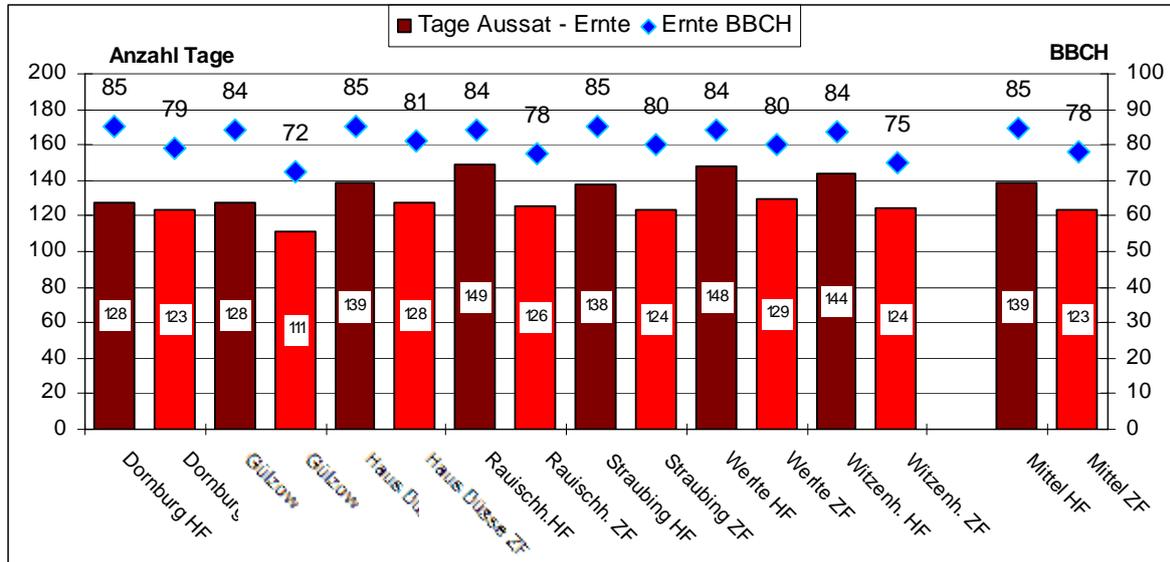


Abb. 17: Anzahl Tage von der Aussaat bis zur Ernte und Reifegrad zur Ernte (BBCH-Stadium) von Mais in Hauptfruchtstellung und als Zweitkultur an den Versuchsstandorten im Mittel der Jahre 2006 – 2008

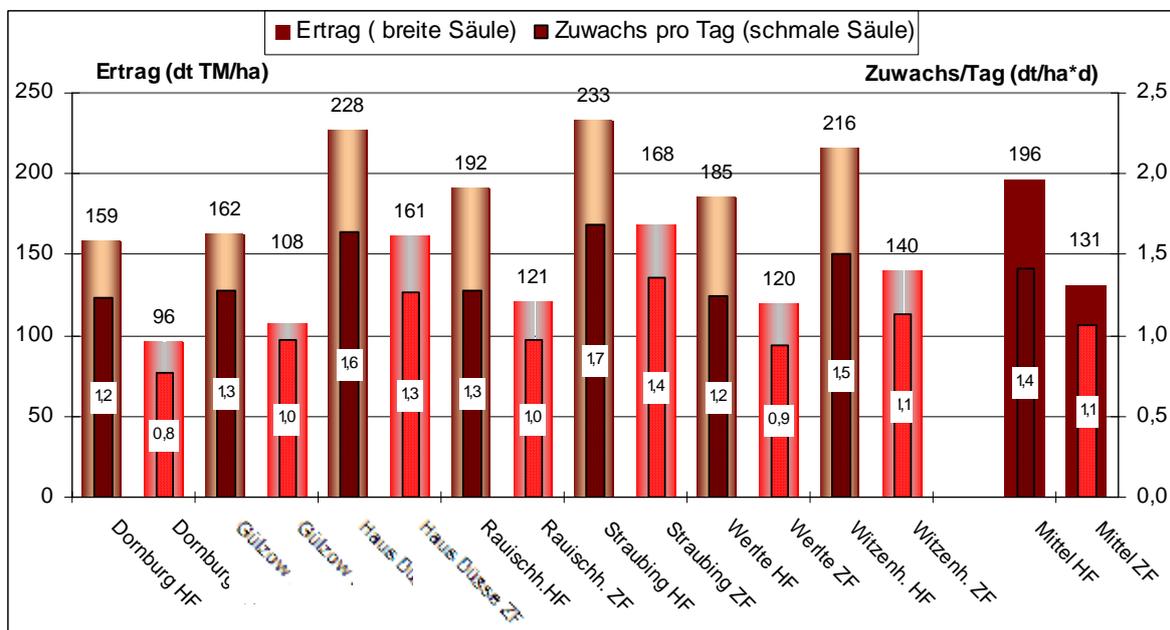


Abb. 18: Trockenmasseertrag und täglicher Zuwachs für Mais in Hauptfrucht- und Zweitfruchtstellung an den sieben Versuchsstandorten im Mittel der Jahre 2006 – 2008

Im Mittel der Standorte hatte der Mais in Hauptfruchtstellung einen täglichen Zuwachs von 1,4 (2006 und 2008) bzw. 1,5 dt TM/ha * Tag im Jahr 2007 (Abb. 19) und die Anzahl genutzter Vegetationstage sind mit 131/132 Tage (2006 und 2008) bzw. 153 Tage (2007) zu beziffern. Damit kann die deutlich



höhere Ertragsleistung im zweiten Versuchsjahr dem höheren täglichen Zuwachs und insbesondere der höheren Anzahl genutzter Vegetationstage zugeordnet werden (Abb. 20). Deutliche Unterschiede zwischen den Jahren sind hingegen im täglichen Zuwachs von Mais als Zweitkultur zu verzeichnen. Während im Anbaujahr 2006 der Mais als Zweitkultur nahezu den gleichen Tageszuwachs hatte wie der Mais in Hauptfruchtstellung (Abb. 19), waren die Tageszuwächse in 2007 mit 1,0 dt TM/ha und Tag und in 2008 mit 0,8 dt TM/ha und Tag deutlich geringer als im ersten Versuchsjahr. Vergleichbar dem Mais in Hauptfruchtstellung waren die Anzahl genutzter Vegetationstage in 2006 und 2008 gleich hoch (118/123 Tage) und in 2007 mit 130 Tagen etwas höher (Abb. 20). Damit beruhen die Ertragsunterschiede zwischen den Jahren zum hohen Maße auf dem täglichen Zuwachs.

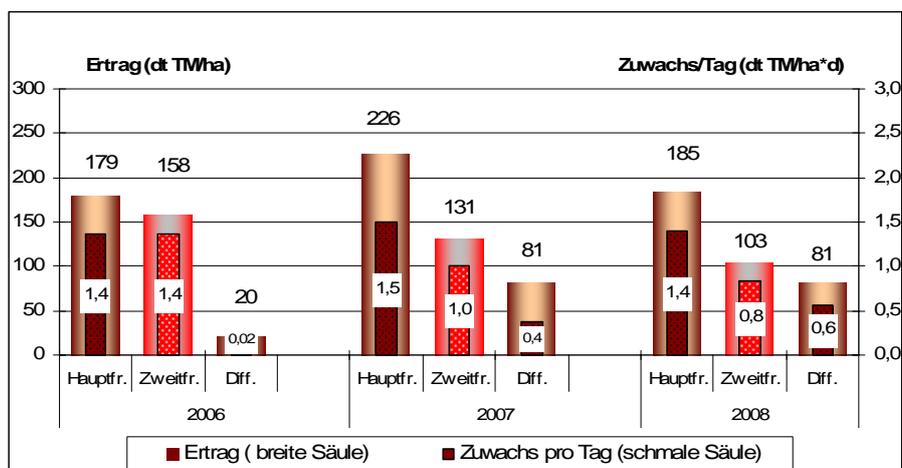


Abb. 19: Trockenmasseertrag und mittlerer täglicher Biomassezuwachs von Mais in Hauptfrucht- und in Zweitkultur-Nutzung im Mittel der Standorte für die Jahre 2006, 2007 und 2008

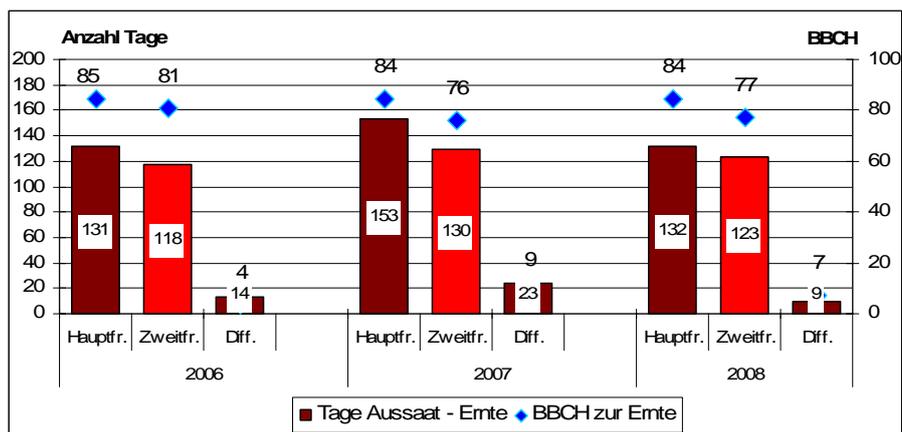


Abb. 20: Anzahl Tage von der Aussaat bis zur Ernte und Reifegrad zur Ernte (BBCH) von Mais in Hauptfruchtstellung und als Zweitkultur im Mittel der Standorte für die Jahre 2006-2008

Hinzuweisen sei an dieser Stelle noch darauf, dass der Mais in Hauptfruchtstellung im Mittel aller Standorte mit 29 (2006) und 27% TS (2007, 2008) einen nahezu ausreichenden TS-Gehalt zur Ernte hatte, ebenso der Mais als Zweitkultur mit 28% TS im Jahr 2006, während er in den Jahren 2007 und 2008 mit 20% TS einen viel zu geringen TS-Gehalt hatte. Aus dem Ergebnis kann nicht abgeleitet



werden, dass die unzureichenden TS-Gehalte auf einer zu geringen Anzahl genutzter Vegetationstage beruht, da im ersten Versuchsjahr mit nahezu ausreichendem TS-Gehalt diese Anzahl Tage am geringsten war und in 2007 deutlich bzw. in 2008 etwas länger war. Da auch aus Datum der Saat, des Aufgangs und des Beginn des Rispschiebens (BBCH 51) keine Beziehung zu dem Reifegrad zur Ernte abgeleitet werden kann, muss noch die Erklärung hierfür in dem Zeitraum nach dem Rispschieben und der Blüte gesucht werden.

In eine weiterführende Bewertung der Ertragsleistung des Zweikultur-Nutzungssystems ist neben dem Ertragsanteil der Zweikultur auch der Ertragsanteil der Erstkultur einzubeziehen, um den Jahresertrag als Basis hierfür zu haben. In Abb. 21 (oben) wird zunächst der Jahresertrag von Mais in Hauptfruchtstellung (ohne Senf) und der Jahresertrag von Roggen gefolgt von Mais in Beziehung zur Anzahl genutzter Vegetationstage gesetzt. Diese Anzahl Tage entspricht in der Hauptfrucht-Nutzung dem Zeitraum zwischen der Aussaat und der Ernte und in der Zweikultur-Nutzung dem Zeitraum zwischen dem 1. März, der im ersten Ansatz als Vegetationsbeginn im Frühjahr definiert wurde, und der Ernte der Zweikultur. In beiden Anbausystemen konnte keine eindeutige Beziehung zwischen der genutzten Vegetationszeit und dem Jahresertrag festgestellt werden. Sie ist für den Mais in Hauptfruchtstellung mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,38 recht gering und positiv. Keine Beziehung besteht bei der Zweikultur-Nutzung und auch für die leicht negative Tendenz gibt es keine Erklärung.

Hingegen besteht eine enge Beziehung zwischen dem täglichen Biomassezuwachs und dem Jahresertrag (Abb. 21, Mitte) bzw. und dem Ertrag von der Erstkultur Roggen und der Zweikultur Mais (Abb. 21, unten). Etwa 75-95% der Differenzen im Ertrag können diesem Faktor zugeordnet werden und nur etwa 5-25% beruhen auf den Unterschieden in der Anzahl genutzter Vegetationstage. Deutlich werden aus dieser Darstellung mit den Einzelergebnissen von allen Standorten und aus allen Jahren die Spannweiten im täglichen Zuwachs zwischen dem niedrigsten und höchsten Wert, die bei dem Mais (Sommerung) allgemein größer ist als beim Roggen (Winterung) und beim Mais als Zweikultur deutlich größer als beim Mais in Hauptfruchtstellung.

In Erweiterung zu der vorangestellten Analyse mit der Anzahl genutzter Vegetationstage ist in Abb. 22 die Beziehung zwischen dem Jahrestag des Aufgangs von Mais und Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung und als Zweikultur und dem Jahresertrag dargestellt. Hier ist zu entnehmen, dass der verspätete Aufgang von Mais, sowohl in der Hauptfruchtstellung als auch in der Zweikultur-Nutzung eine Abnahme des Jahresertrages zur Folge hat. Diese Auswertung beruht auf den Ernteergebnissen aus den Versuchen, in denen in der Zweikultur-Nutzung der Roggen zu BBCH 71 geerntet wurde, schließt jedoch keine früheren Erntetermine des Roggens ein. Diese Ergebnisse stützen aber die oben genannte Empfehlung, die Ernte möglichst Ende Mai (Jahrestag 150) / Anfang Juni durchzuführen und unmittelbar danach die Zweikultur zu säen.

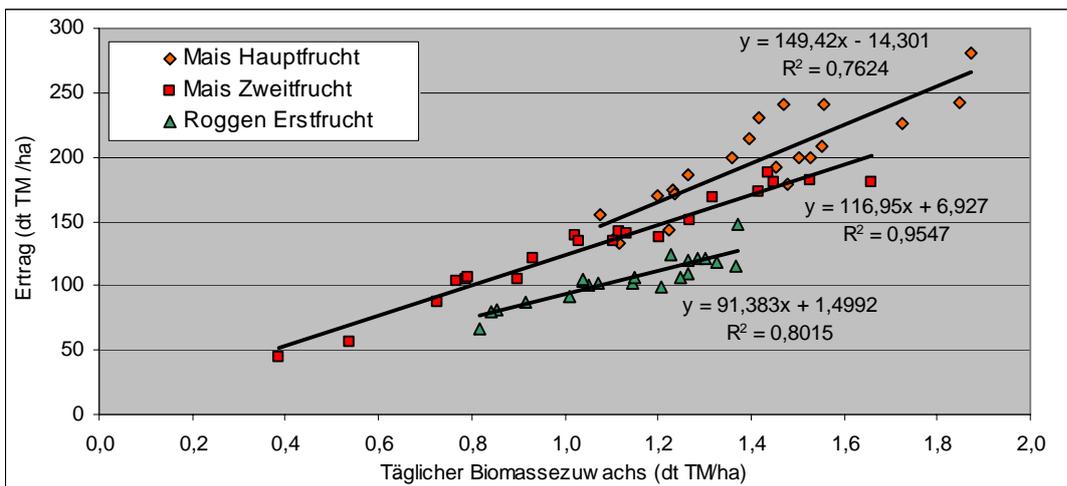
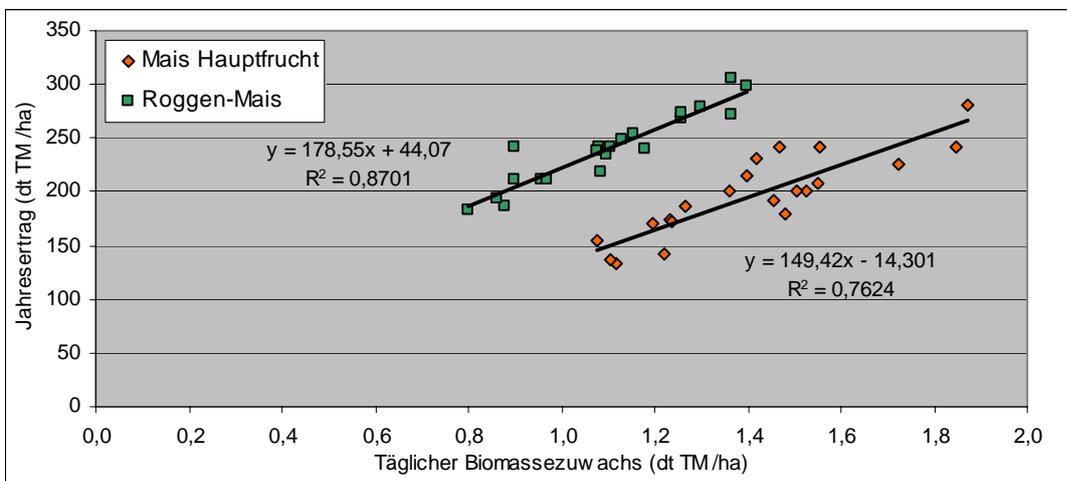
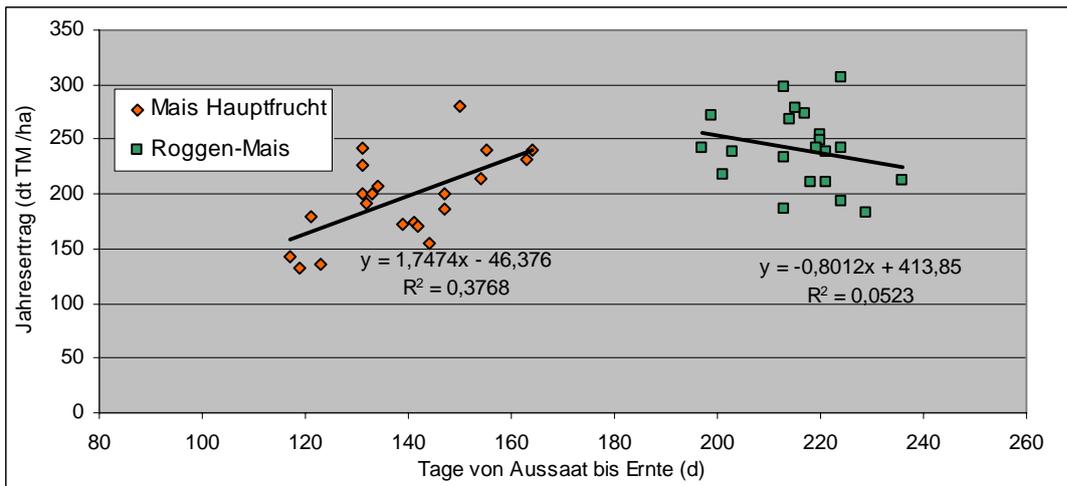


Abb. 21: Beziehung zwischen der Anzahl Tage von der Aussaat bis zur Ernte und dem Jahresertrag für Mais als Hauptfrucht und als Zweitkultur nach Roggen (oben); Beziehung zwischen dem täglichen Biomassezuwachs und dem Jahresertrag für Mais als Hauptfrucht und Mais als Zweitkultur nach Roggen (Mitte); Beziehung zwischen dem täglichen Biomassezuwachs und dem Ertrag von Mais in Hauptfruchtstellung, Roggen als Erstkultur sowie Mai als Zweitkultur; mit den Ergebnissen von sieben Standorten und aus drei Jahren (unten)

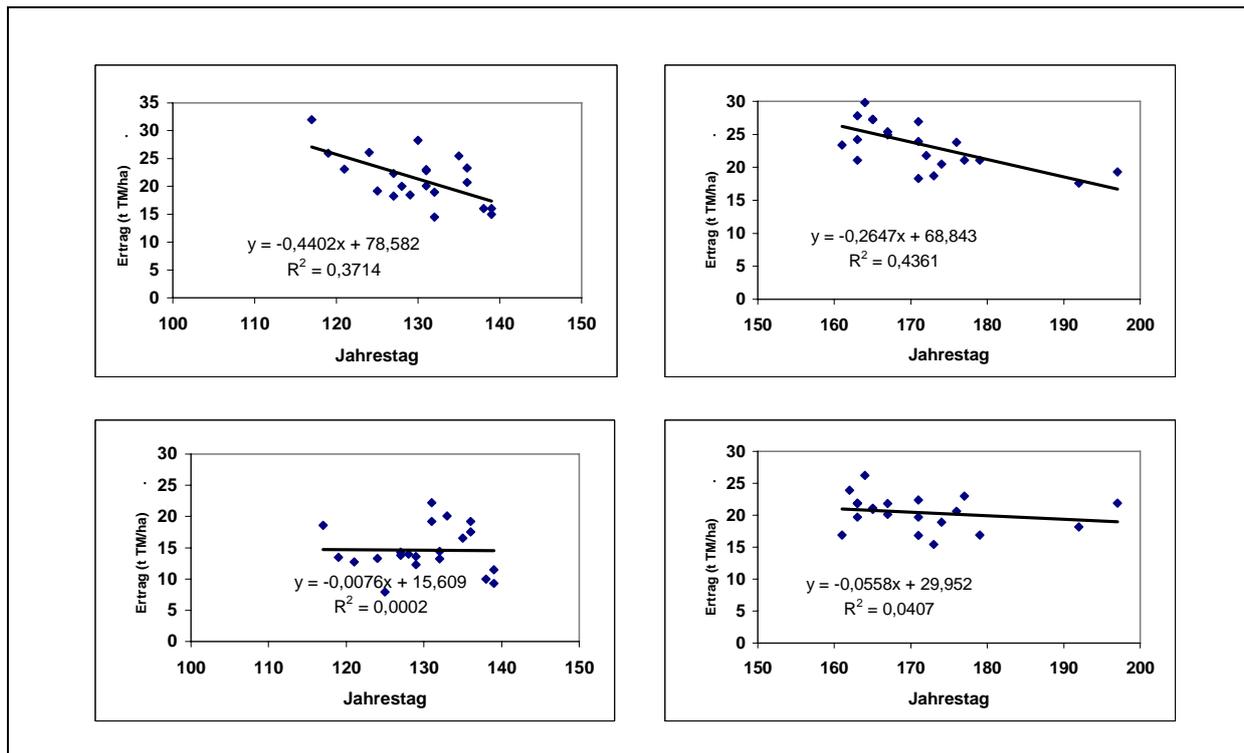


Abb. 22: Beziehung zwischen dem Jahrestag des Aufgangs und dem Jahresertrag für Mais (oben) und Sonnenblumen (unten) in Hauptfruchtstellung (links) und in Zweitkultur-Nutzung (rechts) mit den Ergebnissen von sieben Standorten und aus drei Jahren [Jahrestag 120 = 1. Mai; 150 = 1. Juni; 180 = 1. Juli]

Keine Erklärung kann für das Fehlen einer solchen Beziehung bei Sonnenblumen gefunden werden, hieraus ergeben sich aber Freiräume für die Wahl des Erntetermins der Erstkultur. Weiterhin ist an dieser Stelle festzuhalten, dass mit zunehmender Verspätung der Ernte der Erstkultur die Vorzüglichkeit von Mais im Vergleich zu Sonnenblumen abnimmt, da sich die Jahreserträge immer weiter annähern. Ein Aspekt, der in Ernte-/ Saatzeitversuchen noch weiter zu untermauern ist.

3.4 Qualität des Erntegutes und berechneter Energieertrag

Für die Beurteilung des Erntegutes und die Berechnung des Energieertrages wurden in dem getrockneten Erntegut (keine Silage!) die Inhaltsstoffe mittels erweiterter Weender Analyse sowie die Nährstoffgehalte im Erntegut der Prüfglieder von den sieben Standorten und aus den drei Versuchsjahren bestimmt. Hierbei waren anhand der Ergebnisse aus den drei Jahren und von den sieben Standorten deutliche Unterschiede zwischen den Kulturarten zu verzeichnen, jedoch geringere Unterschiede zwischen den Standorten und Jahren, sodass nachfolgend die Ergebnisse jeweils als Mittelwert über alle Standorte und Jahre dargestellt werden und auf die Unterschiede zwischen den Kulturen abgehoben wird.



3.4.1 Ergebnisse der Nährstoffanalyse

In den Biomassen wurden die Gehalte an N, P, K, Ca, Mg, Na, S und Cl sowie der Aschegehalt bestimmt, um hiermit die Qualität der Biomassen aus der Sicht der thermischen Wandlung beschreiben sowie die Nährstoffentzüge ableiten zu können. Der größere Anteil der Biomassen hatte einen Aschegehalt $\leq 6\%$, während der Rübsen, der Hanf, die Sonnenblumen und der Amarant mit 9; 9,5; 11-12 und 15% deutlich höhere Aschegehalte hatten (Abb. 23). In Verbindung mit der nachfolgenden Darstellung zu den Mineralstoffgehalten in der Biomasse (Abb. 24) ist festzustellen, dass rund die Hälfte der Asche dem jeweiligen Element der Nährstoffe P, K, Ca, Mg, Na, S und Cl zuzuordnen ist, die andere Hälfte des Aschegewichtes ist Sauerstoff, da die Asche auch Oxide der Elemente enthält, sowie einen nicht bestimmten Anteil an Silizium, Eisen usw.

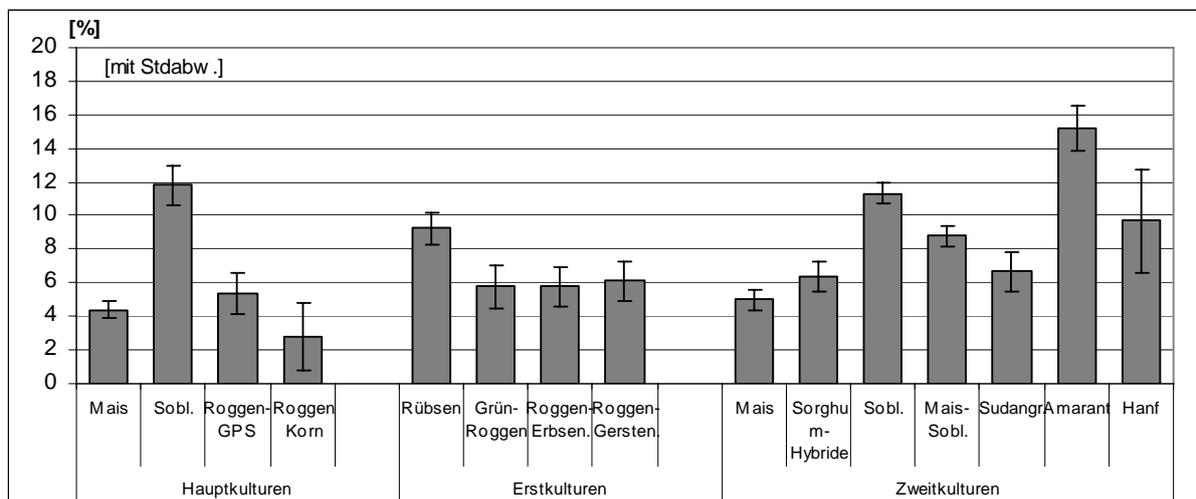


Abb. 23: Aschegehalte im Erntegut der untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren

Wie in Abb. 23 zu den Aschegehalten und den Nährstoffgehalten in Abb. 24 weiter zu entnehmen ist, bestehen die größten Unterschiede zwischen den Kulturarten im Gehalt an Kalium und Calcium, deutlich geringere Unterschiede zwischen den Kulturen sind im Stickstoffgehalt zu verzeichnen. Besonders die Kulturen mit hohem Aschegehalt - der Rübsen, der Hanf, die Sonnenblume und der Amarant - zeichnen sich durch deutlich höhere Gehalte an Kalium und Calcium sowie an Chlor als die anderen Kulturen aus. Diese Rahmenbedingungen sind zunächst als kritisch für eine thermische Verwertung einzustufen, insbesondere durch Emissionen (Cl) und Hochtemperaturkorrosionen (K, Cl). Ob durch die hohen Kaliumgehalte per se auch die Ascheerweichungstemperaturen herabgesetzt werden, ist noch zu prüfen, da durch die hohen Calciumgehalte in diesen Biomassen dieser Minderung entgegengewirkt wird. In eigenen Untersuchungen konnte bei Sonnenblumen, Raps und Hanf mit hohen Kalium- sowie hohen Ca- und Mg-Gehalten deutlich höhere Ascheerweichungstemperaturen als bei Getreide und Mais mit insbesondere niedrigeren Ca-Gehalten (HEINZ et al. 1999). Auch die Sorghum-Hybride und die Sudangras-Hybride haben höhere K-Gehalte als die übrigen Kulturen, die aber wieder mit höheren Ca- und Mg-Gehalten einhergehen. Hinzuweisen ist an dieser Stelle noch auf den hohen Gehalt an Phosphat in dem Amarant.

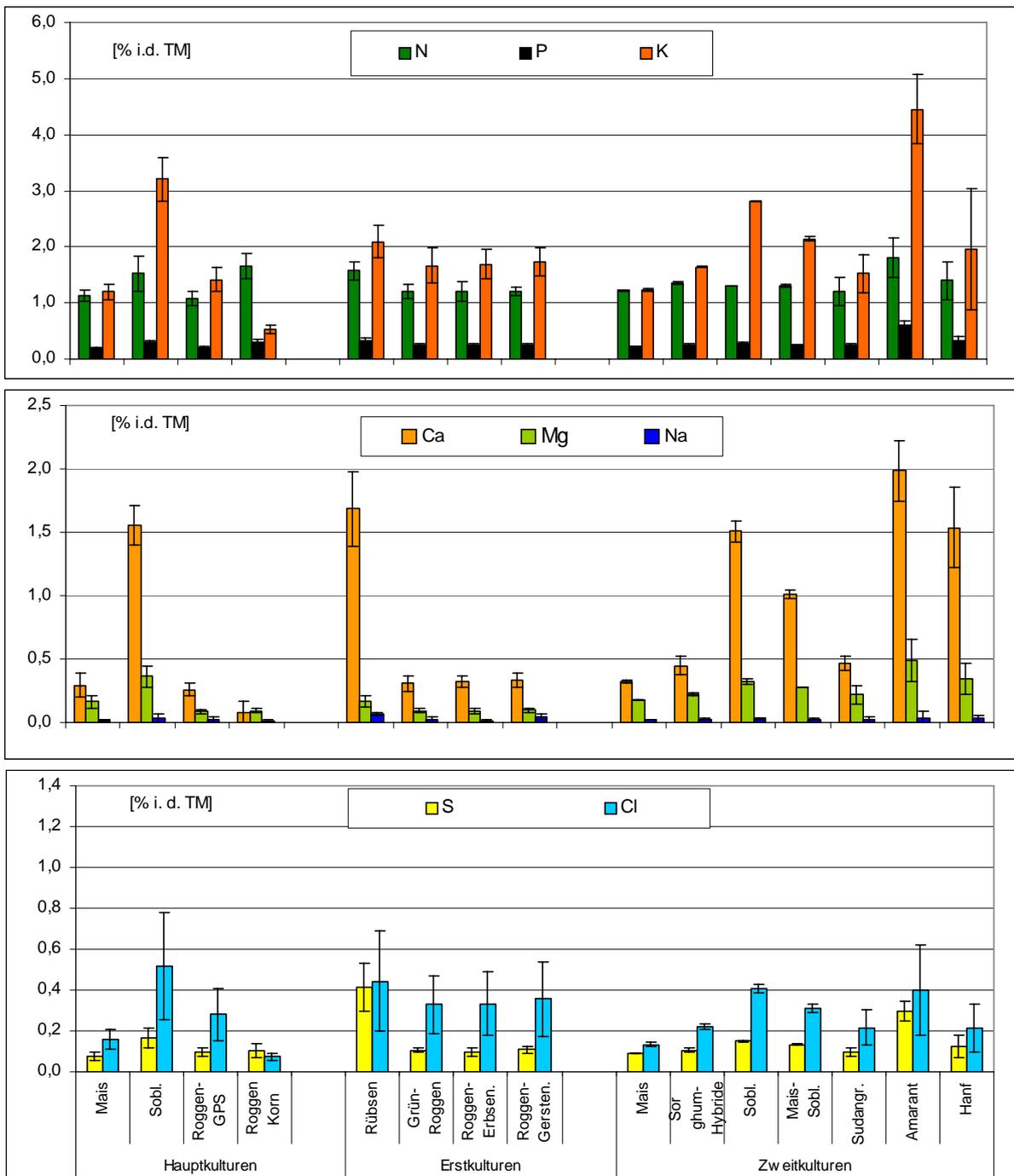


Abb. 24: Gehalte an N, P, K (oben), an Ca, Mg, Na (Mitte) und an S und Cl (unten) im Erntegut (TM) der untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Versuchsstandorten und drei Versuchsjahre

Bei einer thermischen Verwertung sind aus der Sicht der Emissionen auch die Gehalte an Stickstoff und Schwefel im Brennstoff relevant. Mit 0,9% N hatte der Roggen als GPS gerntet den niedrigsten Gehalt, einen etwas höheren Gehalt (1%) hatten der Mais, die Sorghum-Hybride, das Sudangras, die Sonnenblume und das Mais/Sonnenblumen-Gemenge, mit rund 1,25% hatten Mais in Hauptfruchtstellung sowie die Erstkulturen Roggen, Roggen/Erbsen-Gemenge und Roggen/Gersten-Gemenge einen deutlich höheren N-Gehalt. Die höchsten N-Gehalte hatte das Erntegut von Hanf und Amarant (1,4% N), von Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung (1,5% N) und Rübsen mit 1,6% N.



Durch besonders niedrige Schwefelgehalte zeichnen sich Getreide, Mais, Sorghum- und Sudangras-Hybride aus ($\sim 0,1\%$ S), während der Schwefelgehalt bei Sonnenblumen und Amarant $0,3\%$ beträgt und der Rübsen im Mittel aller Versuche ein S-Gehalt von $0,5\%$ hatte. Aus diesen Angaben können Präferenzen für einzelne Kulturarten für die thermische Verwertung abgeleitet werden. Jedoch besteht mit der Silierung und einer mechanischen Entwässerung der Silage vor der thermischen Verwertung die Möglichkeit, diese Nährstoffgehalte zu reduzieren und damit die Brennstoffqualität je nach Kulturart und Vorbehandlung in unterschiedlichem Umfang zu verbessern (GRASS et al. 2009). Gleichzeitig wird mit der hier gewählten Düngestrategie das Ziel verfolgt, niedrige N-Gehalte im Erntegut herbei zu führen, was, gemessen an Vergleichswerten (KTBL, 2006), weitgehend gelungen ist. Darüber hinaus ist es die Aufgabe der Züchtung, mit nährstoffeffizienten Sorten dieses Ziel zu unterstützen.

3.4.1.1 Nährstoffentzug und Hinweise für die Düngung

Mit den Nährstoffgehalten und dem Ernteertrag werden die Nährstoffmengen in den Pflanzen zur Ernte berechnet, die in Abb. 25 dargestellt sind. Sie entsprechen dem Nährstoffentzug mit dem Erntegut und werden im ersten Ansatz dem Nährstoffbedarf der Pflanzen gleichgesetzt. Hieraus werden Empfehlungen für die Düngung abgeleitet und die eigene Düngestrategie bewertet (Kapitel 3.6.3). Gegliedert nach den Nährelementen werden die Ergebnisse vorgestellt.

Stickstoff: Mit dem Erntegut von Roggen, Sonnenblumen und Mais werden im Mittel der Orte und Jahre 150 , 200 und 250 kg N/ha entzogen. Der Entzug bei einer Zweikultur-Nutzung beträgt zwischen 230 und 280 kg N/ha. Hierbei kann der Entzug der Erstkulturen mit 130 kg N/ha und der der Zweikulturen mit 100 (Sudangras-Hybride, Amarant, Hanf) bis 130 - 150 kg N/ha (Mais, Sorghum-Hybride, Sonnenblume, Mais/Sonnenblumen-Gemenge) beziffert werden.

Phosphor: Die Mengen an Phosphor im Erntegut betragen 40 - 50 kg P/ha bei den Kulturen in der Hauptfrucht-Nutzung und insgesamt rund 60 kg P/ha in der Zweikultur-Nutzung, die im Erntegut von Erst- und Zweikultur etwa den gleichen Teil einnimmt. Aufgrund des hohen P-Gehaltes im Amarant werden in der Zweikultur-Nutzung mit ihm etwa 70 kg P/ha entzogen.

Kalium: Der mengenmäßig größte Kalium-Entzug mit dem Erntegut ist mit rund 500 kg K/ha bei der Zweikultur-Nutzung mit Sonnenblumen, Amarant und Mais/Sonnenblumen-Gemenge zu verzeichnen, gefolgt von Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung mit 400 kg K/ha. Beim Getreide und Mais in Hauptfruchtstellung beträgt der K-Entzug rund 200 - 230 kg K/ha, bei den Erstkulturen Rübsen und Getreide rund 175 kg K/ha. Für die Zweikultur-Nutzung mit Mais, Sorghum, Sudangras und Hanf ist der K-Entzug mit rund 300 - 330 kg K/ha zu beziffern. Aus der Sicht der Düngung sei daran erinnert, dass 45 kg/ha eines Nährstoffes einem Gehalt von 1 mg/100 g Boden entsprechen, und 450 kg K/ha würden rein rechnerisch den Boden um 10 mg K/100 g Boden verarmen. Daher ist beim Anbau von Kulturen mit hohem Kaliumbedarf – insbesondere in der Zweikultur-Nutzung – die K-Versorgung des Bodens erneut zu überprüfen und bei ihnen ggf. vorsorglich eine zusätzliche Düngung zur Erzielung des optimalen Ertrages durchzuführen.

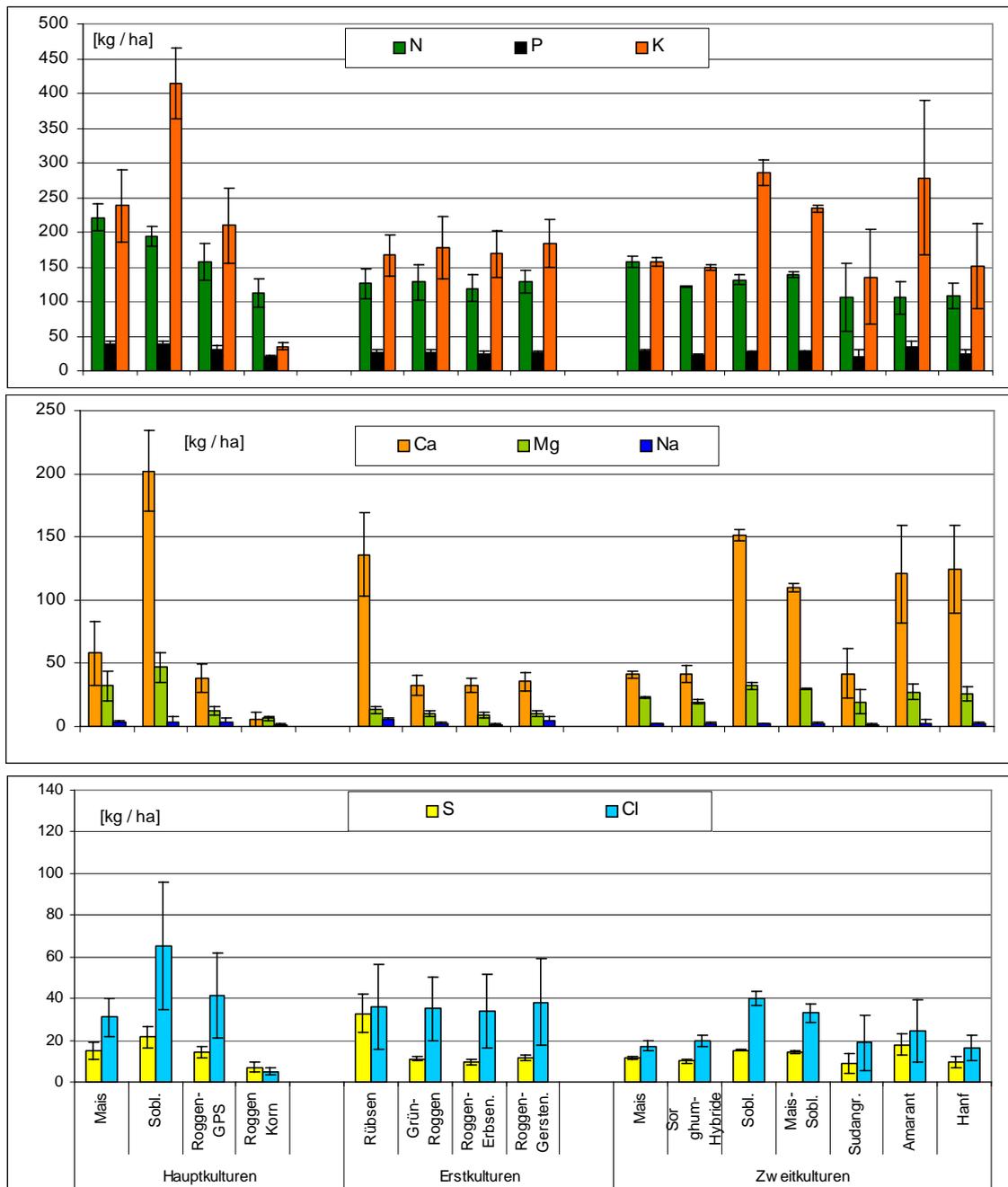


Abb. 25: Mengen (kg/ha) an N, P, K (oben), an Ca, Mg, Na (Mitte) und S, Cl (unten) im Erntegut der untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren

Calcium und Magnesium: Sonnenblumen, Rübsen, Amarant und Hanf zeichnen sich auch durch hohe Gehalte an Calcium aus. Hieraus resultiert ein Kalkbedarf von bis zu 200 (Sonnenblume in Hauptfruchtstellung; Sonnenblumen, Amarant und Hanf in Zweikultur-Nutzung mit Getreide) bzw. von über 300 kg Ca/ha in der Zweikultur-Nutzung von Rübsen mit Sonnenblumen. Diesem hohen Kalkbedarf einzelner Kulturen muss besonders auf leichten Böden Beachtung geschenkt werden. Gleichzeitig bestehen Unterschiede zwischen den Kulturen im Gehalt an Magnesium, die zu Mengen im Erntegut zwischen 15 (Roggen-GPS) und 50 kg Mg/ha führen.



Schwefel und Chlor: Hohe Gehalte an Schwefel und/oder Chlor sind im Erntegut von Sonnenblumen (S), Rübsen (S, Cl) und Amarant (S, Cl) zu verzeichnen. Auch die Getreidearten weisen erhöhte Chlorgehalte auf. Hieraus resultieren Cl-Mengen im Erntegut von über 60 kg Cl/ha (Sonnenblume) bzw. Mengen an Schwefel von rund 40 kg S/ha im Erntegut von Sonnenblumen, Rübsen und Getreide.

Damit ist die Sonnenblume aus der Sicht der Nährstoffversorgung die anspruchsvollste Kultur. Besondere Beachtung sollte ihrer Versorgung mit Kalium geschenkt werden, da in einem dreijährigen Feldversuch mit Getreide (Triticale und Weizen) eine positive Beziehung zwischen dem K-Gehalt in der Pflanze und dem Pflanzenertrag festgestellt wurde (GREBE et al., 2008). Eine entsprechende Überprüfung dieses Befundes bei anderen Kulturen steht aber noch aus.

3.4.1.2 C:N:P:S – Verhältnis im Erntegut

Für eine stabile Biogasbereitung mit hohen Gasausbeuten wird ein C:N:P:S-Verhältnis in der Biomasse von 500:15:5:3 – 600:15:5:3 (WEILAND, 2003) angestrebt, ein Nährstoffverhältnis, in dem heute dem Schwefelgehalt ein größeres Gewicht zugemessen wird. Mit den Gehalten an Kohlenstoff und den Gehalten an Stickstoff, Phosphor und Schwefel wurden dieses Verhältnis für die einzelnen Kulturen berechnet und dem angestrebten Verhältnis (Soll-Verhältnis) in Abb. 26 gegenübergestellt.

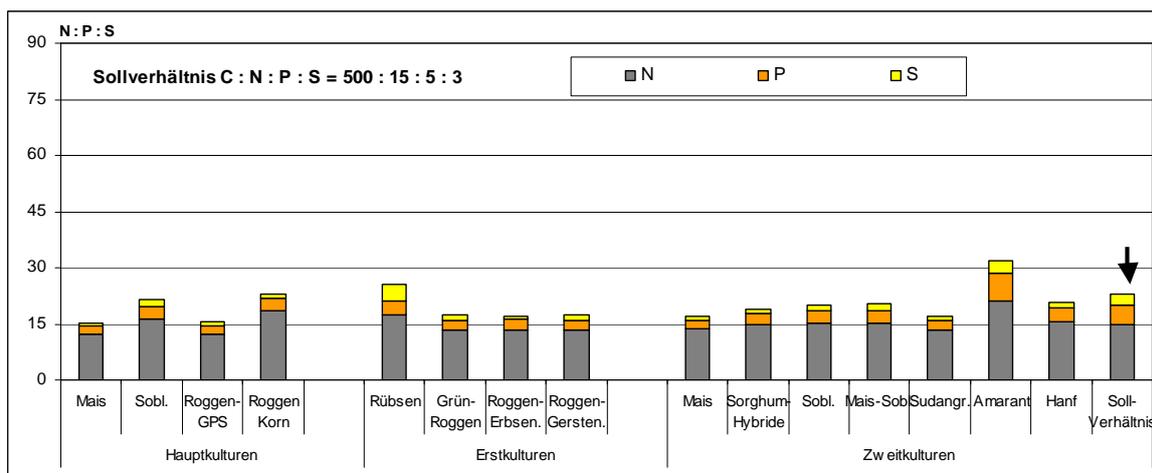


Abb. 26: C:N:P:S-Verhältnis im Erntegut der untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren sowie angestrebtes Verhältnis (Soll-Verhältnis; rechts)

Wie Abb. 26 zu entnehmen ist, haben die Biomassen vielfach einen zu geringen Phosphor- und Schwefel-Gehalt. Ausgenommen davon ist das Erntegut von Senf, Rübsen und Amarant, das zusammen mit dem Roggen-Korn und dem Roggen-Gersten-Gemenge gute „Ergänzungssubstrate“ zur Einstellung des als notwendig erachteten Sollverhältnisses in Biogasanlagen darstellen. Selbst wenn ertragreichere Kulturen bevorzugt werden, ist es sinnvoll mit ihnen Vielfalt in der Fruchtfolge zu haben und gleichzeitig Biogasanlagen mit einem optimierten Rohstoff versorgen zu können.

3.4.2 Ergebnisse der Weender Analyse

In Ergänzung zu der Nährstoffanalyse wurde mittels „erweiterter“ Weender Analyse die Gehalte an Rohasche, Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freien Extraktstoffen sowie zur näheren



Beschreibung der Fraktion der Kohlenhydrate die Gehalte an Stärke, Zucker, Lignin, Cellulose, Hemicellulose und Pentosane im Erntegut der verschiedenen Kulturen bestimmt (Abb. 27; weitere Ergebnisse im Anhang Nr. 35 und 36). Mit diesen Ergebnissen kann die Siliereignung des Erntegutes abgeschätzt werden und in Verbindung mit der Verdaulichkeit der Biomassen die spezifische Methanausbeute (Abb. 28) berechnet sowie daraus mit dem Ernteertrag der Methanertrag je Hektar abgeleitet werden (Abb. 29).

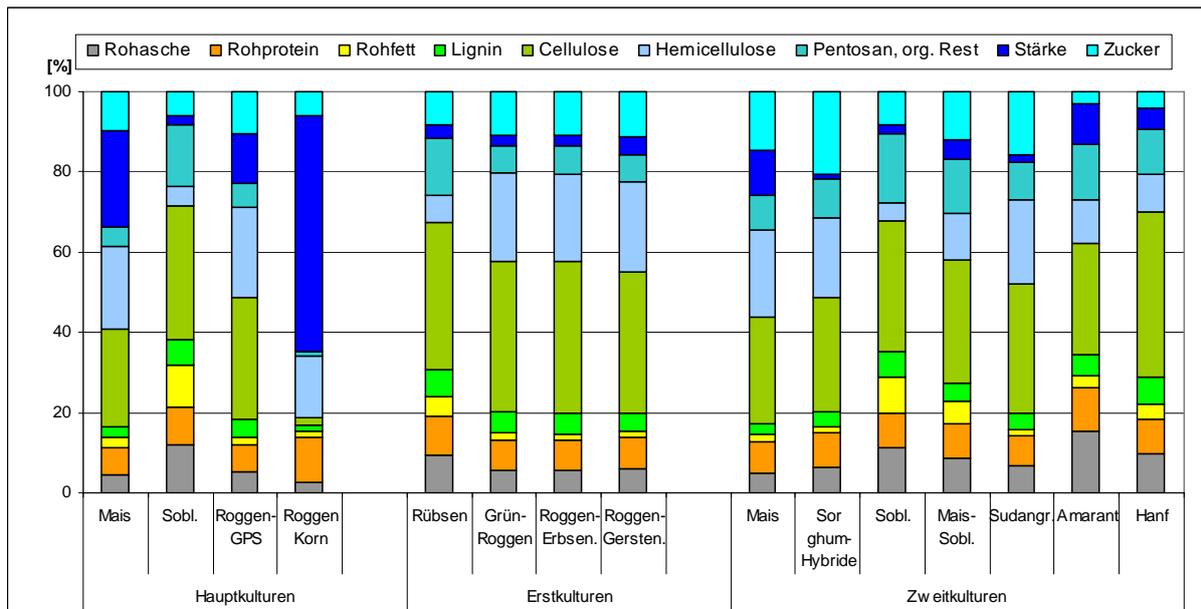


Abb. 27: Inhaltsstoffe („erweiterte“ Weender Analyse) im Erntegut der untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren

Während der Aschegehalt und die Aschezusammensetzung des Rohstoffs Biomasse verbrennungstechnische Relevanz hat und die Nährstoffverhältnisse in der Biomasse bedeutend für die Biogasbereitung sind, wie zuvor dargestellt wurde, ist bei der Biogasbereitung auch der Gehalt an Lignin von Bedeutung, da das Lignin in diesem anaeroben Prozess nicht verwertet werden kann. Höhere Ligningehalte in der Ganzpflanze hatten insbesondere Sonnenblumen, Rübsen und Hanf, während Mais den geringsten Ligningehalt hatte (Abb. 27). Gleichzeitig wird auch der Aufschluss von Cellulosen und Hemicellulosen, wenn diese vom Lignin ummantelt sind, erschwert, was eine überproportionale Abnahme der Verdaulichkeit der Fraktion der Kohlenhydrate haben kann. Hintergrund dieser Aussage ist, dass die jeweilige Verdaulichkeit der organischen Substanz für die Berechnung der Biogasausbeute aus der DLG-Futterwerttabelle entnommen wurde, die auf Fütterungsversuchen mit Wiederkäuern beruhen, aber nicht an diesen verschiedenen Erntematerialien bestimmt wurde.

Hinzuweisen ist in Abb. 27 darauf, dass neben der Sonnenblume auch der Rübsen einen höheren Fettgehalt hat, sowie in abgeschwächtem Maße auch Amarant und Hanf. Weiterhin kann ihr am Beispiel des Roggens entnommen werden, dass mit zunehmender Reife der Gehalt an Stärke zunimmt und der Gehalt an Zucker abnimmt. Dennoch, abgesehen von Amarant und Hanf, war zur Ernte der verschiedenen Kulturen mit Zuckergehalten von deutlich über 5% meistens ausreichende Mengen an Zucker für eine sichere Silierung im Erntegut vorhanden. Für eine sichere Silierung wird von



VOIGTLÄNDER und JACOB (1987) ein Anteil von vergärbaren Kohlenhydraten von mindestens 2 bis 3% in der Frischmasse angegeben.

3.4.3 Methanerträge

Für einen Vergleich der Methanerträge aus dem Erntegut der geprüften Kulturen sind in Abb. 28 die berechneten spezifischen Gaserträge in $l_N CH_4$ je kg oTS dargestellt, die auf der Basis der Ergebnisse aus der Weender Analyse mit den spezifischen Gasausbeuten aus den Inhaltsstoffen (FNR, 2006; Anhang Nr. 37) unter Berücksichtigung der Verdaulichkeiten der Inhaltsstoffe für Wiederkäuer (DLG, 2004) berechnet wurden. Ihr ist zu entnehmen, dass im Mittel aller Kulturen mit einem Gasertrag von $285 l CH_4/kg$ oTS gerechnet werden kann und, abgesehen von der getrennten Analyse des Gasertrages aus dem Korn und dem Stroh von Roggen, dass recht geringe Unterschiede im berechneten Gasertrag zwischen den geprüften Kulturen bestehen. Für Roggen als Erstkultur, Sorghum- und Sudangras-Hyb.

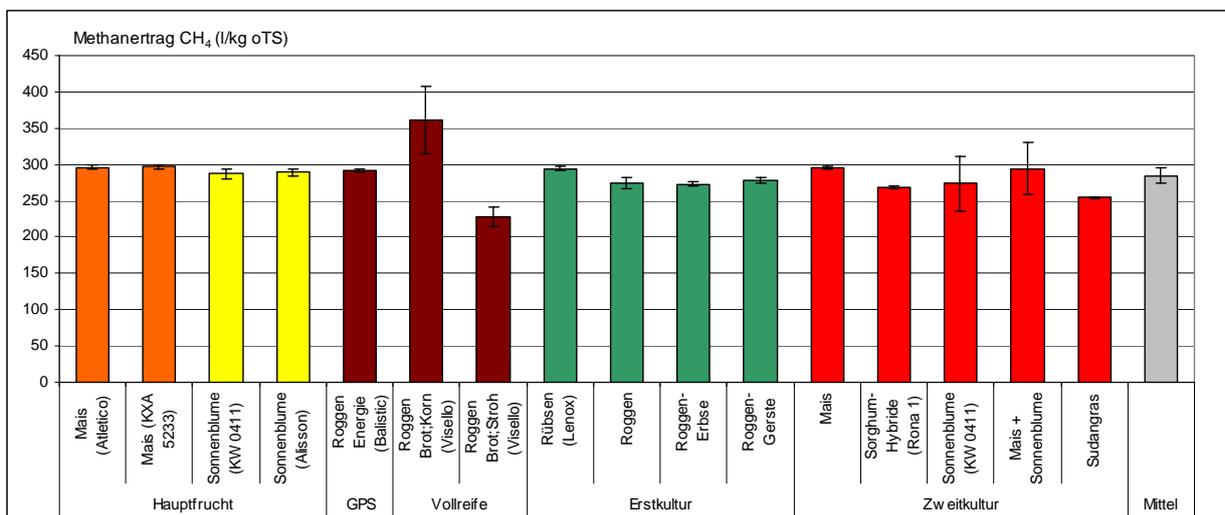


Abb. 28: Berechnete spezifische Methanerträge ($l_N CH_4/kg$ oTS) verschiedener Kulturen im Mittel von drei Jahren und sieben Standorten

wurden etwas niedrigere Ausbeuten abgeleitet, für den reifer geernteten Roggen eine etwas höhere Ausbeute und für die Körner von Roggen ein deutlich höhere Ausbeute. In diesem Zusammenhang ist nochmals darauf hinzuweisen, dass für die Berechnung der spezifischen Gasausbeuten die Verdaulichkeiten der einzelnen Inhaltsstoffe, die bei Wiederkäuer ermittelt wurden, unterstellt wurden. Da weiterhin diese Daten von den nicht üblicherweise in der Fütterung eingesetzten Kulturarten fehlen, wurden im ersten Ansatz für Sorghum, Amarant und Hanf die gleichen Verdaulichkeiten wie für Sudangras angenommen.

Da nur geringe Unterschiede zwischen den geprüften Kulturen im spezifischen Gasertrag bestehen (Abb. 28), sind die Unterschiede im berechneten Jahres-Methanertrag zwischen den einzelnen Varianten (Abb. 29) maßgeblich auf die Unterschiede im erntbaren Jahresertrag an Biomasse zurückzuführen (Abb. 3-11). Im Mittel der sieben Versuchstandorte und drei Jahre hatten die Varianten Maïs in Zweikultur-Nutzung nach Roggen und Roggen/Erbsen-Gemenge mit $\sim 6.400 Nm^3 CH_4/ha$ die höchsten berechneten Methanerträge (Abb. 29). In der Variante Maïs in



Hauptfruchtstellung sind mit durchschnittlich 5.500 Nm³ CH₄/ha die Methanerträge je Hektar um rund 1.000 Nm³ CH₄/ha geringer. Diese Differenz ist größer als aus den Unterschieden in den Jahreserträgen zu erwarten ist. Es ist damit zu erklären, dass der Senf-Ertrag beim Mais in Hauptfruchtstellung zwar Teil des Jahresertrages ist, aber aufgrund der geringen Erträge nicht erntewürdig war und damit auch nicht in die Berechnung des Methanertrages eingeht. Die Zweikultur-Nutzung mit Sonnenblumen ist durch ihren Ertragsvorteil gegenüber der Sonnenblume in Hauptfruchtstellung auch im Gasertrag deutlicher überlegen (bis zu 1.500 Nm³ CH₄/ha). Die Methanerträge der Sorghum- und Sudangras-Varianten entsprechen aufgrund vergleichbarer Biomasseerträge denen von Sonnenblumen in Zweikultur-Nutzung (5.000 – 5.500 Nm³ CH₄/ha). Im Mittel der Standorte und Jahre kann mit Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung und Roggen-GPS bzw. reifem Roggen mit rund 3.700 Nm³ CH₄ /ha ein vergleichbarer Methanertrag erzielt werden.

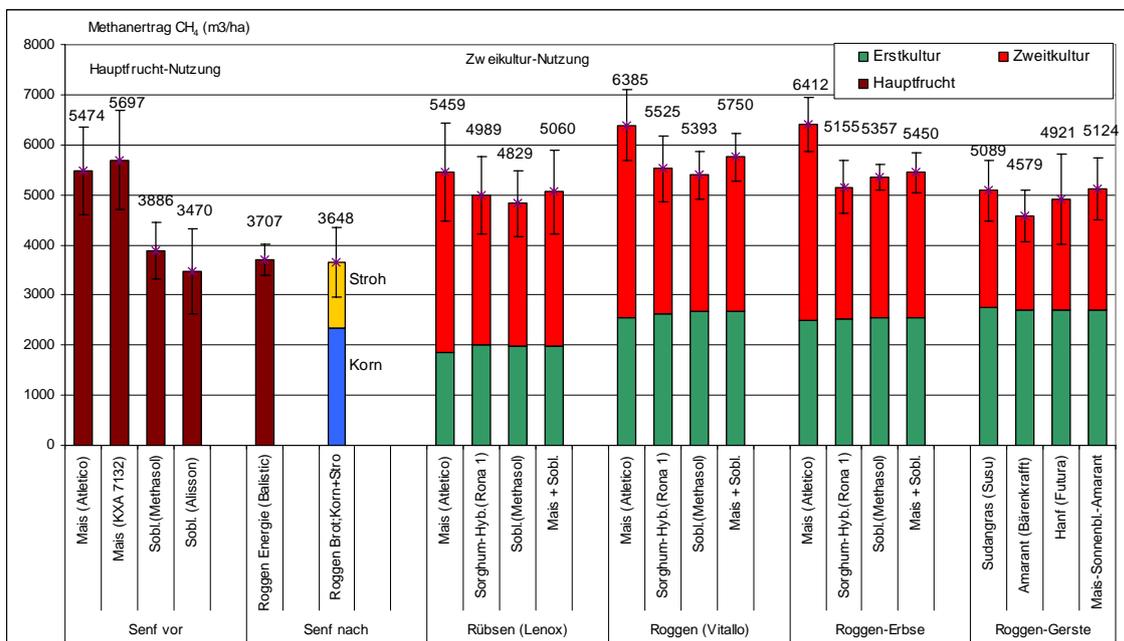


Abb. 29: Berechnete Jahres-Methanerträge (Nm³ CH₄/ha) der Versuchsvarianten im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren

Der Vergleich der berechneten Methanerträge von den einzelnen Standorten (Anhang Nr. 38 und 39) für die Variante Mais in Hauptfruchtstellung macht deutlich, dass an den Standorten Straubing und Haus Düsse mit 6.680 bzw. 6.450 Nm³ CH₄/ha die höchsten Methanerträge zu erzielen waren, während aus den deutlich geringeren Felderträgen am Standort Dornburg nur Methanerträge von ~4.500 Nm³ CH₄/ha abgeleitet werden können. In der Zweikultur-Nutzung mit Mais nach Roggen zeigten ebenfalls die ertragsstarken Standorte Haus Düsse und Straubing mit über 7.300 Nm³ CH₄/ha die höchsten Jahres-Methanerträge. Demgegenüber konnte beim Vergleich der Standorte z.B. mit Roggen-GPS die höchsten Methanerträge (>4.500 Nm³ CH₄/ha) in Dornburg und Rauschholzhausen gewonnen werden.



3.4.4 Heiz- und Brennwert

Soll Biomasse thermisch verwertet werden, so wird der Brennwert (Ho) bzw. der Heizwert (Hu) zur Beschreibung des Energieertrages herangezogen. Hierbei ist der um die Verdampfungsenthalpie bereinigte Heizwertwert immer kleiner als der Brennwert. Diese beiden Kenngrößen sind für die untersuchten Kulturen im Mittel der Standorte und Jahre in Abb. 30 dargestellt.

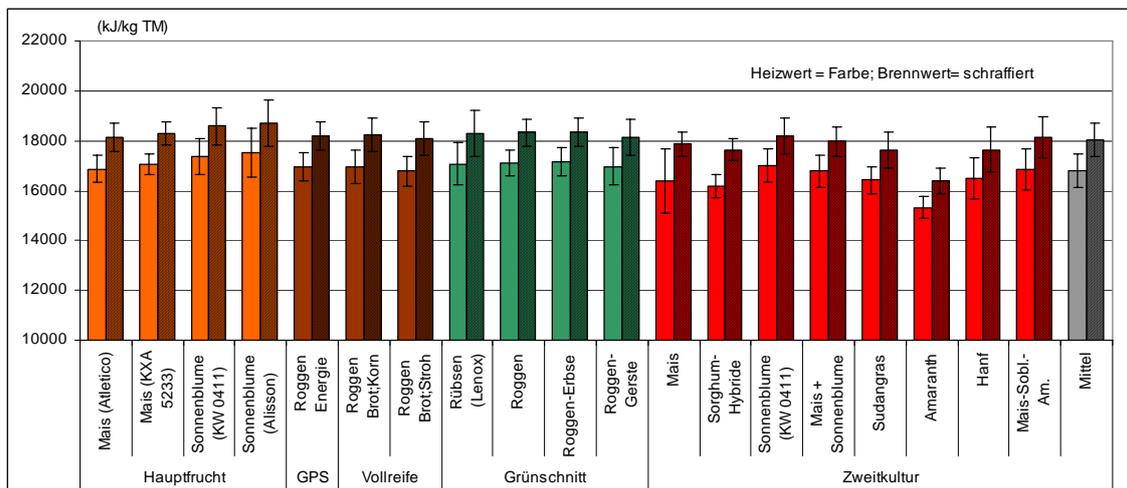


Abb. 30: Heiz- und Brennwerte der untersuchten Kulturen (kJ/kg TM) im Mittel der sieben Standorte und drei Jahre

Die untersuchten Biomassen hatten im Mittel aller Kulturen einen Heizwert von 16.804 kJ/kg TM und einen Brennwert von 18.041 kJ/kg TM. Da die Heiz- und Brennwerte auf die Trockenmasse bezogen sind (wf) und nicht auf die aschefreie Trockenmasse (waf), beruhen die dargestellten Werte nicht nur auf Unterschieden in den Inhaltsstoffen (z.B. Fettgehalt) sondern beruhen im größeren Umfang auf Unterschieden im Aschegehalt (Abb. 23). Dies wird besonders beim Amaranth mit einem Aschegehalt von 15% deutlich, bei dem ein Brennwert von 16.393 kJ/kg TM gemessen wurde. Die Kulturart mit dem höchsten Brennwert ist die Sonnenblume, insbesondere die Sorte Alisson mit 18.700 kJ/kg TM, da hier trotz hohem Aschegehalt (12%) der Fettgehalt von 10% maßgebend für diesen hohen Brennwert ist. Im Vergleich hierzu sind die Unterschiede im Brennwert zwischen den anderen Kulturen bzw. Varianten gering: bei Mais und Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung waren die Brennwerte um 100 – 250 kJ/kg TM höher als in Zweitfruchtstellung. Beim Roggen hatte der früh als Erstkultur geerntete Roggen einen um 142 kJ/kg TM höheren Brennwert als der später geerntete GPS-Roggen und der Brennwert nahm bis zur Vollreife noch weiter ab.

Im Vergleich zu den Brennwerten sind die Heizwerte im Mittel aller Kulturen um 7% geringer und betragen im Mittel aller Kulturen 16.804 kJ/kg TM, beim Amaranth 15.300 kJ/kg TM und bei der Sonnenblume 17.500 kJ/kg TM.

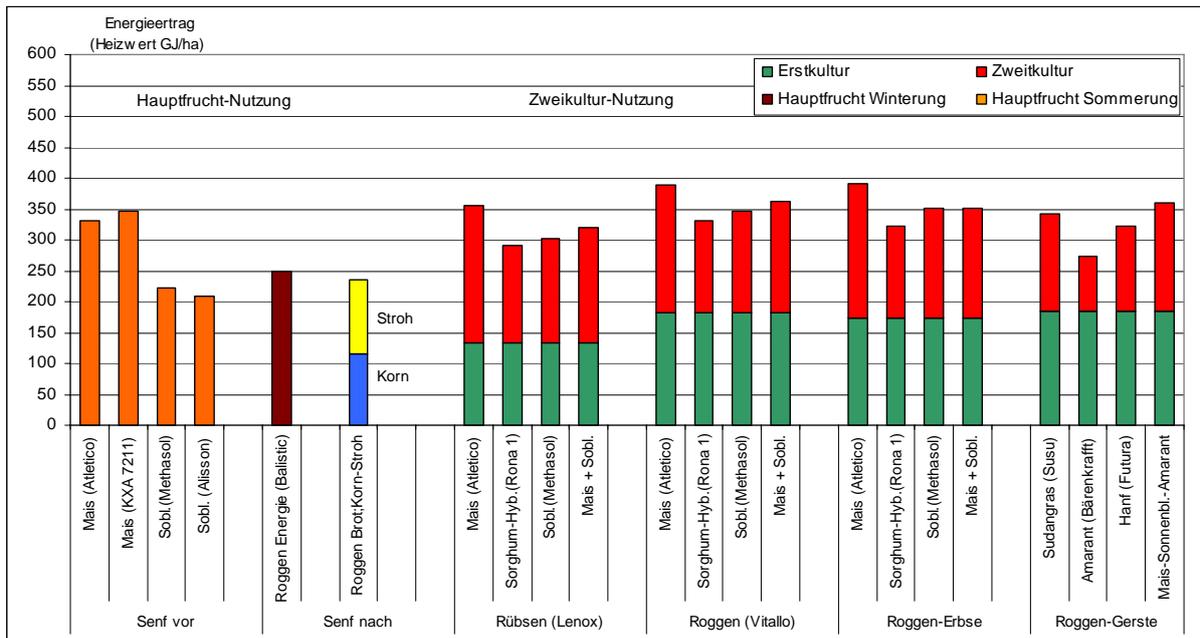


Abb. 31: Berechnete Jahres-Energieerträge je Hektar bei thermischer Verwertung (Basis Heizwert) für die untersuchten Varianten im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren

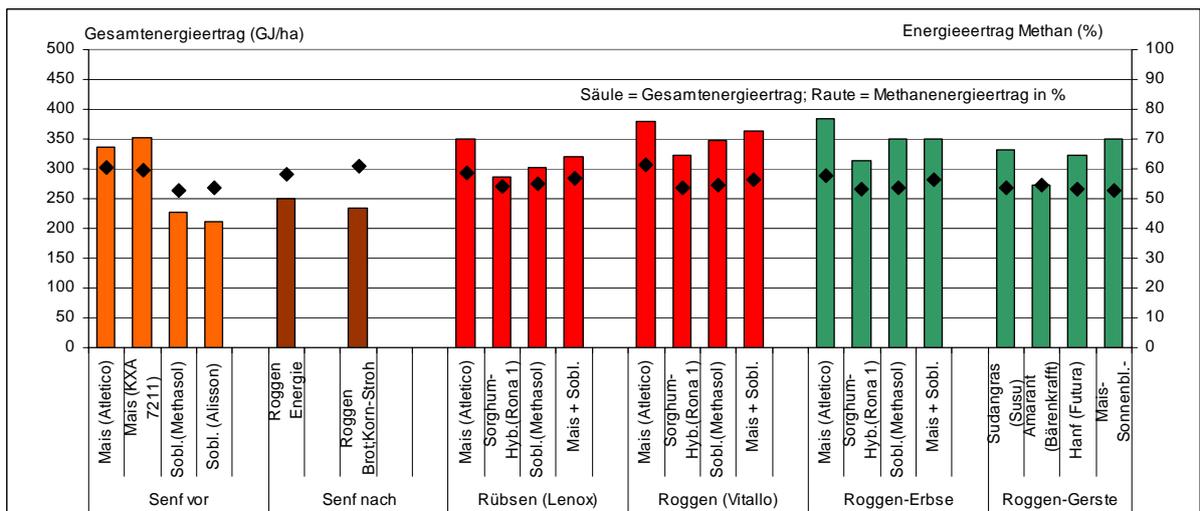


Abb. 32: Berechnete Jahres-Energieerträge je Hektar bei thermischer Verwertung (Basis Heizwert) im Vergleich zu dem berechneten Energieerträgen bei der Biogasbereitung (Basis Heizwert, dargestellt als Relativwert zu den Jahres-Energieerträgen (= 100%) für die untersuchten Varianten im Mittel der sieben Standorte und drei Jahre

Mit diesen Heizwerten und den Ernteerträgen wurden die Jahres-Energieerträge je Hektar berechnet, die im Mittel der sieben Standorte und der drei Jahre – getrennt für Korn und Stroh bzw. Erst- und Zweitkultur – in Abb. 31 dargestellt sind. Wie bei der Berechnung des Methanertrages je Hektar beinhalten die Pflanzenerträge in Hauptfruchtstellung nicht den Ertrag der Zwischenfrucht Senf. Abgesehen von den Varianten mit Mais und Amaran werden bedingt durch die geringen Unterschiede im Heizwert zwischen den Kulturen auch die Jahres-Energieerträge für die thermische Verwertung stark durch die Pflanzenerträge der Varianten beeinflusst (Abb. 4). Den höchsten Energieertrag mit 381 GJ/ha hatte die Zweikultur-Nutzungen mit Mais. Auch Mais in



Hauptfruchtstellung konnte diesen hohen Ertrag nahezu erreichen (350 GJ/ha). Am geringsten war der Jahres-Energieertrag der Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung mit 227 GJ/ha, der von Roggen GPS um 23 GJ/ha übertroffen wurde.

Um einen ersten Vergleich zwischen der Biogasbereitung und einer thermischen Wandlung zu ermöglichen, wurden die berechneten Methanerträge in die Energieeinheit GJ/ha (Basis Heizwert) umgerechnet und in Abb. 32 als Relativwerte den berechneten Jahres-Energieerträgen (= 100%; Basis Heizwert, Abb. 31) gegenübergestellt.

Aus ihr ist zu entnehmen, dass bei der Biogasbereitung zwischen 50 und 60% der Energiemenge im Erntegut in Form von Methan wiedergefunden wird und dass es diesbezüglich nur geringe Unterschiede zwischen den geprüften Varianten gibt. Die verbleibenden 40 – 50% der Energiemenge zur Ernte stellen die nicht anaerob abgebauten Pflanzeninhaltsstoffe Lignin, von Lignin inkrustierte Cellulosen und Hemicellulosen und weitere nicht abgebaute Inhaltsstoffe sowie ausgeschwemmte Bakterienmasse dar, die zusammen mit Wasser den Gärrest darstellen. Dieser wird zum Humusersatz und zur Nährstoffrücklieferung auf Acker- und Grünlandflächen ausgebracht. Gleichzeitig wird ein Teil der ursprünglich vorhandenen Energie im Erntegut als Wärme freigesetzt. Nach eigenen Berechnungen beträgt die freigesetzte Energiemenge in Form von Wärme etwa 5% der umgesetzten Energiemenge. Der überwiegende Teil sind nicht abgebaute Inhaltsstoffe und ausgeschwemmte Bakterienmasse. Ohne diesen Anteil für die einzelnen Biomassen weiter aufgliedern zu können, sei darauf hingewiesen, dass aus energetischer Sicht das Lignin einen recht hohen Stellenwert hat, da das Lignin mit ~28.000 kJ/kg TM einen fast doppelt so hohen Heizwert hat wie die Gesamtpflanze mit im Mittel 16.804 kJ/kg TM. Damit kann etwa $\frac{1}{4}$ dieses Anteils dem Lignin zugeordnet werden. Hieraus soll auch deutlich werden, dass ein gewisses Potenzial zur Effizienzsteigerung in der Biogasbereitung darin besteht, in dem zum Beispiel durch eine weitergehenden enzymatischen oder mechanischen Aufschluss der Biomasse ihre Abbaubarkeit, ihre Verdaulichkeit, verbessert wird. Dies bedeutet auf der anderen Seite, dass der Rückfluss an organischer Substanz auf der Acker- und Grünlandflächen zum Humusersatz vermindert wird.

3.5 Ökonomische Bewertung

Die nachfolgend vorgestellte ökonomische Bewertung der Untersuchung wurde von der Universität Gießen (TOEWS, 2009) durchgeführt. Sie beruht auf den Ernteergebnissen aus den Versuchen und den Angaben zur Arbeitserledigung von der Saat bis zur Ernte seitens der Versuchsansteller. Die **Kosten** der Arbeitserledigung werden auf den berechneten Jahres-Methanertrag in den einzelnen Varianten bezogen (Cent/m³ Methan). Für die Quantifizierung der **Leistung** wird im Rahmen der Ermittlung des Deckungsbeitrages (vgl. auch Kap.2.3) ein Silomaispreis von 28 €/t FM (32%TS, angeliefert und verdichtet im Silo an der Biogasanlage, freie Gärrestrücknahme) unterstellt, aus dem sich bei 91 m³ CH₄/t FM ein Methanpreis von 31 ct/m³ ableitet. Ihm wird der jeweilige berechnete Ertrag an Methan aus den einzelnen Varianten zugeordnet.

Arbeitserledigungskosten und Deckungsbeiträge: In Abb. 33 sind die Arbeitserledigungskosten/m³ Methan bezogen auf die Jahreserträge in den Varianten (d.h. Senf +



Hauptkultur bzw. Erst- + Zweitkultur) im Mittel der sieben Standorte und drei Jahre dargestellt. Die niedrigsten Arbeitserledigungskosten (Cent/m³ Methan) sind bei den Kulturen Roggen-Korn, Roggen-GPS und Silomais in Hauptfruchtstellung mit 13-18 Cent/m³ Methan zu verzeichnen. Deutlich teurer ist das gewonnene Methan in der Variante Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung mit 28 Cent/m³ und in der Biomassebereitstellung mittels Zweikultur-Nutzung. Hier haben die Varianten Roggen und Roggen/Erbsen-Gemenge gefolgt von Mais, Roggen gefolgt

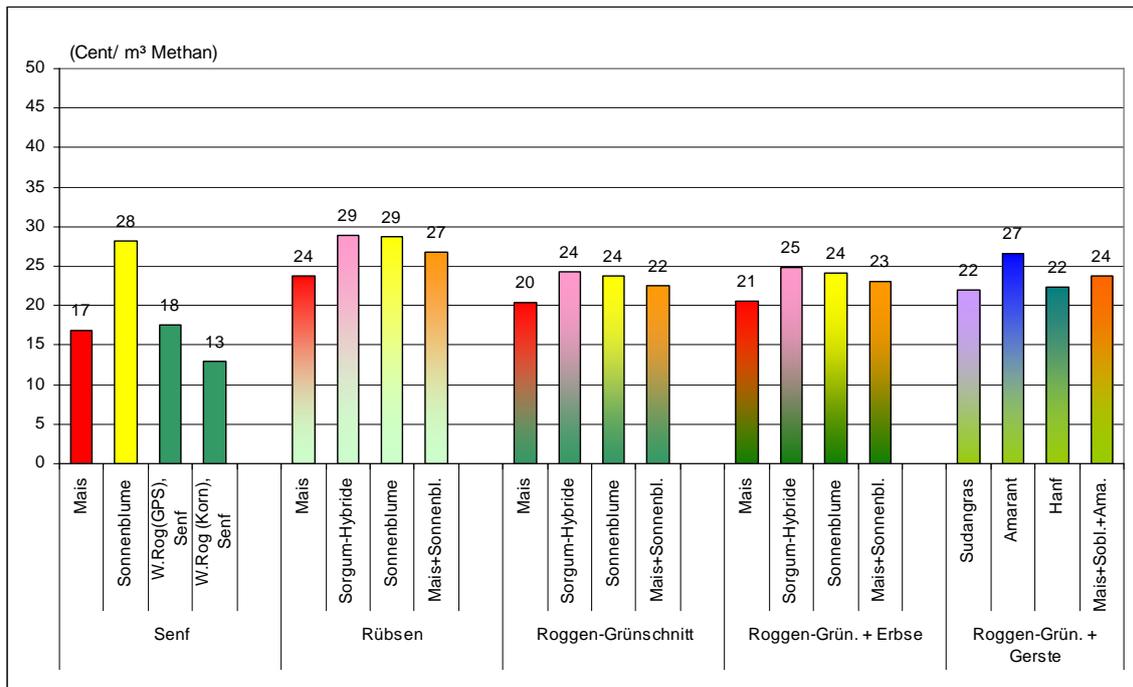


Abb. 33: Arbeitserledigungskosten/m³ Methan bezogen auf den Jahres-Methanertrag/ha für die untersuchten Varianten im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren

von Mais/Sonnenblumen-Gemenge und Roggen/Gersten-Gemenge gefolgt von der Sudangras-Hybride mit 20 – 22 Cent/m³ die niedrigsten Arbeitserledigungskosten. Die Arbeitserledigungskosten in der Variante Roggen und Roggen/Erbsen-Gemenge gefolgt von der Sorghum-Hybride bzw. Sonnenblumen betragen zwischen 22 und 25 Cent/m³. Aufgrund der schlechten Ertragsleistung sind die spezifischen Arbeitserledigungskosten bei Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung, Sorghum-Hybride, Sonnenblumen und Mais/Sonnenblumen-Gemenge nach Rübsen sowie Amaranth mit 27 – 29 Cent/m³ Methan am höchsten. Deutlich wird, dass sich unter den Erstkulturen der Rübsen aus ökonomischer Sicht weniger eignet als der Roggen in Reinsaat bzw. in Gemengen, da sein geringerer Ertrag und der geringere TS-Gehalt des Erntegutes – mehr Transportaufwand bei der Ernte und der Gärrestausrückführung - die Arbeitserledigung verteuern. Im untersuchten Zeitraum konnten zudem mit den Varianten der Zweikultur-Nutzung trotz höherer Erträge an Biomasse und Methan nicht die spezifischen Arbeitserledigungskosten von Mais in Hauptfruchtstellung erzielt werden, da die zweimalige Ernte und der zu geringe TS-Gehalt der Zweitkultur den Aufwand überproportional vergrößern.

Nach den Arbeitserledigungskosten werden in (Abb. 34) die Jahres-Deckungsbeiträge der geprüften Varianten im Mittel der sieben Standorte und drei Jahre dargestellt. Unter den getroffenen Annahmen



ist mit Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf mit 430 €/ha der höchste Deckungsbeitrag zu erzielen, gefolgt von Roggen-GPS (341 €/ha) und Roggen zur Vollreife geerntet (336 €/ha). Aufgrund niedriger Erträge und niedriger TS-Gehalte zur Ernte ergibt sich bei Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung ein negativer Deckungsbeitrag von -205 €/ha.

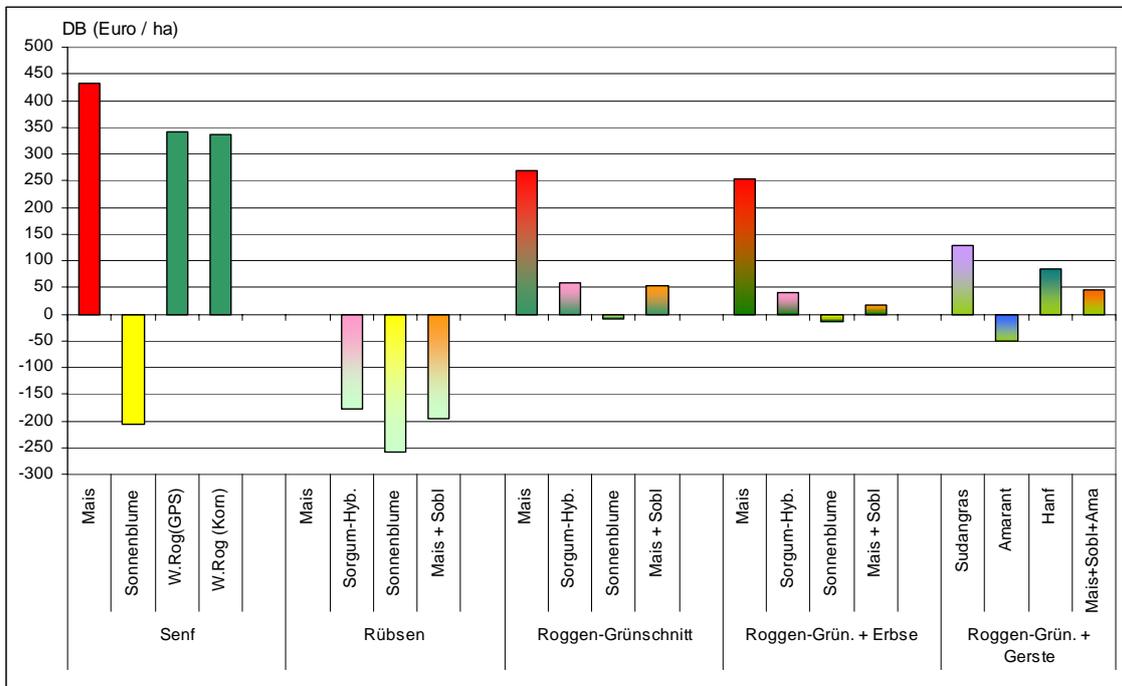


Abb. 34: Jahres-Deckungsbeiträge (DB) für die untersuchten Varianten (€/ha, bezogen auf den Jahresertrag) im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren

Mit Mais nach Roggen (268 €/ha) bzw. Roggen/Erbsen-Gemenge (253 €/ha) konnten in der Zweikultur-Nutzung zwar die höchsten Deckungsbeiträge erzielt werden, das Niveau von Mais und Roggen in Hauptfruchtstellung konnte jedoch nicht erreicht werden. Die weiteren Varianten erreichten einen Deckungsbeitrag um 0 €/ha. Es könnten somit nur die variablen Kosten gedeckt werden, eine Deckung der festen Kosten sowie der Gewinnansprüche wäre jedoch nicht möglich. Wie bereits oben ausgeführt, belasten trotz hoher Erträge die zweimalige Ernte und der zu geringe TS-Gehalt der Zweitkultur das ökonomische Ergebnis. Dies ist auch mit auf das gewählte Verfahren zur Ermittlung der Kosten (KTBL 2008a, 2008b; Anhang Nr. 8 und 9) zurückzuführen, das niedrige TS-Gehalte im Erntegut und mehrmalige Ernten mit niedrigen Teilerträgen mit hohen Kosten belastet.

Deckungsbeiträge der Varianten an den Versuchstandorten: Da deutliche Unterschiede zwischen den Standorten im Jahresertrag der einzelnen Varianten bestanden, werden in Tab. 9 die Deckungsbeiträge getrennt nach Standorten im Mittel der drei Versuchsjahre wiedergegeben und nachfolgend beschrieben.

Dornburg: Zu den vier Varianten mit den höchsten Deckungsbeiträgen gehören in abnehmender Reihenfolge Roggen-GPS gefolgt von Senf, Mais in Hauptfruchtstellung, Mais nach Roggen/Erbsen-Gemenge und nach Grünschnittroggen. Hieraus folgt, dass neben Mais in Hauptfruchtstellung auch Roggen-GPS und die Zweikultur-Nutzung von Roggen und Mais einen festen Platz in der Fruchtfolge zur Energiebereitstellung einnehmen sollten, da das Wintergetreide zu stabilen Jahreserträgen



beiträgt. Auch mit der Sudangras-Hybride und Hanf nach Roggen/Gersten-Gemenge können noch positive Deckungsbeiträge erzielt werden, während die übrigen Varianten vorwiegend negative Deckungsbeiträge aufweisen.

Tab. 9: Jahres-Deckungsbeiträge der geprüften Varianten an den sieben Versuchsstandorten im Mittel von drei Jahren (€/ha, bezogen auf den Zeitraum eines Jahres)

DB (€/ha)	Kultur	Dornburg	Gülzow	Haus Düsse	Rauischh.	Straubing	Werlte	Witzenh.	Mittel	Stabw.
Senf	Mais	177	221	677	312	713	411	512	432	212
	Sonnenblume	-295	-394	-136	-102	-24	-272	-225	-207	127
	W.Rog(GPS), Senf	396	285	313	416	432	294	254	341	71
	W.Rog (Korn), Senf	386	382	286	298	463	311	229	336	78
Rübsen	Mais	-206	-329	342	-14	260	-62	-1	-1	238
	Sorgum-Hybride	-380	-314	92	-211	-26	-162	-238	-177	164
	Sonnenblume	-347	-446	-93	-295	-37	-277	-315	-258	144
	Mais+Sonnenbl.	-378	-453	36	-246	77	-224	-190	-197	196
Roggen-Grünschnitt	Mais	132	116	524	195	521	151	238	268	178
	Sorgum-Hybride	-155	0	257	138	156	-20	29	58	136
	Sonnenblume	-53	-107	107	12	93	-66	-43	-8	82
	Mais+Sonnenbl.	-148	-11	249	40	163	29	58	54	126
Roggen-Grün. + Erbse	Mais	156	204	485	224	337	117	245	253	124
	Sorgum-Hybride	-111	14	192	66	166	-24	-24	40	109
	Sonnenblume	47	-102	17	-17	28	-46	-36	-16	51
	Mais+Sonnenbl.	-119	14	129	-24	139	-1	-25	16	91
Roggen-Grün. + Gerste	Sudangras	102	62	324	14	284	73	45	129	123
	Amarant	31	-100	-23	-98	16	-43	-133	-50	62
	Hanf	102	83	392	-9		-7	-57	84	163
	Mais+Sobl.+Ama.	-154	-79	221	69	257	-18	19	45	151

Gülzow: Die Reihung der Varianten mit den höchsten Deckungsbeiträgen lautet an diesem Standort Roggen-GPS gefolgt von Senf, Mais in Hauptfruchtstellung und Mais nach dem Roggen/Erbsen-Gemenge. Auch am Standort Gülzow sollte Roggen-GPS und die Zweikultur-Nutzung mit Mais neben dem Mais im Hauptfruchtanbau einen festen Bestandteil als Energiepflanzen in der Fruchtfolge einnehmen. Gleichzeitig könnte hier die Sudangras-Hybride in Zukunft eine alternative Kultur sein.

Haus Düsse: An dem Standort, der zusammen mit dem Standort Straubing die höchsten Deckungsbeiträge hat, gehören Mais nach Senf, Mais nach Grünschnittroggen bzw. nach Roggen/Erbsen-Gemenge zu den ökonomischsten Varianten. Die Zweikultur-Nutzung stellt hier eine gute Ergänzung zum Mais in Hauptfruchtstellung dar. Ihre Deckungsbeiträge liegen zwar um ~150 € niedriger als beim Mais in Hauptfruchtstellung, sind aber im Vergleich zu dem Roggen-GPS zum Teil höher. Auch eine Zweikultur-Nutzung mit Hanf ist an diesem Standort lohnend.

Rauischholzhausen: Die ökonomischste Variante ist hier Roggen-GPS gefolgt von Senf, sowie Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf und ebenso Mais nach Roggen/Erbsen-Gemenge mit einem um 88 €/ha geringeren Deckungsbeitrag. Die Empfehlung, auch eine Zweikultur-Nutzung an diesem Standort mit in die Fruchtfolge aufzunehmen erscheint zur Auflockerung der Fruchtfolge gerechtfertigt, zumal an diesem Standort in Zukunft auch die Sorghum-Hybride von Interesse sein könnte.

Straubing: Dieser Standort, der bezüglich der Deckungsbeiträge zur Spitzengruppe zählt, zeigt sich prädestiniert für den Maisanbau in Hauptfruchtstellung und den Anbau von Roggen-GPS, mit dem



Mais in Zweikultur-Nutzung werden um 190 €/ha geringere Deckungsbeiträge erzielt. Potenziale lässt auch die Sudangras-Hybride erwarten, da schon jetzt Deckungsbeträge in Höhe von 284 €/ha möglich sind. Wie am Standort Haus Düsse sind auch hier bei Sonnenblumen in Zweikultur-Nutzung nach Getreide positive Deckungsbeiträge zu erzielen.

Werlte: Zu den ökonomischsten Varianten zählen an diesem Standort der Mais in Hauptfruchtstellung, gefolgt von Roggen-GPS und mit deutlichem Abstand gefolgt von Mais in Zweikultur-Nutzung mit Roggen bzw. Roggen/Erbsen-Gemenge als Erstkulturen. Dieser Standort ist aufgrund der leichten Böden für die Hauptfrucht-Nutzung von Mais und Roggen-GPS besser geeignet als für die Zweikultur-Nutzung, denn trotz hoher Jahresniederschläge können die Zweitkulturen die erforderlichen Erträge und TS-Gehalte für höhere Deckungsbeiträge nicht realisieren. Aussichtsreich scheint an diesem Standort auch die Sudangras-Hybride zu sein, die schon jetzt unter den gewählten Sorten- und Anbaubedingungen einen positiven Deckungsbeitrag hatte.

Witzenhausen: Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf ist auch an diesem Standort die ökonomischste Variante (512 €/ha), mit deutlichem Abstand (254 €/ha) vor Roggen-GPS gefolgt von Senf und Mais nach Roggen, die die gleichen Deckungsbeitrag erzielten. Mais in Hauptfruchtstellung wird somit ein fester Bestandteil in der Fruchtfolge sein, kann aber sowohl durch Roggen-GPS als auch durch die Zweikultur-Nutzung mit Mais ergänzt werden. Auch hier können Sudangras- und Sorghum-Hybride nach Getreide in der Zukunft eine Perspektive für die Fruchtfolgeaufweitung bieten und zeichnen sich schon jetzt durch leicht positive Deckungsbeiträge aus.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Mais und Roggen-GPS in Hauptfruchtstellung an allen Standorten sich durch die höchsten Deckungsbeiträge auszeichnen, gefolgt von Mais in Zweikultur-Nutzung nach Roggen bzw. Roggen/Erbsen-Gemenge. Obwohl mit der Zweikultur-Nutzung deutliche Ertragsfortschritte bei Sonnenblumen als Zweitkultur im Vergleich zur Hauptfruchtstellung erzielt werden können, ist sein Anbau noch nicht konkurrenzkräftig genug. Neben der Ertragssteigerung sind unbedingt höhere TS-Gehalte zur Ernte durch Züchtung zu erzielen. Bis dies realisiert ist, sollte das Gemenge mit Mais als Zweitkultur gewählt werden, da dies ökonomischer ist.

3.6 Ökologische Bewertung

Aus der umfangreichen ökologischen Bewertung dieser Versuche, die auf den erhobenen Daten seitens der Versuchsansteller beruhen, und in Teilprojekt 2 maßgeblich bearbeitet werden, werden von den Berichterstattem Teilaspekte herausgegriffen, die zunächst pflanzenbaulich von Interesse sind. Hierzu zählen der Vergleich zwischen dem Reinanbau einzelner Kulturen und dem Gemengeanbau sowie die Nährstoffversorgung in den Versuchen.

3.6.1 Vergleich zwischen Reinanbau und Gemengeanbau

Im Vorhaben sollte u. a. der Frage nachgegangen werden, ob der Anbau von Energiepflanzen eine Perspektive für den Anbau von Gemengen bietet und somit zur Vielfalt in den Fruchtfolgen beitragen kann. Verglichen werden können bei den Winterungen der Reinanbau von Roggen mit dem Gemenge mit Erbsen bzw. Wintergerste als Erstkulturen, bei den Sommerungen der Reinanbau von Mais und



Sonnenblumen mit dem Mais/Sonnenblumen-Gemenge bzw. Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenge als Zweitkulturen. Diese Vergleiche sind in Abb. 35 im Mittel der sieben Standorte und drei Jahre dargestellt.

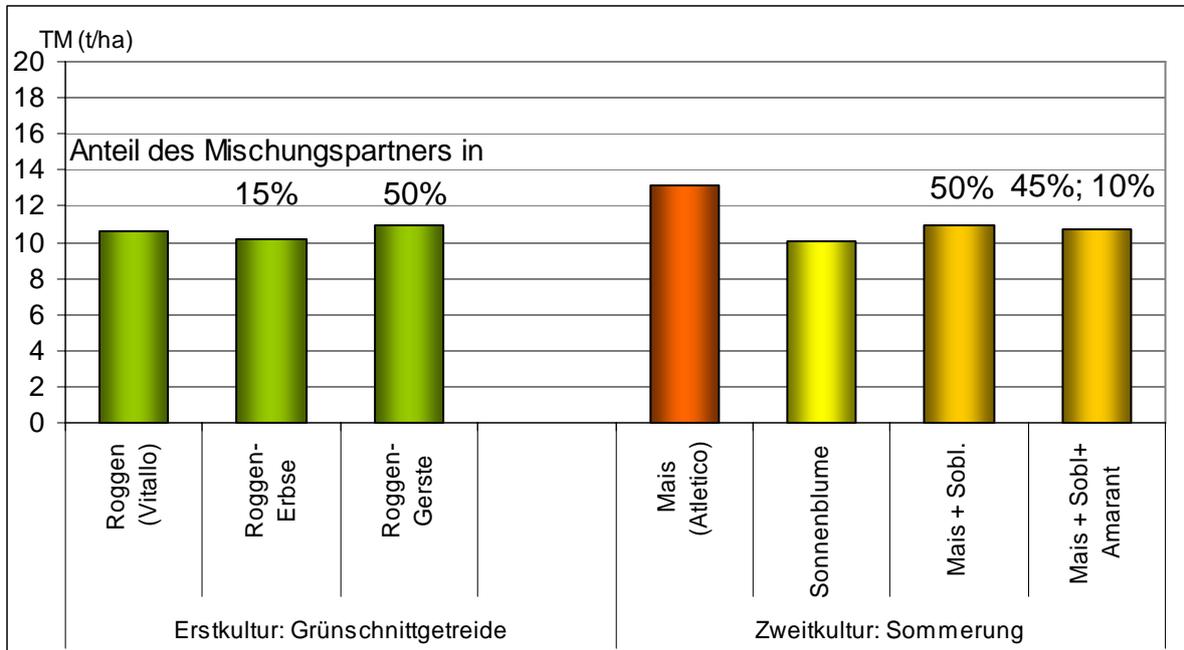


Abb. 35: Vergleich der Trockenmasseerträge im Rein- und Mischanbau, ausgewählte Varianten im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren

Gemenge mit Roggen: Nach drei Anbaujahren kann festgestellt werden, dass Mischungen von Winterroggen mit Wintererbsen oder Wintergerste im Vergleich zum Reinanbau nahezu ohne Ertragseinbußen möglich sind (Roggen/Erbsen-Gemenge) bzw. durch geringere Lagerneigung etwas höhere Erträge zu erzielen sind (Roggen/Gersten-Gemenge). Mit der Wahl der Sorte *Vitallo*, die für die Grünschnittnutzung gezüchtet wurde, war mit einer Nutzung nach dem Ährenschieben eine erhöhte Lagerneigung verbunden, was zu Versuchsbeginn noch nicht bekannt war. Durch die geringere Saatstärke des Roggens im Gemenge mit der Gerste sank die Lagerneigung und erlaubt eine Empfehlung für dieses Gemenge. Weiterhin ist mit der Sorte *Vitallo* ein hoher Massenwuchs im Frühjahr verbunden, der die Konkurrenzkraft der Wintererbsen schmälerte, sodass im Vergleich zu eigenen Versuchen mit dem Roggen/Erbsen-Gemenge (GRASS 2003) die Erbsen teilweise nur einen sehr geringen Anteil am Gesamtertrag hatten. Dieses Gemenge mit Wintererbsen ist dennoch unter der Voraussetzung zu empfehlen, dass nicht ein Grünschnitt-Roggen sondern wie in den eigenen Versuchen (GRASS 2003) ein Brot-Roggen als Sorte gewählt werden sollte, damit beide Gemengepartner in etwa die gleiche Konkurrenzkraft haben. Diese Möglichkeit, hiermit die Fruchtfolge zu bereichern, hat als weiteren positiven Nebeneffekt eine reduzierte N-Düngung, da die Erbse als Leguminose als N-Selbstversorger in die Düngeplanung eingeht (vgl. Kap. 2.2).

Mais/Sonnenblumen-Gemenge: Die Gemenge aus Mais und Sonnenblumen bzw. Mais, Sonnenblumen und Amaran sind dem Ertragsmittel aus den Reinerträgen von Mais und Sonnenblumen um 0,4 dt TM/ha bzw. 0,5 dt TM/ha unterlegen. Das Mais/Sonnenblumen-Gemenge könnte noch aus der Sicht einer gemeinsamen Ernte und Einlagerung als Gemisch in die Siloanlage



empfohlen werden. Während hier auch eine mechanische Unkrautbekämpfung möglich ist, schließt sie sich bei dem Gemenge mit Amaranth aus, da der Amaranth breitwürfig gesät wird und somit auch Pflanzen zwischen den Reihen stehen. Da nur die Pflanzen zwischen den Reihen mit Mais und Sonnenblumen konkurrieren können wird für den Amaranth zunächst nur eine Reinsaat empfohlen, wenn dies aus der Sicht der Verbesserung der Nährstoffzusammensetzung für die Biogasbereitung gewünscht wird (vgl. Kap 3.4.1.2).

3.6.2 Mengen an N_{\min} im Boden und Wassergehalt des Bodens

Vegetationsbegleitend wurden Bodenproben zur Analyse der Menge an pflanzenverfügbarem Stickstoff – kurz N_{\min} - ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$) in den Tiefen 0-30, 30-60 und 60-90cm entnommen, um Aussagen über die Nährstoffverfügbarkeit im Vegetationsverlauf treffen zu können und die N_{\min} -Mengen nach der Ernte bzw. vor dem Winter zu erfassen. Eine Übersicht der mittleren N_{\min} -Mengen im Frühjahr an den Standorten befindet sich im Anhang Nr. 40. Die N_{\min} -Mengen im Frühjahr sind mit 30 bis 60 kg N/ha zu beziffern und wurden bei der Düngeplanung in Abzug gebracht.

Im Folgenden wird der Schwerpunkt auf die N_{\min} -Mengen nach der Ernte bzw. im Herbst vor dem Winter gelegt, die als Indikator für eine angepasste Düngung sowie kulturartenspezifische N-Überschüsse vor Winter dienen. Die entsprechenden N_{\min} -Mengen sind im Mittel der sieben Standorte und drei Jahre in Abb. 36 dargestellt (für die Standorte siehe Anhang Nr. 41 und 42). Insgesamt kann festgestellt werden, dass das gewählte Düngekonzept, beruhend auf den Sollwertmethoden der Länder und erweitert um Abschläge für die früh geernteten Kulturen im Zweikultur-Nutzungssystem (Methodik siehe Kap 2.2) insgesamt als recht zutreffend bezeichnet werden kann. Die N_{\min} -Mengen im Herbst lagen im Mittel zwischen 20 und 60 kg N/ha. Deutlich werden aber auch Unterschiede zwischen Kulturen und Anbauvarianten. So hatte Mais in Hauptfruchtstellung sowie nach Rüben mit ~55 kg N/ha die höchsten N_{\min} -Mengen im Herbst. Nach Rüben als Erstkultur waren im Herbst in allen Varianten höhere N_{\min} -Mengen zu verzeichnen als nach der Erstkultur Getreide, da die N-Nachlieferung nach dem Rüben höher war, was bei diesem Konzept zur der Bemessung der Düngermenge für die Zweitkultur noch nicht berücksichtigt ist.

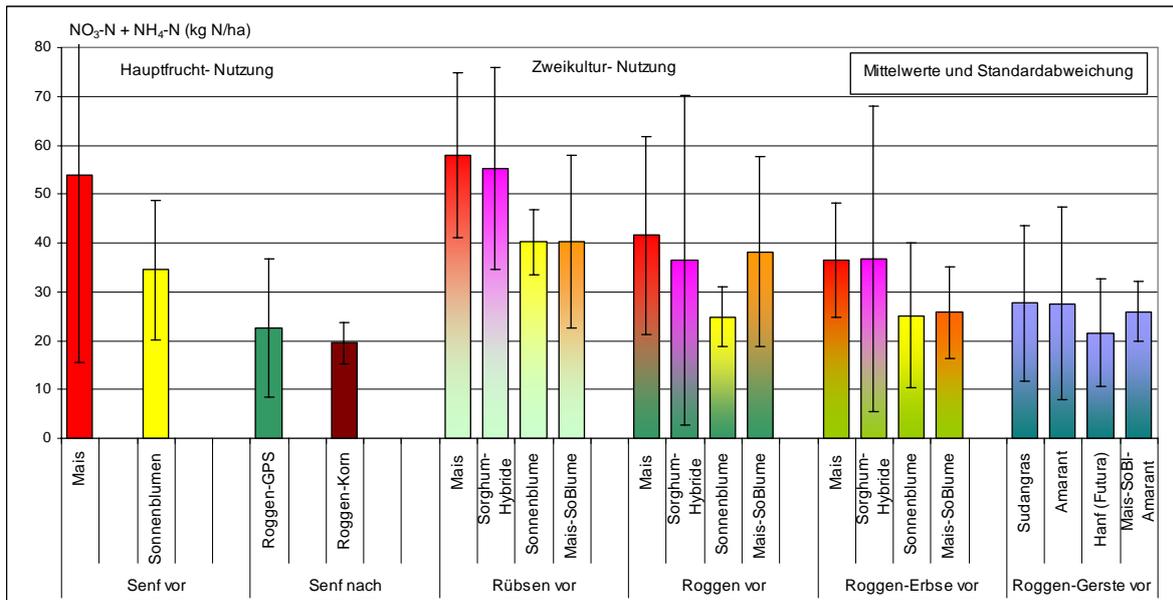


Abb. 36: N_{min} im Boden (0 – 90cm) nach der Ernte für die untersuchten Kulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren

Mit Mais und Sonnenblumen als Zweikulturen nach Roggen waren die N_{min} -Mengen im Herbst um ~ 15 kg N/ha niedriger als in der Hauptfruchtstellung dieser Kulturen. Insgesamt haben Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung und als Zweikultur trotz geringer Erträge niedrige Reststickstoffmengen, die damit - ebenso wie Roggen in Hauptfruchtstellung - als empfehlenswerte Pflanzen für Standorte, an denen Nährstoffauswaschungen leicht vorkommen bzw. problematisch sind (leichte Böden, Wasserschutzgebiete), einzustufen sind. In diesen Katalog können auch die Sudangras-Hybride, Amarant und Hanf als Zweikulturen nach Roggen/Gersten-Gemenge aufgenommen werden.

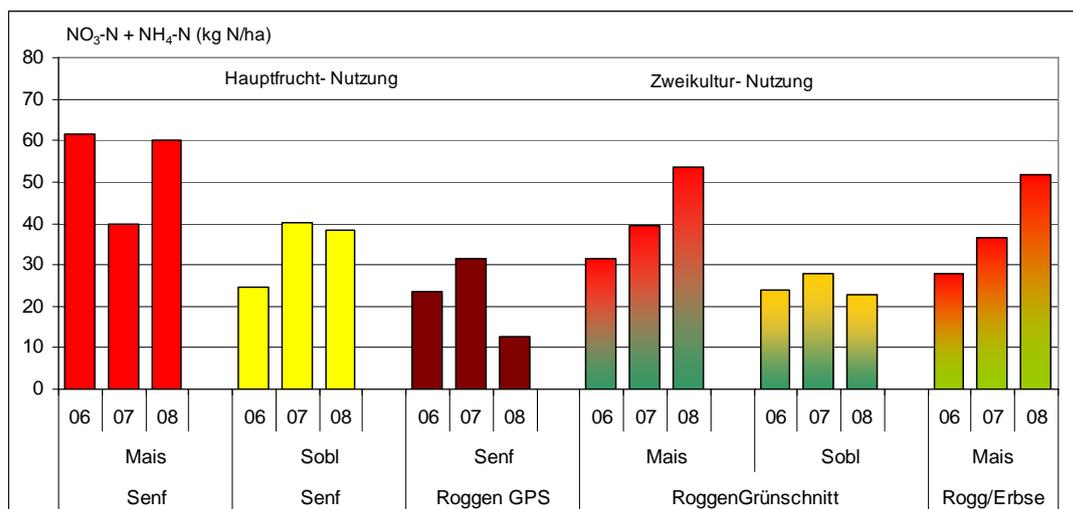


Abb. 37: N_{min} im Boden (0–90 cm) nach der Ernte von Mais, Sonnenblumen und Roggen in Hauptfruchtstellung mit Senf, von Mais und Sonnenblumen nach Grünroggen sowie Mais nach Roggen/Erbsen-Gemenge für die Jahre 2006, 2007 und 2008 im Mittel von sieben Standorten

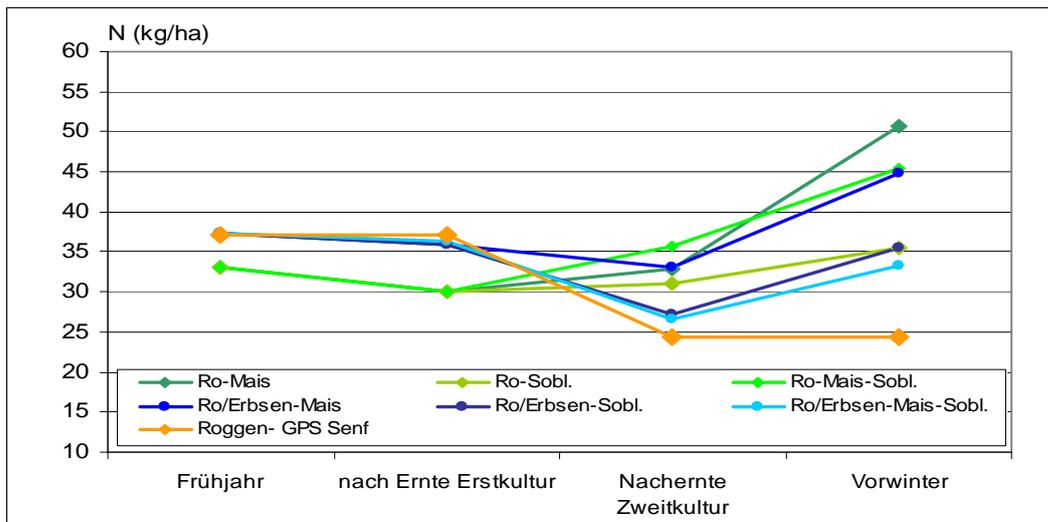


Abb. 38: N_{\min} -Menge im Boden (0-90cm) im Jahresverlauf von Frühjahr bis zu Vegetationsende im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren. Vergleich von Roggen-GPS mit Mais, Sonnenblumen und Mais/Sonnenblumen-Gemenge nach Roggen sowie nach Roggen/Erbsen-Gemenge

Dass es deutlich Unterschiede in den N_{\min} -Mengen im Herbst zwischen den Jahren gibt, verdeutlicht Abb. 37 mit Ergebnissen zu ausgewählten Kulturen. Diese Unterschiede sind vielfach auf die Ertragshöhe der Zweitkulturen zurückzuführen. Hohe Biomasseerträge schöpfen den N-Vorrat im Boden besser aus und führen zu deutlich niedrigeren Restmengen. Jedoch kann in diesen hochwüchsigen Kulturen nur während der Jugendentwicklung die Düngermenge aufgeteilt werden und damit ist eine Korrektur zum späteren Zeitpunkt nicht mehr möglich.

Weiter kann festgestellt werden, dass die Zweitkulturen nach dem Gemenge von Roggen mit der Leguminose Erbsen (blau) aufgrund angepasster mineralischer Düngung keine höheren N_{\min} -Mengen im Herbst aufweist als nach der Erstkultur Roggen (grün), wie Abb. 38 mit dem Jahresgang der N_{\min} -Mengen der verglichenen Kulturen zu entnehmen ist. Deutlich wird auch hier, dass Roggen-GPS die geringste N-Menge hinterlässt, gefolgt von Sonnenblumen, Sonnenblumen in Mischung mit Mais und letztlich gefolgt von Mais mit den höchsten N_{\min} -Mengen im Boden.

Generell soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den Untersuchungsflächen um langjährig mineralisch gedüngte Flächen handelt und auch im Versuch zur Erleichterung der Durchführung Minereraldünger zum Einsatz kam. Die N_{\min} -Mengen spiegeln somit recht gut den Unterschied zwischen den Kulturen wieder. Im Gegensatz hierzu werden in der Praxis Gärrest und somit ein organischer Dünger zum Einsatz kommen. In diesem Fall muss mit einem sukzessiven Aufbau der bodenbürtigen N-Vorräte und in der Folge mit einem Anstieg der N Nachlieferungen gerechnet werden, die zu höheren N_{\min} -Mengen im Frühjahr und Herbst führen können, dem durch Anpassungen im Düngekonzept begegnet werden muss.

Im Rahmen der Entnahme von Bodenproben für die Bestimmung von N_{\min} wurden auch die Wassergehalte in den einzelnen Bodentiefen ermittelt, die nachfolgend zur Charakterisierung der Wasserversorgung des Bodens zu verschiedenen Zeitpunkten herangezogen werden. In Abb. 39 ist die Wasserversorgung in der Bodenschicht 0-30 cm im Frühjahr vor der Saat von Mais und



Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung und zur Saat als Zweitkulturen in Prozent der nutzbaren Feldkapazität dieser Bodenschicht für die drei Versuchsjahre dargestellt. Ihr kann entnommen werden, dass – wie erwartet - die verfügbare Wassermenge für die Keimung und Jugendentwicklung im Frühjahr in der Regel besser ist als nach der Ernte der Erstkulturen bzw. zur Saat der Zweitkulturen. Als kritisch für die Keimung der Zweitkulturen kann sie aber an den Standorten Dornburg, Gülzow und Werlte angesehen werden, zumal an den Standorten Gülzow und Werlte die absolut verfügbare Wassermenge geringer (Gülzow) bzw. deutlich geringer ist (Werlte) als an den anderen Standorten (Tab. 4), während am Standort Dornburg die geringe verfügbare Wassermenge durch die geringen Niederschläge während der Winter- und Frühjahrsmonate verursacht wird (vgl. Anhang Nr. 11). Hieraus folgt, dass an diesen Standorten der Erntetermin der Erstkulturen auch an der aktuellen Wasserversorgung des Bodens sowie den erwarteten Witterungsbedingungen ausgerichtet werden sollte und im Rahmen der Bestellung die Schonung der noch vorhandenen Wassermenge im Boden Priorität hat. Dies bedeutet, dass an diesen Standorten vermehrt Minimalbestelltechniken bzw. die Direktsaat der Zweitkulturen zum Einsatz kommen sollten, die aber zum Teil den Einsatz von Herbiziden bedingen.

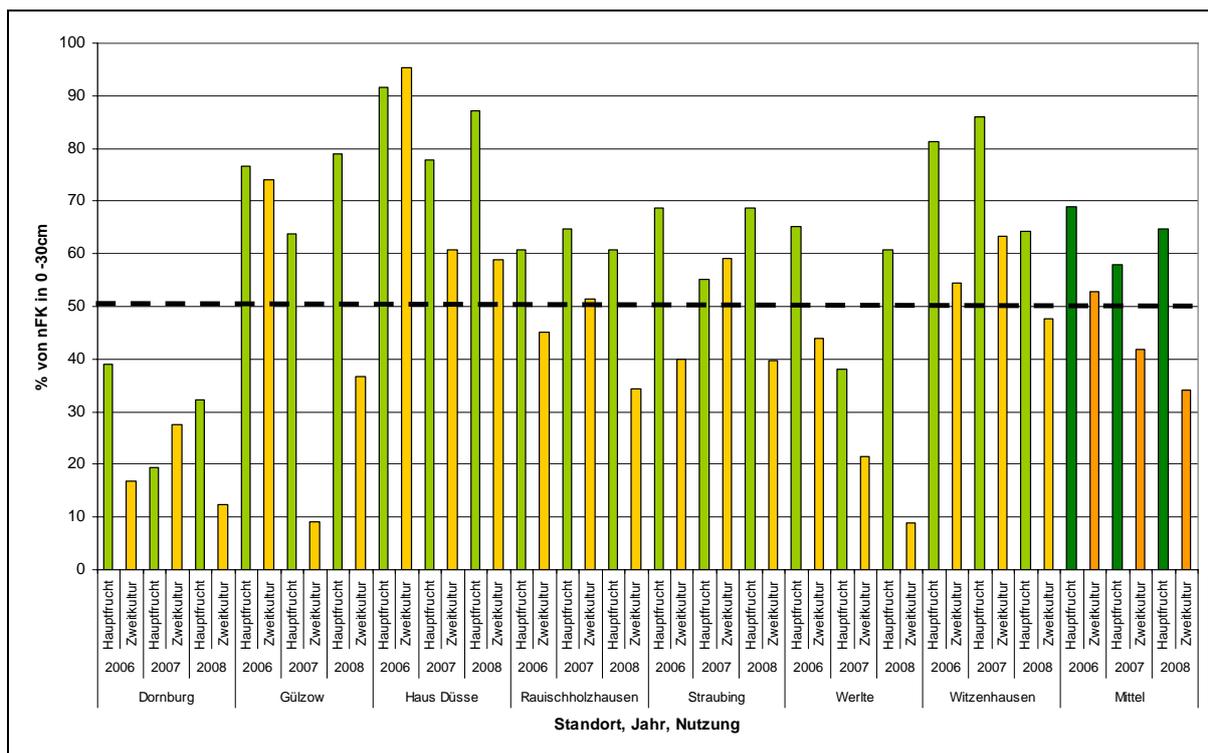


Abb. 39: Wasserversorgung des Bodens im Frühjahr vor der Saat von Mais und Sonnenblumen als Hauptfrüchte und zur Saat als Zweitkulturen in Prozent der nFK der Bodenschicht 0-30 cm

Zur Bewertung von Anbausystemen sind neben der Wasserversorgung der Pflanzen zur Saat auch die verbliebene Wassermenge nach der Ernte und damit die Wasserversorgung von Folgekulturen für die Keimung und Jugendentwicklung im Herbst von Bedeutung. Hierzu sind die Ergebnisse aus der Ermittlung der Wassergehalte zur Ernte der Kulturen in Hauptfruchtstellung und der Ernte der

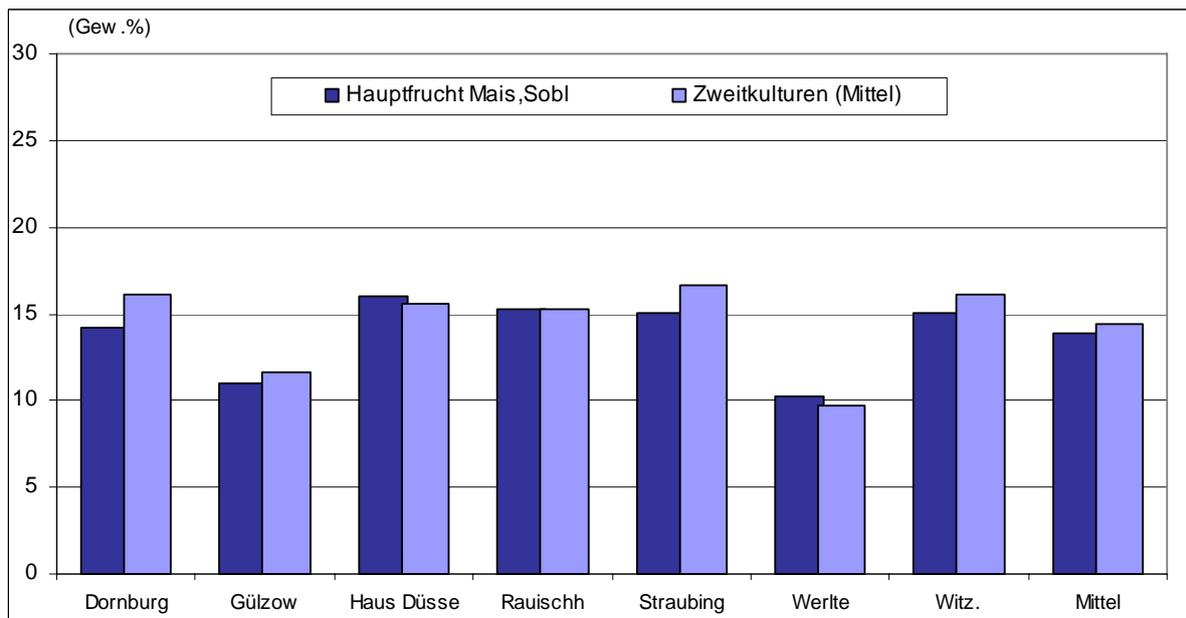
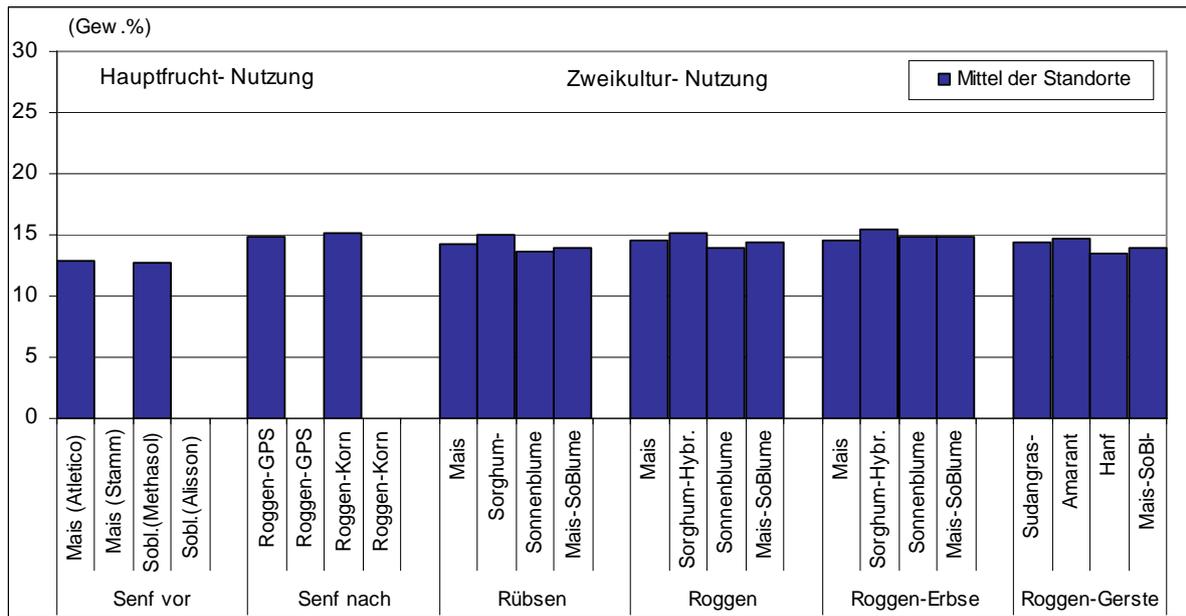


Abb. 40: Wassergehalt des Bodens (Gew. %) nach der Ernte von den Kulturen in Hauptfruchtstellung und als Zweikulturen im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren (oben) und für die einzelnen Versuchsstandorte im Mittel der Kulturen und Jahre (unten)

Zweikulturen in Abb. 40 für die Kulturen (oben) und Standorte dargestellt (unten). Ihnen kann entnommen werden, dass zwischen den Kulturen in Hauptfruchtstellung und als Zweikulturen und damit zwischen der Hauptfrucht-Nutzung und der Zweikultur-Nutzung nur geringe Unterschiede in den noch verbliebenen Wassermengen bestehen (Abb. 40, oben). Diese Aussage wird durch nahezu einheitliche Ergebnisse, die an den einzelnen Standorten gewonnen wurden (Abb. 40, unten), gestützt. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Bestimmung der Wassergehalte bei Mais und Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung durch die frühere Ernte früher erfolgte als bei der Zweikultur-Nutzung.



3.6.3 Nährstoffbilanz

N-Bilanz: Aus der insgesamt applizierten N-Düngermengen und den mit dem Erntegut von den Flächen entzogenen N-Mengen kann eine vereinfachte N-Jahresbilanz abgeleitet werden. Sie ist, bedingt durch den Export der gesamten oberirdischen Pflanzenmasse, in den meisten Fällen deutlich negativ, wie den Auswertungen im Mittel der Standorte und Jahre in Abb. 41 und Abb. 42 zu entnehmen ist. Nur beim Anbau von Brottroggen gefolgt von Senf ist sie nahezu ausgeglichen, da hier nur der Kornertrag in die Bilanz eingeht und das Stroh mit rund 40 kg N/ha auf dem Feld verbleibt. Wenn das Stroh ebenfalls zu einer Verwertung von der Fläche abtransportiert würde, wäre die Bilanz negativ.

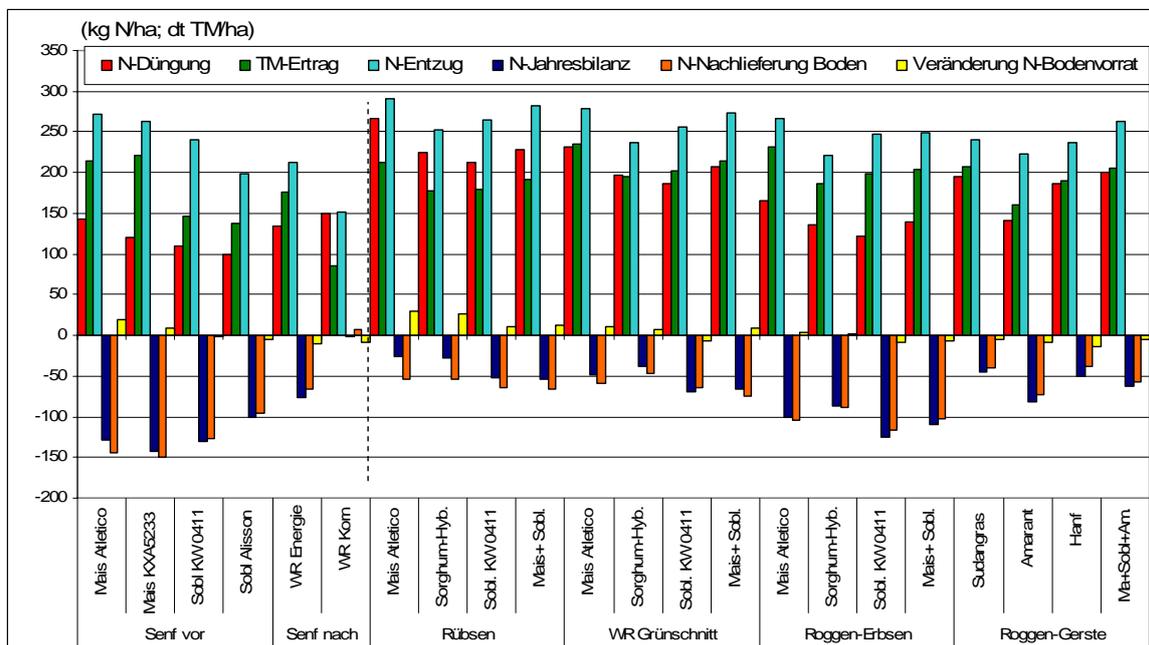


Abb. 41: N-Düngung (kg/ha), Ertrag (dt/ha), N-Entzug (kg/ha), N-Jahresbilanz (kg/ha), N-Nachlieferung (kg/ha) und Änderung des Bodenvorrates an pflanzenverfügbarem Stickstoff (kg/ha) für verschiedene Varianten aus Haupt- und Zwischenfrucht bzw. Erst- und Zweitkultur im Mittel der Standorte und Jahre 2006 – 2008

Auch die Variante mit Roggen GPS gefolgt von Senf weist mit -77 kg N/ha vergleichbare Bilanzen wie die Varianten der Zweikultur-Nutzung auf. Am stärksten negativ sind die N-Bilanzen nach Mais und Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung. Hohe Erträge beim Mais bedingen auch einen hohen Nährstoffbedarf, der in der Startphase durch Düngung gedeckt werden kann, danach, wenn die Bestände nicht mehr befahren werden können, erfolgt die Deckung des Bedarfes zunehmend aus der Nachlieferung des Bodens. Dennoch waren beim Mais erhöhte N_{\min} -Mengen nach der Ernte zu verzeichnen (Abb. 37) und im Vergleich zur N_{\min} -Menge im Frühjahr nahm sie noch zu (Abb. 41). Dies weist darauf hin, dass die Düngermenge für den Höchstertag nicht zu gering bemessen war.

Mit den gleichen Kenngrößen bewertet scheint auch bei der Zweikultur-Nutzung im Allgemeinen die N-Versorgung mittels Kalkammonsalpeter trotz negativer N-Bilanz nicht zu gering bemessen zu sein. Auch hier ist die Veränderung des N_{\min} -Vorrates im Boden vom Frühjahr bis zur Ernte nur gering und zur Ernte ist immer noch pflanzenverfügbare Stickstoff im Boden vorhanden. Im Detail könnte die



N-Menge in der Zweikultur mit Rübsen sogar noch etwas reduziert werden, da hier die N-Restmenge höher ist als nach Getreide als Erstkultur. Dieser Aspekt ist noch in das Düngekonzept einzuarbeiten.

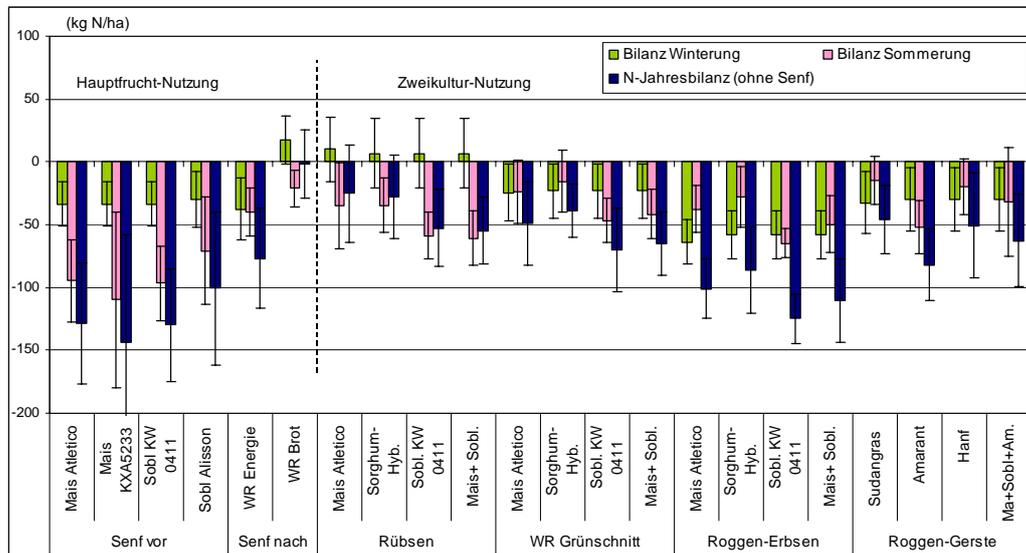


Abb. 42: N-Jahresbilanz der Winterungen und der Sommerungen sowie Jahresbilanz im Mittel der sieben Standorte und drei Jahre

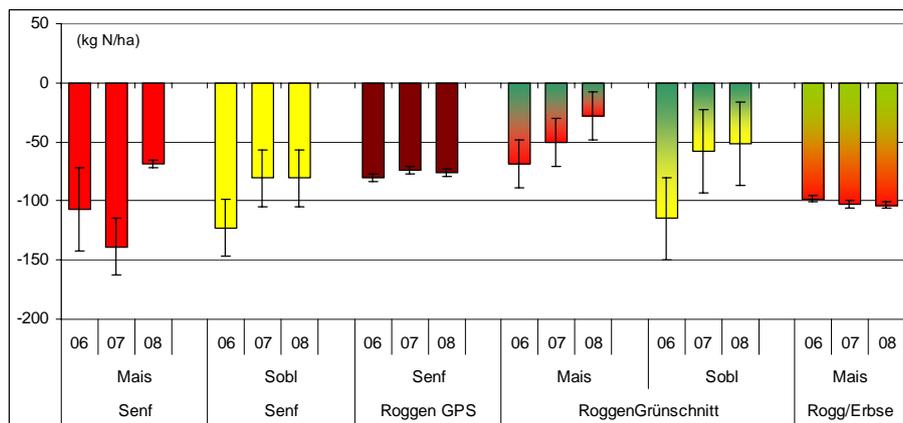


Abb. 43: N-Jahresbilanz für ausgewählte Varianten im Mittel der Standorte für die Jahre 2006-2008

Hierbei ist es hilfreich, die Bilanzierung getrennt für Haupt- und Zwischenfrucht bzw. Erst- und Zweikultur durchzuführen. Aus Abb. 42 wird deutlich, dass durch den geringen Anteil von Erbsen im Gemenge mit Roggen die Menge an fixiertem Stickstoff überschätzt wurde und damit die N-Versorgung des Roggens zu gering bemessen wurde. Eine Berücksichtigung dieses Sachverhaltes bei der Bemessung der N-Düngung zur Zweikultur wäre sicher sinnvoll gewesen. Dem steht gegenüber, dass die N_{min} -Mengen nach der Ernte in den Zweikulturen nach Roggen und nach Roggen/Erbsen-Gemenge gleich hoch waren (Abb. 37).

Die Unterschiede zwischen den Jahren in der N-Bilanz ist Abb. 43 zu entnehmen, die verdeutlicht, dass in Jahren mit hoher Ertragsleistung, wie z.B. das Jahr 2006, das Saldo deutlicher negativ ist als in den Jahren mit geringeren Erträgen, ein Aspekt den die Hauptfrucht-Nutzung mehr beeinflusst als die Zweikultur-Nutzung, und insbesondere hier die hochwüchsigen Kulturen, die nur in der Jugend gedüngt werden können.



Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Düngekonzept, das in Anlehnung an das N-Sollwertkonzept praktiziert wird, den N-Düngebedarf der Kulturen recht gut trifft und zur Realisierung hoher Erträge und relativ niedriger N-Gehalte beiträgt. Dennoch gibt es Bedarf, es zu optimieren und für die Düngung mit Gärrest zu modifizieren.

P- und K- Bilanz: In Ergänzung zur N- Bilanz sind Abb. 44 die Bilanzen für die Nährstoffe Phosphor und Kalium dargestellt. Die negativen Bilanzen beruhen darauf, dass in den Versuchen nicht direkt zu den Versuchen mit den Grundnährstoffen gedüngt wird sondern im Rahmen der Fruchtfolge. Hinzuweisen ist auf den hohen Kaliumbedarf, insbesondere von Sonnenblumen, der zu den deutlich negativen K-Bilanzen führt. Daher sollte die Wirkung einer K-Düngung direkt zu dieser Kultur geprüft werden, um sicher zu sein, dass kein Ertragspotenzial bei unterlassener K-Düngung verschenkt wird.

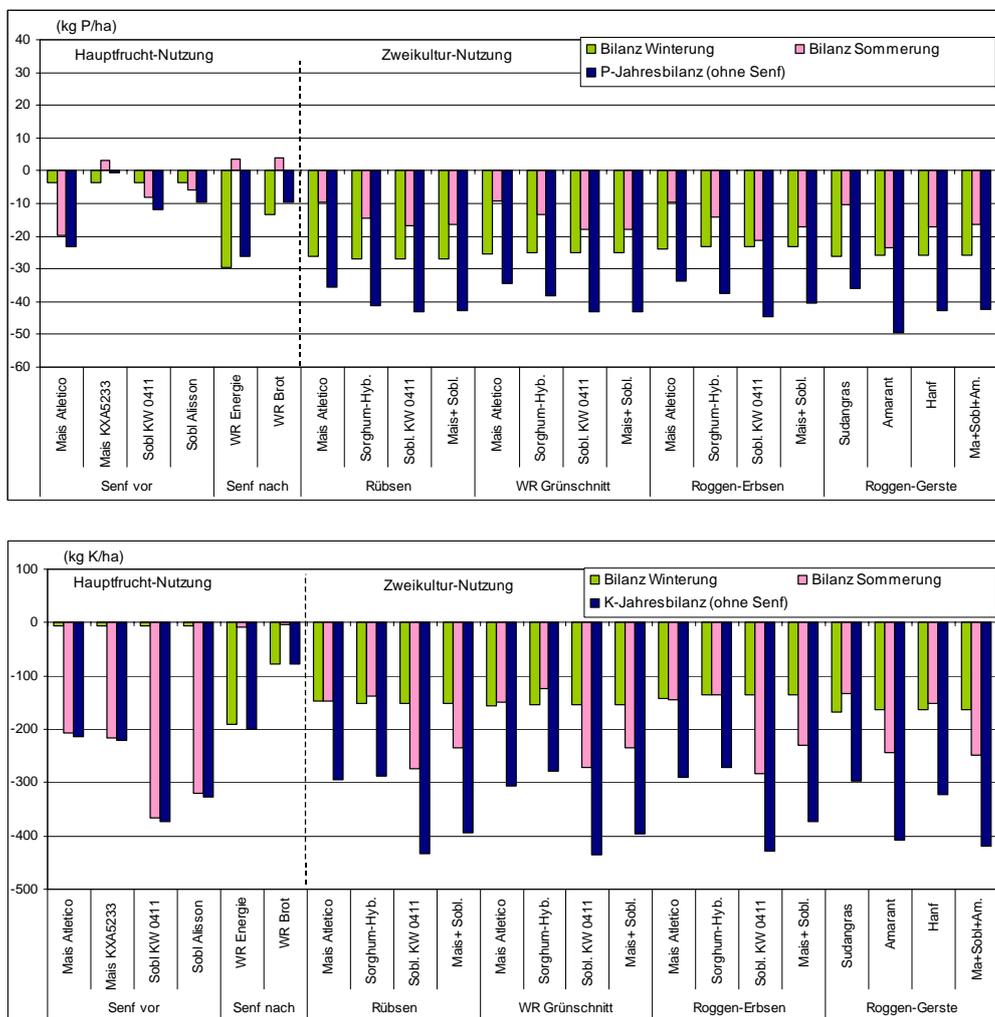


Abb. 44: P-Jahresbilanz (oben) und K-Jahresbilanz (unten) der untersuchten Varianten im Mittel von sieben Standorten und drei Jahren



4 DISKUSSION

Vorbemerkung: Der Vergleich zwischen der üblicherweise praktizierten Hauptfrucht-Nutzung mit Zwischenfrüchten und der noch wenig verbreiteten Zweikultur-Nutzung erfolgt vor dem Hintergrund, unter den unterschiedlichen standörtlichen Gegebenheiten in Deutschland die Vorzüge und Grenzen einer Zweikultur-Nutzung zu erkennen und hieraus Empfehlungen für die Praxis zur Bereitstellung von Biomassen zur Biogaserzeugung abzuleiten. Hierzu wurde in drei Jahren auf sieben Standorten im Bundesgebiet ein Feldversuch angelegt, der an allen Standorten und in allen Jahren identisch und mit nur zwei Wiederholungen angelegt und in gleicher Weise durchgeführt wurde. Dies geschah vor dem Hintergrund, die Versuche für eine allgemeingültigere Aussage über alle Orte und Jahre statistisch auswerten zu können. Verbunden ist diese Vorgehensweise mit Kompromissen, die zunächst im Bereich der gewählten Sorten zu suchen sind. Die gleiche Mais- und Sonnenblumen-Sorte kam nicht nur in Hauptfruchtstellung und als Zweikultur zum Einsatz sondern auch an allen Standorten, ebenso wie die anderen Zweikulturen.

Sortenwahl: Wenn auch aus Landes-Sortenversuchen die geeignete Maissorte für die verschiedenen Standorte für den Anbau in Hauptfruchtstellung abgeleitet werden kann, fehlen entsprechende Versuche für die Sortenwahl für Mais als Zweikultur. In früheren Versuchen konnte von GRAB 2003 gezeigt werden, dass sich die Ertragsleistung von Maissorten bei üblicher Saatzeit von der Ertragsleistung bei Spätsaat deutlich unterscheiden und nur eine Maissorte zeichnete sich als sehr geeignet für die Spätsaat aus. Hintergrund hierfür sind Unterschiede in der photoperiodischen Sensibilität der verschiedenen Maissorten, die aber nur an einem Ort geprüft wurde. Daher bedarf es nach dieser grundlegenden Untersuchung zur Beurteilung der Zweikultur-Nutzung auf verschiedenen Standorten im zweiten Schritt kontinuierlicher Sortenversuche, um in jedem Anbausystem und an jedem Standort bei ständig verbessertem Sortenspektrum die optimale Sorte anbauen zu können.

Zuchtfortschritt und Optimierungen im Anbau: Dies hier Dargelegte gilt nicht nur für den Mais sondern auch für die anderen geprüften Kulturen. Hieraus folgt, dass die Ergebnisse hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Anbausystemen und Kulturen in der Tendenz als richtig anzusehen sind und vornehmlich in der Zweikultur-Nutzung Ertragssteigerungen erzielt werden können, insbesondere bei der Sonnenblume und den tropischen Gräsern (Sorghum- und Sudangras-Hybride). Diese Kulturen werden neben Getreide und Mais zurzeit auch intensiv züchterisch bearbeitet, um die Feld- und Energieerträge zu mehren (FNR, 2009). Den pflanzenbaulichen Untersuchungen hierzu kann entnommen werden, dass insbesondere bei der Sorghum-Hybride gewählte Reihenweite wie bei Mais und Sonnenblumen von 75 cm noch kein Optimum darstellt und sicherlich mit engeren Reihen höhere Erträge zu erzielen gewesen wären (DEIGELMAYR, 2009).

Die Ergebnisse müssen weiter vor dem Hintergrund bewertet werden, dass zur Bereitstellung der Energiepflanzen auf den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verzichtet werden sollte. Dies wurde für die Versuchstätigkeit vorgegeben, um die Chancen für eine Ökologisierung der Landwirtschaft zu nutzen sowie Verzerrungen zwischen den Kulturen aufgrund des Fehlens zugelassener Pflanzenschutzmittel für einzelne Kulturen bzw. durch Grenzen für ihren Einsatz zu vermeiden. Es sei



in diesem Zusammenhang daran erinnert, dass insbesondere Herbizide vor dem Hintergrund normaler Saat- und Erntetermine geprüft und zugelassen werden. Vorgezogene Ernte der Erstkultur, verspätete Saat der Zweitkultur und eventuell eine verkürzte Wachstumszeit können zu Problemen bei der Kultur selbst und auch zu Nachbauproblemen führen. Dies sollte ausgeschlossen werden, erfordert aber Kompromisse. Während der Roggen und die Gemenge mit ihm eine hinreichende Konkurrenzkraft gegenüber Unkräutern haben, setzt der Verzicht von Herbiziden bei den Zweitkulturen sowie bei Mais und Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung in der Regel die mechanische Unkrautregulierung mittels Hackmaschine voraus, die größere Reihenabstände bedingt; Reihenabstände, die zumindest Schlepper mit Pflegebereifung befahren können, da die geprüften Zweitkulturen nicht mit dem Schlepperreifen überfahren werden dürfen.

Ausgeglichene Humusbilanz: Vorauszuschicken ist weiterhin, dass in den Vergleich aus pflanzenbaulicher und ökonomischer Sicht nur die Felderträge eingehen. Da es das Ziel der Klimapolitik ist, einen möglichst hohen Anteil an regenerativen Energien bereitzustellen, rückt der Aspekt der Humusversorgung der Böden zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses. Denn neben der Bereitstellung von Nahrungs- und Futtermitteln sowie nachwachsenden Rohstoffen muss auch hinreichend organische Substanz auf den Ackerflächen verbleiben oder auf sie zurückgeführt werden, um langfristig gleichbleibende Humusgehalte in den Böden realisieren zu können. Die Bewertung auf der Basis von Felderträgen berücksichtigt diesen Aspekt nicht, da während des Anbaus der Kulturen die Humusmengen im Boden in Abhängigkeit von der Pflanzenart verändert werden. Entsprechend der Humusbilanzmethode (VLUFA, 2004) wird während der Kultivierung von Getreide, Raps, Sonnenblumen und Faserpflanzen die Humusmenge um 280 kg Humus-C/ha vermindert, bei der Kultivierung von Mais um 560 kg Humus-C/ha. Hieraus folgt, dass für eine ausgeglichene Humusbilanz bei Mais mehr organische Substanz auf dem Feld verbleiben muss oder zurückgeführt werden muss als beim Getreide und den Sonnenblumen. Bewertet nach der Humusbilanzmethode entspricht die Differenz von 280 kg Humus-C beim Verbleib von organischer Substanz auf dem Feld z. B. durch die Ernte mit größerer Stoppellänge - bewertet mit 80 kg Humus-C/t TM für diese Stoppeln (VLUFA, 2004) – einem Ertragsverzicht von 3,5 t TM/ha durch die längeren Stoppeln. D.h. aus diesem Blickwinkel, dass beim Vergleich von Sonnenblumen mit Mais erst ab einem Mehrertrag von 3,5 t TM/ha beim Mais von einem Mehrertrag gegenüber Sonnenblumen ausgehen kann. Dies verbessert die Wettbewerbsfähigkeit von Getreide und Sonnenblumen gegenüber Mais und Hirsen deutlich, da dieses Defizit innerhalb einer Fruchtfolge mittels verminderten Exports an Biomasse aus dem Betrieb oder vermehrtem Zwischenfruchtanbau wieder ausgeglichen werden muss. Dieser Aspekt wird umso bedeutender, wenn anstatt Biomassen zur Biogasbereitung mit dem Rückfluss an Gärresten Biomassen zur thermischen Verwertung angebaut werden, aus der keine Biomassen als Reststoffen zum Humusersatz zurückfließen. Dies ist bei der Abschätzung des Biomasseaufkommens zur energetischen Wandlung zu berücksichtigen (STÜLPNAGEL 2004, 2004a; STÜLPNAGEL & KÖRSCHENS 2004), für die die Begriffe Feldertrag, Bruttopotenzial (Feldertrag – Biomasse für den Humusersatz) und Nettopotenzial (Bruttopotenzial – Ernte-, Konservierungs- und Lagerverluste) geprägt wurden (STÜLPNAGEL 2004b).

Dieser Ansatz muss auch die ökonomische Betrachtung einfließen, um den Vergleich zwischen den Systemen und Kulturen zu präzisieren. Vergleichbar der Berücksichtigung eines Vorfruchtwertes auf



der Basis von Pflanzennährstoffen, die mehr oder weniger zu Folgefrüchten zu verabreichen sind, ist auch ein Vorfruchtwert – Humus-C ökonomisch zu bewerten. Hiervon wird aber an dieser Stelle abgesehen, da mit diesem Ansatz mehrere ökonomische Vergleiche verbunden sind, die an anderer Stelle noch darzustellen sind. Mit diesen Ausführungen soll aber darauf hingewiesen werden, dass unter diesem Blickwinkel Kulturen wie das Getreide und die Sonnenblumen im Vergleich zum Mais eine ökonomische Besserstellung erfahren.

4.1 Faktor Wasser

Mit der allgemeinen Einschätzung, nur bei einer ausreichenden Wasserversorgung in den Sommermonaten mit der Zweikultur-Nutzung signifikante Mehrerträge im Vergleich zur Hauptfrucht-Nutzung realisieren zu können, war verbunden, dieses Anbausystem nur für Standorte mit ausreichender Wasserversorgung zu empfehlen. Basis der vorgestellten Versuchstätigkeit ist es, die Möglichkeiten und Grenzen der Zweikultur-Nutzung in einem bundesweiten Vergleich zu prüfen, maßgeblich auch vor dem Hintergrund der Wasserversorgung der Kulturen.

In Kap. 3.6.2 wurde zunächst dargelegt, dass die Menge an verfügbarem Wasser zur Saat der Zweitkulturen allgemein niedriger ist als zur Saat der Hauptkulturen, da die Erstkulturen den Wasservorrat im Oberboden deutlicher reduziert hatten als es üblicherweise durch die natürliche Evaporation des Bodens bis zur Saat der Fall ist, teilweise noch intensiviert durch das Aufreißen des Bodens vor der Saat. Entsprechend dieser Ergebnisse ist an den Standorten Dornburg, Gülzow und Werlte mit einer nicht ausreichenden Wasserversorgung zur Saat der Zweitkulturen zu rechnen (Abb. 39). Dem steht gegenüber, dass auch an diesen Standorten mit der Zweikultur-Nutzung eine Steigerung des Jahresertrages im Vergleich zu den Kulturen in Hauptfruchtstellung realisiert werden konnte (Abb. 5, Abb. 6; Abb. 10). Um die Bedeutung der einzelnen Wachstumsfaktoren für die Ertragsbildung abschätzen zu können, wurden die erzielten Erträge der Summe an Niederschlägen, an Wärme oberhalb 6°C und an Globalstrahlung von der Saat bis zur Ernte sowie der Menge an pflanzenverfügbarem Wasser gegenübergestellt und statistisch geprüft. Hierzu wurde zunächst eine multiple Korrelation für die Kulturen Mais und Sonnenblumen unabhängig vom Anbausystem durchgeführt (Tab. 10). Ihr kann entnommen werden, dass mit den geprüften Faktoren bei der Sonnenblume ein geringerer Anteil (0,33) an den Ertragsunterschieden von Ort zu Ort und Jahr zu Jahr erklärt werden kann als bei Mais mit einem Bestimmtheitsmaß von 70% (0,70). Beim Mais hatte die Wärmesumme der Lufttemperaturen die größte Bedeutung für das Pflanzenwachstum und erst an zweiter Stelle rangiert die Wasserversorgung der Pflanzen durch den Niederschlag. Bei den Sonnenblumen hat die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser zur Saat die größte Bedeutung, gefolgt von der Summe der Einstrahlung von der Saat bis zur Ernte.



Tab. 10: Bestimmtheitsmaße der multiplen Regression des Ertrages von Mais und Sonnenblumen mit verschiedenen Kenngrößen der Witterung und des Bodens. Lufttemperatur: Summe der Lufttemperaturen über 6°C von der Saat bis zur Ernte; Strahlung: Summe der Globalstrahlung von der Saat bis zur Ernte; Niederschlag: Niederschlagssumme von der Saat bis zur Ernte; pflanzenverfügbares Wasser im Boden zur Saat in Prozent der nFKWe

Mais		Sonnenblume	
Parameter	mult. r ²	Parameter	mult. r ²
Lufttemperatur	0,58	pflanzenverfügbares Wasser	0,23
Niederschlag	0,69	Strahlung	0,30
pflanzenverfügbares Wasser	0,70	Niederschlag	0,33
Strahlung	0,70	Lufttemperatur	0,33

Tab. 11: Bestimmtheitsmaße der multiplen Regression des Ertrages von Mais und Sonnenblumen in Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung mit verschiedenen Kenngrößen der Witterung und des Bodens. Lufttemperatur: Summe der Lufttemperaturen über 6°C von der Saat bis zur Ernte; Strahlung: Summe der Globalstrahlung von der Saat bis zur Ernte; Niederschlag: Niederschlagssumme von der Saat bis zur Ernte; pflanzenverfügbares Wasser im Boden zur Saat in Prozent der nFKWe

Mais		Sonnenblume	
Parameter	mult. r ²	Parameter	mult. r ²
Hauptfrucht-Nutzung			
Niederschlag	0,42	Strahlung	0,02
Lufttemperatur	0,48	Lufttemperatur	0,03
pflanzenverfügbares Wasser	0,48	Niederschlag	0,05
Strahlung	0,48	pflanzenverfügbares Wasser	0,05
Zweikultur-Nutzung			
Lufttemperatur	0,53	pflanzenverfügbares Wasser	0,50
Niederschlag	0,62	Lufttemperatur	0,57
pflanzenverfügbares Wasser	0,65	Strahlung	0,58
Strahlung	0,68	Niederschlag	0,59

Wird diese multiple Korrelation getrennt für die beiden Anbausysteme durchgeführt, so werden die Unterschiede in den Bestimmtheitsmaßen zwischen den Kulturen sofort deutlich (Tab. 11). Mit den geprüften Faktoren können bei der Sonnenblume in Hauptfruchtstellung die Ertragsunterschiede überhaupt nicht erklärt werden (5%), während beim Mais in Hauptfruchtstellung fast 50% der Ertragsunterschiede auf die Unterschiede in diesen Kenngrößen von Ort zu Ort und Jahr zu Jahr zurückzuführen sind. Hingegen ist das Bestimmtheitsmaß bei diesen Kulturen als Zweitkulturen mit 68 bzw. 59% deutlich höher. Hat beim Mais als Hauptkultur der Niederschlag die größte Bedeutung, gefolgt von der Wärmesumme der Luft, steht bei dem Mais als Zweitkultur die Wärmesumme im



Vordergrund und der Niederschlag an zweiter Stelle. Hingegen hatten bei den Sonnenblumen die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser zur Saat und die Summe der Lufttemperaturen den größten Einfluss auf den Ertrag.

Aus den vorgestellten Analysen kann nur soviel abgeleitet werden, dass der Faktor Wasser nicht das ausschließliche Kriterium ist, mit dem Ertragsunterschiede erklärt werden können und die Empfehlungen für die Standortwahl ausgesprochen werden können, denn dem Faktor Wärme muss anhand dieser Ergebnisse die gleiche Bedeutung zugemessen werden. Sicherlich ist die Erklärung der Ertragsunterschiede mit diesen Faktoren noch zu verbessern, wenn für jeden Standort diese Analysen getrennt durchgeführt werden, dies ist aber erst sinnvoll, wenn durch die Ergebnisse aus weiteren Versuchsjahren mit gleicher Versuchsanordnung die Datengrundlage umfangreicher wird. Möglicherweise kann dann auch die Erklärung der Ertragsunterschiede bei Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung verbessert werden und der fehlende Einfluss der Saatzeit bzw. des Auflauftermins der Sonnenblumen auf den Jahresertrag wird nachvollziehbarer (Abb. 22).

4.2 Faktor Standort

Um aus dem Blickwinkel der verschiedenen Standorte die Ergebnisse zu werten und die allgemeine Einschätzung zu prüfen, dass die Zweikultur-Nutzung nur für die „besseren“ Standorte zu empfehlen ist, wurden die Standorte vor dem Hintergrund von dem Wasserangebot durch Niederschlag, der Niederschlagsverteilung, der Speicherfähigkeit des Bodens für Wasser und der Bodengüte in

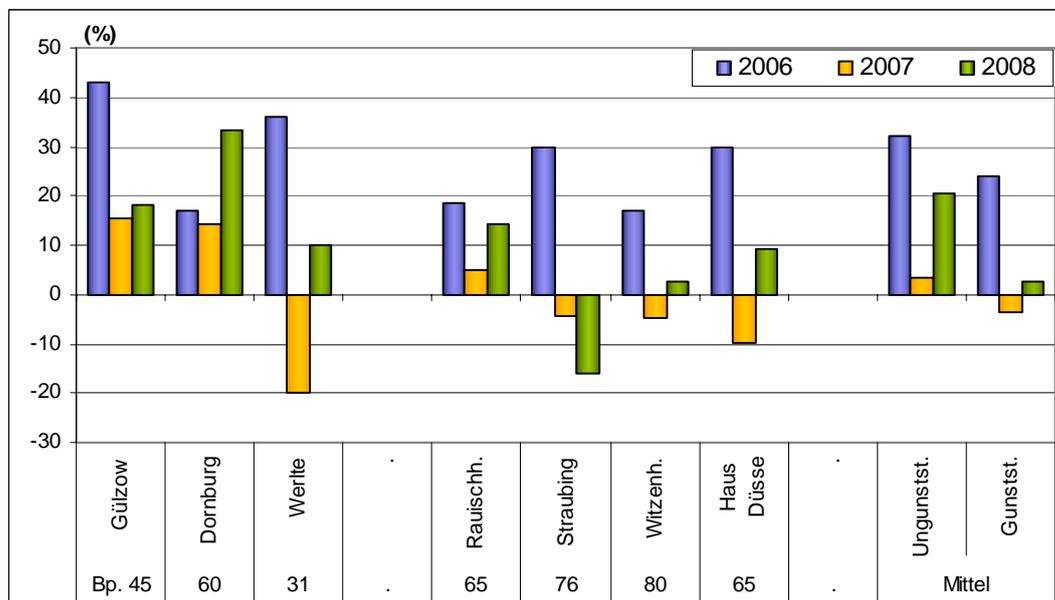


Abb. 45: Relativer Mehrertrag von Roggen und Mais in Zweikultur-Nutzung gegenüber Mais in Hauptfrucht-Nutzung mit Zwischenfrucht an den sieben Standorten (Bp. = Bodenpunkte) in den Jahren 2006-2008 sowie im Mittel für die Gruppe der „Ungunstst.“ und „Gunststandorte“

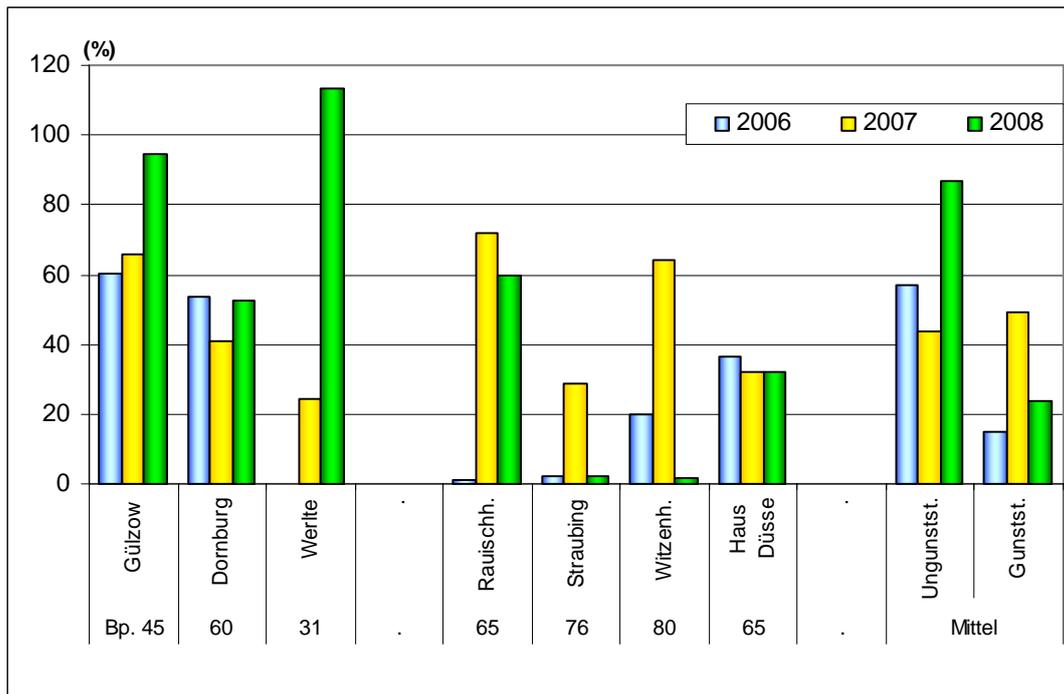


Abb. 46: Relativer Mehrertrag von Roggen und Sonnenblumen in Zweikultur-Nutzung gegenüber Sonnenblumen in Hauptfurcht-Nutzung mit Zwischenfrucht an den sieben Standorten (Bp. = Bodenpunkte) in den Jahren 2006-2008 sowie im Mittel für die Gruppe der „Ungunst-, und „Gunststandorte“

„Ungunststandorte“ und „Gunststandorte“ unterteilt. Als „Ungunststandorte“ werden im ersten Ansatz die Standorte Dornburg, Gülzow und Werlte angesehen, als „Gunststandorte“ die Standorte Haus Düsse, Rauschholzhausen, Straubing und Witzenhäuser. Entsprechend dieser Gruppierung werden in Abb. 45 und Abb. 46 die relativen Mehrerträge dargestellt, die an den einzelnen Standorten mit der Zweikultur-Nutzung mit Mais (Abb. 45) bzw. mit Sonnenblumen (Abb. 46) im Vergleich zur Hauptfrucht-Nutzung von Mais und Sonnenblumen erzielt werden konnten. Hieraus wird deutlich, dass an den „Ungunststandorten“ höhere relative Ertragssteigerungen möglich waren als an den „Gunststandorten“. Die Ertragssteigerung war in 2006 und 2008 in der Regel größer als im Jahr 2007. Gleichzeitig wird hieraus noch einmal verdeutlicht, dass der Gewinn an Biomasse durch die Zweikultur-Nutzung bei den Sonnenblumen größer ist als beim Mais. Mit in die Erklärung hierfür kann der in (Abb. 22) aufgezeigte Sachverhalt aufgenommen werden, dass bei Sonnenblumen keine Beziehung zwischen dem Zeitpunkt des Auflaufens und dem Jahresertrag besteht. Je später der Aufgang ist, sei es bedingt durch verspätete Saat oder durch verzögertes Auflaufen durch Wassermangel zur Saat, umso geringer wird die Differenz im Jahresertrag zwischen Sonnenblumen und Mais, da der Jahresertrag mit der gewählten Mais-Sorte mit zunehmender Verspätung des Aufgangs abnimmt. Deutlich ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die vorliegenden Erkenntnisse aus dem Vergleich mit nur einer Mais- und einer Sonnenblumen-Sorte gezogen werden können. Es ist essentiell, dass im zweiten Schritt mittels Sortenprüfungen aus dem gegenwärtigen Spektrum die Sorten herausgefiltert werden, die in der Zweikultur-Nutzung allgemein und bei späterer Saat bzw. spätem Aufgang zur weiteren Ertragssteigerung beitragen. Diese Aussage wird auch vor dem Hintergrund getroffen, dass in Ergänzung zu dem in den Vorbemerkungen dargelegten Aspekt



Humusversorgung, mit zunehmenden Felderträgen auch ein höherer Bruttoertrag realisiert werden kann, bzw. bei gleichbleibendem Verbrauch an Nahrungs- und Futtermitteln mehr Biomasse zur energetischen Nutzung verfügbar ist.

4.3 Ökonomie

Wenn auch mit der Zweikultur-Nutzung deutliche Ertragssteigerungen erzielt werden können, reichen diese nicht aus, um den nicht lohnenden Anbau der Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung zu einer annähernd ökonomisch ebenbürtigen Kultur werden zu lassen wie Mais und Roggen in Hauptfruchtstellung und Mais als Zweitkultur nach Roggen bzw. Roggen/Erbsen-Gemenge (Abb. 34). Haupthindernis ist die noch zu geringe Ertragssteigerung und der noch zu geringe TS-Gehalt zur Ernte der Sonnenblume als Zweitkultur. Hieraus ist abzuleiten, wie notwendig es ist, um die Vorzüge von mehr Artenvielfalt in den Fruchtfolgen zu haben, dass Verbesserungen im Ertrag und TS-Gehalt erzielt werden. Gleichzeitig ist in weiterführenden Analysen auch der Aspekt des Faktors Humus aufzunehmen, der die Wettbewerbsfähigkeit von Sonnenblumen steigert. Darüber hinaus ist beim Vergleich Hauptfrucht-Nutzung versus Zweikultur-Nutzung mit zu bewerten, dass durch mehrmalige Ernte, durch andere Erntetermine Arbeitsspitzen gebrochen und Maschinen gleichmäßiger ausgelastet werden können. Auch führt eine Steigerung der Flächenerträge zu geringeren Transportentfernungen zur Ver- und Entsorgung einer Energieanlage ebenso wie eine zweimalige Ernte die Lagerkosten durch die Zweifachnutzung von Teilen der Siloanlage reduziert (HEINZ et al., 1999).

4.4 Ökologie

Die Vorzüge einer Zweikultur-Nutzung sind durch die ganzjährige Bodenbedeckung und Nährstoffaufnahme bis in den Herbst hinein im Vergleich zu einer Hauptfrucht-Nutzung eindeutig gegeben, wenn aus ökonomischer Sicht auf den Zwischenfruchtanbau verzichtet wird. Bei dem Anbau von Zwischenfrüchten wird diese Vorzüglichkeit gemindert, jedoch wird auch der Deckungsbeitrag reduziert, da selbst bei erntewürdigen Beständen auch hier die niedrigen TS-Gehalte der Zwischenfrucht die spezifischen Erntekosten deutlich erhöhen. Somit sind die hier nicht ökonomisch bewerteten Umweltleistungen bei der Wahl des Anbausystems in die Entscheidung einzubeziehen. Denn die Umweltleistung Nährstoffaufnahme bis in den Herbst hinein kann bei der Düngung mit Gärresten eine größere Bedeutung erlangen als bei der ausschließlich mineralischen Düngung, wie es in diesem Versuch praktiziert und bewertet wurde.

In den Hintergrund tritt beim Vergleich der Systeme der Aspekt des weitgehenden Verzichts auf Pflanzenschutzmittel, da dies auch im Hauptfruchtanbau realisiert wurde und bei einer energetischen Verwertung mit Konservierung durch Silierung möglich ist. Von dieser strikten Vorgabe muss sogar in manchen Fällen abgewichen werden, da der Einsatz eines Wachstumsregulators beim Roggen öfters notwendig gewesen wäre. Gleichzeitig ist bei hohem Unkrautdruck und langsamer Jugendentwicklung eine mechanische Unkrautbekämpfung bei Sorghum und Amarant nicht ausreichend.



5 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel eines dreijährigen Versuches an sieben Standorten war es, das Anbausystem der Zweikultur-Nutzung unter verschiedenen Umwelten im Bundesgebiet zu prüfen, um Möglichkeiten und Vorzüge, aber auch die Grenzen dieses System zu erkennen. Vergleichsmaßstab ist der Hauptfrucht-Nutzung nach oder gefolgt von Zwischenfrüchten, um auch hier mit ihnen eine möglichst ganzjährige Bodenbedeckung und möglichst hohe Substanzproduktion für die Biogasbereitung realisieren zu können. Aus dieser, auf drei Jahre angelegten Prüfung mit einer breiten Palette von Kulturen können aus der Versuchstätigkeit einschließlich der ökologischen und ökonomischen Begleitforschung folgende Ergebnisse mitgeteilt und Empfehlungen abgeleitet werden:

- Mit der Zweikultur-Nutzung konnten in der Regel höhere, teilweise deutlich höhere Jahreserträge an Biomasse im Vergleich zur Hauptfrucht-Nutzung mit diesen Kulturen einschließlich Zwischenfrüchte gewonnen werden. Die Ertragssteigerung beim Anbau von Sonnenblumen als Zweikultur war größer als beim Anbau von Mais als Zweikultur. Im Mittel der Jahre konnten mit einer Sorghum-Hybride und einer Sudangras-Hybride als Zweikulturen vergleichbare Erträge realisiert werden wie mit Sonnenblumen als Zweikultur. Nachteil ist, dass das Erntegut aller Zweikulturen einen TS-Gehalt deutlich unter 30% hatte, was nicht nur die Silierfähigkeit vermindert sondern auch zu hohen Kosten führt, die den Deckungsbeitrag schmälern.
- In der Hauptfrucht-Nutzung hatte Mais die höchste Ertragsleistung vor Winterroggen, der zur späten Milchreife geerntet wurde. Dieser hatte im Mittel der Standorte und Jahre eine höhere, an einzelnen Standorten eine deutlich höhere Ertragsleistung als Sonnenblumen, die auch als Hauptfrucht meist einen noch zu geringen TS-Gehalt zur Ernte hatte. Diese niedrigen Erträge und niedrigen TS-Gehalte waren Ursache von negativen Deckungsbeiträgen bei Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung. Hingegen waren beim Mais in Hauptfruchtstellung die höchsten Deckungsbeiträge zu verzeichnen, und etwas geringere Deckungsbeiträge waren beim Winterroggen gegeben. Aufgrund der zweimaligen Ernte und den niedrigen TS-Gehalte der Zweikulturen zur Ernte hatte nur der Winterroggen bzw. das Winterroggen/Wintererbsen-Gemenge ein deutlich positiver Deckungsbeitrag, der aber niedriger war als von Winterroggen und Mais in Hauptfruchtstellung. Hieraus wurde abgeleitet, dass neben weiteren Ertragssteigerungen die TS-Gehalte der als Zweikulturen genutzten Sorten vornehmlich durch Züchtung zu verbessern sind, um auch ökonomisch einen Gewinn mit der Zweikultur-Nutzung zu erzielen.
- Die in der Zweikultur-Nutzung geprüften Gemenge von Winterroggen mit Wintererbsen und Winterroggen mit Wintergerste als Erstkulturen hatten vergleichbare Erträge wie Winterroggen im Reinanbau und hatten teilweise eine geringere Lagerneigung, die durch den weitgehenden Verzicht auf Pflanzenschutzmittel einschließlich Wachstumsregulatoren gegeben war. Die Gemenge von Mais und Sonnenblumen bzw. Mais, Sonnenblumen und Amarant als Zweikulturen haben fast die Ertragsleistung von dem Mittelwert der Erträge im Reinanbau dieser



Kulturen erreicht und können wie die Gemenge der Erstkulturen aus der Sicht der Artenvielfalt für den Anbau empfohlen werden.

- Die Einschätzung, die Zweikultur-Nutzung ist nur an den Standorten möglich und führt nur dann zu signifikanten Ertragssteigerungen, wenn ausreichend Wasser insbesondere während der Sommermonate verfügbar ist, konnte in diesen Versuchen nicht bestätigt werden. Sie führte gerade auf diesen Standorten zu größeren relativen Ertragssteigerungen als auf denen, die als Gunststandorte anzusprechen sind. Dennoch findet die Zweikultur-Nutzung auf sehr leichten Böden mit einer geringen Speicherfähigkeit für Wasser ihre Grenzen und ist auf ihnen nur noch unter Beregnung möglich, wenn zumindest Keimung und Jugendentwicklung gesichert werden kann. Der Vergleich der Erträge von Mais und Sonnenblumen mit Kenngrößen des Bodens und der Witterung zeigte, dass neben der Wasserversorgung die Summe der Lufttemperaturen über 6°C von der Saat bis zur Ernte einen bedeutenden Einfluss auf das Wachstum hatte und hiermit in Einzelanalysen über 50% der Ertragsunterschiede von Ort zu Ort und Jahr zu Jahr erklärt werden können.

In Verbindung mit den Einschätzungen der Versuchsansteller sind aus den Ergebnissen, die an den Versuchstandorten Dornburg, Gülzow, Haus Düsse, Rauschholzhausen, Straubing, Werlte und Witzhausen gewonnen wurden, folgende Erkenntnisse mitzuteilen und Empfehlungen aus einer dreijährigen Versuchstätigkeit abzuleiten:

Standort Dornburg nahe Jena, Thüringen: An diesem Standort (Parabraunerde, 65 Bodenpunkte; 193 mm nFKWe; 564 mm Jahresniederschlag und $\bar{\theta}$ 9,2°C) hat neben Mais auch der Winterroggen in Hauptfruchtstellung ein hohes Ertragspotenzial. Mit der Zweikultur-Nutzung von Roggen gefolgt von Mais konnte ein um rund 3 t TM/ha höherer Ertrag erzielt werden als mit Mais nach Senf. Als Zweitkulturen sind aus diesem Vergleich neben Mais auch Sonnenblumen und die Sudangras-Hybride für den Anbau an diesem Standort zu empfehlen. In Verbindung mit anderen Versuchen wird für Thüringen aber zunächst eine Präferenz für den Anbau von Mais und Sudangras-Hybride, sowohl in Hauptfruchtstellung als auch in Zweitfruchtstellung ausgesprochen, ebenso wie die Bevorzugung von Wintergetreide gegenüber Sommergetreide bei der Bereitstellung von Ganzpflanzengetreide.

Standort Gülzow nahe Güstrow, Mecklenburg-Vorpommern: Auf diesem Kolluvium-Pseudogley (45 Bodenpunkte, 159 mm nFKWe, 580 mm Jahresniederschlag und $\bar{\theta}$ 9,2°C) war die Zweikultur-Nutzung von Winterroggen sowie Winterroggen/Wintererbsen-Gemenge gefolgt von Mais am ertragreichsten und dem Mais in Hauptfruchtstellung nach Senf um 5 t TM/ha sowie Winterroggen gefolgt von Senf um fast 7 t TM/ha überlegen. In Verbindung mit der ökonomischen Analyse kann für diesen Standort der Anbau von Mais und Winterroggen in Hauptfruchtstellung sowie Mais und die Sudangras-Hybride nach Winterroggen/Wintererbsen- bzw. /Wintergersten-Gemenge empfohlen werden. Ebenso könnte mit Hanf als Zweitkultur die Palette der kultivierten Arten erweitert werden.

Standort Haus Düsse nahe Bad Sassendorf, Nordrhein-Westfalen: In Haus Düsse (Haftpseudogley-Braunerde, 72 Bodenpunkte; 190 mm nFKWe, 872 mm Jahresniederschlag und $\bar{\theta}$ 9,2°C) konnten mit der Zweikultur-Nutzung von Roggen sowie Roggen/Erbsen-Gemenge gefolgt von Mais nur ein geringfügig höherer Jahresertrag erzielt werden als mit Mais in Hauptfruchtstellung nach



Senf. Daher wird an diesem Standort der Mais die bevorzugte Kultur bleiben. Da auch mit der Sorghum-Hybride und der Sudangras-Hybride hohe Erträge erzielt werden konnten, wird zur Fruchtfolgeerweiterung und Stabilisierung der Erträge z.B. in Trockenjahren auch der Anbau dieser Kulturen verbunden mit weiteren Anbau- und Sortenversuchen empfohlen.

Standort Raischholzhausen nahe Gießen, Hessen: An diesem Standort (Parabraunerde Haftpseudogley, 65 Bodenpunkte, 226 mm nFKWe, 660 mm Jahresniederschlag und $\bar{\theta}$ 9,6°C) konnte mit der Zweikultur-Nutzung mit Mais nach Winterrüben, Winterroggen bzw. Winterroggen/Wintererbsen-Gemenge rund 3 t TM/ha mehr geerntet werden als mit Mais bzw. 8 t TM/ha mehr als mit Winterroggen in Hauptfruchtstellung. Demgegenüber kann mit Winterroggen der höchste Deckungsbeitrag erzielt werden, gefolgt von Mais und danach gefolgt von der Zweikultur-Nutzung, da hier die hohen Erntekosten das ökonomische Ergebnis verschlechtern. Dennoch sollten neben Mais sowie Roggen in Hauptfruchtstellung als früh räumende Frucht zur Realisierung artenreicherer Fruchtfolgen die Zweikultur-Nutzung praktiziert und Sonnenblumen und Sorghum- sowie Sudangras-Hybride in ihr angebaut werden, da hiermit weitere ökologische Leistungen realisiert werden können.

Standort Straubing, Bayern: In Straubing (Parabraunerde, 76 Bodenpunkte; 157 mm nFKWe, 682 mm Jahresniederschlag und $\bar{\theta}$ 8,7°C) war Mais in Hauptfruchtstellung die Variante mit dem höchsten Jahresertrag, auch aus ökonomischer Sicht, gefolgt von der Zweikultur-Nutzung mit Mais und Roggen in Hauptfruchtstellung. In die Fruchtfolge integriert werden könnte an diesem Standort auch der Anbau der Sudangras-Hybride. Dennoch besteht noch Optimierungsbedarf durch Züchtung, da hier wie an den anderen Standorten die Zweitkulturen zur Ernte zu geringe TS-Gehalte hatten.

Standort Werlte nahe Oldenburg, Niedersachsen: In Werlte (Parabraunerde Pseudogley, 31 Bodenpunkte; 134 mm nFKWe, 794 mm Jahresniederschlag und $\bar{\theta}$ 9,9°C) war die Zweikultur-Nutzung mit Mais nur geringfügig dem Mais in Hauptfruchtstellung überlegen, hier wie auch an den anderen Standorten konnte mit der Zweikultur-Nutzung mit Sonnenblumen der Jahresertrag von Sonnenblumen in Hauptfruchtstellung deutlich übertroffen werden. An diesem Standort behält die Hauptfrucht-Nutzung von Mais auch aus ökonomischer Sicht ihren festen Anteil an der Fruchtfolge, ergänzt durch Roggen-GPS gefolgt von Gras sowie Mais als Zweitkultur nach Roggen bzw. Gemengen mit Roggen.

Standort Witzenhausen nahe Kassel, Hessen: Auch an diesem Standort (Haftnässe Parabraunerde-Braunerde, 80 Bodenpunkte; 200 mm nFKWe, 629 mm Jahresniederschlag und $\bar{\theta}$ 8,2°C) konnte in der Zweikultur-Nutzung mit Mais Ertragssteigerungen bzw. mit Sonnenblumen deutliche Ertragssteigerungen im Vergleich zu diesen Kulturen in Hauptfruchtstellung erzielt werden. Aus ökonomischer Sicht ist auf der Basis des gewählten Kalkulationsansatzes wiederum Mais in Hauptfruchtstellung am wirtschaftlichsten, gefolgt von Winterroggen-GPS und der Zweikultur-Nutzung mit Mais, Sorghum- und Sudangras-Hybride.

Mit der Versuchstätigkeit konnten wertvolle pflanzenbauliche Erkenntnisse zu den Anbausystemen gewonnen werden, mit den Wirkungen erklärbarer werden und Anbauempfehlungen ausgesprochen werden können. Um dieses Wissen zu festigen und Empfehlungen auch aus ökonomischer Sicht zu präzisieren ist es erforderlich, die Versuchstätigkeit fortzusetzen und im Detail zu erweitern.



6 LITERATUR

- Baserga, U. (1998): Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. FAT-Bericht 512
- Bassler, R. (1988): Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Methodenbuch Band III. VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- Beratung (2009): Internetportale der Länder Bayern, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Thüringen zur aktuellen Düngeberatung im Rahmen der Düngeverordnung
- BMELV (2007): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2007. Landwirtschaftsverlag Münster Hilstrup
- Boie, W. (1957): Vom Brennstoff zum Rauchgas. Teubner Verlag Leipzig
- Bühle, L., R. Stülpnagel, K. Scheffer, W. Zerr und M. Wachendorf (2007): Methanbildungspotenzial und Gärdynamik von Presssäften mechanisch entwässerter Silagen. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau Band 8, 188-191
- Deigelmayer, K. (2009): persönliche Mitteilung am 29.6.2009 zu den Ergebnissen aus Versuchen mit Hirsen. Technologie und Förderzentrum, TFZ, Straubing
- Deumlich, D. (2009): Durchführung der bodenkundlichen Untersuchungen. ZALF, Müncheberg
- Deumlich, D., Glemnitz, M., Hufnagel, J., Wenkel, K.O., Willms, M., (2008). Ökologie. Im FNR-Verbundprojekt »Energiepflanzenanbau«. www.tll.de/vbp/vbp_idx.htm
- DLG (1997): DLG-Futterwerttabellen für Wiederkäuer. Universität Hohenheim Dokumentationsstelle [Hrsg.], 7. Aufl., DLG-Verlag, Frankfurt.
- GfE (1995): Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffvers. von Mastrindern. DLG-Verlag Frankfurt
- FNR (2006): Handreichung Biogasgewinnung und Biogasnutzung. Hrsg. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). 3. überarbeitete Auflage
- FNR (2009): Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Projektliste. www.nachwachsenderohstoffe.de/projekte-foerderung/projekte/archiv/bioenergie.html ; Projekte Nr. 22005007; 22012904; 22013508; 2202820.
- Fricke, T., K. Bedenk, J. Reulein, R. Stülpnagel und M. Wachendorf (2007a): Untersuchungen zur Optimierung der energetischen Nutzung von verschiedenen feucht konservierten Pflanzenarten durch Maischen und anschließende mechanische Entwässerung. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau Band 8, 180-183
- Fricke, T., W. Beyrich, M. Emanuel, R. Neff, J. Reulein, R. Stülpnagel und M. Wachendorf (2007b): Charakterisierung der Mineralstoff- und Organik-Flüsse bei der mechanischen Abpressung extensiver Grünlandaufwüchse. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau Band 8, 184-187
- Grass, R. (2003): Direkt- und Spätsaat von Silomais – Ein neues Anbausystem zur Reduzierung von Umweltgefährdungen und Anbauproblemen bei Optimierung der Erträge. Dissertation, Universität Kassel, FB 11, Witzenhausen. Cuvillier Verlag Göttingen
- Grass, R., Reulein, J., Scheffer, K. Stülpnagel, R., und Wachendorf, M. (2009): Die integrierte Biogas- und Festbrennstoffherzeugung aus Ganzpflanzensilagen. Berichte über Landwirtschaft, 87, 43 - 64
- Grebe, S., Stülpnagel, R. und Wachendorf, M. (2007): Teil- und Ganzpflanzeerträge unterschiedlicher Triticale- u Weizensorten für die Herstellung von Biogas u. Ethanol bzw. zur thermisch/stofflichen Verwertung („SUNFUEL“). Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 19 (58-59)
- Grebe, S., Stülpnagel, R. und Wachendorf, M. (2008): Vergleich von Triticale-Sorten und einzelnen Weizen-Sorten hinsichtlich Teil- und Ganzpflanzeerträgen für die Herstellung von Biogas und Ethanol bzw. zur thermischen/stofflichen Verwertung („SUNFUEL“). Kapitel 0921. Abschlussbericht an das Hessische Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz. 119 Seiten, übermittelt im Januar 2008
- Heinz, A., R. Stülpnagel, M. Kaltschmitt, K. Scheffer und D. Jezierska (1999): Feucht- und Trockengutlinien zur Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen. Vergleich anhand von Energie- und Emissionsbilanz. IER, Stuttgart, Band 63



- Heuser, R. Stülpnagel, C. von. Buttlar, M. Wachendorf (2007): A multi-site experiment to evaluate the double-cropping-system on seven sites in Germany – first results. 15th European Biomass Conference & Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Berlin, 7. – 11. May 2007, Proceedings page 536-539; pdf.
- Kenward, M.G. & Roger, J.H., 1997: Small sample inference for fixed effects from restricted maximum likelihood. *Biometrics* 53: 983-997.
- KTBL (2008a): Datensammlung Betriebsplanung. <http://ktbl.de/dslkr/>
- KTBL (2008b): Feldarbeitsrechner Maschinenkosten und Arbeitszeitbedarf. <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html>
- Piepho, H.-P., 1999: Stability analysis using the SAS system. *Agron. J.* 91: 154-160.
- Piepho, H.-P., Büchse, A., Emrich, K. (2003): A hitchhiker's guide to the mixed model analysis of randomized experiments. *Journal of Agronomy and Crop Science* 189: 310-322.
- Piepho, H.-P., 2004: An algorithm for a letter-based representation of all-pairwise comparisons. *J. Comput. Graph. Stat.* 13: 456-466.
- Piepho, H.P. (2009): Universität Hohenheim. Institut für Pflanzenbau und Grünland. Beratung im Rahmen der statistischen Auswertung der Versuche.
- Schiemann, R. (1971): Energetische Futterbewertung und Energienormen. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin
- Stülpnagel, R., Behringer, T., Klose, W., Reufer, F. und Stuke, V. (1992): Investigations for a cheap estimation of the net calorific values (n.c.v.) of different biomasses. 7th European Conference on Biomass for Energy and Environment, Agriculture and Industry, 5.-9.10.1992, Florence, Italy.
- Stülpnagel, R. (2004): Zur Potenzialermittlung von Biomassen für die Herstellung von Kraftstoffen. DGMK-Fachbereichstagung „Energetische Nutzung von Biomassen“ DGMK Tagungsb. 2004–1; 341 - 350
- Stülpnagel, R. (2004a): Estimating the potential of biomass for energy and industry with particular respect to political directives to an orderly agriculture and C-sequestration in soils. 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Rome, 10. – 14.5. 2004, Proceedings Volume I. p. 467 – 470
- Stülpnagel, R. (2004b): Kompetenznetzwerk Regenerative Kraftstoffe (ReFuelNet). Studie im Auftrag des BMB+F. Teil III. Systemanalytische Begleitforschung. Arbeitspaket 2. Potenziale und Bereitstellung der Biomasse. Endbericht: www.refuelnet.de/content/refuelnet/pdf/RFN_SB05.pdf, Seite 43 und 143-166.
- Stülpnagel, R. and M. Körschens (2004): Calculation of the need of biomass for the reproduction of the soil organic matter (SOM) as a precondition for the estimation of the potential of biomass for energy and industry. 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Rome, 10. – 14.5.04, Proceedings Volume I. p. 531 – 534
- Stülpnagel, R., HJ. Abel, S. Grebe (2005): The Potential of Biomass for Energy in Germany – Remarks to possible reserves and to the interactions with the agriculture at present. 14th Europ. Biomass Conf. & Exhib. on Biom. Energy, Industry and Climate Protect. Paris, 17–21.10.05, Proc. in pr. (2005)
- Stülpnagel, R. und v. Buttlar, C. (2006): Das Zweikultur-Nutzungssystem. In *Energiepflanzen. KTBL-Datensammlung mit Internetangebot*. Herausgeber: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt und Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), Bornim; 343 – 354
- Stülpnagel, R., v. Buttlar, C., Heuser, F., Wagner, D. und Wachendorf, M. (2007): Standortvergleiche zum Zweikultur-Nutzungssystem. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 31, 78 - 96
- Stülpnagel, R., W. Wiest, W. Klose und M. Wachendorf (2008a): Fortschritte im Bereich der energetischen Wandlung von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen durch erweiterte Analytik des Erntegutes. In DGMK-Fachtagung "Energetische Nutzung von Biomassen – Velen VIII" - 14.-16.04.2008 in Velen/Westfalen, Tagungsband Seite 199 – 206
- Stülpnagel, R., C. von. Buttlar, F. Heuser and M. Wachendorf (2008b): Evaluation of the Double-Cropping-System on Seven Sites in Germany – Results from two years: 16th European Biomass



- Conference & Exhibition. From Research to Industry and Markets. Valencia, 02. – 06. June 2008, Proceedings; page 79-83; pdf.
- Stülpnagel, R., C. v. Buttlar und F. Heuser (2008c): Systemversuch zum Zweikultur-Nutzungssystem auf sechs. Zwischenbericht 2007 für die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR). 101 Seiten
- Stülpnagel, R., C. von Buttlar, F.Heuser & M. Wachendorf (2008d): Chancen der Fruchtfolgeerweiterung im Energiepflanzenbau durch das Zweikultur-Nutzungssystem. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. Band 20; 174-177
- TLL (2009): Verbundprojekt „Energiepflanzenanbau zur Biogasgewinnung. www.tll.de/vbp/vbp_idx.htm
- Toews, T., R. Stülpnagel und C. v. Buttlar (2008): Mit dem Zweifrukt-System den Gewinn erhöhen. Top agrar, 6. 2008, 58 – 60
- VDI-Richtlinie 4630 (2004): Vergärung organischer Stoffe. VDI-Handbuch Energietechnik
- VDLUFA (2004): Standpunkt „Humusbilanzierung – Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland“. Verb. Deutscher Landw. Untersuchungs- und Forschungsanstalten
- Voigtländer, G. und H. Jacobs (1987): Grünlandwirtschaft und Futterbau. Verlag Eugen Ulmer
- Wachendorf, M., T. Fricke, R. Graß und R. Stülpnagel (2007): Ein neues Konzept für die bioenergetische Nutzung von Grünlandbiomasse. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau Band 8, 165-168
- Weiland, P. (2003): Biologie der Biogaserzeugung, http://www.biogas-infoboard.de/pdf/Biologie_der_Biogaserzeugung.pdf
- ZALF (2009): Ökologie in „Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen“. www.tll.de/vbp/vbp_idx.htm