



**Prüfung des Zweikultur-Nutzungssystems
für die Bereitstellung von Energiepflanzen
auf sieben Standorten in Deutschland**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Universität Kassel
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften

Prüfung des Zweikultur-Nutzungssystems
für die Bereitstellung von Energiepflanzen auf sieben
Standorten in Deutschland

Dissertation zur Erlangung des akademischen Titels
Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

vorgelegt von Florian Heuser

Gutachter: Prof. Dr. K. Hammer
Prof. Dr. M. Wachendorf

Datum der Disputation: 12.07.2010

Witzenhausen, 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2010

Zugl.: Kassel U niv., Diss., 2010

978-3-86955-503-4

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-503-4

für Ute

Abkürzungen

a	Jahr
Abb.	Abbildung
BBCH	Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie (Entwicklungsstand von Kulturpflanzen)
C	Kohlenstoff
Cl	Chlor
C _{org}	organischer Kohlenstoff
C _t	Gesamt-Kohlenstoff
d	Tag
t	Tonne
FK	Feldkapazität
FM	Frischmasse
g	Gramm
GE	Bruttoenergie (Gross energy)
GJ	Gigajoule
h	Stunde
ha	Hektar
HF	Hauptfrucht
HFN	Hauptfrucht-Nutzung
K	Kalium
M	Mais
Mg	Magnesium
MJ	Megajoule
N	Stickstoff
n.e.	nicht erhoben
NfE	N-freie-Extraktstoffe (Weender Analyse)
nFK	Nutzbare Feldkapazität
nFKWe	Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum
N _{crit}	kritischer N-Gehalt
N _{min}	mineralischer Bodenstickstoff (NO ₃ -N + NH ₄ -N)
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
NNI	N-Ernährungsindex (N nutrition index)
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff
N _t	Gesamt-Stickstoff
oTS	organische Trockensubstanz
P	Phosphor
r ²	Bestimmtheitsmaß
r _{adj} ²	adjustiertes Bestimmtheitsmaß
S	Schwefel

SD	Standardabweichung (standard deviation)
St	Standort
Tab.	Tabelle
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
WDH	Wiederholung
We	effektiver Wurzelraum
WE	Winter-Erbse
WG	Winter-Gerste
WR	Winter-Roggen
WRü	Winter-Rüben
ZKN	Zweikultur-Nutzung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Hintergrund und Problemstellung	1
1.2	Ziele der Versuchsdurchführung.....	9
2	Material & Methoden.....	13
2.1	Charakterisierung der Versuchsstandorte	13
2.1.1	Lage der Versuchsstandorte	13
2.1.2	Bodenkennwerte.....	15
2.1.3	Witterungsdaten	17
2.1.4	Praxisübliche Erträge und Fruchtfolgen	20
2.2	Versuchsaufbau	23
2.3	Bewirtschaftungsmaßnahmen.....	27
2.3.1	Bodenbearbeitung und Saat.....	27
2.3.2	Nährstoffversorgung.....	29
2.3.3	Pflanzenschutz	33
2.4	Bodenuntersuchungen.....	33
2.5	Pflanzenuntersuchungen.....	35
2.5.1	Bonituren	35
2.5.2	Ernte und Ertragsbestimmung.....	35
2.5.3	Bewertung der Gemenge.....	36
2.5.4	Nährstoffgehalte	37
2.5.5	Bioenergetische Parameter	39
2.5.6	N-Bilanzrechnungen	40
2.6	Statistische Auswertung.....	41
3	Ergebnisse	45
3.1	Witterungsverlauf.....	45
3.1.1	Vergleich zu mehrjährigen Witterungsdaten	45
3.1.2	Pflanzenverfügbares Wasser zur Saat.....	52
3.1.3	Temperatur- und Niederschlagssummen	54
3.2	Anbaudaten	59

3.3	Biomasseerträge.....	61
3.3.1	Übersicht über alle Varianten	61
3.3.2	Anteile der winter- und sommerannuellen Kulturen in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung	70
3.3.3	Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung.....	72
3.3.4	Sorghum, Sudangras, Amaranth und Hanf in der Zweikultur-Nutzung	87
3.3.5	TS-Gehalte	89
3.3.6	Gemengeanbau in der Zweikultur-Nutzung.....	91
3.3.7	Ertragsschwankungen in der Zweikultur-Nutzung.....	96
3.4	Energieertrag.....	97
3.4.1	Biogas.....	101
3.5	Stickstoff in Boden und Pflanze	103
3.5.1	Mineralischer Bodenstickstoff	103
3.5.2	N-Gehalt in der Pflanze	114
3.5.3	N-Bilanzen.....	121
3.6	P- und K-Entzüge.....	128
4	Diskussion.....	131
4.1	Das Ertragspotenzial der Zweikultur-Nutzung.....	131
4.1.1	Erträge von Mais und Sonnenblumen in Abhängigkeit von Anbausystem und Standorteigenschaften	131
4.1.2	Die Bedeutung der winterannuellen Kulturen für die Zweikultur-Nutzung	147
4.1.3	Mischkulturen in der Zweikultur-Nutzung	150
4.1.4	Das Potenzial alternativer Zweikulturen in der Zweikultur-Nutzung	154
4.1.5	Bioenergetische Parameter	162
4.2	Nährstoffversorgung in der Zweikultur-Nutzung	164
4.3	Die Zweikultur-Nutzung als Fruchtfolge	173
4.4	Effekte der reduzierten Bodenbearbeitung in der Zweikultur-Nutzung.....	175
4.5	Ökologische Effekte der Zweikultur-Nutzung.....	178
4.5.1	Verzicht auf Pflanzenschutzmittel	178

4.5.2	Möglichkeiten der Erhöhung der Artenvielfalt durch die Zweikultur-Nutzung	180
4.5.3	Reduzierte N-Austräge durch die Zweikultur-Nutzung	181
4.6	Aussichten für die Zweikultur-Nutzung in Deutschland	193
5	Zusammenfassung	197
6	Literatur	201
7	Anhang	225

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Struktur der Endenergiebereitstellung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2008. (Quelle: BMU, Juni 2009).....	4
Abb. 2:	Schematische Darstellung zum Anbau und zur Bereitstellung von Energiepflanzen im Hauptfruchtanbau mit Winterung (oben) bzw. Sommerung (unten) als Hauptfrucht. (Quelle: Stülpnagel et al. 2009, verändert).....	10
Abb. 3:	Schematische Darstellung zum Anbau und zur Bereitstellung von Energiepflanzen im Zweikultur-Nutzungssystem. (Quelle: Stülpnagel et al. 2009, verändert).....	11
Abb. 4:	Übersicht der hydrogeologischer Regionen sowie Lage und Zuordnung der Versuchsstandorte in Anbauregionen. (Quelle: Dt. Klimaatlas 2007, verändert).....	14
Abb. 5:	Mehrfährige Niederschlagssummen, mittlere Jahrestemperaturen und Bodenpunkte der sieben Versuchsstandorte; sortiert nach Bodenpunkten.....	19
Abb. 6:	Saat-, Vegetations- und Erntezeiten des Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystems. ZwF=Zwischenfrucht (Senf).....	24
Abb. 7:	Übersicht über die Versuchsanlage einer der beiden Wiederholungen (Blöcke) mit Großteilstücken (GS) und der vollständigen Variantenliste.....	25
Abb. 8:	Prinzipzeichnung zum Einfluss der Konzentration an Nähr-elementen in der Pflanze auf die Substanzproduktion als Basis für eine Düngestrategie für Energiepflanzen. (Quelle: Marschner 1995, verändert).....	31
Abb. 9:	Monatliche Niederschlagssummen sowie mittlere monatliche Lufttemperaturen an den Versuchsstandorten Dornburg, Gülzow, Haus Düsse und Rauischholzhausen im Vergleich zu den mehrjährigen Mittelwerten.....	50
Abb. 10:	Monatliche Niederschlagssummen sowie mittlere monatliche Luft-temperaturen an den Versuchsstandorten Straubing, Werlte und Witzenhausen im Vergleich zu den mehrjährigen Mittelwerten.....	51

Abb. 11:	Pflanzenverfügbares Wasser (pvW) zur Saat der Sommerungen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in Prozent der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in der Bodenschicht 0-30 cm im Mittel der Versuchsjahre.....	53
Abb. 12:	Pflanzenverfügbares Wasser (pvW) zur Saat der Sommerungen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in Prozent der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in der Bodenschicht 0-30 cm in den drei Versuchsjahren.	54
Abb. 13:	Temperatur- und Niederschlagssummen von der Aussaat bis zur Ernte von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) an allen Standorten in den drei Versuchsjahren. Die durchgezogene Linie markiert die von Mais und Sonnenblumen benötigte Temperatursumme von 1500°C d.	57
Abb. 14:	Mittelwerte der Erträge an den Versuchsstandorten Dornburg, Gülzow, Haus Düsse und Rauschholzhausen über alle drei Versuchsjahre mit Standardabweichungen der Jahreserträge. Links: Hauptfrucht-Nutzung, rechts: Zweikultur-Nutzung. ¹ Ganzpflanze	66
Abb. 15:	Mittelwerte der Erträge an den Versuchsstandorten Straubing, Werlte und Witzenhausen über alle drei Versuchsjahre mit Standardabweichungen der Jahreserträge. Links: Hauptfrucht-Nutzung, rechts: Zweikultur-Nutzung. ¹ Ganzpflanze, ² am Standort Straubing wurde in allen drei Jahren Quinoa statt Hanf angebaut.....	67
Abb. 16:	Erträge von Winterroggen als Ganzpflanzensilage (WR-Energie) und Mais mit der Zwischenfrucht Senf in der Hauptfrucht-Nutzung.....	70
Abb. 17:	Jahreserträge von Winterroggen und Mais in der Zweikultur-Nutzung sowie deren Ertragsanteile an den sieben Versuchsstandorten.....	71
Abb. 18:	Phänologische Entwicklung von Senf und Mais in der Hauptfrucht-Nutzung (oben) sowie Winterroggen und Mais in der Zweikultur-Nutzung (unten) anhand der BBCH-Skala im dritten Versuchsjahr.	73

Abb. 19:	Trockenmasseerträge von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) im Mittel der Standorte in den drei Versuchs-jahren. Die TM-Erträge pro Versuchsjahr mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$).	74
Abb. 20	Trockenmasseerträge von Mais und Sonnenblumen im Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) im Mittel der drei Versuchsjahre pro Standort. Die TM-Erträge pro Standort mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$).	75
Abb. 21:	Vegetationsdauer und Ernte-Reifegrade (BBCH) von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Versuchsjahre mit Standardabweichungen.....	76
Abb. 22:	Erträge und mittlere tägliche Zuwachsraten von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Standorte in den drei Versuchsjahren.....	77
Abb. 23:	Erträge und mittlere tägliche Zuwachsraten von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Versuchsjahre an den sieben Standorten.	78
Abb. 24:	Trockenmasseerträge von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Standorten in den drei Versuchsjahren.....	79
Abb. 25:	Vegetationstage und Ernte-Reifegrade (BBCH) von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Versuchsjahre mit Standardabweichungen.....	80
Abb. 26:	Erträge und mittlere tägliche Zuwachsraten von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Standorte in den drei Versuchsjahren.....	81
Abb. 27:	Erträge und mittlere tägliche Zuwachsraten von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Versuchsjahre an den sieben Standorten.....	82
Abb. 28:	Trockenmasseerträge von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Standorten in den drei Versuchsjahren.	83

Abb. 29:	Trockenmassejahreserträge von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Standorte in den drei Versuchsjahren. Die TM-Erträge pro Versuchsjahr mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$).	84
Abb. 30:	Vergleich der über die drei Versuchsjahre gemittelten Jahreserträge von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) im Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) nach Winterroggen. Die TM-Erträge pro Standort mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$).	85
Abb. 31:	Jahrestrockenmasseerträge von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Standorten in den drei Versuchsjahren.	85
Abb. 32:	Jahrestrockenmasseerträge von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Standorten in den drei Versuchsjahren.....	86
Abb. 33:	Trockenmasseerträge von Winterroggen (WR) und Sorghum sowie Winterroggen/Wintergerste (WR/WG) und Sudan-gras in der Zweikultur-Nutzung in den drei Versuchsjahren an den sieben Standorten.	88
Abb. 34:	Trockenmasseerträge von Winterroggen/Wintergerste (WR/WG) und Amarant sowie Hanf in der Zweikultur-Nutzung in allen drei Versuchsjahren pro Standort. *Quinoa statt Hanf.	89
Abb. 35:	Trockensubstanzgehalte aller Kulturen in den drei Versuchsjahren mit Standardabweichungen. Links: Hauptfrucht-Nutzungssystem, rechts: Zweikultur-Nutzungssystem. *Ganzpflanze	90
Abb. 36:	Trockenmasseerträge der Zweitkulturen Mais und Sonnenblumen in Reinsaat sowie als Gemenge in den drei Versuchsjahren. Daten aus Dornburg (2008), Gülzow (2007, 2008) und Werlte (2006, 2008) fehlen.	94
Abb. 37:	»Land Equivalent Ratios« und Konkurrenzbeziehungen von Mais und Sonnenblumen in den drei Versuchsjahren.	95
Abb. 38:	Brennwerte der Kulturpflanzen im Hauptfrucht- (links) und Zweikultur-Nutzungssystem (rechts) im Mittel der Standorte und Jahre mit Standardabweichungen.....	98
Abb. 39:	Energieerträge auf Basis der Brennwerte im Mittel der drei Versuchsjahre und Standorte mit Standardabweichungen.....	99

Abb. 40:	Energieerträge auf Basis des Brennwertes von Mais (M), Sonnenblumen (SB) und Winterroggen (WR) in den beiden Anbausystemen im Mittel der Standorte und Versuchsjahre mit Standardabweichungen.....	100
Abb. 41:	Methan- (CH ₄) ausbeute der organischen Trockenmasse (oTS) der Kulturpflanzen im Hauptfrucht- (links) und Zweikultur-Nutzungssystem (rechts) im Mittel der Standorte und Versuchsjahre mit Standardabweichungen.	101
Abb. 42:	Jahresmethanerträge im Mittel der drei Versuchsjahre und Standorte mit Standardabweichungen.....	102
Abb. 43:	Frühjahrs N _{min} -Werte (0-90 cm) an den Standorten in den drei Versuchsjahren im Mittel aller Varianten mit Standardabweichungen.....	103
Abb. 44:	Nachernte N _{min} -Werte (0-90 cm) an den Standorten in den drei Versuchsjahren im Mittel aller Varianten mit Standardabweichungen.....	104
Abb. 45:	Nachernte-N _{min} -Werte im Boden (0-90 cm) aller Varianten im Mittel der sieben Standorte in den drei Versuchsjahren. Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich pro Versuchsjahr nicht signifikant voneinander (α=0,05). Links: Hauptfrucht-Nutzung, rechts: Zweikultur-Nutzung.	106
Abb. 46:	N _{min} -Werte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte an den Standorten Dornburg, Gülzow, Haus Düsse und Rauschholzhausen in den drei Versuchsjahren. Links Hauptfrucht-Nutzung, rechts: Zweikultur-Nutzung. n.e.: nicht erhoben	108
Abb. 47:	N _{min} -Werte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte an den Standorten Straubing, Werlte und Witzenhausen in den drei Versuchsjahren. Links Hauptfrucht-Nutzung, rechts: Zweikultur-Nutzung. n.e.: nicht erhoben.....	109
Abb. 48:	N _{min} -Werte im Boden (0-90 cm) im Frühjahr vor Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht-Nutzung (HFN) und in den Erstkulturen der Zweikultur-Nutzung (ZKN) mit Standardabweichungen.....	110
Abb. 49:	N _{min} -Werte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) in der Hauptfrucht- (HFN) bzw. Zweikultur-Nutzung (ZKN). Werte mit gleichen Buchstaben an den jeweiligen Standorten unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (α=0,05).....	112

Abb. 50:	N_{\min} -Werte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in den drei Versuchsjahren an den sieben Standorten. n.e.: nicht ermittelt.....	113
Abb. 51:	N_{\min} -Gehalte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in den drei Versuchsjahren an den sieben Standorten. n.e.: nicht ermittelt.....	114
Abb. 52:	Mittlere Stickstoff-(N) gehalte der Hauptfrucht-Nutzung (links) und der Zweikultur-Nutzung (rechts) mit Standardabweichungen. *Ganzpflanze.....	115
Abb. 53:	N-Gehalte und TM-Erträge von Winterroggen (oben), Mais (Mitte) und Sonnenblumen (unten) in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) sowie der Bezug zum jeweiligen kritischen N-Gehalt (Linie) in den drei Versuchsjahren.....	116
Abb. 54:	N-Gehalte und TM-Erträge von Sorghum und Sudangras in der Zweikultur-Nutzung im Vergleich zum kritischen N-Gehalt (N_{crit}) in den drei Versuchsjahren.....	118
Abb. 55:	N-Ernährungs-Indices (NNI) und TM-Erträge von Winterroggen (oben), Mais (Mitte) und Sonnenblumen (unten) in der Hauptfrucht-(HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in den drei Versuchsjahren.....	119
Abb. 56:	N-Ernährungs-Indices (NNI) und TM-Erträge von Sorghum und Sudangras in der Zweikultur-Nutzung in den drei Versuchsjahren.....	120
Abb. 57:	N-Salden aller Varianten im Mittel der Standorte in der Hauptfrucht- (links) und Zweikultur-Nutzung (rechts) in den drei Versuchsjahren. *N-Entzug lediglich durch Körner.....	124
Abb. 58:	N-Entzüge von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht-Nutzung (HFN) sowie von Winterroggen (WR) und Mais bzw. Sonnenblumen in der Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Versuchsstandorten im Mittel der drei Versuchsjahre mit Standardabweichungen.....	125
Abb. 59:	N-Entzüge von Mais in der Hauptfrucht-Nutzung (HFN) sowie von Winterroggen (WR) und Mais in der Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den Versuchsstandorten in den drei Versuchsjahren.	126

Abb. 60:	N-Entzüge von Sonnenblumen in der Hauptfrucht-Nutzung (HFN) sowie von Winterroggen (WR) und Sonnenblumen in der Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den Versuchsstandorten in den drei Versuchsjahren.	127
Abb. 61:	N-Bilanzsalden von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) im Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) im Mittel der drei Versuchsjahre. *Bei der Zwischenfrucht Senf wurde lediglich die N-Düngung und kein N-Entzug berücksichtigt.	127
Abb. 62:	Schematische Darstellung der Biomasseproduktion und der potenziellen Auswaschungsgefahr in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN). (Quelle: Heggenstaller et al. 2008, verändert)	186

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Anbau von Energiepflanzen in Deutschland in ha. (Quelle: FNR 2010)	6
Tab. 2:	Übersicht zu Kenngrößen des Bodens an den sieben Versuchsstandorten.	15
Tab. 3:	Übersicht zu den Klimadaten (1998-2008) an den Versuchsstandorten auf der Basis mehrjähriger Wetterbeobachtungen. (Quelle: Angaben der Versuchsansteller 2008).....	18
Tab. 4:	Fruchtfolgen und Bodenbearbeitung an den Versuchsstandorten bzw. in ihrer unmittelbaren Umgebung. (Quelle: Angaben der Versuchsansteller 2008).....	21
Tab. 5:	Übersicht über die TM-Erträge und ihrer Spannweiten an den Versuchsstandorten bzw. in ihrer unmittelbaren Umgebung. (Quelle: Angaben der Versuchsansteller 2008).....	22
Tab. 6:	TM-Erträge in t TM ha ⁻¹ von Energie- bzw. Silomais der Landesortenversuche der beteiligten Bundesländer in den drei Versuchsjahren.....	23
Tab. 7.:	Übersicht über die Sorten, Stämme und Saatstärken bzw. Zielbestandesdichten der angebauten Kulturarten in keimfähigen Körner m ⁻² bzw. kg ha ⁻¹ in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung.	28
Tab. 8:	Angestrebte Reifegrade zur Ernte (BBCH-Stadien) der Kulturpflanzen in beiden Anbausystemen.....	29
Tab. 9:	Höhe der Abschlüge für Energiepflanzen und die angepassten N-Sollwert-Düngemengen in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung.....	32
Tab. 10:	Erhobene Bonituren und Analysen sowie deren Termine.....	35
Tab. 11:	Mittlere Methanausbeuten von Kohlenhydraten, Protein und Fett. (Quelle: ZALF 2009, TLL 2009).....	40
Tab. 12:	In der N-Bilanz berücksichtigte Ein- und Austräge.....	41
Tab. 13:	Start und Ende der Vegetationsperiode und Anzahl der Vegetationstage in den drei Versuchsjahren an den sieben Standorten.	45

Tab. 14:	Mittlere Temperaturen zu Vegetationsbeginn (Februar/März) und Vegetationsende (September/Okttober) im mehrjährigen Mittel und in der drei Versuchsjahren an den sieben Versuchstandorten.....	46
Tab. 15:	Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen der Luft in den drei Versuchsjahren an den sieben Standorten im Vergleich mit den mehrjährigen Mittelwerten.....	47
Tab. 16:	Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnungen zwischen den TM-Erträgen von Mais und Sonnenblumen im Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) und den Faktoren Temperatur-, Niederschlag-, Strahlungssumme sowie pflanzenverfügbares Bodenwasser zur Saat.....	58
Tab. 17:	Saat- und Erntetermine, Anzahl der Anbautage und BBCH-Entwicklungsstadien aller Varianten im Mittel der Standorte und Versuchsjahre.....	61
Tab. 18:	TM-Erträge der einzelnen Kulturpflanzen und der Jahreserträge im Mittel der Versuchsjahre und Standorte sowie deren signifikanten Unterschiede in t ha ⁻¹	62
Tab. 19:	Jahreserträge der Hauptfrucht- (oben) und Zweikultur-Nutzung (unten) im Mittel der Standorte sowie den signifikanten Unterschieden pro Versuchsjahr.....	69
Tab. 20:	Aussaat, BBCH 51 und Erntetermine von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung in den drei Versuchsjahren.....	72
Tab. 21:	Erträge und mittlere prozentuale Standardabweichungen der Erstkulturen Winterroggen, Winterroggen/Wintererbsen- und Winterroggen/Wintergersten-Gemenge sowie die Ertragsanteile der Gemengepartner.....	92
Tab. 22:	Gesamterträge und Ertragsanteile des Mais/Sonnenblumen-Gemenges als Zweitkultur nach Winterrüben, Winterroggen und Winterroggen/Wintererbsen-Gemenge im Mittel der Standorte in den drei Versuchsjahren.....	93
Tab. 23:	TM-Erträge und Ertragsanteile des Mais/Sonnenblumen-Gemenges nach Winterrüben, Winterroggen und Winterroggen/Wintererbsen sowie des Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenges nach Winterroggen/Wintergerste im Mittel der drei Versuchsjahre an den sieben Versuchstandorten.....	93

Tab. 24:	»Land Equivalent Ratios« (LER) von Mais und Sonnenblumen im Gemenge an den Versuchsstandorten in den drei Versuchsjahren.....	95
Tab. 25:	Mittlere prozentuale Abweichungen der TM-Erträge von Winterroggen, Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) von den Mittelwerten der drei Versuchsjahre.....	96
Tab. 26:	Nachernte- und Herbst-N _{min} -Werte (0-90 cm) von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in den drei Versuchsjahren.....	111
Tab. 27:	N-Gehalte und NNI-Werte von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) nach Winterroggen an den sieben Standorten.....	121
Tab. 28:	N-Düngung und N-Entzüge in kg ha ⁻¹ aller Varianten im Mittel der Standorte und Jahre.....	122
Tab. 29:	K-Gehalte in Prozent der Trockenmasse von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN).....	128
Tab. 30:	P- und K-Entzüge aller Kulturen der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung im Mittel der Standorte und Jahre.....	130
Tab. 31:	Übersicht über die Erträge von Mais und Sonnenblumen im Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) im Mittel der Standorte in den Versuchsjahren.....	135
Tab. 32:	Übersicht über die Jahreserträge von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und der Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Standorten.....	141
Tab. 33:	TM-Erträge, N-Gehalte und N-Ernährungsindices (NNI) von Winterroggen, Mais, Sonnenblumen, Sorghum und Sudan-gras in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung.....	165
Tab. 34:	N-Salden und Nachernte N _{min} -Werte von Mais- und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) sowie den jeweiligen Differenzen von HFN und ZKN.....	183

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Die Atmosphäre besteht aus einem gleichmäßigen Gemisch verschiedener Gase. Ausnahmen stellen die Ozonschicht der Stratosphäre sowie unterschiedliche Wasserdampfkonzentration dar (TRENBERTH 1996). Neben den Wassermolekülen sind Kohlendioxid (CO_2) und andere Gase, die lediglich in Spuren auftreten wie Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) strahlungsaktive Treibhausgase (WATSON ET AL. 1990, FLACH ET AL. 1997). Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt läge die mittlere Temperatur der Erdoberfläche bei -18°C und damit 33°C niedriger als die aktuelle Temperatur, was menschliches Leben vermutlich unmöglich machen würde (WATSON ET AL. 1990, TRENBERTH 1996). Neben diesem natürlichen gibt es auch einen vom Menschen verursachten Treibhauseffekt. Seit der Industrialisierung haben menschliche Aktivitäten zu einem enormen Anstieg der Treibhausgasemissionen beigetragen. Als wichtigste Ursache gilt dabei die Freisetzung von CO_2 aus fossilen Brennstoffen wie Öl, Kohle und Gas, gefolgt von der zunehmenden Entwaldung der Erde. In der Vegetation und im Boden eines natürlichen Waldes ist laut WATSON ET AL. (1990) 10-100-mal so viel Kohlenstoff (C) gespeichert, wie unter landwirtschaftlicher Nutzung. Die große Variation ist hierbei vor allem auf die unterschiedliche CO_2 -Speicherung der ursprünglichen Vegetation zurück zu führen, weist des Weiteren aber auch auf die Bedeutung der jeweiligen Landnutzung hin.

Durch anthropogene Emissionen ist die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre seit dem Jahr 1750 über 30% gestiegen. Neben der CO_2 - steigt auch die CH_4 -Konzentration der Erdatmosphäre vor allem durch wasserbedeckte Reisfelder und die Viehzucht stark an (BMU 2009). Ähnlich verhält es sich mit N_2O , welches durch mikrobiologische Aktivitäten in sauerstoffarmen Böden entsteht. Sowohl CH_4 als auch N_2O bewirken eine wesentlich stärkere Erwärmung des Klimas (ALBRITTON ET AL. 1995, KASIMIR-KLEMEDTSSON ET AL.

1997, FLACH ET AL. 1997), werden allerdings chemisch in der Atmosphäre zersetzt (SCHIMEL ET AL. 1995). Aus fossilen Energieträgern freigesetztes CO₂ hingegen wird nicht abgebaut, sondern durchläuft atmosphärische, terrestrische und marine Reservoirs mit großen Unterschieden in der Verweildauer, die zwischen Jahren und Jahrtausenden liegen (SCHIMEL ET AL. 1995). Daher sind die Konsequenzen der anthropogenen Störung auf den CO₂-Zyklus als langfristig anzusehen und haben somit den größten Einfluss auf die Veränderungen der Klimata (WATSON ET AL. 1990, SCHIMEL ET AL. 1995, ALBRITTON ET AL. 1995, BMU 2009). Neben der Produktion von Treibhausgasen beeinflusst der Mensch auch durch andere Maßnahmen das Klima, z.B. durch die Veränderung des Albedo (Reflexionskoeffizient), durch Desertifikation oder Entwaldung bzw. durch die Freisetzung von Aerosolen (WATSON ET AL. 1990).

Durch die Produktion von Energiepflanzen wird atmosphärisches CO₂ gebunden und bei der Energiegewinnung wieder freigesetzt. Dennoch ist die Energiebilanz nicht ausgeglichen, da für Produktionsfaktoren wie Diesel, Dünger und Pestizide fossile Energieträger eingesetzt werden. Hierbei ist die entsprechende energetische Output/Input-Relation, wobei dieser Quotient möglichst hoch sein soll, entscheidend. Die Energie, die aus Biomasse (verholzte und krautige Energiepflanzen) gewonnen werden kann, ist ca. 10-15-mal höher als der Energieinput für Produktionsfaktoren wie Bodenbearbeitung, Agrochemikalien, Transport und Konversion (TURHOLLOW & PERLACK 1991, SCHEFFER 1992, HARTMANN 1994). Dieses Output/Input-Verhältnis wird in Zukunft durch steigende Erträge noch weiter auseinander gehen. Gemäß Modellrechnungen von FOSTER (1993) kann dieses Verhältnis auf bis zu 30:1 vergrößert werden. Die freigesetzte C-Menge durch Treibstoffverbrauch sowie Dünger- und Pflanzenschutzmittelerzeugung pro erzeugte Energieeinheit liegt laut TURHOLLOW & PERLACK (1991) zwischen 1,1 und 1,9 kg C GJ⁻¹ für verholzte und krautige Biomasse. Im Vergleich hierzu ist die C-Freisetzung bei der direkten energetischen Nutzung von Gas bzw. Kohle mit 13,8 und 24,7 kg C GJ⁻¹ um ein Vielfaches höher. Durch eine Substitution von fossilen durch »nachwachsende« Kraftstoffe kann die CO₂-Nettoemission im Energiepflanzenanbau weiter gesenkt werden.

Die 1990er Jahre waren sowohl im globalen als auch regionalen Maßstab das wärmste Jahrzehnt seit dem Beginn instrumenteller Aufzeichnungen. Allerdings sind urbane Hitzequellen durch den erhöhten Energieverbrauch, Oberflächenveränderungen, Verkehr etc. schwer von der treibhausgasinduzierten Klimaerwärmung zu trennen (BÖHM 1998, MCKENDRY 2003). Die Zunahme der Erdoberflächentemperatur scheint nicht einheitlich zu sein. Laut Untersuchungen von BRAITHWAITE (2002) gab es in den letzten 50 Jahren keinen globalen Trend, welcher auf ein Schmelzen der Gletschermasse hindeutet. Auch Untersuchungen in Grönland belegen, dass sich die dortige Eisfläche seit Beginn der Messungen im Jahr 1987 sogar ausweitet und die Temperatur im Mittel um $2,2^{\circ}\text{C}$ pro Dekade gefallen ist (CHYLEK ET AL. 2004); ein ähnlicher Trend wird von DORAN ET AL. (2002) für die Antarktis bestätigt und auch die Eisdicke im Arktischen Ozean blieb während der 1990er Jahre konstant (WINSOR 2001). Die vorsichtige Ausdrucksweise in dem aktuellen Bericht der »Intergovernmental Panel on Climate Change« (IPCC) Kommission von 2007 deutet ebenfalls darauf hin, dass es sich bei der Klimaforschung um ein sehr komplexes Thema handelt. Demnach ist es »wahrscheinlich« (durch mehr als 66% der Beobachtungen bestätigt), dass sich die Erde (ohne die Antarktis) innerhalb der letzten 50 Jahre durch anthropogene Einflüsse erwärmt hat (IPCC 2007). Prognosen gehen davon aus, dass sich die mittlere Erdtemperatur durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt bis zu Jahr 2100 um mehrere Grad Celsius erhöht, wobei die Spannen der verschiedenen Modellrechnungen zwischen $1,1^{\circ}\text{C}$ und $6,4^{\circ}\text{C}$ liegen (IPCC 2007). Damit geht ein Anstieg des Meeresspiegels zwischen 0,18 und 0,59 m einher, wodurch ganze Inselstaaten und Küstenregionen bedroht sein werden. Eine Häufung extremer Witterungsverhältnisse sowie die Ausbreitung von Tropenkrankheiten über neue Gebiete ist ebenfalls »wahrscheinlich« (IPCC 2007) und die Niederschlagsverteilung weist eine Tendenz zur Abnahme von sommerlichen und Zunahme von winterlichen Niederschlägen auf (CHMIELEWSKI 2004). Darüber hinaus wird die Desertifikation weiter zunehmen, was vor allem die Entwicklungsländer betrifft (BMU 2009).

Obwohl bzw. gerade weil die anthropogene Einflussnahme auf das Klima noch nicht eindeutig quantifiziert werden kann, besteht ein dringender Handlungsbedarf, Treibhausgase einzusparen und damit den potenziellen Ursachen für einen Klimawandel entgegenzuwirken. Alternativen Energiequellen sowie der temporären Festlegung von Kohlenstoff in Pflanzen und Humus kommen hierbei entscheidende Bedeutungen zu. Gemäß Schätzungen von SAUERBECK (2001) können durch forst- und landwirtschaftliche Maßnahmen insgesamt 10-25% des aus fossilen Energieträgern freigesetzten CO₂ ersetzt werden. Neben der Substitution von fossilen Energieträgern und der Sequestrierung von Kohlenstoff sind vor allem eine effizientere Nutzung und Einsparung von Energie sowie die Anpassungen der Konsumgewohnheiten erstrebenswert (SCHAUB & VETTER 2007).

Der Anteil von erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch in der Bundesrepublik stieg in den letzten Jahren stark an und lag im Jahr 2008 bei 9,5% des Primärenergieverbrauchs (AGEE-STAT 2009). Laut Schätzungen von SCHEFFER (2000) kann dieser bis auf 20% gesteigert werden. Die Struktur der aktuellen Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien ist in **Abb. 1** dargestellt. Der Energie aus Biomasse kommt mit einem Anteil von fast 70% hierbei eine herausragende Bedeutung zu.

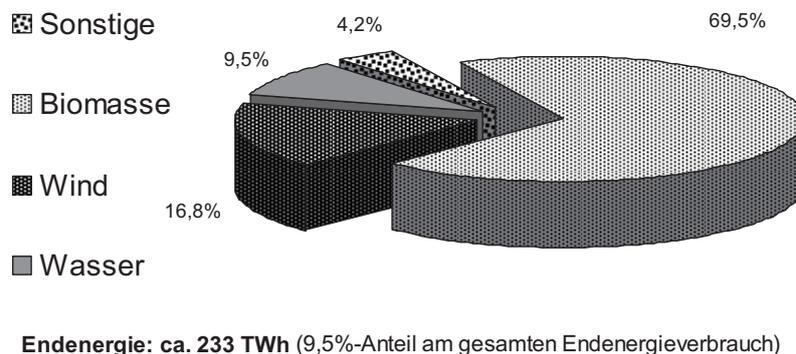


Abb. 1: Struktur der Endenergiebereitstellung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2008. (Quelle: BMU, Juni 2009)

Da eine Energiebereitstellung aus Biomasse, im Gegensatz zu Wind- und Solarenergie, eine gleichmäßigere Versorgung sowie eine Speicherung ermöglicht, wird diese auch weiterhin die stärkste Fraktion ausmachen und gegebenenfalls weiter an Bedeutung zunehmen (SCHEFFER 2000). Neben einer Nutzung von Stärke und pflanzlichen Ölen hat auch die Nutzung von Zellwandmaterialien ein hohes Potenzial, da diese mit einem Anteil von bis zu 95% im Pflanzenmaterial die am häufigsten vorkommenden organischen Verbindungen darstellen (GOLDSTEIN 1981, CLAASSEN ET AL. 1999). Allein Cellulose macht laut GOLDSTEIN (1981) ca. 50% der jährlich global produzierten Biomasse aus. Zudem ist die Verwendung von Biomasse zur Energiebereitstellung extrem flexibel (Verbrennung, flüssige Kraftstoffe, Biogas, Strom) und sowohl im kleinen als auch im großen Maßstab durchführbar. Außerdem fördert die Energiegewinnung aus Biomasse mit anderen alternativen Energiequellen die Vielfalt der Energieerzeugung und erhöht damit die Sicherheit der Energieversorgung (HALL & HOUSE 1995). Auf globaler Ebene ist die Spannweite des zukünftigen Potenzials der Energiebereitstellung aus Biomasse extrem groß und hängt neben Faktoren, wie der Nachfrage nach Nahrung, Konkurrenz um Landflächen etc. auch von der Produktivität der Anbausysteme ab (HOOGWIJK ET AL. 2003).

Die gesteigerte Nachfrage nach Biomasse verschärft jedoch die Probleme einer ausreichenden Bereitstellung, da Reststoffe nur begrenzt verfügbar sind und die Kosten dafür oft unterschätzt werden. Ein gezielter Anbau von Energiepflanzen ist deshalb für Landwirte nicht zuletzt wegen der staatlichen Förderung zunehmend interessant. Das bisherige Ziel der Bundesregierung bis zum Jahr 2010 12,5% des Bruttostromverbrauchs mit erneuerbaren Energien zu decken, wurde bereits im Jahr 2007 mit 14,2% überschritten. Gemäß dem neuen Erneuerbare-Energien-Gesetz und dem Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz sollen der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Stromherstellung bis zum Jahr 2020 auf mindestens 30% und der Anteil an der Wärmebereitstellung auf 14% ansteigen (BMU 2009). Dabei besteht eine der größten Herausforderungen der Biomasseproduktion in der Entwicklung von geeigneten Anbausystemen, die hochproduktiv und ökologisch vertretbar sind. Durch eine

angemessene Energiepflanzenproduktion ließen sich aus ackerbaulicher Perspektive ökologische Probleme wie Pestizidbelastungen, Nährstoffauswaschungen, Erosionsverluste, Zerstörung der Bodenfruchtbarkeit und Agrar-biodiversitätsverluste auf ein Minimum reduzieren (FRESE 1995, BUTTLAR 1996, IPCC 2008), was vor allem vor dem Hintergrund der stark wachsenden Bevölkerung für eine nachhaltige Landwirtschaft von Bedeutung ist.

Die Anbaufläche von Rohstoffpflanzen in der Bundesrepublik ist in den letzten 10 Jahren etwa um das fünffache auf derzeit etwa 2 Mio. ha (17% der Ackerfläche) gestiegen. Diese Pflanzen werden neben einer stofflichen Nutzung überwiegend für energetische Zwecke genutzt und das geschätzte Potenzial liegt bei etwa 4,5 Mio. ha (FNR 2010). **Tab. 1** gibt eine Übersicht über den Flächenanbau von Energiepflanzen in den Jahren 2008 und 2009.

Tab. 1: Anbau von Energiepflanzen in Deutschland in ha. (Quelle: FNR 2010)

	2008	2009*
Raps für Biodiesel/ Pflanzenöl	915.000	942.000
Zucker und Stärke für Bioethanol	187.000	226.000
Pflanzen für Biogas	500.000	530.000
Dauerkulturen für Festbrennstoffe	2.000	3.500
Energiepflanzenanbau insgesamt	1.908.000	1.995.500

* vorläufige Schätzung

Durch die Ausweitung des Energiepflanzenanbaus steigt die Flächenkonkurrenz zwischen Nahrungsmittel- und Futterproduktion sowie Naturschutzgebieten an (SCHAUB & VETTER 2007, BOEHMEL ET AL. 2008). Ökonomische Modelle auf globaler Ebene weisen darauf hin, dass eine direkte Konkurrenz zwischen Nahrungsmitteln und Bioenergie entsteht. Dies würde zu steigenden Preisen, weiterer Entwaldung und einem zusätzlich Anheizen der Klimaerwärmung führen (KASIMIR-KLEMEDTSSON ET AL. 1997, AZAR & BERNDES 1999,

MCCARL & SCHNEIDER 2001, SCHNEIDER & MCCARL 2003, AZAR 2005, JOHANSSON & AZAR 2007). Um die Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion gering zu halten und hohe Transport- oder Umweltkosten zu vermeiden, sind für die Energiepflanzenproduktion vorzugsweise regionale Flächen, die für den Ackerbau ungeeignet sind zu nutzen. Hierbei kann es sich beispielsweise um Grünschnitte aus Naturschutzgebieten oder Randstreifen von Fahrbahnen bzw. Grünland handeln (SCHEFFER 1993, GRAß ET AL. 2007, WACHENDORF ET AL. 2007). Laut FIELD ET AL. (2007) haben Gebiete, die keine Nahrungsmittelkonkurrenz hervorrufen, das größte Potenzial zur Senkung der Nettoerwärmung. Hierbei handelt es sich um Flächen, die nicht mehr in landwirtschaftlicher Nutzung sind und nicht in urbane Gebiete oder Wald umgewandelt werden können. Durch diese Flächen kann global jedoch lediglich etwa 5% der Primärenergie bereitgestellt werden (FIELD ET AL. 2007). Daher ist der Anbau von Energiepflanzen auf landwirtschaftlichen Flächen notwendig und wird in Westeuropa auch in Zukunft eine Schlüsselrolle einnehmen. Schätzungen gehen davon aus, dass bis 2050 17-30% der Primärenergie aus Biomasse bereitgestellt wird (HALL & HOUSE 1995).

Bei einer Substitution von fossilen Energieträgern durch Biomasse werden an die jeweiligen Standorte angepasste Pflanzenarten bzw. -sorten und ökologisch verträgliche Anbausysteme mit hohen Erträgen benötigt (SCHOLZ & ELLERBROCK 2002). Es ist also eine möglichst hohe Produktivität des knappen Gutes Ackerfläche anzustreben (HOOGWIJK ET AL. 2003, BOEHMEL ET AL. 2008). Eine Erhöhung der Biomasserträge ohne negative ökologische Folgen kann hierbei über Züchtungsfortschritte bzw. neue Anbausysteme erzielt werden (SCHAUB & VETTER 2007, BOEHMEL ET AL. 2008). Neben einer optimalen Flächenausnutzung, sowie der Bereitstellung qualitativ hochwertiger Biomasse für die energetische Wandlung, ist auch die Nachhaltigkeit dieses hieraus erwachsenden Betriebszweiges für die Landwirtschaft, sowie neue Wertschöpfungsketten im ländlichen Raum von großer Bedeutung. In diesem Rahmen sind für Anbau und Bereitstellung der Biomasse verschiedene Ansätze denkbar. Mit dem Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) wurde ein Anbausystem

entwickelt, das hohe Flächenerträge mit ökologischen Vorteilen in Einklang bringen soll.

Die derzeit wichtigste Kulturpflanze für die energetische Nutzung ist Silomais mit einem Anteil an der Anbaufläche von über 80%. Insbesondere in viehhaltenden Regionen mit hohen Gülleapplikationen stieg der Maisanteil in den Fruchtfolgen teilweise auf über 50% an (STÜLPNAGEL ET AL. 2008). Entsprechend der Erfahrungen aus der Praxis und aus langjährigen Fruchtfolgeversuchen sollte im Integrierten Landbau der Anteil von Mais bei günstigen Standortbedingungen 40% und bei ungünstigen Bedingungen 25% nicht überschreiten (BAEUMER 1990). Gründe für diese Vorgabe liegen sowohl in der Gefahr der Bodenerosion und Nährstoffauswaschung während der Brachezeiten, als auch in einem verstärkten Krankheitsdruck (Fusariosen, Mais-Beulenbrand, Nematoden, Maiszünsler, Maiswurzelbohrer) als Folge zunehmender Anbaudichte. Die Anforderungen an Alternativen zum Silomais sind hoch, denn sie müssen sowohl mit dem Ertrags- und Preisniveau von Mais konkurrieren können, als auch Umweltvorteile in Bezug auf das Erosions- und Auswaschungsrisiko erbringen.

Durch eine Ausweitung der Fruchtfolgen und die Entwicklung neuer Anbausysteme besteht zudem die Möglichkeit, die Agrarbiodiversität zu erhöhen. Für die Gesundheit der Biosphäre ist deren Diversität von großer Bedeutung (CALLOW ET AL. 1997). Neben der Erweiterung von Anbausystemen, ist eine Ausweitung des Genpools von Kulturpflanzen nötig, um auch in Zukunft hohe und stabile Erträge zu erzielen. Hierfür ist die Erhaltung pflanzengenetischer Ressourcen, die heute bereits erfolgreich in der Züchtungsarbeit eingesetzt werden, von entscheidender Bedeutung (HAMMER ET AL. 2003b, HAMMER ET AL. 2007). Derzeit findet jedoch immer noch eine Generosion vor allem durch die Vernachlässigung regional bedeutsamer Pflanzenarten bzw. -sorten statt (HAMMER ET AL. 2001). Diese pflanzengenetischen Ressourcen gilt es zu sammeln, zu charakterisiert, zu bewertet und vor allem für die Zukunft zu bewahren (HAMMER ET AL. 2007).

1.2 Ziele der Versuchsdurchführung

Das übergeordnete Ziel dieser Forschungsarbeit ist eine klimafreundliche Bereitstellung von Energie. Dabei sollen hier in einem dreijährigen Versuch an unterschiedlichen Standorten der Anbau und die Verwertungsmöglichkeiten von Energiepflanzen, vornehmlich für die Biogaserzeugung, in Teilen aber auch für die Verwertung als Brennstoff zur BtL-Erzeugung, geprüft werden. In diesem Teilprojekt, welches in das Gesamtprojekt »Standortangepasste Anbausysteme für die Produktion von Energiepflanzen« eingebettet ist, wurde auf sieben Standorten die Hauptfrucht-Nutzung (HFN) mit der von SCHEFFER & STÜLPNAGEL (1993) entwickelten Zweikultur-Nutzung (ZKN) verglichen. Durch einen bundesweiten Vergleichsanbau sollen Vorzüge und standörtliche Begrenzungen der ZKN bewertet werden. In **Abb. 2** ist zunächst die konventionelle HFN zur Bereitstellung von Energiepflanzen dargestellt. Hierbei wird eine Winterung oder eine Sommerung als Hauptkultur angebaut. Zeitlich vor- oder nachgelagert erfolgt ein Zwischenfruchtanbau.

Die ZKN strebt hohe Flächenerträge an und zeichnet sich zusätzlich durch ökologische Vorzüge, wie dem weitgehenden Verzicht auf Pflanzenschutzmittel und eine nahezu ganzjährige Bodenbedeckung aus (SCHEFFER 1993, GRAß & SCHEFFER 2003, SCHEFFER 2003a/b). In diesem Anbau- und Bereitstellungssystem, welches in **Abb. 3** schematisch dargestellt ist, erfolgt nach einer winterannuellen Kultur der Anbau einer sommerannuellen Zweitfrucht, ähnlich dem Grünroggenanbau zur Fütterung mit folgendem Anbau einer Sommerung. Der Unterschied hierzu ist, dass die Erstkultur nicht zum Ährenschieben geerntet wird, sondern zu Beginn der Kornfüllung, wenn der TM-Ertrag annähernd das Maximum erreicht hat (GREBE ET AL. 2007). Zudem werden beide Kulturen als Ganzpflanze einsiliert und können energetisch auf unterschiedliche Weise weiter verwertet werden. Durch eine mechanische Entwässerung und anschließender Trocknung der festen Phase, können die Nährstoffgehalte reduziert und damit die Brennstoffqualität erhöht werden, während die flüssige Phase ein hervorragendes Vergärungssubstrat darstellt (STÜLPNAGEL 1998, HEINZ ET AL. 1999, FRICKE ET AL. 2007, REULEIN ET AL.

2007, GRAß ET AL. 2009). Alternativ zur mechanischen Entwässerung kann die Silage direkt in eine Biogasanlage eingespeist werden.

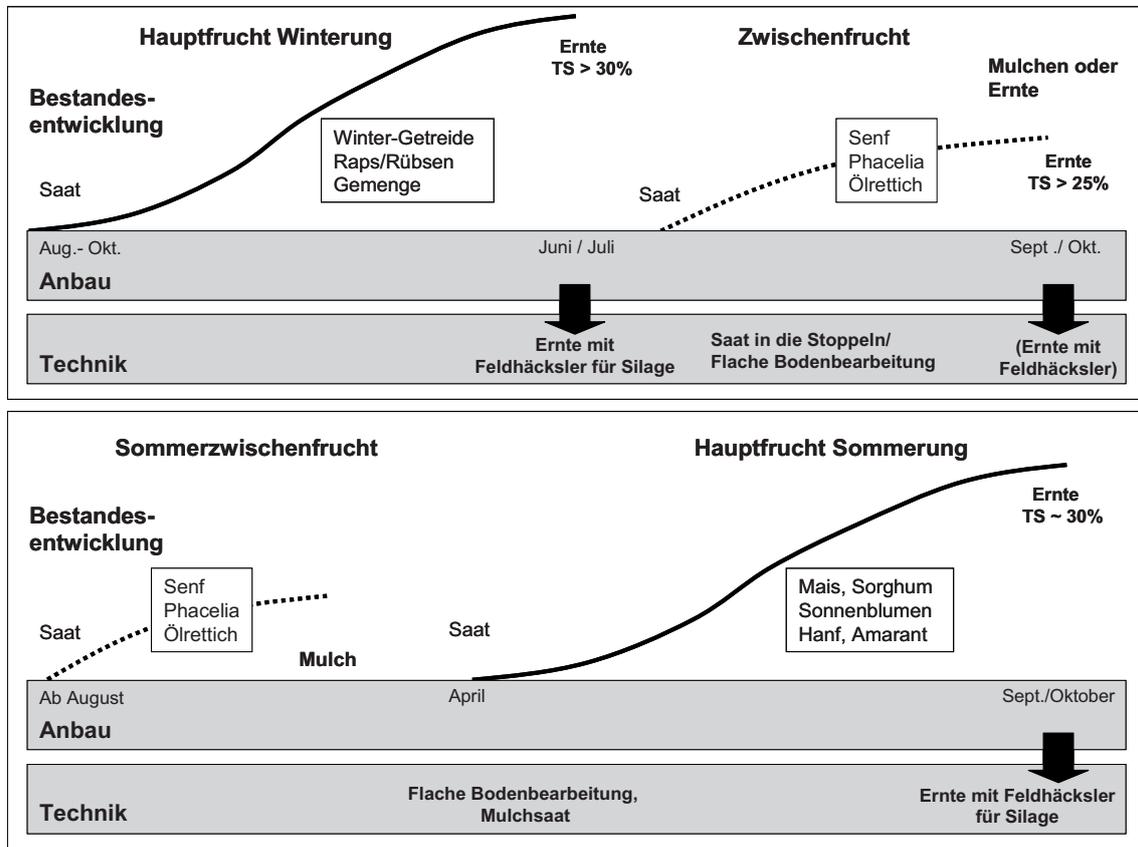


Abb. 2: Schematische Darstellung zum Anbau und zur Bereitstellung von Energiepflanzen im Hauptfruchtanbau mit Winterung (**oben**) bzw. Sommerung (**unten**) als Hauptfrucht. (Quelle: Stülpnagel et al. 2009, verändert).

Wildpflanzen werden durch massenwüchsige Kulturen unterdrückt und die Schadensschwelle liegt höher, da diese ähnliche Energiegehalte wie Kulturpflanzen aufweisen und damit in gleicher Art und Weise nutzbar sind (SCHEFFER 1992, 2003a/b). Daher können auch alte Sorten integriert werden, die oft eine höhere Biomasseproduktion aufweisen als aktuelle Sorten (BUTTLAR 1996, STRESE 2001). Auf diese Art und Weise können genetische Ressourcen sinnvoll genutzt und erhalten werden (SCHEFFER 1993, SCHEFFER & STÜLPNAGEL 1993, HAMMER 2004). So können in der ZKN bei der Sorten- und Artenwahl phytosanitäre Aspekte einen höheren Stellenwert einnehmen (SCHEFFER

2003a/b, SCHEFFER & STÜLPNAGEL 1993), wodurch neben der Verminderung des Schädlings- und Krankheitsbefalls auch der Gesamtertrag gesteigert werden kann (FRANCIS 1989, HEITEFUSS 2000, KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000).

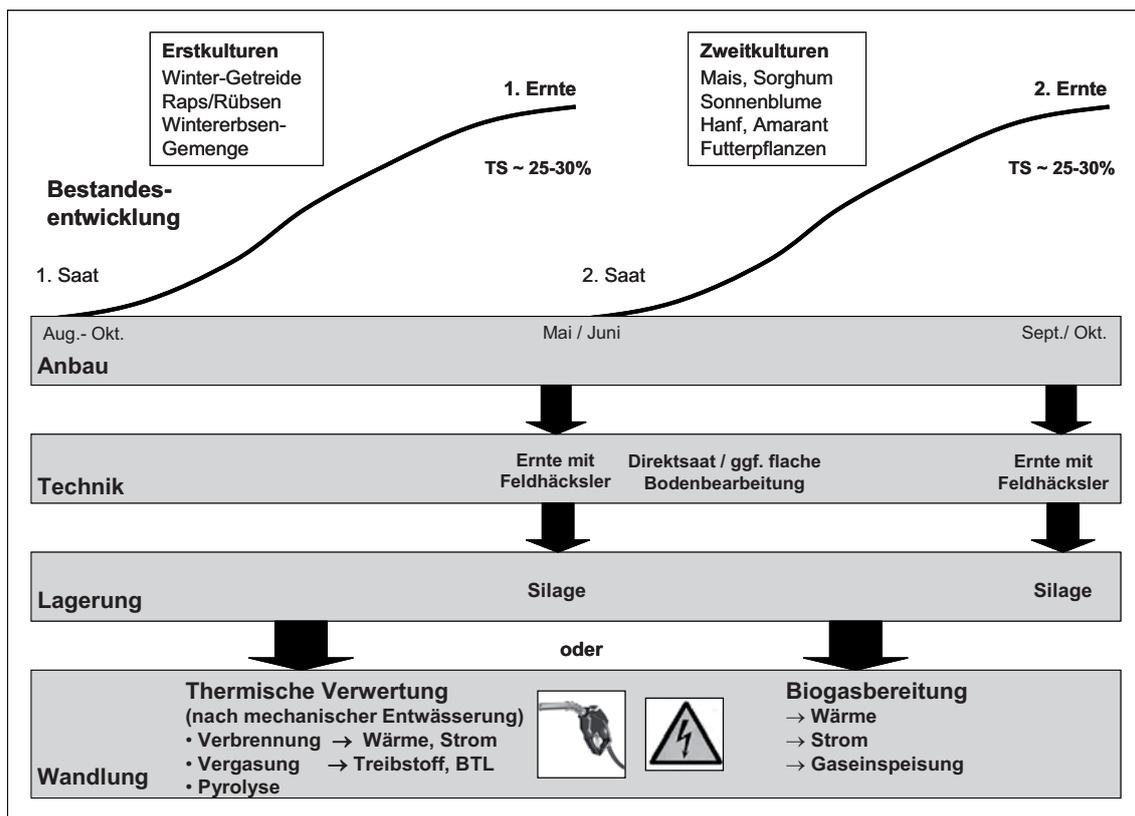


Abb. 3: Schematische Darstellung zum Anbau und zur Bereitstellung von Energiepflanzen im Zweikultur-Nutzungssystem. (Quelle: Stülpnagel et al. 2009, verändert).

Die Aussaat der Zweikulturen erfolgt ohne wendende Bodenbearbeitung in die schützende Stoppelschicht der Vorfrucht, was Erosionsverluste minimiert und einem Humusabbau entgegenwirkt (SCHEFFER 1992, SCHEFFER & STÜLPNAGEL 1993, GRAß 2003, GRAß & SCHEFFER 2003, JIN ET AL. 2008). Zudem können durch die ZKN Auswaschungsverluste von Stickstoff vermindert werden (SCHEFFER 2000, GRAß 2003, WAGNER 2006, HEGGENSTALLER ET AL. 2008). Die ZKN wurde bereits mit unterschiedlichen Erst- und Zweikulturen geprüft (KARPENSTEIN-MACHAN 2001, KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000).

GEL 2000, GRAß 2003, WAGNER 2006), aber die Fragestellung der Standortvoraussetzungen blieb bislang unbeantwortet. Neben der Ertragsleistung unterschiedlicher Kulturarten an den verschiedenen 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 sollen in dieser Untersuchung die Umweltauswirkungen des Biomasseanbaus abgeschätzt werden. Darüber hinaus wird eine umfassende ökonomische Bewertung durch die Universität Gießen sowie eine ökologische Auswertung seitens des Leibniz-Zentrums für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit stehen jedoch pflanzenbauliche Fragestellungen im Vordergrund, wobei folgende Arbeitshypothesen überprüft wurden:

1. **Der Anbau von Mais und Sonnenblumen in der ZKN erhöht die Jahreserträge gegenüber dem Anbau in der HFN mit Zwischenfrüchten.**
2. **Die ZKN ist der HFN lediglich auf Standorten mit hohen Niederschlägen und guten Wasserspeichervermögen des Bodens überlegen.**
3. **Die ZKN erhöht an Standorten mit ungünstigen Wachstumsbedingungen die Ertragssicherheit.**
4. **Der Gemengeanbau von Mais und Sonnenblumen bietet Vorteile gegenüber den Reinsaaten.**
5. **Die ZKN eignet sich besonders für den Anbau alternativer Zweitkulturen wie Sorghum, Sudangras, Amarant und Hanf.**
6. **Die ZKN erzielt ohne chemische Pflanzenschutzmittel hohe Flächenerträge.**
7. **Durch die ZKN wird die Auswaschungsgefahr von Stickstoff vermindert.**

2 Material & Methoden

2.1 Charakterisierung der Versuchsstandorte

2.1.1 Lage der Versuchsstandorte

Zur Prüfung möglichst vieler Umwelten mit Unterschieden in bodenkundlichen und klimatischen Kenngrößen wurden aus den verschiedenen Ackerbauregionen im Bundesgebiet Versuchsstandorte ausgewählt, die repräsentativ für diese sind und die über einen mehrjährigen Erfahrungsschatz im Bereich nachwachsender Rohstoffe verfügen. Die Versuche wurden von folgenden Partnern in den entsprechenden Bundesländern angelegt und in identischer Art und Weise durchgeführt:

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

Abb. 4 zeigt die sieben Versuchsstandorte mit Bezug zur hydrogeologischen Region sowie der Klassifizierung in Anbauregionen (Angaben der Versuchspartner). Die Standorte *Werlte* und *Gülzow* liegen im norddeutschen Flachland, *Haus Düsse*, *Witzenhausen*, *Dornburg* und *Rauischholzhausen* in der Mittelgebirgsregion und *Straubing* im voralpinen Flachland.

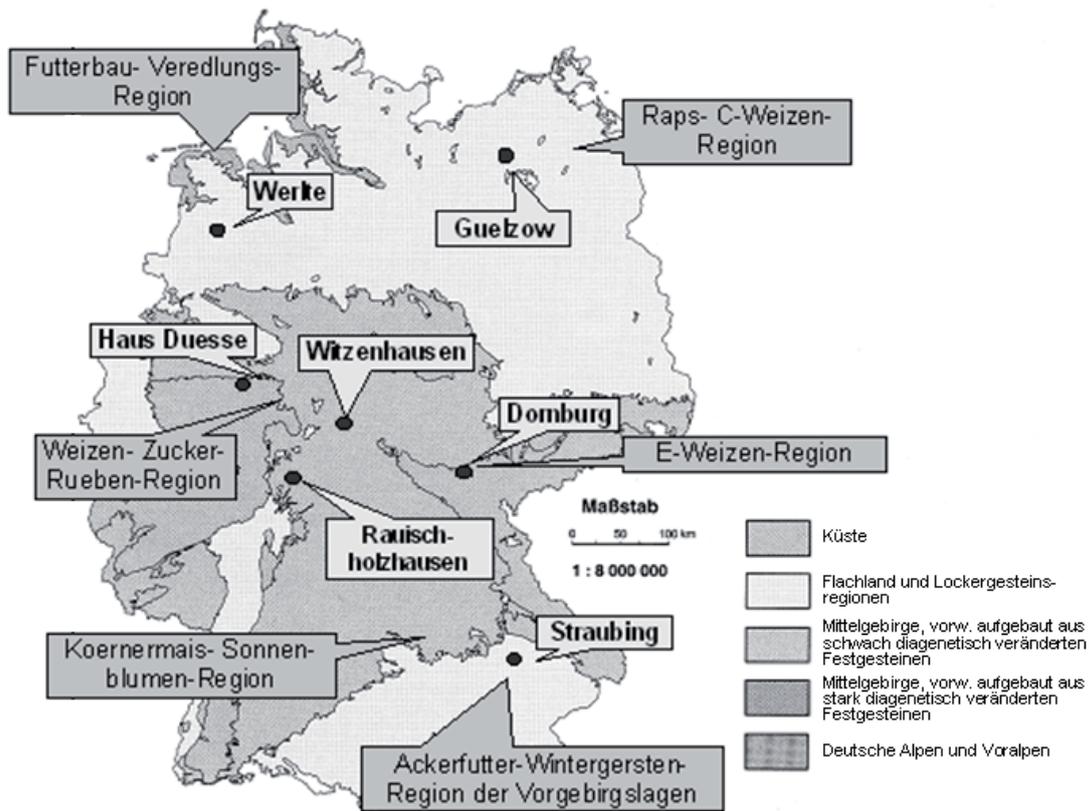


Abb. 4: Übersicht der hydrogeologischen Regionen sowie Lage und Zuordnung der Versuchsstandorte in Anbauregionen. (Quelle: Dt. Klimaatlas 2007, verändert)

Der Standort *Dornburg* liegt in einer Elite (E)-Weizenregion, *Haus Düsse* und *Witzenhausen* in einer Zuckerrüben-/Weizen-, *Werlte* in einer Futterbau-/Veredlungs-, *Gülzow* in einer Raps-/Keks (C)-Weizen- und *Straubing* in einer Ackerfutter/Wintergersten-Region.

2.1.2 Bodenkennwerte

Die bodenkundliche Standortcharakterisierung wurde von dem Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) durchgeführt (DEUMLICH ET AL. 2008). **Tab. 2** zeigt die wichtigsten Standortparameter in der Übersicht. Die Angaben zum Humus und zur Nährstoffversorgung beziehen sich auf den Pflughorizont.

Die Standorte *Gülzow* und *Werlte* zeichnen sich durch relativ leichte, sandige Böden mit geringen Bodenpunkten von 45 und 31 aus. In *Dornburg* wurde der Versuch auf einer schluffig-tonigen Parabraunerde mit hoher nutzbarer Feldkapazität (193 mm) im effektiven Wurzelraum (nFKWe) angelegt. Der Oberboden am Standort *Dornburg* ist ausreichend mit den Nährstoffen P, K und Mg versorgt.

Tab. 2: Übersicht zu Kenngrößen des Bodens an den sieben Versuchsstandorten.

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

A, B, C, D, E: Versorgungsklassen, nFKWe: Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (We)

Der Boden am Standort *Gülzow* ist ein Kolluvium-Pseudogley mit hohem Sandanteil und einer nFKWe von 159 mm. Die Versorgung mit Grundnährstoffen ist den Versorgungsklassen C und E zuzuordnen. Am Standort *Haus Düsse* wird eine Haftpseudogley-Parabraunerde mit überwiegend schluffigen Bestandteilen vorgefunden. Diese weist 72 Bodenpunkte und eine mit 190 mm hohe nFKWe auf. Die Grundnährstoffe P und Mg liegen in der Versorgungsstufe D und C, während die Kalium (K) –Gehalte in der Versorgungsklasse B liegen.

Am Standort *Rauischholzhausen* handelt es sich um einen schluffreichen Parabraunerde-Haftpseudogley mit 65 Bodenpunkten und der unter den Standorten höchsten nFKWe von 226 mm. Die Versorgung mit den Grundnährstoffen P, K und Mg entsprechen den Klassen C, E und A.

Am Standort *Straubing* treffen wir eine Parabraunerde mit 76 Bodenpunkten aus vorwiegend schluffig-tonigem Substrat an. Die nFKWe liegt mit 157 mm im mittleren Bereich, vergleichbar der des Standortes *Gülzow*. Die Versorgung mit Grundnährstoffen ist gut und liegt in allen Fällen in der Versorgungsklasse C.

Am Standort *Werlte* ist der Versuchsboden ein Parabraunerde-Pseudogley aus stark sandhaltigem Substrat. Sie hat eine geringe nFKWe von nur 134 mm. Die Versorgung mit Grundnährstoffen entsprechen den Versorgungsstufen D (P, Mg) bzw. B (K).

Am Standort *Witzenhausen* kann der Boden als eine Haftnässe-Parabraunerde-Braunerde aus schluffig-tonigem Material mit einer hohen nFKWe von 200 mm bezeichnet werden. Die Versorgung mit Grundnährstoffen entsprechen den Versorgungsklassen C (P) und D (K, Mg).

Bis auf die Böden der Standorte *Rauischholzhausen* und *Witzenhausen*, welche Humusgehalte von knapp 2% aufweisen, haben alle Versuchsstandorte einen Humus-Gehalt zwischen 2,2% und 2,6%. Generell verfügen die Böden aller Standorte mit Gehaltsklassen C oder höher über ausreichende Mengen an P, K und Mg. Lediglich die K-Gehalte in *Haus Düsse* liegen in der Gehaltsklasse B.

2.1.3 Witterungsdaten

Vegetationsperioden

Die Vegetationstage der drei Versuchsjahre wurden auf der für ein Pflanzenwachstum mindestens nötigen Basis einer Tagesmitteltemperatur von 5°C (DWD 2009) nach folgender Definition errechnet. Die Vegetationsperiode beginnt mit dem ersten Tag einer dreitägigen Serie mit mindestens 5°C und endet vor der ersten Serie von drei Tagen unter 5°C. Der früheste Starttermin der Vegetationszeit liegt dabei zeitlich nach der letzten Serie von drei Tagen unter 5°C. Die Anzahl der Vegetationstage eines Kalenderjahres ergibt sich aus der Summe der Tage mit einer mittleren Temperatur von mindestens 5°C innerhalb der definierten Vegetationsperiode.

Um einen Vergleich zwischen der Dauer der Vegetationsperioden in den Versuchsjahren und den mehrjährigen Witterungsdaten zu ziehen, wurden die mittleren monatlichen Temperaturen zu Beginn (Februar/März) und Ende (September/Okttober) gegenübergestellt.

Mehrjährige Witterungsdaten

Neben dem Boden nimmt die Jahreswitterung entscheidenden Einfluss auf das Pflanzenwachstum. In **Tab. 3** sind die Klimadaten der Versuchsstandorte zusammengetragen, die aus mehrjährigen Wetterbeobachtungen abgeleitet wurden. Erfolgt eine Verknüpfung dieser mit den Kenngrößen der Böden an den Standorten (**Tab. 2**), so zeigt sich, dass der Nachteil geringer Bodenpunkte und FK durch relativ hohe Jahresniederschläge ausgeglichen werden kann. Dies ist am Standort *Werlte* im Gegensatz zu *Gülzow* durch höhere Jahresniederschläge von 250 mm der Fall.

Tab. 3: Übersicht zu den Klimadaten (1998-2008) an den Versuchsstandorten auf der Basis mehrjähriger Wetterbeobachtungen. (Quelle: Angaben der Versuchsansteller 2008)

Parameter	Dornburg	Gülzow	Haus Düsse	Rauisch.	Straubing	Werlte	Witzenh.
Mittlere Niederschlagssumme [mm a ⁻¹]	564	580	827	660	682	794	629
Mittlere rel. Luftfeuchte [%]	75,2	83,3	80	80*	86	85	84
Jahresmitteltemp. der Luft [°C]	9,2	9,2	9,7	9,6	8,7	9,9	8,2
Mittlere Globalstrahlung [Wh m ⁻² d ⁻¹]	2.524	2.669	2.657	2.588	3.041	2.637	2.712
Höhe über NN [m]	250	10	79	180	340	32	252

* Mittel 2007-2008

Abb. 5 gibt einen grafischen Überblick über Jahresniederschlagssumme, mittlere Jahrestemperatur sowie der Bodenpunkte an den sieben Versuchsstandorten. Die Standorte sind nach Bodenzahlen, die von links nach rechts ansteigen, geordnet. Innerhalb der Gruppe der »besseren Böden« gibt es Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten. So ist die Niederschlagssumme am Standort *Haus Düsse* über 200 mm höher als in *Dornburg*. Die Standorte *Haus Düsse* und *Rauischholzhausen* mit etwas schlechteren Bodeneigenschaften als *Witzenhausen* und *Straubing* zeichnen sich gegenüber diesen durch höhere Jahresmitteltemperaturen von 1,5°C aus. Die Standorte *Dornburg* und *Gülzow* weisen von allen Standorten die geringsten jährlichen Niederschläge und mittleren relativen Luftfeuchtgehalte auf, wobei in *Gülzow* relativ schlechte Bodenkenntwerte hinzukommen. Der Standort *Werlte* zeichnet sich durch hohe jährliche Niederschläge, aber durch die niedrigsten Bodenpunkte aus. Damit herrschen an den Standorten *Dornburg*, *Gülzow* und *Werlte* die schlechtesten Wachstumsbedingungen unter den Standorten, während an den Standorten *Witzenhausen*, *Straubing* und *Haus Düsse* gute Bedingungen vereinigt sind. In *Witzenhausen* ist die Durchschnittstemperatur mit 8,2°C am ge-

ringsten, dafür liegen hier die besten Bodeneigenschaften vor. *Straubing* weist die höchste Globalstrahlung und mittlere Bodeneigenschaften auf.

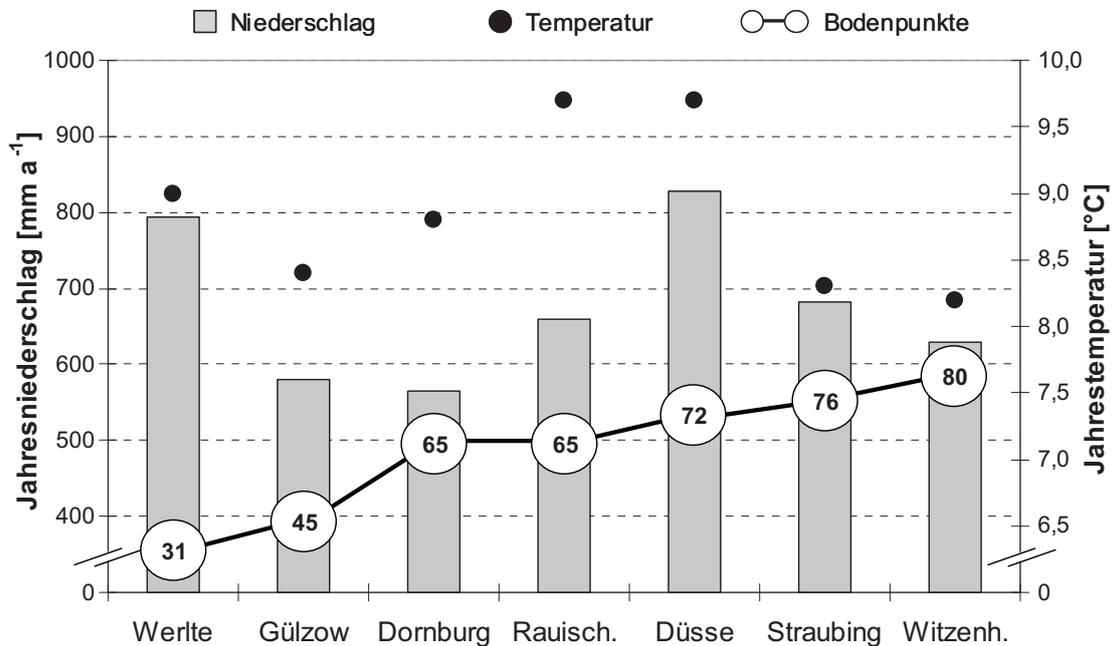


Abb. 5: Mehrjährige Niederschlagssummen, mittlere Jahrestemperaturen und Bodenpunkte der sieben Versuchsstandorte; sortiert nach Bodenpunkten.

Temperatursummen

Zur Charakterisierung der Ansprüche von Kulturpflanzen an die Wärmeversorgung, kann die Temperatursumme der Tagesdurchschnittstemperaturen über einem bestimmten Basiswert herangezogen werden. Die Temperatursummen wurden für Mais und Sonnenblumen in der HFN und ZKN in Anlehnung an BONHOMME ET AL. (1994) mit dem Basiswert von 6°C wie folgt berechnet:

$$\Sigma \text{Temp} = \sum_{i=1}^n \left\{ \left(\frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} \right) - 6 \right\}$$

ΣTemp	:	Temperatursumme [°C d]
T_{\max}	:	Tagesmaximum [°C]
T_{\min}	:	Tagesminimum [°C]

Die Temperatursumme von n -Tagen ergibt sich aus der Summe der über dem Basiswert liegenden Tagesmitteltemperaturen abzüglich der Basistemperatur. So ist über die Temperatursumme zum einen eine Bewertung der Versuchsjahre und Standorte möglich, zum anderen kann sie zur Interpretation der erzielten Erträge in den beiden Anbausystemen dienen. Ähnlich kann mit den Niederschlägen während der Wachstumszeit verfahren werden.

Niederschlagssummen

Analog den Temperatursummen wurden von der Saat bis zur Ernte die täglichen Niederschläge addiert und eine Niederschlagssumme für die in beiden Anbausystemen vertretenen Kulturen Mais und Sonnenblumen erstellt.

2.1.4 Praxisübliche Erträge und Fruchtfolgen

Um die Ergebnisse der drei Versuchsjahre bewerten zu können, wurden diese mit üblichen Fruchtfolgen und Erträgen der Standorte verglichen, die in **Tab. 4** und **Tab. 5** dargestellt sind. An den Standorten *Dornburg*, *Straubing*, *Werlte* und *Witzenhausen* wird in der Regel eine wendende Bodenbearbeitung vorgenommen. In *Gülzow*, *Haus Düsse* und *Rauischholzhausen* wird je nach Fruchtfolgeglied und Bodenbeschaffenheit weitgehend auf eine Pflugfurche verzichtet (**Tab. 4**). Auf allen Standorten ist üblicherweise Winterweizen in den Fruchtfolgen vertreten. In *Haus Düsse*, *Rauischholzhausen*, *Straubing* und *Witzenhausen* sind auch Zuckerrüben in die Fruchtfolgen integriert, was auf relativ gute Bodeneigenschaften dieser Standorte hindeutet. Ein Vergleich mit mittleren Fruchtfolgen und Erträgen der Standorte erhöht die Aussagekraft der Untersuchungen für eine Beratung bzw. Empfehlungen.

Tab. 4: Fruchtfolgen und Bodenbearbeitung an den Versuchsstandorten bzw. in ihrer unmittelbaren Umgebung. (Quelle: Angaben der Versuchsansteller 2008)

Standort	Übliche Fruchtfolgen und Bodenbearbeitung
Dornburg	Ra-WW-SG; WW-WG-SG Grundbodenbearbeitung wendend
Gülzow	WW-WW-Ra; WW-WG-Ra; 60-65% Pflug ; 30-35% pfluglos
Haus Düsse	ZR-WW-WG, Zwischf.-Senf; Ra-WW-WG, Grünroggen-SM-WW-WG; SM-WW-WG-Feldgras; Pfluglos 70%; Pflug 30%;
Rauschholzhausen	Ra-WW-WW-Erbsen-WG; ZR-WW-Blattfrucht (Leguminose/Ra)-WW Grundbodenbearbeitung 70% pfluglos, 30% Pflug
Straubing	Ka-WW+Zwischenf.-Senf-ZR Grundbodenbearbeitung mit Pflug
Werlte	KöM-WW-WW/WG; Ra-WW-WG; SM/KöM-SM/KöM-Ka Grundbodenbearbeitung i.d.R. mit Pflug; teilweise Mulchsaat
Witzenhausen	ZR-WW-WW/WG; Ra-WW-WG/Tri; SM-WW-WG/Tri Grundbodenbearbeitung mit Pflug, zunehmend Mulchsaat, insbesondere auf flachgründigen Böden bzw. in Fruchtfolgen ohne Zuckerrüben

WW = Winterweizen; WG = Wintergerste; Tri = Wintertriticale; SG = Sommergerste;
Ra = Winterraps; SM = Silomais; KöM = Körnermais; ZR = Zuckerrüben; Ka = Kartoffeln

In **Tab. 5** sind ortsübliche Erträge der wichtigsten Kulturpflanzen gemäß den Angaben der Versuchsansteller dargestellt. Hier werden zum einen die Unterschiede im Ertragsniveau zwischen den Standorten deutlich, zum anderen ist in Verbindung mit Kenngrößen der Bodengüte und Witterung zu erkennen, dass auch auf leichten Böden bei ausreichenden Niederschlägen und hohen Temperaturen gute Erträge erzielt werden können, wie beispielsweise durch Mais am Standort *Werlte*. Jedoch sind an diesem Standort große Spanne in den Erträgen zu verzeichnen, d. h. die Ertragssicherheit kann als gering betrachtet werden. An den Standorten *Dornburg*, *Gülzow* und *Witzenhausen* sind die Winterungen sehr ertragstark, während in *Werlte*, *Straubing* und *Haus Düsse* die Sommerungen ein bedeutenderes Ertragspotenzial aufweisen. Generell sind in der Standortgüte (Bodenpunkte, vgl. **Tab. 2**, **Abb. 5**) größere Unterschiede als bei den erwirtschafteten Erträgen zu beobachten. Dies hängt wohl mit kompensierenden Faktoren wie hohen Niederschlägen trotz geringer Bodenpunkte und nFKWe (*Werlte*) sowie mit den variablen Produktionsfaktoren Düngung, Pflanzenschutz etc. zusammen. Als Gründe für die guten bis sehr guten Getreide- und die relativ geringen Silomaiserträge

am Standort *Dornburg* können die guten Bodeneigenschaften und die geringen sommerlichen Niederschläge angesehen werden. Auch in *Gülzow* und *Witzenhausen* scheinen die Winterungen im Vergleich zu anderen Standorten einen besseren Stand zu haben als die Sommerung Mais, was in diesem Fall den niedrigen mittleren Jahrestemperaturen zuzuschreiben ist.

Tab. 5: Übersicht über die TM-Erträge und ihrer Spannweiten an den Versuchsstandorten bzw. in ihrer unmittelbaren Umgebung. (Quelle: Angaben der Versuchsansteller 2008)

	Dornburg	Gülzow	Haus Düsse	Rauisch.	Straubing	Werlte	Witzenh.
Winterweizen (t ha ⁻¹ ; 86% TS)	10,2 8,6-11,5	9,8 7,3-11,5	9,0 8,0-10,0	8,5 8,0-9,2	9,5 7,5-10,5	7,2 4,0-8,5	9,0 7,8-10,0
Wintergerste (t ha ⁻¹ ; 86% TS)	9,7 8,9-10,2	8,3 7,3-11,5	8,0 7,0-9,0	8,0	8,0 6,5-9,0	6,2 4,0-7,5	8,5 7,5-9,0
Winterroggen (t ha ⁻¹ ; 86% TS)	9,1 7,9-10,5	9,0 7,9-10,4	8,0 7,0-9,0	7,5 6,5-8,0	8,5 7,5-9,5	5,8 4,5-7,0	8,9 8,3-9,4
Winterraps (t ha ⁻¹ ; 91% TS)	4,4 4,1-5,1	5,5 4,7-6,0	4,0 3,0-5,0	4,5 4,3-4,9	4,0 3,0-5,3	3,3 2,0-4,5	4,3 4,0-5,0
Silomais (t ha ⁻¹)	15,5 15,0-16,0	17,2 16,2-18,5	17,0 15,0-20,0	18,5	17,0 15,0-21,0	17,7 13,0-20,0	15,0 13,8-17,0

Die in **Tab. 5** aufgeführten Erträge sind Erfahrungswerte der Versuchsansteller, die für die Bewertung der relativen Vorzüglichkeit von Winterungen bzw. Sommerungen sowie für die Ertragspotenziale von Bedeutung sind. Um die eigenen Ergebnisse der drei Versuchsjahre, deren Witterungsverhältnisse sehr unterschiedlich waren, besser bewerten zu können, sind in **Tab. 6** die Erträge von Energie- bzw. Silomais der jeweiligen Landessortenversuche der beteiligten Bundesländer aufgeführt. Aus **Tab. 6** lässt sich ableiten, dass die Erträge von Mais der hier durchgeführten konventionellen HFN im ersten Versuchsjahr 2006 in allen Landessortenversuchen außer in Mecklenburg-Vorpommern (*Gülzow*) am geringsten ausfielen. Die Erträge des zweiten Versuchsjahres 2007 waren in vier der sechs Bundesländer am höchsten und das dritte Versuchsjahr ist im Ertragsniveau in der Mitte einzuordnen.

Tab. 6: TM-Erträge in t TM ha⁻¹ von Energie- bzw. Silomais der Landessortenversuche der beteiligten Bundesländer in den drei Versuchsjahren.

	2006	2007	2008
Thüringen¹ (Dornburg)	17,6 (Mittelfrühe Sorten)	21,9 (Mittelfrühe Sorten)	21,2 (Mittelfrühe Sorten)
Mecklenburg-Vorpommern² (Gülzow)	21,0 (Energiemais)	23,1 (Energiemais)	19,7 (Energiemais)
Nordrhein-Westfalen³ (Haus Düsse)	20,0 (Energiemais)	22,7 (Energiemais)	23,4 (Energiemais)
Hessen⁴ (Rauisch., Witzenh.)	18,1 (Silomais)	22,4 (Silomais)	21,6 (Silomais)
Bayern⁵ (Straubing)	20,3 (Energiemais)	23,0 (Energiemais)	22,4 (Energiemais)
Niedersachsen⁶ (Werlte)	20,1 (Energiemais)	21,2 (Energiemais)	22,7 (Energiemais)

Quellen: 1: TLL 2008 2: LWK MV 2009a,b,c 3: LWK NW 2009 4: LLH 2008 5: LfL 2009a,b,c 6: LWK N 2009

2.2 Versuchsaufbau

Dieses Projekt beinhaltet den Vergleich von zwei Anbau- und Bereitstellungs-konzepten, die in einem Feldversuch an sieben Standorten im gesamten Bundesgebiet durchgeführt wurden. Um einen Vergleich zur ZKN zu ermöglichen, wurde auch die übliche HFN in den Versuch aufgenommen. Als Winterung wurde Energie-Roggen (WR-Energie) zur Ganzpflanzensilierung und auch zur Körnergewinnung angebaut (WR-Brot). Dieser in der Vollreife geerntete Brot-Roggen kann neben seinen Marktfrüchten auch als Trockengut mit Korn und Stroh zur BtL-Herstellung oder anderen thermischen Wandlungswegen dienen.

Als sommerannuelle Kulturen wurden nach der abfrierenden Zwischenfrucht Senf, Mais und Sonnenblumen mit jeweils zwei Sorten als Energiepflanzen in der HFN angebaut. In **Abb. 6** sind die Saat- und Erntetermine in den beiden Anbausystemen im Jahresverlauf dargestellt. In der ZKN ist der Erntezeitraum der Erstkulturen und der anschließende Saatzeitraum der Zweitkulturen zeitlich sehr eng begrenzt. Dafür wird im Gegensatz zum An-

bau einer Sommerung in der HFN die Winterperiode durch eine winterharte Frucht genutzt. Die Ernte der Zweitfrucht erfolgt in der Regel kurz vor dem Auftreten des ersten Frostes und damit später als in der HFN.

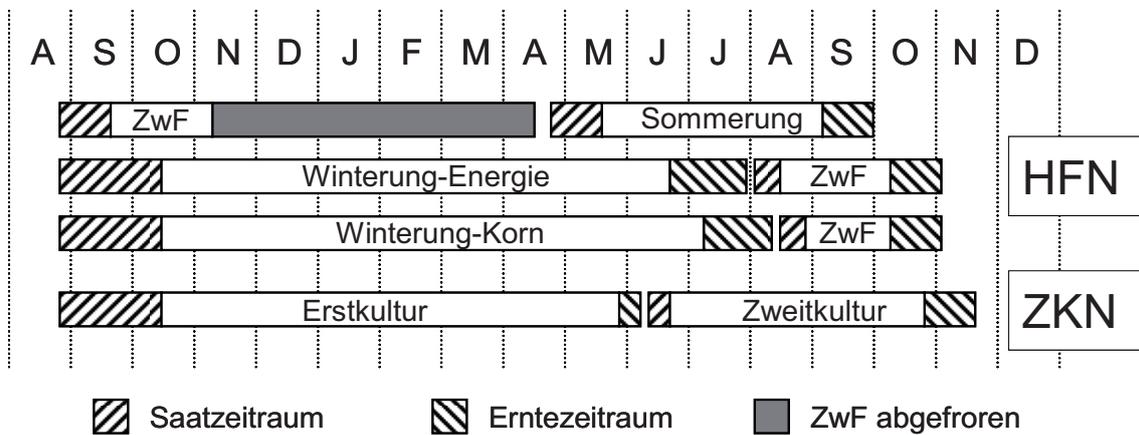


Abb. 6: Saat-, Vegetations- und Erntezeiten des Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystems. ZwF=Zwischenfrucht (Senf)

In **Abb. 7** ist die Versuchsanordnung einer der beiden Wiederholungen dieses randomisiert angelegten Feldversuches dargestellt. Die Parzellengröße betrug 18 m^2 . Wie bereits vorgestellt, erfolgt in der ZKN nach dem Anbau von Winterkulturen (Erstkulturen), die Ende Mai bis Anfang Juni nahe dem höchsten Gesamtpflanzenenertrag geerntet und einsiliert werden, der Anbau von sommerannuellen Zweitkulturen.

Als Erstkulturen fiel die Wahl auf Winterrüben (WRü) (*Brassica rapa* L. subsp. *oleifera* (DC.) Metzger), Winterroggen (WR) (*Secale cereale* L.), Winterroggen/Wintererbsen (WR/WE) (*Pisum sativum* L.)-Gemenge sowie Winterroggen/Wintergersten-Gemenge (WR/WG) (*Hordeum vulgare* L., sensu lato). Als Erstkultur bzw. Hauptfrucht wurde WR verwendet, da sich dieser durch eine Anspruchslosigkeit in Bezug auf Boden und Klimaverhältnisse auszeichnet (GEISLER 1988, BAEUMER 1992). Des Weiteren besitzt WR eine hohe Frosttoleranz und durchläuft im Frühjahr eine rasche Entwicklung und kann so Unkräuter wirkungsvoll unterdrücken (GEISLER 1988, BAEUMER 1992). Die als Erstkultur angebaute Futterroggen-Sorte 'Vitallo' zeichnet sich

durch eine besondere Massenwüchsigkeit aus, was einen Anbau ohne Herbizide ermöglicht. Auf reine Wintererbsen als Erstkultur wurde verzichtet, da diese aufgrund der Empfindlichkeit gegenüber längeren Frostperioden sowie Staunässe nicht auf allen Standorten anbaufähig sind (KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000).



Abb. 7: Übersicht über die Versuchsanlage einer der beiden Wiederholungen (Blöcke) mit Großteilstücken (GS) und der vollständigen Variantenliste.

Bei dem verwendeten WR/WE-Gemenge als Erstkultur können Ausfälle der WE durch den Gemengepartner WR ausgeglichen werden. Bei guten Bedingungen kann die Leguminose ihren direkten Beitrag zum Ertrag bzw. ihren Vorfruchtwert leisten. Als Zweitkulturen folgten dann nach WRü, WR und WR/WE jeweils Mais (*Zea mays* L.), Sorghum-Hybride (*Sorghum bicolor* (L.)

Moench), Sonnenblumen (*Helianthus annuus* L.) sowie die alternierende Aussaat eines Mais/Sonnenblumen-Gemenges. Nach WR/WG standen dann als Zweitkulturen Sudangras-Hybride (*Sorghum bicolor* × *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf ex Prain), Amarant (*Amaranthus hypochondriacus* L./ *A. cruentus* L.), Hanf (*Cannabis sativa* L.) und ein Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenge, in dem Mais und Sonnenblumen in getrennten Reihen gedrillt und der Amarant mit einer Drillmaschine ganzflächig ausgesät wurde. Im Folgenden werden für Sorghum-Hybride und Sudangras-Hybride die kürzeren Formen Sorghum und Sudangras verwendet. Bei Mais, Sorghum, Sudangras und Amarant handelt es sich um C₄-Pflanzen, welche über eine effizientere Photosyntheseleistung und damit über eine bessere Wasser- und Stickstoffverwertung verfügen als C₃-Pflanzen. Dies ist zum einen auf die CO₂ Speicherung als Malat, was der Photosynthese ermöglicht, bei geschlossenen Spaltöffnungen zu arbeiten und zum anderen auf die verminderte Photorespiration im C₄-Stoffwechsel zurück zu führen (MOORE 1982, NULTSCH 1986, BROWN 1987, OAKS 1994). Da mit einer Temperaturerhöhung auch die Photorespiration ansteigt (FOCK ET AL. 1979, MARK & TEVINI 1997) und die Aktivität des CO₂-fixierenden Enzyms in C₃-Pflanzen sinkt (SAMARAS ET AL. 1988), weisen C₄-Pflanzen bei hohen Temperaturen höhere Nettphotosynthesen auf als C₃-Pflanzen (CANVIN ET AL. 1980, OBERHUBER & EDWARDS 1993). Obwohl es sich bei der Sonnenblume um eine C₃-Pflanze handelt, erreicht sie im Jugendstadium mit Netto-Photosyntheseleistungen zwischen 40 und 50 mg CO₂ dm⁻² h⁻¹ (HESKETH 1963, ENGLISH ET AL. 1979, FOCK ET AL. 1979) ähnliche Werte wie C₄-Pflanzen (HUGGER 1989). Die nötige Keimtemperatur von Sonnenblumen liegt wie bei Mais bei 8-9°C (DIEPENBROCK 1987). Eine Übersicht über die Sorten gibt **Tab. 7** im folgenden Kapitel.

Um eine Auswertung des Versuches über alle Standorte und Jahre durchführen zu können, wurde der Versuch an allen Standorten und in allen Jahren in gleicher Weise angelegt und durchgeführt. Gleichzeitig erhielten alle Standorte das Saatgut aus demselben Vermehrungsanbau. Im Rahmen der N-

Düngung erfolgte eine Anpassung an die regionalen Gegebenheiten, welche unter 2.3.2 dargelegt sind.

2.3 Bewirtschaftungsmaßnahmen

2.3.1 Bodenbearbeitung und Saat

Winterungen

In allen Versuchsjahren war Weizen die Vorfrucht und die Grundbodenbearbeitung erfolgte mit einer Scheibenegge und anschließender Pflugfurche. Die Saatbettbearbeitung erfolgte mit einer Kreiselegge. Die Getreidearten sowie Winterrüben und Senf wurden mit einer Parzellensämaschine in 10 Reihen mit 13,5 cm Reihenabstand gesät.

Sommerungen

Nach Abfrieren des Senfs (HFN) bzw. nach der Ernte der Erstkulturen (ZKN) erfolgte eine pfluglose flache Bodenbearbeitung mit einer Scheibenegge. Senf, Sudangras, Hanf und Amarant wurden mit oben genannter Parzellensämaschine gesät. Mais, Sonnenblumen und Sorghum wurden mit einer Einzelkorndrillmaschine mit 75 cm Reihenabstand ausgebracht. Um eine möglichst exakte Bestandesdichte zu erreichen, erfolgte bei den Sommerungen eine um 20% höhere Saatstärke mit anschließender manueller Vereinzlung. **Tab. 7** gibt einen Überblick über die einzelnen Sorten und Saatstärken bzw. Bestandesdichten. Aufgrund der unterschiedlichen Maschinenausstattung der einzelnen Versuchsstandorte wichen die Bodenbearbeitung und Saattechnik teilweise voneinander ab. Für die Erstkulturen wurde die Grünroggensorte ‘*Vitallo*’ verwendet, die eine üppige Massenbildung in der Jugendphase aufweist (BSA 2009). In beiden Nutzungssystemen wurde die Energiemaissorte ‘*Aletico*’ verwendet. Hierbei handelt es sich um eine mittelspäte Sorte mit der Reifezahl S 280 und sehr hohem Gesamttrockenmassepotenzial (BSA 2009).

Die Sorte zeichnet sich laut Züchter durch eine schnelle Jugendentwicklung, Standfestigkeit und geringer Anfälligkeit gegenüber Stängelfäule aus (KWS 2008).

Tab. 7: Übersicht über die Sorten, Stämme und Saatstärken bzw. Zielbestandesdichten der angebauten Kulturarten in keimfähigen Körner m⁻² bzw. kg ha⁻¹ in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung.

Hauptfrucht-Nutzung			
Winter	Sommer	Sorte	Saatstärke Zielbestandesdichte
Senf		<i>Setoria</i>	25 kg ha ⁻¹
	Mais	<i>Atletico (So. 1), KXA 5243¹/5233² (2006), KXA 7132 (2007), KXA 7211 (2008)</i>	10 K m ⁻²
	Sonnenblumen	<i>Methasol (So. 1), Alisson (So. 2)</i>	10 K m ⁻²
WR-Energie		<i>Balistic (So. 1), LPH 76 (2006) Evolu (2007) LPH 88 (2008)</i>	250 K m ⁻²
	Senf	<i>Setoria</i>	25 kg ha ⁻¹
WR-Brot		<i>Visello (So. 1), Rasant (So. 2)</i>	250 K ha ⁻¹
	Senf	<i>Setoria</i>	25 kg ha ⁻¹
Zweikultur-Nutzung			
Winter	Sommer	Sorte	Saatstärke Zielbestandesdichte
WRü		<i>Lenox</i>	75 K m ⁻²
WR		<i>Vitallo</i>	250 K m ⁻²
WR/WE		<i>Vitallo/EFB33</i>	170 / 25 K m ⁻²
	Mais	<i>Atletico</i>	10 K m ⁻²
	Sorghum	<i>Róna 1</i>	25 K m ⁻²
	Sonnenblumen	<i>Methasol</i>	10 K m ⁻²
	Mais/Sonnenblumen	<i>Atletico/Methasol</i>	5 / 5 K m ⁻²
WR/WG		<i>Vitallo/Lomerit</i>	80 / 200 K m ⁻²
	Sudangras	<i>Susu</i>	25 kg ha ⁻¹
	Amarant	<i>Bärnkrafft</i>	0,45 kg ha ⁻¹
	Hanf	<i>Futura</i>	400 K m ⁻²
	Mais/Sonnenblumen/ Amarant	<i>Atletico/Methasol/ Bärnkrafft</i>	5 / 5 K m ⁻² / 0,2 kg ha ⁻¹

So.: Sorte WR: Winterroggen WRü: Winterrübsen WE: Wintererbsen WG: Wintergerste K: Körner
¹ an den Standorten mit wärmeren Jahresmitteltemperaturen
² an Standorten mit kühleren Jahresmitteltemperaturen

In der HFN wurde zusätzlich in jedem Jahr ein neuer aktueller Mais-Stamm getestet. Bei der Sonnenblumensorte ‘*Methasol*’ handelt es sich um eine speziell für die Biogasproduktion gezüchtete Sorte, die sich durch extremes »stay green« auszeichnet und auf Standorten mit guter Wasserversorgung Höchst-erträge erzielt (KWS 2008). Die Sorte ‘*Alisson*’ ist hingegen frühreifer. Die Sorghumsorte ‘*Róna 1*’ wird als eine hochwachsende Sorte, die ursprünglich zur Fütterung gezüchtet wurde, ausgewiesen.

In **Tab. 8** sind die angestrebten Erntereifegrade dargestellt. In der HFN werden Mais und Sonnenblumen in der Teigreife (BBCH 85) geerntet, während dieser Reifegrad bei den Zweitkulturen nicht erreicht wird. Die Erstkulturen sollten mindestens die Milchreife (BBCH 75) erreichen bevor sie geerntet werden, wobei die Ernte spätestens Anfang Juni erfolgen muss, damit den Zweitkulturen ausreichend Vegetationszeit verbleibt.

Tab. 8: Angestrebte Reifegrade zur Ernte (BBCH-Stadien) der Kulturpflanzen in beiden Anbausystemen.

Hauptfrucht-Nutzung		Zweikultur-Nutzung			
Hauptfrüchte		Erstkulturen		Zweitkulturen	
Mais	BBCH 85	WRü	ab BBCH 75	Mais	BBCH 83
Sonnenblumen	BBCH 83	WR		Sonnenblumen	
WR-Energie	BBCH 81	WR/WE		Sorghum	
WR-Brot	BBCH 92	WR/WG		Sudangras	

WRü: Winterrüben WR: Winterroggen WE: Wintererbsen WG: Wintergerste

2.3.2 Nährstoffversorgung

Erfolgt der Anbau von Energiepflanzen für die Verwertung in einer Biogasanlage, so kann der N-Bedarf weitgehend durch die Rückführung der Gärreste auf die Flächen gedeckt werden (geschlossener Nährstoffkreislauf). Da die angebauten Pflanzen in diesem Versuch nicht vergoren wurden und auch eine Belieferung aller Versuchsstandorte mit einem einheitlichen Gärrest nicht rea-

lisierbar war, wurde die N-Düngung in diesem Versuch komplett in mineralischer Form verabreicht. Aber auch durch die Integration von Leguminosen kann ein Nährstoffeintrag erfolgen, um auf mineralische Dünger zu verzichten, deren Produktion sich negativ auf die Energie- und CO₂-Bilanz auswirkt (HALL & HOUSE 1995).

Ziel im Anbau von Biomasse zur energetischen Verwertung ist es, eine möglichst nährstoffarme Biomasse bereitzustellen, Nährstoffkreisläufe zu schließen und Verluste zu minimieren. Die im Nahrungs- und Futtermittelanbau gängige Düngepraxis kann daher aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsziele lediglich als Anhaltspunkt dienen. Da es für den Anbau von Energiepflanzen und vor allem in einer ZKN keine Vorgaben zur Höhe der N-Düngung gibt, wurde ein eigenes Düngekonzept erarbeitet, das im Folgenden erläutert wird.

In dem N-Düngekonzept wurden folgende allgemeine Zielsetzungen festgelegt:

- I. Angestrebt wird für die Menge an Grundnährstoffen in den Böden die Versorgungsstufe C.
- II. Die übliche Vorratsdüngung mit Phosphor und Kalium alle 3–4 Jahre sollte nicht unmittelbar vor der Saat einer Energiepflanze ausgebracht werden, sondern besser zu einem anderen Fruchtfolgeglied, um hohe Nährstoffgehalte im Erntegut zu vermeiden. Besonders diese Nährstoffe beeinflussen die Biomassequalität für die thermische Verwertung negativ (STÜLPNAGEL 1998).
- III. Beim Energiepflanzenanbau sollten die zuvor entzogenen Nährstoffe über Gärreste bzw. Aschen auf die Anbauflächen zurückgeführt werden. Eine angemessene Nährstoffrückführung und ausgeglichene Nährstoffbilanzen sowie die Reduktion von Nährstoffverlusten stellen auch für die Düngung von Energiepflanzen die wesentlichen Ziele dar.

IV. Die Nährstoffversorgung sollte sich auf die Jugendentwicklung der Pflanzen konzentrieren und zur physiologischen Reife hin stark vermindert werden, um eine möglichst nährstoffarme Biomasse zu ernten. Dabei soll die Düngergabe jedoch den Biomasseaufbau nicht beschränken, sondern lediglich von der optimalen Versorgung in der Jugendphase so weit zurück gefahren werden, dass sich die Pflanzen vor der Ernte in einem latenten Mangel befinden (**Abb. 8**). Eine vergleichbare Düngestrategie wird beim Anbau von Zuckerrüben angewandt, um hohe bereinigte Zuckererträge zu erzielen.

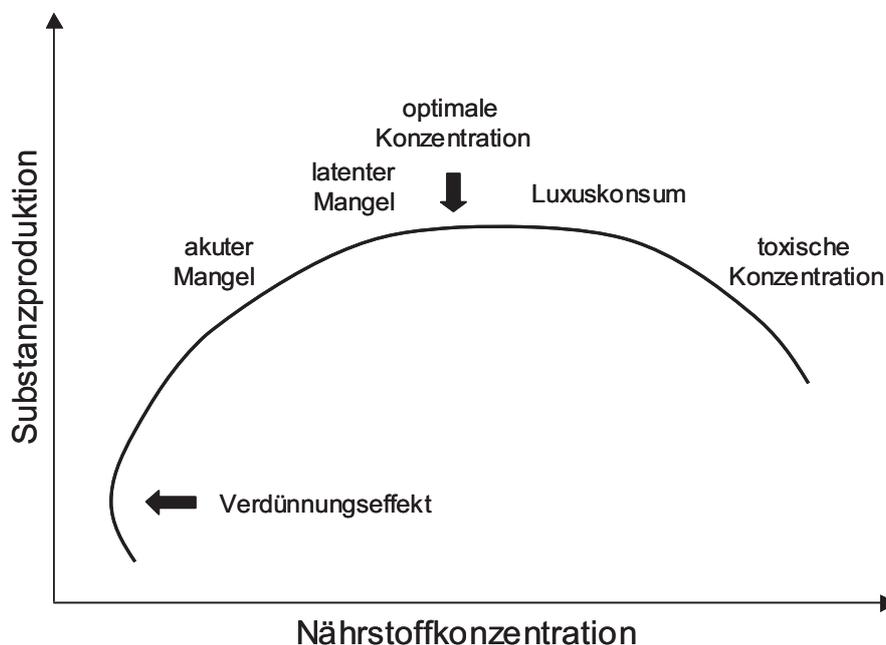


Abb. 8: Prinzipzeichnung zum Einfluss der Konzentration an Nährelementen in der Pflanze auf die Substanzproduktion als Basis für eine Düngestrategie für Energiepflanzen. (Quelle: Marschner 1995, verändert)

V. Das Nährstoffangebot sollte an die verminderte Ertragsleistung angepasst werden, welche aufgrund der vorgezogenen Ernte (Erstkultur) und der verkürzten Wachstumszeit (Zweitkultur) zu erwarten ist.

Die Höhe der N-Gaben an den verschiedenen Versuchsstandorten orientierte sich an den Sollwerten der jeweiligen Kulturpflanzen in den entspre-

chenden Bundesländern. **Tab. 9** gibt ein Beispiel für die einheitlichen Abschläge und die ausgebrachten N-Mengen am Standort *Witzenhausen* (Hessen).

Tab. 9: Höhe der Abschläge für Energiepflanzen und die angepassten N-Sollwert-Düngermengen in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung.

Hauptfrucht-Nutzung			
Winter	Sommer	N-Abschlag [kg N ha⁻¹]	N-Düngung [kg N ha⁻¹]
Senf		0	60
	Mais	0	200
	Sonnenblumen	0	150
WR-Energie		- 20	160
	Senf	0	60
WR-Brot		0	180
	Senf	0	60
Zweikultur-Nutzung			
Winter	Sommer	N-Abschlag [kg N ha⁻¹]	N-Düngung [kg N ha⁻¹]
WRü		- 40	200
WR		- 40	140
WR/WE		- 90	90
	Mais	- 40 ¹ - 60 ²	160 ¹ 140 ²
	Sorghum	- 40 ¹ - 60 ²	130 ¹ 110 ²
	Sonnenblumen	- 40 ¹ - 60 ²	110 ¹ 90 ²
	Mais/Sonnenblumen	- 40 ¹ - 60 ²	135 ¹ 115 ²
WR/WG		- 40	140
	Sudangras	0	130
	Amarant	0	80
	Hanf	- 40	120
	Mais/Sonnenblumen/ Amarant	- 40	135

WR: Winterroggen, WRü: Winterrüben, WE: Wintererbsen, WG: Wintergerste, K: Körner
¹ nach Winterrüben und Winterroggen ² nach Winterroggen/Wintererbsen

Damit wurden die bereits im Boden vorhandenen Mengen an pflanzenverfügbarem Stickstoff (N_{\min}) sowie die regionalen Ertragserwartungen in den üblichen Produktionssystemen einbezogen. Basierend auf diesen länderspezifischen Sollwertkonzepten wurden einheitliche Abschläge der Nährstoffmenge vorgenommen

Die N-Versorgung sämtlicher Kulturen erfolgte mit Kalkammonsalpeter (Ammoniumnitrat + Calciumcarbonat; 27% N), wobei der Schwerpunkt der N-Düngung jeweils bei der ersten von zwei N-Gaben lag. Auf eine Qualitätsdüngung wurde verzichtet. Um eine ausreichende P-Versorgung des Mais sicherzustellen, wurden 100 bzw. 50 kg Diammonhydrogenphosphat (18% N, 46% P₂O₅) als Unterfußdüngung zur Reinsaat bzw. im Gemenge appliziert. Die hierbei mit ausgebrachten N-Mengen wurden bei der restlichen N-Gabe berücksichtigt. Bei den Sommerungen wurde der gesamte N-Bedarf mit einer Gabe (3–4 Blattstadium) ausgebracht.

2.3.3 Pflanzenschutz

Bei der Durchführung der Versuche sollte auf eine chemische Pflanzenschutzbehandlung so weit wie möglich verzichtet werden. Die Unkrautbekämpfung in den Zweitkulturen erfolgte durch zweimalige Maschinenhacke, ersatzweise durch Handhacke oder durch Jäten. Lediglich in der Variante WR-Brot wurde der praxisübliche Pflanzenschutz durchgeführt. Ebenso wurde beim WRü im Herbst ein Herbizid eingesetzt, da hier aus versuchstechnischen Gründen das Striegeln nicht möglich war.

2.4 Bodenuntersuchungen

In jedem der Versuchsjahre erfolgte zur Versuchsanlage die Bestimmung des pH-Wertes sowie der C, N, P, K und Mg-Gehalte des luftgetrockneten Oberbodens (0-30 cm) nach DIN ISO 11464, VDLUFA-Methodenbuch Bd. 1 (A. 5.1.1, A 6.2.1.1 und A 6.2.4.1). Des Weiteren wurden zu Versuchsbeginn Bodenproben bis zu einer Tiefe von 120 cm gezogen, um die Bodenart und den N_{min}-Wert zu bestimmen.

Mineralischer Bodenstickstoff (N_{min})

Zur Versuchsanlage, im Frühjahr und Herbst sowie zu den Ernten wurde der mineralische Nitrat- (NO_3) und Ammonium- (NH_4) Stickstoff nach DIN ISO 14255, VDLUFA-Methodenbuch Bd. 1 (A 6.1.4.1) bestimmt. Die Probenahme hierfür erfolgte in den Tiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm, wobei jeweils eine Mischprobe aus den beiden Wiederholungen erstellt wurde. Die Proben wurden tiefgefroren gelagert, um Mineralisationsprozesse bis zur Extraktion und anschließender Messung zu unterbinden. Die Bodenproben wurden mit einer CaCl_2 -Lösung (0,0125 Mol) extrahiert.

Im Herbst erfolgte lediglich eine erneute Probenahme, wenn mindestens 14 Tage zwischen Erntetermin und Herbst- N_{min} -Beprobungen lagen. War dies nicht der Fall, so wurde die Beprobung zur Endernte als ausreichend angesehen.

Pflanzenverfügbares Bodenwasser zur Saat

Bei jeder N_{min} -Probenahme wurde auch der Bodenwassergehalt mitbestimmt. Mit der Rohdichte wurde nach dem Methodenhandbuch-VDLUFA Bd. 1a (A 2.1.1) der Volumen-Anteil des Bodenwassers nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Vol\%} = \% \text{H}_2\text{O} \times \text{Rohdichte}$$

Das Wasservolumen des Oberbodens (0-30 cm) kann in l m^{-2} und damit in der Einheit des Niederschlags angegeben werden. Nach Subtraktion des Totwassers verbleibt das pflanzenverfügbare Bodenwasser. Hiermit konnte das pflanzenverfügbare Wasser zur Saat der Sommerungen in Prozent der nFK ermittelt werden. Vor allem die spätere Saat der Zweitkulturen Anfang Juni geht oft mit trockenen Perioden einher und die Erstkulturen haben dem Boden zusätzlich Wasser entzogen. Das zum kritischen Zeitpunkt der Saat der Zweitkulturen vorhandene Bodenwasser kann für ein zügiges Auflaufen und eine gute Jugendentwicklung ausschlaggebend und damit gegebenenfalls auch ertragsbeschränkend sein (EHLERS 1996).

2.5 Pflanzenuntersuchungen

2.5.1 Bonituren

Das phänologische Entwicklungsstadium (BBCH-Stadium) der Kulturpflanzen wurde wöchentlich erhoben, um dieses an allen Standorten in einer zeitlichen Abfolge darstellen zu können und um andere Bonituren durch zu führen.

Das Untersuchungsprogramm umfasste die Erhebung von Witterungsdaten, Erfassung der Biomasserträge einschließlich der TS- und Nährstoffgehalte des Pflanzenmaterials. **Tab. 10** gibt einen Überblick über die erhobenen Bonituren bzw. Analysen.

Tab. 10: Erhobene Bonituren und Analysen sowie deren Termine.

Parameter	Termine
BBCH Stadien	wöchentlich
Biomasse Endernte: FM, %TS, TM	1 Termin
N _{min} 0 – 90 cm (NO ₃ + NH ₄), H ₂ O	zur Aussaat; zu den Ernten, Herbst, vor Winter
pH-Wert, P, K, Mg	einmalig zu Versuchsbeginn
Niederschlag, Lufttemperatur, Einstrahlung.	täglich
Rohasche, Rohfett, Rohprotein, Rohfaser, NfE, NDF, ADF, ADL, Stärke, Gesamtzucker	zur Endernte
N _t , P, K, Mg, S, Ca, Cl, Na; Heizwert, Brennwert	zur Endernte

2.5.2 Ernte und Ertragsbestimmung

Für die Ermittlung der TS-Gehalte erfolgte eine Trocknung des Pflanzenmaterials bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz (VDLUFA-Methodenhandbuch Bd. 1a, 1991, A 2.1.1).

Bei der Ernte wurde die Frischmasse (FM) oberhalb 15 cm ganzer Parzellen sowie der TS-Gehalt bestimmt und die TM-Erträge pro Hektar errechnet. Hierfür wurden immer mittlere Parzellen beerntet, wobei die »Köpfe« dieser

vorher entfernt wurden, um Randeffekte auszuschließen. Für die Bewertung der beiden Anbausysteme wurden die Jahreserträge von Mais (*'Atletico'*) und Sonnenblumen (*'Methasol'*) in der HFN und der ZKN angebaut. In der HFN setzten sich die Jahreserträge aus der Zwischenfrucht Senf und den Hauptfrüchten Mais bzw. Sonnenblumen zusammen. Die Zwischenfrucht Senf wurde hier in den Jahresertrag einbezogen, um die potentielle Biomasseproduktion der Anbausysteme miteinander vergleichen zu können. In der Praxis kann je nach Ertrag und TS-Gehalt entschieden werden, ob die Zwischenfrucht gerntet wird oder als Gründüngung dient. In der ZKN wurden für die Bewertung von Mais und Sonnenblumen die Varianten mit WR als Erstkultur gewählt, da dieser auch in der HFN geprüft wurde. Durch den Verzicht der Einbeziehung der WR/WE-Gemenge wurden Ertragseinflüsse des Gemengepartners WE vermieden.

2.5.3 Bewertung der Gemenge

Bei den Erstkulturen erfolgte ein Vergleich der Gemenge WR/WE sowie WR/WG mit der WR-Reinsaat. Bei dem Mais/Sonnenblumen-Gemenge als Zweitkulturen konnte durch den Anbau der Reinsaaten für die Bewertung der »Land Equivalent Ratio« (LER) herangezogen werden. Der LER wurde nach MEAD & WILLEY (1980) wie folgt berechnet:

$$\text{LER}_{\text{Gemenge}} = \text{LER}_{\text{Mais}} + \text{LER}_{\text{Sonnenblumen}} = \frac{M_G}{M_R} + \frac{SB_G}{SB_R}$$

M_G	:	TM-Ertrag von Mais im Gemenge
SB_G	:	TM-Ertrag von Sonnenblumen im Gemenge
M_R	:	TM-Ertrag von Mais in Reinsaat
SB_R	:	TM-Ertrag von Sonnenblumen in Reinsaat

Durch den LER können Aussagen über die biologische Effektivität des Mais/Sonnenblumen-Gemenges als Zweitkultur auf den einzelnen Standorten gemacht werden.

2.5.4 Nährstoffgehalte

N-Gehalte

Bei jeder Ernte wurde neben anderen Nährstoffen in dem Pflanzenmaterial auch der Gesamt-N bestimmt, um in Verbindung mit dem Ertrag Rückschlüsse auf den N-Entzug ziehen zu können. Diese flossen in die N-Bilanzrechnung (2.5.6) ein. Des Weiteren wurde bei WR, Mais, Sonnenblumen, Sorghum und Sudangras der N-Gehalt des Erntegutes für eine Bewertung des N-Ernährungsstatus herangezogen. Als Bewertungsgrundlage diente hierbei der kritische N-Gehalt (N_{crit}), welcher als der minimal nötige N-Gehalt für das Erreichen des maximalen Ertrages definiert ist (ULRICH 1952). GREENWOOD ET AL. (1990) ermittelte zunächst für die Gruppen C_3 - und C_4 -Pflanzen unterschiedliche Beziehungen zwischen N_{crit} und Trockenmasseerträgen. JUSTES ET AL. (1994) sowie PLÉNET & CRUZ (1997) verfeinerten die Beziehung für Getreide [1], Mais [2] sowie Sorghum [3]. PLÉNET & LEMAIRE (2000) bestätigten diese Beziehungen empirisch für unterschiedlichste Umweltbedingungen. Während PLÉNET & LEMAIRE (2000) die Gültigkeit der Gleichung [2] für Silomaiserträge bis 22 t TM beschränkten, konnten HERRMANN & TAUBE (2004) zeigen, dass die Methode des N_{crit} bei Mais auch bei dem Einsatz von Wirtschaftsdüngern und bis zur Siloreife Gültigkeit hat. Da für Sonnenblumen keine spezifische mathematische Beziehung für N_{crit} -Gehalte vorliegt, wurde für die Bewertung der N-Versorgung die allgemeingültige mathematische Beziehung für C_3 -Pflanzen [4] nach GREENWOOD ET AL. (1990) verwendet.

WR (WR-Energie, WR als Erstkultur)

$$N_{\text{crit}} [\%] = 5,35 \times (\text{TM-Ertrag})^{-0,0442} \quad \text{wenn } 1 \text{ t ha}^{-1} \leq \text{TM-Ertrag} \leq 12 \text{ t ha}^{-1} \quad [1]$$

Mais (als Hauptfrucht und Zweitkultur)

$$N_{\text{crit}} [\%] = 3,40 \times (\text{TM-Ertrag})^{-0,37} \quad \text{wenn } 1 \text{ t ha}^{-1} \leq \text{TM-Ertrag} \leq \text{»Siloreife«} \quad [2]$$

Sorghum und Sudangras (als Zweitkulturen)

$$N_{\text{crit}} [\%] = 3,90 \times (\text{TM-Ertrag})^{-0,39} \quad \text{bis zur Blüte} \quad [3]$$

Sonnenblumen (als Hauptfrucht und Zweitkultur)

$$N_{\text{crit}} [\%] = 5,697 \times (\text{TM-Ertrag})^{-0,5} \quad \text{wenn } 1 \text{ t ha}^{-1} \leq \text{TM-Ertrag} \quad [4]$$

Der aktuelle N-Status kann durch den N-Ernährungs-Index (NNI) charakterisiert werden, welcher das Verhältnis von aktueller N-Konzentration (N_{akt}) und dem kritischen N-Gehalt [5] widerspiegelt (JUSTES ET AL. 1997, LEMAIRE & GASTAL 1997).

$$\text{NNI} = \frac{N_{\text{akt}}}{N_{\text{crit}}} \quad [5]$$

Ist der NNI-Wert < 1 , so liegt ein N-Mangel vor, bei Werten > 1 hat die Pflanze mehr Stickstoff aufgenommen, als sie aktuell zur Stoffproduktion benötigt (LEMAIRE ET AL. 1996). Unter identischen Bedingungen ist die Kulturpflanze besser in der Lage Stickstoff aufzunehmen, die einen höheren NNI-Wert aufweist (LEMAIRE ET AL. 1996). Dieser Quotient wurde in Anlehnung an LEMAIRE ET AL. (1996) und JUSTES ET AL. (1997) für die C_4 -Pflanzen Mais, Sorghum und Sudangras, sowie für die C_3 -Pflanzen WR(-Gemenge) und Sonnenblumen errechnet.

Weitere Nährstoffgehalte

Zusätzlich wurden in den Pflanzenproben die Nährstoffgehalte von P, K, Mg, S, und Cl zur Berechnung der Nährstoffaufnahmen bzw. Nährstoffentzügen ermittelt und Rückschlüsse auf den Versorgungsstand der Kulturpflanzen

gezogen. Auch für die energetische Nutzung gilt es, die Konzentrationen unerwünschter Stoffen im Erntegut zu bewerten. Die Analysen der Anionen und Kationen wurden nach VDLFA Bd. 3 (10.8.3) durchgeführt.

2.5.5 Bioenergetische Parameter

Um die energetische Verwertbarkeit der unterschiedlichen Biomassen zu bewerten, wurden verschiedene Ansätze durchgeführt. Zum einen wurden die Gesamtenergiegehalte in Form des Brennwertes und damit die Energieerträge ermittelt und zum anderen erfolgte eine Abschätzung der Biogasausbeuten. Beim diesem anaeroben Abbau organischer Substanz in Abwesenheit von anorganischen Elektronenakzeptoren, dient das organische Material als Elektronendonator und Elektronenakzeptor, wodurch CO₂ und CH₄ entsteht. Ein Großteil der chemischen Energie der organischen Substanz ist im hierbei im Endprodukt gespeichert (CLAASSEN ET AL. 1999). Da eine direkte Wandlung der Biomasse zu Biogas Vergasung nicht möglich war, wurden andere Mittel zur Abschätzung des Biogasertrages herangezogen, die im Folgenden beschrieben werden.

Bombenkalorimeter

Die Energiegehalte der unterschiedlichen Biomasse wurden auf der Basis des wasserfreien Brennwertes (DIN 51900) bestimmt. So konnten in Kombination mit den Biomasseerträgen für jede Kulturpflanzenkombination die Energieerträge pro Hektar errechnet werden.

Weender Analyse

Die Inhaltsstoffe wurden in dem auf 65°C getrockneten Pflanzenmaterial mittels einfacher und erweiterter Weender Futtermittel-Analyse bestimmt. Hierbei handelte es sich neben dem TS-Gehalt (VDLUFA Bd. 3 (3.1)) um die Gehalte an Rohprotein, Rohfaser, Rohfett, Zucker, Stärke, ADF, NDF, ADL

(DIN EN ISO 12099) und Rohasche (VDLUFA Bd. 3 (3.3.8.1)). Mit den Ergebnissen der erweiterten Weender Analyse in Verbindung mit den Verdauungskoeffizienten für Rinder (DLG 1997) unter Berücksichtigung des Entwicklungsstadiums zur Ernte wurde die Methanausbeute nach BASERGA (1998) bzw. FNR (2006) berechnet. In **Tab. 11** sind die hierbei berücksichtigten mittleren Methanausbeuten dargestellt.

Tab. 11: Mittlere Methanausbeuten von Kohlenhydraten, Protein und Fett. (Quelle: ZALF 2009, TLL 2009)

Gasausbeute Kohlenhydrate		Gasausbeute Protein		Gasausbeute Fett	
Gas [l kg oTS ⁻¹]	CH ₄ -Anteil [Vol %]	Gas [l kg oTS ⁻¹]	CH ₄ -Anteil [Vol %]	Gas [l kg oTS ⁻¹]	CH ₄ -Anteil [Vol %]
750	52,5	650	72,5	1125	80,5

Mit den Trockenmasseerträgen konnten die Methanerträge je Hektar sowie der Anteil der im Methan gespeicherten Bruttoenergie (Brennwert) bestimmt werden. Verluste durch Ernte, Silierung, Lagerung und Transport blieben hierbei unberücksichtigt.

2.5.6 N-Bilanzrechnungen

N-Flächenbilanz

Mit dem N-Gehalt des Pflanzenmaterials und dem TM-Ertrag konnten die N-Entzüge mit dem Erntegut ermittelt werden. Durch Einbeziehung der Nährstoffeinträge durch Düngung wurden Flächenbilanzsalden nach FREDE & DABBERT (1999) mit den in **Tab. 12** aufgeführten Parametern errechnet. In Anlehnung an eine bundesweite Kartierung der atmosphärischen N-Deposition nach GAUGER (2002), welcher N-Einträge zwischen 10 und 52 kg ha⁻¹ a⁻¹ angibt, ging der atmosphärische N-Eintrag mit 30 kg ha⁻¹ a⁻¹ in die Berechnung ein. Hierbei ist zu beachten, dass in der Düngeverordnung der atmosphärische N-Eintrag keine Berücksichtigung findet, da er vom Landwirt nicht

beeinflussbar ist. Die symbiotische N-Fixierung durch den Leguminosenpartner WE wurde mit $2,5 \text{ kg N t}^{-1} \text{ FM}^{-1}$ veranschlagt (LLH 2007).

Tab. 12: In der N-Bilanz berücksichtigte Ein- und Austräge.

N-Eintrag	N-Austrag
Mineraldünger	Stickstoff im Erntegut
Symbiotische N-Bindung ($2,5 \text{ kg N t}^{-1} \text{ FM}^{-1}$)	
Atmosphärischer Eintrag ($30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)	

Ein Bilanzüberschuss für Stickstoff gilt als weitgehend anerkannter Schlüsselindikator zur Dokumentation, Analyse und Bewertung landwirtschaftlicher Produktion sowie der Umweltbelastung durch N-Emissionen (BACH & FREDE 2005, GÄTH 1997, FREDE & DABBERT 1999, GRIGNANI ET AL. 2007). Die N-Zufuhr mit dem Saatgut wurde bei der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

2.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programmpaket SAS® (Statistical Analysis System) Version 9.1 (SAS®, 2002-2003). Da es sich bei der Versuchsanlage um eine Spaltanlage handelte, ist die Prozedur MIXED verwendet worden, um die Großteilstückfehler zu berücksichtigen. Der Versuchsaufbau besteht demnach aus 6 Großteilstücken innerhalb einer Wiederholung (Block), die für die Zweit- bzw. Hauptkulturen in Kleinteilstücke (Parzellen) unterteilt wurden (siehe Versuchsplan **Abb. 7**). 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 [3]. In den folgenden Modellen nach PIEPHO ET AL. (2003) sind fixe und zufällige Effekte durch einen Doppelpunkt getrennt dargestellt:

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

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

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

Behandlungsfaktor:

V : Variante (Kulturpflanzenkombination innerhalb eines Jahres)

Blockfaktoren:

St : Standort

J : Jahr

B : Block (Wiederholung)

GT : Großteilstück

Einer statistischen Auswertung unterzogen wurden die TM-Erträge, TS-Gehalte, N-Gehalte der einzelnen Kulturen (Zwischen-, Hauptfrüchte, Erst-, Zweitkulturen) sowie die Jahrestrockenmasse-, Methanerträge und N_{\min} -Werte in 0-90 cm Tiefe nach der Ernte im Boden. Da bei der Ertragsbestimmung innerhalb der Großteilstücke lediglich eine Mischprobe erhoben wurde, flossen diese Werte entsprechend gewichtet in die statistische Auswertung ein (PIEPHO 1999). Auch bei den N_{\min} - und CH_4 -Werten wurde berücksichtigt, dass diese prüfgliedweise, also aus einer Mischprobe aus den beiden WDH entstanden sind. 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 Mittelwertvergleiche 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), der Witterung wie Temperatur-, Niederschlag- und Strahlungssumme jeweils von der Saat bis zur Ernte auf den TM-Ertrag von Mais und Sonnenblumen in der HFN bzw. ZKN abschätzen bzw. bewerten zu können, wurde für jedes Anbausystem eine schrittweise Regression zur Prüfung der einzubeziehenden Einflussparameter durchgeführt. Anschließend erfolgte eine multiple Regression dieser Faktoren. Für eine Vergleichbarkeit der Koeffizienten wurden diese auf die Standardabweichungen bezogen sowie das adjustierte Bestimmtheitsmaß (r_{adj}^2) angegeben, welches die Anzahl der Einflussfaktoren berücksichtigt und damit eine Vergleichbarkeit ermöglicht.

3 Ergebnisse

Der Darstellung der Feld-, Energieerträge und weiterer Ergebnisse werden zunächst die Witterungsverläufe der drei Versuchsjahre im Vergleich zu den mehrjährigen Daten an den Versuchsstandorten und Besonderheiten und Probleme beim Anbau vorangestellt.

3.1 Witterungsverlauf

3.1.1 Vergleich zu mehrjährigen Witterungsdaten

Vegetationsperioden der Standorte

Der Dauer des Vegetationszeitraumes kommt in der ZKN durch den Anbau von zwei Kulturen eine besondere Bedeutung zu. Daher sind in **Tab. 13** die Vegetationsperioden sowie die Vegetationstage mit einer Basistemperatur über 5°C an den einzelnen Standorten in den drei Versuchsjahren dargestellt (vgl. 2.1.3).

Tab. 13: Start und Ende der Vegetationsperiode und Anzahl der Vegetationstage in den drei Versuchsjahren an den sieben Standorten.

	2006			2007			2008			06-08
	von	bis	Tage	von	bis	Tage	von	bis	Tage	Tage
Dornburg	25.3.	31.10.	214	24.3.	18.10.	208	11.4.	28.10.	196	206
Straubing	8.4.	1.11.	206	25.3.	18.10.	207	9.4.	13.11.	213	209
Witzenh.	7.4.	31.10.	216	23.3.	19.10.	218	11.4.	27.10.	198	207
Gülzow	7.4.	31.10.	206	23.3.	9.11.	228	12.4.	28.10.	200	211
Rauisch.	25.3.	9.11.	226	24.3.	18.10.	209	9.4.	27.10.	201	212
Werlte	25.3.	31.10.	217	23.3.	8.11.	227	9.4.	27.10.	198	214
H. Düsse	24.3.	16.12.	262	25.3.	11.11.	228	8.4.	27.10.	200	230
Ø	30.3.	8.11.	221	24.3.	27.10.	218	9.4.	29.10.	201	213

Im Jahr 2006 reichte die Vegetationsperiode im Mittel der Standorte bis fast Mitte November, während sie in den anderen beiden Jahren bereits Ende Ok-

tober endete. Daher zeichnete sich das Jahr 2006 im Mittel der Standorte durch die längste und das Jahr 2008 durch die kürzeste Vegetationsperiode aus. Die Standorte *Dornburg*, *Straubing* und *Witzenhausen* wiesen in den drei Versuchsjahren weniger als 210 Vegetationstage auf, während sich vor allem *Haus Düsse* und *Werlte* durch lange Vegetationsperioden von 230 und 214 Tagen auszeichneten. Die größten Unterschiede zwischen den Vegetationstagen der Standorte lagen im ersten Versuchsjahr vor, während die Anzahl der Vegetationstage im dritten Jahr lediglich um 3 Tage schwankten.

Um die Länge der Vegetationsperioden mit den mehrjährigen Witterungsdaten zu vergleichen, sind in **Tab. 14** die mittleren Temperaturen zum Start (Februar/März) sowie zum Ende (September/Oktober) im mehrjährigen Mittel und in der drei Versuchsjahren für jeden Standort gegenübergestellt.

Tab. 14: Mittlere Temperaturen zu Vegetationsbeginn (Februar/März) und Vegetationsende (September/Oktober) im mehrjährigen Mittel und in der drei Versuchsjahren an den sieben Versuchsstandorten.

	Februar / März					September / Oktober				
	mehrj.*	2006	2007	2008	06-08	mehrj.*	2006	2007	2008	06-08
Dornburg	2,9	- 0,1	5,0	3,8	2,9	11,7	14,3	10,1	10,4	11,6
Gülzow	2,8	0,5	4,9	4,5	3,3	11,9	14,9	11,0	11,6	12,5
Haus Düsse	4,1	2,8	6,1	4,9	4,6	13,0	16,8	11,7	11,6	13,4
Rauisch.	3,6	1,2	5,8	4,4	3,8	12,1	14,4	10,6	10,9	12,0
Straubing	1,2	- 0,2	5,1	3,5	2,8	11,6	13,7	10,0	10,8	11,5
Werlte	4,3	1,8	5,8	4,7	4,1	12,5	15,6	10,9	11,5	12,7
Witzenh.	2,1	0,5	5,7	4,2	3,5	10,8	14,8	10,7	11,0	12,1
Ø	3,0	0,9	5,5	4,3	3,6	11,9	14,9	10,7	11,1	12,2
Differenz zum mehrj. Mittel		- 2,1	+ 2,5	+ 1,3	+ 0,5		+ 3,0	- 1,2	- 0,8	+ 0,3

* 1998 – 2008

Im Jahr 2006 waren die mittleren Temperaturen im Februar/März auf allen Standorten außer in *Dornburg* und *Straubing* etwas höher als im mehrjährigen Mittel. Im Herbst herrschten hingegen deutlich höhere Temperaturen als im mehrjährigen Mittel, so dass hier insgesamt von einer längeren Vegetationspe-

riode ausgegangen werden kann. Die Jahre 2007 und 2008 zeichneten sich auf allen Standorten durch überdurchschnittlich hohe Temperaturen im Februar/März aus, was den Beginn der Vegetationszeit verfrüht haben dürfte. Im Herbst wurde diese hingegen von etwas niedrigeren Temperaturen als im mehrjährigen Mittel früher beendet. Im Mittel aller Standorte waren die Temperaturen sowohl im Februar/März als auch im September/Oktober etwas höher als im mehrjährigen Mittel.

In **Tab. 15** sind die Niederschlagssummen und die mittlere Jahrestemperaturen der drei Versuchsjahre auf allen Standorten im Vergleich zu den mehrjährigen Mittelwerten dargestellt. Das erste Versuchsjahr 2006 zeichnete sich durch unterdurchschnittliche Niederschläge und überdurchschnittliche Temperaturen aus. Besonders deutlich war dies in *Dornburg* ausgeprägt. Hier lagen die Niederschläge mit 486 mm etwa 80 mm unter dem mehrjährigen Mittel.

Tab. 15: Niederschlagssummen und mittlere Temperaturen der Luft in den drei Versuchsjahren an den sieben Standorten im Vergleich mit den mehrjährigen Mittelwerten.

	Niederschlag [mm a ⁻¹]					Mittlere Temperatur [°C]				
	mehrj.*	2006	2007	2008	06-08	mehrj.*	2006	2007	2008	06-08
Dornburg	564	486	777	547	603	9,2	9,4	9,8	9,4	9,5
Gülzow	580	651	862	533	682	9,2	9,9	10,1	10,0	10,0
Haus Düsse	827	614	1018	640	757	9,7	11,3	10,9	10,4	10,9
Rauisch.	660	548	849	563	644	9,6	9,7	10,3	9,9	9,8
Straubing	682	752	816	700	755	8,7	8,8	9,6	9,3	9,3
Werlte	794	753	1033	776	854	9,9	10,4	10,4	10,1	10,3
Witzenhausen	629	568	851	687	696	8,2	9,7	9,9	9,7	9,8
Ø	677	624	884	631	713	8,9	9,8	10,1	9,8	9,9
Differenz zum mehrj. Mittel		- 53	+ 207	- 46	+ 36		+ 0,9	+ 1,2	+ 0,9	+ 1,0

* 1998 – 2008

Auch an den Standorten *Rauischholzhausen* und *Witzenhausen* lagen die Jahresniederschläge im Jahr 2006 mit Werte von knapp 600 mm um 112 mm und 61 mm unter dem mehrjährigen Mittel. In *Gülzow* fielen im Jahr 2006

hingegen 651 mm Niederschlag und damit 70 mm mehr als im mehrjährigen Mittel.

Im zweiten Jahr konnten auf allen Standorten deutlich höhere Niederschläge verzeichnet werden, wobei der Mittelwert der Standorte um 207 mm über dem mehrjährigen Mittel lag. Die Temperaturen des zweiten Versuchsjahres waren auf vielen Standorten noch etwas höher als im ersten Jahr. Das dritte Jahr bewegte sich sowohl hinsichtlich der Niederschläge als auch der Temperaturen zwischen den ersten beiden Jahren. Die Niederschläge entsprachen meist den mehrjährigen Werten und lagen im Mittel der Standorte 46 mm unter dem mehrjährigen Mittel.

Die mittleren Daten der Kalenderjahre können zum Vergleich der Standorte herangezogen werden, sind aber nur begrenzt für den Vergleich der angebauten Kulturpflanzen verwendbar. Der genutzte Zeitraum begann im August/September mit der Saat und endete im folgenden Jahr im Herbst mit der Ernte im September/Oktober. Außerdem sind die Jahresverläufe von Temperatur und Niederschlag von entscheidender Bedeutung, um das potenzielle Pflanzenwachstum hinreichend bewerten zu können.

In **Abb. 9** und **Abb. 10** sind die monatlichen Temperaturmittelwerte und Niederschlagssummen aller Standorte im mehrjährigen Mittel sowie im gesamten Untersuchungszeitraum von September 2005 bis Dezember 2008 für jeden Standort dargestellt. Bezüglich der mehrjährigen Mittelwerte lässt sich ableiten, dass die Unterschiede zu den Versuchsjahren von im Mittel bis zu 1,5°C nicht auf eine unterschiedliche Jahresverteilung, sondern auf eine Verschiebung der Temperaturkurve nach oben bzw. unter zurück zu führen ist. Lediglich der Standort *Straubing* zeichnet sich aufgrund seiner kontinentaleren sowie höheren Lage durch kältere Winter und heißere Sommer aus. Bei der Niederschlagsverteilung fielen die Unterschiede deutlicher aus. Alle Standorte wiesen höhere Sommerniederschläge, allerdings mit unterschiedlicher Ausprägung, auf. Die Standorte *Haus Düsse*, *Rauischholzhausen*, *Werlte* und *Witzenhausen* zeigten eine nahezu gleichmäßige und relativ hohe Niederschlagsverteilung, während die Standorte *Gülzow*, *Dornburg* und *Straubing* im

mehrfährigen Mittel höhere Sommer- und geringere Winterniederschläge aufwiesen. Besonders die Standorte *Dornburg* und *Gülzow* zeichneten sich vor allem durch eine Frühjahrs- aber auch Sommertrockenheit aus.

Das Versuchsjahr 2005/06

Bei dem Vergleich der mehrjährigen monatlichen Durchschnittstemperaturen mit den aktuellen Werten ist festzustellen, dass sich das erste Versuchsjahr durch überdurchschnittlich hohe Temperaturen und eine Trockenperiode in der Jahresmitte (Juni/Juli) auf allen Standorten auszeichnete. Die Niederschlagsverteilung war im Jahresverlauf 2006 sehr ungleich. Lediglich in *Dornburg*, *Straubing* und *Witzenhausen* fielen im Herbst 2005 die Niederschläge deutlich geringer aus als im mehrjährigen Mittel und parallel dazu lagen die Temperaturen etwas über dem mehrjährigen Mittelwert. Der Winter 2005/06 zeichnete sich durch sehr niedrige Temperaturen aus. Die Niederschläge von April 2006 zur Saat der Hauptfrüchte Mais und Sonnenblumen waren bis Mai auf allen Standorten überdurchschnittlich hoch. Im Juni und Juli nach der Saat der Zweitkulturen waren die Niederschläge wieder geringer als im mehrjährigen Mittel. Gleichzeitig lagen an allen Standorten die monatlichen Mittelwerte der Temperatur im Juli ca. 5°C über dem mehrjährigen Mittel, was in Verbindung mit sehr geringen Niederschlagsmengen an den Standorten *Dornburg* und *Werlte* zu Wasserknappheit führte.

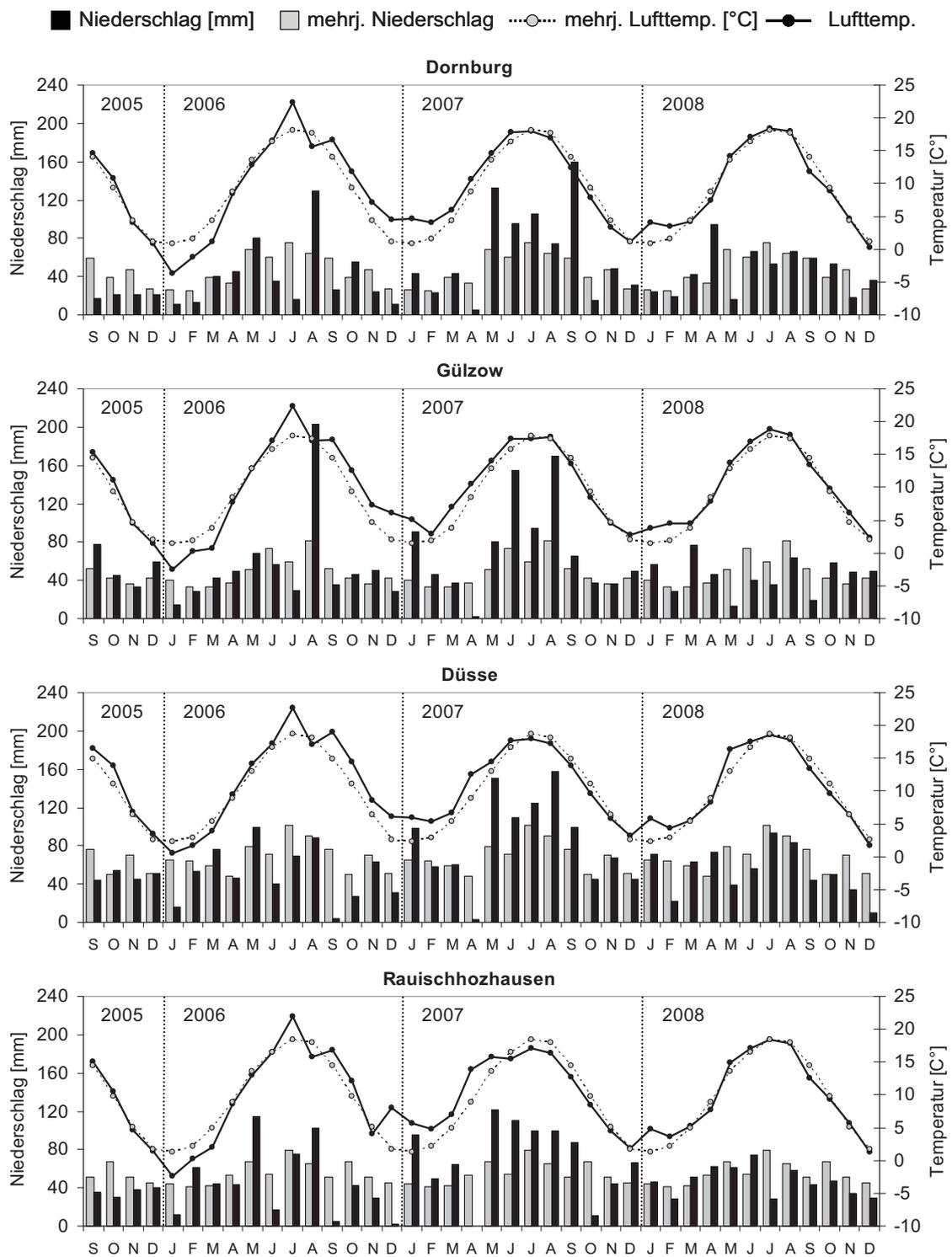


Abb. 9: Monatliche Niederschlagssummen sowie mittlere monatliche Lufttemperaturen an den Versuchsstandorten Dornburg, Gülzow, Haus Düsse und Rauschholzhausen im Vergleich zu den mehrjährigen Mittelwerten.

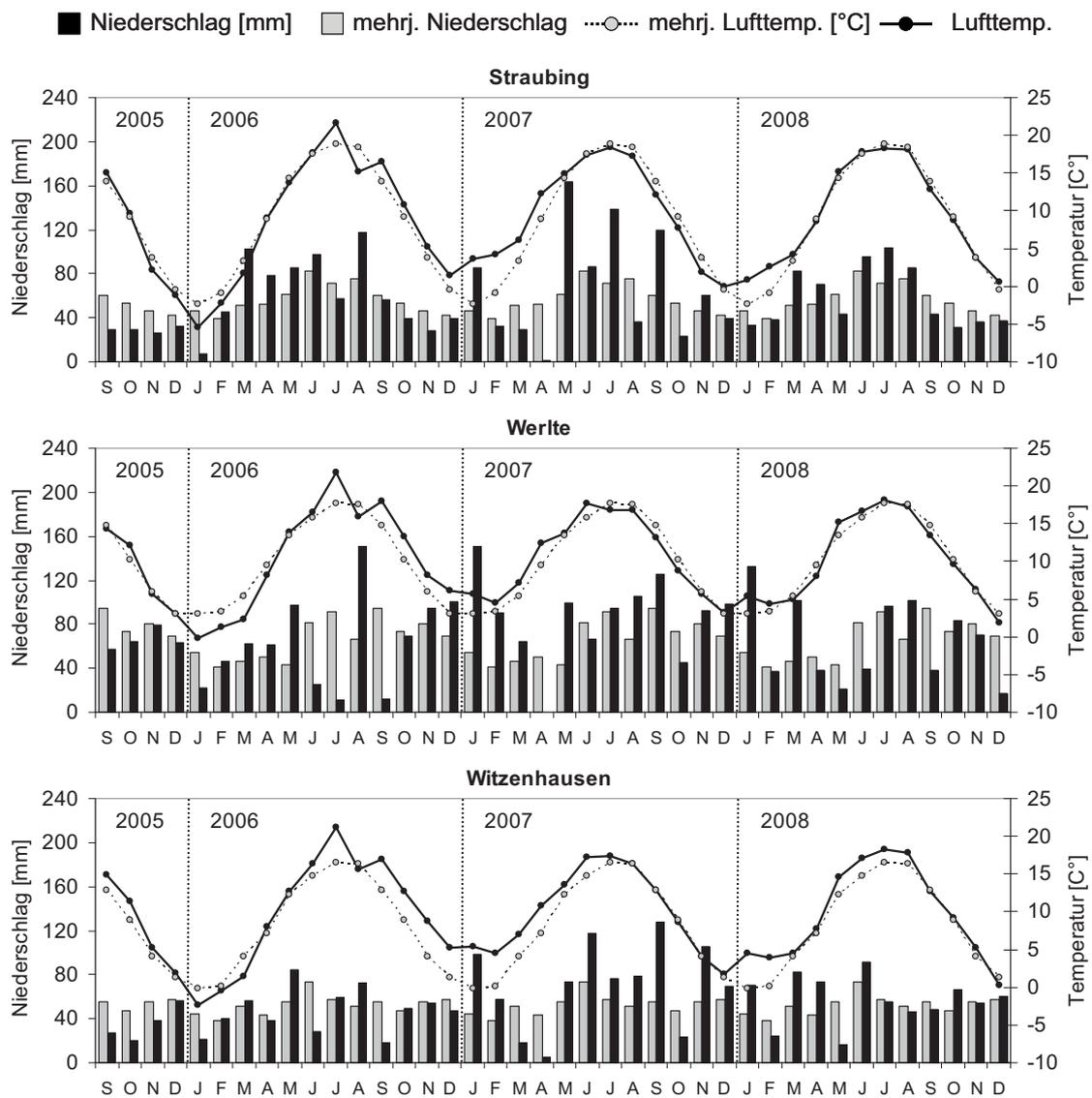


Abb. 10: Monatliche Niederschlagssummen sowie mittlere monatliche Lufttemperaturen an den Versuchsstandorten Straubing, Werlte und Witzhausen im Vergleich zu den mehrjährigen Mittelwerten.

Das Versuchsjahr 2006/07

Winter und Frühjahr des zweiten Versuchsjahres (2006/07) waren überdurchschnittlich warm, was zusätzliche Vegetationstage für die Winterungen und damit eine hohe Biomasseproduktion mit sich brachte. Diese litten dann jedoch unter einem extrem trockenen April mit nur einigen Millimetern Niederschlag. Von Mais bis September lagen die Niederschläge meist über dem

mehrjährigen Mittelwert. Besonders die überdurchschnittlich hohen Niederschläge und Temperaturen im Mai und Juni förderten die Jugendentwicklung der Hauptkulturen Mais und Sonnenblumen, was zu einem klaren Entwicklungsvorsprung gegenüber den Zweitkulturen führte. Ab August bewegten sich die Temperaturen an den Standorten auf oder unter dem mehrjährigen Mittel, was das Wachstum der Sommerungen teilweise hemmte. Besonders weit unter das mehrjährige Mittel fielen die Temperaturen am Standort *Rauischholzhausen*. Dies führte besonders bei den wärmebedürftigen Zweitkulturen zu einer verzögerten Entwicklung. Verstärkt wurde dies durch die überdurchschnittlich hohen sommerlichen Niederschläge, was teilweise Staunässe hervorrief.

Das Versuchsjahr 2007/08

Die dritte Vegetationsperiode startete im Herbst 2007 auf allen Standorten mit unterdurchschnittlichen Temperaturen und sehr hohen Niederschlägen im September an den Standorten *Dornburg*, *Straubing*, *Werlte* und *Witzenhausen*. Die Temperaturen im Winter lagen erneut über dem mehrjährigen Mittel, sanken aber im März und April in *Dornburg* und *Rauischholzhausen* wieder stark ab. Auf den anderen Standorten bewegten sich die Temperaturen auf dem mehrjährigen Mittel bevor diese ab Mai auf allen Standorten über dieses stiegen. Im August und September 2008 fielen die Temperaturen auf (*Gülzow*, *Straubing*, *Witzenhausen*) bzw. unter das mehrjährige Mittel (*Dornburg*, *Haus Düsse*, *Rauischholzhausen*, *Werlte*). Die Niederschläge waren an allen Standorten ausreichend hoch. Eine Ausnahme stellte dabei der Monat Mai dar, der vor allem in *Dornburg*, *Gülzow*, *Werlte* und *Witzenhausen* sehr geringe Niederschläge aufwies.

3.1.2 Pflanzenverfügbares Wasser zur Saat

Einen bedeutenden Faktor zur Etablierung der Sommerungen stellt der Bodenwassergehalt zur Saat dar. Eine ausreichende Bodenfeuchte ist besonders

zur Saat der Zweitkulturen durch den Wasserentzug der Erstkulturen sowie durch die meist trockene Witterung Anfang Juni oft nicht gewährleistet. Eine ausreichende Bodenfeuchte ist zum einen bei der maschinellen Bearbeitung für die Bereitung eines feinen Saatbetts erforderlich, zum anderen wird das Bodenwasser als Quellwasser für die Keimungsinduktion benötigt (EHLERS 1996). **Abb. 11** stellt die Anteile an pflanzenverfügbarem Bodenwasser in Prozent der nFK in 0-30 cm dar.

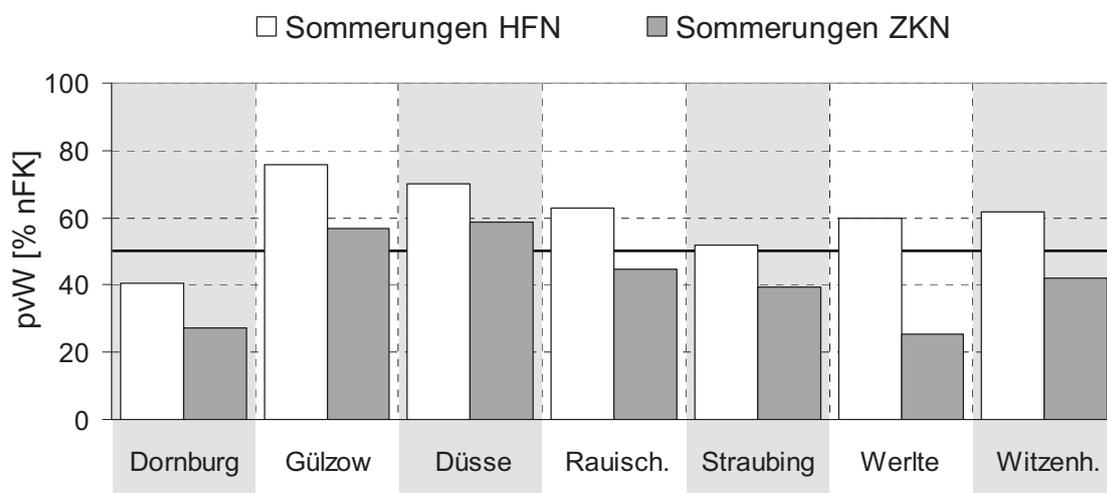


Abb. 11: Pflanzenverfügbares Wasser (pvW) zur Saat der Sommerungen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in Prozent der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in der Bodenschicht 0-30 cm im Mittel der Versuchsjahre.

Im Mittel der Versuchsjahre waren die Bodenwassergehalte zur Saat der Zweitkulturen (Anfang Juni) auf allen Standorten geringer als zur Saat der Sommerungen der HFN (Ende April/Anfang Mai). An den Standorten *Dornburg* und *Werlte* waren die Bodenwassergehalte zur Saat der Zweitkulturen mit weniger als 30% der nFK besonders gering. Im Mittel der Standorte lagen die Wassergehalte zur Saat der Hauptkulturen bei 62% und zur Saat der Zweitkulturen bei 42% der nFK.

Betrachtet man das pflanzenverfügbare Wasser zur Saat an den sieben Standorten und in der drei Versuchsjahren (**Abb. 12**), so waren in 17 der 21

Fälle zum früheren Saattermin der Hauptfrüchte höhere Mengen pflanzenverfügbaren Wassers im Boden vorhanden als zur Saat der Zweitkulturen.

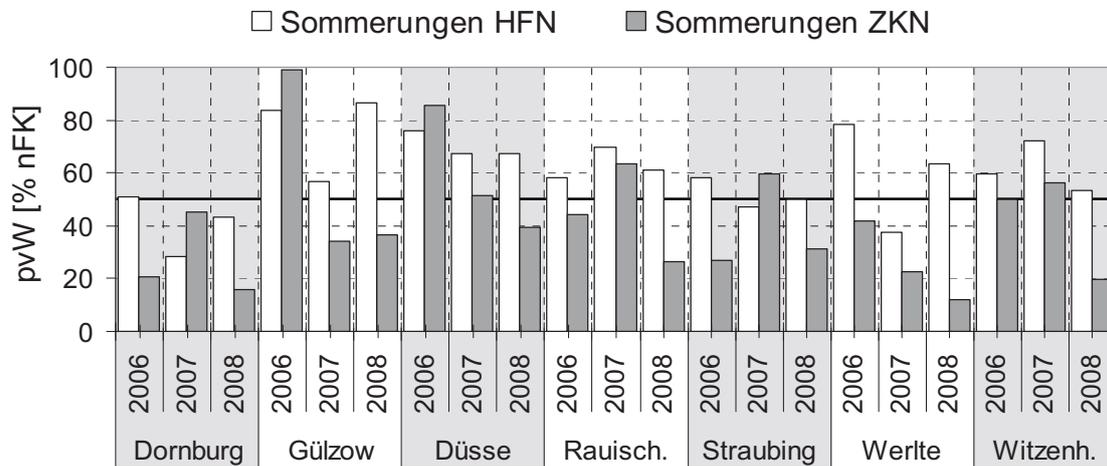


Abb. 12: Pflanzenverfügbares Wasser (pvW) zur Saat der Sommerungen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in Prozent der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in der Bodenschicht 0-30 cm in den drei Versuchsjahren.

Besonders an den Standorten *Dornburg* und *Werlte* waren die pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalte zur Saat der Zweitkulturen in allen drei Versuchsjahren mit Werten < 50% gering. Lediglich in sieben von 21 Fällen lagen die Gehalte an pflanzenverfügbarem Wasser zur Saat der Zweitkulturen bei mindestens 50%. Die Anteile an pflanzenverfügbarem Wasser zur Saat der Zweitkulturen lagen in den Jahren 2006, 2007 und 2008 im Mittel der Standorte bei 53%, 48% und 26%.

3.1.3 Temperatur- und Niederschlagssummen

Für die Bewertung der Witterung in der Vegetationszeit für das Pflanzenwachstum können die Temperatur- und Niederschlagssummen herangezogen werden. Für die Temperatursumme wurde sowohl für Sonnenblumen als auch für Mais der Basiswert von 6°C Lufttemperatur herangezogen (HUGGER 1989). Spätreife Silomaisorten, wie die verwendete Sorte *'Atletico'*, benötigen bis zur Siloreife eine Temperatursumme von etwa 1570°C d (LFL 2009d). Laut AMON

ET AL. (2007) sowie AMLER (2008) produzieren spätreife Maissorten mit vitaler Restpflanze mehr Biomasse und damit höhere Methanerträge als frühreife Sorten. Bei der Sonnenblumensorte 'Methasol' handelt es sich ebenfalls um eine spätreife Sorte. Da Sonnenblumen generell geringere Temperatursummen als Mais benötigen, wurde bei Mais und Sonnenblumen für das Erreichen der Siloreife eine notwendige Temperatursumme von 1500°C d angenommen, welche in **Abb. 13** mit einer durchgezogenen Linie gekennzeichnet ist. Hierbei ist zu beachten, dass die Temperatursumme Faktoren wie Tageslänge und Bewölkung nicht berücksichtigt. Trotzdem können sie zur Interpretation der unterschiedlichen Anbausysteme herangezogen werden, da Saat- und Erntetermine teilweise stark voneinander abweichen und Unterschiede in den Temperatursummen zu erwarten sind und diese gegebenenfalls zur Interpretation von Ertragsunterschieden zwischen der beiden Anbausystemen herangezogen werden können.

Das Versuchsjahr 2005/06

Die Niederschlagssummen von Mais und Sonnenblumen lagen im ersten Versuchsjahr von der Saat bis zur Ernte an allen Standorten zwischen 200 und 350 mm. Mais und Sonnenblumen standen in der HFN auf allen Standorten höhere Niederschlagsmengen zur Verfügung als in der ZKN (**Abb. 13**, oben). Die einzige Ausnahme bildeten die Sonnenblumen am Standort *Gülzow*, welchen als Zweitfrucht höhere Niederschläge zur Verfügung standen als in der HFN. Im Mittel der Standorte hatten Mais und Sonnenblumen im Jahr 2006 als Zweitkulturen 62 mm (- 20%) und 40 mm (- 15%) weniger Niederschläge zur Verfügung als die Hauptfrüchte. Die Temperatursummen von Mais und Sonnenblumen waren im ersten Versuchsjahr an den Standorten *Dornburg*, *Gülzow* und *Haus Düsse* in der ZKN höher als in der HFN. Wobei der Unterschied an den Standorten *Gülzow* und *Haus Düsse* bei den Sonnenblumen ausgeprägter ausfiel. In *Straubing*, *Rauischholzhausen* und *Werlte* waren die Temperatursummen von Mais in der ZKN geringer als in der HFN. Lediglich in *Straubing* waren sowohl die Temperatursummen von Mais als auch von

Sonnenblumen in der ZKN niedriger als in der HFN. Im ersten Versuchsjahr lagen die Temperatursummen von Mais und Sonnenblumen in der ZKN im Mittel der Standorte bei knapp 1500°C d und waren damit ausreichend hoch für das Erreichen der Siloreife. Die Temperatursummen von Mais und Sonnenblumen als Zweitkulturen lagen im Jahr 2006 im Mittel der Standorte 50°C d niedriger (- 3%) bzw. 72°C d höher (+ 5%) als in der HFN.

Das Versuchsjahr 2006/07

Im zweiten Versuchsjahr (**Abb. 13**, Mitte) bewegten sich die Niederschlagssummen zwischen 400 und über 600 mm und lagen damit auf einem deutlich höherem Niveau als im ersten Versuchsjahr. Im Mittel waren die Niederschlagssummen bei Mais und Sonnenblumen in der ZKN um 78 mm (- 15%) und 45 mm (- 10%) niedriger als in der HFN. Die Temperatursummen von Mais und Sonnenblumen in der ZKN lagen im zweiten Versuchsjahr bei etwa 1200°C d und damit 20% und 15% tiefer als in der HFN.

Das Versuchsjahr 2007/08

Die Niederschlagssummen im dritten Versuchsjahr (**Abb. 13**, unten) lagen zwischen 150 und über 400 mm. Im Mittel der Standorte lagen die Niederschlagssummen von Mais und Sonnenblumen als Zweitkulturen bei etwa 250 mm und damit lediglich 4% und 3% geringer als in der HFN. Deutlich höhere Niederschläge von etwa 150 mm hatten die Sommerungen der HFN lediglich am Standort *Straubing* zu Verfügung. Die Temperatursummen von Mais und Sonnenblumen in der ZKN lagen im dritten Versuchsjahr auf allen Standorten deutlich niedriger als in der HFN. Wie auch im zweiten Jahr lagen die Temperatursummen von Mais und Sonnenblumen in der ZKN im Mittel der Standorte bei etwa 1200°C d und damit rund 20% unter den Temperatursummen der HFN. Am Standort *Straubing* waren die Temperatursummen in der ZKN sogar 30% niedriger als in der HFN.

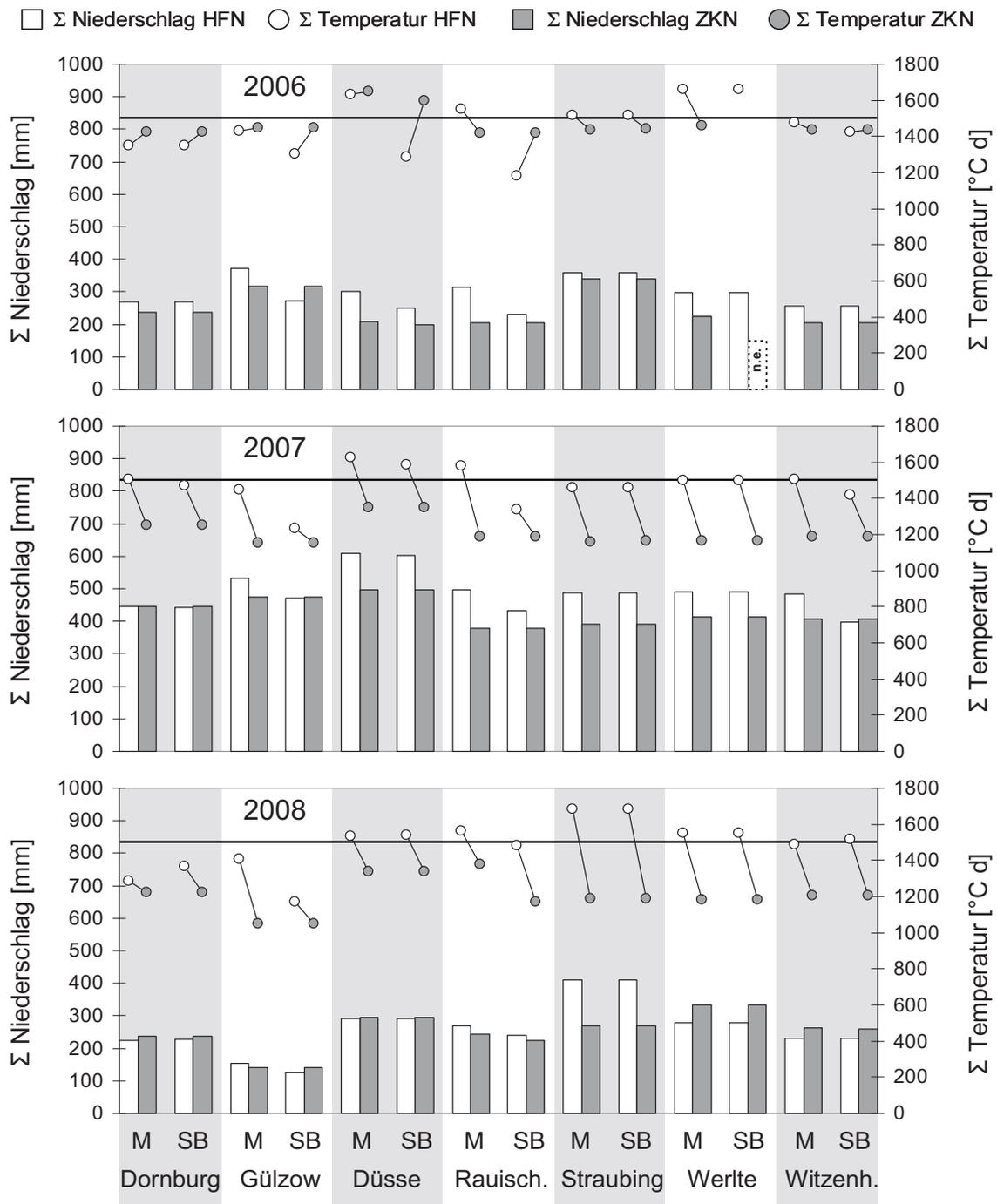


Abb. 13: Temperatur- und Niederschlagsummen von der Aussaat bis zur Ernte von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweitkultur-Nutzung (ZKN) an allen Standorten in den drei Versuchsjahren. Die durchgezogene Linie markiert die von Mais und Sonnenblumen benötigte Temperatursumme von 1500 $^{\circ}$ C d.

Zusammenhang zwischen Witterung und Ertrag

Durch diese teilweise sehr großen Unterschiede vor allem der Temperatursummen zwischen den beiden Anbausystemen stellt sich die Frage, wie stark der jeweilige Einfluss auf die TM-Erträge ist und ob diesbezüglich Unterschiede der Anbausysteme vorliegen. Neben Temperatur- und Niederschlagssumme wurde hier die Strahlungssumme sowie das pflanzenverfügbare Bodenwasser in 0-30 cm zur Saat berücksichtigt. Mit diesen Einflussfaktoren wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse in **Tab. 16** dargestellt sind. Die Beziehungen zwischen den signifikanten Faktoren und den TM-Erträgen von Mais und Sonnenblumen sind absolute (Parameter Schätzung) bzw. auf die Standardabweichung (SD) bezogene Schätzungen.

Tab. 16: Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnungen zwischen den TM-Erträgen von Mais und Sonnenblumen im Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) und den Faktoren Temperatur-, Niederschlag-, Strahlungssumme sowie pflanzenverfügbares Bodenwasser zur Saat.

Mais					
HFN ($r_{adj}^2 = 0,35, p < 0,0001$)			ZKN ($r_{adj}^2 = 0,60, p < 0,0001$)		
<i>Faktor(en)</i>	<i>Parameter Schätzung</i>	<i>Schätzung (SD)</i>	<i>Faktor(en)</i>	<i>Parameter Schätzung</i>	<i>Schätzung (SD)</i>
Σ Nds.	0,0010	0,23	Σ Nds.	0,0094	0,22
Σ Temp.	0,0178	0,51	Σ Temp.	0,0224	0,78
Σ Str.	-	-	Σ Str.	< -0,0001	-0,22
pvW	-	-	pvW	0,0556	0,22

Sonnenblumen					
HFN (nicht signifikant)			ZKN ($r_{adj}^2 = 0,48, p < 0,0001$)		
<i>Faktor(en)</i>	<i>Parameter Schätzung</i>	<i>Schätzung (SD)</i>	<i>Faktor(en)</i>	<i>Parameter Schätzung</i>	<i>Schätzung (SD)</i>
Σ Nds.	-	-	Σ Nds.	-	-
Σ Temp.	-	-	Σ Temp.	0,0037	0,22
Σ Str.	-	-	Σ Str.	-	-
pvW	-	-	pvW	0,0823	0,57

Nds.: Niederschlag Temp.: Temperatur Str.: Strahlung pvW: pflanzenverfügbares Wasser zur Saat
 r_{adj}^2 : adjustiertes Bestimmtheitsmaß SD: Standardabweichung

In der HFN erhöhte sich der geschätzte TM-Ertrag um 0,001 t TM ha⁻¹ durch die Erhöhung der Niederschlagssumme um eine Einheit bei der Kon-

stanzhaltung aller anderen Faktoren. Da durch diese absolute Beziehung aufgrund der verschiedenen Skalierungen kein direkter Vergleich der Einflussfaktoren untereinander gemacht werden kann, wurden die Beziehungen jeweils auf die Standardabweichungen bezogen. Dadurch wird deutlich, dass bei Mais sowohl in der HFN als auch in der ZKN die Temperatursumme die größten positiven Auswirkungen auf den TM-Ertrag hatte, wobei der Zusammenhang in der ZKN deutlicher ausfiel; durch die Erhöhung der Standardabweichung der Temperatursumme um eine Einheit erhöhte sich der geschätzte TM-Ertrag von Mais um 0,78 Standardabweichungen. Bei der ZKN konnten alle vier Einflussparameter in das Modell einbezogen werden.

Die Sonnenblumenenerträge in der HFN konnten durch keinen der vier Einflussparameter erklärt werden. Hierfür kann eventuell der an einigen Standorten besonders in der HFN aufgetretene Vogelfraß verantwortlich gemacht werden. In der ZKN hingegen hatte das pflanzenverfügbare Wasser zur Saat sowie die Temperatursumme signifikante Einflüsse auf den Ertrag, wobei erstgenannter Faktor die größte Auswirkung aufwies.

3.2 Anbaudaten

Winterungen

Die WRü zeichneten sich oft durch einen schlechten Feldaufgang aus. Die WE im WR/WE-Gemenge wiesen eine geringe Konkurrenzkraft auf und erlitten teilweise Frost- und Staunässeschäden und konnten deshalb lediglich einen geringen Ertragsanteil leisten. Auch die WG wurde vom WR am Wachstum gehindert, jedoch in geringerem Ausmaß. Durch die warmen Temperaturen im Winter kam es auf einigen Standorten zu Problemen mit Wühlmäusen und aufgrund der hohen Wüchsigkeit gingen die Erstkulturen oft ins Lager. Weniger ausgeprägt war dies bei den WR/WG-Gemengen, was wohl an der Stützfunktion der niedrigeren WG lag. Die Ernte der Erstkulturen wurde teilweise durch eine feuchte Witterung verzögert.

Sommerungen

Bei zu trockener Witterung gab es Probleme mit der Saatbettbereitung und dadurch mit dem Feldaufgang vor allem der Feinsämereien Amarant, Hanf und Sudangras, welche sich durch eine geringe Triebkraft auszeichneten. Weitere Schwierigkeiten bereiteten die Ausfallgerste und der Ausfallrüben. Durch eine bessere Erntetechnik könnte dies jedoch vermindert werden. Sorghum lief sehr zögerlich auf und reagierte empfindlich auf kühle Perioden. Teilweise gab es hier wie auch bei den Sonnenblumen Lagerschäden. Die Sonnenblumenkörbe der Ernteparzellen mussten durch Säcke gegen Vogelfraß geschützt werden. Der WRü wurde im Mittel der Standorte bereits Anfang September und die Getreidearten bzw. Gemenge Ende September gesät (**Tab. 17**). Die Aussaat der Sommerungen als Hauptfrüchte erfolgte Ende April, während die Zweitkulturen der ZKN sechs Wochen später Mitte Juni und damit eine Woche nach der Ernte der Erstkulturen (BBCH 68-78) gesät wurden. Diese Woche zwischen Saat und Ernte der Erst- bzw. Zweitkulturen wurde für das Räumen des Feldes, eine flache Bodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Aussaat der Zweitkulturen benötigt. Mais und Sonnenblumen in der HFN wurden Mitte September geerntet, während diese in der ZKN erst Mitte Oktober und somit einen Monat später geerntet wurden. Die angestrebten Erntereifegrade (vgl. **Tab. 8**) konnten im Mittel der Standorte und Jahre weder bei den Erst- noch bei den Zweitkulturen erreicht werden. Der WR-Energie in der HFN wurde im Mittel der Standorte drei Wochen nach den Erstkulturen mit einem höheren BBCH-Stadium von 79 geerntet und der WR-Brot wurde weitere vier bis fünf Wochen später Ende Juli (BBCH 92) gedroschen. Eine ausführliche Tabelle mit Anbaudaten aller Kulturen auf den einzelnen Versuchstandorten findet sich im Anhang (vgl. **A1**). Mit der Anzahl der Anbautage und den TM-Erträgen wurden die mittleren täglichen Zuwachsraten für Mais und Sonnenblumen in den beiden Anbausystemen errechnet.

Tab. 17: Saat- und Erntetermine, Anzahl der Anbautage sowie BBCH-Stadien zur Ernte aller Varianten im Mittel der Standorte und Versuchsjahre.

Hauptfrucht-Nutzung					
Winterung	Sommerung	Saat	Ernte	Anbautage ±SD	Ernte- BBCH
Senf		2.9.	11.11.	69 ± 11	40
	Mais	28.4.	19.9.	145 ± 12	85
	Sonnenblumen	28.4.	11.9.	136 ± 17	84
WR-Energie		27.9.	23.6.	270 ± 12	79
	Senf	30.7.	23.10.	83 ± 26	65
WR-Brot		27.9.	24.7.	299 ± 19	92
	Senf	13.8.	23.10.	69 ± 16	55
Zweikultur-Nutzung					
Winterung	Sommerung	Saat	Ernte	Anbautage ±SD	Ernte- BBCH
WRü		11.9.	2.6.	265 ± 16	78
WR		28.9.	3.6.	250 ± 9	71
WR/WE		28.9.	3.6.	250 ± 9	68/61
	Mais	11.6.	16.10.	128 ± 8	79
	Sorghum	11.6.	15.10.	127 ± 10	69
	Sonnenblumen	11.6.	14.10.	126 ± 7	82
	Mais/Sonnenbl.	11.6.	15.10.	127 ± 8	78/82
WR/WG		28.9.	3.6.	250 ± 9	71/74
	Sudangras	12.6.	12.10.	124 ± 15	71
	Amarant	12.6.	10.10.	121 ± 9	80
	Hanf	12.6.	2.10.	115 ± 12	79
	Mais/Sonnenbl./ Amarant	11.6.	15.10.	127 ± 8	78/82/80

WR: Winterroggen WRü: Winterrübsen WE: Wintererbsen WG: Wintergerste SD: Standardabweichung

3.3 Biomasseerträge

3.3.1 Übersicht über alle Varianten

Erträge im Mittel der Jahre und Standorte

Die Vegetationszeiten beider Anbausysteme beginnen jeweils mit der Aussaat der Winterungen/Zwischenfrüchte im Spätsommer und enden mit der Ernte der Zwischenfrüchte/Zweikulturen im Herbst des folgenden Jahres. In der HFN setzt sich der Jahresertrag aus der Summe von Zwischen- und

Hauptfrucht und in der ZKN aus der Summe von Erst- und Zweitkultur zusammen. **Tab. 18** gibt die Mittelwerte der einzelnen Kulturpflanzenkombinationen sowie der Jahreserträge über alle sieben Standorte und drei Versuchsjahre mit ihren signifikanten Unterschieden an.

Tab. 18: TM-Erträge der einzelnen Kulturpflanzen und der Jahreserträge im Mittel der Versuchsjahre und Standorte in t ha⁻¹ sowie deren signifikanten Unterschiede.

Hauptfrucht-Nutzung						
	Winter		Sommer		Jahresertrag	
Senf; Mais (<i>Atletico</i>)	1,9	a ····	19,6	···· e	21,5	···· efg
Senf; Mais (Stamm)			20,3	···· e	22,2	···· e · g
Senf; Sonnenbl. (<i>Methasol</i>)			12,9	··· d ·	14,7	ab ·····
Senf; Sonnenbl. (<i>Alisson</i>)			12,0	·· cd ·	13,9	a ······
WR-Energie (<i>Balistic</i>); Senf	14,7	···· e	3,0	a ····	17,7	a · c · e · ·
WR-Energie (Sorte 2); Senf	14,4	···· e	3,0	a ····	17,4	a · c · · f ·
WR-Brot (<i>Visello</i>); Senf	13,0	··· de	1,8	a ····	14,8	a · c ····
WR-Brot (<i>Rasant</i>); Senf	12,9	··· de	1,9	a ····	14,6	ab ·····

Zweikultur-Nutzung						
	Winter		Sommer		Jahresertrag	
WRü; Mais	7,9	· b ···	13,4	··· d ·	21,3	··· defg
WRü; Sorghum			9,6	· bcd ·	17,6	a · c · e · · ·
WRü; Sonnenbl.			9,9	· bcd ·	17,7	a · c · e · · ·
WRü; Mais/Sonnenbl.			11,2	·· cd ·	19,0	· bc ··· g
WR; Mais	10,5	· b · d ·	13,1	··· d ·	23,6	····· g
WR; Sorghum			9,1	· bcd ·	19,6	·· c ··· g
WR; Sonnenbl.			9,7	· bcd ·	20,3	··· defg
WR; Mais/Sonnenbl.			10,9	·· cd ·	21,5	··· efg
WR / WE; Mais	10,1	· bc ··	13,1	··· d ·	23,2	····· g
WR / WE; Sorghum			9,0	· bcd ·	19,1	· bc ··· g
WR / WE; Sonnenbl.			10,2	·· cd ·	20,3	··· defg
WR / WE; Mais/Sonnenbl.			10,6	·· cd ·	20,7	··· defg
WR / WG; Sudangras	10,8	·· cd ·	10,1	· bcd ·	20,9	··· defg
WR / WG; Amarant			5,8	ab ···	16,6	a · cd ···
WR / WG; Hanf			8,4	· bcd ·	19,2	··· defg
WR / WG; Mais/Sonnenbl./Amarant			9,9	· bcd ·	20,7	··· defg

WR: Winterroggen WRü: Winterrübsen WE: Wintererbsen WG: Wintergerste
 Varianten mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich pro Spalte nicht signifikant voneinander ($\alpha=5\%$).

Die Biomasseproduktion von Senf als Zwischenfrucht in der HFN war mit 1,9 t TM ha⁻¹ vor Mais bzw. Sonnenblumen und bis zu 3,0 t TM ha⁻¹ nach WR sehr gering. Auch an einzelnen Standorten lagen die Senferträge nicht wesentlich über 5,0 t TM ha⁻¹ und waren damit nicht erntewürdig. Innerhalb der HFN waren die Jahreserträge von Mais signifikant höher als die Sonnenblumen- und WR-Brot-Erträge. Der Ertragsunterschied von ca. 4 t TM ha⁻¹ zu WR-Energie konnten jedoch nicht statistisch abgesichert werden. Innerhalb der ZKN lagen die Erträge der Erstkultur WRü über 2 t TM ha⁻¹ geringer als die Erträge der anderen Erstkulturen, wobei lediglich im Vergleich zu WR/WG ein signifikanter Unterschied auszumachen war. Die Zweitkulturen nach WRü wiesen etwas höhere Erträge auf als nach den anderen Erstkulturen. Insgesamt lagen die Jahreserträge dieser Varianten aufgrund der deutlich geringeren WRü-Erträge unter den Varianten mit WR und WR/WE als Erstkultur, wobei diese Unterschiede nicht signifikant waren. Die Maiserträge der HFN waren mit Mehrererträgen von über 6 t TM ha⁻¹ signifikant höher als die der ZKN. Bei den Sonnenblumen hingegen reichten höhere Erträge von 2-3 t TM ha⁻¹ in der HFN nicht zu einem signifikanten Unterschied zu den Sonnenblumenenerträgen nach einer Erstkultur aus. Obwohl die Jahreserträge von Mais nach WR und WR/WE-Gemenge ca. 2 t TM ha⁻¹ höher waren als die Jahreserträge von Mais in der HFN, lagen im Mittel der Standorte keine signifikanten Unterschiede vor. In der HFN erzielte der aktuelle Mais-Stamm gegenüber der in beiden Anbausystemen verwendete Sorte 'Atletico' einen Mehrerertrag von fast 1 t TM ha⁻¹.

Die Erträge von Sonnenblumen mit den Erstkulturen WR bzw. WR/WE in der ZKN führten im Vergleich zu den Sonnenblumen in der HFN zu einer signifikanten Ertragssteigerung von fast 6 t TM ha⁻¹. Die Jahreserträge von Sudangras, Hanf und dem Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenge mit WR/WG als Erstkultur waren mit Jahreserträgen um die 20 t TM ha⁻¹ signifikant höher als die Erträge beider Sonnenblumen- und WR-Brot-Sorten der HFN.

Erträge pro Standort im Mittel der Versuchsjahre

Im Mittel aller Standorte und Versuchsjahre zeichnet sich bei den Mais- und noch stärker bei den Sonnenblumenenerträgen eine deutliche Überlegenheit der ZKN ab, wobei auch hohe Ertragsunterschiede oft nicht signifikant waren, was auf eine große Bedeutung der Jahres- und Standorteinflüsse hinweist. In **Abb. 14** und **Abb. 15** sind daher zunächst die mittleren Erträge über die drei Versuchsjahre pro Standort abgebildet. Mit über 25 t TM ha⁻¹ wurden die höchsten mittleren Jahreserträge an den Standorten *Straubing* und *Haus Düsse* erzielt. Auch in *Witzenhausen* und *Rauischholzhausen* lagen die Erträge auf einem hohen Niveau, gefolgt von *Gülzow*, *Dornburg* und *Werlte* mit den niedrigsten Erträgen. Die generell höchsten Erträge erlangte sowohl in der HFN als auch in der ZKN der Mais.

Die Erträge der Varianten mit Sonnenblumen als Haupt- bzw. Zweitkultur lagen teilweise deutlich unter den Varianten mit Mais. Diese Ertragsunterschiede zwischen Mais und Sonnenblumen fielen jedoch in der ZKN geringer aus als in der HFN. An den Standorten *Dornburg*, *Werlte* und *Gülzow* zeigte sich in der HFN eine Überlegenheit der WR-Energie-Erträge gegenüber den Sonnenblumen, während auf allen anderen Standorten die Sommerungen Mais und Sonnenblumen höhere Erträge als die Winterungen aufwiesen. Die Erträge von WR-Energie in der HFN schwankten zwischen 12,5 (*Werlte*) und 16,2 t TM ha⁻¹ (*Rauischholzhausen*). Die Ganzpflanzenerträge von WR-Brot fielen an den Standorten *Dornburg*, *Haus Düsse*, *Rauischholzhausen* und *Straubing* geringer aus als die WR-Energie-Erträge und bewegten sich zwischen 10,2 (*Straubing*) und 14,8 t TM ha⁻¹ (*Dornburg*).

Die WRü erreichten mit Erträgen zwischen 5,4 (*Werlte*) und 9,3 t TM ha⁻¹ (*Witzenhausen*) das geringste Ertragsniveau unter den Erstkulturen. Bei dem WR/WE-Gemenge konnten Erträge von 7,8 (*Werlte*) bis 11,8 t TM ha⁻¹ (*Dornburg*) ermittelt werden und bei dem WR Ganzpflanzenerträge von 8,4 (*Werlte*) bis 11,9 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse*). Die höchsten Erträge erreichte das WR/WG-Gemenge mit Erträgen von 8,7 (*Werlte*) bis 12,4 t TM ha⁻¹ (*Dornburg*). Diese Erträge waren über alle Jahre und Standorte signifikant höher als die WRü-

Erträge. Die Erträge der Erstkulturen mit Getreide unterschieden sich im Mittel über alle Standorte und Jahre nicht signifikant voneinander (vgl. **Tab. 18**). Die über drei Jahre gemittelten Maiserträge (*'Atletico'*) in der HFN lagen zwischen 15,8 (*Gülzow*) und 23,2 t TM ha⁻¹ (*Straubing*). Als Zweitkultur erreichte diese Maissorte Erträge von 9,9 (*Gülzow*) bis 17,7 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse*) nach WRü, 9,6 (*Dornburg*) bis 17,7 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse*) nach WR und 9,1 (*Dornburg*) bis 16,1 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse*) nach dem WR/WE-Gemenge. Dies liegt über den von KARPENSTEIN-MACHAN (1997) angegebenen Erträgen von 6 bis 10 t TM ha⁻¹ für Mais als Zweitfrucht. Die Sonnenblumenerträge bewegten sich im Bereich von 7,8 (*Dornburg*) bis 11,8 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse*) nach WRü, von 7,6 (*Werlte*) bis 11,4 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse*) nach WR und von 8,3 (*Dornburg*) bis 11,9 t TM ha⁻¹ (*Rauischholzhausen*) nach dem WR/WE-Gemenge. In der HFN erreichte die Sonnenblumensorte *'Methasol'* Erträge von 12,5 (*Werlte*) bis 16,2 t TM ha⁻¹ (*Rauischholzhausen*). Die Erträge des Mais/Sonnenblumen-Gemenges lagen zwischen den Erträgen von reinen Sonnenblumen und reinem Mais und hier meist etwas unterhalb des Mittelwertes der Reinsaaten. Die Erträge von Sorghum als Zweitkultur waren an den Standorten *Dornburg*, *Haus Düsse*, *Rauischholzhausen* und *Werlte* in Abhängigkeit von der Erstkultur teilweise höher als die Erträge von Sonnenblumen als Zweitkultur. Die Sorghumerträge reichten von 6,5 (*Gülzow*) bis 14,8 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse*) nach WRü, von 6,0 (*Gülzow*) bis 13,2 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse*) nach WR und von 5,9 (*Gülzow*) bis 13,2 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse*) nach dem WR/WE-Gemenge. Unter den selten angebauten Kulturen nach der Erstkultur WR/WG erwies sich Sudangras als ertragsstärkste Kultur mit TM-Erträgen von 6,8 (*Gülzow*) bis 14,8 t ha⁻¹ (*Haus Düsse*). Auf allen Standorten außer *Rauischholzhausen* erreichte Sudangras als Zweitkultur gleichwertige (*Dornburg*, *Gülzow*, *Haus Düsse*) oder sogar höhere Erträge (*Straubing*, *Werlte*, *Witzenhausen*) als Sorghum.

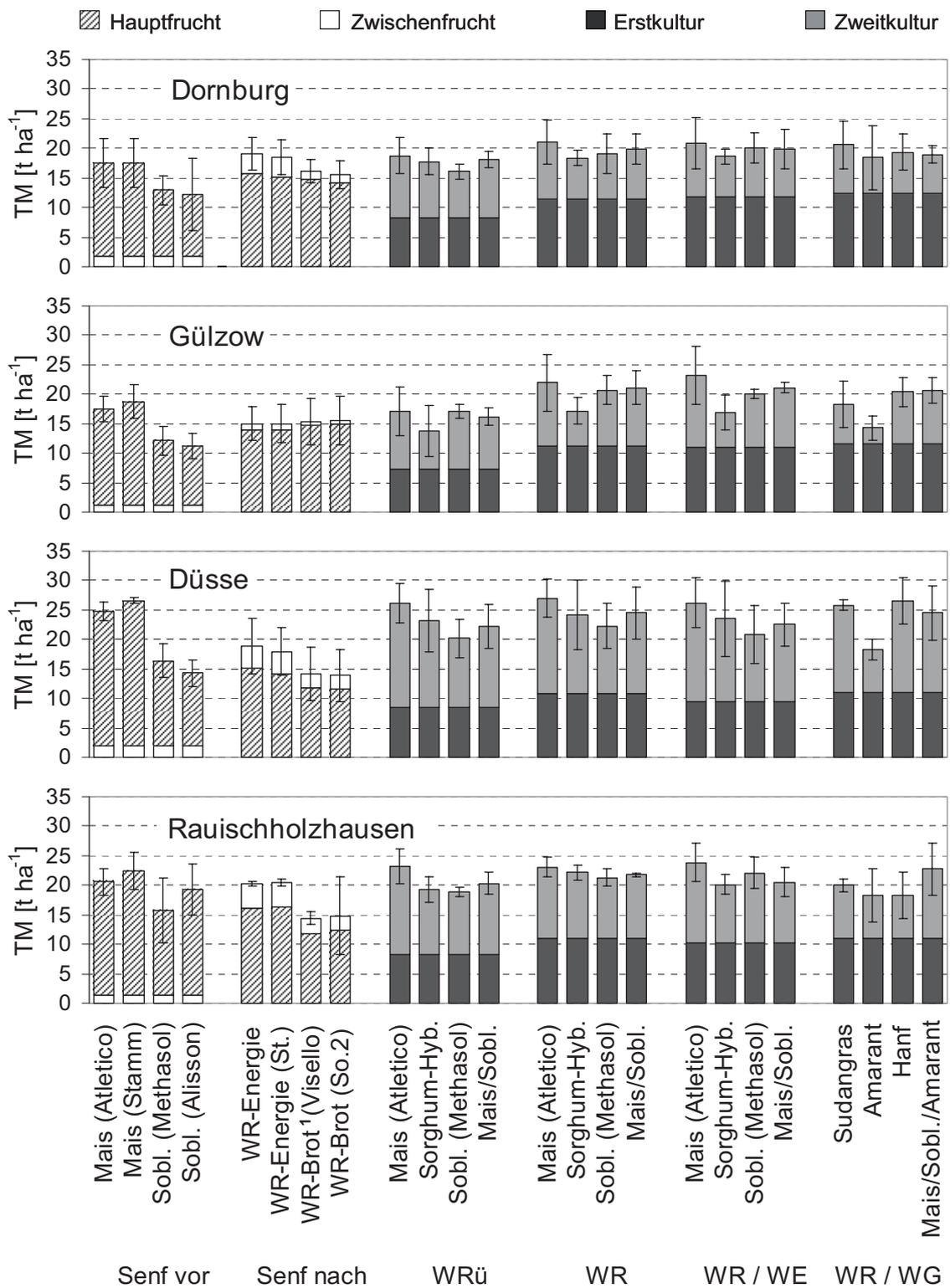


Abb. 14: Mittelwerte der Erträge an den Versuchsstandorten Dornburg, Gülzow, Haus Düsse und Rauschholzhausen über alle drei Versuchsjahre mit Standardabweichungen der Jahreserträge. **Links:** Hauptfrucht-Nutzung, **rechts:** Zweikultur-Nutzung. ¹Ganzpflanze

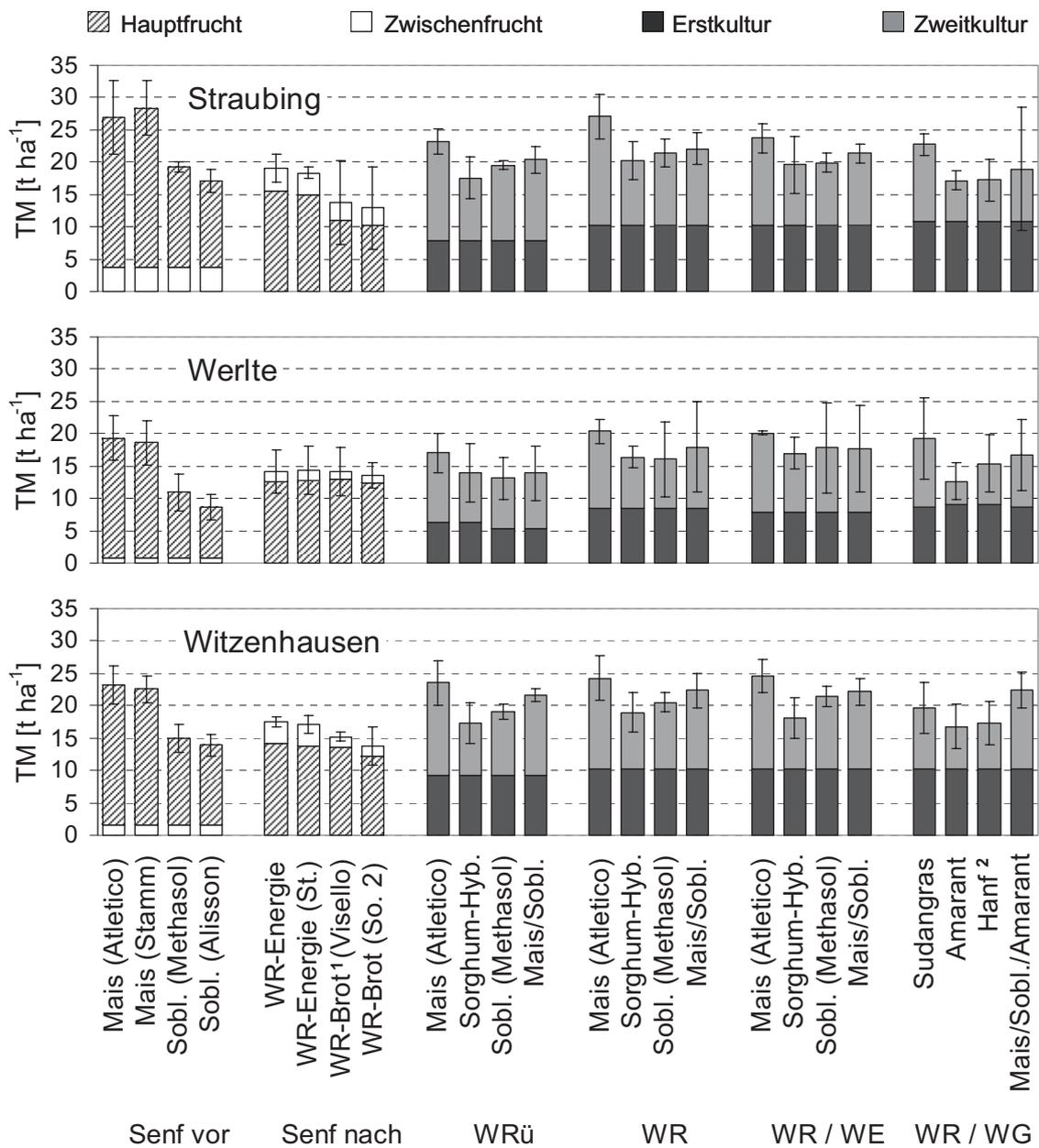


Abb. 15: Mittelwerte der Erträge an den Versuchsstandorten Straubing, Werlte und Witzhausen über alle drei Versuchsjahre mit Standardabweichungen der Jahreserträge. **Links:** Hauptfrucht-Nutzung, **rechts:** Zweitkultur-Nutzung. ¹Ganzpflanze, ²am Standort Straubing wurde in allen drei Jahren Quinoa statt Hanf angebaut.

In *Haus Düsse* und *Werlte* lagen die Erträge der Zweitkultur Sudangras höher als die Sonnenblumenerträge, während diese in *Dornburg* und *Straubing* etwa gleich hoch waren. Die Erträge von Amaranth als Zweitkultur nach

WR/WG schwankten mit Werten zwischen 2,8 (*Gülzow*) und 7,3 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse, Rauischholzhausen*) stark zwischen den Standorten aber auch zwischen den Jahren, was durch die relativ großen Standardabweichungen deutlich wird. Amarant erwies sich als ertragsschwächste Zweitkultur. Die Erträge von Hanf als Zweitkultur variierten mit Werten zwischen 6,5 (*Werlte*) und 15,5 t TM ha⁻¹ (*Haus Düsse*) ebenfalls sehr stark. Der in *Straubing* anstatt Hanf angebaute Quinoa erreichte einen TM-Ertrag von 6,4 t ha⁻¹. Das Mais-/Sonnenblumen/Amarant-Gemenge erreichte an den Standorten *Gülzow, Haus Düsse, Rauischholzhausen* und *Witzenhausen* ähnliche Erträge wie die Mais-/Sonnenblumen-Gemenge und in *Dornburg, Straubing* und *Werlte* geringere als diese.

Erträge der drei Versuchsjahre im Mittel der Standorte

Da neben dem Standorteinfluss auch der Jahreseffekt sehr ausgeprägt ausfiel, sind in **Tab. 19** die Einzel- und Jahreserträge aller Varianten im Mittel der Standorte pro Versuchsjahr sowie deren signifikanten Unterschiede aufgelistet. Die Jahreserträge von Mais in der HFN waren im zweiten Jahr signifikant höher als die Erträge von Sonnenblumen, WR-Energie und WR-Brot in der HFN. Im dritten Versuchsjahr lagen lediglich gegenüber den Sonnenblumen signifikante Mehrerträge vor. WR-Energie wies in allen drei Versuchsjahren höhere Erträge als WR-Brot auf, wobei hier keine signifikanten Unterschiede vorlagen. Im dritten Versuchsjahr lagen die Erträge von WR-Energie signifikant über den Sonnenblumenenerträgen der HFN. Die Jahreserträge von Mais in der ZKN waren im ersten Versuchsjahr signifikant höher als die Erträge von Mais, Sonnenblumen, WR-Energie und WR-Brot der HFN. Im zweiten Jahr waren diese signifikant höher als die Erträge von Sonnenblumen, WR-Energie und WR-Brot und im dritten Jahr waren diese lediglich den Sonnenblumen der HFN signifikant im Ertrag überlegen. Innerhalb der ZKN waren kaum signifikante Unterschiede der Jahreserträge zu beobachten.

Tab. 19: Jahreserträge der Hauptfrucht- (oben) und Zweikultur-Nutzung (unten) im Mittel der Standorte sowie den signifikanten Unterschieden pro Versuchsjahr.

Hauptfrucht-Nutzung						
	2005/06		2006/07		2007/08	
Senf; Mais (<i>Atletico</i>)	19,7	a·cd·f·	24,4	·····i·	20,2	··de·
Senf; Mais (Stamm)	21,1	···efg	23,7	·····ij	21,6	···ef
Senf; Sonnenbl. (<i>Methasol</i>)	16,1	ab···	14,2	abcd·····	13,5	ab···
Senf; Sonnenbl. (<i>Alisson</i>)	15,4	a····	13,8	ab·d·····	12,6	a····
WR-Energie (<i>Balistic</i>); Senf	18,3	a·c·f·	16,2	a···e····	18,6	··c·e·
WR-Energie (Sorte 2); Senf	17,6	a···f·	15,6	abcd·····	19,0	··c·e·
WR-Brot (<i>Visello</i>); Senf	15,2	ab····	13,3	ab······	15,7	a·cd··
WR-Brot (<i>Rasant</i>); Senf	15,3	a···f·	13,0	a·······	14,9	a·c··

Zweikultur-Nutzung						
	2005/06		2006/07		2007/08	
WRü; Mais	23,0	··c··g	20,1	···ef·h·j	20,7	···ef
WRü; Sorghum	20,6	·b·efg	15,0	abcd·····	17,1	a···e·
WRü; Sonnenbl.	19,1	a·cd·f·	17,6	··defg···	17,4	a···e·
WRü; Mais/Sonnenbl.	20,9	a····g	18,7	··c·ef·h·	18,4	·bc·e·
WR; Mais	25,1	·····g	24,0	·····ij	21,6	···e·
WR; Sorghum	21,4	····fg	18,4	··def·h·	19,0	··c·e·
WR; Sonnenbl.	20,6	a····g	20,9	····f·i·	19,7	··c·e·
WR; Mais/Sonnenbl.	22,1	····fg	22,2	····hi·	20,3	··de·
WR / WE; Mais	23,8	··d·g	23,9	·····ij	21,9	···e·
WR / WE; Sorghum	21,4	····fg	17,4	··def···	18,6	··c·e·
WR / WE; Sonnenbl.	20,1	a····g	21,0	····f·i·	20,0	··de·
WR / WE; Mais/Sonnenbl.	20,7	·b·efg	21,4	····f·i·	20,4	··de·
WR / WG; Sudangras	21,6	····fg	20,6	···e··i·	20,4	··c·e·
WR / WG; Amarant	16,2	a···e·	17,2	·b·ef···	16,6	a·cd·f
WR / WG; Hanf	19,0	a····g	20,9	····f·i·	18,1	·bc·e·
WR / WG; Mais/Sonnenbl./Amarant	19,9	a·cd·f·	21,8	····ghi·	20,7	···ef

WR: Winterroggen WRü: Winterrübsen WE: Wintererbsen WG: Wintergerste
 Varianten mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich pro Spalte nicht signifikant voneinander ($\alpha=5\%$).

Im zweiten Jahr wiesen die Varianten mit Sorghum und Amarant signifikant geringere Erträge als der Mais in der ZKN auf. Im dritten Jahr war dies lediglich bei Amarant der Fall. Insgesamt waren die Jahreserträge der ZKN im ersten und der HFN im zweiten Versuchsjahr am höchsten.

3.3.2 Anteile der winter- und sommerannuellen Kulturen in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung

Hauptfrucht-Nutzung

Um den Einfluss der winter- und sommerannuellen Kulturen auf die Ertragsleistungen an den einzelnen Standorten charakterisieren zu können, sind in **Abb. 16** die Erträge von WR-Energie ('Balistic') und Mais ('Atletico') mit der Zwischenfrucht Senf in der HFN dargestellt.

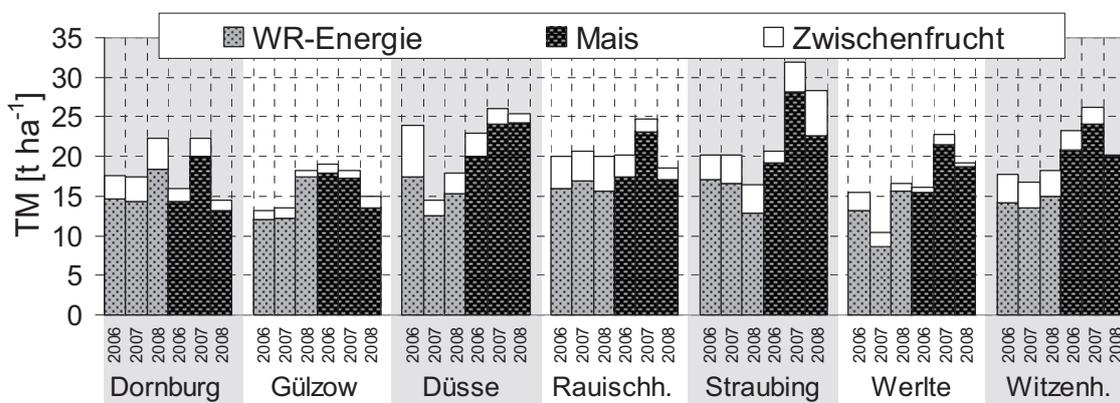


Abb. 16: Erträge von Winterroggen als Ganzpflanzensilage (WR-Energie) und Mais mit der Zwischenfrucht Senf in der Hauptfrucht-Nutzung.

Im Mittel der Standorte und Jahre fiel der Maisertrag knapp 5 t TM ha⁻¹ (+ 33%) höher aus als der WR-Energie-Ertrag. Die Schwankungen der Mehrererträge von Mais waren im Mittel der Standorte mit 3 t (+ 20%) im Jahr 2006, 9 t (+ 67%) im Jahr 2007 und 3 t TM ha⁻¹ (+17%) im Jahr 2008 sehr groß. Im zweiten Versuchsjahr beliefen sich die durchschnittlichen Maiserträge auf knapp 23 t TM ha⁻¹ und damit um 5 bzw. 4 t TM ha⁻¹ höher als im ersten und dritten Versuchsjahr. Damit erwies sich Mais im Jahr 2007 auf allen Standorten ertragsstärker als WR-Energie. Im Jahr 2006 lagen in *Dornburg* die Erträge von WR-Energie und Mais auf gleichem Niveau, während in *Gülzow* und *Witzenhausen* Mais einen klaren Ertragsvorteil hatte, der an den anderen Standorten weniger ausgeprägt ausfiel. Das dritte Versuchsjahr war durch hohe WR-Energie-Erträge von im Mittel der Standorte knapp 16 t TM ha⁻¹ gekennzeichnet. Damit lagen diese in *Dornburg* und *Gülzow* mit 18,4 und

17,5 t TM ha⁻¹ um 5,1 und 3,1 t TMha⁻¹ höher als die Maiserträge. An den Standorten *Rauischholzhausen* und *Werlte* war Mais dem WR knapp und in *Haus Düsse*, *Straubing* und *Witzenhausen* deutlich überlegen. Im Mittel der Jahre war Mais an den Standorten *Dornburg*, *Gülzow* und *Rauischholzhausen* mit 0,1 und 2,3 und 3,0 t TM ha⁻¹ gegenüber WR-Energie weniger überlegen als an den Standorten *Werlte*, *Witzenhausen*, *Haus Düsse* und *Straubing* mit Mehrerträgen des Mais zwischen 6,0 und 7,8 t TM ha⁻¹.

Zweikultur-Nutzung

In **Abb. 17** sind die Jahreserträge und Ertragsanteile der Winterung (Winterroggen) und Sommerung (Mais) der ZKN sortiert nach Jahreserträgen der einzelnen Standorte dargestellt. Die Jahreserträge lagen im Mittel über alle drei Versuchsjahre zwischen 20,4 (*Werlte*) und 27,1 t TM ha⁻¹ (*Straubing*) und damit 13% unter bzw. 15% über dem Mittel aller Standorte.

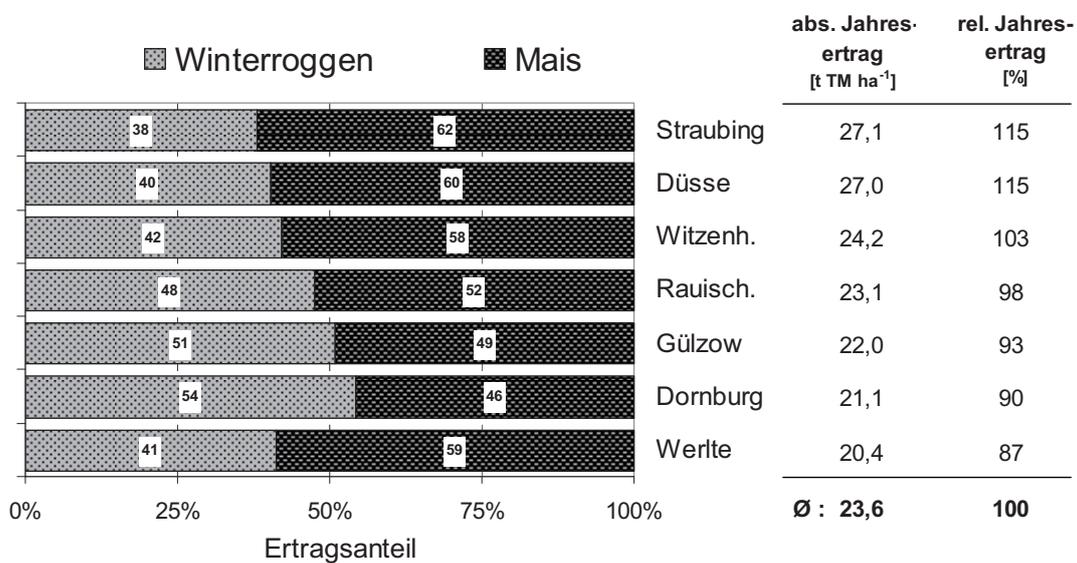


Abb. 17: Jahreserträge von Winterroggen und Mais in der Zweikultur-Nutzung sowie deren Ertragsanteile an den sieben Versuchsstandorten.

An den ertragsstärksten Standorten *Straubing*, *Haus Düsse* und *Witzenhausen* waren die Ertragsanteil von Mais mit 62%, 60% und 58% am höchsten,

während an den ertragsschwachen Standorten *Dornburg* und *Gülzow* die Erstkultur WR einen bedeutenderen Anteil am Jahresertrag einnahmen. In *Rauischholzhausen* waren die Ertragsanteile annähernd ausgeglichen. Am Standort *Werlte*, der die geringsten Erträge aufwies, war Mais mit 59% maßgeblich am Jahresertrag beteiligt. Im Mittel der Standorte waren die Erträge der Zweikultur Mais 25% höher als die Erträge der Erstkultur WR.

3.3.3 Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung

Um die beiden Anbausysteme bewerten zu können, wurden jeweils die Maissorte ‘*Atletico*’ und die Sonnenblumensorte ‘*Methasol*’ integriert. In **Tab. 20** sind die Saat-, BBCH 51 (Rispenstadium bzw. Sternstadium) und Erntetermine von Mais und Sonnenblumen in beiden Anbausystemen angegeben.

Tab. 20: Aussaat, BBCH 51 und Erntetermine von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung in den drei Versuchsjahren.

Hauptfrucht-Nutzung								
	Mais				Sonnenblumen			
	2006	2007	2008	Ø	2006	2007	2008	Ø
Saat	4.5.	21.4.	27.4.	28.4.	4.5.	21.4.	27.4.	28.4.
BBCH 51*	21.7.	15.7.	12.7.	16.7.	12.7.	26.6.	27.6.	1.7.
Ernte	15.9.	25.9.	18.9.	19.9.	14.9.	13.9.	15.9.	11.9.

Zweikultur-Nutzung								
	Mais				Sonnenblumen			
	2006	2007	2008	Ø	2006	2007	2008	Ø
Saat	10.6.	8.6.	18.6.	11.6.	10.6.	8.6.	18.6.	11.6.
BBCH 51*	8.8.	20.8.	23.8.	17.8.	29.7.	8.8.	11.8.	5.8.
Ernte	7.10.	18.10.	21.10.	16.10.	6.10.	18.10.	19.10.	14.10.

* BBCH 51: Rispenstadium bei Mais und Sternstadium bei Sonnenblumen

Die Saat der Zweitkulturen erfolgte im Mittel der Standorte etwa sechs Wochen später als die Saat der Hauptfrüchte. Mais und Sonnenblumen erreichten in der ZKN das Rispenschieben bzw. Sternstadium (BBCH 51) im Mittel am 17.8. und 5.8. und damit jeweils etwa einen Monat später als die Hauptfrüchte.

Um die unterschiedlichen phänologischen Entwicklungen an den einzelnen Standorten darzustellen, sind in **Abb. 18** die Entwicklungen von Senf und Mais sowie von WR und Mais in den beiden Anbausystemen exemplarisch für das dritte Versuchsjahr gegenübergestellt.

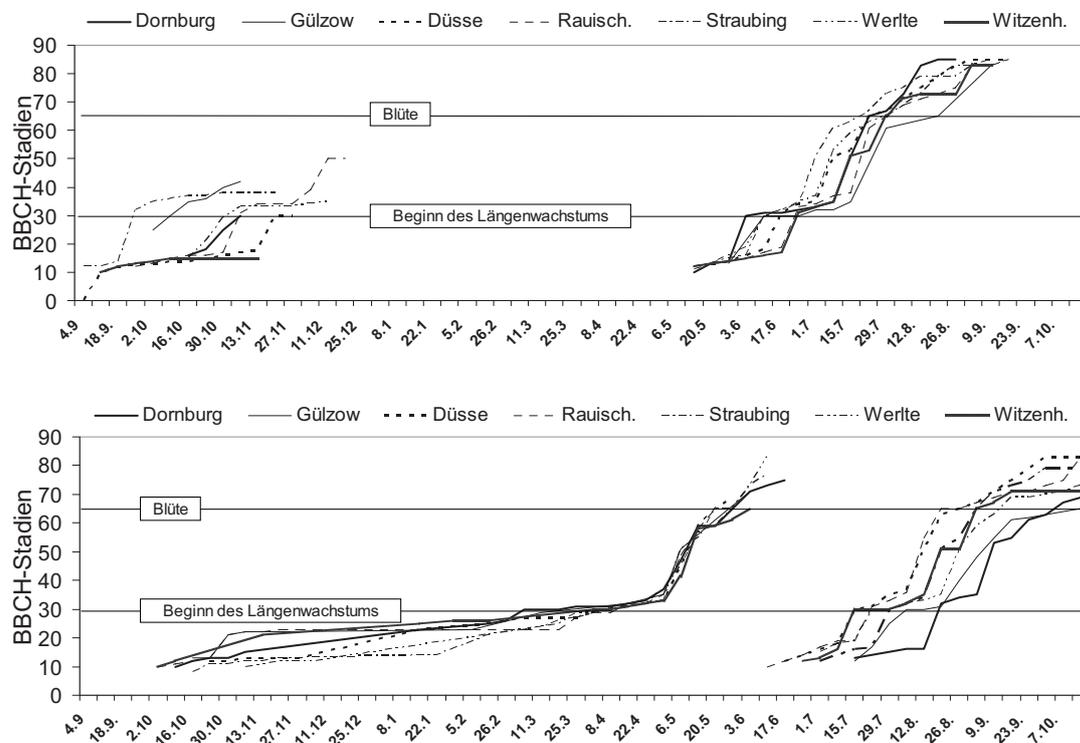


Abb. 18: Phänologische Entwicklung von Senf und Mais in der Hauptfrucht-Nutzung (**oben**) sowie Winterroggen und Mais in der Zweikultur-Nutzung (**unten**) anhand der BBCH-Skala im dritten Versuchsjahr.

In der HFN entwickelte sich die Zwischenfrucht Senf an den Standorten unterschiedlich schnell und starb während des Winters ab, wobei die Pflanzenreste bis ins Frühjahr erhalten blieben. Der im Mittel Ende April gesäte Mais als Hauptfrucht entwickelte sich über die Standorte relativ gleich. Die

Unterschiede im Eintritt in ein bestimmtes Entwicklungsstadium von etwa 10 Tagen sind maßgeblich auf die verschiedenen Saatzeiten zurück zu führen (Abb. 18, oben). Trotz unterschiedlicher vorwinterlicher Entwicklungen von WR, glichen sich die Entwicklungsstadien bis zum Stadium der Blüte zwischen der Standorten an (Abb. 18, unten). Die unterschiedlichen Reifegrade zur Ernte beruhten hauptsächlich auf verschiedenen Ernteterminen. Die Entwicklung von Mais als Zweitkultur fiel zwischen den Standorten unterschiedlicher als bei Mais in der HFN aus. Während sich der Mais in der HFN an den Standorten *Dornburg* und *Werlte* durch eine zügige Entwicklung auszeichnete, war diese in der ZKN im Vergleich zu den anderen Standorten deutlich langsamer. Am Standort *Gülzow* entwickelte sich sowohl der Mais in der HFN als auch in der ZKN verzögert. An den Standorten *Haus Düsse* und *Rauischholzhäusen* durchlief der Mais als Zweitfrucht die zügigste Entwicklung.

Mais erreichte im Mittel der Standorte in den Jahren 2006, 2007 und 2008 in der HFN Erträge von 17,9, 22,6 und 18,5 t TM ha⁻¹ (Abb. 19), wobei die Erträge der Zwischenfrucht Senf bzw. der Erstkulturen nicht berücksichtigt wurden.

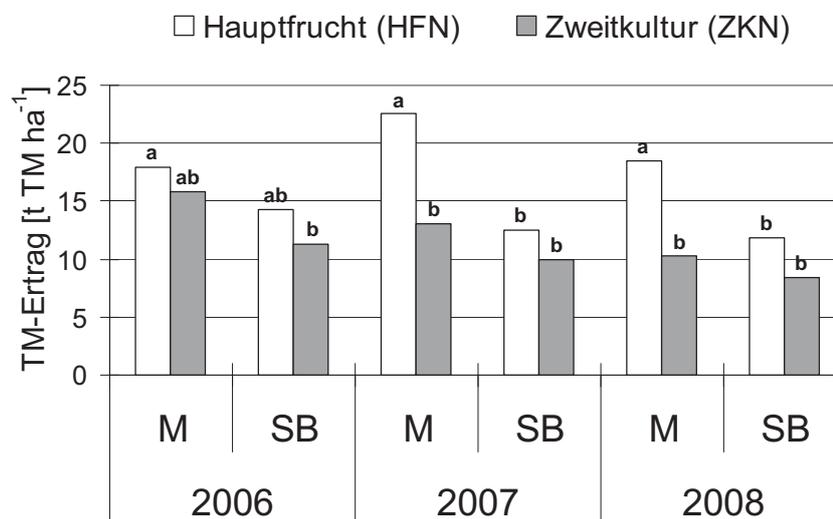


Abb. 19: Trockenmasseerträge von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) im Mittel der Standorte in den drei Versuchsjahren. Die TM-Erträge pro Versuchsjahr mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$).

In der ZKN lagen die Erträge von Mais bei 15,8, 13,1 und 10,3 t TM ha⁻¹ und damit um 11%, 42% und 44% niedriger als in der HFN. In den letzten beiden Jahren waren die Erträge von Mais in der HFN signifikant höher als die Erträge von Mais in der ZKN, Sonnenblumen in der HFN und Sonnenblumen in der ZKN. Auch die Erträge der Sonnenblumen als Zweitkultur fielen in den Jahren 2006, 2007 und 2008 21%, 21% und 29% geringer aus als in der HFN, wobei hier keine signifikanten Unterschiede zugeordnet werden konnten. In **Abb. 20** sind die Trockenmasseerträge der Sommerungen Mais und Sonnenblumen in beiden Anbausystemen auf allen sieben Versuchsstandorten dargestellt. An allen Standorten waren die Erträge von Mais und Sonnenblumen in der HFN größer als in der ZKN.

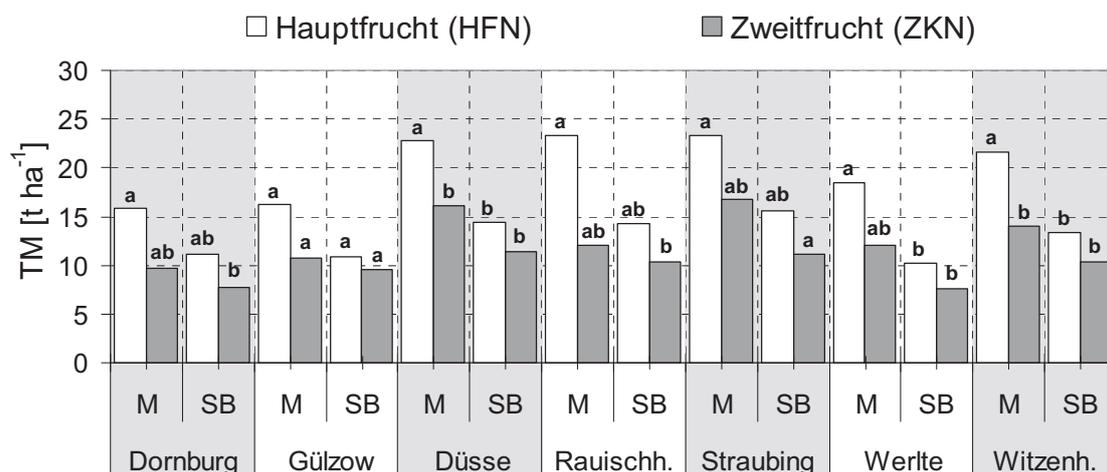


Abb. 20 Trockenmasseerträge von Mais und Sonnenblumen im Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) im Mittel der drei Versuchsjahre pro Standort. Die TM-Erträge pro Standort mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$).

Bei Mais waren diese Ertragsunterschiede allerdings lediglich an den Standorten *Haus Düsse* und *Witzenhausen* signifikant. Zwischen den Sonnenblumenenerträgen der beiden Anbausysteme lagen auf keinem der Standorte signifikanten Unterschiede vor. Die ertragliche Überlegenheit der Mais- gegenüber den Sonnenblumenenerträgen war in der HFN mit signifikanten Mehrerträgen

an den Standorten *Haus Düsse*, *Werlte* und *Witzenhausen* ausgeprägter als in der ZKN, wo keine signifikanten Unterschiede beobachtet werden konnten.

Mais

Im Mittel der Standorte und Versuchsjahre hatte Mais in der HFN eine um 17 Tage längere Vegetationszeit zur Verfügung als in der ZKN. Mais als Zweitkultur wurde hingegen erst einen Monat später geerntet. Die Anzahl der Vegetationstage waren in *Dornburg* und *Gülzow* am geringsten, während sie an den anderen Standorten ähnlich waren (**Abb. 21**). Je länger die Vegetationsdauer war, desto höher war in der Regel auch der erreichte Erntereifegrad. Mais erreichte als Hauptfrucht den Erntegrad der Teigreife (BBCH 85) und in der ZKN nach WR das Endstadium der Milchreife (BBCH 79).

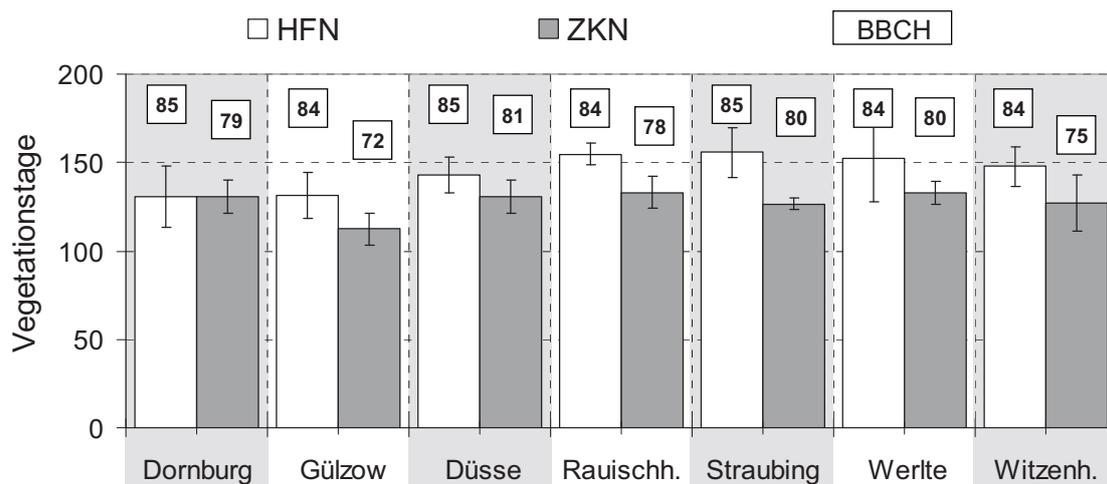


Abb. 21: Vegetationsdauer und Ernte-Reifegrade (BBCH) von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweitkultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Versuchsjahre mit Standardabweichungen.

Der angestrebte Reifegrad der frühen Teigreife (BBCH 83) konnte demnach im Mittel der Standorte in der ZKN bei Mais nicht ganz erreicht werden, was sich auch in den TS-Gehalten widerspiegelte (vgl. **Abb. 35**). An den Standorten *Dornburg*, *Gülzow*, *Rauschholzhausen* und *Witzenhausen* lagen die BBCH-Stadien von Mais als Zweitkultur unterhalb von 80. Die mittleren tägli-

chen Zuwachsraten von Mais waren im Versuchsjahr 2006 in beiden Anbausystemen mit knapp $14 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ gleich hoch (**Abb. 22**).

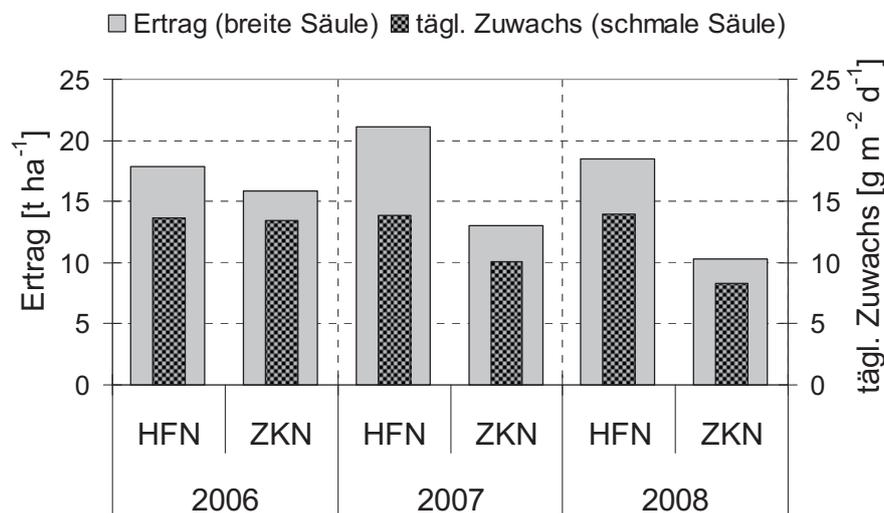


Abb. 22: Erträge und mittlere tägliche Zuwachsraten von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Standorte in den drei Versuchsjahren.

In den Jahren 2007 und 2008 lagen die täglichen Zuwachsraten von Mais als Zweitkultur mit $10,0$ und $8,3 \text{ g TM m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ deutlich unterhalb des ersten Jahres, während der tägliche Zuwachs von Mais als Hauptfrucht über alle Jahre unverändert blieb. Da die täglichen Zuwachsraten im Jahr 2006 in beiden Anbausystemen identisch waren, ist der Ertragsunterschied von 3 t TM ha^{-1} hier lediglich auf die längere Vegetationsdauer der Hauptfrüchte von 15 Tagen zurück zu führen. Im dritten Jahr betrug der Ertragsunterschied bei identischer Vegetationsdauer knapp 7 t TM ha^{-1} , was demnach der verminderten täglichen Zuwachsrate zugeschrieben werden kann. Im zweiten Versuchsjahr waren sowohl die Vegetationsdauer der HFN länger als auch die täglichen Zuwachsraten höher als in der ZKN, was zu dem höchsten Mehrertrag der Hauptfrucht von 10 t TM ha^{-1} führte. Die Ertragsunterschiede von Mais und Sommerungen als Haupt- bzw. Zweitfrüchte sind neben einer kürzeren Vegetationsdauer vor allem auf geringere tägliche Zuwachsraten zurück zu führen. Bei Mais bestand sowohl in der HFN ($r^2=0,80$; $n=21$) als auch in der ZKN

($r^2=0,96$; $n=21$) ein deutlicher positiver Zusammenhang zwischen täglichem Zuwachs und TM-Ertrag, wobei in der ZKN ein engerer Zusammenhang festgestellt werden konnte. Wie in **Abb. 23** ersichtlich wird, beruhten die hohen Maiserträge an den Standorten *Haus Düsse*, *Straubing* und *Witzenhausen* in beiden Anbausystemen auf deutlich höhere tägliche Zuwachsraten und weniger auf eine längere Vegetationsdauer (vgl. **Abb. 21**).

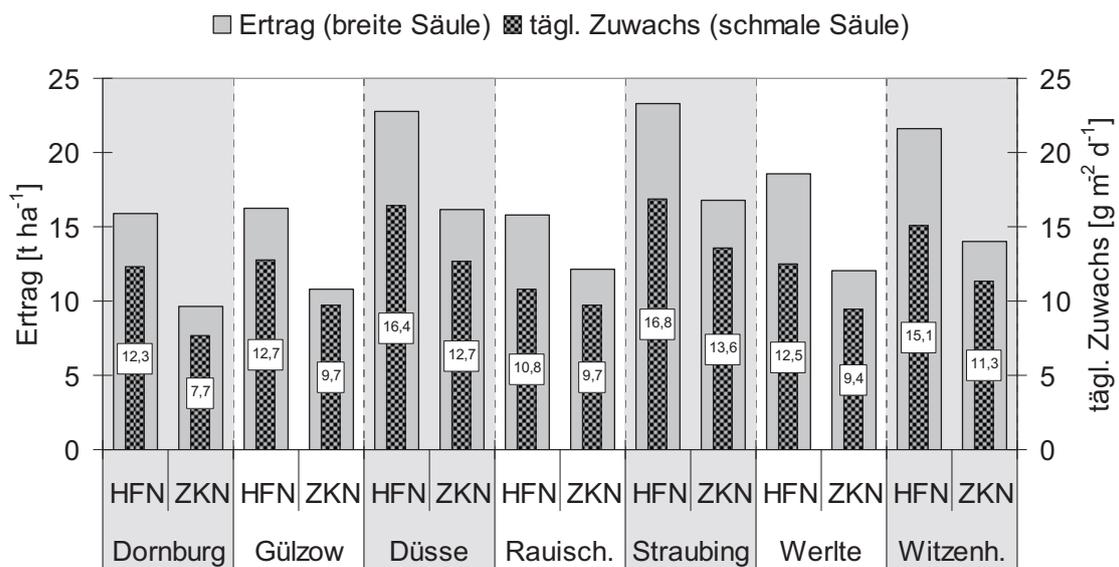


Abb. 23: Erträge und mittlere tägliche Zuwachsraten von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Versuchsjahre an den sieben Standorten.

Die täglichen Zuwachsraten an den Standorten *Werlte*, *Dornburg*, *Gülzow* und *Rauischholzhausen* lagen generell auf einem tieferen Niveau. Für die Mehrererträge der HFN sind neben der länger genutzten Vegetationsdauer vor allem höhere tägliche Zuwachsraten verantwortlich. Am Standort *Dornburg* war die Vegetationsdauer in beiden Anbausystemen identisch und die Ertragsunterschiede sind demnach auf den verschiedenen täglichen Zuwachsraten zurück zu führen. In *Rauischholzhausen* hingegen war der Einfluss der Vegetationsdauer auf den Mehrerertrag der HFN bedeutender als die täglichen Zuwachsraten, welche annähernd identisch waren.

In **Abb. 24** sind die Trockenmasseerträge von Mais als Hauptfrucht und als Zweitkultur in den drei Versuchsjahren auf allen Standorten dargestellt. Die Maiserträge der HFN schwankten zwischen 13,3 und 28,1 t TM ha⁻¹ und die Erträge von Mais als Zweitkultur zwischen 4,5 und 18,7 t TM ha⁻¹.

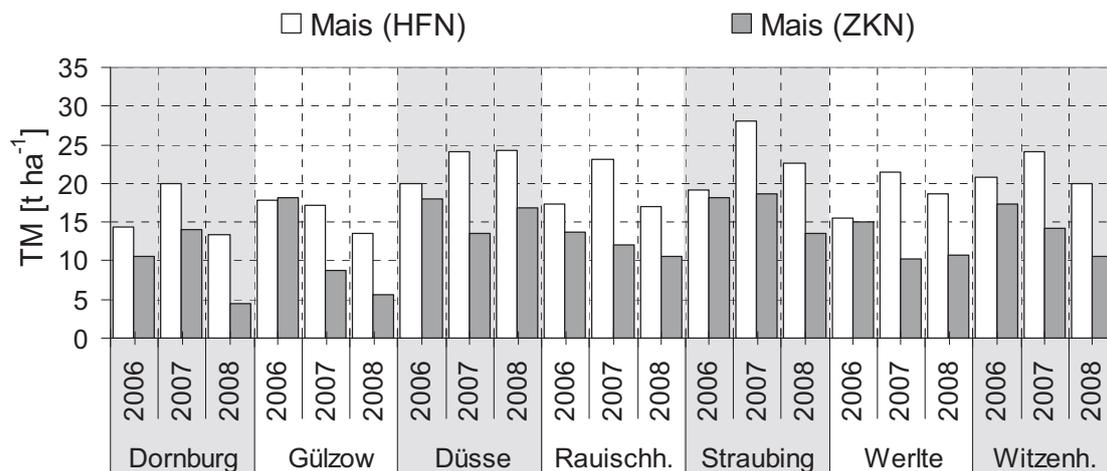


Abb. 24: Trockenmasseerträge von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweitkultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Standorten in den drei Versuchsjahren.

Die ermittelten Erträge von Mais in der HFN stimmen in der Abstufung der Jahre gut mit den Erträgen der Landessortenversuche überein (vgl. **Tab. 6**), bei denen sich das Jahr 2007 ebenfalls als das ertragsstärkste herauskristallisierte. Im ersten Versuchsjahr lagen die Erträge von Mais in der ZKN zwischen 27% unter (*Dornburg*) und 1% über (*Gülzow*) den Erträgen von Mais in der HFN. Im Mittel der Standorte lagen die Maiserträge der ZKN in den Jahren 2006, 2007 und 2008 um 11%, 42% und 44% unter den Erträgen von Mais in der HFN. Mit Ausnahme der Erträge in *Dornburg* und *Gülzow* im Jahr 2008 lagen alle Erträge von Mais als Zweitkultur über 10 t TM ha⁻¹.

Sonnenblumen

Im Mittel der Standorte haben die Sonnenblumen in der HFN die Vegetationszeit 10 Tage länger als in der ZKN genutzt. Die Ernte der Sonnenblumen als Hauptkultur erfolgte im Mittel der Standorte in der ersten Septemberhälfte

etwas vor der Maisernte. Die Sonnenblumen als Zweitkulturen wurden erst Mitte Oktober und damit einen Monat später geerntet. In **Abb. 25** sind die Vegetationstage von Sonnenblumen in den beiden Anbausystemen im Mittel der drei Versuchsjahre für alle Standorte sowie die Reifestadien zur Ernte (BBCH) angegeben.

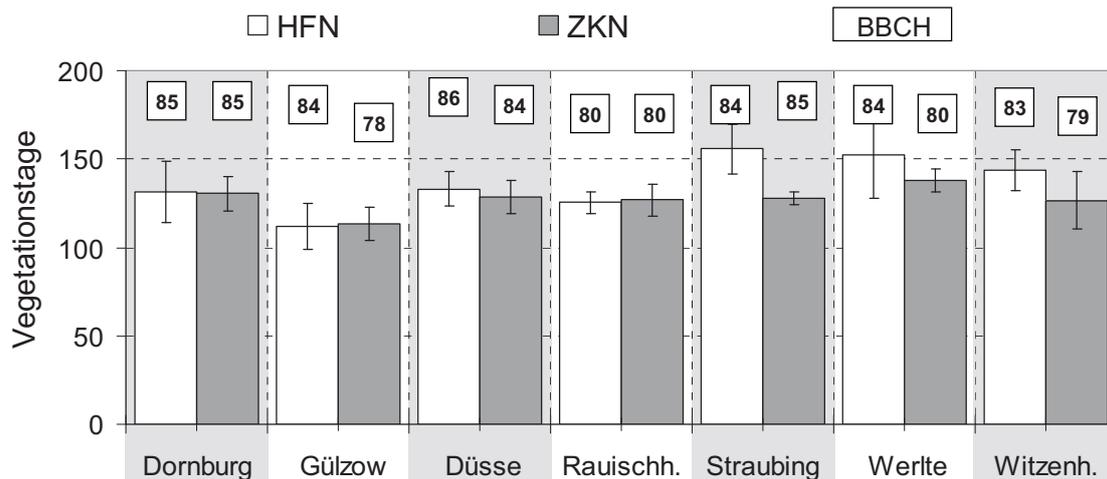


Abb. 25: Vegetationstage und Ernte-Reifegrade (BBCH) von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweitkultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Versuchsjahre mit Standardabweichungen.

Die Anzahl genutzter Vegetationstage waren in *Gülzow* in beiden Anbausystemen am geringsten, während die Vegetationsdauer in *Straubing*, *Werlte* und *Witzenhausen* in der HFN länger war als in der ZKN. In *Dornburg*, *Gülzow*, *Haus Düsse* und *Rauschholzhausen* war die Vegetationsdauer von Sonnenblumen in der HFN und der ZKN annähernd gleich lang. Je länger die Vegetationsdauer war, desto höher war in der Regel auch der Erntereifegrad. Sonnenblumen erreichten als Hauptfrüchte den Erntegrad der Zitronenreife (BBCH 84) und in der ZKN nach WR das BBCH-Stadium 81. Der angestrebte Reifegrad (BBCH 83) konnte demnach im Mittel der Standorte bei Sonnenblumen als Zweitfrucht nicht ganz erreicht werden, was sich auch hier in den TS-Gehalten widerspiegelte (vgl. **Abb. 35**). Die Unterschiede im Reifegrad zwischen den beiden Anbausystemen waren bei den Sonnenblumen geringer

als bei Mais. Bei den Sonnenblumen in der ZKN lagen lediglich die BBCH-Stadien von *Gülzow* und *Witzenhausen* unter 80.

Sonnenblumen in der HFN wiesen in den Jahren 2006, 2007 und 2008 mit 11,7, 8,7 und 8,5 g TM m⁻² d⁻¹ geringere tägliche Zuwachsraten auf als Mais. Außerdem lagen diese in den letzten zwei Versuchsjahren auf einem geringeren Niveau als im ersten (**Abb. 26**), während die täglichen Zuwachsraten von Mais in der HFN zwischen den Jahren identisch waren (vgl. **Abb. 22**). Sonnenblumen wiesen in der ZKN in allen drei Versuchsjahren geringere tägliche Zuwachsraten auf als in der HFN. Die Abstufung der Sonnenblumen als Zweitfrucht war identisch und lag ebenso auf einem geringeren Niveau als bei Mais als Zweitfrucht (vgl. **Abb. 22**).

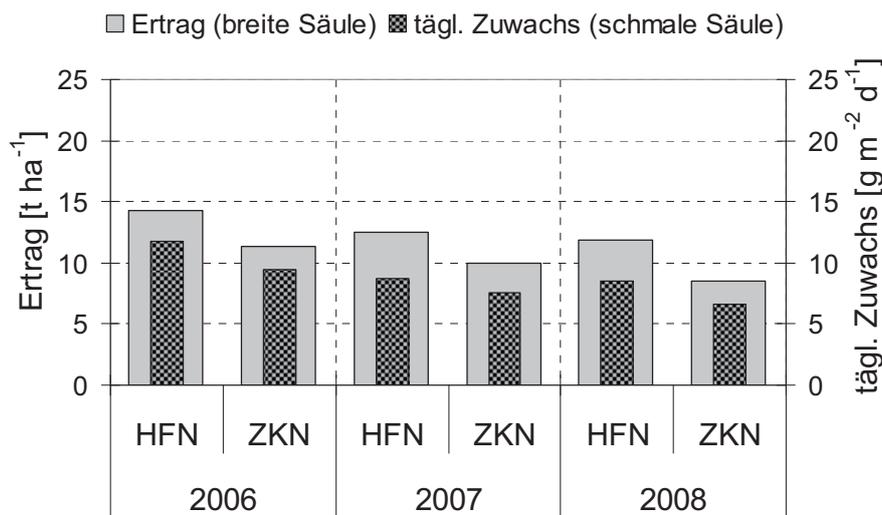


Abb. 26: Erträge und mittlere tägliche Zuwachsraten von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Standorte in den drei Versuchsjahren.

Sowohl bei Sonnenblumen in der HFN ($r^2=0,77$, $n=21$) als auch in der ZKN ($r^2=0,93$, $n=21$) lag ein klarer positiver Zusammenhang zwischen Ertrag und täglichen Zuwachs vor.

In **Abb. 27** sind die TM-Erträge und die täglichen Zuwachsraten von Sonnenblumen in beiden Anbausystemen für alle Versuchsstandorte dargestellt. In der HFN wiesen die Standorte *Haus Düsse*, *Rauischholzhausen* und *Straubing* die höchsten täglichen Zuwachsraten und Erträge auf. Da die genutzten Vegetationszeiten von Sonnenblumen an den Standorten *Dornburg*, *Gülzow*, *Haus Düsse* und *Rauischholzhausen* in beiden Anbausystemen identisch, bzw. sogar etwas länger in der ZKN waren (vgl. **Abb. 25**), sind die Mehrerträge der Hauptfrüchte hier auf die höheren täglichen Zuwachsraten zurück zu führen. Lediglich an den Standorten *Straubing*, *Werlte* und *Witzenhausen* war die Vegetationsdauer von Sonnenblumen als Hauptfrucht länger, was ausschlaggebend für die Ertragsunterschiede war, da sich die täglichen Zuwachsraten hier nur geringfügig unterschieden.

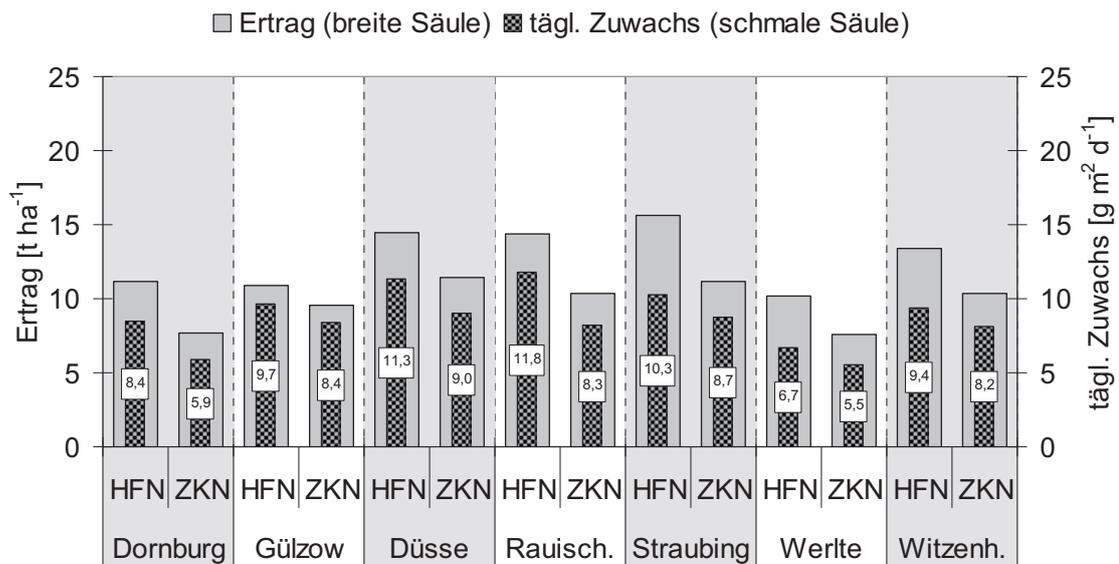


Abb. 27: Erträge und mittlere tägliche Zuwachsraten von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Versuchsjahre an den sieben Standorten.

In der HFN schwankten die Erträge der Sonnenblumen zwischen 7,3 und 19,4 t TM ha⁻¹ und in der ZKN zwischen 6,1 und 14,5 t TM ha⁻¹ (**Abb. 28**). Die Erträge von Sonnenblumen in der ZKN lagen dabei im Mittel der Standorte in

den Jahren 2006, 2007 und 2008 um 21%, 20% und 29% niedriger als in der HFN.

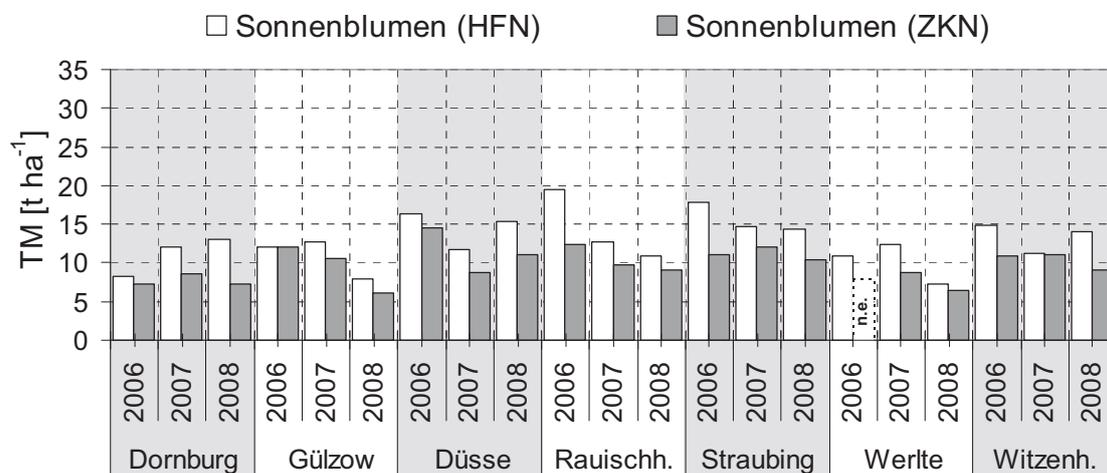


Abb. 28: Trockenmasseerträge von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Standorten in den drei Versuchsjahren.

Jahreserträge

Der Mais-Jahresertrag in der HFN setzt sich aus der Zwischenfrucht Senf und der Maissorte 'Atletico' zusammen. In der ZKN ist der Jahresertrag die Summe aus WR als Erstkultur und Mais ('Atletico') als Zweitkultur. Entsprechendes gilt für die Sonnenblumensorte 'Methasol'.

Im Mittel aller Standorte erreichte die ZKN mit Mais ('Atletico') nach WR in den ersten beiden Versuchsjahren mit 25,1 und 24,0 t TM ha⁻¹ höhere Jahreserträge als im dritten Jahr mit lediglich 21,6 t TM ha⁻¹ (Abb. 29). In der HFN erzielte Mais im zweiten Versuchsjahr mit 24,6 t TM ha⁻¹ deutlich höhere Jahreserträge als im ersten und dritten Jahr mit 19,7 und 20,2 t ha⁻¹. Damit war der Mehrertrag der ZKN im ersten Versuchsjahr mit über 5 t TM (+ 27%) am deutlichsten, im dritten Versuchsjahr betrug dieser 1,4 t (+ 7%) und im zweiten war er aufgrund der hohen Erträge der HFN sogar 0,6 t (- 3%) geringer als in der HFN.

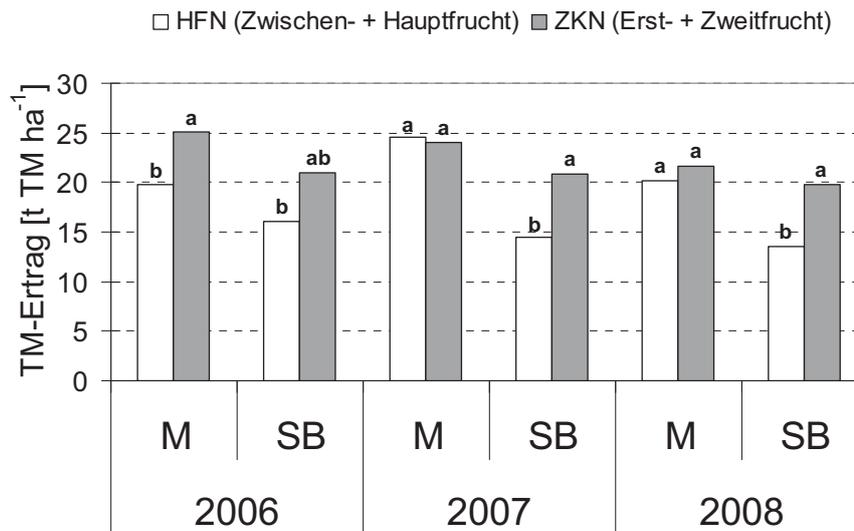


Abb. 29: Trockenmassejahreserträge von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) im Mittel der Standorte in den drei Versuchsjahren. Die TM-Erträge pro Versuchsjahr mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$).

Die Sonnenblumenerträge lagen in allen drei Versuchsjahren in der ZKN höher als in der HFN. Im zweiten und dritten Versuchsjahr waren die Jahreserträge von Sonnenblumen in der ZKN signifikant um 6,4 (+ 44%) und 6,2 t TM ha⁻¹ (+ 46%) höher als in der HFN, während der Mehrertrag von 4,9 t TM ha⁻¹ (+ 30%) im ersten Jahr nicht signifikant war. In **Abb. 30** sind die Jahreserträge von Mais bzw. Sonnenblumen in der HFN und ZKN für jeden Standort im Mittel der drei Versuchsjahre dargestellt. Im Mittel der drei Versuchsjahre waren die Jahreserträge von Mais in der ZKN auf allen Standorten höher als in der HFN, wobei sich an keinem der Standorte signifikante Unterschiede ergaben. Die prozentualen Ertragsteigerungen variierten für Mais zwischen 0,3% (*Straubing*) und 26,2% (*Gülzow*) mit einem Mittelwert von 10%. Bei den Sonnenblumen wurden durch die ZKN erheblich höhere Ertragsteigerungen zwischen 10,8% (*Straubing*) und 71,3% (*Gülzow*) erzielt. Trotzdem war dieser Unterschied lediglich am Standort *Gülzow* signifikant. Die mittlere Steigerung der Jahreserträge durch die ZKN betrug bei Sonnenblumen 38%.

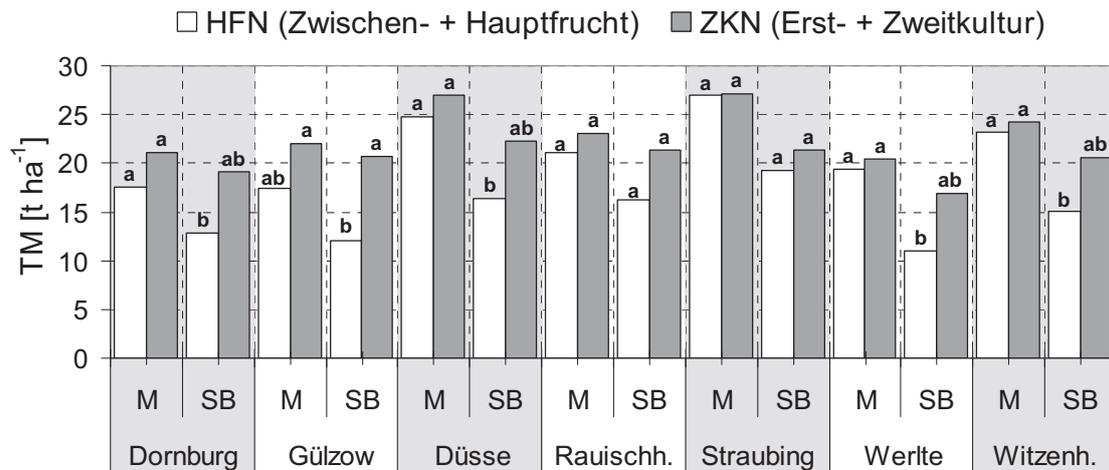


Abb. 30: Vergleich der über die drei Versuchsjahre gemittelten Jahreserträge von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) im Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungs-system (ZKN) nach Winterroggen. Die TM-Erträge pro Standort mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$).

Da sich der Jahreseffekt als sehr bedeutend erwies, sind in **Abb. 31** die Jahrestrockenmasseerträge von Mais in der HFN und in der ZKN für jedes Versuchsjahr getrennt dargestellt.

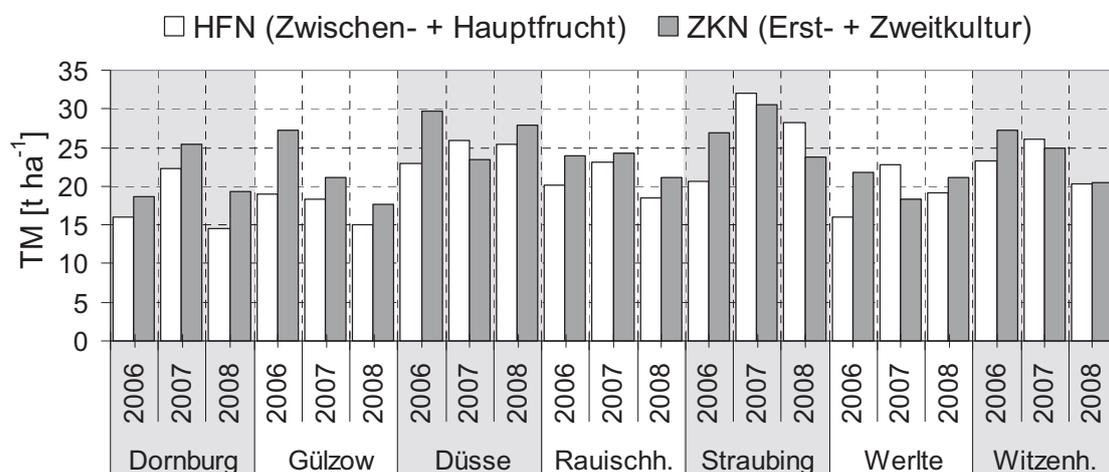


Abb. 31: Jahrestrockenmasseerträge von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Standorten in den drei Versuchsjahren.

Die höchsten Maiserträge wurden in beiden Anbausystemen in *Straubing*, *Haus Düsse* und *Witzenhausen* erzielt. Der höchste Ertragszuwachs der ZKN

wurde auf allen Standorten, mit der Ausnahme von *Dornburg*, im ersten Versuchsjahr erzielt. An den Standorten *Dornburg*, *Gülzow* und *Rauischholzhausen* konnte durch den Anbau von Mais in der ZKN in allen drei Versuchsjahren ein Mehrertrag erwirtschaftet werden. In *Haus Düsse*, *Werlte* und *Witzenhausen* war die ZKN in zwei der drei Versuchsjahre und in *Straubing* lediglich im ersten Versuchsjahr mit einem zusätzlichen Ertrag verbunden. In 16 der 21 Fälle erwiesen sich die Jahreserträge der ZKN gegenüber der HFN als überlegen.

Die Sonnenblumenerträge lagen auf einem niedrigeren Niveau als die Maiserträge (**Abb. 32**). Klare Ertragsvorteile der ZKN in allen drei Versuchsjahren konnten in *Dornburg*, *Gülzow*, *Haus Düsse* und *Witzenhausen* erzielt werden. Auch in *Werlte* führte der Anbau von Sonnenblumen in der ZKN in den beiden untersuchten Jahren zu höheren Erträgen als in der HFN.

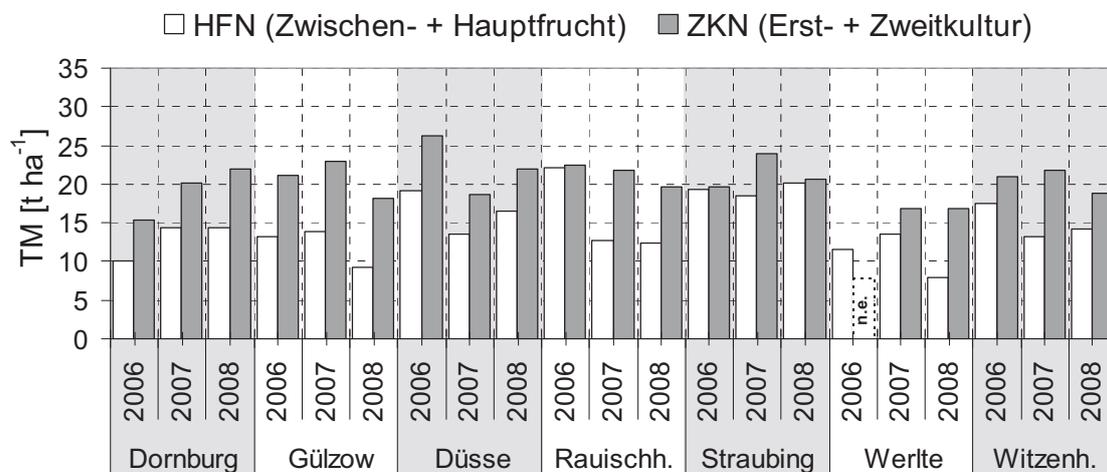


Abb. 32: Jahrestrockenmasseerträge von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Standorten in den drei Versuchsjahren.

In allen 20 der hier abgebildeten Vergleiche waren die Jahreserträge der ZKN denen der HFN überlegen. Lediglich in *Straubing* erreichten die Erträge der HFN im ersten und dritten Versuchsjahr annähernd die Erträge der ZKN. Am Standort *Rauischholzhausen* war dies nur im ersten Versuchsjahr der Fall.

Im Mittel aller Standorte (vgl. **Tab. 19**) lagen die Erträge von Sonnenblumen und WR in der ZKN in allen drei Versuchsjahren deutlich höher als in der HFN, wobei sich die Rangfolge der Jahre im Vergleich zu Mais genau umgekehrt verhielt. Die höchsten Mehrerträge der ZKN lagen mit 6,4 und 6,2 t TM ha⁻¹ im zweiten und dritten Jahr vor und im ersten Jahr betrug die Ertragsdifferenz immerhin noch 4 t TM.

3.3.4 Sorghum, Sudangras, Amarant und Hanf in der Zweikultur-Nutzung

In **Abb. 33** sind die Erträge von Sorghum nach WR sowie Sudangras nach WR/WG aller Versuchsstandorte und Jahre dargestellt. Die Erträge von WR und Sorghum lagen im Mittel der Standorte in den Jahren 2006, 2007 und 2008 bei 21,4, 18,4 und 19,0 t TM ha⁻¹, wobei Sorghum 57%, 40% und 39% zum Jahresertrag beitrug. Der mittlere Ertrag von Sorghum über die Jahre und Standorte lag bei 9 t TM ha⁻¹, wobei hohe Schwankungen zwischen den Versuchsjahren auftraten. Der warme, trockene Sommer 2006 lieferte hierbei mit durchschnittlich 12,2 t TM ha⁻¹ die höchsten Erträge von Sorghum als Zweikultur und einen Jahresertrag von 21,4 t TM ha⁻¹. Ein Jahresertrag von knapp 30 t T ha⁻¹ konnte am Standort *Haus Düsse* im Jahr 2006 erzielt werden, wobei Sorghum hierbei mit 18 t TM ha⁻¹ beteiligt war. In *Rauischholzhausen* lagen die Sorghumerträge in allen drei Versuchsjahren über 10 t TM ha⁻¹ und auch die Jahreserträge erreichten in allen drei Jahren Werte über 20 t TM ha⁻¹. An den Standorten mit geringen Niederschlägen *Dornburg* und *Gülzow* erreichte Sorghum im Jahr 2006 als Zweikultur TM-Erträge von über 10 t ha⁻¹. In den Jahren 2007 und 2008 lagen die durchschnittlichen Erträge von Sorghum jeweils bei lediglich knapp 8 t TM ha⁻¹ und damit 39% und 37% geringer als im Jahr 2006.

Die Biomasseerträge von WR/WG und Sudangras waren in den drei Versuchsjahren mit 21,6, 20,6 und 20,4 t TM ha⁻¹ etwas höher als die von Sorghum und WR. Sudangras trug in den Jahren 2006, 2007 und 2008 mit 57%,

42% und 42% zum Jahresertrag bei. Im Jahr 2006 konnten sowohl Sorghum als auch Sudangras mit den Erstkulturen etwa 2 t TM ha⁻¹ höhere Erträge erreichen als Mais in der HFN (vgl. **Tab. 19**).

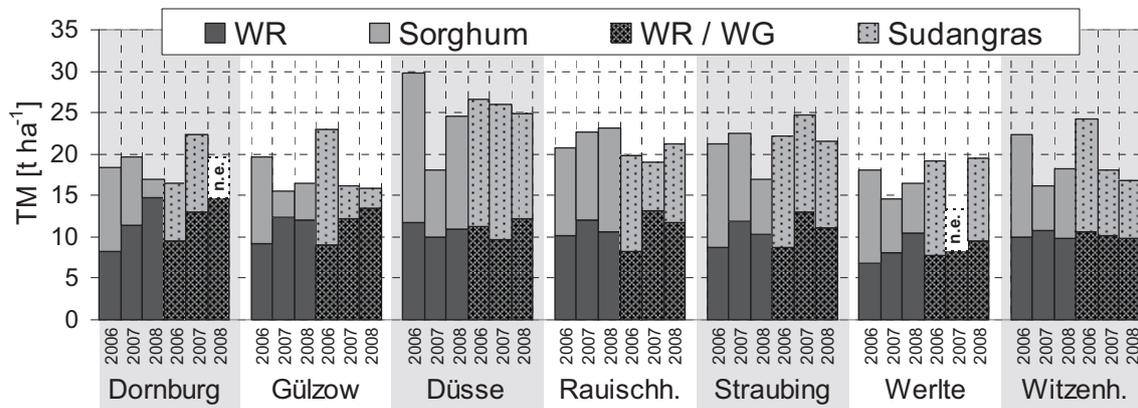


Abb. 33: Trockenmasseerträge von Winterroggen (WR) und Sorghum sowie Winterroggen/Wintergerste (WR/WG) und Sudangras in der Zweikultur-Nutzung in den drei Versuchsjahren an den sieben Standorten.

Im Vergleich zu Sorghum schwankten die Erträge von Sudangras geringer zwischen den Jahren und lagen im Mittel etwa 1 t TM ha⁻¹ höher, wobei hier auf die unterschiedlichen Erstkulturen hinzuweisen ist.

Die Erträge von Amarant als Zweitkultur nach WR/WG erzielten im Mittel der Standorte und Jahre knapp 6 t TM ha⁻¹ und variierten sehr stark (**Abb. 34**). An den Standorten *Dornburg* (2007) und *Rauschholzhausen* (2008) wurden Maximalwerte von knapp 12 t TM ha⁻¹ erreicht. Auf allen anderen Standorten lagen die TM-Erträge unter 10 t TM ha⁻¹. Die Erträge von Hanf als Zweitkultur lagen im Mittel der Standorte und Jahre bei 9 t TM ha⁻¹, wobei der geringste Ertrag im Jahr 2008 mit durchschnittlich 6 t TM ha⁻¹ zu verzeichnen war. Zusammen mit der Erstkultur WR/WG wurden im Mittel Jahreserträge von knapp 20 t TM ha⁻¹ erreicht. Die höchsten TM-Erträge wurden in *Haus Düsse* mit 19, 18 und 10 t TM ha⁻¹ ermittelt, was im Jahr 2006 zu einem Jahresertrag von 30 t TM ha⁻¹ führte.

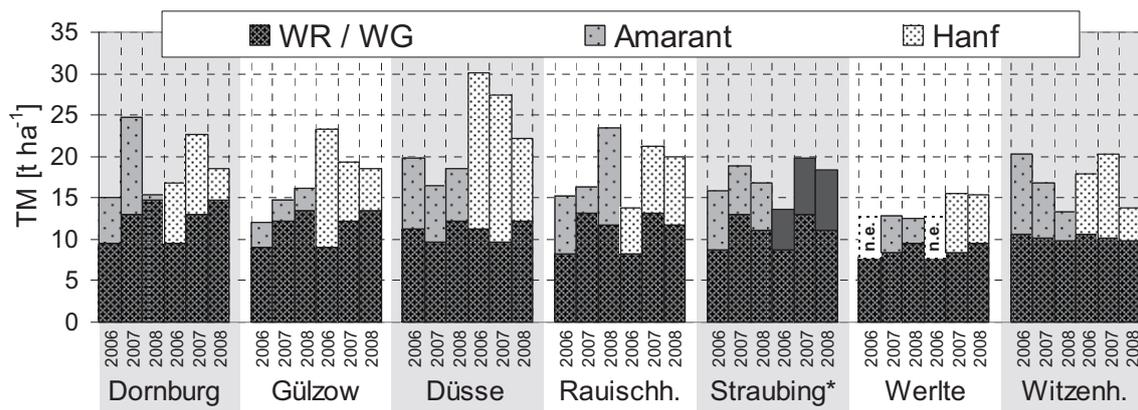


Abb. 34: Trockenmasseerträge von Winterroggen/Wintergerste (WR/WG) und Amaranth sowie Hanf in der Zweikultur-Nutzung in allen drei Versuchsjahren pro Standort. *Quinoa statt Hanf.

In *Gülzow* erreichte Hanf als Zweikultur im Jahr 2006 14 t TM ha⁻¹. Alle anderen Erträge lagen unter 10 t TM ha⁻¹. Das am Standort *Straubing* statt Hanf angebaute Quinoa erreichte im Mittel TM-Erträge von etwas über 6 t ha⁻¹ und im Jahr 2007 mit WR/WG als Erstkultur einen Jahresertrag von 20 t TM ha⁻¹.

3.3.5 TS-Gehalte

In **Abb. 35** sind die mittleren TS-Gehalte der Kulturpflanzen beider Anbausysteme in den drei Versuchsjahren dargestellt. Für eine optimale chemische Zusammensetzung der Silage ist ein TS-Gehalt des Ausgangsmaterials von etwa 30% erforderlich (BAL 2006, AMLER 2008), was durch eine durchgezogene Linie gekennzeichnet ist. Mais in der HFN erreichte in allen drei Versuchsjahren die angestrebten 30% TS-Gehalt, während WR-Energie mit etwa 38% darüber lag. Die Zwischenfrucht Senf war mit TS-Gehalten von etwa 15% nicht zur Silierung geeignet und die Sonnenblumen in der HFN und ZKN wiesen ebenfalls etwas zu niedrige TS-Gehalte auf. Bei den Erstkulturen lag der mittlere TS-Gehalt der WRü vor allem im ersten Versuchsjahr auf einem zu geringen Niveau. Die TS-Gehalte der anderen Erstkulturen WR, WR/WE und WR/WG waren mit knapp 30% im ersten Jahr und etwas über 30% in den

beiden letzten Jahren optimal für eine Silierung. In allen Versuchsjahren waren die TS-Gehalte von WR-Energie signifikant höher als die TS-Gehalte von WRü als Erstkultur.

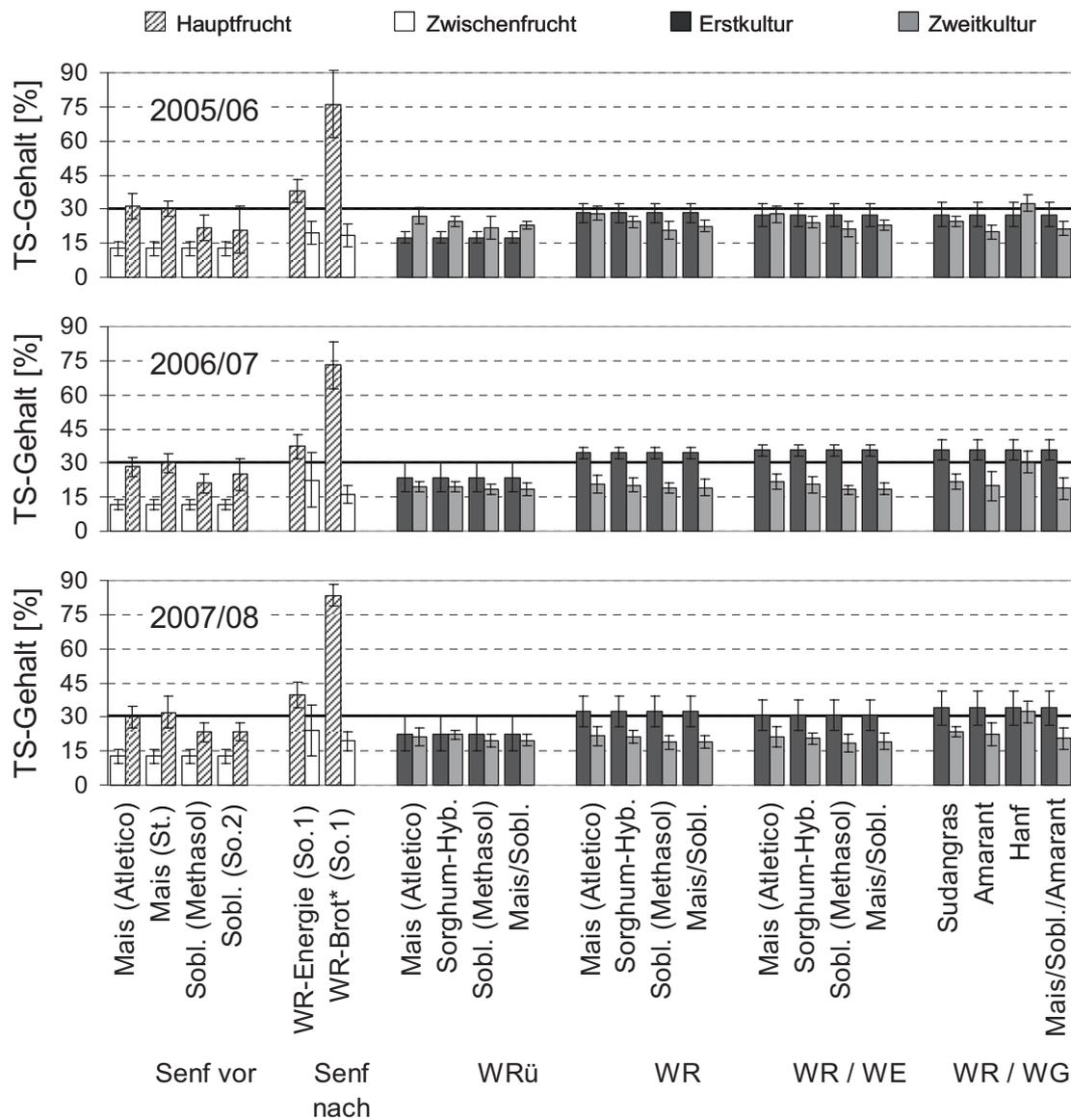


Abb. 35: Trockensubstanzgehalte aller Kulturen in den drei Versuchsjahren mit Standardabweichungen. **Links:** Hauptfrucht-Nutzungssystem, **rechts:** Zweikultur-Nutzungssystem. *Ganzpflanze

Lediglich im dritten Versuchsjahr waren die TS-Gehalte von WR-Energie signifikant höher als von WRü, WR und WR/WE. Die TS-Gehalte von Mais in

der HFN lagen im Mittel der Jahre signifikant höher als die TS-Gehalte aller Zweitkulturen mit Ausnahme von Hanf. Die TS-Gehalte der Sonnenblumen in der HFN wiesen keine signifikant höheren TS-Gehalte auf als alle Zweitkulturen. Unter den Zweitkulturen bildete der Hanf mit über 30-32% den höchsten TS-Gehalt aus. Der TS-Gehalt von Mais lag etwas unter 30% und war damit höher als der von Sorghum, Sonnenblumen und Mais/Sonnenblumen-Gemenge. Generell wurden im zweiten und dritten Versuchsjahr geringere TS-Gehalte der Zweitkulturen ermittelt als im ersten. So erreichte Sorghum im ersten Jahr TS-Gehalte von ca. 25% und in den beiden Folgejahren lediglich 20%. Der gleiche Trend gilt für die TS-Gehalte der Sonnenblumen, welche generell etwa 1% niedriger lagen als die von Sorghum. Der TS-Gehalt von Amarant betrug in allen Versuchsjahren etwa 20%, was wohl auch für den geringen TS-Gehalt des Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenges verantwortlich war.

3.3.6 Gemengeanbau in der Zweikultur-Nutzung

Gemenge als Erstkulturen

In **Tab. 21** sind die Ertragsanteile von WR in Reinsaat sowie der Gemenge WR/WE und WR/WG als Erstkulturen angegeben. Die Erträge der Erstkulturen schwankten in *Dornburg* zwischen den Jahren mit knapp 30% besonders stark, während die Erträge in *Witzenhausen* relativ stabil waren. Im Mittel der Standorte waren keine Unterschiede der Ertragsschwankungen zwischen Reinsaat und Gemengeanbau zu beobachten. Im Gemenge mit WR nahmen die WE vom Trockenmasseertrag je nach Standort mit Anteilen zwischen 1% und 18% und einem Mittel von 8% nur eine untergeordnete Stellung ein. An den Standorten *Gülzow* und *Haus Düsse* betrugen die Ertragsanteile der WE 18% und 15%, während die Anteile an allen anderen Standorten unter 10% lagen. WG trug im Gemenge mit WR zwischen 29% und 48% und einem Mittel von 38% zum Ertrag bei. Die Gesamterträge von WR/WE (10,1 t TM ha⁻¹) lagen im Mittel der Standorte und Jahre etwas niedriger als die Erträge von

WR/WG (10,8 t TM ha⁻¹) und WR in Reinsaat (10,5 t TM ha⁻¹), wobei hierbei keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden konnten (vgl. **Tab. 18**).

Tab. 21: Erträge und mittlere prozentuale Standardabweichungen der Erstkulturen Winterroggen, Winterroggen/Wintererbse- und Winterroggen/Wintergerstengemenge sowie die Ertragsanteile der Gemengepartner.

	WR		WR / WE				WR / WG			
	Ertrag [t TM ha ⁻¹]	SD [%]	Ertrag [t TM ha ⁻¹]	SD [%]	WR [%]	WE [%]	Ertrag [t TM ha ⁻¹]	SD [%]	WR [%]	WG [%]
Dornburg	11,5	29	11,8	27	95	5	12,4	22	57	43
Gülzow	11,2	16	11,0	19	82	18	11,5	20	n.e.	n.e.
H. Düsse	10,9	9	9,4	15	85	15	11,0	12	57	43
Rauisch.	11,0	9	10,0	13	96	4	11,0	22	68	32
Straubing	10,3	16	10,0	23	99	1	10,9	20	52	48
Werlte	8,4	23	7,8	13	94	6	8,7	10	71	29
Witzenh.	10,2	5	10,2	3	93	7	10,2	4	67	33
Ø	10,5	15	10,1	16	92	8	10,8	16	62	38

WR: Winterroggen WE: Wintererbse WG: Wintergerste SD: Standardabweichung n.e.: nicht erhoben

Die Erträge und damit die N-Fixierungsleistung des Gemengepartners WE waren generell gering und schwankten sehr stark zwischen den Versuchsjahren 2006, 2007 und 2008, in denen im Mittel der Standorte 10, 1 und 15 kg N ha⁻¹ fixiert werden konnten. Hierbei wurde eine Fixierungsleistung von 2,5 kg N t⁻¹ FM⁻¹ unterstellt (LLH 2007).

Gemenge als Zweitkulturen

Als Zweitkulturen wurde neben Mais und Sonnenblumen in Reinsaat auch ein Mais/Sonnenblumen-Gemenge angebaut. In **Tab. 22** sind die Gesamterträge sowie die Ertragsanteile der Gemengepartner in den drei Versuchsjahren aufgelistet. Im Jahr 2006 erzielte das Mais/Sonnenblumen-Gemenge mit 14,3 t TM ha⁻¹ den höchsten Ertrag, wobei Mais mit 55% beteiligt war. In den Jahren 2007 und 2008 trugen dagegen die Sonnenblumen mehr zu den Erträgen bei, die jeweils knapp 2,0 t niedriger lagen als im ersten Jahr.

Tab. 22: Gesamterträge und Ertragsanteile des Mais/Sonnenblumen-Gemenges als Zweitkultur nach Winterrübsen, Winterroggen und Winterroggen/Wintererbsen-Gemenge im Mittel der Standorte in den drei Versuchsjahren.

	Gesamtertrag [t TM ha ⁻¹]	Anteil Mais [%]	Anteil Sonnenblumen [%]
2006	14,3	55	45
2007	12,6	46	54
2008	12,4	47	53
Ø	13,1	49	51

In **Tab. 23** sind die Erträge und die Ertragsanteile des Mais/Sonnenblumen-Gemenges sowie der Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenge angegeben.

Tab. 23: TM-Erträge und Ertragsanteile des Mais/Sonnenblumen-Gemenges nach Winterrübsen, Winterroggen und Winterroggen/Wintererbsen sowie des Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenges nach Winterroggen/Wintergerste im Mittel der drei Versuchsjahre an den sieben Versuchsstandorten.

	Mais / Sonnenblumen (nach WRü, WR, WR/WE)			Mais / Sonnenblumen / Amarant (nach WR/WG)			
	Ertrag [t TM ha ⁻¹]	Mais [%]	SB [%]	Ertrag [t TM ha ⁻¹]	Mais [%]	SB [%]	Am [%]
Dornburg¹	8,8	47	53	6,6	30	60	10
Gülzow²	9,7	68	32	9,1	45	45	10
Haus Düsse	13,5	54	46	13,5	39	46	15
Rauisch.	11,1	41	59	11,7	25	57	18
Straubing	11,8	49	51	8,1	42	49	9
Werlte³	9,3	48	52	8,0	23	66	11
Witzenh.	12,1	50	50	12,2	37	55	8
Ø	10,9	51	49	9,9	34	54	12

¹ Werte aus 2008 fehlen ² Werte aus 2007 und 2008 fehlen ³ Werte aus 2006 und 2008 fehlen
 WRü: Winterrübsen WR: Winterroggen WE: Wintererbsen WG: Wintergerste SB: Sonnenblumen
 Am: Amarant

An den Standorten *Gülzow* und *Haus Düsse* trug im Mais/Sonnenblumen-Gemenge der Mais mit 68% und 54% mehr zum Ertrag als die Sonnenblumen bei. In *Witzenhausen* lagen beide Ertragsanteile bei 50% und an den übrigen Standorten waren die Ertragsanteile der Sonnenblumen höher. Im Mais/Son-

nenblumen/Amarant-Gemenge waren die Ertragsanteile der Sonnenblumen auf allen Standorten mit Werten zwischen 45% und 66% am höchsten. Lediglich in *Gülzow* ergaben sich mit 45% identische Ertraganteile von Sonnenblumen und Mais. Amarant trug zwischen 8% und 18% zum Gesamtertrag bei. Der mittlere Ertrag des Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenges lag mit 9,9 t TM ha⁻¹ etwa 1 t niedriger als die Gemenge ohne Amarant, wobei hier auf die unterschiedlichen Erstkulturen hinzuweisen ist.

In **Abb. 36** sind die Trockenmasseerträge der Zweitkulturen Mais und Sonnenblumen in Reinsaat sowie im Gemenge in den drei Versuchsjahren dargestellt. Die Geraden repräsentieren die möglichen Ertragsanteile der beiden Reinsaat Mais und Sonnenblumen und die Punkte kennzeichnen die TM-Erträge von Mais und Sonnenblumen im Gemenge. In allen drei Versuchsjahren gab es im Mittel der Standorte einen Ertragsvorteil durch den Gemengeanbau im Vergleich zu Reinsaat von Mais und Sonnenblumen als Zweitkultur, welcher in **Abb. 36** am Abstand zwischen der Markierung und der Geraden sichtbar wird.

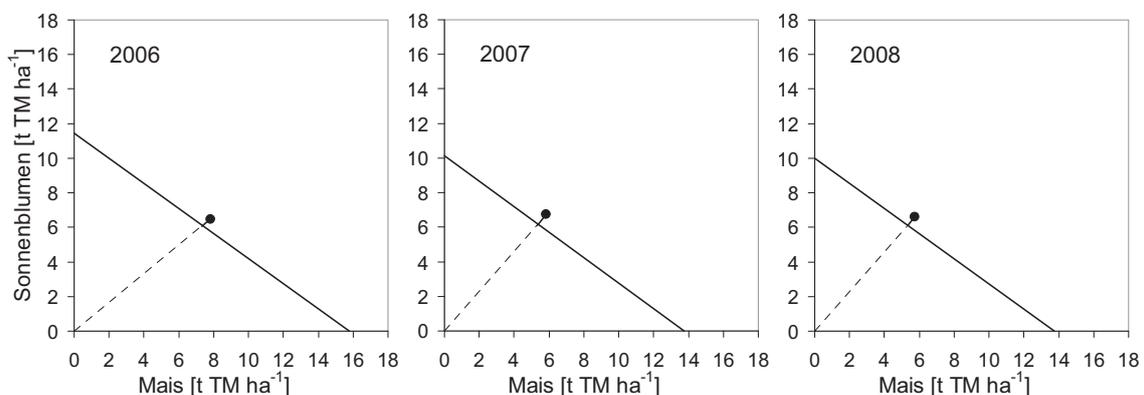


Abb. 36: Trockenmasseerträge der Zweitkulturen Mais und Sonnenblumen in Reinsaat sowie als Gemenge in den drei Versuchsjahren. Daten aus Dornburg (2008), Gülzow (2007, 2008) und Werlte (2006, 2008) fehlen.

Um die biologischen Effizienzen des Mais/Sonnenblumen-Gemenges an den einzelnen Standorten zu bewerten, wurden die »Land Equivalent Ratios«

(LER) (vgl. 2.5.3) erstellt. In **Tab. 24** sind diese für die Mais/Sonnenblumen-Gemenge an allen Versuchsstandorten und in den drei Jahren dargestellt.

Tab. 24: »Land Equivalent Ratios« (LER) von Mais und Sonnenblumen im Gemenge an den Versuchsstandorten in den drei Versuchsjahren.

	Dornburg	Gülzow	Haus Düsse	Rauisch.	Straubing	Werlte	Witzenh.	Ø
2006	1,61	0,87	0,97	1,11	0,95	n.e.	1,09	1,10
2007	1,46	n.e.	1,15	0,92	0,89	1,16	1,06	1,11
2008	n.e.	n.e.	1,08	1,06	1,02	n.e.	1,18	1,08

n.e.: nicht erhoben

Aus **Tab. 24** wird ersichtlich, dass die biologischen Effizienzen des Gemengeanbaus gegenüber der Reinkultur von Mais und Sonnenblumen im Mittel der Standorte in den Jahren 2006, 2007 und 2008 um 10%, 11% und 8% höher lagen.

In **Abb. 37** sind die LER-Werte für Mais und Sonnenblumen im Gemenge im Vergleich zum Reinanbau (LER=1) grafisch veranschaulicht. Anhand des LER von Mais und Sonnenblumen wird ersichtlich, dass sich Sonnenblumen meist als konkurrenzfähiger erwiesen, was durch die Lage der Punkte links von der Winkelhalbierenden deutlich wird (**Abb. 37/a, d**).

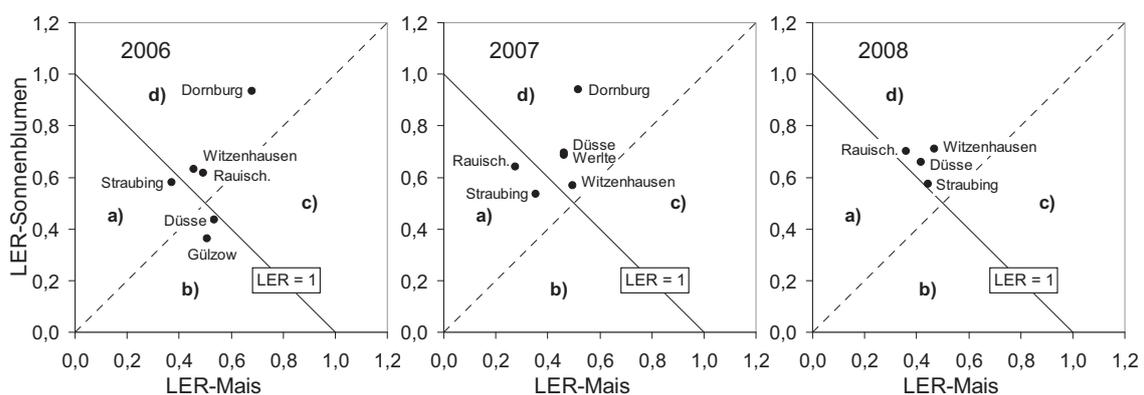


Abb. 37: »Land Equivalent Ratios« und Konkurrenzbeziehungen von Mais und Sonnenblumen in den drei Versuchsjahren.

Im Jahr 2006 waren die LER-Werte von *Straubing*, *Haus Düsse* und *Gülzow* < 1 (a, b). Im zweiten Versuchsjahr war dies bei *Straubing* und *Rauischholzhäusen* der Fall und im dritten Jahr waren alle erhobenen LER-Werte > 1 (c, d). Eine Dominanz von Mais im Gemenge trat lediglich im Jahr 2006 an den Standorten *Haus Düsse* und *Gülzow* auf. In beiden Fällen war der LER < 1 (Abb. 37, b), d.h. ein Gemengeanbau lohnte sich gegenüber den Reinsaaten nicht.

3.3.7 Ertragsschwankungen in der Zweikultur-Nutzung

Neben den verschiedenen absoluten Erträgen der beiden Anbausysteme variierten diese auch unterschiedlich stark zwischen den Jahren. In Tab. 25 sind die mittleren prozentualen Abweichungen von WR, Mais und Sonnenblumen in beiden Anbausystemen angegeben. Im Mittel der Standorte schwankten die Erträge von WR-Energie in der HFN und WR als Erstkultur um 15%. Die Abweichungen der Sonnenblumen lagen mit 21% und 18% in der HFN und ZKN etwas höher. Die mittlere Abweichung von Mais in der HFN lag bei 16%, während die Erträge von Mais in der ZKN mit 29% deutlich stärker variierten.

Tab. 25: Mittlere prozentuale Abweichungen der TM-Erträge von Winterroggen, Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) von den Mittelwerten der drei Versuchsjahre.

Standorte	HFN			ZKN						
	Einzelerträge SD [%]			Einzelerträge SD [%]				Jahreserträge SD [%]		
	WR	M	SB	WR	M	SB	M/SB	WR+M	WR+SB	WR+M/SB
H. Düsse	16	10	17	9	15	25	26	12	17	18
Straubing	15	19	12	16	17	8	10	13	10	11
Rauisch.	4	18	31	9	13	16	11	7	7	1
Witzenh.	6	10	14	5	24	11	18	14	7	12
Gülzow	22	14	24	16	60	32	42	22	12	14
Dornburg	15	23	23	29	49	11	31	18	18	13
Werlte	29	16	25	23	22	23	29	9	36	39
Ø	15	16	21	15	29	18	24	14	15	15

WR: Winterroggen M: Mais SB: Sonnenblumen
SD: Standardabweichung des Trockenmasseertrages in Prozent vom Mittelwert

Die Ertragsschwankungen der Gemenge aus Mais und Sonnenblumen lagen zwischen den Werten der Reinsaaten. An den Standorten mit geringen Ertragsanteilen der Sommerungen *Dornburg* und *Gülzow* schwankten die Erträge von Mais als Zweitfrucht mehr als auf Standorten mit höherem Ertragsanteil der Sommerungen wie *Haus Düsse*, *Straubing* und *Rauischholzhausen*. Die Ertragsschwankungen der Jahreserträge waren auf allen Standorten geringer als die Schwankungen der Einzelerträge von Mais und Sonnenblumen als Zweitkulturen und lagen im Mittel der Standorte sogar etwas tiefer als in der HFN.

3.4 Energieertrag

Energiegehalt/Brennwert

Der Energiegehalt wurde für alle Pflanzenarten auf Basis des Brennwertes bestimmt. In **Abb. 38** sind die Energiegehalte pro Kilogramm Trockenmasse der einzelnen Kulturpflanzen beider Anbausysteme im Mittel der Standorte und Jahre dargestellt. In der HFN wurde hier lediglich die Haupt- und nicht die Zwischenfrucht Senf berücksichtigt. Die Energiegehalte von Sonnenblumen waren in beiden Anbausystemen höher als die von Mais. Die höchsten Werte von 18,6 (*'Methasol'*) und 18,7 MJ kg TM⁻¹ (*'Alisson'*) erreichten Sonnenblumen als Hauptfrucht. Mais erreichte als Hauptfrucht Energieerträge von 18,1 (*'Atletico'*) und 18,3 MJ kg TM⁻¹ (Stamm). Damit lagen die Energiegehalte von Mais und Sonnenblumen in der HFN höher als in der ZKN, in welcher Mais und Sonnenblumen durchschnittlich 17,9 (*'Atletico'*) und 18,3 MJ kg TM⁻¹ (*'Methasol'*) erzielten. Die Brennwerte der Mais/Sonnenblumen-Gemenge lagen zwischen denen von Mais und Sonnenblumen in Reinsaat. Sorghum wies einen mittleren Energiegehalt von 17,7 MJ kg TM⁻¹ auf und lag damit unter den Energiegehalten von Mais und Sonnenblumen, aber höher als der von JERGER ET AL. (1987) angegebenen Werts von 16 MJ kg TS⁻¹.

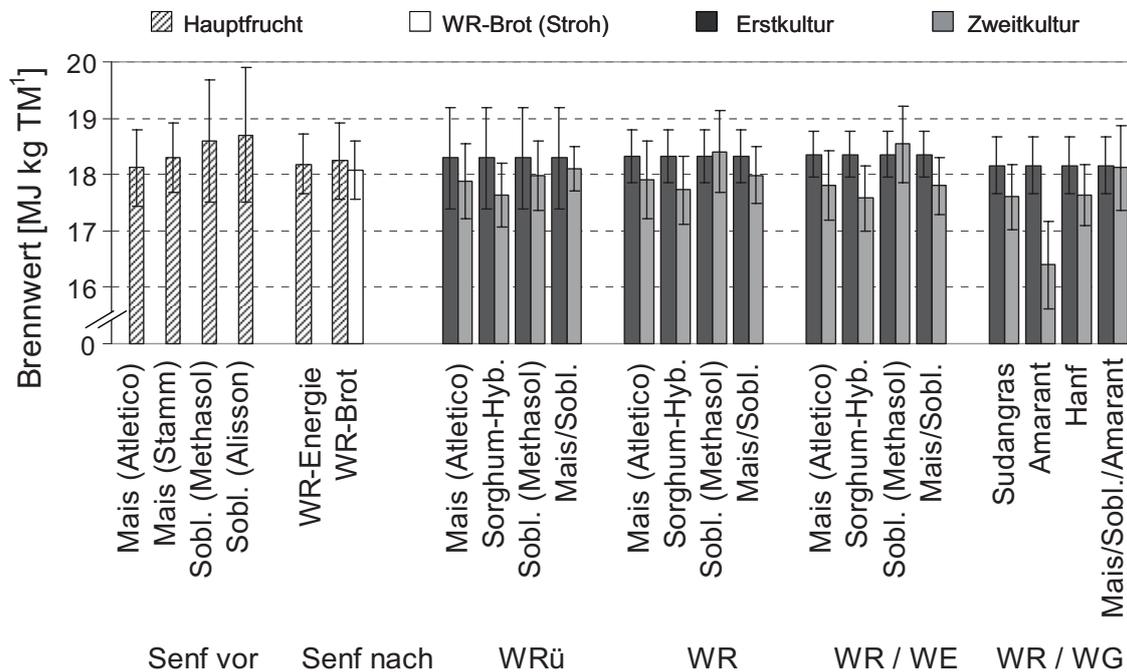


Abb. 38: Brennwerte der Kulturpflanzen im Hauptfrucht- (**links**) und Zweikultur-Nutzungssystem (**rechts**) im Mittel der Standorte und Jahre mit Standardabweichungen.

Die Brennwerte der Erstkulturen WRü, WR, WR/WE befanden sich mit durchschnittlich $18,3 \text{ MJ kg TM}^{-1}$ auf ähnlich hohem Niveau wie die der Hauptfrucht Mais. Der Brennwert des WR/WG-Gemenges lag mit $18,2 \text{ MJ kg TM}^{-1}$ etwas unterhalb der übrigen Erstkulturen und damit auf der gleichen Höhe wie WR-Energie und WR-Brot in der HFN.

Energieertrag

Mit dem Energiegehalt und den Trockenmasseerträgen wurde der Jahres-Energieertrag für jede Variante errechnet (**Abb. 39**). Die Maissorte ‘*Atletico*’ erzielte als Hauptfrucht 355 GJ ha^{-1} was gut mit den Ergebnissen von BOEHMEL ET AL. (2008), die Energieerträge von 350 GJ ha^{-1} ermittelten, übereinstimmt. Der jeweils aktuelle Mais-Stamm erreichte in der HFN im Mittel der Standorte 17 GJ ha^{-1} höhere Energieerträge und damit eine Steigerung gegenüber der Energiemaissorte ‘*Atletico*’ von 5%. Bei den Sonnenblumensorten in

der HFN erlangte die spätreifere Energiesorte 'Methasol' höhere Energieerträge als die frühreifere Sorte 'Alisson'.

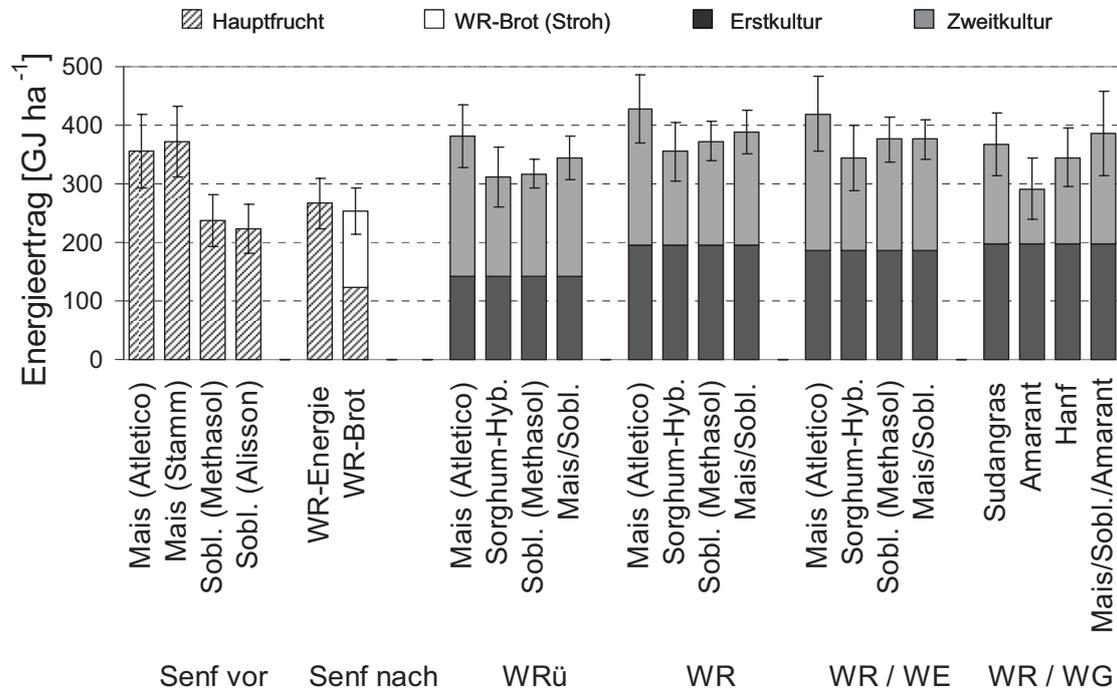


Abb. 39: Energieerträge auf Basis der Brennwerte im Mittel der drei Versuchsjahre und Standorte mit Standardabweichungen.

Die höheren Jahreserträge der ZKN kompensierten die geringeren Energiegehalte bei Mais und Sonnenblumen. WR und Mais erreichte im Mittel der Standorte und Jahre damit die höchsten Energieerträge. In der ZKN ergaben sich bei Mais und WRü, WR und WR/WE mit 375, 419 und 412 GJ ha⁻¹ die höchsten Energiejahreserträge. Die Energieerträge von Sorghum und WRü, WR bzw. WR/WE waren mit 306, 347 und 337 GJ ha⁻¹ geringer als der Jahresenergieertrag von WR/WG und Sudangras mit 356 GJ ha⁻¹. Die Energieerträge der Erstkultur WRü lagen mit 142 GJ ha⁻¹ deutlich unterhalb der anderen Erstkulturen WR, WR/WE bzw. WR/WG mit 194, 186 und 197 GJ ha⁻¹. Innerhalb der Sommerungen in der ZKN erreichte Mais mit durchschnittlich 235 GJ ha⁻¹ höhere Energieerträge als das Mais/Sonnenblumen-Gemenge, Sonnenblumen und Sorghum mit 195, 181 und 162 GJ ha⁻¹. Der Energieertrag von Sudangras als Zweitkultur lag mit 170 GJ ha⁻¹ um 4% höher als der von

Sorghum. Amarant und Hanf als Zweitkulturen erzielten mit 95 und 148 GJ ha⁻¹ die geringsten Energieerträge.

Die Jahresenergieerträge auf Basis der Brennwerte waren bei Mais und WR in der ZKN mit 427 GJ ha⁻¹ um 72 GJ ha⁻¹ (+ 20%) höher als bei Mais als Hauptfrucht (**Abb. 40**). Berücksichtigt wurden hierbei jeweils die in beiden Anbausystemen vertretenen Mais- und Sonnenblumensorten ‘*Atletico*’ und ‘*Methasol*’. Durch den Anbau von Sonnenblumen konnte im Mittel der Jahre und Standorte in der ZKN ein Energieertrag von 373 GJ ha⁻¹ a⁻¹ erzielt werden, welcher 135 GJ ha⁻¹ (+ 57%) höher war als in der HFN.

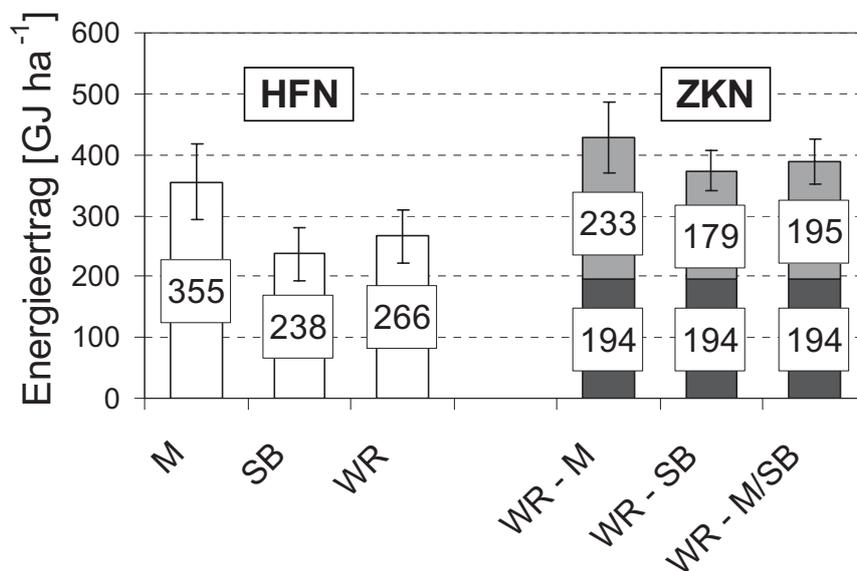


Abb. 40: Energieerträge auf Basis der Brennwerte von Mais (M), Sonnenblumen (SB) und Winterroggen (WR) in den beiden Anbausystemen im Mittel der Standorte und Versuchsjahre mit Standardabweichungen.

In der HFN konnte durch WR ein Energieertrag von 266 GJ ha⁻¹ erwirtschaftet werden, welcher sich durch den zusätzlichen Anbau von Mais, Sonnenblumen und Mais/Sonnenblumen-Gemenge deutlich um 161 (+ 61%), 107 (+ 40%) und 123 GJ ha⁻¹ a⁻¹ (+ 46%) erhöhte.

3.4.1 Biogas

Methanausbeute

Entscheidend für die Produktion von Biogas sind der TM-Ertrag sowie die Konzentrationen wertgebender Inhaltsstoffe. Diese wurden mittels der Weender Analyse bestimmt und flossen in die Berechnung der Methanausbeute ein. In **Abb. 41** sind die Methanausbeuten pro Kilogramm organischer Substanz angegeben. Die höchste Methanausbeute von 362 l CH₄ kg oTS⁻¹ erreichte hier das Roggen-Korn, während alle anderen Werte unter 300 l CH₄ kg oTS⁻¹ lagen und mit Werten zwischen 255 und 296 l CH₄ kg oTS⁻¹ relativ gering schwankten.

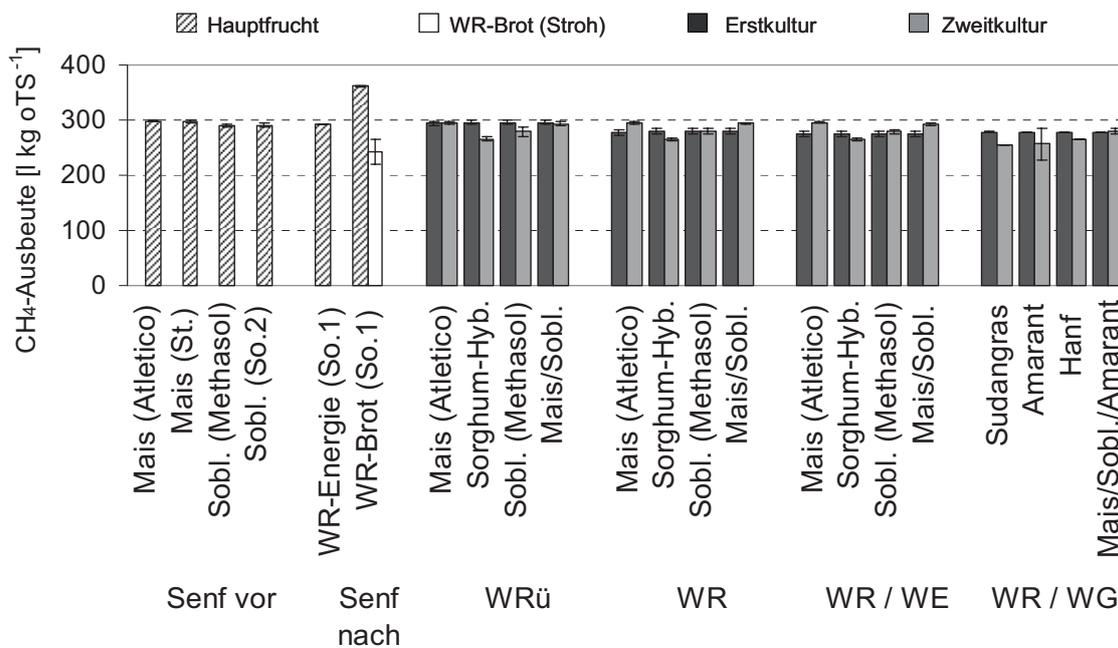


Abb. 41: Methan- (CH₄) ausbeute der organischen Trockenmasse (oTS) der Kulturpflanzen im Hauptfrucht- (**links**) und Zweikultur-Nutzungssystem (**rechts**) im Mittel der Standorte und Versuchsjahre mit Standardabweichungen.

Methanerträge

In **Abb. 42** sind die Methanerträge im Mittel der Standorte und Versuchsjahre dargestellt. Die Maissorte 'Atletico' erreichte in der HFN einen Methaner-

trag von 5.610 und in der ZKN mit WRü, WR bzw. WR/WE 5.873, 6.418 und 6.296 m³ ha⁻¹, wobei hier keine signifikanten Unterschiede bestanden. Der Methanertrag der Sonnenblumensorte ‘*Methasol*’ lag in der ZKN nach WR signifikant um 2.000 m³ ha⁻¹ höher als in der HFN, wo die Sonnenblumen lediglich Methanerträge von knapp über 3.000 m³ ha⁻¹ erreichten. WR-Energie in der HFN erreichte Methanerträge von knapp 4.000 m³ ha⁻¹. Innerhalb der ZKN lagen die Methanjahreserträge von Mais signifikant höher als von Sorghum. Im Vergleich zu Sonnenblumen und Mais/Sonnenblumen-Gemenge ließen sich keine signifikanten Unterschiede verzeichnen. Die Methanjahreserträge sämtlicher Varianten der ZKN außer Amaranth nach WR/WG lagen signifikant höher als die Methanerträge von Sonnenblumen in der HFN. Sudangras und WR/WG wiesen in der Summe knapp 5.200 m³ ha⁻¹ auf und lagen damit über den Werten von Amaranth und Hanf, die unter 5.000 m³ ha⁻¹ blieben.

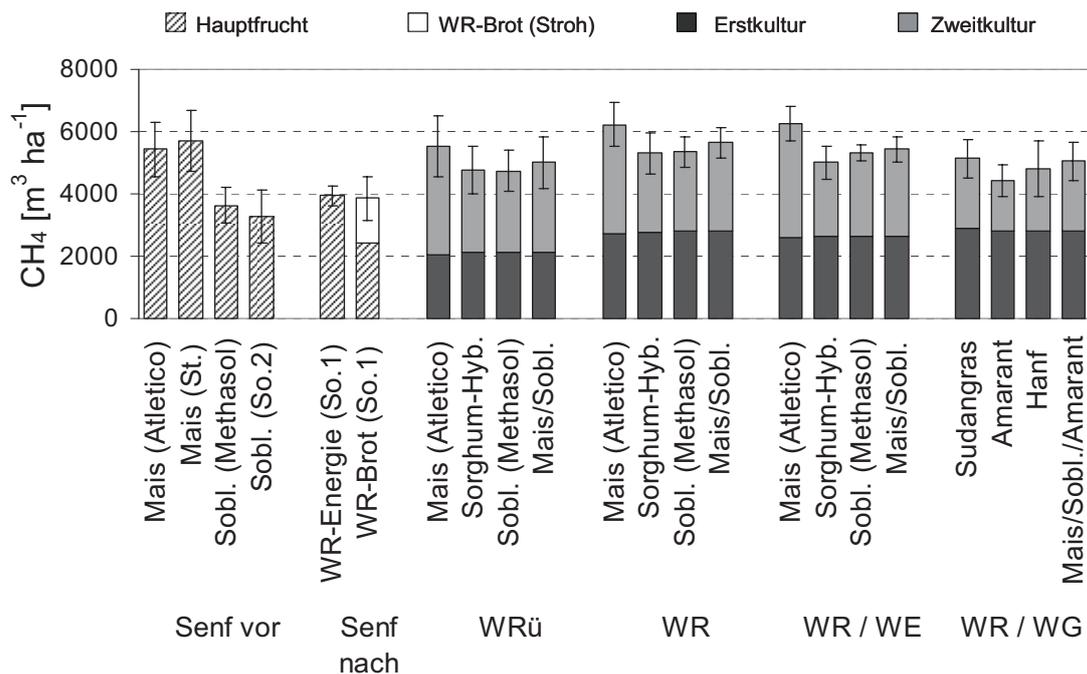


Abb. 42: Jahresmethanerträge im Mittel der drei Versuchsjahre und Standorte mit Standardabweichungen.

Amarant und WR/WG erzielten innerhalb der ZKN die geringsten Methanerträge. In den Methanerträgen findet man etwa 60% der Energie des Heizwertes wieder.

3.5 Stickstoff in Boden und Pflanze

3.5.1 Mineralischer Bodenstickstoff

Sowohl im Frühjahr als auch im Herbst zur Ernte wurden die mineralischen Bodenstickstoffgehalte ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) bestimmt. Diese wurden bei der N-Düngung berücksichtigt und für die Abschätzung der auswaschunggefährdeten N-Mengen nach der Ernte herangezogen. **Abb. 43** stellt die mittleren Frühjahrs- N_{min} -Werte in 0-90 cm Tiefe aller Varianten pro Standort in den drei Versuchsjahren dar. Die beiden höchsten Werte von 74 und 72 kg N ha^{-1} wurden am Standort *Straubing* im ersten und dritten Versuchsjahr ermittelt, wobei die Standardabweichung sehr hoch ausfiel.

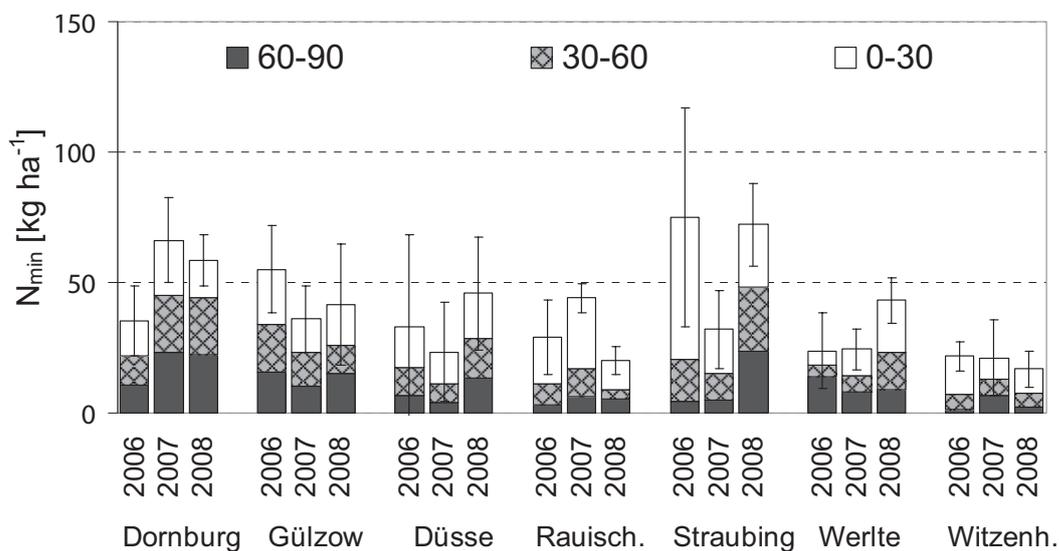


Abb. 43: Frühjahrs N_{min} -Werte (0-90 cm) an den Standorten in den drei Versuchsjahren im Mittel aller Varianten mit Standardabweichungen.

Mit Ausnahme von *Dornburg* (2./3. Jahr) und *Gülzow* (1. Jahr) lagen die N_{\min} -Werte unter 50 kg N ha^{-1} . In *Witzenhausen* waren die N_{\min} -Werte in allen drei Versuchsjahren mit max. 22 kg N ha^{-1} am geringsten. Die Standardabweichungen der N_{\min} -Gehalte waren teilweise sehr hoch, da es sich um Mittelwerte aus allen Varianten handelt.

In **Abb. 44** sind die N_{\min} -Werte in 0-90 cm nach der Ernte im Mittel aller Varianten dargestellt. Die Mittelwerte aller Varianten lagen zwischen 15 und 75 kg N ha^{-1} und die beiden höchsten Werte von 75 und 66 kg N ha^{-1} wurden im dritten Versuchsjahr in *Dornburg* und *Gülzow* ermittelt. Die Standorte *Haus Düsse*, *Rauischholzhausen* und *Straubing* wiesen nach der Ernte die geringsten N_{\min} -Gehalte im Boden auf. Im ersten Versuchsjahr lagen die N_{\min} -Werte in *Gülzow*, *Haus Düsse*, *Rauischholzhausen*, *Straubing* und *Werlte* im Herbst unter den Frühjahrs- N_{\min} -Gehalten (**Abb. 43**).

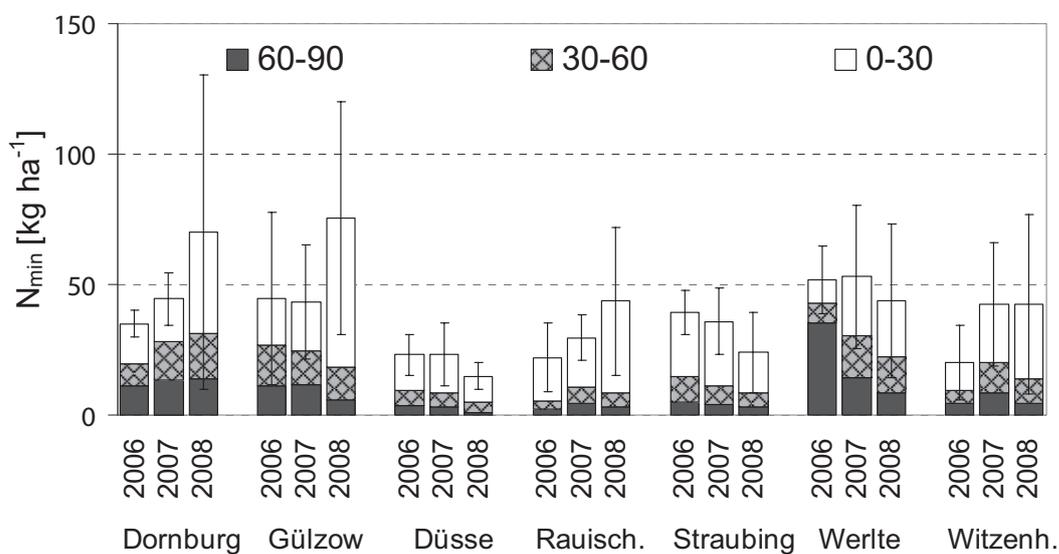


Abb. 44: Nachernte N_{\min} -Werte (0-90 cm) an den Standorten in den drei Versuchsjahren im Mittel aller Varianten mit Standardabweichungen.

In *Dornburg* und *Witzenhausen* befanden sich diese im Jahr 2006 auf etwa gleichem Niveau. Im zweiten Versuchsjahr waren die Nachernte- N_{\min} -Werte lediglich in *Dornburg* und *Rauischholzhausen* niedriger als im Frühjahr. In

Gülzow, Straubing und *Witzenhausen* lagen die N_{\min} -Werte nach der Ernte 2007 auf einem höheren Niveau als im Frühjahr. Dies war in *Dornburg, Gülzow, Rauischholzhausen, Werlte* und *Witzenhausen* auch im dritten Versuchsjahr der Fall. Lediglich in *Haus Düsse* und *Straubing* lagen die N_{\min} -Werte nach der Ernte im Mittel aller Varianten unter den Frühjahrs- N_{\min} -Werten.

Im Jahr 2006 waren die N_{\min} -Werte nach der Ernte auf allen Standorten außer *Werlte* niedriger als im Frühjahr, während dies in den letzten beiden Jahren lediglich auf zwei bzw. drei Standorten der Fall war. An den Standorten *Werlte* und *Gülzow* waren sowohl im Frühjahr als auch im Herbst die N_{\min} -Gehalte in den tieferen Bodenhorizonten 30-60 und 60-90 cm im Vergleich zum Oberboden relativ hoch, was wohl auf die relativ schlechten Bodeneigenschaften mit niedrigen FK dieser Standorte zurück zu führen ist.

Im Mittel der drei Versuchsjahre und sieben Standorte konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Nachernte- N_{\min} -Gehalten der Varianten ermittelt werden. Daher sind in **Abb. 45** die Nachernte- N_{\min} -Gehalte aller Varianten im Mittel der Standorte in den einzelnen Versuchsjahren dargestellt. Im ersten Jahr war der Nachernte N_{\min} -Wert von Mais in der HFN mit 61 kg N ha^{-1} signifikant höher als alle anderen N_{\min} -Werte außer von Mais und Sonnenblumen nach WRü.

Das zweite Jahr zeichnete sich durch etwas höhere Nachernte- N_{\min} -Gehalte aus als das erste. Die drei höchsten Werte von 60, 53 und 50 kg N ha^{-1} wurden hier nach Sorghum als Zweitkultur ermittelt, wobei Sorghum nach der Erstkultur WR signifikant höhere Nachernte- N_{\min} -Werte aufwies als Sonnenblumen nach WR und Hanf nach WR/WG.

Im dritten Versuchsjahr erreichten die N_{\min} -Gehalte nach der Ernte die höchsten Werte der drei Versuchsjahre. Die N_{\min} -Gehalte nach der Ernte der Zweitkulturen mit der Erstkultur WRü in der ZKN waren deutlich höher als nach den Erstkulturen WR und WR/WE. Diese Tendenz war auch in den ersten beiden Versuchsjahren erkennbar. Sorghum nach WRü hinterließ im Jahr 2008 mit 100 kg N ha^{-1} signifikant höhere N_{\min} -Gehalte im Boden als nach WR und WR/WE.

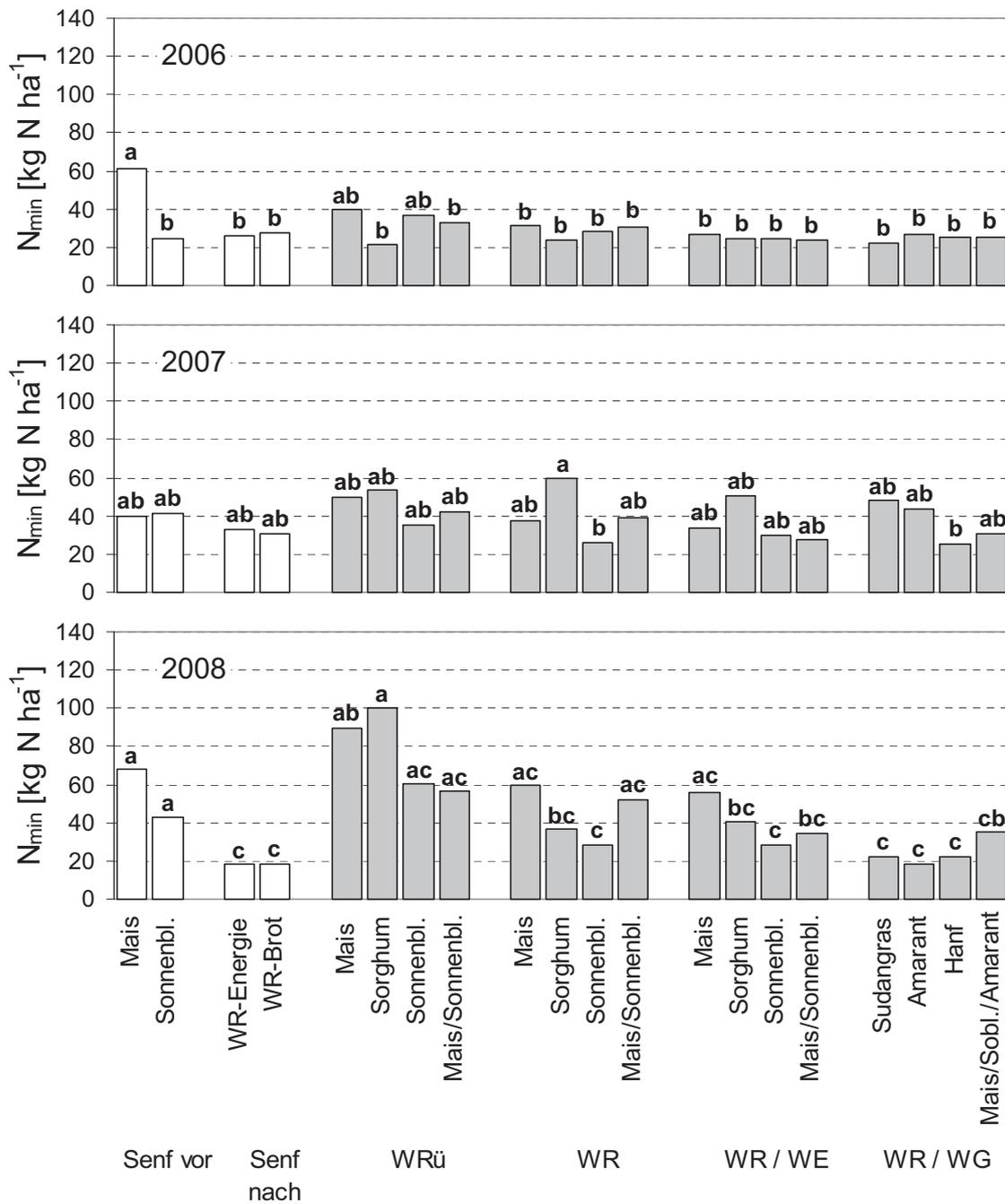


Abb. 45: Nachernte- N_{min} -Werte im Boden (0-90 cm) aller Varianten im Mittel der sieben Standorte in den drei Versuchsjahren. Werte mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich pro Versuchsjahr nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$). **Links:** Hauptfrucht-Nutzung, **rechts:** Zweikultur-Nutzung.

Die N_{\min} -Werte von WR-Energie und WR-Brot lagen unter 20 kg N ha^{-1} . Beim Vergleich der Erstkulturen WR und WR/WE wiesen letztgenannte in allen drei Versuchsjahren tendenziell die geringsten N_{\min} -Gehalte nach Ernte der Zweitkulturen auf. Sudangras, Amaranth, Hanf und Mais/Sonnenblumen-/Amaranth-Gemenge nach WR/WE-Gemenge ließen im Mittel in allen drei Versuchsjahren relativ geringe Rest- N_{\min} -Mengen unter 50 kg N ha^{-1} im Boden zurück.

In **Abb. 46** und **Abb. 47** sind die Nachernte- N_{\min} -Mengen aller Varianten und Jahre für jeden Standort dargestellt. Über den Balken sind die jeweiligen mittleren Probenahme- bzw. Erntetermine für jeden Standort im Mittel der drei Jahre aufgeführt. Die N_{\min} -Gehalte wiesen mit Werten zwischen wenigen Kilogramm und über 240 kg N ha^{-1} extreme Unterschiede zwischen und teilweise auch pro Standort auf. Die in allen drei Versuchsjahren geringsten Rest- N_{\min} -Mengen nach der Ernte waren an den Standorten *Haus Düsse* und *Straubing* mit Werten von maximal 70 kg N ha^{-1} zu verzeichnen. Auf diesen beiden Standorten waren die Unterschiede zwischen den Varianten relativ gering. Die Rest- N_{\min} -Mengen im Boden waren im zweiten und dritten Versuchsjahr höher als im ersten. Auf allen Standorten waren die N_{\min} -Werte nach den Zweitkulturen mit WRü als Erstkultur höher als nach WR bzw. WR/WE-Gemenge. Diese Werte lagen teilweise sogar höher als in der HFN, wobei besonders hohe Werte in *Dornburg* und *Gülzow* zu verzeichnen waren. Die N_{\min} -Werte nach der Ernte der Zweitkulturen mit WR und WR/WE-Gemenge als Erstkulturen lagen meistens unter denen von Mais und Sonnenblumen in der HFN. WR-Energie und WR-Brot hinterließen auf allen Standorten und in allen Jahren relativ geringe Rest- N_{\min} -Mengen im Boden. Die ermittelten N_{\min} -Mengen von Mais in der HFN bewegten sich in allen drei Jahren in dem von WIESLER & HORST (1992) nach Silomais ermittelten Bereich von 32 bis 71 kg ha^{-1} .

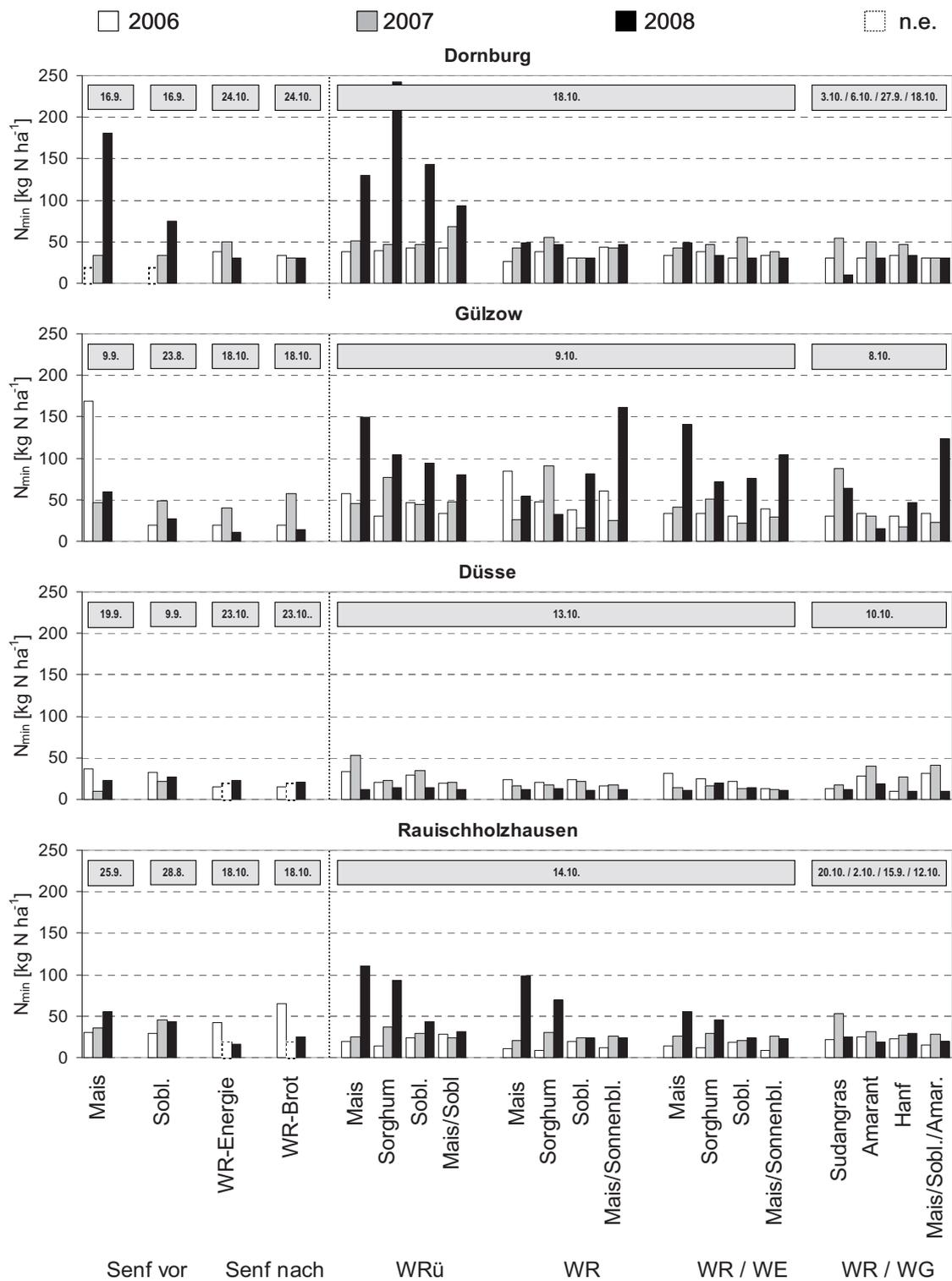


Abb. 46: N_{min} -Werte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte an den Standorten Dornburg, Gülzow, Haus Düsse und Rauschholzhausen in den drei Versuchsjahren. **Links** Hauptfrucht-Nutzung, **rechts:** Zweikultur-Nutzung. n.e.: nicht erhoben

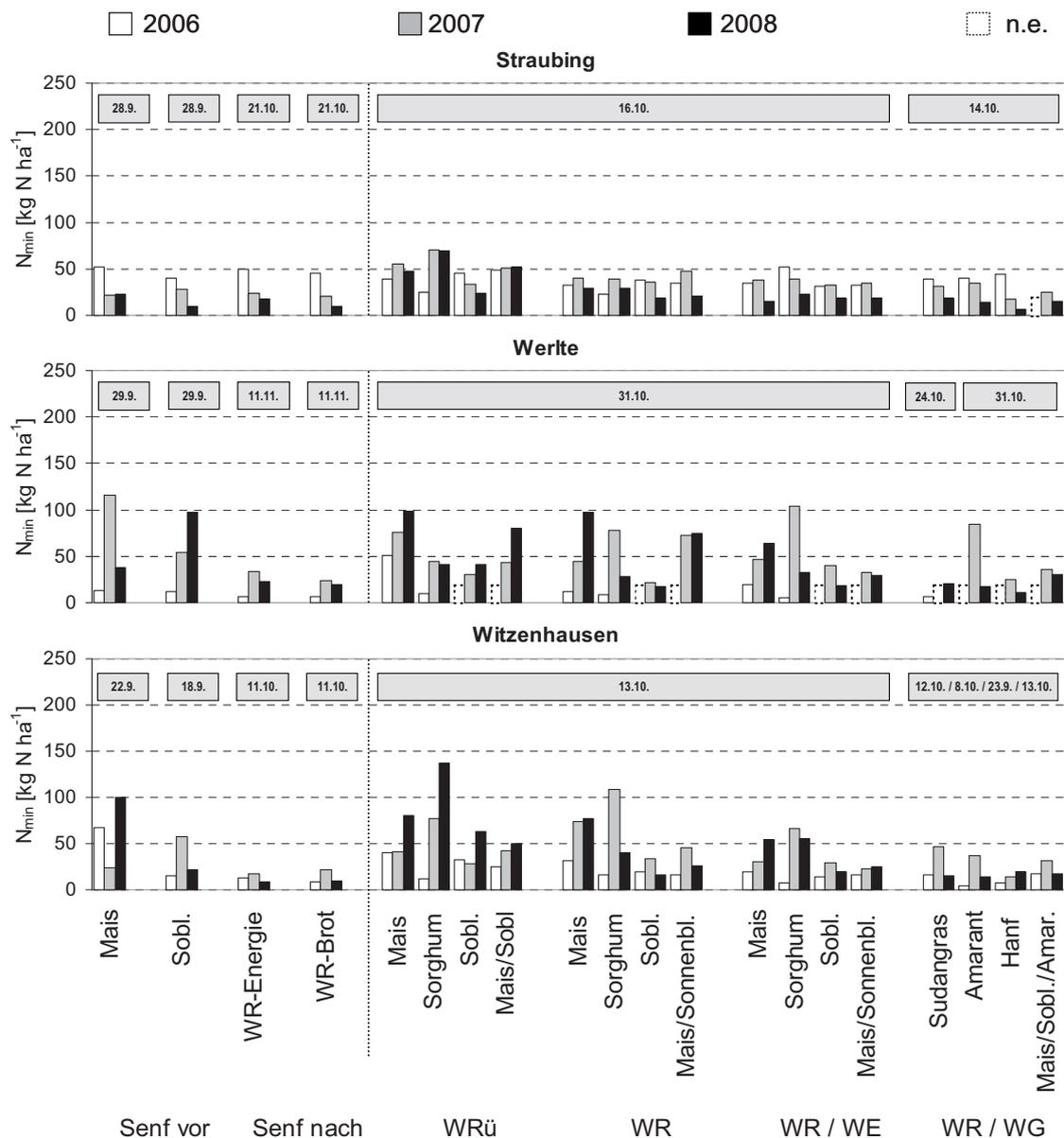


Abb. 47: N_{\min} -Werte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte an den Standorten Straubing, Werlte und Witzhausen in den drei Versuchsjahren. **Links** Hauptfrucht-Nutzung, **rechts**: Zweikultur-Nutzung. n.e.: nicht erhoben

Um die Einflüsse der Anbausysteme bewerten zu können, sind in **Abb. 48** zunächst die Frühjahrs- N_{\min} -Gehalte in 0-90 cm in der HFN und in der ZKN dargestellt. Bei der HFN wurde hier lediglich die Varianten mit den Sommerungen Mais und Sonnenblumen berücksichtigt, d.h. die Probenahme fand vor der Saat der Sommerungen in der abgefroren Zwischenfrucht Senf statt,

während die Probenahme in der ZKN zeitgleich in den Erstkulturen erfolgte. Auf allen sieben Standorten lagen die N_{\min} -Werte der ZKN im Frühjahr zwischen 29% und 74% niedriger als in der HFN. Im Durchschnitt lag der N_{\min} -Gehalt im Frühjahr in der ZKN bei 33 kg N ha^{-1} und damit um 48% niedriger als in der HFN mit einem Mittelwert von 64 kg N ha^{-1} .

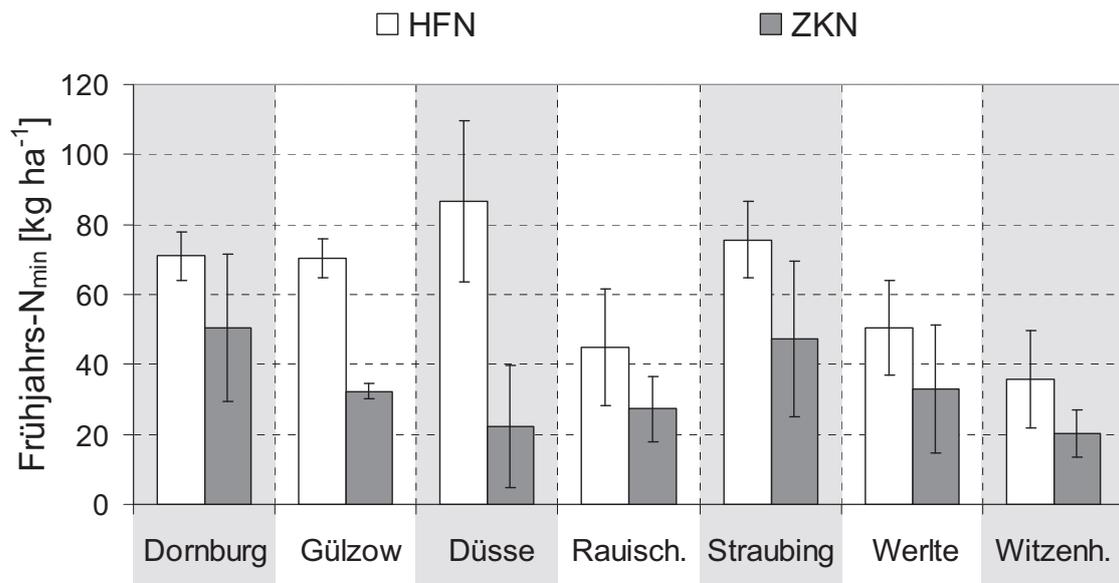


Abb. 48: N_{\min} -Werte im Boden (0-90 cm) im Frühjahr vor Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht-Nutzung (HFN) und in den Erstkulturen der Zweikultur-Nutzung (ZKN) mit Standardabweichungen.

Die Ernten und damit die Beprobungstermine waren bei Mais und Sonnenblumen in der HFN früher als in der ZKN. Letztere erfolgten meist erst im Oktober und entsprachen den Herbst- N_{\min} -Werten. In **Tab. 26** sind die Nacherte- und Herbst- N_{\min} -Mengen von Mais und Sonnenblumen beider Anbausysteme dargestellt. In allen drei Versuchsjahren waren die N_{\min} -Werte nach der Ernte von Mais in der HFN höher als in der ZKN. Bis zum Herbst fielen die N_{\min} -Werte der HFN teilweise stark ab, was im dritten Jahr zu deutlich geringeren Werten der HFN im Vergleich zur ZKN führte. Damit lag auch der mittlere Herbst- N_{\min} -Wert der HFN auf einem etwas geringeren Niveau als der N_{\min} -Wert der ZKN. Im dritten Versuchsjahr fiel auch der N_{\min} -Wert nach Sonnenblumen in der HFN von der Ernte bis zum Herbst ab. In

den beiden ersten Versuchsjahren stiegen diese jedoch an. Hier lagen die N_{\min} -Werte der ZKN im Mittel der Jahre sowohl nach der Ernte als auch im Herbst tiefer als in der HFN.

Tab. 26: Nachernte- und Herbst- N_{\min} -Werte (0-90 cm) von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in den drei Versuchsjahren.

	Mais				Sonnenblumen			
	HFN		ZKN		HFN		ZKN	
	Ernte	Herbst	Ernte	Herbst	Ernte	Herbst	Ernte	Herbst
2006	61	52	31	30	25	36	28	31
2007	40	40	38	38	42	50	26	26
2008	68	24	60	61	43	30	28	30
Ø	57	38	43	43	36	39	27	29

Die teilweise hohen Veränderungen der N_{\min} -Werte von der Ernte der Hauptkulturen bis zum Herbst lassen auf eine Auswaschung bzw. Mineralisation während dieses Zeitraumes schließen. Im Mittel verringerten sich die N_{\min} -Werte von der Ernte bis zum Herbst bei Mais um 33%, während diese bei Sonnenblumen um 8% anstiegen. Daher werden im Folgenden die Nachernte- N_{\min} -Werte zum Vergleich der Anbausysteme herangezogen.

Im Mittel der Jahre hinterließ Mais mit der Erstkultur WR in der ZKN nach der Ernte auf fünf der sieben Standorte zwischen 5% und 58% weniger Rest- N_{\min} im Boden als Mais in der HFN (**Abb. 49**). Lediglich an den Standorten *Straubing* und *Rauischholzhausen* lagen die N_{\min} -Gehalte im Boden (0-90 cm) nach Mais in der ZKN um 6% bzw. 7% höher als nach Mais in der HFN. Im Mittel aller Standorte und Jahre lag der Rest- N_{\min} im Boden nach WR und Mais in der ZKN um 25% niedriger als nach Senf und Mais in der HFN. Die statistische Analyse lieferte auf keinem der Standorte signifikante Unterschiede zwischen den Nachernte- N_{\min} -Werten von Mais und Sonnenblumen in den beiden Anbausystemen bzw. zwischen HFN und ZKN.

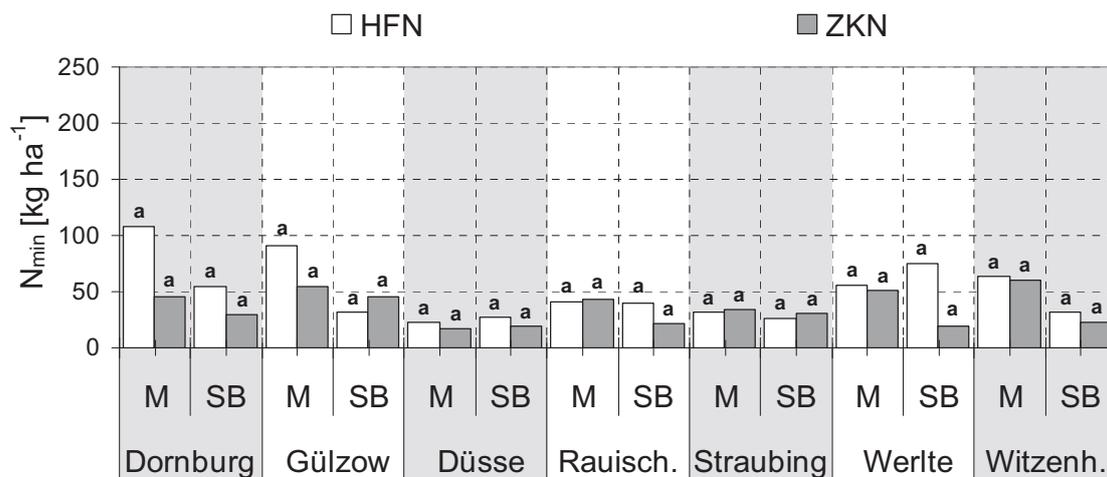


Abb. 49: N_{min}-Werte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) in der Hauptfrucht- (HFN) bzw. Zweikultur-Nutzung (ZKN). Werte mit gleichen Buchstaben an den jeweiligen Standorten unterscheiden sich nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$).

Die Nachernte-N_{min}-Mengen von Sonnenblumen in der ZKN lagen auf fünf der sieben Standorte zwischen 26% und 74% niedriger als in der HFN. In *Gülzow* und *Straubing* waren die Nachernte-N_{min}-Mengen in der ZKN nach Sonnenblumen um 42% bzw. 17% höher als in der HFN. Im Mittel der Standorte war der N_{min}-Wert nach der Ernte von Sonnenblumen in der ZKN 9 kg N ha⁻¹ und damit 25% niedriger als in der HFN.

Die N_{min}-Werte nach der Ernte der einzelnen Versuchsjahre schwankten sowohl zwischen den Standorten als auch zwischen den Behandlungen sehr stark und lagen im Bereich zwischen 10 und 181 kg N ha⁻¹ (**Abb. 50**). Die drei höchsten Werte wurden mit 181, 169 und 116 kg N ha⁻¹ nach Mais in der HFN an den Standorten *Dornburg* (2008), *Gülzow* (2006) und *Werlte* (2007) ermittelt. Im ersten Versuchsjahr lagen die N_{min}-Mengen nach der Ernte auf allen Standorten nach Mais in der ZKN niedriger als nach Mais in der HFN. Im zweiten Versuchsjahr waren die N_{min}-Werte der ZKN in *Haus Düsse*, *Straubing* und *Witzenhausen* höher als in der HFN. Im Jahr 2008 war dies in *Rauschholzhausen*, *Straubing* und *Werlte* der Fall. Die N_{min}-Werte nach Mais in der ZKN lagen im Mittel der Standorte in den Jahren 2006, 2007 und 2008 um

29 (- 47%), 8 (- 8%) und 9 kg N ha⁻¹ (- 15%) niedriger als in der HFN, wobei diese Unterschiede lediglich im ersten Jahr signifikant waren (vgl. **Abb. 45**).

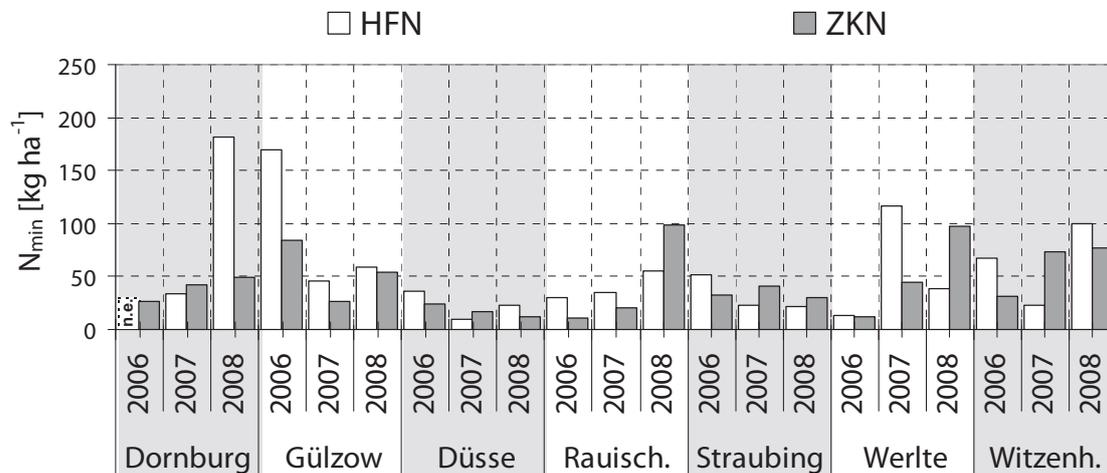


Abb. 50: N_{min}-Werte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte von Mais in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in den drei Versuchsjahren an den sieben Standorten. n.e.: nicht ermittelt

Die Nachernte-N_{min}-Mengen im Boden nach Sonnenblumen lagen generell auf einem niedrigeren Niveau als nach Mais (**Abb. 51**). Im ersten Versuchsjahr lagen die N_{min}-Werte nach Sonnenblumen in der ZKN an den Standorten *Haus Düsse*, *Rauischholzhausen* und *Straubing* niedriger als in der HFN. In *Gülzow* ergaben sich in der ZKN hingegen etwas höhere N_{min}-Mengen. Im zweiten Versuchsjahr fielen die N_{min}-Werte der ZKN an allen Standorten mit Ausnahme von *Straubing* niedriger aus als in der HFN. Im Jahr 2008 waren die N_{min}-Werte in der ZKN an fünf der sieben Standorte niedriger als in der HFN. In *Dornburg* und *Werlte* waren diese Reduktionen der Rest-N_{min}-Mengen im Jahr 2008 mit 45 und 80 kg N ha⁻¹ besonders hoch. Lediglich in *Gülzow* und *Straubing* lagen die N_{min}-Werte nach Sonnenblumen in der ZKN höher als in der HFN, wobei der Unterschied in *Gülzow* mit 54 kg N ha⁻¹ sehr groß ausfiel. Im Mittel der Standorte waren die N_{min}-Werte nach Sonnenblumen in der ZKN im Jahr 2006 um 3 kg N ha⁻¹ (+ 13%) höher und in den Jahren 2007 und 2008 um 15 (- 37%) und 15 kg N ha⁻¹ (- 34%) niedriger als in der

HFN. Signifikant niedrigere Nachernte- N_{\min} -Gehalte von Sonnenblumen in der ZKN lagen hierbei lediglich im dritten Versuchsjahr vor (vgl. **Abb. 45**).

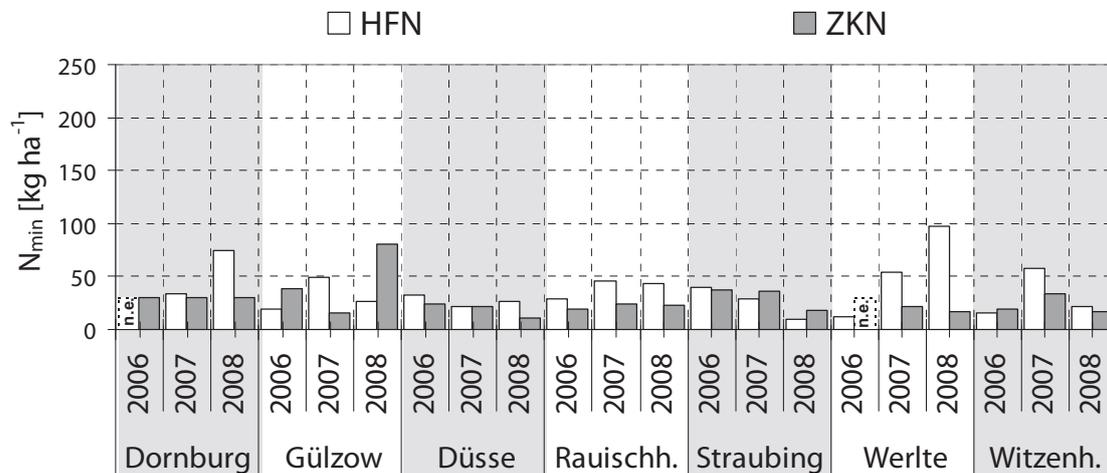


Abb. 51: N_{\min} -Werte im Boden (0-90 cm) nach der Ernte von Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in den drei Versuchsjahren an den sieben Standorten. n.e.: nicht ermittelt

Demnach waren die N_{\min} -Gehalte nach der Ernte von Mais in der ZKN in allen drei Versuchsjahren und nach Sonnenblumen in zwei der drei Jahre niedriger als in der HFN.

3.5.2 N-Gehalt in der Pflanze

Die N-Gehalte im Pflanzenmaterial geben Auskunft über den Versorgungsgrad und es können gegebenenfalls Rückschlüsse auf die N-Düngung bzw. auf eine N-Austragsgefährdung gezogen werden. Abhängig von der Pflanzenart, dem Entwicklungsstadium und der Konzentration anderer Nährelemente liegt der N-Gehalt bei ausreichend versorgten Pflanzen im Spross bei etwa 1,5% in der Trockenmasse (MARSCHNER 1995). Dies stimmt gut mit den ermittelten N-Gehalten überein, die in **Abb. 52** dargestellt sind. Die mittleren N-Gehalte bewegten sich im Mittel aller Standorte und Versuchsjahre zwischen 1,1% und 2,6%. Die höchsten N-Gehalte wies die Zwischenfrucht Senf mit Gehalten von 1,9% bis 2,6% auf. Innerhalb der zuerst angebauten Kulturen (jeweils linke

Säulen in **Abb. 52**) lagen die N-Gehalte von Senf (vor Mais) in allen drei Versuchsjahren signifikant höher als die N-Gehalte der anderen Winterungen.

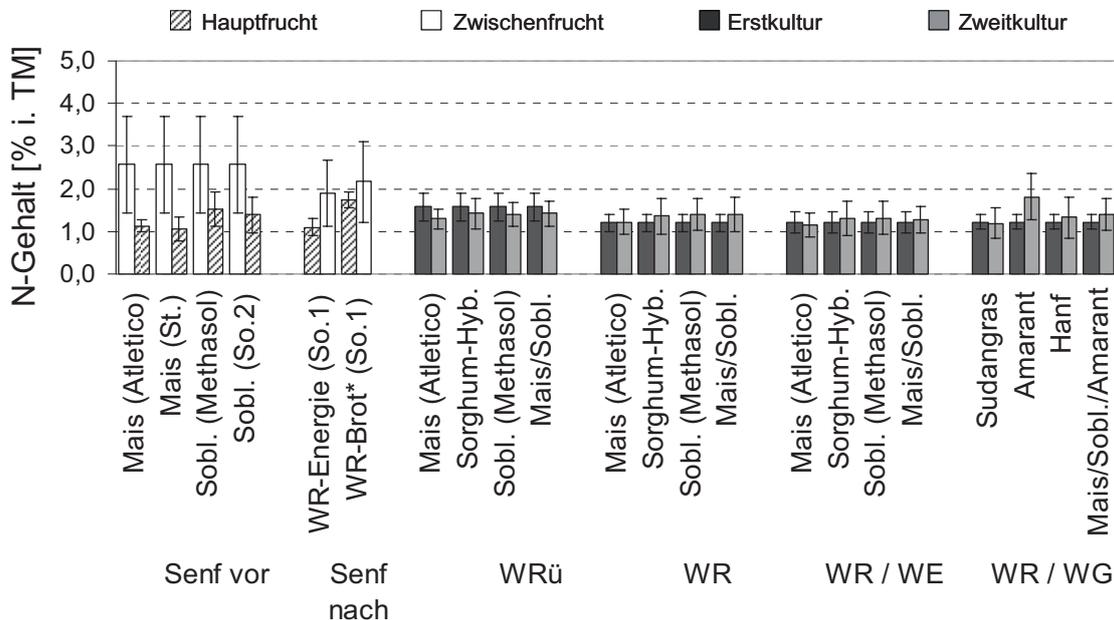


Abb. 52: Mittlere Stickstoff-(N) gehalte der Hauptfrucht-Nutzung (**links**) und der Zweitkultur-Nutzung (**rechts**) mit Standardabweichungen. *Ganzpflanze

Die N-Gehalte von WRü waren tendenziell höher als die der übrigen Winterungen, wobei ein signifikanter Unterschied lediglich zu den N-Gehalten von WR-Energie bestand. Innerhalb der Sommerungen wies Amaranth relativ hohe N-Gehalte auf. Diese waren im Mittel der Standorte und Jahre signifikant höher als die N-Gehalte von Mais in der HFN, Mais in der ZKN nach WR und WR/WE und Hanf nach WR/WG. In der HFN waren die N-Gehalte von Sonnenblumen höher als die N-Gehalte von Mais, was in der ZKN weniger ausgeprägt ausfiel.

In **Abb. 53** (oben) sind die N-Gehalte und TM-Erträge von WR-Energie in der HFN sowie der Erstkulturen WR, WR/WE und WR/WG in der ZKN dargestellt. Da die maximale N-Aufnahmerate zeitlich vor der maximalen Rate der Biomasseproduktion liegt (GREEF ET AL. 1999), sinkt der N-Gehalt im Vegetationsverlauf. Damit sinkt auch der kritische N-Gehalt (N_{crit}), definiert als minimaler N-Gehalt, der nötig ist, um einen maximalen Ertrag zu erreichen,

mit steigenden Biomasseerträgen (LEMAIRE & GASTAL 1997). Die durchgezogene Linie repräsentiert den N_{crit} -Gehalt von Getreide, welcher von den Autoren lediglich bis 12 t TM ha⁻¹ definiert wurde.

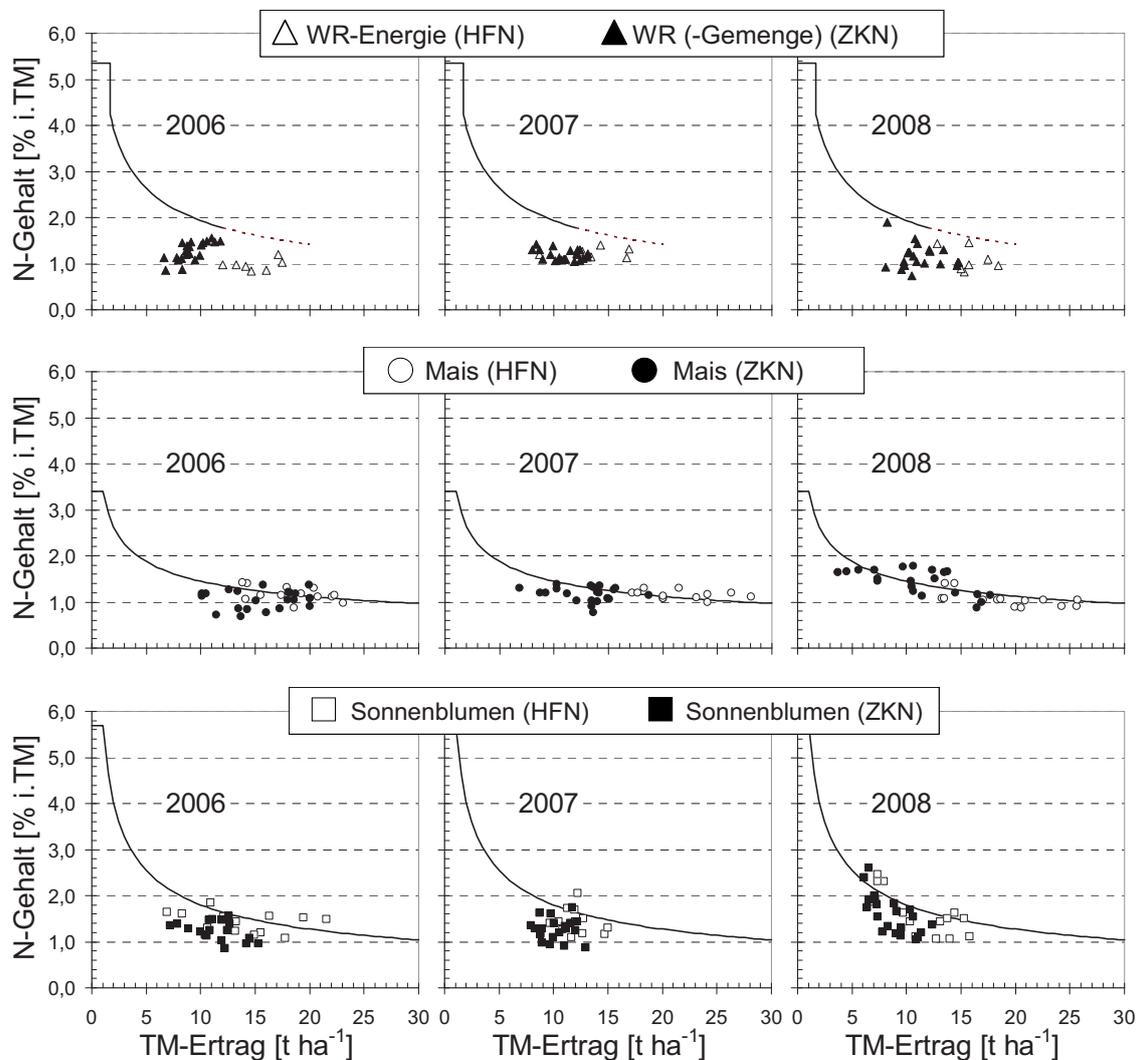


Abb. 53: N-Gehalte und TM-Erträge von Winterroggen (**oben**), Mais (**Mitte**) und Sonnenblumen (**unten**) in der Hauptfrucht-(HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) sowie der Bezug zum jeweiligen kritischen N-Gehalt (Linie) in den drei Versuchsjahren.

Die N-Gehalte von WR bewegten sich zwischen 0,7% und 1,9% in der TM, was gut mit den von SCHOLZ & ELLERBECK (2002) ermittelten N-Gehalte von 0,9% überein stimmt. Sämtliche N-Gehalte von WR lagen unterhalb der N_{crit} -Gehalte. Zwischen WR in der HFN und der ZKN (Abb. 53, oben) gab es im

Jahr 2006 eine klare Trennung, wobei in der HFN höhere Erträge und tendenziell geringere N-Gehalte von etwa 1% vorlagen. Im Jahr 2007 fiel der Ertragsunterschied zwischen der HFN und der ZKN bei WR geringer aus als im ersten Jahr und auch die N-Gehalte wiesen eine deutlich geringere Streuung auf. Das dritte Versuchsjahr 2008 wies eine ähnliche Trennung der Roggenerträge zwischen den Anbausystemen wie das Jahr 2007 auf. Die N-Gehalte variierten allerdings stärker als in den beiden vorangegangenen Jahren.

Bei Mais (**Abb. 53**, Mitte) waren im ersten Versuchsjahr lediglich geringe Ertragsunterschiede zwischen HFN und ZKN zu erkennen. Der Mais in der HFN wies neben leicht höheren Erträgen auch höhere N-Gehalte auf als in der ZKN. Dabei lagen die N-Gehalte von Mais in der HFN auf und teilweise über dem N_{crit} -Wert, während die N-Gehalte von Mais in der ZKN meist geringer ausfielen als die N_{crit} -Gehalte. Dies galt gleichermaßen für das Jahr 2007, wobei die Erträge von Mais in der HFN mit Erträgen zwischen 17 und 28 t TM ha⁻¹ deutlich höher lagen als im ersten Jahr. Die Erträge von Mais als Zweitkultur waren hingegen deutlich geringer als im Jahr 2006. Im dritten Versuchsjahr fiel die Trennung zwischen den Erträgen noch deutlicher aus und auch die N-Gehalte der ZKN lagen teilweise über den N_{crit} -Gehalten, während sich die N-Gehalte in der HFN trotz höherer Erträge meist unterhalb der N_{crit} -Kurve bewegten. BALÍK ET AL. (2003) ermittelten bei Mais N-Gehalte von 1,0% und 1,2% in einer ungedüngten Kontrollvariante bzw. bei einer Düngegabe von 120 kg N ha⁻¹ a⁻¹ mit entsprechenden Erträgen von 11,6 und 15,0 t TM ha⁻¹, was gut mit den eigenen Ergebnissen übereinstimmt.

Bei den Sonnenblumen lagen die N-Gehalte im ersten Versuchsjahr in der HFN teilweise über und in der ZKN meist unterhalb der N_{crit} -Kurve (**Abb. 53**, unten). Im Jahr 2007 war die ertragliche Trennung von HFN und ZKN gering und fast alle N-Gehalte lagen unterhalb der N_{crit} -Kurve. Im dritten Versuchsjahr wiesen die N-Gehalte von Sonnenblumen und hier vor allem in der ZKN ein generell höheres Niveau auf als in den beiden anderen Versuchsjahren.

In **Abb. 54** sind die TM-Erträge und N-Gehalte von Sorghum und Sudangras dargestellt. Die N_{crit} -Gehalte von Sorghum liegen nach PLÉNET & CRUZ (1997) etwas höher als bei Mais.

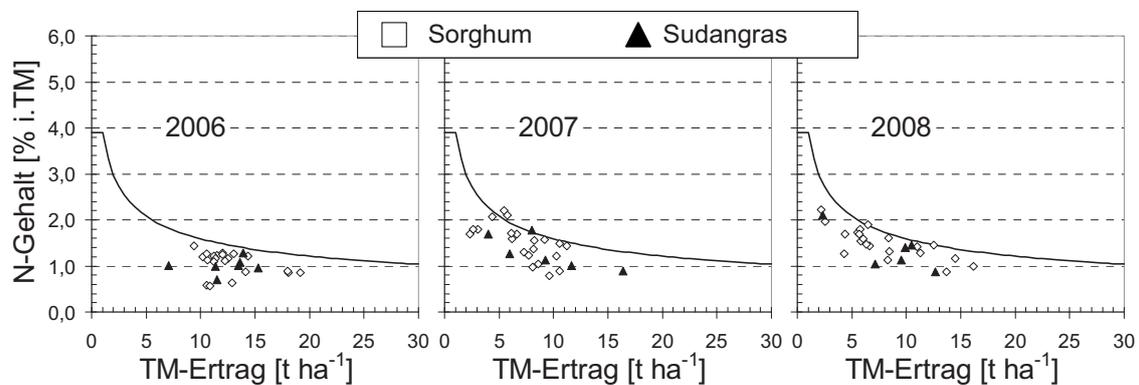


Abb. 54: N-Gehalte und TM-Erträge von Sorghum und Sudangras in der Zweikultur-Nutzung im Vergleich zum kritischen N-Gehalt (N_{crit}) in den drei Versuchsjahren.

Die N-Gehalte variierten über die Jahre mit Werten zwischen 0,5% bis 2,3% sehr stark, wobei kein Unterschied zwischen Sorghum und Sudangras zu erkennen war. Im Jahr 2006 erreichten sowohl Sorghum als auch Sudangras hohe Erträge mit geringen N-Gehalten von etwas über 1%. In den beiden letzten Versuchsjahren hingegen lagen die Erträge vor allem von Sorghum auf einem geringeren Niveau und parallel dazu waren die N-Gehalte mit Werten bis über 2% entsprechend hoch. Meist blieben diese jedoch unter der N_{crit} -Kurve.

Um die N-Versorgung der Kulturen besser einschätzen zu können, sind in **Abb. 55** die N-Ernährungsindices (NNI) von WR, Mais und Sonnenblumen in der HFN und ZKN dargestellt. Bei einem NNI-Wert > 1 ist die N-Versorgung nicht limitierend, bei einem Wert kleiner < 1 liegt dementsprechend ein N-Defizit vor (LEMAIRE & GASTAL 1997). LEMAIER & GASTAL (1997) gehen bei einem NNI-Wert $> 0,8$ noch von einer guten N-Versorgung aus. Die NNI-Werte von WR (**Abb. 55**, oben) waren sowohl in der HFN als auch in der ZKN in allen drei Versuchsjahren < 1 . In den Jahren 2006, 2007 und 2008 lagen die NNI-Werte von WR-Energie in der HFN bei $0,60 \pm 0,13$,

0,73 ± 0,10 und 0,69 ± 0,15. In der ZKN lagen die NNI-Werte bei 0,63 ± 0,13, 0,64 ± 0,06 und 0,63 ± 0,13 und waren damit in den letzten beiden Jahren niedriger als in der HFN.

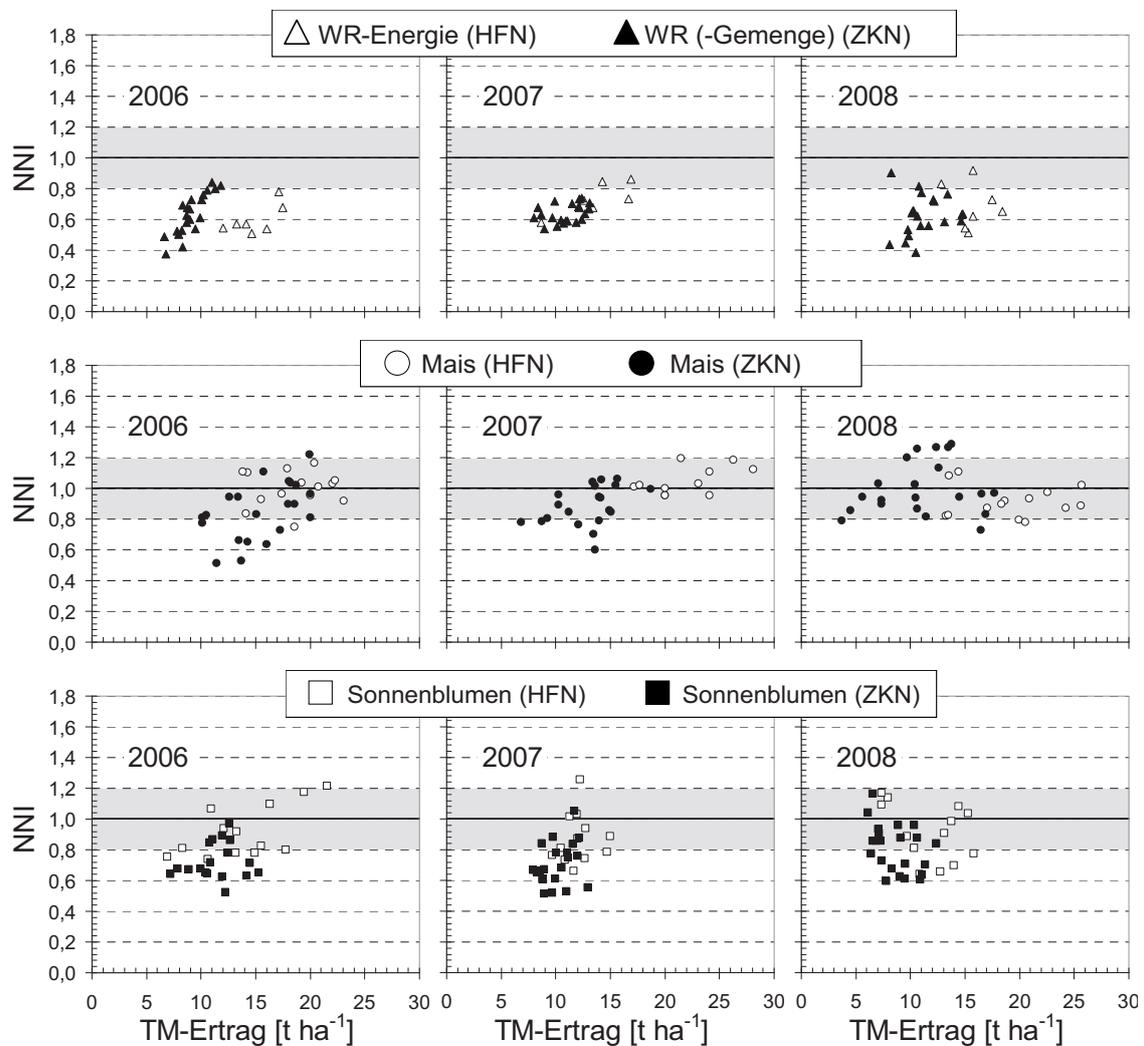


Abb. 55: N-Ernährungs-Indices (NNI) und TM-Erträge von Winterroggen (**oben**), Mais (**Mitte**) und Sonnenblumen (**unten**) in der Hauptfrucht-(HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) in den drei Versuchsjahren.

Die NNI-Werte von Mais (**Abb. 55**, Mitte) bewegten sich in den drei Jahren zwischen 0,51 und knapp über 1,29. Mais als HFN wies in den Jahren 2006, 2007 und 2008 neben höheren TM-Erträgen auch höhere NNI-Werte von $1,0 \pm 0,12$, $1,05 \pm 0,09$ und $0,91 \pm 0,10$ auf als Mais in der ZKN mit NNI-Werten von $0,85 \pm 0,19$, $0,89 \pm 0,13$ und $1,0 \pm 0,17$. Zudem schwankten die

NNI-Werte der ZKN stärker als die NNI-Werte der HFN. In den ersten beiden Jahren lag knapp die Hälfte der NNI-Werte von Mais in der ZKN unter 0,8, was auf leichte N-Defizite hindeutet. Mais in der ZKN war demnach etwas schlechter mit Stickstoff versorgt als Mais in der HFN.

Die NNI-Werte von Sonnenblumen in der HFN lagen in den Jahren 2006, 2007 und 2008 im Mittel bei $0,92 \pm 0,17$, $0,87 \pm 0,17$ und $0,91 \pm 0,18$ und bei $0,72 \pm 0,12$, $0,71 \pm 0,14$ und $0,81 \pm 0,16$ in der ZKN (Abb. 55, unten).

In Abb. 56 sind die NNI-Werte und die TM-Erträge von Sorghum und Sudangras in den drei Versuchsjahren dargestellt. Die NNI-Werte schwanken zwischen knapp 0,4 und 1,1.

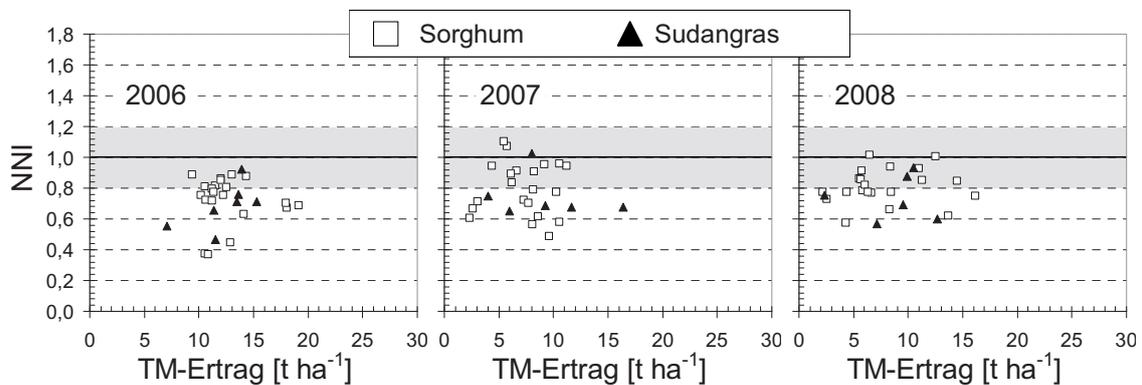


Abb. 56: N-Ernährungs-Indices (NNI) und TM-Erträge von Sorghum und Sudangras in der Zweikultur-Nutzung in den drei Versuchsjahren.

Ein Unterschied im N-Ernährungsstatus zwischen Sorghum und Sudangras bestand neben den eher höheren Sudangraserträgen nicht. Fast alle Werte lagen unterhalb von 1,0 und mehr als die Hälfte unter 0,8, was auf ein N-Defizit hindeutet. Die NNI-Werte von Sorghum lagen in den Jahren 2006, 2007 und 2008 im Mittel bei $0,72 \pm 0,15$, $0,80 \pm 0,17$ und $0,81 \pm 0,11$ und von Sudangras bei $0,68 \pm 0,15$, $0,75 \pm 0,14$ und $0,74 \pm 0,15$. Damit lagen die NNI-Werte von Sorghum und Sudangras auf einem geringeren Niveau als die NNI-Werte von Mais in der ZKN (vgl. Abb. 55).

Tab. 27 listet die N-Gehalte in der Trockenmasse und NNI-Werte von Mais und Sonnenblumen in beiden Anbausystemen an den einzelnen Standorten auf. Sowohl in der HFN als auch in der ZKN wiesen Sonnenblumen auf allen Standorten höhere N-Gehalte auf als Mais.

Tab. 27: N-Gehalte und NNI-Werte von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) nach Winterroggen an den sieben Standorten.

	Mais				Sonnenblumen			
	HFN		ZKN		HFN		ZKN	
	N	NNI	N	NNI	N	NNI	N	NNI
Dornburg	1,18	0,96	1,27	0,88	1,49	0,86	1,40	0,69
Gülzow	1,31	1,07	1,45	0,97	1,78	1,01	1,65	0,89
H. Düsse	0,99	0,93	1,16	0,99	1,39	0,93	1,25	0,74
Rausch.	1,09	0,96	1,03	0,83	1,27	0,85	1,21	0,69
Straubing	1,11	1,05	1,39	1,12	1,29	0,89	1,51	0,90
Werlte	1,17	1,01	1,47	1,03	2,25	1,21	1,59	0,76
Witzenh.	1,06	0,97	1,27	0,98	1,31	0,83	1,28	0,70
Ø	1,13	0,99	1,29	0,97	1,54	0,94	1,41	0,77

N: N-Gehalt in Prozent der Trockenmasse NNI: Stickstoff-Ernährungsindex

Dem NNI-Wert zufolge war Mais in der HFN auf allen Standorten optimal mit Stickstoff versorgt und in der ZKN traten lediglich an den Standorten *Dornburg* und *Rauschholzhausen* leichte Defizite auf. Bei den Sonnenblumen in der HFN war die N-Versorgung hingegen etwas schlechter und gemäß den NNI-Werten lagen bei Sonnenblumen als Zweitkulturen teilweise deutliche N-Mangelsituationen vor.

3.5.3 N-Bilanzen

Mit den N-Düngermengen und den N-Entzügen im Erntegut wurde für jede Kulturpflanze bzw. Kulturpflanzenkombination eine Bilanzierung erstellt (**Tab. 28**). Mais entzog als Hauptfrucht im Mittel der Standorte 220 kg N was im unteren Bereich der von WIESLER & HORST (1992) in 3-jährigen Feldversuchen ermittelten Spanne von 177 bis 328 kg N ha⁻¹ liegt. Die N-Entzüge der

Zwischenfrucht Senf wurden hierbei nicht berücksichtigt. In der ZKN entzog Mais zusammen mit WR 280 kg N und Sonnenblumen entzogen entsprechend 189 und 262 kg N.

Tab. 28: N-Düngung und N-Entzüge in kg ha⁻¹ aller Varianten im Mittel der Standorte und Jahre.

Hauptfrucht-Nutzung									
Variante	Kultur 1			Kultur 2			Gesamt		
	+ N	- N	Saldo	+ N	- N	Saldo	+ N	- N	Saldo
Senf ¹ ; Mais (<i>Atletico</i>)	27	-	+ 27	139	220	- 81	166	220	- 54
Senf ¹ ; Mais (Stamm)	27	-	+ 27	139	220	- 81	166	220	- 54
Senf ¹ ; Sonnenbl. (<i>Methasol</i>)	27	-	+ 27	99	189	- 90	126	189	- 63
Senf ¹ ; Sonnenbl. (<i>Alisson</i>)	27	-	+ 27	73	170	- 97	100	170	- 70
WR-Energie; Senf ¹	123	161	- 38	26	-	+ 26	150	161	- 11
WR-Brot (Körner); Senf ¹	143	119	+ 24	17	-	+ 17	160	119	+ 41

Zweikultur-Nutzung									
Variante	Kultur 1			Kultur 2			Gesamt		
	+ N	- N	Saldo	+ N	- N	Saldo	+ N	- N	Saldo
WRü; Mais	167	126	+ 41	113	168	- 55	280	294	- 14
WRü; Sorghum				85	125	- 41	251	251	0
WRü; Sonnenbl.				81	139	- 58	248	265	- 17
WRü; Mais/Sonnenbl.				93	156	- 63	260	282	- 22
WR; Mais	106	126	- 20	123	154	- 31	229	280	- 51
WR; Sorghum				94	112	- 18	200	238	- 38
WR; Sonnenbl.				84	133	- 49	189	262	- 73
WR; Mais/Sonnenbl.				101	146	- 45	207	276	- 69
WR/WE; Mais	54	121	- 67	106	146	- 40	160	267	- 107
WR/WE; Sorghum				76	106	- 30	130	227	- 97
WR/WE; Sonnenbl.				62	130	- 68	116	251	- 135
WR/WE; Mais/Sonnenbl.				79	132	- 53	133	253	- 120
WR/WG; Sudangras	104	133	- 29	89	108	- 19	193	240	- 48
WR/WG; Amarant				48	98	- 50	152	231	- 79
WR/WG; Hanf				90	109	- 19	194	242	- 48
WR/WG; Mais/Sobl./Amarant				96	142	- 46	200	275	- 75

¹ Die N-Entzüge der Zwischenfrucht Senf wurden nicht berücksichtigt + N: N-Düngung - N: N-Entzug
So.: Sorte WRü: Winterrübsen WR: Winterroggen WE: Wintererbsen WG: Wintergerste

Damit lagen die N-Entzüge bei WR und Mais bzw. Sonnenblumen in der ZKN 27% und 39% höher als von Mais und Sonnenblumen in der HFN. Die Erstkultur WRü entzog im Mittel der Standorte und Jahre 41 kg weniger Stickstoff als mit der Düngung zugeführt wurde, während die N-Entzüge der Erstkulturen WR, WR/WE und WR/WG 22, 66 und 31 kg höher lagen als die N-Düngegaben. Mais und Sonnenblumen entzogen in beiden Anbausystemen mehr Stickstoff als ihnen mit der Düngung zugeführt wurde.

In **Abb. 57** sind die N-Bilanzsalden im Mittel der Standorte im ersten, zweiten und dritten Versuchsjahr dargestellt. Die legume N-Fixierung der WE im Gemenge mit WR wurde $2,5 \text{ kg N t}^{-1} \text{ TM}^{-1}$ (LLH 2007) und der atmosphärische N-Eintrag mit einem Pauschalwert von $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ berücksichtigt (GAUGER 2002). Die legume N-Fixierungsleistung ging in Abhängigkeit vom FM-Ertrag der WE mit 10, 1 und 15 kg N ha^{-1} in den Jahren 2006, 2007 und 2008 in die Bilanzrechnung ein. Im ersten Versuchsjahr lagen alle N-Salden der ZKN mit Werten zwischen -5 und -94 kg N ha^{-1} im negativen Bereich, d.h. es wurde mehr Stickstoff entzogen, als mit der mineralischen Düngung zugeführt wurde. Im zweiten Versuchsjahr waren die N-Salden der ZKN nach mit WR, WR/WE und WR/WG als Erstkulturen mit Werten zwischen -22 und $-100 \text{ kg N ha}^{-1}$ niedriger als im ersten Jahr, während die N-Salden der Varianten mit WRü als Erstkultur positive Werte von $+1$ bis $+38$ aufwiesen. Die sehr stark negativen N-Salden der Varianten mit WR/WE als Erstkultur sind wohl auf die sehr geringen Erträge und damit N-Fixierungsleistungen der WE zurück zu führen, welche im Mittel der Standorte und Jahre lediglich 9 kg N ha^{-1} betrug. Im dritten Jahr lagen sämtliche N-Salden der Varianten nach WRü mit Werten zwischen $+32$ und $+59 \text{ kg N ha}^{-1}$ im positiven Bereich. Innerhalb der ZKN waren im Jahr 2008 die N-Bilanzen von Sonnenblumen geringer als von Mais und Sorghum, welche die höchsten Werte aufwiesen. In der HFN lagen die N-Bilanzen von Mais und Sonnenblumen in allen drei Versuchsjahren im negativen Bereich. Lediglich im dritten Jahr war die N-Bilanz von Mais (*'Atletico'*) in der HFN leicht positiv.

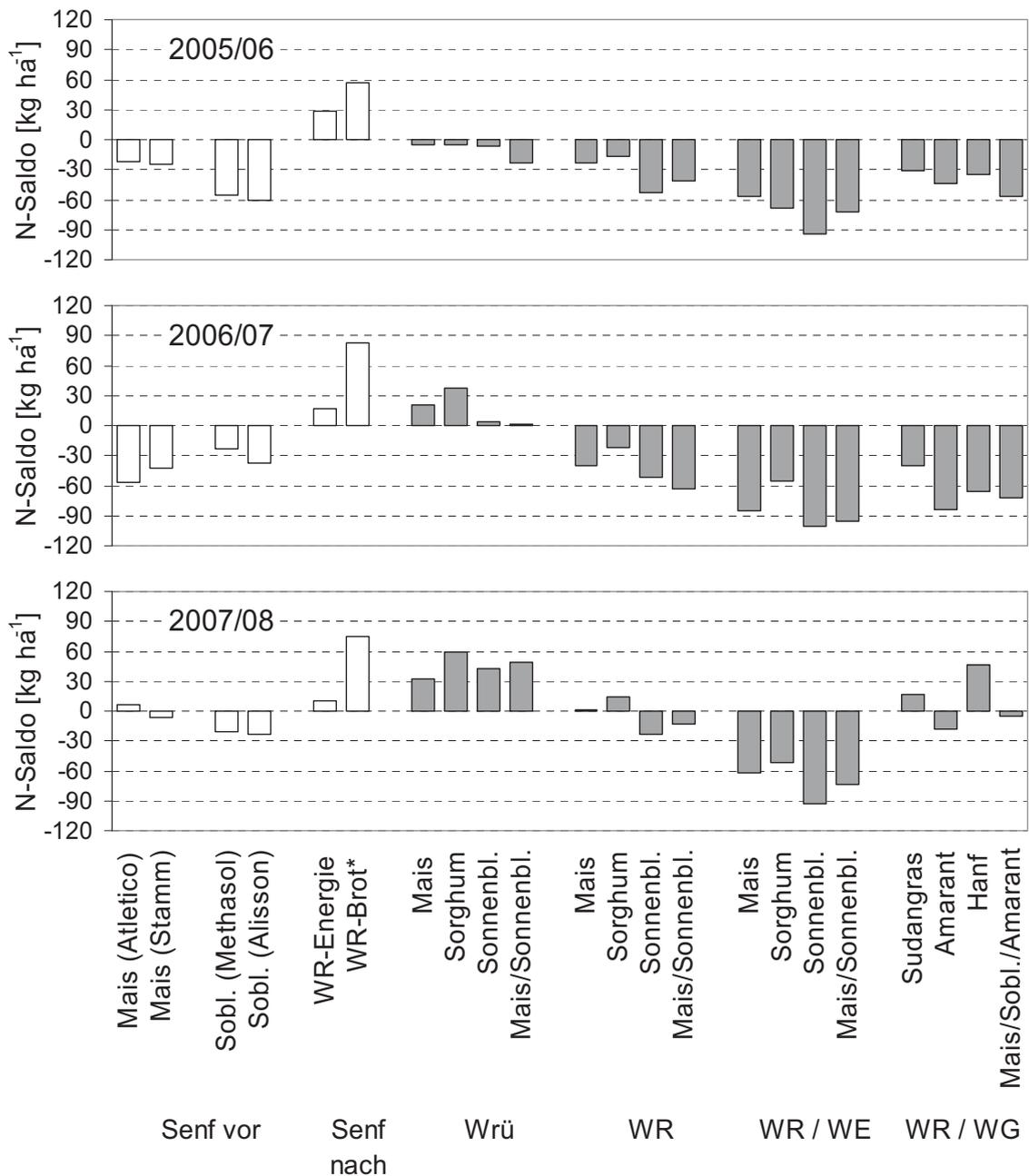


Abb. 57: N-Salden aller Varianten im Mittel der Standorte in der Hauptfrucht- (**links**) und Zweikultur-Nutzung (**rechts**) in den drei Versuchsjahren. *N-Entzug lediglich durch Körner.

Die N-Bilanzen von WR-Energie und WR-Brot wiesen in allen Versuchsjahren mit + 11 und + 83 kg N ha⁻¹ positive Werte auf. Sudangras und Hanf nach WR/WG wiesen in den beiden ersten Versuchsjahren negative und im

dritten Jahr positive N-Salden auf. Die N-Salden von Amaranth waren in allen drei Versuchsjahren mit Werten von - 19 bis - 84 kg N ha⁻¹ negativ.

Auf allen Standorten entzogen sowohl Mais als auch Sonnenblumen zusammen mit der Erstkultur in die ZKN mehr Stickstoff als in der HFN (Abb. 58). Lediglich in *Werlte* entzogen die Sonnenblumen als Hauptfrüchte mehr Stickstoff als WR und Sonnenblumen in der ZKN. In *Dornburg* und *Werlte* wurden in beiden Anbausystemen die geringsten N-Mengen entzogen. Die N-Entzüge von Mais in der HFN waren auf allen Standorten höher als die N-Entzüge von Sonnenblumen in der HFN. In der ZKN hingegen waren die N-Entzüge von Mais und Sonnenblumen an den Standorten *Dornburg*, *Gülzow* und *Rauischholzhausen* annähernd gleich hoch.

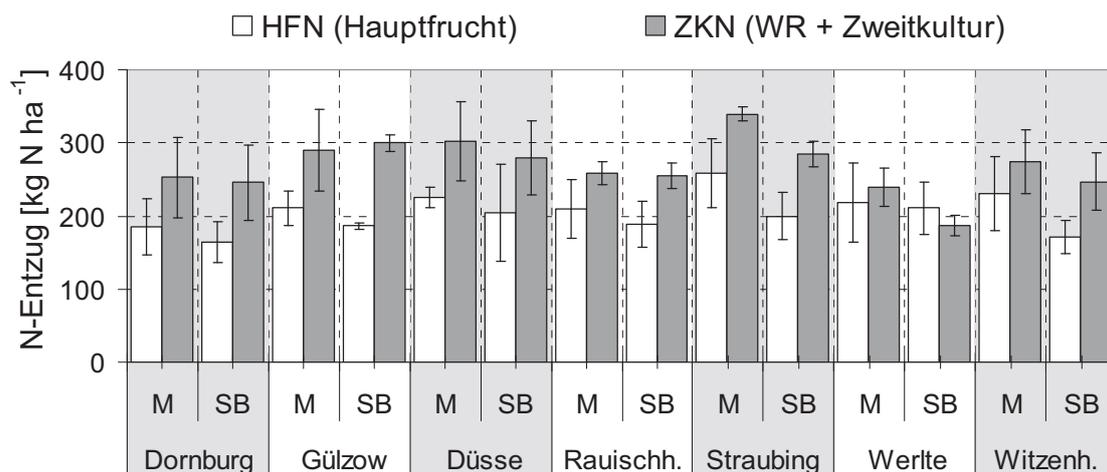


Abb. 58: N-Entzüge von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht-Nutzung (HFN) sowie von Winterroggen (WR) und Mais bzw. Sonnenblumen in der Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den Versuchsstandorten im Mittel der drei Versuchsjahre mit Standardabweichungen.

Im Mittel der Standorte wurde in der ZKN 280 kg N ha⁻¹ durch WR und Mais entzogen und damit 60 kg N ha⁻¹ (+ 30%) mehr als durch Mais in der HFN. Die Sonnenblumen in der ZKN entzogen mit knapp 260 kg N ha⁻¹ etwa 70 kg N ha⁻¹ (+ 36%) mehr als in der HFN.

In **Abb. 59** sind die N-Entzüge von Mais als Hauptkultur sowie von WR und Mais in der Zweikultur-Nutzung auf allen Standorten und für jedes Versuchsjahr dargestellt.

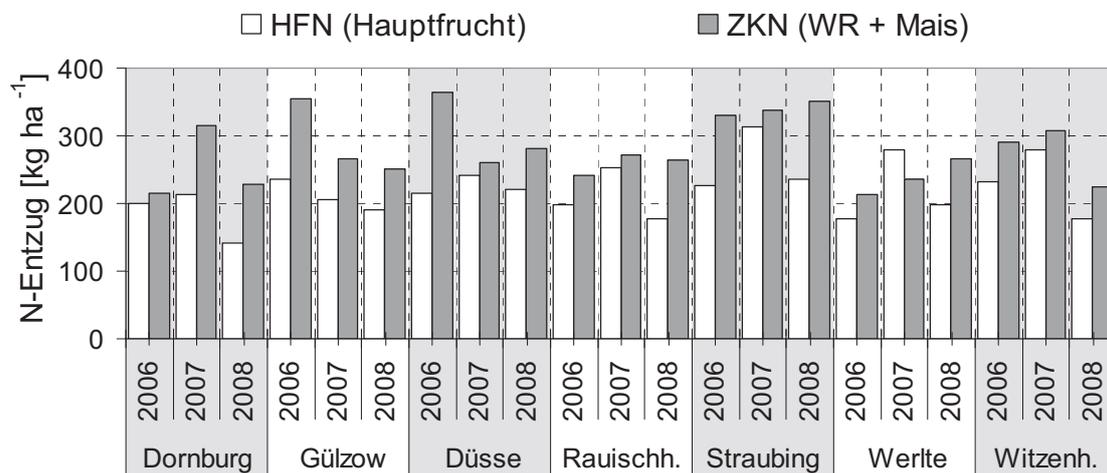


Abb. 59: N-Entzüge von Mais in der Hauptfrucht-Nutzung (HFN) sowie von Winterroggen (WR) und Mais in der Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den Versuchsstandorten in den drei Versuchsjahren.

In den Jahren 2006, 2007 und 2008 entzogen WR und Mais in der ZKN im Mittel der Standorte 287, 285 und 267 kg N ha⁻¹ und damit 75, 30 und 75 kg N ha⁻¹ mehr als Mais in der HFN. In *Gülzow* (2006), *Haus Düsse* (2006) und *Straubing* (2008) entzogen WR und Mais über 350 kg N ha⁻¹.

Die N-Entzüge von WR und Sonnenblumen lagen in den Jahren 2006, 2007 und 2008 mit 272, 258 und 156 kg N ha⁻¹ um 68, 79 und 72 kg N ha⁻¹ höher als die N-Entzüge von Sonnenblumen in der HFN (**Abb. 60**). An den Standorten *Gülzow* (2006, 2008), *Haus Düsse* (2006) und *Straubing* (2008) entzogen WR und Sonnenblumen etwas mehr als 300 kg N ha⁻¹. Lediglich in *Werlte* (2007) und *Rauschholzhausen* (2006) entzogen die Sonnenblumen als Hauptfrüchte mehr Stickstoff als WR und Sonnenblumen in der ZKN.

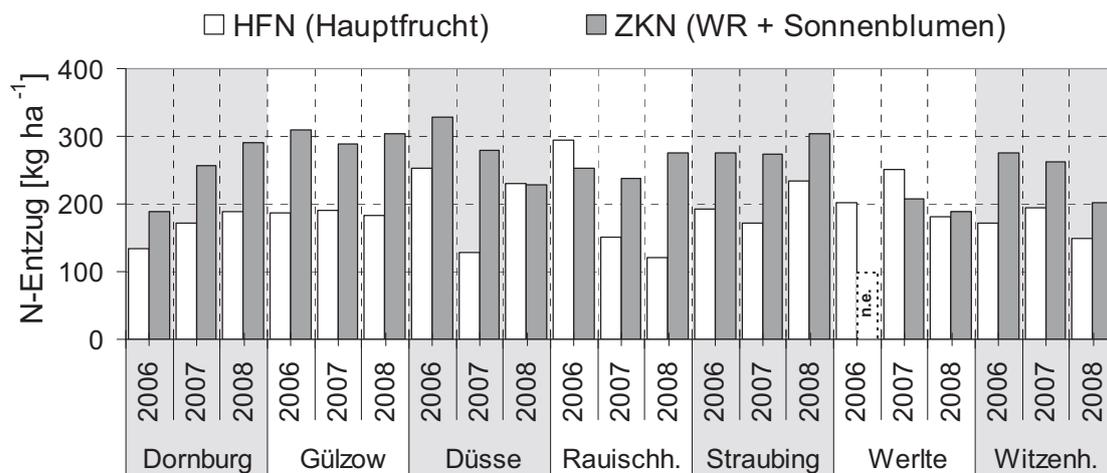


Abb. 60: N-Entzüge von Sonnenblumen in der Hauptfrucht-Nutzung (HFN) sowie von Winterroggen (WR) und Sonnenblumen in der Zweikultur-Nutzung (ZKN) an den Versuchsstandorten in den drei Versuchsjahren.

Mit den zugeführten N-Düngermengen wurden die Bilanzsalden für Mais und Sonnenblumen in der HFN und ZKN errechnet (**Abb. 61**).

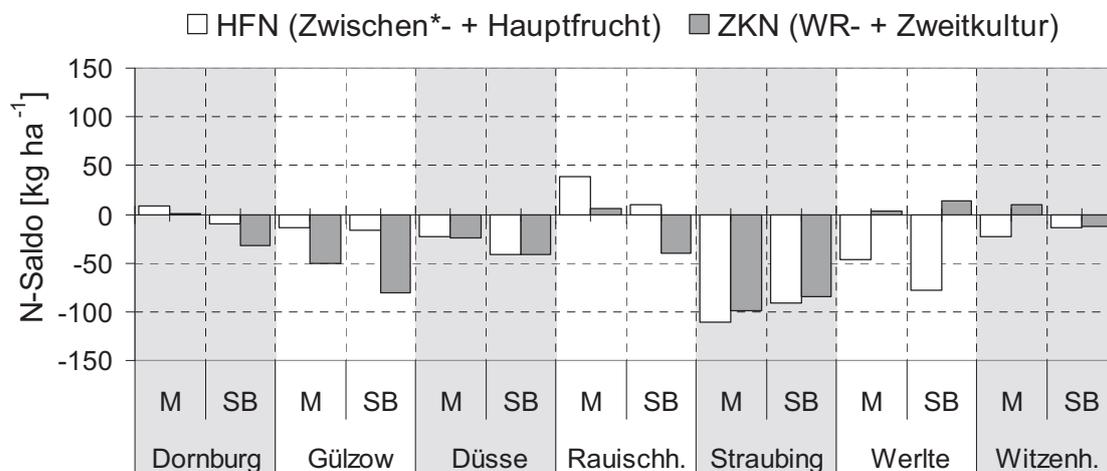


Abb. 61: N-Bilanzsalden von Mais (M) und Sonnenblumen (SB) im Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzungssystem (ZKN) im Mittel der drei Versuchsjahre. *Bei der Zwischenfrucht Senf wurde lediglich die N-Düngung und kein N-Entzug berücksichtigt.

An den Standorten *Dornburg*, *Gülzow* und *Rauschholzhausen* ergaben sich in der ZKN sowohl bei Mais als auch bei Sonnenblumen niedrigere N-Bilanzen als in der HFN, während in *Werlte* die N-Bilanzen der HFN geringer

waren. An den übrigen Standorten lag kein klarer Unterschied bezüglich der N-Bilanzen zwischen den Anbausystemen vor. Sehr stark negative N-Bilanzen wurden in *Straubing* für Mais und Sonnenblumen in beiden Anbausystemen, in *Gülzow* bei Sonnenblumen in der ZKN und in *Werlte* bei SB in der HFN erreicht. Im Mittel der Standorte lagen die N-Bilanzen von Mais und Sonnenblumen in der ZKN bei - 22 und - 40 kg N ha⁻¹ a⁻¹ und damit 2 kg N höher bzw. 5 kg N niedriger als in der HFN.

3.6 P- und K-Entzüge

SCHOLZ & ELLERBECK (2002) ermittelten bei WR P, K und Cl-Gehalte von 0,2%, knapp 1,0% und etwa 0,13% in der TM. Die P-Gehalte stimmen gut mit den eigenen Ergebnissen überein. Die ermittelten K-Gehalte von SCHOLZ & ELLERBECK (2002) lagen hingegen auf einem tieferen Niveau, was wohl auf den sandigen Boden am Versuchsstandort zurück zu führen ist. Auch die Cl-Gehalte lagen in den eigenen Untersuchungen etwas höher.

In **Tab. 29** sind die K-Gehalte von Mais und Sonnenblumen als Haupt- und Zweitkulturen dargestellt. Sonnenblumen wiesen mit über 3% generell deutlich höhere K-Gehalte auf als Mais.

Tab. 29: K-Gehalte in Prozent der Trockenmasse von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN).

Standorte	Mais [% K i. TM]			Sonnenblumen [% K i. TM]		
	HFN	ZKN	Diff.	HFN	ZKN	Diff.
H. Düsse	1,35	1,12	- 0,23	3,26	3,34	+ 0,17
Straubing	1,42	1,03	- 0,39	2,57	2,56	- 0,01
Rauisch.	1,06	1,26	+ 0,20	2,83	3,07	+ 0,24
Witzenh.	1,07	1,41	+ 0,34	3,04	2,90	- 0,14
Gülzow	1,18	1,43	+ 0,25	3,39	2,93	- 0,47
Dornburg	1,19	1,37	+ 0,17	3,23	2,85	- 0,38
Werlte	1,12	1,23	+ 0,11	3,64	2,86	- 0,78
Ø	1,20	1,27	+ 0,07	3,14	2,81	- 0,20

Diff.: Differenz von ZKN und HFN.

Sämtliche K-Gehalte lagen über 1% in der Trockenmasse, was von MARSCHNER (1995) als mittlere Konzentration für ein adäquates Wachstum angegeben wird. Die K-Gehalte von Mais als Zweitkultur lagen auf fünf der sieben Standorte höher als von Mais in der HFN. Bei den Sonnenblumen lagen die K-Gehalte in der ZKN hingegen meist niedriger als in der HFN. Deutlich geringer lagen die K-Gehalte der Sonnenblumen als Zweitkultur an den Standorten *Werlte*, *Gülzow* und *Dornburg*.

Durch die Körnerernte des Roggens in der HFN wurden lediglich 21 kg P und 37 kg K ha⁻¹ mit der Ernte abgefahren (**Tab. 30**). Durch die Ganzpflanzenernte von WR-Energie in der HFN stiegen die P-Entzüge moderat auf 29 und die K-Entzüge sehr stark auf über 200 kg K ha⁻¹ an. In der ZKN lagen die P-Entzüge bei etwa 60 kg ha⁻¹ und damit fast 40% höher als in der HFN. Sonnenblumen wiesen in beiden Anbausystemen die höchsten K-Entzüge auf. Als Hauptfrucht entzog die Sonnenblumensorte '*Methasol*' bereits 391 kg K ha⁻¹ und mit WR in der ZKN sogar 462 kg K ha⁻¹. Die K-Entzüge von Mais lagen mit 230 in der HFN und 323 kg K ha⁻¹ in der ZKN ebenfalls auf einem hohen Niveau. Der K-Entzug des Mais/Sonnenblumen-Gemenges lag zwischen den Entzügen der Reinsaaten. In der ZKN wurden durch die Erstkulturen bereits zwischen 165 (WRü) und 181 kg K ha⁻¹ (WR/WG) entzogen. Die Summe der K-Entzüge durch die Erstkulturen und Sorghum lagen bei etwa 300 kg K ha⁻¹, während Sudangras und Hanf zusammen mit WR/WG als Erstkultur jeweils knapp 330 und Amarant sogar 447 kg K ha⁻¹ entzogen. Durch die Integration von Amarant in das Mais/Sonnenblumen/Amarant-Gemenge wurden 20 bis 30 kg K ha⁻¹ mehr entzogen als im Mais/Sonnenblumen-Gemenge.

Tab. 30: P- und K-Entzüge aller Kulturen der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung im Mittel der Standorte und Jahre.

Hauptfrucht-Nutzung						
Variante	Kultur 1 [kg ha ⁻¹]		Kultur 2 [kg ha ⁻¹]		Gesamt [kg ha ⁻¹]	
	P	K	P	K	P	K
Senf ¹ ; Mais (<i>Atletico</i>)	-	-	37	230	37	230
Senf ¹ ; Mais (Stamm)	-	-	40	239	40	239
Senf ¹ ; Sonnenbl. (<i>Methasol</i>)	-	-	37	391	37	391
Senf ¹ ; Sonnenbl. (<i>Alisson</i>)	-	-	32	348	32	348
WR-Energie (<i>Balistic</i>); Senf ¹	29	209	-	-	29	209
WR-Brot ² (<i>Visello</i>); Senf ¹	21	37	-	-	21	37

Zweikultur-Nutzung						
Variante	Kultur 1 [kg ha ⁻¹]		Kultur 2 [kg ha ⁻¹]		Gesamt [kg ha ⁻¹]	
	P	K	P	K	P	K
WRü; Mais	27	165	27	153	54	318
WRü; Sorghum			22	143	49	308
WRü; Sonnenbl.			25	279	51	444
WRü; Mais/Sonnenbl.			26	230	53	396
WR; Mais	25	175	26	148	51	323
WR; Sorghum			22	133	47	308
WR; Sonnenbl.			26	287	51	462
WR; Mais/Sonnenbl.			27	225	52	400
WR / WE; Mais	23	156	27	146	50	303
WR / WE; Sorghum			21	138	45	294
WR / WE; Sonnenbl.			30	290	53	446
WR / WE; Mais/Sonnenbl.			28	235	52	391
WR / WG; Sudangras	26	181	23	142	48	324
WR / WG; Amarant			35	275	60	447
WR / WG; Hanf			24	146	49	327
WR / WG; Mais/Sonnenbl./Amarant			27	237	53	418

¹ Die Entzüge der Zwischenfrucht Senf nicht berücksichtigt ² Entzug durch Körnerernte

4 Diskussion

4.1 Das Ertragspotenzial der Zweikultur-Nutzung

4.1.1 Erträge von Mais und Sonnenblumen in Abhängigkeit von Anbausystem und Standorteigenschaften

Um die beiden Anbausysteme zu vergleichen, wurden Mais und Sonnenblumen in der HFN und der ZKN angebaut. Es zeigte sich, dass die Witterung der Versuchsjahre neben den Standorteigenschaften einen erheblichen Einfluss auf das Pflanzenwachstum hatte, was von STRUIK ET AL. (1985), CRASTA ET AL. (1997), WILHELM ET AL. (1999), KRUSE ET AL. (2008) bestätigt wurde. Bis zum Fahnenschieben werden Entwicklungsgeschwindigkeit und Biomasseproduktion bei Mais durch hohe Temperaturen gefördert (STRUIK ET AL. 1985, BAEUMER 1992). Die optimale Temperatur für die Photosynthese ist bei Mais mit knapp 30°C etwas höher als bei Sonnenblumen, deren Optimum bei 25°C liegt (WARREN-WILSON 1966, HUGGER 1989). Auch die Temperaturspanne für optimale Wachstumsbedingungen rangiert bei Mais mit Werten zwischen 23 und 36°C auf einem höheren Niveau als bei Sonnenblumen, welche bei Temperaturen zwischen 18 und 33°C ein optimales Wachstum aufweisen (WARREN-WILSON 1966). Auf kühle Temperaturen unter 18°C reagiert die C₄-Pflanze Mais mit einem stark verzögerten Wachstum (WILSON ET AL. 1995). C₄-Pflanzen zeichnen sich bei Temperaturen über 25°C durch hohe Nettphotosyntheseraten aus. Dies liegt zum einen an der Speicherung von CO₂ als Malat, wodurch die Photosynthese auch bei geschlossenen Stomata arbeiten kann und zum anderen an der geringeren Photorespiration von C₄-Pflanzen, die sich dadurch bei steigenden Temperaturen weniger erhöht als bei C₃-Pflanzen (CANVIN ET AL. 1980, MOORE 1982, NULTSCH 1986, BROWN 1987, OBERHUBER & EDWARDS 1993, OAKS 1994). Sonnenblumen zeichnen sich dagegen durch einen hohen Wasserverbrauch aus, können sich bei Trockenheit jedoch schnell über die Verringerung des Blattflächenindex anpassen (DIEPENBROCK 1987, HUGGER 1989). GROVE & SUMNER (1982) bezeichnen Sonnenblumen

daher als eine trockenresistente Art. Tritt Trockenstress jedoch in der Jugendphase auf, reagieren Sonnenblumen mit starken Ertragseinbußen (HUGGER 1989).

Die Phase der Etablierung der Zweitkultur ist von besonderer Bedeutung, da zu deren Aussaat Ende Mai bzw. Anfang Juni oft Trockenheit herrscht, was die Keimung und damit den Feldaufgang verzögert (EHLERS 1996, LÖPMEIER 2007). Dies konnte durch die eigenen Ergebnisse bestätigt werden. Zur Aussaat der Sommerungen in der HFN Ende April war die nFK zu durchschnittlich 60% aufgefüllt, während zur Saat der Zweitkulturen Anfang Juni mit 42% der nFK trockenere Bedingungen herrschten (vgl. **Abb. 11**). Bei trockenen Bedingungen ab dem Saatzeitpunkt bildet Mais eine geringere Blattfläche aus, was höhere Ertragseinbußen hervorruft als ein zeitlich später auftretender Wassermangel (ARGILLIER ET AL. 1994), auf welchen die Pflanzen physiologisch mit einer geringeren Nettoassimilation reagieren (VÁCLAVÍK 1967). Neben den tendenziell trockeneren Bedingungen kann auch das Zeitfenster zwischen Ernte der Erst- und Aussaat der Zweitkulturen zu kurz für die Bereitung eines guten Saatbettes sein. Etwas entzerrt wird dies durch die pfluglose Bodenbearbeitung und Direktsaat der Zweitkulturen. Generell ist für multiple Anbausysteme wie die ZKN ein intensiveres Management nötig (LEWIS & PHILLIPS 1983). Im Mittel der Jahre und Standorte erzielte die ZKN mit Mais und Sonnenblumen 23,6 und 20,3 t TM ha⁻¹ und damit 10% und 38% höhere Jahreserträge als in der HFN mit Zwischenfrüchten, was die **Arbeitshypothese Nr. 1 »Der Anbau von Mais und Sonnenblumen in der ZKN erhöht die Jahreserträge gegenüber dem Anbau in der HFN mit Zwischenfrüchten«** bestätigt. Durch den Anbau von Sonnenblumen in der ZKN konnten im Mittel der sieben Standorte in allen drei Versuchsjahren und durch den Anbau von Mais in zwei der drei Versuchsjahre höhere Jahreserträge erwirtschaftet werden. Auch die ökonomische Auswertung weist auf höhere Gewinnbeiträge der ZKN hin (TOEWS ET AL. 2008). Die drei Versuchsjahre zeichneten sich durch sehr unterschiedliche Witterungsverläufe aus, was sich in den Niederschlags- und Temperatursummen widerspiegelte, die zwischen den Jahren stärker

variierten als zwischen den einzelnen Standorten (vgl. **Abb. 13**). In der ZKN sind durch die kürzeren Vegetationszeiten von Mais und Sonnenblumen die täglichen Wachstumsbedingungen bedeutender für die Ertragsbildung als in der HFN. Hierauf deutet der stärkere Zusammenhang zwischen täglichem Zuwachs und TM-Ertrag, was sich durch höhere Bestimmtheitsmaße äußerte, hin. Den Zweitkulturen Mais und Sonnenblumen standen im Mittel der Jahre und Standorte knapp 1300°C d und 308 mm Niederschlag zur Verfügung und damit 178°C d (- 12%) und 40 mm (- 11%) weniger als den Hauptkulturen. Die Unterschiede der Niederschlags- und Temperatursummen zwischen den Anbausystemen fielen bei Sonnenblumen geringer aus als bei Mais, was auf die schnellere Abreife von Sonnenblumen als Hauptkultur zurück zu führen war.

Jahreseffekte

Das Jahr 2006 wies mit 221 Tagen die längste Vegetationsperiode der drei Versuchsjahre auf (vgl. **Tab. 13**). Im Jahresdurchschnitt lag die Temperatur 0,9°C höher als im mehrjährigen Mittel. Während die Temperatur zu Beginn der Vegetationsperiode unterdurchschnittlich kühl war, lag die mittlere Temperatur im Herbst (Sept./Okt.) 3,0°C höher als im mehrjährigen Mittel (vgl. **Tab. 14**), was vor allem dem Mais in der ZKN ein langes Wachstum bis in der Herbst ermöglichte. Die Temperatursummen der Sommerungen beider Anbausysteme waren mit 1500°C d ausreichend hoch für das Erreichen der Siloreife (vgl. **Abb. 13**). Während der Vegetation von Mais und Sonnenblumen in der ZKN fielen knapp 250 mm Niederschlag und damit etwa 50 mm weniger als zur Vegetation der Sommerungen der HFN (vgl. **Abb. 13**). Trotz der im Vergleich zum mehrjährigen Mittel um 53 mm geringen Niederschläge im Jahr 2006 (vgl. **Tab. 15**) war die nFK zur Aussaat der Zweitkulturen im Mittel der Standorte zu 53% aufgefüllt und damit höher als in den beiden folgenden Jahren (vgl. **Abb. 12**).

Die Erträge von Mais als Zweitkultur lagen im Jahr 2006 daher lediglich 11% unter den Erträgen von Mais als Hauptfrucht und es konnten keine signi-

fikanten Unterschiede ermittelt werden. Die täglichen Zuwachsraten von Mais waren in beiden Anbausystemen identisch, so dass die geringeren Erträge der ZKN auf die im Mittel 15 Tage kürzere Vegetationsdauer zurückgeführt werden können (vgl. **Abb. 21**). Im Juni/Juli des Jahres 2006 wurde Mais in der Hauptfruchtstellung durch eine Trockenperiode beeinträchtigt, was laut ARGILLIER ET AL. (1994) besonders in dieser Wachstumsphase den Ertrag beeinträchtigt. Durch die guten Wachstumsbedingungen mit hohen Niederschlägen im Mai (vgl. **Abb. 9, Abb. 10**) entwickelte der Mais eine große Blattmasse, was die Transpirationsverluste und damit den Stress in der folgenden Trockenperiode verstärkte. Der erst im Juni gesäte Mais der ZKN konnte von den aufgefüllten Bodenwasservorräten profitieren. Während der anschließenden Trockenphase verfügte dieser noch über eine kleinere Blattfläche und damit geringere Transpirationsverluste als der Mais in der HFN. Ähnliche Beobachtungen machte auch LÖPMEIER (2007). Zusätzlich befand sich der Mais in der HFN während der trockenen Hitzeperiode im Juli 2006 im Stadium des Fahenschiefens (vgl. **Tab. 20**), was laut WILHELM ET AL. (1999) die Biomasseproduktion besonders einschränkt. Bei den Zweitkulturen begann die kritische Phase der Kornfüllung erst ab Anfang/Mitte August, wo wieder ausreichende Niederschlagsmengen zur Verfügung standen (vgl. **Abb. 9, Abb. 10**).

Die Sonnenblumen in der HFN reagierten auf die Trockenperiode im Juli 2006 trotz des generell hohen Wasserbedarfs (DIEPENBROCK 1987, HUGGER 1989, TURHAN & BASER 2004) nicht mit derartigen Ertragseinbußen und erlangten mit über 14 t TM ha⁻¹ die höchsten Erträge der drei Versuchsjahre. Dies ist auf die rasche Anpassungsfähigkeit des Blattflächenindex (DIEPENBROCK 1987) sowie der Eigenschaft, dem Boden bis in große Tiefen und gegen hohe Bindungskräfte Wasser zu entziehen (HUGGER 1989) zurück zu führen. Auf Standorten mit hohen Wasserspeicherkapazitäten (*Haus Düsse, Straubing, Witzenhausen*) äußerte sich dies durch hohe Erträge (vgl. **Abb. 28**). C₃-Pflanzen wie Sonnenblumen reagieren auf hohe Temperaturen mit einer schnelleren Entwicklungsgeschwindigkeit als C₄-Pflanzen (BAEUMER 1992). Dadurch befanden sich die Sonnenblumen während der Trockenperiode bereits in einem späteren Entwicklungsstadium mit geringerem Wasserbedarf

(vgl. **Tab. 20**). Der Ertrag von Sonnenblumen als Zweitkultur war im Mittel der Standorte dennoch 21% geringer als in der HFN (**Tab. 31**). Dies ist neben den hohen Sonnenblumenerträgen der HFN auch auf die mangelnde Wasserverfügbarkeit des Jahres 2006 zurück zu führen (vgl. **Tab. 15**), was bei Sonnenblumen die Abreife fördert und damit Ertragsdepressionen hervorruft (HUGGER 1989).

Tab. 31: Übersicht über die Erträge von Mais und Sonnenblumen im Hauptfrucht- (HFN) und Zweitkultur-Nutzungssystem (ZKN) im Mittel der Standorte in den drei Versuchsjahren.

Hauptfrucht-Nutzung								
	Mais [t TM ha ⁻¹]				Sonnenblumen [t TM ha ⁻¹]			
	2006	2007	2008	Ø	2006	2007	2008	Ø
Senf	1,8	1,9	1,7	1,8	1,8	1,9	1,7	1,8
Sommerung	17,9	22,6	18,5	19,6	14,2	12,5	11,9	12,9
Jahresertrag	19,7	24,6	20,2	21,5	16,1	14,5	13,5	14,7
Zweikultur-Nutzung								
	Mais [t TM ha ⁻¹]				Sonnenblumen [t TM ha ⁻¹]			
	2006	2007	2008	Ø	2006	2007	2008	Ø
Winterroggen	9,2	10,9	11,3	10,5	9,2	10,9	11,3	10,6
Sommerung	15,8	13,1	10,3	13,1	11,3	9,9	8,4	9,7
Jahresertrag	25,1	24,0	21,6	23,6	20,6	20,9	19,7	20,3
Ertragsveränderung durch die Zweikultur-Nutzung								
	Mais [t TM ha ⁻¹]				Sonnenblumen [t TM ha ⁻¹]			
	2006	2007	2008	Ø	2006	2007	2008	Ø
Sommerung	- 11% (n.s.)	- 42% (s.)	- 44% (s.)	- 33% (n.s.)	- 21% (n.s.)	- 20% (n.s.)	- 29% (n.s.)	- 23% (n.s.)
Jahresertrag	+ 27% (s.)	- 3% (n.s.)	+ 7% (n.s.)	+ 10% (n.s.)	+ 30% (n.s.)	+ 44% (s.)	+ 46% (s.)	+ 38% (s.)

s.: signifikant ($\alpha = 0,05$) n.s.: nicht signifikant

Aufgrund des geringeren Wasserbedarfs und der hohen Temperatursprüche erzielte Mais als Zweitkultur höhere Erträge als Sonnenblumen, bei

denen über geringe Bodenwassergehalte und damit niedrigere Diffusionsraten zusätzlich einen K-Mangel induziert werden kann (NYE 1966, SCHAFF & SKOGLEY 1982), worauf diese sehr empfindlich reagieren (DIEPENBROCK 1987, HUGGER 1989). Mit der Erstkultur WR konnten im Jahr 2006 durch die ZKN mit Mais und Sonnenblumen Mehrerträge von 5,4 (+ 27%) und 4,5 t TM ha⁻¹ (+ 30%) erwirtschaftet werden, wobei beim Maisanbau signifikante Unterschiede vorlagen.

Das zweite Versuchsjahr zeichnete sich durch einen sehr milden Winter aus, was maßgeblich für die Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur im Vergleich zum mehrjährigen Mittelwert um 1,2°C verantwortlich war. Im Jahr 2007 traten neben sehr hohen Niederschlägen (+ 207 mm) überdurchschnittlich hohe Temperaturen in der ersten Jahreshälfte auf, was besonders die Entwicklung von Mais als Hauptfrucht förderte und sich in Ertragsvorteilen gegenüber dem Jahr 2006 von fast 5 t TM ha⁻¹ äußerte. Die Ertragssteigerungen von Mais in der HFN gegenüber dem Jahr 2006 waren nicht auf höhere tägliche Zuwachsraten, sondern auf eine längere Vegetationsdauer zurück zu führen. Hiervon profitierten auch die Erstkulturen, was sich ebenfalls in höheren Erträgen widerspiegelte (**Tab. 31**). In der zweiten Jahreshälfte des Jahres 2007 herrschten deutlich kühlere Temperaturen als im Jahr 2006. Dies führte besonders bei der Zweitkultur Mais, aber auch bei Sonnenblumen zu starken Ertragseinbußen. Die C₄-Pflanze Mais reagiert auf kühle Temperaturen mit einem stark verzögerten Wachstum, während sich C₃-Pflanzen wie Sonnenblumen durch eine Verminderung des Spross/Wurzelverhältnisses besser an kühle Temperaturen anpassen können (PRITCHARD ET AL. 1990, ENGELS 1993a, WILSON ET AL. 1995). Hierfür sprechen die stark verminderten täglichen Zuwachsraten von Mais als Zweitkultur, während Sonnenblumen in beiden Anbausystemen annähernd identische Zuwachsraten aufwiesen (vgl. **Abb. 26**). Niedrige Bodentemperaturen reduzieren das Wurzelwachstum und die Nährstoffaufnahme der C₄-Pflanze Mais, was das Sprosswachstum durch den induzierten Nährstoffmangel vermindern kann (MACKAY & BARBER 1984, ENGELS & MARSCHNER 1992, ENGELS & MARSCHNER 1996). Die Temperatursummen

von Mais und Sonnenblumen als Zweitkulturen lagen im Jahr 2007 bei etwa 1200°C d und damit 20% und 15% unter den Temperatursummen der HFN (vgl. **Abb. 13**). Dies war auch für die geringeren Reifegrade der Zweitkulturen zur Ernte verantwortlich, die die Siloreife nicht erreichten (vgl. **Tab. 20**) und deren TS-Gehalte mit 21% (Mais) und 19% (Sonnenblumen) ebenfalls zu gering ausfielen (vgl. **Abb. 35**). Die Hauptfrucht Mais erreichte im Mittel der Standorte einen deutlich höheren TS-Gehalt von 28%, während der TS-Gehalt von Sonnenblumen in der HFN mit 21% lediglich geringfügig höher ausfiel als in der ZKN. Dies steht im Einklang mit Ergebnissen von TOLLENAAR ET AL. (1992), die bei Mais nach WR ebenfalls geringere TS-Gehalte als bei Mais in einer HFN ermittelten. Die Erträge von Mais in der ZKN lagen im Jahr 2007 daher deutlich unter den Erträgen der HFN, wobei dies nicht auf eine Verkürzung der Vegetationsdauer, sondern auf niedrigere tägliche Zuwachsraten zurück zu führen war (vgl. **Abb. 22**). Die Sonnenblumen in der ZKN wiesen aufgrund ihres geringeren Temperaturanspruches, der schnelleren Abreife sowie des hohen Wasserbedarfs (WARREN-WILSON 1966, HUGGER 1989) in dem feuchten, kühlen Jahr 2007 nahezu identische tägliche Zuwachsraten wie in der HFN auf (vgl. **Abb. 26**). Der Ertrag von Sonnenblumen in der ZKN lag daher lediglich 20% niedriger als in der HFN, während Mais als Zweitkultur einen um 42% geringeren Ertrag erzielte als in der HFN. Als weiterer Grund für die geringeren Ertragsunterschiede von Sonnenblumen zwischen den beiden Anbausystemen kann im Jahr 2007 die Beeinträchtigung der Hauptkulturen durch Staunässe angesehen werden. Die Niederschläge während der Vegetation von Sonnenblumen lagen im Jahr 2007 in beiden Anbausystemen etwa 200 mm höher als in den anderen Versuchsjahren (vgl. **Abb. 13**). Aufgrund der überdurchschnittlich hohen Niederschlägen im Mai 2007 (vgl. **Abb. 9**, **Abb. 10**) trat vor allem auf schweren und kalten Böden Staunässe auf, worauf Sonnenblumen besonders empfindlich reagieren (DIEPENBROCK 1987, HUGGER 1989). Dies äußerte sich besonders auf Standorten mit schweren Böden (*Haus Düsse, Straubing, Witzenhausen*) durch Ertragsdepressionen in der HFN, während auf leichten Böden (*Gülzow, Werlte*) im Jahr 2007 die höchsten

Sonnenblumenenerträge der drei Versuchsjahre erzielt wurden (vgl. **Abb. 28**). Die Sonnenblumen der ZKN wurden durch den Wasserentzug der Erstkulturen sowie durch die spätere Saat nach der Periode der hohen Niederschläge weniger durch Staunässe geschädigt als die Sonnenblumen der HFN. Daher ergab sich im Jahr 2007 beim Anbau von WR und Sonnenblumen in der ZKN ein signifikanter Ertragsvorteil von 44% gegenüber dem Jahresertrag von Senf und Sonnenblumen in der HFN. Sonnenblumen benötigen höhere Wassermengen als Mais, was die Wasserversorgung bzw. -speicherung oft zum limitierenden Faktor macht (HUGGER 1989). Dafür spricht auch, dass das pflanzenverfügbare Wasser zur Saat der Zweitkulturen einen signifikant hohen Einfluss auf die Erträge der Sonnenblumen hatte (vgl. **Tab. 16**). Die Niederschlagssumme hatte über alle Jahre und Standorte jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Ertragsbildung von Sonnenblumen, was wohl mit dem hohen Anspruch von Sonnenblumen an die Bodeneigenschaften und der Empfindlichkeit gegenüber Staunässe zusammenhängt (HUGGER 1989). Trotz hoher Ertragseinbuße der Zweitkulturen lagen die Jahreserträge von Mais und Sonnenblumen in der ZKN im Jahr 2007 durch die höheren Erträge der Erstkultur WR auf einem ähnlichen Niveau wie im Vorjahr. Dennoch waren die Jahreserträge von Mais in der ZKN im Jahr 2007 3% geringer als in der HFN, wofür die sehr hohen Erträge der HFN verantwortlich waren. Mais wurde durch Staunässe weniger beeinträchtigt als Sonnenblumen, was auf das Aerenchym zurück zu führen ist, welches die Sauerstoffversorgung der Wurzeln bei Wassersättigung des Bodens sicherstellt (MARSCHNER 1995).

Das dritte Versuchsjahr war 0,9°C wärmer und es fiel 46 mm weniger Niederschlag als im mehrjährigen Mittel. Im Mittel der Standorte lagen zur Aussaat der Zweitkulturen mit 26% der nFK die geringsten Wassergehalte der drei Versuchsjahre vor (vgl. **Abb. 12**). Die hohe durchschnittliche Jahrestemperatur war, wie auch im Jahr 2007, vor allem auf den ungewöhnlich warmen Winter zurück zu führen. Die zweite Jahreshälfte wies ebenfalls unterdurchschnittliche Temperaturen auf, was die Erträge von Mais und Sonnenblumen in der ZKN im Vergleich zur HFN um 44% und 29% verringerte. Die Tempe-

ratursummen der Zweitkulturen lagen auf ähnlich geringen Niveaus wie im Jahr 2007 und damit ebenfalls etwa 20% niedriger als in der HFN (vgl. **Abb. 13**). Dass die Jahreserträge von Mais in der ZKN dennoch 8% höher lagen als in der HFN, war den höheren Erträgen der Erstkultur WR sowie moderaten Erträgen von Mais in der HFN zu verdanken. Dessen Jugendphase wurde durch den niederschlagsarmen Monat Mai verzögert. Noch stärker wurden die Sonnenblumen der HFN durch diesen Trockenstress beeinträchtigt. Besonders in der Jugendphase, die neben ähnlich hohen CO₂-Photosyntheseleistungen wie C₄-Pflanzen laut HUGGER (1989) mit einem sehr hohen Wasserverbrauch einhergeht, reagieren Sonnenblumen sehr empfindlich auf Trockenstress. Die Anlage der Blattprimordien wird gestört, was eine Reduktion der Blattfläche nach sich zieht, die wiederum eng mit dem Ertrag korreliert ist (DIEPENBROCK 1987). Dabei können Sonnenblumen durch Trockenstress in der Jugendphase bis zu 30% weniger Blätter ausbilden (DIEPENBROCK 1987). Die Niederschlagssumme von Sonnenblumen als Hauptfrucht lag im Jahr 2008 mit knapp 260 mm nur unwesentlich höher als die Niederschlagssumme von Sonnenblumen als Zweitkultur (vgl. **Abb. 13**). Besonders deutlich wurde dies auf Böden mit geringer nFK (*Werlte, Gülzow, Straubing*), wo die Ertragseinbußen von Sonnenblumen in der HFN besonders hoch ausfielen (vgl. **Abb. 28**). Die Pflanzen der ZKN wurden erst Anfang Juni und damit nach dem trockenen Monat Mai gesät. In der kühlen zweiten Jahreshälfte wiesen die Sonnenblumen aufgrund des geringeren Temperaturanspruchs auch geringere Ertragseinbuße als der Mais in der HFN auf. Zusammen mit den hohen Erträgen der Erstkultur WR lag der Jahresertrag von WR und Sonnenblumen 46% höher und der von WR und Mais 7% höher als in der HFN.

In beiden Anbausystemen erfolgte der Anbau mittelspäter Sorten, die als Zweitkulturen in den kühlen zweiten Jahreshälften der Jahre 2007 und 2008 Probleme mit der Abreife hatten. Im Hinblick auf eine ausreichende Siloreife empfiehlt sich der Anbau etwas frühreiferer Sorten als Zweitkulturen bzw. der Anbau von Erstkulturen, die früher geerntet werden können. Laut AMLER (2008) sind spät abreifende Maissorten wie die Sorte '*Atletico*' unter Stress und

Trockenheit besonders ertragsinstabil, was wohl zu den starken Ertragseinbußen und hohen Schwankungen der Maiserträge in der ZKN beigetragen hat. Im Mittel der Standorte und Versuchsjahre waren sowohl die Temperaturen im Februar/März als auch im September/Okttober höher als im mehrjährigen Mittel (vgl. **Tab. 14**). Daraus kann gefolgert werden, dass die Vegetationsperioden länger waren als im mehrjährigen Mittel, was im Frühjahr die Entwicklung der Winterungen beschleunigte (2007, 2008) und im Herbst einen langen Biomassezuwachs der Zweitkulturen ermöglichte (2006). Eine lange Vegetationsperiode ist damit eine Voraussetzung für eine erfolgreiche ZKN (FRANCIS 1989), wobei aus den eigenen Ergebnissen deutlich wird, dass die Temperaturen der zweiten Jahreshälfte für die ZKN von entscheidender Bedeutung sind.

Die Pflanzen der ZKN wiesen in den eigenen Untersuchungen aufgrund der späteren Aussaat geringere Pflanzengrößen zur Ernte auf als die Hauptkulturen. Nach LEWIS & PHILLIPS (1983) eröffnet dies die Möglichkeiten höherer Bestandesdichten und damit höherer Flächenerträge.

Standortbedingungen für eine ZKN

In **Tab. 32** sind die Jahreserträge von Mais und Sonnenblumen auf den einzelnen Standorten zusammengestellt. Die Standorte sind nach der Höhe der Erträge von Mais in der HFN sortiert. Die Jahreserträge von WR und Mais in der ZKN lagen im Mittel der Standorte mit 23,6 t TM ha⁻¹ 10% höher als in der HFN. Dies stimmt gut mit den Ergebnissen von OKOLI ET AL. (1984), TOLLENAAR ET AL. (1992) sowie GRIGNANI ET AL. (2007) überein. Letztere führten 11-jährigen Feldversuche in Norditalien durch, in denen sie in einer ZKN mit Weidelgras als Erstkultur und Silomais als Zweitkultur mittlere TM-Erträge von über 25 t ha⁻¹ ernteten, was ebenfalls einer Ertragssteigerung gegenüber einer HFN von 10% entsprach. KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) zeigten, dass die ZKN auf einem fruchtbaren Standort hochproduktiv ist, was durch die hohen Jahreserträge an Standorten mit guten Wachstumsbedingungen (*Straubing, Haus Düsse, Witzenhausen*) bestätigt wird. Aus wirtschaftlicher Sicht ist jedoch entscheidend, wie hoch die Ertragssteigerung

gen durch die ZKN im Vergleich zur HFN sind. Die phänologischen Entwicklungen von Mais als Zweitkultur gingen zwischen den Standorten im Gegensatz zur HFN stark auseinander (vgl. **Abb. 18**), was zu Unterschieden der Jahreserträge von HFN und ZKN zwischen den Standorten beitrug.

Tab. 32: Übersicht über die Jahreserträge von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweitkultur-Nutzung (ZKN) an den sieben Standorten.

	Mais			Sonnenblumen		
	HFN [t TM ha ⁻¹]	ZKN [t TM ha ⁻¹]	Ertrags- steigerung durch ZKN	HFN [t TM ha ⁻¹]	ZKN [t TM ha ⁻¹]	Ertrags- steigerung durch ZKN
Straubing	27,0	27,1	+ 0,3% (n.s.)	19,3	21,4	+ 10,8% (n.s.)
H. Düsse	24,8	27,0	+ 8,9% (n.s.)	16,4	22,3	+ 35,8% (s.)
Witzenh.	23,2	24,2	+ 4,4% (n.s.)	15,0	20,5	+ 36,9% (s.)
Rauisch.	21,1	23,1	+ 9,1% (n.s.)	16,3	21,3	+ 30,7% (n.s.)
Werlte	19,4	20,4	+ 5,4% (n.s.)	11,0	16,9	+ 53,4% (s.)
Dornburg	17,6	21,1	+ 20,2% (s.)	12,9	19,1	+ 48,5% (s.)
Gülzow	17,4	22,0	+ 26,2% (s.)	12,1	20,7	+ 71,3% (s.)
Ø	21,5	23,6	+ 10% (n.s.)	14,7	20,3	+ 38 (s.)

s.: signifikant n.s.: nicht signifikant ($\alpha = 0,05$)

Die Ertragsvorteile der ZKN fielen durch den Anbau von Mais in der ZKN an den Standorten *Straubing*, *Haus Düsse*, *Witzenhausen*, *Rauischholzhausen* und *Werlte* mit Werten zwischen 0,1 und 2,2 t TM ha⁻¹ a⁻¹ relativ gering aus und lagen unter der mittleren Steigerung von 10%. Mit Ausnahme des Standortes *Werlte* handelt es sich hierbei um die Standorte mit den besten Wachstumsbedingungen. Eine weitere Gemeinsamkeit dieser Standorte liegt in den relativ geringen Ertragspotenzialen der Winterungen gegenüber den Sommerungen (vgl. **Abb. 17**). So konnte am Standort *Straubing* im Mittel der Versuchsjahre durch die ZKN mit Mais kein zusätzlicher Jahresertrag erwirtschaftet werden, was auf die sehr hohen Erträge von Mais in der HFN zurück zu führen ist. Dieser profitierte von der hohen Einstrahlung (vgl. **Tab. 3**), während das Wachstum von Mais als Zweitkultur durch die relativ kurze Vegetationsperiode (vgl. **Tab. 13**) mit kürzer werdenden Tagen im Herbst terminiert wurde. Dies wurde auch an den Unterschieden der Temperatursummen am

Standort *Straubing* deutlich, welche bei Mais in der ZKN 20% niedriger lagen als in der HFN (vgl. **Abb. 13**). In *Straubing* lagen in der HFN die Maiserträge im Mittel knapp 8 t TM ha⁻¹ über den WR-Energieerträgen, was das sehr geringe Ertragspotenzial der Winterungen verdeutlicht (vgl. **Abb. 17**). Verantwortlich hierfür ist wohl die unter den Standorten im Mittel der Versuchsjahre kürzeste Vegetationsperiode in *Straubing* von 206 Tagen (vgl. **Tab. 13**). Durch die lange Vegetationsruhe wurde das Wachstum der Erstkulturen im Frühjahr stark verzögert. Daher konnte in der ZKN die Ertragsdepression von Mais hier nicht durch die Erträge der Erstkulturen kompensiert werden, welche lediglich mit 32% am Jahresertrag beteiligt waren.

Die Sonnenblumenerträge lagen auf einem generell geringeren Niveau als die Erträge von Mais. Lediglich an den Standorten *Rauischholzhausen*, *Dornburg* und *Gülzow* lagen die Jahreserträge von Sonnenblumen in der ZKN höher als die Erträge von Mais als Hauptfrucht. Durch den Anbau von Sonnenblumen in der ZKN wurde im Vergleich zur HFN eine signifikante Ertragssteigerung der Jahreserträge von 38% erzielt. Die hohen prozentualen Ertragssteigerungen ergaben sich zumindest teilweise durch das geringere Ertragspotenzial von Sonnenblumen, wodurch in der ZKN die zusätzlichen Erträge der Erstkulturen höher ins Gewicht fielen. Dies rief eine Erhöhung und ein Angleichen der prozentualen Steigerungen durch die ZKN hervor. Besonders deutlich fiel dies an den Standorten mit geringen Niederschlägen (*Dornburg*, *Gülzow*), bzw. mit schlechter Wasserspeicherkapazität des Bodens (*Werlte*) und damit sehr geringen Sonnenblumenerträgen in beiden Anbausystemen aus. Hier sind die hohen Ertragssteigerungen durch die ZKN hauptsächlich auf den hohen Anteil der Erstkulturen am Jahresertrag zurück zu führen. Dennoch wurden die Erträge von Sonnenblumen als Zweitkulturen durch die kühlen spätsommerlichen Witterungen der letzten beiden Versuchsjahre weniger stark beeinträchtigt als die Maiserträge, was mit den geringeren Wärmeansprüchen sowie der kürzeren Vegetationszeit von Sonnenblumen zusammenhängt. Laut HUGGER (1989) wird die Seneszenz von Sonnenblumen durch hohe sommerliche Temperaturen gefördert, was mit Ertragseinbußen einher-

geht. Dies betrifft die früher ausgesäten Hauptkulturen stärker als die Zweitkulturen. Sonnenblumen eignen sich daher besonders auf Standorten mit kühlen sommerlichen Bedingungen, guter Drainierung, ausreichenden Niederschlägen und relativ früh endender Vegetationsperiode wie *Straubing* und *Witzenhausen*. In der ZKN ist die Gefahr von Staunässe durch die spätere Saat und den Wasserentzug der Erstkulturen vermindert, was den Anbau von Sonnenblumen als Zweitkulturen auf schwereren Böden eher ermöglicht als in der HFN. Ein weiterer Grund für eine Verzerrung der Sonnenblumenerträge zwischen HFN und ZKN dürfte der auf vielen Standorten aufgetretene Vogelfraß sein, der besonders die in der Entwicklung weiter fortgeschrittenen Sonnenblumen der HFN betraf.

Die Entwicklung von WR als Erstkultur war auf allen Standorten annähernd identisch und die Unterschiede der Erntereifegrade beruhten hauptsächlich auf den verschiedenen Ernteterminen (vgl. **Abb. 18**). Da die Winterungen in der ZKN einen höheren Stellenwert als in der HFN ausmachen (siehe **4.1.2**), werden Standorte mit relativ hohen Erträgen der Winterungen (*Dornburg*, *Gülzow*) bevorteilt, was zu hohen Ertragssteigerungen der ZKN führte. Hier konnten durch den Anbau von Mais in der ZKN die signifikant höchsten Ertragssteigerungen der Jahreserträge von 3,5 (+ 20%) und 4,6 t TM ha⁻¹ a⁻¹ (+ 26%) erzielt werden, obwohl sich diese Standorte sowohl im mehrjährigen Mittel als auch in den Versuchsjahren durch die geringsten Niederschläge auszeichneten. Auch die Bodenwassergehalte zur Saat der Zweitkulturen waren in *Dornburg* und *Gülzow* mit mittleren Werten < 20% der nFK sehr gering (vgl. **Abb. 11**). Dies steht im Widerspruch zu den Ergebnissen von LÖPMEIER (2007), wonach eine ZKN in Regionen mit geringen Niederschlägen ausgeschlossen werden kann. Am Standort *Dornburg* war die Wasserversorgung für den Mais in beiden Anbausystemen ertragsbeschränkend, was an dem Ertragsvorteil des feuchten Jahres 2007 gegenüber des warmen, trockenen Jahres 2006 deutlich wurde. Waren auf diesen Standorten (*Dornburg*, *Gülzow*) sowohl die Temperaturen als auch die Niederschläge gering wie im Jahr 2008, so resultierten daraus starke Ertragseinbuße von Mais als Zweitkultur (vgl.

Abb. 24). Der Vorteil der ZKN gegenüber der HFN mit Zwischenfrüchten ist auf diesen Standorten hauptsächlich auf die bessere Nutzung der winterlichen Niederschläge durch die Erstkultur zurück zu führen. Eine weitere Besonderheit dieser Standorte ist die besonders im Frühjahr auftretende Trockenheit (vgl. mehrjährige Witterungsdaten in **Abb. 9**), welche die Sommerungen der HFN in der empfindlichen Jugendphase beeinträchtigt, während die Aussaat der Zweitkulturen erst später erfolgte. Die Vermutung von FRANCIS (1989) sowie GRAß & SCHEFFER (2003), dass die ZKN lediglich auf Standorten mit guter Wasserversorgung produktiv ist, kann daher durch die eigenen Untersuchungen nicht bestätigt bzw. muss differenziert betrachtet werden, da sich die Wasserversorgung aus der Niederschlagsverteilung und der Fähigkeit des Bodens zur Wasserspeicherung zusammensetzt. Die **Arbeitshypothese Nr. 2** »Die ZKN ist der HFN lediglich auf Standorten mit hohen Niederschlägen und guten Wasserspeichervermögen des Bodens überlegen« kann also nicht bestätigt werden. Vielmehr verhielt es sich auf sommertrockenen Standorten mit relativ hohen Erträgen der Winterungen genau umgekehrt. Auch der geringe Ertragsvorteil der ZKN in dem niederschlagreichen Jahr 2007 deutet auf eine untergeordnete Rolle der Niederschläge beim Vergleich der Anbausysteme hin. Zudem war die Ertragssteigerung von Mais in der ZKN an dem Standort mit den höchsten Niederschlägen (*Werlte*) mit 5% gering, was mit der ungleichmäßigen Niederschlagsverteilung und der mangelhaften Wasser- und damit Nährstoffspeicherkapazität des Bodens zusammenhängt. Dies ist besonders vor dem Hintergrund der restriktiv durchgeführten Düngergabe von Bedeutung, da Mais einen sehr hohen Nährstoffbedarf aufweist (KAUTER ET AL. 2004) und sich Sonnenblumen durch einen hohen K-Bedarf auszeichnen. Der Einfluss der Nährstoffversorgung ist in der ZKN durch die hohen Entzüge von bedeutendem Einfluss und wird in Kapitel 4.2 diskutiert. Auch das pflanzenverfügbare Wasser zur Aussaat der Zweitkulturen lag in *Werlte* in allen drei Jahren unter 50% der nFK und damit tiefer als zur Aussaat der Hauptfrüchte (vgl. **Abb. 12**). Zusätzlich waren die Temperatursummen von Mais als Zweitkultur um 300°C und damit 20% niedriger als in der HFN, was

dem höchsten Rückgang unter den Standorten entsprach (vgl. **Abb. 13**). Bei Mais als Zweitkultur hatte die Temperatursumme einen größeren Einfluss auf die Ertragsbildung als die Niederschlagssumme (vgl. **Tab. 16**). Aufgrund der niedrigen Ertragsanteile der Erstkulturen am Standort *Werlte* (vgl. **Abb. 17**), konnten diese die hohen Ertragsausfälle von Mais nicht wie an den Standorten *Gülzow* und *Dornburg* kompensieren. Nichtsdestotrotz ist die ZKN auf Standorten mit schlechten Bodeneigenschaften trotz relativ geringer Ertragssteigerungen empfehlenswert, da nicht speicherbare Faktoren wie Einstrahlung, Wärme und Niederschläge durch den Anbau von Winterungen und Sommerungen in einem Jahr effektiver genutzt und damit Risiken vermindert werden (FRANCIS 1989). Durch die ZKN werden je nach Textur kurzfristig im Boden gespeicherte Niederschläge und Nährstoffe in größerem Umfang und über eine längere Periode genutzt, was neben höheren Biomasseerträgen potenzielle Verluste minimiert (vgl. **4.5.3**). Dies ist gerade auf Standorten mit unregelmäßigen Niederschlägen oder mangelhaften Speicherkapazitäten des Bodens wichtig, wo multiple Anbausysteme die gesamten Ressourcen besser nutzen und damit eine kontinuierliche Produktion sicherstellen (ANDREWS & KASSAM 1983). Auf solchen Standorten kommt der Ertragssicherheit, die durch die ZKN erhöht wird (vgl. **4.1.2**), eine größere Bedeutung zu. So werden in China schon lange ZKN genutzt, um die Nahrungsmittelproduktion auf kargen Standorten zu erhöhen (XIAN & LIN 1985). Dies ist besonders auf die hohe Nutzung der Strahlung durch WR in den Monaten April/Mai zurück zu führen, während Mais als Hauptfrucht aufgrund der kühlen Temperaturen und der geringen Blattmasse zu dieser Zeit deutlich weniger Strahlung nutzen kann (TOLLENAAR ET AL. 1992). Durch eine größere Strahlungssumme ist das Potenzial für höhere Erträge gegeben (FRANCIS 1989). Dies wird auch in den Ergebnissen von CRABTREE ET AL. (1990) deutlich, bei denen die Jahreserträge auch bei kontinuierlicher ZKN höher waren als die einer HFN, was diese auf eine effizientere Nutzung der Produktionsfaktoren Klima, Land, Arbeit und Maschinenausstattung zurückführten. Aber auch bei einer Erhöhung der Kosten für Arbeit, Land, Dünger etc., lohnt es sich zunehmend diese effektiver zu nutzen (ANDREWS & KASSAM 1983, LEWIS & PHILLIPS 1983).

Sind die Temperaturen bei einer langen Vegetationsperiode ausreichend hoch, steigt der Einfluss der Wasserversorgung auf den Ertrag. Langzeitstudien über 12 Jahre von CRABTREE ET AL. (1990) in Oklahoma (USA) belegen, dass die Zweitkulturen einer ZKN bei ausreichenden Temperaturen und Niederschlägen annähernd so ertragsstark sind wie Hauptfrüchte. Trockenstress kann durch die ungleichmäßige Verteilung der Niederschläge, wie sie in den drei Versuchsjahren vorlagen, sowohl die Sommerungen der HFN als auch der ZKN in kritischen Phasen des Wachstums treffen, wobei zum einen eine gute Wasserspeicherkapazität direkt und zum anderen die Erträge der Erstkulturen indirekt puffernd wirken können. Diese beanspruchen natürlich zusätzlich die Wasservorräte, nutzen aber andererseits auch Niederschläge, die andernfalls vielleicht ungenutzt versickert wären und setzen diese in Ertrag um. Dies gilt in besonderem Maße für Standorte mit leichten Böden. Und auch in der HFN wird durch die Zwischenfrucht der Bodenwasserhaushalt beansprucht, was laut MCVAY (2006) ebenfalls Trockenstress in der Folgefrucht hervorrufen kann. Der Einfluss der ZKN auf den Grundwasserspiegel sowie das Ertragspotenzial auf Standorten mit Beregnung liegen derzeit noch keine Ergebnisse vor.

Mais als Hauptfrucht wurde bereits Mitte September geerntet, während die Zweitkulturen erst einen Monat später geerntet wurden. Dadurch konnten diese die Vegetationsperiode besser ausschöpfen. Allerdings besteht bei den Zweitkulturen durch die verzögerte Abreife die Gefahr von Frostschäden, wobei Temperaturen $< - 2^{\circ}\text{C}$ vor dem Erreichen des optimalen TS-Gehaltes den Maisanbau beschränken (LÖPMEIER 2007). Dies kann bei einem Anbau von spätreifen Sorten als Zweitkulturen besonders auf Standorten mit kurzen Vegetationsperioden (*Straubing, Dornburg, Witzenhausen*) zu Problemen führen. Sonnenblumen sind aufgrund der schnelleren Abreife sowie der höheren Toleranz gegenüber kühlen Temperaturen eher für Standorte mit kühler Witterung, guter Drainierung sowie ausreichenden Niederschlägen geeignet.

4.1.2 Die Bedeutung der winterannuellen Kulturen für die Zweikultur-Nutzung

Innerhalb der HFN fielen die Erträge von Mais durchschnittlich 33% höher aus als die Erträge des Grünroggens (WR-Energie). Aufgrund des höheren Ertragspotenzials werden in der landwirtschaftlichen Praxis für die Energiepflanzenproduktion Winterungen durch Sommerungen, hauptsächlich Mais, ersetzt. Dieser Mehrertrag des Mais war in den eigenen Ergebnissen jedoch stark von der Witterung abhängig und schwankte im Mittel der Standorte zwischen den Jahren von 3 bis 9 t TM ha⁻¹ (vgl. **Abb. 16**). Die Ertragsverhältnisse von Winterungen und Sommerungen waren neben der Witterung in hohem Maße standortabhängig und stimmten gut mit den Angaben der Projektpartner zu durchschnittlichen Erträgen auf den jeweiligen Standorten überein. Die Standorte *Dornburg* und *Gülzow* zeichneten sich durch relativ hohe Erträge der Winterungen, während die Standorte *Haus Düsse* und *Straubing* ihren Schwerpunkt bei den Sommerungen hatten (vgl. **Tab. 5**). Auf Standorten mit Sommertrockenheit und damit schlechteren Wachstumsbedingungen waren die Roggenerträge annähernd so hoch wie die Maiserträge. So lagen im Jahr 2006 die Erträge von Mais und WR-Energie in *Dornburg* in der HFN auf gleichem Niveau. Im Jahr 2008 waren die WR-Energie-Erträge in *Dornburg* und *Gülzow* sogar 5 und 3 t TM ha⁻¹ höher als die Maiserträge. Auf diesen Standorten stellt Roggen damit eine klare Alternative zu Mais dar und sollte ein fester Bestandteil von Energiefruchtfolgen sein. An dem Standort mit den niedrigsten Bodenpunkten (*Werlte*) waren in der HFN die Erträge von Mais 48% höher als die Roggenerträge. An den Standorten mit guten Wachstumsbedingungen (*Witzenhausen*, *Haus Düsse*, *Straubing*) waren die Ertragsvorteile von Mais gegenüber Roggen in der HFN mit 53%, 51% und 50% sehr ausgeprägt. Der Standort *Rauischholzhausen* zeichnete sich durch 18% höhere Maiserträge aus und in *Gülzow* lagen die Maiserträge um 17% höher, während die Erträge von WR-Energie und Mais in *Dornburg* im Mittel der Jahre identisch ausfielen.

In der ZKN war die gleiche Rangfolge der Standorte bezüglich der Ertragsanteile von Winterungen und Sommerungen identisch wie in der HFN (vgl. **Abb. 16**, **Abb. 17**). Da in der ZKN die Vegetationsdauer der Erst- und Zweitkulturen kürzer ist als in der HFN, verschoben sich die Ertragsverhältnisse von Winterungen und Sommerungen. Während der Mais in der HFN im Mittel der Standorte 33% höhere Erträge aufwies als die Winterung WR, war in der ZKN der Ertrag der Zweitkultur Mais lediglich 25% höher als der Ertrag der Erstkultur WR. Der mittlere Ertragsanteil von WR am Jahresertrag lag bei 49%. Dies erzeugt einen Vorteil für einen erfolgreichen Anbau der ZKN auf Standorten mit hohem Ertragspotenzial der Winterungen (*Dornburg, Gülzow*) und ist auch für die Ertragssicherheit von Bedeutung, da die Erträge der Winterungen geringeren Schwankungen unterworfen waren als die der Sommerungen (vgl. **Tab. 25**). Hierfür konnten extreme sommerliche Bedingungen wie Trockenheit (2006) oder kühle Temperaturen in der zweiten Jahreshälfte verantwortlich gemacht werden (2007, 2008). Neben geringeren Erträgen von Mais als Zweitkultur war auch die Schwankungsbreite mit 29% fast doppelt so hoch wie in der HFN, während WR in beiden Anbausystemen identische (15%) und Sonnenblumen sogar 3% geringere Variabilitäten in der ZKN aufwiesen (vgl. **Tab. 25**). Hierbei schwankten die Erträge der wärmebedürftigen C₄-Pflanzen Mais, Sorghum und Sudangras besonders stark. Aufgrund des hohen Ertragsanteils tragen die Winterungen in der ZKN zu einer erhöhten Ertragstabilität bei, was besonders an Standorten mit unsicheren sommerlichen Bedingungen (*Dornburg, Gülzow*) bedeutsam ist. In der ZKN kann daher von einer höheren Ertragssicherheit ausgegangen werden (vgl. **Tab. 25**), was die **Arbeitshypothese Nr. 3 »Die ZKN erhöht an Standorten mit ungünstigen Wachstumsbedingungen die Ertragssicherheit«** bestätigt. Die hohen Schwankungen der Erträge der Zweitkulturen wurden durch die Erstkulturen ausgeglichen und führten damit zu relativ stabilen Jahreserträgen der ZKN (vgl. **Tab. 25**, **Tab. 32**). Besonders deutlich wurde dies am Standort mit den schlechtesten Wachstumsbedingungen (*Werlte*), wo die Ertragsschwankungen von WR und Mais in der HFN bei 29% und 16% lagen, die Jahreserträge der ZKN mit Schwankungen von lediglich 9% jedoch deutlich stabiler ausfielen.

Dass die schlechten Standorteigenschaften am Standort *Werlte* besonders problematisch für den Anbau von Sonnenblumen in der ZKN waren, zeigte sich neben geringen mittleren Erträgen ebenfalls an hohen Ertragsschwankungen (vgl. **Tab. 25**). Trotzdem wiesen Sonnenblumen im Vergleich zu Mais als Zweitkultur generell geringere Ertragsschwankungen auf, was auf das geringere Ertragspotenzial sowie die geringere Empfindlichkeit gegenüber kühleren Temperaturen zurück zu führen ist. Auf Standorten mit unsicheren sommerlichen Bedingungen und guten Bodeneigenschaften (*Dornburg*), kann durch den Anbau eines Mais/Sonnenblumen-Gemenges als Zweitkultur die Ertragssicherheit erhöht und zusätzlich ein Ertragsgewinn erwirtschaftet werden (vgl. **Tab. 24** bzw. **4.1.3**).

Bei der Wahl der Erstkultur ist neben hohen Erträgen mit ausreichend hohen TS-Gehalten eine gute Unkrautunterdrückung wichtig. Des Weiteren sollte die Erstkultur möglichst früh den Siloreifegrad erreichen, um der Zweitkultur genügend Vegetationszeit zu lassen. WRü erwiesen sich hierbei in vielerlei Hinsicht als ungenügend. Neben geringeren Erträgen (vgl. **Tab. 18**), geringeren TS-Gehalten (vgl. **Abb. 35**) und höheren N-Gehalten (vgl. **Abb. 52**) zeichneten sich die Varianten mit WRü als Erstkultur durch höhere N_{\min} -Werte (vgl. **Abb. 45**) nach der Ernte sowie N-Salden (vgl. **Abb. 57**) aus. Zudem traten massive Probleme mit Auswuchsrüben auf, was mechanisch nur durch eine verspätete Saat der Zweitkulturen zu lösen gewesen wäre. Allerdings verfügten WRü über eine hervorragende Unkrautunterdrückung. Durch die geringe Ertragsleistung entzogen WRü im Mittel 41 kg N ha^{-1} weniger Stickstoff als ihnen mit der Düngung zugeführt wurde, während die N-Entzüge von WR, WR/WE und WR/WG zwischen 21 und 65 kg höher lagen als die N-Düngermenge (vgl. **Tab. 28**). Hier kann die Ursache für die etwas höheren Erträge der Zweitkulturen nach WRü gesehen werden. Durch die schwache Ertragsleistung der WRü fielen die Jahreserträge dieser Varianten jedoch niedriger aus als die Erträge mit WR, WR/WE bzw. WR/WG als Erstkulturen.

WR ist durch die Anspruchslosigkeit, hohe Erträge und sehr gute Unkrautunterdrückung als Erstkultur besonders geeignet, was auch die Ergebnisse von

HELSEL & WEDIN (1981) zeigten. Grundlegende Probleme sind hierbei der hohe Wasserverbrauch, eine gegebenenfalls verspätete Ernte sowie die geringe Zeitspanne zur Bereitung eines guten Saatbettes für die Zweitkultur (HELSEL & WEDIN 1981). BARNES & PUTNAM (1983) weisen des Weiteren auf allelopathische Effekte der Wurzel und Erntereste von WR hin. Laut PUTNAM ET AL. (1983) ist die Keimungshemmung geringer, je größer die Samen der Folgefrüchte sind, so dass großsamige Pflanzen wie Mais und Sonnenblumen hierdurch nicht beeinträchtigt werden. Dem Landwirt bleibt bei unzureichenden Bedingungen die Möglichkeit, von der ZKN in die HFN zu wechseln, indem die Erstkultur später geerntet wird und als Energie- bzw. Brotroggen Verwendung findet. Hierfür sind jedoch ausreichend standfeste Sorten nötig. Die in den eigenen Versuchen als Erstkultur verwendete Sorte 'Vitallo' ist hierfür ungeeignet. Der Anbau von Winterungen als Erstkulturen ist auch mit ökologischen Vorteilen verbunden, die im Folgenden diskutiert werden (vgl. 4.5).

Bei den Energieerträgen von Mais und Sonnenblumen in der ZKN zeichnete sich das gleiche Bild wie bei den Erträgen ab. Im Mittel der Standorte und Jahre lagen die Energieerträge von Mais und Sonnenblumen in der ZKN um 49% höher als die Energieerträge der Winterungen und um 33% höher als die Sommerungen der HFN, wobei hier die Zwischenfrüchte der HFN nicht berücksichtigt wurden (vgl. Abb. 40).

4.1.3 Mischkulturen in der Zweikultur-Nutzung

WR/WE und WR/WG-Gemenge

Ein Gemengeanbau nutzt Wachstumsfaktoren effizienter als Monokulturen, wobei sich komplementäre Effekte aus räumlichen und zeitlichen Dimensionen zusammensetzen können (ANDREWS 1972, WILLEY 1979, KARLEN ET AL. 1994, FRANCIS 1989, KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000). In der ZKN besteht die Möglichkeit, Gemenge als Erst- oder Zweitkulturen anzubauen. Das als Erstkultur eingesetzte Gemenge aus WR und WE erreichte

im Mittel der Standorte und Jahre einen TM-Ertrag von 10,1 t TM ha⁻¹ und lag damit etwas unter dem Ertrag von WR in Reinsaat (10,5 t TM ha⁻¹) sowie WR/WG (10,8 t TM ha⁻¹). Im Mittel der Jahre und Standorte lagen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Erträgen der Erstkulturen vor (vgl. **Tab. 18**). Da WE und WG nicht in Reinsaat angebaut wurden, konnte der »Land Equivalent Ratio« (LER) für die beiden Erstkultur-Gemenge nicht ermittelt werden. In Untersuchungen von KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) lag der LER eines WR/WE-Gemenges als Erstkultur zwischen 1,1 und 1,3, was einer Effizienzsteigerung im Vergleich zur Reinsaat von WR und WE zwischen 10% und 30% entspricht. Die höhere Effektivität dieses Mischbaus führten KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) auf die N-Fixierungsleistung der WE sowie die Stützfunktion des WR zurück, was eine Verschmutzung des Erntegutes vermindert. Durch die höheren Wasserentzüge von WR werden die WE zusätzlich vor Staunässeschäden geschützt, worauf diese empfindlich reagieren (GEISLER 1988). WE benötigen mittelschwere Böden und eine stetige Wasserversorgung sowie einen pH-Wert über 6,5, was den Anbau in vielen Regionen erschwert (GEISLER 1988). Die mangelhafte Winterhärte (*Straubing*), unzureichende Niederschläge (*Dornburg*) bzw. zu geringe pH-Werte (*Werlte*) sind wohl als Gründe für die sehr geringen Ertragsanteile und damit N-Fixierungsleistungen der WE im Gemenge mit WR zu sehen (vgl. **Tab. 21**).

Das WR/WG-Gemenge erzielte im Mittel der Standorte die höchsten Erträge unter den Erstkulturen, wobei lediglich im Vergleich zu den WRü ein signifikanter Unterschied auszumachen war. Neben den hohen Erträgen zeichnete sich das WR/WG-Gemenge durch die höchsten TS-Gehalte zur Ernte aus (vgl. **Abb. 35**), was der physiologisch reiferen WG zuzuschreiben war (vgl. **Tab. 17**). Dadurch traten in den Zweitkulturen jedoch oft Probleme mit Auswuchs der WG auf. Da die WR-Sorte 'Vitallo' teilweise Bestandeshöhen von 2 m erreichte, traten oft Lager und damit Ernteprobleme sowie Verunreinigungen auf. Durch die niedrigere Wuchshöhe konnte die WG hier erfolgreich eine Stützfunktion einnehmen. Neben unterschiedlichen Ansprüchen an begrenzte Ressourcen, können sich Gemengepartner also auch aktiv gegenseitig

(unter)stützen (ANDREWS & KASSAM 1983). Gemenge als Erstkulturen erreichen laut KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) höhere Erträge sowie eine größere Ertragsstabilität. In den eigenen Ergebnissen wurden jedoch keine Unterschiede zwischen den Ertragsschwankungen von WR in Reinsaat und den WR/WE bzw. WR/WG-Gemenge beobachtet. Gemenge sind generell erfolgreicher als Reinsaaten, wenn die Summe der interspezifischen Konkurrenz geringer ist als die Summe der intraspezifischen Konkurrenz (ANDREWS & KASSAM 1983), was wohl für das WR/WG-Gemenge aufgrund verschiedener Entwicklungsgeschwindigkeiten zutrifft. Da es sich bei den WR/WE- und WR/WG-Gemengen um Erstkulturen handelte, ist ihnen auch ein gewisser Vorfruchtwert zuzuschreiben (vgl. 4.3).

Mais-Sonnenblumen-Gemenge

Als Zweitkulturen wurden neben Mais und Sonnenblumen in Reinsaat auch Mais/Sonnenblumen-Gemenge angebaut, wobei die Erträge der Gemenge zwischen den Erträgen der Reinsaaten lagen. Der LER lag im Mittel der Standorte und Jahre bei 1,10, was einer Steigerung der biologischen Effizienz durch den Gemengeanbau von 10% entspricht (vgl. **Tab. 24**). Dies stimmt gut mit Ergebnissen von KHAN ET AL. (1999) überein, die einen LER von 1,15 für Mais und Sonnenblumen, allerdings auf Basis der Kornerträge, ermittelten. Bei der Interpretation des LER wird allerdings vorausgesetzt, dass beide Pflanzenarten benötigt werden (MEAD & WILLEY 1980), was im Energiepflanzenanbau nur bedingt von Bedeutung ist, da der absolute Biomassertrag den entscheidenden Faktor einnimmt. Da die Ertragsschwankungen der wärmebedürftigen C₄-Pflanze Mais in der ZKN sehr hoch waren, Sonnenblumen in der ZKN jedoch geringere Ertragsschwankungen aufwiesen, ging mit dem Gemengeanbau eine generell höhere Ertragssicherheit einher, als bei dem Anbau von Mais in Reinsaat (vgl. **Tab. 25**). Dies ist auf unterschiedliche Ansprüche von Mais und Sonnenblumen bezüglich Wasser und Temperatur zurück zu führen. Herrscht während der empfindlichen Blattanlagephase der Sonnenblumen beispielsweise Trockenstress oder Staunässe, kann dies durch den

Mais ausgeglichen werden. Bei niedrigen sommerlichen Temperaturen, welche das Maiswachstum verzögert, kann die Sonnenblume einen größeren Ertragsanteil beisteuern, wie an den Ergebnissen der letzten beiden Versuchsjahre deutlich wurde (vgl. **Tab. 22**). Daher kann die **Arbeitshypothese Nr. 4 »Der Gemengeanbau von Mais und Sonnenblumen bietet Vorteile gegenüber den Reinsaaten«**, bestätigt werden, wobei die Standorteigenschaften hier eine entscheidende Rolle spielen.

Gemenge können besser auf abiotische, aber auch biotische Faktoren reagieren als Reinsaaten und weisen damit eine höhere biologische Dynamik auf (ANDREWS & KASSAM 1983). Ergebnisse von LI ET AL. (2001) belegen ein höheres Nährstoffaneignungsvermögen von Gemengen, was auf unterschiedliche Wurzelsysteme zurückgeführt werden kann. Während Mais beispielsweise dem Oberboden mehr Wasser entzieht, sind Sonnenblumen in der Lage, Wasser und damit Nährstoffe aus tieferen Bodenschichten zu nutzen (CABELGUENNE & DEBAEKE 1998). Dies ist wohl der Grund für die höchsten LER-Werte an dem Standort *Dornburg*, welcher sich durch geringe Niederschläge, aber relativ gute Bodeneigenschaften auszeichnet. Auch in *Witzenhausen* waren die LER-Werte in allen drei Versuchsjahren > 1 . Hier konnten die Sonnenblumen auf dem tiefgründigen und gut mit Nährstoff versorgten Boden, die durch die kühlen Temperaturen hervorgerufenen Ertragsdepressionen von Mais ausgleichen. Der Standort *Straubing* zeichnete sich in allen drei Versuchsjahren durch LER-Werte < 1 aus, was für einen Nachteil der Gemenge gegenüber den Reinsaaten spricht. Dies ist auf das sehr hohe Ertragspotenzial von Mais zurück zu führen, welches im Gemenge mit den konkurrenzstarken Sonnenblumen erheblich eingeschränkt wurde. Die im Mittel der Standorte gleichen Ertragsanteile von Mais (51%) und Sonnenblumen (49%) erleichtern generell eine gegenseitige Kompensation. Auf 4 der 7 Standorte waren im Mittel über die drei Versuchsjahre jedoch die in Reinsaat ertragsschwächeren Sonnenblumen konkurrenzstärker als der Mais, was generell das Ertragspotenzial von Gemengen vermindert (WILLEY 1985). Dies war hauptsächlich den relativ schlechten Wachstumsbedingungen für den Gemengepartner Mais in

den Jahren 2007 und 2008 zuzuschreiben, wodurch die Sonnenblumen einen größeren Beitrag zum Ertrag leisten konnten (vgl. **Tab. 22**).

4.1.4 Das Potenzial alternativer Zweitkulturen in der Zweikultur-Nutzung

Um die Vielfalt der Kulturpflanzen im Energiepflanzenbau zu erhöhen, bedarf es alternativer Pflanzenarten mit hohen Ertragspotenzialen. Die ZKN bietet hierbei durch die späte Saat der Zweitkulturen die Möglichkeit, wärmebedürftigere Pflanzenarten zu verwenden. So wurden in diesen Versuchen die C₄-Pflanzen Sorghum, Sudangras, Amarant und die C₃-Pflanze Hanf als Zweitkulturen integriert.

Ertragspotenziale von Sorghum als Zweitkultur

Sorghum stammt aus semi-ariden tropischen Gebieten und ist sensibel gegenüber niedrigen Temperaturen im Bereich von 20 bis 0°C (PEACOCK 1982, OSUNA-ORTEGA ET AL. 2003). Bereits bei Temperaturen unter 10 – 15°C kann es zu Kälteschädigungen kommen (PEACOCK 1982, OSUNA-ORTEGA ET AL. 2003), wobei niedrige Temperaturen vor allem die Keimung und den Feldaufbau verzögern (PINTHUS & ROSENBLUM 1961). Daher empfiehlt sich bei Sorghum unter mitteleuropäischen Bedingungen eher eine spätere Aussaat als Zweitkultur.

Sorghum wurde in der ZKN nach WRü, WR und WR/WE-Gemenge angebaut und erreichte bei einem mittleren TS-Gehalt von 21% (vgl. **Abb. 35**) einen durchschnittlichen Ertrag von etwa 9 t TM ha⁻¹. Der durchschnittliche Jahresertrag von WR und Sorghum lag bei 19,6 t TM ha⁻¹ (vgl. **Abb. 33**), was unter den in anderen Untersuchungen ermittelten Erträgen von 23,1 für eine ZKN mit WR und Sorghum (HELSEL & WEDIN 1981) bzw. 23,0 t TM ha⁻¹ mit Triticale und Sorghum lag (HEGGENSTALLER ET AL. 2008). Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den eigenen Ergebnissen um Mittelwerte der Erträge von sieben Standorten mit unterschiedlichen Wachstumsbedingungen

handelt. Die Sorghumerträge unterlagen starken Schwankungen zwischen den Versuchsjahren. Der warme, trockene Sommer im Jahr 2006 lieferte hierbei im Mittel der Standorte nach der Erstkultur WR mit 12,2 t TM ha⁻¹ die höchsten Erträge und einen Jahresertrag von 21,4 t TM ha⁻¹. An Standorten mit guten Bodeneigenschaften, hohen Jahresmitteltemperaturen (vgl. **Abb. 5**) und vor allem ausreichenden Temperatursummen der Zweitkulturen (vgl. **Abb. 13**) (*Haus Düsse, Rauischholzhausen*), konnte Sorghum als Zweitkultur hohe und stabile Erträge erzielen (vgl. **Abb. 33**). In *Haus Düsse* erzielte Sorghum im Jahr 2006 als Zweitkultur nach WR mit 18 t TM ha⁻¹ und einem Jahresertrag von knapp 30 t TM ha⁻¹ die höchsten Erträge und damit knapp 7 t TM ha⁻¹ mehr als Mais und Senf in der HFN (vgl. **Abb. 31**). In *Rauischholzhausen* waren die Sorghumerträge mit über 10 t TM ha⁻¹ in allen drei Versuchsjahren stabil und die Jahreserträge lagen in allen drei Jahren über 20 t TM ha⁻¹. Aber auch am Standort *Straubing*, der sich unter den sieben Standorten durch die höchste Globalstrahlung auszeichnet (vgl. **Tab. 3**), konnte Sorghum hohe Erträge erreichen. Dies zeigt das große Ertragspotenzial von Sorghum, was durch Ergebnisse von HABYARIMANA ET AL. (2004) bestätigt wird. Sie erzielten in Italien im Hauptfruchtanbau Sorghumerträge von 20-29 t TM ha⁻¹, die durch eine Bewässerung sogar auf 33-51 t TM ha⁻¹ anstiegen. Da Sorghum jedoch stark negativ auf niedrige Temperaturen reagiert, erreichte es in den kühlen Sommern der Jahre 2007 und 2008 als Zweitkultur lediglich durchschnittliche Erträge von knapp 8 t TM ha⁻¹ und damit fast 40% geringere Erträge als im Jahr 2006. Dieser Ertragseinbruch war im Jahr 2007 besonders am Standort *Haus Düsse* ausgeprägt, was neben den unzureichenden Temperaturen auf die sehr hohen Niederschläge von Juni bis September (vgl. **Abb. 9**), die auf schlecht dränierten Böden Staunässe hervorriefen, zurück zu führen war. In Untersuchungen von SINGH ET AL. (2002) reagierte Sorghum mit signifikanten Ertragseinbußen auf Staunässe, was vor allem dem hierdurch induzierten N-Mangel zuzuschreiben war. Durch den Anbau als spät gesäte Zweitkultur ist die Gefahr von Schäden durch Staunässe, die meist durch Starkregenfälle im Frühjahr hervorgerufen wird, jedoch geringer als in der HFN. Auch an den Standorten mit geringen Niederschlägen *Dornburg*

und *Gülzow* erreichte Sorghum in dem heißen und trockenen Sommer des Jahres 2006 als Zweitkultur TM-Erträge von über 10 t ha⁻¹, was sich mit den auf diesen Standorten ertragsstarken Winterungen zu Jahreserträgen von knapp 20 t TM ha⁻¹ summierte (vgl. **Abb. 33**). Dieses Ergebnis zeigt, dass durch den Anbau von trockenheitstoleranten C₄-Pflanzen wie Mais, Sorghum oder Sudangras als Zweitkulturen auf Standorten mit Sommertrockenheit hohe Erträge der Zweitkulturen erwirtschaftet werden können. In Untersuchungen von HEGGENSTALLER ET AL. (2008) wurde durch den Anbau von Sorghum in einer ZKN im Vergleich zu einem Hauptfruchtanbau der Jahresertrag um 25% gesteigert. Die hohen Ertragsschwankungen von Sorghum werden in der ZKN durch die Erstkulturen abgepuffert, da diese einen Großteil der Jahreserträge sicherstellen. So liegt in der ZKN auch mit Sorghum eine relativ hohe Ertragsstabilität der Jahreserträge vor.

Erntereifegrade von Sorghum

Durch die verzögerte Entwicklung von Sorghum konnten in den Jahren 2007 und 2008 meist keine Körner ausgebildet werden, was eine ausreichende Siloreife verhinderte. Dies ist vermutlich auf die kühlen Temperaturen zurück zu führen, welche die Entwicklung der generativen Phase verzögern (SINGH 1985). Kühle morgendliche Temperaturen von 8°C können laut OSUNA-ORTEGA ET AL. (2003) bereits eine männliche Sterilität hervorrufen, wobei sowohl die Pollenmenge als auch deren Qualität beeinträchtigt werden. Die beste Erntezeit für Sorghum ist die Teigreife (BBCH 85), wenn TS-Gehalt, Kornfüllung und Verdaulichkeit die optimalen Parameter für eine gute Silage aufweisen (BOLSEN ET AL. 2003). In den eigenen Untersuchungen erlangte Sorghum im Mittel der Standorte und Jahre einen Reifegrad von BBCH 69 (vgl. **Tab. 17**) (Ende Blüte). Im Jahr 2006 waren die Pflanzen bereits in der Kornfüllungsphase (BBCH 76), während im Jahr 2007 und 2008 lediglich BBCH-Stadien von 63 und 73 erreicht wurden. BBCH-Stadien über 80 erreichte Sorghum lediglich im Jahr 2006 an den Standorten *Haus Düsse*, *Straubing* und *Werlte*. Die TS-Gehalte lagen mit 24%, 20% und 21% in den Jahren 2006, 2007

und 2008 (vgl. **Abb. 35**) unterhalb der von ARIAS ET AL. (2008) ermittelten TS-Gehalte von durchschnittlich 33,1% und damit zu gering für eine optimale Silierung. Neben Ertragseinbußen und zu geringen TS-Gehalten vermindert eine Ernte vor der Kornfüllungsphase laut ARIAS ET AL. (2008) auch die Verdaulichkeit, da die Blütenstände von Sorghum mit den gut verdaulichen Körnern die wertvollsten Pflanzenteile darstellen, während die Stängel relativ stark lignifiziert und daher schlechter abbaubar sind (FLARESSO ET AL. 2000).

Züchtung von Sorghum

Gelingt es, die Kältetoleranz von Sorghum züchterisch zu verbessern, so könnten andere Vorteile von Sorghum zur Ausprägung kommen. Besonders der C₄-Photosyntheseweg sowie eine ausgesprochene Trockenheitstoleranz erlauben Sorghum eine effiziente CO₂-Fixierung und damit sehr hohe potenzielle Zuwachsraten (LOOMIS & WILLIAMS 1963, HEICHEL 1976, JERGER ET AL. 1987, LEMAIRE ET AL. 1996). Sorghum erholt sich besser von Trockenstress (BOLSEN ET AL. 2003) und entzieht Wasser und Nährstoffe aus tieferen Bodenschichten als Mais (CABLEGUENNE & DEBAEKE 1998), was auf das gut entwickelte Wurzelsystem zurück zu führen ist (SUBUDHI ET AL. 2002). Laut MAQBOOL ET AL. (2001), OSUNA-ORTEGA ET AL. (2003) sowie YU ET AL. (2004) ist unter der genetischen Variation von Sorghum kältetolerantes Material vorhanden, das für die Erzeugung neuer Hybriden verwendet werden kann. Diesen wird zudem ein Heterosis-Effekt zugesprochen (HAUSSMANN ET AL. 1998, HABYARIMANA ET AL. 2002, SUBUDHI ET AL. 2002). Da das Genom von Sorghum lediglich 1/5 der Größe von Mais entspricht, ist es für biotechnologische Eingriffe bzw. um einzelne Gene in andere Getreidearten einzuschleusen, prädestiniert (MAQBOOL ET AL. 2001, SUBUDHI ET AL. 2002). BACON ET AL. (1986) konnten in Feldversuchen zur Kältetoleranz von Sorghum eine mittlere Erhöhung des Feldaufbaus von 2,8% pro Generation feststellen. Mit der verbesserten Kältetoleranz ging in ihren Untersuchungen bei identischer Bestandesdichte auch eine hochsignifikante Ertragsteigerung von knapp 200 kg TM pro

Generation einher. Damit ist bei Sorghum eine ähnliche Verbesserung bezüglich der Kältetoleranz möglich wie bei Mais (BACON ET AL. 1986).

N-Effizienz von Sorghum

Bei ausreichender Stickstoff- und Wasserversorgung ist Mais ertragsstärker als Sorghum, was laut LEMAIRE ET AL. (1996) auf die frühere Entwicklung einer großen Blattfläche von Mais und der damit erhöhten Strahlungsinterzeption zurück zu führen ist. Unter N-Mangelsituationen ist Sorghum jedoch zu einer höheren N-Aufnahme fähig als Mais (LEMAIRE ET AL. 1996, BOLSEN ET AL. 2003). Dies wird durch Ergebnisse von OIKEH ET AL. (2007) bestätigt, die bei einer N-Mangelsituation bei Sorghum 2 bis 3-fach höhere Biomasseerträge und 165-230% höhere N-Entzüge als bei N-effizienten Maissorten ermittelten und dies auf ein besseres N-Aneignungsvermögen von Sorghum zurückführten. Durch Trockenstress wird sowohl bei Mais als auch bei Sorghum ein N-Mangel induziert, worauf Mais laut LEMAIRE ET AL. (1996) jedoch sensibler reagiert, da hier zu dem direkten Effekt des Wassermangels ein stärkerer N-Mangel hinzukommt. Sorghum ist hingegen in der Lage, bereits vor Zeiten des Mangels höhere N-Mengen aufzunehmen als Mais (LEMAIRE ET AL. 1996). Daher verursacht Sorghum über geringere Nährstoffansprüche geringere Inputkosten als Mais (BOLSEN ET AL. 2003).

Ertragspotenziale von Sudangras als Zweitkultur

Bei der Saat von Sudangras, welches im gleichen Reihenabstand wie Getreide gesät wurde, traten teilweise Probleme mit der Saattechnik auf und die Triebkraft war eher als gering einzuschätzen. Dennoch erreichte Sudangras als Zweitkultur Erträge von durchschnittlich 10 t TM ha⁻¹ mit TS-Gehalten von 23% und lag damit im Ertrag 1 t TM ha⁻¹ und beim TS-Gehalt 2% höher als Sorghum (vgl. **Abb. 33**). Das Ertragspotenzial von Sudangras als Hauptfrucht ist nach DEBRUCK & RECHARDT (2004) mit Erträgen je nach Saatzeitpunkt (23.4., 25.6., 23.7.) von 32,6, 16,4 und 14,0 t TM ha⁻¹ und TS-Gehalten von

27%, 27% und 25% sehr hoch. Neben den Erträgen und dem TS-Gehalt lag in den eigenen Untersuchungen auch der mittlere Reifegrad zur Ernte mit dem BBCH-Stadium 71 etwas höher als bei Sorghum (vgl. **Tab. 17**). Die Jahreserträge mit WR/WG und Sudangras lagen im Mittel der Standorte und Jahre bei knapp 21 t TM ha⁻¹, was etwas unterhalb der von HELSEL & WEDIN (1981) sowie HEGGENSTALLER ET AL. (2008) in einer ZKN ermittelten Jahreserträgen von jeweils 23 t TM ha⁻¹ lag. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um einen Mittelwert aller Standorte und Versuchsjahre handelt. Die Erträge von Sudangras als Zweitkultur waren, wie auch bei Sorghum im Jahr 2006, mit durchschnittlich 12,3 t TM ha⁻¹ höher als die Erträge der Jahre 2007 und 2008 mit 9,2 und 8,7 t TM ha⁻¹. Allerdings reagierte Sudangras weniger empfindlich auf die kühle sommerliche Witterung der letzten beiden Versuchsjahre als Sorghum. Sudangras scheint daher ertragssicherer bzw. besser an kühle Bedingungen angepasst zu sein als Sorghum, wobei letzteres bei optimalen Bedingungen, wie sie am Standort *Haus Düsse* im Jahr 2006 vorlagen, fast 3 t TM ha⁻¹ höhere Erträge als Sudangras erzielte. Neben genetischen Determinationen und den Vorfruchtwirkungen der Erstkulturen können die unterschiedlichen Bestandesdichten von Sudangras und Sorghum für die Ertragsunterschiede verantwortlich sein (vgl. **Tab. 7**). Sorghum wurde in weiten Reihen (75 cm) gedrillt, während Sudangras im Getreideabstand (15 cm) gesät wurde. Hierfür sprechen auch die Ergebnisse von DEBRUCK & RECHARDT (2004) bezüglich unterschiedlicher Bestandesdichten, wo Sudangras bei Saat auf Getreideabstand maximale Erträge erreichte. Zudem reagierte Sudangras bei hohen Niederschlägen auf schweren Böden wohl nicht so sensibel auf Staunässe wie Sorghum, wie in dem feuchten Jahr 2007 besonders an dem Standort *Haus Düsse* aber auch in *Witzenhausen* und *Dornburg* an den Erträgen deutlich wurde (vgl. **Abb. 33**).

Ertragspotenziale von Amarant als Zweitkultur

Bei der Saat und Etablierung von Amarant traten aufgrund der geringen Tausendkorngewichte und der damit verbundenen geringen Triebkraft sowie

unzureichender Saatbetteigenschaften ebenfalls große Probleme bei der Bestandesetablierung auf und der Unkrautdruck war aus diesem Grund ebenfalls sehr hoch. Auch DERSCH & NAGL (2001) bestätigen die geringe Keimkraft und Bestandesetablierung von Amarant bei suboptimalen Bedingungen, was sie auf das geringe Tausendkorngewicht sowie die hohen Temperaturansprüche zurückführten. Innerhalb einer Art ist die Triebkraft kleiner Samen geringer, was zu einem ungleichen Feldauflauf beiträgt und die intraspezifische Konkurrenz verstärkt (KHURANA & SINGH 2000). Der durchschnittliche Ertrag der Zweitkultur Amarant betrug im Mittel der Jahre und Standorte $5,8 \text{ t TM ha}^{-1}$ und lag damit unterhalb der von SAUERBECK (2004b) sowie DERSCH & NAGL (2001) angegebenen Biomasserträge von knapp 10 bzw. 14 t TM ha^{-1} , wobei der Amarant hier als Hauptfrucht angebaut wurde. Die Erträge von Amarant als Zweitkultur schwankten sehr stark und erreichten Maximalwerte von knapp 12 t TM ha^{-1} an den Standorten *Dornburg* (2007) und *Rauischholzhausen* (2008) (vgl. **Abb. 34**). Auf allen anderen Standorten wurden TM-Erträge unter 10 t TM ha^{-1} erzielt. Die Höhe der Amaranterträge kann nicht auf Standorteinflüsse, sondern vielmehr auf mangelnde Saatechnik bzw. Bestandesetablierung aufgrund der geringen Triebkraft zurückgeführt werden. Amarant verfügt über ein stark verzweigtes und tief reichendes Wurzelsystem, wodurch neben einer hohen Trockenheitstoleranz ein sehr gutes Nährstoffaneignungsvermögen vorliegt (DERSCH & NAGL 2001). Da die Saatbettbereitung für die Zweitkulturen in der ZKN aufgrund des kleinen zeitlichen Rahmens problematisch ist, kommt der Triebkraft und dem Feldauflauf eine entscheidende Bedeutung zu. Da die Ansprüche an das Saatbett sehr hoch sind (DERSCH & NAGL 2001), kann Amarant nicht als Zweitkultur empfohlen werden. Durch die zögerliche Entwicklung und den ungleichen Feldauflauf waren auch der Reifegrad zur Ernte (BBCH 80) und der TS-Gehalt von 20% zu gering für eine gute Silierbarkeit. Amarant weist bis in den Herbst hohe Wassergehalte auf (DERSCH & NAGL 2001). Dennoch sind die Siliereigenschaften von Amarant laut SAUERBECK (2004a) gut bis sehr gut, wobei der Energiegehalt mit dem einer guten Grassilage vergleichbar ist. Durch Zugabe von Amarant zu Mais und anschließender Silierung wurde die Milchsäurevergärung begünstigt, wo-

bei der Rohfasergehalt anstieg (SAUERBECK 2004a). Die Energiegehalte in der unsilierten Biomasse von Amarant waren in den eigenen Untersuchungen sehr gering (vgl. **Abb. 38**), was wohl mit dem hohen Kornverlust vor bzw. durch die Ernte zusammenhing. Die Abreife der Körner von Amarant war sehr uneinheitlich was durch Ergebnisse von DERSCH & NAGL (2001) bestätigt wird. Auch die N-Gehalte waren in den eigenen Ergebnissen trotz restriktiver Düngung unerwünscht hoch (vgl. **Abb. 52**). Aufgrund der mangelhaften Keimkraft in Kombination mit dem kurzen Zeitfenster zwischen Ernte der Erst- und Saat der Zweitkulturen, eignet sich Amarant schlecht zum Anbau als Zweitkultur. Hier besteht noch erheblicher Bedarf der züchterischen Verbesserung. Bei dem Anbau der kälteempfindlichen C₄-Pflanzen Mais, Sorghum, Sudangras und Amarant besteht im Herbst zudem die Gefahr von Frostschäden, so dass diese frühzeitig geerntet werden müssen (BOLSEN ET AL. 2003). Andererseits können diese Kulturen bei ausreichenden Wärmemengen im Herbst hohe Erträge realisieren.

Ertragspotenziale von Hanf als Zweitkultur

Die Erträge von Hanf als Zweitkultur lagen im Mittel der Standorte bei 9 t TM ha⁻¹, wobei der geringste Ertrag im Jahr 2008 mit 6 t TM ha⁻¹ zu verzeichnen war (vgl. **Abb. 34**). Zusammen mit der Erstkultur WR/WG wurden im Mittel Jahreserträge von knapp 20 t TM ha⁻¹ erzielt. Die höchsten TM-Erträge wurde in *Haus Düsse* mit 19, 18 und 10 t TM ha⁻¹ erreicht, was im Jahr 2006 zu einem Jahresertrag von 30 t TM ha⁻¹ führte. In *Gülzow* lag der Ertrag von Hanf als Zweitkultur im Jahr 2006 bei 14 t TM ha⁻¹, während auf den übrigen Standorten Erträge zwischen 4 und 10 t TM ha⁻¹ erzielt wurden.

Hanf entwickelt sehr schnell und bei hervorragender Unkrautunterdrückung ausreichend hohe TS-Gehalte von über 30%. Die C₃-Pflanze Hanf zeichnet sich durch eine schnelle Jugendentwicklung und Abreife aus, was den Anbau auf Standorten mit kürzerer Vegetationsperiode und kühleren Temperaturen ermöglicht. Der Erntetermin muss hierbei gut abgepasst werden, sonst erreicht Hanf sehr schnell zu hohe TS-Gehalte, was durch die Fasern zu Prob-

lemen beim Häckseln führen kann. Das am Standort *Straubing* statt Hanf angebaute Quinoa erreichte im Mittel TM-Erträge von etwas über 6 t ha⁻¹.

Die hohen Ertragspotenziale von Sorghum und Sudangras wurden im Jahr 2006 deutlich. Besonders die hohen Erträge des Jahres 2006 verdeutlichten das hohe Potenzial von Sorghum und Sudangras. Die **Arbeitshypothese Nr. 5** »Die ZKN eignet sich besonders für den Anbau alternativer Zweitkulturen wie Sorghum, Sudangras, Amarant und Hanf«, muss daher differenziert beantwortet werden. Entscheidend für sichere Erträge der wärmebedürftigen C₄-Pflanzen Sorghum, Sudangras und Amarant sind ausreichend hohe Temperaturen sowie eine lange Vegetationsperiode im Herbst. Die Feinsämereien, vor allem Amarant, weisen zu geringe Keimkräfte und damit zu hohe Ansprüche an das Saatbett auf, was die Bestandesetablierung als Zweitkulturen stark beeinträchtigt. Durch die spätere Aussaat sowie den großen Beitrag der Erstkultur zum Jahresertrag und der damit erhöhten Ertragssicherheit, ist mit der ZKN eine Integration dieser wärmebedürftigen C₄-Pflanzen in die mitteleuropäischen Landwirtschaft realisierbar.

4.1.5 Bioenergetische Parameter

Bruttoenergieerträge

Die Energieerträge waren hauptsächlich von den Erträgen abhängig, da sich die Energiegehalte wenig unterschieden. Die Energiegehalte von Mais und Sonnenblumen waren in der HFN höher als in der ZKN, wobei Sonnenblumen höhere Energiegehalte als Mais aufwiesen. Dies verstärkt den größeren ertraglichen Vorteil durch den Anbau von Sonnenblumen in der ZKN. Zusätzlich zeichneten sich die Erstkulturen mit durchschnittlich 18,3 MJ kg⁻¹ durch höhere Energiegehalte als die Zweitkulturen aus und wiesen damit etwas höhere Energiegehalte als Mais in der HFN auf. Zusammen mit den in der ZKN großen Ertragsanteilen der Winterungen, ergaben sich hohe Jahresenergieerträge der ZKN. In der ZKN mit WR als Erst- und Mais, Sonnenblumen

bzw. deren Gemenge konnten jeweils etwa 400 GJ ha⁻¹ erwirtschaftet und damit im Mittel knapp 40% mehr als mit WR, Mais bzw. Sonnenblumen in der HFN (vgl. **Abb. 40**).

Methanerträge

Eine spätreife Maissorte wies in Untersuchungen von GAUDCHAU ET AL. (2004) weniger Stärke und mehr Rohfasern auf als frühe Sorten. Trotzdem konnte eine Biogasausbeute von 419 l CH₄ kg oTS⁻¹ und 8.192 m³ CH₄ ha⁻¹ bei 20,8 t TM ha⁻¹ erzielt werden. In den eigenen Untersuchungen lagen die errechneten Biogasausbeuten von Mais in beiden Anbausystemen unter 300 l CH₄ kg oTS⁻¹ bei zum Teil wesentlich höheren Biomasseerträgen. Dies deutet darauf hin, dass bei der Berechnung der Biogasausbeuten mit Hilfe der verdaulichen Inhaltsstoffe die tatsächliche Biogasausbeute unterschätzt wurde. Gestützt wird dies durch die Aussage von GAUDCHAU ET AL. (2004), dass aus einzelnen Inhaltsstoffen (z.B. Stärkegehalt) keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die zu erwartende Biogasausbeute gezogen werden können. Auch JERGER ET AL. (1987) konnten in Batch-Versuchen mit Sorghum einen durchschnittlichen Methangehalt von 54,4% im Biogas und Methanausbeuten von bis zu 400 l CH₄ kg oTS⁻¹ erzielen, die also ebenfalls deutlich über den in den eigenen Untersuchungen berechneten Biogasausbeuten von etwa 265 l CH₄ kg oTS⁻¹ lagen. Auch die in den eigenen Untersuchungen ermittelten Methanerträge von Mais in der HFN und ZKN lagen mit 5.610 m³ ha⁻¹ und 6.400 m³ ha⁻¹ deutlich unter den von AMON ET AL. (2007) bei spätreifen Sorten erzielten Methanerträge von 7.100 bis 9.000 m³ ha⁻¹. AMLER (2008) bestätigt einen positiven Zusammenhang zwischen vitaler Restpflanze und Methanertrag. Ein grundsätzliches Problem stellen in den eigenen Ergebnissen die aus den DLG-Futterwerttabellen entnommenen Werte für die Verdaulichkeiten der Kulturpflanzen dar, welche unterschiedliche Erntereifegrade bzw. Sonderkulturen oft nicht berücksichtigen.

4.2 Nährstoffversorgung in der Zweikultur-Nutzung

N-Versorgung

Um den Versorgungsgrad der Kulturpflanzen in den beiden Anbausystemen bewerten und damit Rückschlüsse auf ökologische Parameter ziehen zu können, wurden die N-, P- und K-Gehalte der Pflanzen ermittelt. Die N-Versorgung der Kulturen wurde aufgrund unterschiedlicher Erträge und Entwicklungsstadien nicht direkt anhand der N-Gehalte, sondern in Bezug zu den kritischen-N-Gehalten (N_{crit}) bewertet. Das Konzept des N_{crit} bestimmt den minimal nötigen N-Gehalt, um einen maximalen Ertrag zu erlangen (ULRICH 1952). HERRMANN & TAUBE (2004) konnten zeigen, dass die Methode des N_{crit} bei Mais bis zur Siloreife Gültigkeit hat. Des Weiteren haben sie in ihren Versuchen neben Mineraldünger auch organische Düngemittel verwendet, wie sie in der Praxis oft eingesetzt werden. Durch den N_{crit} kann relativ einfach eine Unterversorgung bzw. ein Luxuskonsum ermittelt werden. Er hat für ein breites Band von Sorten, Klimaten und Bodentypen sowie Arten Gültigkeit (GREENWOOD ET AL. 1991, MARY 1997, PLÉNET & LEMAIRE 2000, HERRMANN & TAUBE 2004). Eine Bewertung der N-Versorgung mit Hilfe des N_{crit} erfolgte u.a. bei Grünland (LEMAIRE & SALETTE 1984), Getreide (JUSTES ET AL. 1994, 1997), Mais und Sorghum (PLÉNET & CRUZ 1997) sowie Raps (COLNENNE ET AL. 1998). Der N_{crit} stellt laut MARY (1997) einen brauchbaren Indikator zur Bewertung der guten fachlichen Praxis in Bezug auf die Einhaltung ökologischer Rahmenbedingungen dar und könnte laut HERRMANN & TAUBE (2005) gut als Instrument zur Vergabe von Subventionen verwendet werden. Besonders bei möglichst niedrigen N-Gehalten im Erntegut, wie es bei Braugerste und Zuckerrüben der Fall ist, kann diese Methode laut MARY (1997) hilfreich sein. Dies kann auf den Energiepflanzenanbau übertragen werden, wo geringe N-Konzentrationen mit möglichst hohen Biomasseerträgen verbunden werden sollen. Die absoluten N-Gehalte können aufgrund unterschiedlicher Reifestadien und Ertragsniveaus der beiden Anbausysteme nicht zur Bewertung der N-Versorgung herangezogen werden, da mit zunehmender Abreife und

damit steigenden Erträgen ein Verdünnungseffekt auftritt. Daher sinkt der N_{crit} -Gehalt mit steigenden Erträgen.

Der aktuelle N-Status kann durch den N-Ernährungs-Index (NNI) charakterisiert werden, welcher das Verhältnis von aktueller N-Konzentration und dem N_{crit} -Gehalt darstellt (GREENWOOD ET AL. 1991, LEMAIRE & GASTAL 1997, ZIADI ET AL. 2008). Die Bewertung der aktuellen N-Versorgung nach dem NNI-Wert ist auf jedes Entwicklungsstadium und auf eine Vielzahl von Kulturpflanzen übertragbar (HERRMANN & TAUBE 2004). In **Tab. 33** sind die TM-Erträge, N-Gehalte und NNI-Werte für WR, Mais, Sonnenblumen, Sorghum und Sudangras im Mittel der Standorte und Versuchsjahre angegeben. Bei einem NNI-Wert > 1 ist die N-Versorgung nicht limitierend, bei einem Wert < 1 liegt dementsprechend ein N-Defizit vor (LEMAIRE & GASTAL 1997).

Tab. 33: TM-Erträge, N-Gehalte und N-Ernährungsindices (NNI) von Winterroggen, Mais, Sonnenblumen, Sorghum und Sudangras in der Hauptfrucht- und Zweikultur-Nutzung im Mittel der Standorte und Versuchsjahre.

	Hauptfrucht-Nutzung			Zweikultur-Nutzung		
	Ertrag [t TM ha ⁻¹]	N-Gehalt [% i. TM]	NNI	Ertrag [t TM ha ⁻¹]	N-Gehalt [% i. TM]	NNI
Winterroggen	14,7	1,10	0,67	10,5	1,20	0,63
Mais	19,6	1,12	0,99	13,1	1,22	0,91
Sonnenblumen	12,9	1,49	0,90	9,7	1,37	0,75
Sorghum	-	-	-	9,1	1,36	0,78
Sudangras	-	-	-	10,1	1,21	0,72

NNI: N-Ernährungsindex NNI < 1: limitierend NNI > 1: nicht limitierend

Die NNI-Werte von WR lagen in beiden Anbausystemen mit Werten $< 0,7$ auf dem niedrigsten Niveau. Die Erträge von WR lagen allerdings meist über der von JUSTES ET AL. (1994) definierten Grenze von 12 t TM ha⁻¹, was die Aussagekraft der NNI-Werte für WR schmälert. Dennoch kann bei WR zumindest nicht von einer N-Übersorgung ausgegangen werden. Mais wies in beiden Anbausystemen niedrigere N-Gehalte als Sonnenblumen auf, was auf die generell höhere photosynthetische N-Nutzungseffizienz von C₄-Pflanzen im Vergleich zu C₃-Pflanzen zurück zu führen ist (BROWN 1987, OAKS 1994,

MARSCHNER 1995). Daher liegt laut GREENWOOD ET AL. (1990) auch der N_{crit} -Gehalt bei C_3 -Pflanzen auf einem höheren Niveau.

In der ZKN waren die N-Gehalte von WR und Mais höher als in der HFN, was auf die physiologisch jüngeren Beständen mit geringeren Erträgen und damit vermindertem Verdünnungseffekt zurück zu führen ist (MARSCHNER 1995). Die NNI-Werte von WR und Mais waren jedoch trotz höherer N-Gehalte in der ZKN niedriger als in der HFN, was auf eine etwas schlechtere N-Versorgung hindeutet. Bei Sonnenblumen waren hingegen in der ZKN die N-Gehalte niedriger als in der HFN. Obwohl Sonnenblumen einen geringen N-Bedarf aufweisen und in Versuchen von GROVE & SUMNER (1982) keine signifikante Reaktion auf eine N-Düngung zeigten, lagen die NNI-Werte deutlich unter den Werten von Mais, was zumindest in der ZKN mit einem NNI-Wert von 0,75 auf eine N-Unterversorgung hindeutet. Die NNI-Werte lagen bei allen drei Kulturen in der ZKN auf einem niedrigeren Niveau als in der HFN. Bei WR, Mais und Sonnenblumen in der ZKN war die N-Versorgung demnach ertragslimitierender als in der HFN, wobei auch in der HFN sämtliche NNI-Werte < 1 waren und auch hier nicht von einem Luxuskonsum ausgegangen werden kann. Bekräftigt wird dies durch die N-Salden von WR, Mais und Sonnenblumen in der HFN, die mit Werten zwischen -33 und $+19 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gering waren. Auch die schlechtere N-Versorgung der Zweitkulturen und hier besonders der Sonnenblumen wird durch die Ergebnisse der N-Salden gestützt, welche in der ZKN niedriger waren als in der HFN (vgl. **Abb. 57**). Bei Mais waren die N-Bilanzsalden der ZKN 9% höher und bei Sonnenblumen 15% geringer als in der HFN. Auch die NNI-Werte der lediglich als Zweitkultur angebauten Arten Sorghum und Sudangras waren mit 0,78 und 0,72 sehr niedrig. Sorghum wies als Zweitkultur höhere N-Gehalte auf als Mais in der ZKN, während die N-Gehalte von Sudangras und Mais identisch waren. Die NNI-Werte von Sorghum und Sudangras lagen deutlich unter den Werten von Mais als Zweitkultur. Der schlechteren N-Versorgung der Zweitkulturen können verschiedene Ursachen zu Grunde liegen. Die Boden-N-Dynamik wird stark von den Bodenwassergehalten beein-

flusst (ES & YANG 2005). Zusätzlich können durch die spätere Saat zu Zeiten des hohen N-Bedarfs schlechtere N-Aufnahmebedingungen geherrscht haben. Da in dem trockenen Jahr 2006 die NNI-Werte und damit die N-Versorgung von Mais in der ZKN kaum niedriger war und zudem die höchsten Erträge der drei Versuchsjahre erzielt wurden (vgl. **Abb. 55**), war Trockenstress wohl nicht für den N-Mangel verantwortlich. Dies wird durch die Ergebnisse von BULJOVICIC & ENGELS (2001) sowie von ES & YANG (2005) bestätigt, nach denen die N-Aufnahme von Mais trotz Trockenstress annähernd konstant blieb. In den beiden letzten Versuchsjahren herrschten ab Mitte des Jahres unterdurchschnittlich kühle Temperaturen, was das Wachstum vor allem der wärmebedürftigen Pflanzen Mais, Sorghum und Sudangras einschränkte und eine negative Rückkopplung in Bezug auf die Nährstoffaufnahme mit sich zieht (ENGELS & MARSCHNER 1992, GARNETT & SMETHURST 1999). Trotz höherer N-Nutzungseffizienz, können die wärmebedürftigen C₄-Pflanzen bei zu geringen Temperaturen stärker unter N-Mangel leiden als C₃-Pflanzen (GEBAUER ET AL. 1987). Zusätzlich sinkt durch niedrigere Temperaturen die N-Freisetzung im Boden (STANFORD ET AL. 1973) und die physiologische Aufnahmekapazität der C₄-Pflanze Mais verschlechtert sich (BRAVO-F. & URIBE 1981). Durch kühle Temperaturen werden auch die Translokationsprozesse von Mikronährstoffen reduziert (ENGELS & MARSCHNER 1996). Daher kann die restriktive Düngergabe nicht für die zu geringe N-Aufnahme, welche vor allem bei den Zweitkulturen auftrat, verantwortlich gemacht werden. Obwohl die N-Düngergaben von Mais und Sonnenblumen als Zweitkultur mit N-Sollwerten von 160 und 110 kg ha⁻¹ jeweils 40 kg ha⁻¹ geringer waren als von Mais und Sonnenblumen in der HFN (vgl. **Tab. 9**), kann dennoch nicht von einer N-Unterversorgung seitens der Düngung ausgegangen werden. Auch die Zweitkulturen Sorghum und Sudangras, die teilweise hohe Erträge erzielten, erhielten lediglich eine Sollwert-Düngergabe von 130 kg ha⁻¹ und damit weitere 30 kg weniger als Mais in der ZKN.

Amarant als Zweitkultur erhielt lediglich eine Sollwert-N-Düngung von 80 kg ha⁻¹, wobei die relativ hohen N-Gehalte im Erntegut darauf hinwiesen,

dass hier trotzdem kein N-Mangel vorlag (vgl. **Abb. 52**). Auch DERSCH & NAGL (2001) bestätigen, dass Amarant über ein sehr hohes Nährstoffaneignungsvermögen verfügt und lediglich bei einem geringen N-Düngungsniveau positiv auf dieses reagierte, wobei mit der N-Düngung ein signifikanter Anstieg der Wassergehalte einherging. Die restriktive Düngung der Zweitkulturen ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass die nicht-legumen Erstkulturen WR und WR/WG bereits etwa 20 kg N ha⁻¹ mehr entzogen haben, als diesen mit der Düngung zugeführt wurde (vgl. **Tab. 28**). Die hohen Entzüge von Stickstoff und die relativ geringe Düngergabe führten in beiden Anbausystemen meist zu negativen Bilanzen (vgl. **Tab. 28**). Nichtsdestotrotz konnte durch das eigene, an Energiepflanzen angepasste N-Düngekonzept (vgl. **2.3.2**), niedrige Nährstoffkonzentrationen im Erntegut mit hohen Jahreserträgen verbunden werden. Auch vor dem Hintergrund der Wasserversorgung ist eine eher verhaltene N-Düngung angebracht, da der Wasserbedarf durch eine Erhöhung des Spross/Wurzel-Verhältnisses mit der N-Versorgung ansteigt (MARSCHNER 1995).

Durch die NNI-Werte konnte die N-Versorgung gut dargestellt werden, was durch Ergebnisse von HERRMANN & TAUBE (2005) bestätigt wird. Mit Hilfe des NNI wird zudem die Möglichkeit eröffnet, die Düngestrategie in der folgenden Saison entsprechend anzupassen (HERRMANN & TAUBE 2005). Hierbei ist allerdings zu beachten, dass ein niedriger NNI-Wert nicht zwingend auf eine zu geringe N-Düngung zurück zu führen ist. Vielmehr wurde nicht genügend Stickstoff aufgenommen, was auch anderen limitierenden Wachstumsfaktoren zugeschrieben werden kann. Dies wurde in den eigenen Untersuchungen vor allem durch die zu kühlen Temperaturen der Jahre 2007 und 2008 bei den wärmebedürftigen C₄-Pflanzen deutlich.

Die ZKN ist ein gutes Beispiel dafür, dass eine Intensivierung der Landwirtschaft nicht zwangsläufig zu höheren N-Verlusten führt (BACH & FREDE 2005). Durch die Integration von Gemengen und sinnvollen Erst- und Zweitkulturen in die ZKN werden Nährstoffe effizienter genutzt als in einer Monokultur im Hauptfruchtanbau, da durch verschiedene Pflanzenarten zum einen

das Bodenvolumen und zum anderen die Vegetationsperiode besser ausgenutzt werden (ANDREWS 1972, WILLEY 1979, FRANCIS 1989, KARLEN ET AL. 1994, KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000). In 11-jährigen Feldversuchen von GRIGNANI ET AL. (2007) lag die N-Effizienz bei organischer Düngung in einer ZKN mit Mais nach Weidelgras höher als bei Silomais in einer HFN. Diese höhere N-Effizienz in der ZKN führten GRIGNANI ET AL. (2007) auf die spätere Vegetationszeit und die damit bessere Synchronisation mit Mineralisationsprozessen sowie den positiven Einfluss der Erstkultur durch die winterliche Bodenbedeckung zurück. Auch BAESEL ET AL. (2008) weisen auf die große Bedeutung der Anbausysteme zur Verbesserung der N-Effizienz hin und räumen züchterisch verbesserten Sorten lediglich eine untergeordnete Rolle ein. JOCIĆ & SARIĆ (1983) ermittelten sowohl bei Mais als auch bei Sonnenblumen große Streuungen zwischen den Nährstoffgehalten verschiedener Sorten und führten dies auf unterschiedliche Nutzungseffizienzen zurück. PRESTERL ET AL. (2000) fanden in ihren Untersuchungen für das Merkmal Kornertrag Interaktionen zwischen Genotyp und N-Düngungsstufe, was darauf hindeutet, dass eine Züchtung von Maissorten mit verbesserter N-Effizienz möglich ist. Des Weiteren deutete sich in ihren Versuchen ein positiver Zusammenhang zwischen N-Effizienz und Ertragsstabilität an (PRESTERL ET AL. 2000).

K-Versorgung

MURDOCK & WELLS (1978) sowie HEGGENSTALLER ET AL. (2008) ermittelten Ertragssteigerungen der ZKN gegenüber einer HFN von durchschnittlich 26% bzw. 25%. Diese hohe Ertragsdifferenz beruht wohl darauf, dass in den Versuchen von MURDOCK & WELLS (1978) sowie HEGGENSTALLER ET AL. (2008) in der HFN keine Zwischenfrucht mit einbezogen wurde. Außerdem wirken sich, wie die eigenen Ergebnisse bestätigen, Standorteinflüsse entscheidend auf den Ertragsvorteil einer ZKN aus. In den Versuchen von MURDOCK & WELLS (1978) wurde zudem eine N-P-K-Düngung appliziert. Durch eine geteilte K-Düngung konnten die Erträge der ZKN in ihren Versuchen um

33% gesteigert werden. In den eigenen Untersuchungen entzog die Erstkultur WR bereits 175 kg K ha^{-1} und Mais als Zweitkulturen 148 kg K ha^{-1} . Damit wurden in der ZKN durch Mais K-Mengen von über 320 kg K ha^{-1} entzogen (vgl. **Tab. 30**), ohne dass dies durch eine direkte K-Düngung ausgeglichen wurde. Hierauf wurde verzichtet, da die K-Versorgung der Böden (außer in *Haus Düsse* und *Werlte*) hoch waren und um hohe Nährstoffanreicherungen im Erntegut zu vermeiden. Auch HEGGENSTALLER ET AL. (2008) ermittelten in einer ZKN hohe K-Entzüge von 252 kg ha^{-1} . Für die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist in der ZKN daher besonders auf eine ausreichende Nährstoffrückführung zu achten. Durch die hohen Entzüge sowie die tendenziell geringeren Bodenwassergehalte, ist eine ausreichende Nährstoffversorgung sowie deren Verfügbarkeit in der ZKN besonders wichtig. Dies schließt die Einhaltung optimaler pH-Werte ein, welche für die Nährstoffverfügbarkeit und Aufnahme bedeutend sind (MARSCHNER 1995). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass in den eigenen Versuchen eine K-Gabe die Erträge der ZKN zumindest auf Standorten mit mäßiger K-Versorgung der Böden gegebenenfalls gesteigert hätten. Die K-Gehalte von Mais als Zweitfrucht waren auf allen Standorten außer *Haus Düsse* und *Straubing* etwas höher als in der HFN (vgl. **Tab. 29**). Dies ist wie auch bei den N-Gehalten auf einen Verdünnungseffekt im Entwicklungsverlauf zurück zu führen (MARSCHNER 1995). Die Zweitkulturen befanden sich zur Ernte in entsprechend jüngeren phänologischen Stadien und wiesen damit höhere K-Gehalte auf. An den Standorten mit guten Wachstumsbedingungen (*Haus Düsse*, *Straubing*) lagen die K-Gehalte von Mais in der ZKN jedoch unter den Werten der HFN. Durch die hohen K-Entzüge der ZKN lag hier wohl ein K-Mangel vor. Am Standort *Werlte*, der mit der K-Versorgungsklasse B eine relativ geringe K-Versorgung aufwies (vgl. **Tab. 2**), waren etwas höhere K-Gehalte der Zweitkultur Mais zu beobachten. Aufgrund der geringen Substanzproduktion lag hier wohl kein Nährstoffmangel vor. Anders verhält es sich bei den Sonnenblumen, die sich durch einen sehr hohen K-Bedarf auszeichnen (DIEPENBROCK 1987, HUGGER 1989). Die K-Gehalte von Sonnenblumen waren mit etwa 3% i.d.TM sowohl in der HFN als auch in der ZKN mehr als doppelt so hoch wie die K-Gehalte von

Mais. Die K-Gehalte von Sonnenblumen als Zweitkulturen lagen meist unter den Gehalten der Erstkulturen, wobei eine klare Rangfolge der Bodeneigenschaften zu erkennen war (vgl. **Tab. 2**, **Tab. 29**). Je schlechter die Bodeneigenschaften, desto niedriger waren die K-Gehalte von Sonnenblumen als Zweitkultur, welche auf vier der sieben Standorte unter den Werten der HFN lagen. Besonders hoch fielen hier die Unterschiede der K-Gehalte zwischen HFN und ZKN an Standorten mit geringen Tonanteilen (*Werlte, Gülzow*), gefolgt von dem Standort mit den geringsten Niederschlägen (*Dornburg*) aus. Die an diesen drei Standorten im Mittel um 0,54% geringeren K-Gehalte von Sonnenblumen als Zweitkultur im Vergleich zur HFN weisen auf einen K-Mangel, zumindest jedoch eine deutlich schlechtere K-Versorgung der Zweitkulturen hin. Dies wird dadurch verstärkt, dass in der ZKN aufgrund des jüngeren Entwicklungsstadiums höhere K-Gehalte zu erwarten gewesen wären (HUGGER 1989), wie es an den Standorten *Rauischholzhausen, Haus Düsse* und *Straubing* der Fall war.

Sonnenblumen in der HFN entzogen dem Boden bereits fast 400 kg K ha⁻¹, was durch die Integration in die ZKN bis auf über 450 kg K ha⁻¹ anstieg (vgl. **Tab. 30**). Da Sonnenblumen besonders während der Jugendphase neben einem hohen K-Bedarf auch einen hohen Wasserbedarf aufweisen (DIEPENBROCK 1987, HUGGER 1989, TURHAN & BASER 2004), kann ein K-Defizit gegebenenfalls Trockenstress induzieren bzw. verstärken. Geringere Wassergehalte und Pufferkapazitäten des Bodens, welche vom Tongehalt abhängen, senken die Diffusionsrate und damit die K-Aufnahme (NYE 1966, SCHAFF & SKOGLEY 1982). Zudem treten bei der Nährstoffaufnahme von Pflanzen Interaktionen mit anderen Ionen auf. Laut Ergebnissen von TAUBE ET AL. (1995) und HEUSER (2004) stieg die K-Aufnahme mit der N-Düngung an. Die restriktive N-Versorgung der Zweitkulturen und hier vor allem der Sonnenblumen kann demnach die K-Aufnahme limitiert haben. BERGMANN (1993) sowie MARSCHNER (1995) beobachteten den umgekehrten Effekt und GROVE & SUMNER (1982) konnten keine signifikanten Interaktionen zwischen der N- und K-Aufnahme erkennen.

Kalium ist vor allem für die Steuerung osmotischer Vorgänge in der Pflanze, u.a. für die Bewegung der Stomata verantwortlich. Daher ist die Welke tracht ein typisches K-Mangelsymptom (BERGMANN 1993, MARSCHNER 1995, RICHTER 2005). Tritt ein K-Mangel gegen Ende der Vegetationsperiode auf, so reagiert die Sonnenblume mit einer verfrühten Seneszenz (DIEPENBROCK 1987).

Mais wies sowohl geringere N- als auch K-Konzentrationen und damit eine höhere Nährstoffeffizienz auf als Sonnenblumen, was durch Ergebnisse von JOCIĆ & SARIĆ (1983) bestätigt wird. Da keine K-Düngung verabreicht wurde, waren die Bilanzen stark negativ und es kann vermutet werden, dass eine K-Düngung vor allem in der ZKN zu einer Ertragsteigerung beigetragen hätte. GREBE ET AL. (2008) fanden bei Weizen und Triticale einen positiven Zusammenhang zwischen K-Gehalt und Ertrag und in Versuchen von GROVE & SUMNER (1982) stieg der Sonnenblumenertrag mit der K-Düngung signifikant an. Über eine Rückführung des Gärrestes kann in der Praxis zumindest ein Teil der Nährstoffentzüge zurückgeführt werden, was die Bilanzen annähernd ausgleichen dürfte.

P-Versorgung

Die P-Entzüge von Mais und Sonnenblumen lagen in der ZKN etwa 40% höher als in der HFN. Im Gegensatz zu Kalium wurde Phosphor bei Mais zur Saat als Unterfußdüngung mit ausgebracht. Dennoch kann die P-Aufnahme von Mais durch die kühlen Temperaturen der Jahre 2007 und 2008 beeinträchtigt worden sein, welche laut Ergebnissen von MACKAY & BARBER (1984) sowie ENGELS & MARSCHNER (1992) das Wurzelwachstum und damit die P-Aufnahme von Mais stark beeinträchtigen.

4.3 Die Zweikultur-Nutzung als Fruchtfolge

Die in der ZKN verwendeten Erst- und Zweitkulturen können auch als Fruchtfolgeglieder betrachtet werden. LÓPEZ-BELLIDO GARRIDO & LÓPEZ-BELLIDO (2001) ermittelten durch zweijährige Fruchtfolgen höhere Erträge im Vergleich zu einer Weizen-Monokultur. In 40-jährigen Fruchtfolgeversuchen waren nach BERZSENYI ET AL. (2000) die Mais- sowie Weizenerträge in Fruchtfolgegliedern höher als die einer Monokultur, wobei allerdings der Fruchtfolgeeffekt bei Mais durch eine erhöhte N-Düngung kompensiert werden konnte. Auch RIEDELL ET AL. (1998) bestätigen, dass der Ertragsvorteil von 32% durch die Vorfrucht Sojabohne im Vergleich zu Mais mit Zwischenfrucht ebenfalls durch eine mineralische Düngung erzielt werden konnte. Durch eine N-Düngung steigt zwar der pflanzenverfügbare Stickstoff im Boden, andere Qualitätsparameter wie pH-Wert und Kationenaustauschkapazität sinken jedoch und zudem steigt der Bedarf an Dünger, um das Ertragspotenzial zu erhalten (RUSSELL ET AL. 2006). Eine Integration von Leguminosen in die Fruchtfolge kann eine mineralische N-Zufuhr ersetzen, ohne dass negative Folgen auftreten (FRANCIS & CLEGG 1990, RUSSELL ET AL. 2006, SHARMA & BEHERA 2009, URBATZKA ET AL. 2009). Neben dem N-Eintrag können Leguminosen weitere positive Effekte hervorrufen (BALDOCK ET AL. 1981) wie phytosanitäre Aspekte (CURL 1963), Verbesserung der Bodenphysik (BARBER 1972), Eliminierung von phytotoxischen Stoffen aus Maisernteresten (BARBER 1971) sowie die wachstumsfördernde Wirkung von Substanzen in den Ernteresten von Leguminosen (RIES ET AL. 1977, SHARMA & BEHERA 2009). Verantwortlich für die Vorteile einer Fruchtfolge sind meist mehrere Faktoren. KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) konnten zeigen, dass durch den Leguminosenanteil in einem WR/WE-Gemenge als Erstkultur ein N-Effekt und ein Fruchtfolgeeffekt hervorgerufen werden, was Ergebnisse von SHARMA & BEHERA (2009) bestätigen. In den eigenen Versuchen war der WE-Anteil zur Ernte sehr gering, was zum einen an der Saatstärke und zum anderen an der mineralischen N-Düngung lag, welche die Konkurrenzkraft der ohnehin sehr massenwüchsigen Roggensorte 'Vitallo' weiter verstärkte. Des Weiteren

reagierten WE empfindlich auf lange Frostperioden sowie auf Staunässe, was ihren Ertragsanteil auf manchen Standorten auf nahezu null reduzierte (vgl. **Tab. 21**). Zu ähnlichen Beobachtungen kamen auch KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000). Daher lagen die N-Fixierungsleistungen, die sehr stark zwischen den Standorten und Jahren variierten, im Mittel lediglich bei 9 kg N ha^{-1} .

Eine gute Fruchtfolgegestaltung kann neben der Versorgung mit Stickstoff auch durch die Verbesserung der Bodeneigenschaften zu einer Ertragssteigerung und vor allem zu einer erhöhten Ertragssicherheit beitragen (BARBER 1972, FRANCIS 1989, BERZSENYI ET AL. 2000). Oft ist dies auf eine Humusanreicherung und damit verbundene Verbesserungen der Wasserspeicherkapazität, Nährstoffverfügbarkeit sowie Struktur zurück zu führen (FRANCIS & CLEGG 1990, KARLEN ET AL. 1994, RUSSELL ET AL. 2006). Verantwortlich hierfür ist die Rückführung von diversem Pflanzenmaterial, was die Bodenqualität verbessert und das Wurzelwachstum sowie die mikrobiologische Aktivität fördert (BARBER 1979, BALDOCK ET AL. 1981, BRUCE ET AL. 1990). Die ZKN bietet die Möglichkeit, unterschiedlichste Pflanzenarten bzw. Gemenge in den Energiepflanzenbau zu integrieren. LARSON ET AL. (1972) sowie MORACHAN ET AL. (1972) konnten zeigen, dass Aggregatstabilität und Wasserspeicherkapazität mit der Zufuhr von unterschiedlichem Pflanzenmaterial ansteigen und die Bodenrohichte abnimmt. Sie konnten allerdings keine signifikanten Einflüsse auf Erosion und Infiltration ermitteln (MORACHAN ET AL. 1972). KARLEN ET AL. (1994) betonen jedoch, dass ein Anstieg der Wasserhaltekapazität nicht zwingend mehr pflanzenverfügbares Wasser bedeutet, da das im Humus gespeicherte Wasser zu einem Großteil nicht pflanzenverfügbar ist.

Durch den Anbau unterschiedlicher Kulturen können Schädlinge und Krankheiten reduziert werden. Besondere Bedeutung kommt hier der Substitution von Mais zu, welcher stark durch den Maiswurzelbohrer beeinträchtigt wird und negative Eigenschaften auf den Humusgehalt hervorruft. Dies ist vor allem nach dem Inkrafttreten der »Cross Compliance« gefragt.

Durch die ZKN erfolgt eine Effizienzsteigerung der zeitlichen Dimension durch die verbesserte Ausnutzung der Vegetationsperiode (FRANCIS 1989).

Aus von REEVES (1997) zusammengetragenen Langzeitstudien wird ersichtlich, dass die landwirtschaftliche Produktivität durch Wirtschaftsdünger, adäquate Düngung sowie eine weite Fruchtfolge und die damit erhöhten C-Einträge gesteigert wird.

Nach der späten Ernte der Zweitkulturen Mitte Oktober kann eine Aussaat von Winterweizen oder einer Zwischenfrucht erfolgen. Interessant wäre diesbezüglich der Versuch von Untersaaten, welche nach der Ernte der Zweitkulturen den Winter überdauern und so die Gefahr von N-Auswaschungen weiter vermindern könnten. Bei Silomais im Hauptfruchtanbau führte eine Gras-Untersaat in Untersuchungen von WACHENDORF ET AL. (2006) sowie BOEHMEL ET AL. (2008) zu signifikant geringeren N-Auswaschungs- sowie Erosionsverlusten.

4.4 Effekte der reduzierten Bodenbearbeitung in der Zweikultur-Nutzung

Es gibt viele Begriffe und Definitionen für eine verminderte Bodenbearbeitung, wie pfluglose, konservierende oder Minimalbodenbearbeitung. Diese Begriffe sind meist nicht klar definiert und haben je nach verwendeten Bodenbearbeitungsgeräten fließende Übergänge (MANNERING & FENSTER 1983). In der ZKN erfolgte lediglich vor der Aussaat der Erstkulturen und in der HFN vor der Aussaat der Zwischenfrüchte eine Pflugfurche. Die Sommerungen wurden in beiden Anbausystemen nach einer flachen Bodenbearbeitung direkt in die Erntereste der Erstkulturen bzw. Zwischenfrüchte gesät. Durch den Verbleib einer Mulchschicht, die eine raue Oberfläche bildet und damit einer Verschlammung und Krustenbildung entgegengewirkt sowie Wasser- und Windgeschwindigkeiten reduziert, werden Wasser- und Bodenverluste minimiert (MANNERING & FENSTER 1983, MOLDENHAUER ET AL. 1983, LEWIS & PHILLIPS 1983, MCVAY 2006). So sank in Untersuchungen von SOMMER & BRUNOTTE (1997) der Oberflächenabfluss mit zunehmendem Bodendeckungsgrad. Auch die Ergebnisse aus Berechnungsversuchen von JIN ET AL.

(2008) bestätigen, dass eine unterlassene Bodenbearbeitung mit verbleibender Mulchschicht den besten Erosionsschutz bietet, wobei eine Mulchschicht auch bei einer Tiefenlockerung des Bodens gut vor Erosionsverlusten schützt. Auch LEWIS & PHILLIPS (1983) sowie MOLDENHAUER ET AL. (1983) bestätigen, dass Erosionsverluste am effektivsten durch lebende oder abgestorbene Biomasse minimiert werden. Durch die Integration einer zweiten Kultur pro Jahr verminderte sich die Erosion in Untersuchungen von JIN ET AL. (2008) signifikant, was sie auf die ganzjährige Bodenbedeckung zurückführten. Eine Direktsaat fängt demnach Erosionsverluste zum erosionsgefährdeten Zeitpunkt der Saat der Zweitkulturen ab. Des Weiteren wird durch eine reduzierte Bodenbearbeitung eine Bodenverdichtung bzw. die Bildung einer Pflugsohle verhindert (SOMMER & BRUNOTTE 1997, MCVAY 2006). NEVENS & REHEUL (2003) ermittelten bei verdichteten Böden geringere Maiserträge und geringere N-Nutzungseffizienzen, was sie durch schlechtere Mineralisationsbedingungen und geringere N-Aufnahmen begründeten. Laut LI ET AL. (2008) führt eine konventionelle Bodenbearbeitung und Druckbelastung durch landwirtschaftlichen Verkehr zu einem höheren Oberflächenabfluss von Wasser, einer geringeren Bodenfeuchte und zu geringeren Erträgen (LI ET AL. 2008).

Neben der Verminderung der Erosionsgefahr fördert eine reduzierte Bodenbearbeitung den Humusaufbau und verbessert die Bodenfruchtbarkeit (LEWIS & PHILLIPS 1983, SCHEFFER 1992, GRAß 2003, SCHEFFER 2003a/b, BOEHMEL ET AL. 2008). Auch die Ergebnisse von SAUERBECK (1993), SMITH ET AL. (1998), sowie BOEHMEL ET AL. (2008) bestätigen einen positiven Zusammenhang zwischen reduzierter Bodenbearbeitung und Humusgehalt. Damit geht mit einer reduzierten Bodenbearbeitung auch eine C-Sequestrierung einher (SMITH ET AL. 1998). In Versuchen von ZIBILSKE & BRADFORD (2007) erhöhte sich durch eine reduzierte Bodenbearbeitung auch die Menge an Bodenaggregaten, was zur Verbesserung der Wasserhaltekapazität beitrug. Eine konservierende Bodenbearbeitung führt zu höheren Bodenwassergehalten, niedrigeren Bodentemperaturen, mehr organischer Masse und zur verstärkten Bildung von stabilen Aggregaten (KLADIVKO ET AL. 1986, GERZABEK ET AL. 1995, EDWARDS ET AL. 1999). Durch eine reduzierte Bodenbearbeitung steigt

die Regenwurmpopulation an, was das Bodengefüge, das Wurzelwachstum, die Nährstoffverfügbarkeit und die Wasserinfiltration verbessert (BRUCE ET AL. 1990, SOMMER & BRUNOTTE 1997, EDWARDS ET AL. 1999, MCVAY 2006). Eine ZKN mit reduzierter Bodenbearbeitung spart daher Zeit und Bodenwasser, was den Zweitkulturen einen Vorteil verschafft. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund wichtig, dass zum einen die Zeit zwischen Ernte und Saat sehr begrenzt ist und zum anderen die Bodenwassergehalte laut LÖPMEIER (2007) zur Saat der Zweitkulturen in der Regel geringer sind als zur Saat der Hauptkulturen, was durch die eigenen Ergebnisse bestätigt werden konnte (vgl. **Abb. 11**). Eine pfluglose Bodenbearbeitung trägt daher durch die Verkürzung der Zeitspanne zwischen Ernte der Erst- und Saat der Zweitkultur, sowie der Bodenwasserkonservierung zum Erfolg einer ZKN bei (LEWIS & PHILLIPS 1983). Nichtsdestotrotz ist eine konservierende Bodenbearbeitung laut COSPER (1983) nicht für alle Böden, Anbausysteme und Kulturarten geeignet und erfordert im Vergleich zu einer konventionellen Bodenbearbeitung oft ein intensiveres Management. In 11-jährigen Untersuchungen in Kanada von ANGERS ET AL. (1995) förderte eine Bodenbearbeitung lediglich die Verteilung von Maisernterückständen und hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Humusumsetzung im Boden, welche eher durch Bodenfeuchte und Temperatur beeinflusst wurde. In Untersuchungen von BARBER (1971) war der Einfluss von Bodenbearbeitung und Ernterestmanagement auf den Ertrag gering, wobei der Humusgehalt hier bereits auf einem hohen Niveau lag. Auch COSPER (1983), KLADIVKO ET AL. (1986) und GRIFFITH ET AL. (1988) weisen darauf hin, dass eine reduzierte Bodenbearbeitung bei feuchten, fein-strukturierten bzw. schlecht dränierten Böden zu Ertragsverlusten führen kann, was sie auf die verschlechterte Bodenerwärmung zurückführten. Allerdings konnte dieser Ertragsverlust durch eine Fruchtfolgegestaltung nach vier Jahren ausgeglichen werden und nach neun Jahren war der Ertrag sogar höher als bei konventioneller Bodenbearbeitung mit Mais als Monokultur (GRIFFITH ET AL. 1988). Untersuchungen von KLADIVKO ET AL. (1986) sowie von BRUCE ET AL. (1990) belegen zudem, dass sich Fruchtfolge und Bodenbearbeitung signifikant beeinflussen, wobei eine intensive Bodenbearbeitung die positiven Folgen einer

Fruchtfolge auf bodenphysikalische Eigenschaften zu vermindern scheinen. So führt eine pfluglose Bodenbearbeitung bei Monokulturen oft zu vermehrtem Unkrautdruck sowie zu Problemen bei ungleich verteilten Ernteresten und damit zu Ertragseinbußen (COSPER 1983, MOLDENHAUER ET AL. 1983, MCVAY 2006).

GOVAERTS ET AL. (2007) stellten in Langzeitversuchen eine erhöhte Wurzelfäule sowie einen verstärkten Nematodenbefall bei Mais unter Minimalbodenbearbeitung fest, was jedoch die Erträge nicht signifikant verminderte; vielmehr überwogen die positiven Effekte, wie eine bessere Infiltration und Wasserspeicherung durch eine Minimalbodenbearbeitung vor allem bei Vorhandensein einer schützenden Mulchschicht, was sich durch Ertragssteigerungen bis zu 30% äußerte (GOVAERTS ET AL. 2007). Die positiven Veränderungen der Bodenstruktur kompensieren demnach auf den meisten Böden die negativen Effekte wie eine erhöhte Rohdichte, schlechterer Erwärmbarkeit und damit verzögertem Feldaufgang (EDWARDS ET AL. 1999). Durch den Verzicht auf eine Pflugfurche wird direkt Dieselkraftstoff eingespart, was die Produktionskosten sowie die CO₂-Freisetzung vermindert.

Die Ausweitung einer konservierenden Bodenbearbeitung ist abhängig von der Quantität von Böden, die nicht mit einer Ertragsdepression reagieren (CHRISTENSEN & MAGLEBY 1983), wobei die Effekte oft verzögert auftreten und andere Managementparameter die positive Wirkung einer reduzierten Bodenbearbeitung unterstützen können.

4.5 Ökologische Effekte der Zweikultur-Nutzung

4.5.1 Verzicht auf Pflanzenschutzmittel

Die ZKN strebt hohe Flächenerträge an und zeichnet sich zusätzlich durch ökologische Vorzüge, wie dem weitgehenden Verzicht auf Pflanzenschutzmittel und eine nahezu ganzjährige Bodenbedeckung aus (SCHEFFER 1993, GRAß

& SCHEFFER 2003). Da Wildpflanzen ähnliche Energiegehalte wie Kulturpflanzen aufweisen, sind diese in gleicher Weise nutzbar (SCHEFFER 2003a/b). Auch die Untersuchungen von BUTTLAR (1997) weisen durch einen lediglich schwachen und nicht signifikanten Zusammenhang zwischen Unkraut- und Ganzpflanzenertrag auf höhere Schadensschwellen im Energiepflanzenanbau hin. Durch die vorgezogene Ernte der Winterungen und sofortige Saat der Sommerungen werden die Reproduktionszyklen von vielen Unkräutern durchbrochen, was einen Herbizideinsatz in der Regel nicht notwendig macht (FRANCIS 1989, SCHEFFER 1992, 1993, 2003a/b). Die als Erstkultur verwendete massenwüchsige Roggensorte 'Vitallo' verfügte über eine sehr gute Unkrautunterdrückung, was den Verzicht auf Herbizide ermöglichte und den Zweitkulturen zugute kam. Laut PUTNAM ET AL. (1983) verfügen winterharte Kulturen wie WR über eine bessere Unkrautunterdrückung als abfrierende Zwischenfrüchte. WR unterdrückt durch Wurzelexudate während des Wachstums, aber auch durch Erntereste und hier vor allem bei reduzierter Bodenbearbeitung, wirkungsvoll die Keimung von Unkräutern (PUTNAM ET AL. 1983, KOHLI ET AL. 2001). Dies bestätigt die **Arbeitshypothese Nr. 8 »Die ZKN erzielt ohne chemische Pflanzenschutzmittel hohe Flächenerträge«**. WR ist durch die Anpruchslosigkeit, hohe Erträge und sehr gute Unkrautunterdrückung als Erstkultur besonders geeignet, was Ergebnisse von HELSEL & WEDIN (1981) bestätigen. Dadurch kann auf eine wendende Bodenbearbeitung zur Unkrautbekämpfung verzichtet werden, was eine Keimungsinduktion weiterer Unkräuter verhindert (SCHEFFER 1993) und laut BARNES & PUTNAM (1983) die hemmenden Effekte von WR-Ernteresten auf die Keimung von Unkräutern verstärkt. Eine pfluglose Bodenbearbeitung allein oder eine Herbizidapplikation reichen bei einer Monokultur nicht aus, um den Unkrautdruck auf einem niedrigen Niveau zu halten, hierfür ist eine gute Fruchtfolgegestaltung unabdingbar (LIEBMAN & DYCK 1993, MCVAY 2006). Bei den Sommerungen ist eine mechanische Unkrautbekämpfung allerdings notwendig.

Auch durch einen Gemengeanbau können Unkräuter wirkungsvoller unterdrückt werden als in Reinsaaten (LIEBMAN & DYCK 1993) und bei der Sor-

ten- und Artenwahl können phytosanitäre Aspekte einen wichtigeren Stellenwert einnehmen (SCHEFFER 2003a/b, SCHEFFER & STÜLPNAGEL 1993), wodurch der Krankheitsbefall um bis zu 50% vermindert werden kann (HEITEFUSS 2000). Da pilzliche Erreger hauptsächlich den Körnerertrag von Getreide vermindern, aber geringe Einflüsse auf die Gesamtbiomasse zur energetischen Nutzung haben, kann auf eine Fungizidbehandlung verzichtet werden, ohne dass hohe Ertragsausfälle zu erwarten sind (SODIKIN 1994). Anbausysteme mit mehreren Kulturen und entsprechend hoher Diversität weisen in der Regel auch weniger tierische Schädigungen auf, und über die Intensivierung wird eine übermäßige Unkrautvermehrung verhindert (OKOLI ET AL. 1984, FRANCIS 1989). Über Artenmischungen kann neben der Verminderung des Schädlings- und Krankheitsbefalls auch der Gesamtertrag erhöht werden (FRANCIS 1989, KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL 2000), wodurch der wirtschaftliche Gesamterfolg der Erzeugung erneuerbarer Energie in Deutschland schneller realisiert werden kann. Die Integration des Energiepflanzenanbaus in Fruchtfolgen im Umfang von 30% würde damit zu einer erheblichen ökologischen Entlastung von Agrarökosystemen beitragen (SCHEFFER 2003a/b).

4.5.2 Möglichkeiten der Erhöhung der Artenvielfalt durch die Zweikultur-Nutzung

Während der letzten 100 Jahre fand ein bedeutender Verlust an Diversität statt und das Aussterben von Arten geht laut HAMMER ET AL. (2003a) unvermindert weiter. Durch die hohen Flächenerträge der ZKN können natürliche Ökosysteme und deren Artenvielfalt erhalten werden. Aber auch die Agrarbiodiversität könnte durch die ZKN gesteigert werden. Weltweit dienen lediglich 2,5% aller höheren Pflanzen als Feldfrüchte, aber 42,5% gelten als pflanzengenetische Ressourcen (HAMMER 1998, HAMMER ET AL. 2001). Dazu zählen alle Feldfrüchte oder für andere Zwecke kultivierte Pflanzen sowie deren wilde Verwandte für sämtliche anthropogenen Verwendungszwecke wie Nahrung, Medizin, Futter, Kleidung, Fasern, Schatten oder Energie. Zudem bestehen global große Unterschiede in der Art und Effizienz der Erhaltung pflanzenge-

netischer Ressourcen (HAMMER ET AL. 2003b) und regional bedeutsame Kulturarten werden dabei oft vernachlässigt (HAMMER ET AL. 2001). Der Wert des Energiepflanzenanbaus in der ZKN ist daher für den Erhalt genetischer Ressourcen nicht zu unterschätzen. Neben der Vielfalt der einsetzbaren Pflanzenarten besteht in keinem anderen Anbausystem eine so große Chance, alten Stämmen und Sorten wieder Bedeutung und Anbaufläche zukommen zu lassen (BUTTLAR 1996). Die ZKN bietet durch die relativ geringen Anforderungen an das Erntegut sowie die dem System innewohnende hohe Ertragssicherheit die Möglichkeit, unterschiedlichste Pflanzenarten und -sorten zu verwenden. So könnten genetische Ressourcen in Form von alten Sorten sinnvoll genutzt und erhalten werden (SCHEFFER 1993, SCHEFFER & STÜLPNAGEL 1993, BUTTLAR 1996, HAMMER 2004). Dabei besteht beispielsweise die Möglichkeit, auf proteinarme, N-effiziente Sorten zurückzugreifen, die eine hohe Biomasseproduktion und Unkrautunterdrückung aufweisen (BUTTLAR 1996). Die Ganzpflanzenerträge alter Sorten liegen bei einer vorzeitigen Ganzpflanzenernte oft über denen moderner Sorten, was BUTTLAR (1996) für Wintergerste sowie STRESE (2001) für Winterweizen aufzeigen konnten.

4.5.3 Reduzierte N-Austräge durch die Zweikultur-Nutzung

N-Auswaschung

Überschüssige Nährstoffe aus landwirtschaftlichen Quellen werden hauptsächlich in Gewässer eingetragen und haben weit reichende Folgen wie Versauerung, Eutrophierung und Nitratbelastung von Grund- und Oberflächenwasser sowie der Meere, wodurch auch die Biodiversität beeinträchtigt wird (UBA 2009). Laut UBA (2009) stammen rund 62% der N-Einträge in Fließgewässern aus der Landwirtschaft. Dabei gilt die Emission verschiedener N-Verbindungen als eines der wichtigsten Umweltprobleme der mitteleuropäischen Landnutzung (WAHMHOFF 2000). Mit zunehmender Intensivierung und steigendem Einsatz von Düngemitteln stiegen auch die Nährstoffkonzentrationen im Grundwasser an (HENNING & SCHEFFER 2000). Da jedoch ledig-

lich ein kleiner Teil des Stickstoffs im Boden gespeichert wird, können erhebliche Verluste auftreten (JANZEN ET AL. 2003). So kann die maximal zugelassene NO_3 -Konzentration im Trinkwasser von 50 mg l^{-1} , bzw. der Richtwerte von 25 mg l^{-1} , schnell überschritten werden (TRINKWV 2001, FREDE & DABBERT 1999). Die NO_3 -Konzentration des von landwirtschaftlichen Flächen ausgehenden Wassers ist dabei von der NO_3 -Menge im Boden und der Sickerwassermenge abhängig. Das Gefährdungspotenzial ist in erheblichem Maße vom Standort und der speziellen Nutzungsform wie Anbausystem, Fruchtfolge sowie den N-Entzügen abhängig (HENNINGS & SCHEFFER 2000). Gängigen Bewertungskriterien zur Umweltbelastung durch N-Austräge aus der Landwirtschaft sind die N-Bilanzierungs- und die N_{\min} -Methode (GÄTH 1997).

N-Salden

Ein relativ guter Indikator für eine potenzielle N-Auswaschung scheint der N-Überschuss nach einer Bilanzierung zu sein (TAUBE & PÖTSCH 2001, WACHENDORF ET AL. 2006). Von 1990 bis 2003 lag der durchschnittliche N-Flächenbilanzüberschuss der Bundesrepublik bei $83 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (BACH & FREDE 2005). In Wassereinzugsgebieten fand GÄTH (1997) auf leichten Standorten mit hoher Sickerwassermenge einen engen positiven Zusammenhang zwischen N-Saldo und NO_3 -Konzentration im Quellwasser. Hohe Bilanzüberschüsse, die laut GÄTH (1997) sowie HENNINGS & SCHEFFER (2000) oft mit einem Silomaisanbau einhergehen, konnten in den eigenen Ergebnissen nicht bestätigt werden. Die hohen Bilanzüberschüsse beruhen meist darauf, dass ein Maisanbau in viehhaltenden Betrieben oft mit einer intensiven Gülledüngung einhergeht (GÄTH 1997, HENNINGS & SCHEFFER 2000, THIEMT 2002, GRIGNANI ET AL. 2007).

Im Mittel der Standorte waren sowohl in der HFN als auch in der ZKN die N-Salden von Mais und Sonnenblumen negativ, was auf die restriktive Düngung und die hohen N-Entzüge zurück zu führen ist. In **Tab. 34** sind die Ergebnisse der N-Salden und der Nachernte- N_{\min} -Gehalte im Boden von Mais und Sonnenblumen beider Anbausysteme auf allen Standorten dargestellt. Die

positiven N-Salden einzelner Standorte lagen unterhalb der von GÄTH (1997) angegebenen tolerierbaren Grenze zwischen 30 und 50 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Die N-Salden von Mais und Sonnenblumen nach WR waren in der ZKN mit - 22 und - 40 kg N ha⁻¹ a⁻¹ lediglich 2 kg N ha⁻¹ a⁻¹ höher bzw. 5 kg N ha⁻¹ a⁻¹ niedriger und damit im Mittel der Standorte ähnlich wie in der HFN, was den höheren N-Entzügen zuzuschreiben ist. An den Standorten mit den höchsten Ertragsvorteilen der ZKN (*Dornburg, Gülzow*) waren die N-Bilanzen der ZKN niedriger als in der HFN. Die N-Salden der ZKN aus den eigenen Ergebnissen lagen niedriger als die von MURDOCK & WELLS (1978) in einer ZKN bei mittlerer N-Düngung ermittelten N-Salden von + 40 kg bei Mais nach Gerste. Bei mehrjähriger höherer Zufuhr als Abfuhr erhöht sich die potenzielle Auswaschung durch größere Mengen anorganischen Stickstoffs. Ein Teil des überschüssigen Stickstoffs reichert sich im Boden an, wobei nach 11-jährigen Versuchen von GRIGNANI ET AL. (2007) 57% gasförmig oder im Sickerwasser verloren gingen.

Tab. 34: N-Salden und Nachernte N_{min}-Werte von Mais und Sonnenblumen in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN) sowie den jeweiligen Differenzen von HFN und ZKN im Mittel der Versuchsjahre.

	Mais						Sonnenblumen					
	N-Saldo			Nachernte-N _{min}			N-Saldo			Nachernte-N _{min}		
	HFN	ZKN	Diff.	HFN	ZKN	Diff.	HFN	ZKN	Diff.	HFN	ZKN	Diff.
Dornburg	+ 9	+ 1	- 8	108	46	- 62	- 10	- 32	- 22	55	30	- 25
Gülzow	- 14	- 50	- 36	91	55	- 37	- 16	- 80	- 64	32	45	+ 13
H. Düsse	- 22	- 24	- 1	23	17	- 6	- 41	- 41	0	27	19	- 8
Rauisch.	+ 39	+ 6	- 33	40	43	+ 3	+ 9	- 40	- 50	40	22	- 18
Straubing	-111	- 99	+ 12	32	34	+ 2	- 92	- 84	+ 7	26	31	+ 4
Werlte	- 47	+ 3	+ 50	56	51	- 5	- 79	+ 14	+ 93	76	20	- 56
Witzenh.	- 23	+ 10	+ 32	64	61	- 3	- 14	- 13	+ 1	31	23	- 8
Mittel	- 24	- 22	+ 2	59	44	- 15	- 35	- 40	- 5	41	27	- 14

Die Vergleichbarkeit von N-Überschüssen setzt vergleichbare Bilanzierungsmethoden voraus, aber selbst bei gleicher Methodik verbleibt ein Fehler von ±10% (BACH & FREDE 2005, GUTSER 2006). Negative N-Bilanzen über mehrere Jahre führen hingegen zur einer N-Verarmung des Bodens (GRIGNA-

NI ET AL. 2007). Die eigenen Ergebnisse belegen, dass bei einer kontinuierlichen ZKN relativ hohe N-Mengen appliziert werden können, ohne dass Bilanzüberschüsse auftreten, was von MURDOCK & WELLS (1978), LEWIS & PHILLIPS (1983) sowie HEGGENSTALLER ET AL. (2008) bestätigt wurde.

N_{min}-Werte

Wie aus **Tab. 34** sowie **Abb. 49** ersichtlich wird, konnten an den Standorten mit geringen Ertragspotenzialen und damit N-Entzügen der HFN, die N_{\min} -Werte nach der Ernte und damit das N-Verlagerungsrisiko bei Mais (*Dornburg, Gülzow*) und Sonnenblumen (*Dornburg, Werlte*) durch den Anbau in der ZKN erheblich gesenkt werden. Leichte Standorte (*Gülzow, Werlte*) weisen aufgrund ihrer bodenphysikalischen Verhältnisse und einer damit einhergehenden niedrigen nFKWe generell ein hohes Verlagerungsrisiko auf (HENNING & SCHEFFER 2000). Auf Standorten mit guten Bodeneigenschaften lagen die N_{\min} -Werte nach der Ernte durch die hohen N-Entzüge in beiden Anbausystemen auf einem geringen Niveau und konnten durch den Anbau in der ZKN lediglich leicht gesenkt werden (*Haus Düsse, Witzzenhausen*) bzw. sie stiegen leicht an (*Straubing*). Durch die hohen N-Entzüge in beiden Anbausystemen lagen an diesen Standorten (*Haus Düsse, Straubing*) die über alle Varianten gemittelten Herbst- N_{\min} -Gehalte unter den Frühjahrs-Werten (vgl. **Abb. 43**, **Abb. 44**). Die N_{\min} -Werte lagen im Mittel der Standorte und Jahre nach der Ernte bei Mais und Sonnenblumen in der ZKN um 15 (- 18%) und 14 kg N ha⁻¹ (- 23%) niedriger, was durch Untersuchungen von HEGGENSTALLER ET AL. (2008) gestützt wird, die bei einer ZKN im Herbst 25% geringere N_{\min} -Gehalte im Boden vorfanden als in einer HFN. Im Jahr 2006 verringerte die ZKN bei Mais die N_{\min} -Werte im Vergleich zur HFN signifikant um 47% und in den Jahren 2007 und 2008 um 8% und 15% (vgl. **Abb. 45**). Bei Sonnenblumen war es umgekehrt. Im Jahr 2006 lagen hier sogar 13% höhere Werte in der ZKN vor, während in den Jahren 2007 und 2008 die N_{\min} -Werte nach der Ernte der Zweitkulturen 37% und 34% niedriger lagen als in der HFN, wobei hier keine signifikanten Unterschiede feststellbar waren (vgl. **Abb. 45**).

Ein geringeres Auswaschungspotenzial der ZKN gegenüber der HFN wurde somit durch die N_{\min} -Methode nachgewiesen. **Die Arbeitshypothese Nr. 9: »Durch die ZKN wird die Auswaschungsgefahr von Stickstoff vermindert«**, kann daher bestätigt werden.

In den eigenen Untersuchungen ist die deutliche Verminderung des N_{\min} -Wertes durch die ZKN zum einen auf die restriktive Düngung und zum anderen auf die hohen N-Entzüge durch die spätreifen Sommerungen der ZKN zurück zu führen. Diese produzieren mehr Biomasse und entziehen dem Boden bis in den Herbst Stickstoff und tragen so zu einer Minimierung der Auswaschungsverluste bei (SCHEFFER 2000, 2003b, WAGNER 2006, AMON ET AL. 2007). In **Abb. 62** ist der Verlauf der Biomasseproduktion sowie der N-Verluste in Anlehnung an HEGGENSTALLER ET AL. (2008) grafisch dargestellt. In der HFN besteht besonders im Spätsommer oder Herbst die Gefahr einer verstärkten Auswaschung durch eine N-Freisetzung aus dem Boden oder durch eine Gülleapplikation (MARY 1997, WACHENDORF ET AL. 2006). Auf sandigen Böden konnten WACHENDORF ET AL. (2006) einen Zusammenhang zwischen N_{\min} -Gehalt im Boden zur Ernte und N-Auswaschung feststellen. Da die überwiegende Menge des Sickerwassers im Winterhalbjahr auftritt, kommt es besonders zwischen Oktober und April zu N-Austrägen (HENNING & SCHEFFER 2000). Dem kann in den HFN durch die Integration von Zwischenfrüchten entgegengewirkt werden. Zwischenfrüchte können durch die N-Aufnahme, aber auch über die Verminderung der Sickerwassermenge die N-Auswaschungsgefährdung vermindern (BERENDONK 1987, BERGER 1992, SCHRÖDER ET AL. 1996, ARONSSON & TORSTENSSON 1998, HENNING & SCHEFFER 2000, MCVAY 2006). Daher wurde in der HFN in den eigenen Untersuchungen die Zwischenfrucht Senf als Zwischenfrucht angebaut. BERGER (1992) bestätigt, dass die Herbst- N_{\min} -Gehalte im Boden durch einen Zwischenfruchtanbau minimiert werden können, was jedoch keine Sicherheit für die Verhinderung von hohen winterlichen N-Verlagerungen durch erneute Mineralisationsvorgänge gibt. In Untersuchungen von RICHTER & SCHMALER (1995) ging die vor Winter gespeicherte N-Menge in Ölrettich durch ein Abfrieren auf 34% zurück, wohingegen WRü trotz Blattverlusten keinen Stick-

stoff einbüßte, was wohl einer N-Aufnahme an milden Wintertagen zuzuschreiben war. Die NO_3 -Konzentrationen im Bodenwasser waren unter WRü signifikant geringer als unter Ölrettich (RICHTER & SCHMALER 1995). Dies kann durch die eigenen Ergebnisse gestützt werden.

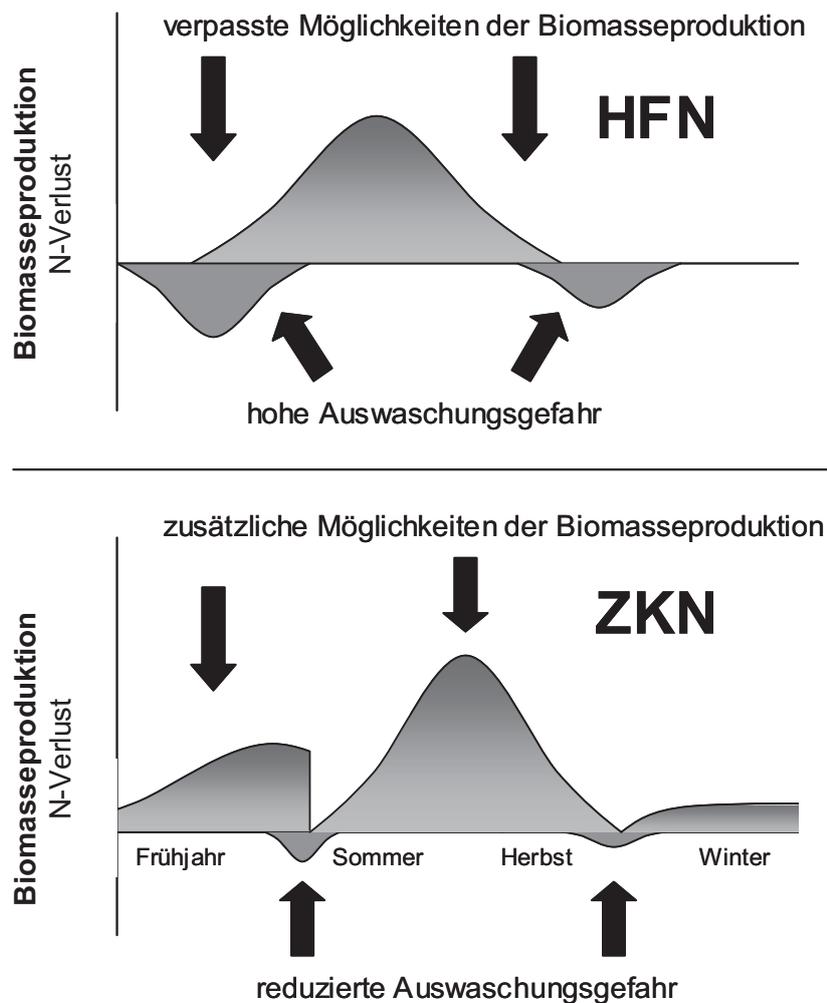


Abb. 62: Schematische Darstellung der Biomasseproduktion und der potenziellen Auswaschungsgefahr in der Hauptfrucht- (HFN) und Zweikultur-Nutzung (ZKN). (Quelle: Heggenstaller et al. 2008, verändert)

Der durchschnittliche N_{\min} -Gehalt der ZKN lag im Frühjahr (in den Erstkulturen) bei 33 kg N ha^{-1} und damit 48% niedriger als in der HFN (im abgefrorenen Senf) vor der Aussaat von Mais und Sonnenblumen (vgl. **Abb. 48**). Dies weist darauf hin, dass die Erstkultur WR über den Winter mehr Stickstoff

entzogen hat als die Zwischenfrucht Senf. Auch BERGER (1992) sowie RICHTER & SCHMALER (1995) bestätigen, dass winterharte Zwischenfrüchte Stickstoff sicherer konservieren als abfrierende Zwischenfrüchte. Des Weiteren vermindern winterharte Zwischenfrüchte bzw. eine Erstkultur laut SHEPHERD & WEBB (1999) die Sickerwassermenge. Dadurch wird die absolute Auswaschungsmenge reduziert, die N-Konzentration im Sickerwasser kann jedoch ansteigen. Zudem können winterharte Zwischenfrüchte bei Frühjahrstrockenheit einen Wassermangel bei folgendem Mais induzieren (MCVAY 2006).

Auch in Untersuchungen von HEGGENSTALLER ET AL. (2008) nahm die Erstkultur Triticale bis Mitte April bereits 15 kg N ha^{-1} auf und die Frühjahr- N_{\min} -Mengen lagen 17 kg N ha^{-1} (- 34%) unter den Werten einer HFN, wobei hier keine Zwischenfrucht angebaut wurde. Werden in einer HFN Zwischenfrüchte angebaut, müssen die gespeicherten Nährstoffe bei der Gründüngung selbst und im Düngemanagement berücksichtigt werden (SCHRÖDER 2005), was sich durch den hohen Einfluss der Witterung bei der Nährstofffreisetzung als schwierig gestaltet. Mineralisationsvorgänge können bereits bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt und damit auch im Winter ablaufen (ENGELS 1993b). SCHRÖDER ET AL. (1996), ARONSSON & TORSTENSSON (1998) sowie SHEPHERD & WEBB (1999) fanden nach einem mehrjährigen Zwischenfruchtanbau erhöhte N-Verluste, was sie auf eine Erhöhung des labilen N-Pools im Bodens zurückführten. Die in den eigenen Untersuchungen physiologisch jungen Bestände der Zwischenfrucht Senf wiesen mit einem mittleren N-Gehalt von 2,5% sehr hohe N-Konzentrationen auf (vgl. **Abb. 52**). Damit geht ein enges C/N-Verhältnisse einher, was zu einer raschen Umsetzung und Förderung von unerwünschten Mineralisationsvorgängen beiträgt (BERENDONK 1987). So können neben winterlichen Auswaschungen, welche durch den Herbst- N_{\min} -Wert abgeschätzt werden, auch im Frühjahr hohe Auswaschungsverluste auftreten. Durch die Bodenbearbeitung bei Sommerungen wie Mais werden zudem Mineralisationsprozesse gefördert, ohne dass die Pflanzen durch ihre langsame Jugendentwicklung in der Lage sind, ausreichende N-Mengen aufzunehmen. Die jungen Maispflanzen zeichnen sich ebenso durch geringe Transpirationsraten und damit Wasserentzügen aus, so

dass ein Großteil der oft hohen Frühjahrsniederschläge inklusive der mobilen N-Verbindungen versickert (AUFHAMMER ET AL. 1991, HUGGER 1992). Die Erstkulturen einer ZKN nehmen auch im Herbst, Winter und Frühjahr Stickstoff auf und hinterlassen Erntereste lediglich in Form von Wurzeln und Stoppeln, welche einer langsameren Umsetzung unterliegen (BALESDENT & BALABANE 1996, HEGGENSTALLER ET AL. 2008). In Untersuchungen von HEGGENSTALLER ET AL. (2008) entzog die Erstkultur Triticale vom Frühjahr bis zur Ernte im Juni bereits 84 kg mehr Stickstoff als die Hauptfrucht Mais. Die N-Aufnahme von Mais als Hauptfrucht endet zudem bereits Mitte August (HUGGER 1992, SCHRÖDER ET AL. 1997).

Dem in der ZKN durch die spätere Saat tendenziell höherem Mineralisationsvermögen wird durch eine Direktsaat entgegengewirkt. Die kritische Jugendentwicklung und damit auch die N-Aufnahme werden in einer ZKN aufgrund der höheren Temperaturen zügiger durchschritten als in der HFN.

Nach HENNINGS & SCHEFFER (2000) sind die tolerierbaren N_{\min} -Gehalte im Herbst von der Sickerwassermenge und der Bodentextur abhängig und liegen zwischen 15 und 40 kg ha⁻¹. Je geringer die Sickerwassermenge und je sandiger der Boden ist, desto weniger mineralischer Stickstoff kann im Boden toleriert werden. Die Nachernte- N_{\min} -Werte des Maisanbaus in der HFN lagen im Mittel der Standorte in allen drei Versuchsjahren mit Werten zwischen 41 und 68 kg N ha⁻¹ bereits über dem Grenzwert von 40 kg. Durch einen Anbau in der ZKN konnten die N_{\min} -Werte in zwei der drei Versuchsjahre auf 32 und 38 kg N ha⁻¹ gesenkt werden. Bei den Sonnenblumen lagen in der HFN lediglich die N_{\min} -Werte der letzten beiden Versuchsjahre mit 42 und 43 kg N ha⁻¹ etwas über dem Grenzwert. Durch einen Anbau in der ZKN lagen die N_{\min} -Werte nach der Ernte in allen drei Jahren unter 30 kg N ha⁻¹. GRAß (2003) konnte die Senkung des NO₃-Austrages durch eine ZKN bestätigen.

Ein klarer Zusammenhang zwischen N-Bilanz und N_{\min} -Methode auf den einzelnen Standorten war nicht erkennbar (vgl. **Tab. 34**). Auch ANTONY ET AL. (2001) konnten keinen Zusammenhang zwischen N-Bilanz und Herbst-

N_{\min} feststellen. Das ist darauf zurück zu führen, dass der Herbst N_{\min} -Wert auch aus dem Bodenvorrat freigesetzten Stickstoff beinhaltet. Des Weiteren handelt sich um eine punktuelle Beprobung, welche stark Witterungsabhängig ist. Laut GÄTH (1997) ist die Bilanzmethode auf auswaschungsgefährdeten Standorten besser geeignet als die arbeits- und kostenintensivere N_{\min} -Methode, da hier eine rasche N-Verlagerung unterhalb der N_{\min} -Beprobung von 90 cm stattfinden kann. Allerdings berücksichtigt die Bilanzierung nicht den Jahresverlauf der N-Aufnahme bzw. Auswaschung. Nichtsdestotrotz ist eine ausgeglichene Bilanz Voraussetzung für eine langfristige Konstanthaltung des Boden-N-Gehaltes (GÄTH 1997).

Einfluss der Düngung

Die N-Auswaschungsgefahr steigt in Abhängigkeit von dem N-Entzug mit der Düngung an. In Ergebnissen von MÖLLER (1999) verringerte sich die N-Fracht eines leichten Standortes durch eine reduzierte N-Düngung um 20%. Eine Reduktion bzw. Teilung der N-Düngung bei gut mit Stickstoff versorgten Böden ist sinnvoll, kann aber unter Umständen nicht ausreichen, um eine N-Auswaschung zu reduzieren (MACDONALD ET AL. 1989). Dies wird dadurch gestützt, dass in den eigenen Untersuchungen trotz negativer N-Salden in der HFN an den Standorten *Dornburg*, *Gülzow* und *Werlte* hohe N_{\min} -Werte von über 50 kg N ha^{-1} nach der Ernte auftraten (vgl. **Tab. 28**). Entsprechendes galt für die N_{\min} -Werte nach der Ernte der Zweitkulturen im zweiten und dritten Versuchsjahr. Laut JOHNSTON & JENKINSON (1989), MACDONALD ET AL. (1989), ADDISCOTT ET AL. (1991), sowie KÖHLER ET AL. (2006) hat eine Reduzierung der N-Düngung lediglich einen geringen Effekt auf die N-Auswaschung, was diese auf die stark verminderten Erträge und damit N-Entzüge sowie die Boden-N-Nachlieferung zurückführen. Diese Beobachtungen wurden auch von anderen Autoren bestätigt, vernachlässigen jedoch Langzeiteffekte. Kleine jährliche N-Überschüsse können laut HUGGER (1992) sowie MARY (1997) durch kumulative Effekte durchaus bedeutsam sein. Dies wird durch die weltweit längsten Feldversuche gestützt, wo eine N-Düngung zur

Akkumulation von organischem Stickstoff im Boden beitrug (JOHNSTON & JENKINSON 1989), was die Auswaschungsgefährdung durch Mineralisationsvorgänge deutlich erhöhte. Durch reduzierte N-Düngergaben sind daher eher langfristig positive Effekte bezüglich verminderter N-Verlagerungen zu erwarten (KÖHLER ET AL. 2006). Laut JANZEN ET AL. (2003) kann durch eine angepasste N-Düngung eine N-Emission zumindest reduziert werden. Eine restriktive Düngung und damit die Einhaltung einer ausgeglichenen Bilanz, vor allem bei möglichst geringen N-Gehalten in den Ernteresten, ist entscheidend für eine Verminderung der Auswaschungsgefährdung. Andere pflanzenbauliche Maßnahmen, welche die Biomasseproduktion und damit den N-Entzug steigern, stellen jedoch bedeutsamere Parameter dar (BAESEL ET AL. 2008). Dazu gehört zum Beispiel eine ganzjährige Bodenbedeckung und eine möglichst gute Ausnutzung anderer Wachstumsfaktoren wie Wasser und Einstrahlung durch angepasste Anbausysteme (BAESEL ET AL. 2008). In der ZKN werden diese Faktoren intensiver genutzt und damit einer N-Auswaschung entgegen gewirkt.

In den eigenen Untersuchungen konnte oft ein negativer Zusammenhang zwischen Ertrag und Rest- N_{\min} nach der Ernte festgestellt werden. An den ertragreichsten Standorten *Straubing* und *Haus Düsse* lagen die N_{\min} -Werte im Mittel aller Varianten nach der Ernte unter den Frühjahrs- N_{\min} -Werten (vgl. **Abb. 43**, **Abb. 44**), was auf die hohen Erträge und damit N-Entzüge zurück zu führen ist. Die relativ ertragsschwachen Varianten mit WRü als Erstkultur hinterließen vor allem im dritten Versuchsjahr höhere Rest- N_{\min} -Mengen nach der Ernte als Varianten mit WR oder WR/WE als Erstkultur (vgl. **Abb. 45**). Noch deutlicher ist dies am Beispiel Sorghum zu sehen, welches im zweiten und dritten Versuchsjahr durch die sommerliche Witterung im Wachstum gehemmt wurde, was sich in sehr hohen N_{\min} -Werten im Boden nach der Ernte widerspiegelte (vgl. **Abb. 46**). BALÍK ET AL (2003) konnten in Langzeitversuchen mit unterschiedlicher Düngung bei Mais keine signifikanten Unterschiede in den N_{\min} -Gehalten feststellen, was diese durch die relativ hohen Standardabweichungen erklären. Parallele Lysimeter-Untersuchungen wiesen auf eine erhöhte N-Auswaschung durch eine mineralische Düngung

hin, die durch eine N_{\min} -Beprobung nicht ermittelt werden konnte. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen BENKE & SCHNACK (1995) sowie ANGER (2002) bei beweidetem Grünland. In Untersuchungen von WIESLER & HORST (1992) wurden durch höhere N-Entzüge im Silomaisanbau die Nachernte- N_{\min} -Mengen und damit die Auswaschungsgefahr reduziert. Neben anorganischen N-Formen können auch organische N-Verbindungen ausgewaschen werden (SIEMENS & KAUPENJOHANN 2002), was von BALÍK ET AL. (2003) allerdings nicht bestätigt wurde.

In Kapitel 4.3 wurden bereits Vorteile einer Fruchtfolgegestaltung erläutert, wobei die einzelnen Kulturen einer ZKN als Fruchtfolgeglieder betrachtet werden können. In Versuchen von BAKHSH ET AL. (2001) konnte durch eine Fruchtfolge im Vergleich zu einer Mais Monokultur der Nachernte NO_3-N um 25% bzw. 33% bei Harnstoff bzw. Schweinegülleapplikation gesenkt werden. LÓPEZ-BELLIDO GARRIDO & LÓPEZ-BELLIDO (2001) bestätigen höhere Rest- N_{\min} -Mengen nach einer Weizen-Monokultur im Vergleich zu zweijährigen Fruchtfolgen und führen dies auf eine verringerte N-Nutzungseffizienz zurück. In Untersuchungen von KARPENSTEIN-MACHAN ET AL. (1992) wurden durch eine ZKN die Rest- N_{\min} -Mengen deutlich vermindert, wobei vor allem Sorghum als Zweitkultur dem Boden auch im Herbst noch viel Stickstoff entzogen konnte, da dieser physiologisch jünger war. LEMAIRE ET AL. (1996) weisen darauf hin, dass Sorghum im Vergleich zu Mais höhere Mengen Stickstoff aufnimmt und daher die Auswaschungsgefährdung reduziert. Entscheidend ist jedoch der absolute N-Entzug, der erheblich von der Biomasseproduktion abhängt, welche bei Mais unter guten Wachstumsbedingungen besser ist (LEMAIRE ET AL. 1996). Ergebnisse aus 3-jährigen Feldversuchen von WIESLER & HORST (1992) haben gezeigt, dass Maissorten mit hohen N-Aufnahmekapazitäten geringe Rest- N_{\min} -Mengen im Boden hinterlassen und damit die Auswaschungsgefahr vermindern.

In den eigenen Versuchen waren die N_{\min} -Gehalte nach der Ernte der Zweitkulturen bei WR/WE als Erstkultur in allen drei Versuchsjahren tendenziell geringer als bei WR als Erstkultur (vgl. **Abb. 45**), was durch Ergebnisse

von KARPENSTEIN-MACHAN & STÜLPNAGEL (2000) bestätigt wurde. In den eigenen Versuchen war hierbei jedoch lediglich ein Trend mit keinerlei statistischer Absicherung zu erkennen. Außerdem wurde der Erstkultur WE/WR eine geringere N-Düngermenge verabreicht und der Leguminosenanteil zur Ernte lag mit 1-18% auf einem sehr niedrigen Niveau. Auch der Gesamtertrag war etwas geringer, was auf weniger Erntereste schließen lässt. Dies könnte ebenfalls für die verminderten Nachernte- N_{\min} -Werte der Zweitkultur verantwortlich sein.

Gasförmige N-Verluste

Auch gasförmige N-Austräge des Bodens in Form von elementarem Stickstoff (N_2)- oder Lachgas (N_2O)-emissionen können in größeren Mengen vor allem durch eine Düngergabe zu ungünstigen Zeitpunkten entstehen (AULAKH ET AL. 1982, YAMULKI ET AL. 1995, SMITH 1997). Die Höhe der N_2O -Emission ist abhängig von dem Verhältnis zwischen Produktion und Konsum von N_2O durch Denitrifikation (Umsetzung von NO_3 zu N_2O und N_2) und Nitrifikation (Umsetzung von NH_4 zu NO_3 und N_2O). Diese mikrobiologischen Aktivitäten finden bereits bei Temperaturen unter $10^\circ C$ statt (PROSSER & COX 1986, DORLAND & BEAUCHAMP 1991), bei denen das Pflanzenwachstum und damit die N-Aufnahme niedrig sind. Ist der Bodenvorrat an anorganischem Stickstoff zu dieser Zeit z.B. durch eine Düngung hoch, kann es zu beträchtlichen N_2O -Akkumulationen kommen. Diese wird außerdem durch niedrige O_2 - und hohe H_2O -Gehalte im Boden gefördert (AULAKH ET AL. 1992). So kann auch eine Bodenverdichtung durch landwirtschaftlichen Verkehr über eine Verminderung des O_2 -Gehaltes im Boden zu einer verstärkten N_2O -Entstehung beitragen (BAKKEN ET AL. 1987). Keinen nennenswerten gasförmigen N_2O -Austrag fanden hingegen JØRGENSEN ET AL. (1997) bei dem Anbau von Energie-Roggen, wobei die Bodenfeuchte in den Versuchsjahren relativ gering war. Neben dem N-Verlust ist das Potenzial zur Klimaerwärmung von N_2O etwa 300-fach höher als das von CO_2 (ALBRITTON ET AL. 1995, FLACH ET AL. 1997, KASIMIR-KLEMEDTSSON ET AL. 1997). Vergleicht man die

Klimawirksamkeit des freigesetzten N_2O und die Einsparung von CO_2 im Energiepflanzenanbau, so sind die N_2O -Emissionen unbedeutend (JØRGENSEN ET AL. 1997). Einer hohen N_2O -Akkumulation kann vor allem durch eine sachgerechte Bewirtschaftung entgegengewirkt werden. Die Lebensspanne von N_2O in der Atmosphäre beträgt ca. 120 Jahre (PRATHER ET AL. 1995). Die Verweildauer von CO_2 hingegen kann nicht beziffert werden, da dieses nicht chemisch abgebaut wird und damit unschädlich gemacht werden kann, sondern atmosphärische, terrestrische und marine Reservoirs mit großen Unterschieden in der Verweildauer durchläuft bis sich ein neues Gleichgewicht einstellt (SCHIMEL ET AL. 1995).

4.6 Aussichten für die Zweikultur-Nutzung in Deutschland

Durch die zu erwartende weitere Erhöhung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre steigt der stomatäre Widerstand für Wasser, woraus eine geringere Transpiration resultiert (MARK & TEVINI 1997). Dies könnte einerseits den Wasserstatus unter Trockenheit verbessern, andererseits aber auch den Oberflächenabfluss erhöhen (BURKART ET AL. 2004). Durch die Klimaveränderung steigt jedoch auch die Verdunstung an und extreme Witterungsverhältnisse wie Starkregen nehmen zu, was den positiven Effekt einer verminderten Transpiration nach BURKART ET AL. (2004) überkompensieren dürfte. Durch die mit der Klimaerwärmung verbundenen höheren Bodentemperaturen sind verstärkte CO_2 -Emissionen aus der organischen Bodensubstanz zu erwarten (SAUERBECK 1993, KASIMIR-KLEMEDTSSON ET AL. 1997). Damit sind jedoch steigende Erträge und höhere Erntereste zum Humusaufbau verbunden (SAUERBECK 1993). FOCK ET AL. (1979) belegten, dass durch eine Steigerung der CO_2 -Konzentration die Photosynthese von C_3 -Pflanzen gefördert wird und die Photorespiration unverändert bleibt, was zu einer höheren Netto-Photosynthese führt. Auch die Ergebnisse von CANVIN ET AL. (1980) sowie MARK & TEVINI (1997) belegen eine Unterdrückung der Photorespiration durch steigende CO_2 -Gehalte und damit eine Steigerung der Nettophotosynthese von

C₃-Pflanzen, während C₄-Pflanzen nicht mit einer höheren Photosynthese reagieren. Mit steigenden Temperaturen geht jedoch auch eine erhöhte Photorespiration von C₃-Pflanzen einher (FOCK ET AL. 1979, BERRY & BJÖRKMANN 1980), während C₄-Pflanzen durch höhere Temperaturen gefördert werden (MARK & TEVINI 1979, BERRY & BJÖRKMANN 1980, SAMARAS ET AL. 1988, BAEUMER 1992). So deuten Modellrechnungen darauf hin, dass die Ertragssteigerung von Mais zu einem erheblichen Teil der Witterung und damit der Klimaerwärmung zuzuschreiben und der Beitrag der Genetik am Ertragswachstum gering ist (HERRMANN ET AL. 2004). Die Klimaveränderung hat bereits begonnen und wird weiter fortschreiten, was negative und positive Folgen nach sich zieht. Gesamtwirtschaftliche Berechnungen von CHANGNON (1999) über die Kosten und Nutzen von El Niño in den USA belegen z.B., dass der wirtschaftliche Nettogewinn stark positiv ausfiel. Die Ausweitung der Vegetationsperiode in Europa ist im Wesentlichen auf den zeitigeren Vegetationsbeginn zurück zu führen. Im Mittel verlängerte sich die Vegetationsperiode in Europa in den letzten 30 Jahren signifikant ($p < 0,01$) um 11 Tage (CHMIELEWSKI 2004). Diese Entwicklung wird weiter zunehmen (CHMIELEWSKI ET AL. 2004) wobei eine Erwärmung um 1 Kelvin zu einer Verfrühung des Vegetationsbeginns um eine Woche führt (CHMIELEWSKI & RÖTZER 2001). Auch in den drei Versuchsjahren war dieser Trend im Vergleich zum mehrjährigen Mittel festzustellen (vgl. **Abb. 9**, **Abb. 10**). Die ZKN eignet sich hervorragend für die zu erwartenden Veränderungen wie eine verlängerte Vegetationsperiode und steigende Temperaturen. Durch die Ernte von zwei Kulturen pro Jahr wird die Vegetationsperiode besser ausgenutzt und mit extremen Witterungsereignissen einhergehende Ertragsausfälle können durch die höhere Ertragssicherheit leichter ausgeglichen werden. Hierzu können auch Arten- bzw. Sortenmischungen einen Beitrag leisten (FRANCIS 1989). Die ZKN ist ein umweltverträgliches Anbausystem, welches der CO₂-Freisetzung entgegenwirkt und die Möglichkeit einer Diversifizierung der Agrarlandschaft bietet. Durch einen weiteren Anstieg der CO₂-Konzentration verändern sich Artenzusammensetzungen und damit ganze Ökosysteme (BRADLEY & PREGITZER 2007). REICH ET AL. (2004) stellten für Grünland fest, dass durch einen An-

stieg der CO₂-Gehalte in der Atmosphäre die Biomasse umso stärker ansteigt, je artenreicher bzw. je mehr funktionale Gruppen (z.B. Leguminosen, C₃-Gräser, C₄-Gräser) ein Bestand aufweist. Für terrestrische Ökosysteme hätte dementsprechend eine Verringerung der Diversität weit reichende Folgen für die Biomasseakkumulation und damit für die globale Klimaveränderung (REICH ET AL. 2004).

5 Zusammenfassung

Die Zielsetzung dieses dreijährigen Feldversuches (2005-2008) lag in der Bewertung der Zweikultur-Nutzung (ZKN) auf sieben Standorten in Deutschland gegenüber der üblichen Hauptfrucht-Nutzung (HFN). In der ZKN wurden nach der Ganzpflanzenernte winterannueller Erstkulturen, sommerannuelle Zweikulturen angebaut, so dass zwei Ernten im Jahr erfolgten. In der HFN wurden diese Kulturen als winter- oder sommerannuelle Hauptfrüchte mit Senf als Zwischenfrucht angebaut. Die Jahreserträge der Anbausysteme ergaben sich in der HFN aus der Summe von Zwischen- und Hauptfrucht und in der ZKN aus Erst- und Zweikultur. Im Mittel der Standorte und Versuchsjahre wurden durch den Anbau von Mais und Sonnenblumen in der ZKN 2,1 (+ 10%) und 5,6 t TM ha⁻¹ (+ 38%) mehr geerntet als in der HFN. Die Witterung der Versuchsjahre und hierbei vor allem die Temperatursummen während der Vegetation der Sommerungen hatten einen hohen Einfluss auf den Erfolg der ZKN. Bei Mais zeigten sich in dem überdurchschnittlich heißen Jahr 2006 um 27% signifikant höhere Erträge als in der HFN, während die Sonnenblumenerträge der ZKN in den Jahren mit kühlen spätsommerlichen Bedingungen 2007 und 2008 signifikante Mehrerträge von 44% und 46% lieferten. Sonnenblumen wiesen ein geringeres Ertragspotenzial auf, wurden als C₃-Pflanzen jedoch weniger durch die kühle spätsommerliche Witterung der beiden letzten Versuchsjahre beeinträchtigt als die wärmebedürftige C₄-Pflanze Mais. Der Vorteil der ZKN ist generell auf die bessere Ausnutzung der Vegetationsperiode durch die Erstkulturen im Frühjahr und durch die spätreifen Zweikulturen im Herbst zurück zu führen. Damit werden nicht speicherbare Wachstumsfaktoren wie Strahlung, Wärme, Wasser und Nährstoffe effektiver genutzt als in der HFN.

Durch die hohe Ertragsstabilität der Erstkulturen konnten die relativ starken Schwankungen der Zweikulturen ausgeglichen werden, so dass in der ZKN generell von einer hohen Ertragssicherheit ausgegangen werden kann. Dies zeigte sich besonders auf Standorten mit geringen Jahresniederschlägen

und Sommertrockenheit und führte daher auf diesen Standorten (*Dornburg, Gülzow*) zu den höchsten Ertragssteigerungen von WR und Mais in der ZKN. Deutlich überlegen war die ZKN gegenüber der HFN, wenn hohe Ertragspotenziale der Winterungen mit einer langen Wachstumsperiode und hohen Temperaturen bis in den Herbst zusammentrafen. Daher war an dem Standort mit relativ kurzer Vegetationsperiode, geringen Erträgen der Winterungen und durch eine hohe Globalstrahlung sehr hohen Maiserträgen der HFN (*Straubing*) kein Ertragsvorteil der ZKN erkennbar. Auch an dem Standort mit den schlechtesten Bodeneigenschaften (*Werlte*) war der Ertragsvorteil der ZKN trotz sehr hoher Niederschläge eher gering, was wohl zum Teil auf einen Nährstoffmangel zurückgeführt werden kann. Der Anbau von Gemengen als Erst- bzw. Zweitkultur ermöglicht ebenfalls eine höhere Ertragssicherheit. Bei den Erstkulturen kann durch die Integration von Leguminosen eine N-Fixierung erfolgen und zugleich der Vorfruchtwert verbessert werden. Die als Zweitkulturen angebauten Mais/Sonnenblumen-Gemenge führten im Mittel der Standorte und Jahre zu einer Effizienzsteigerung gegenüber den Reinsaatens von 10%. Die späte Aussaat der Zweitkulturen Anfang Juni eröffnet die Möglichkeit, wärmebedürftige C₄-Pflanzen wie Sudangras, Sorghum oder Amarant zu integrieren. Amarant erwies sich hierbei als sehr ertragsinstabil. Dies ist vor allem auf die geringe Keimkraft kleiner Samen für die Durchdringung der Erdkruste zurück zu führen. Sudangras und Sorghum hingegen weisen bei ausreichend hohen Temperaturen sehr hohe Ertragspotenziale auf, wie das erste Versuchsjahr verdeutlichte. Für Standorte mit kühleren spätsommerlichen Bedingungen sind eher schnell abreifende C₃-Pflanzen wie Sonnenblumen und Hanf als Zweitkulturen empfehlenswert.

Bei einer energetischen Nutzung der Ganzpflanzen sind höhere Unkrautdichten tolerierbar, was einen Herbizideinsatz meist nicht notwendig macht. Da die Arten- und Sortenwahl relativ variabel ist, können genetische Ressourcen in Form von alten Sorten integriert und damit erhalten werden. Ein weiterer ökologischer Vorteil besteht in der Verminderung des N-Verlagerungspotenzials. Im Frühjahr waren die mineralischen N-Gehalte (N_{\min}) in der ZKN 48% geringer und nach der Ernte von Mais und Sonnenblumen im Herbst

jeweils 25% geringer als in der HFN. Die N-Salden lagen sowohl in der HFN als auch in der ZKN im negativen Bereich.

Durch die ZKN verbleiben die Stoppeln und Wurzeln von zwei Kulturen zum Humusaufbau und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit auf den Flächen, während die leichter abbaubare oberirdische Biomasse abgefahren wird. Durch diesen Eintrag von relativ langsam abbaubarer Biomasse, der annähernd ganzjährigen Bodenbedeckung sowie der reduzierten Bodenbearbeitung zur Saat der Zweitkulturen, ist eine Humusanreicherung durch die ZKN zu erwarten. Zudem spart die ZKN durch den Verzicht auf Pflanzenschutzmittel, eine angepasste Düngung und reduzierte Bodenbearbeitung zum einen direkt CO₂ ein, zum anderen kann durch den Humusaufbau und die Erhaltung natürlicher Vegetation die Kohlenstoffspeicherung erhöht werden.

Durch die in der Zukunft zu erwartende Klimaveränderung mit höheren Temperaturen, geringeren Niederschlägen und generell unsicheren Wachstumsbedingungen, werden die Ertragsvorteile der ZKN weiter an Bedeutung zunehmen.

Durch eine ZKN mit der entsprechenden Anpassung an die jeweiligen Standorteigenschaften können Energiepflanzen ohne negative Folgen für die Umwelt produziert werden. Nährstoffauswaschung und Erosionsverluste können reduziert werden, zusätzlich kann sogar Kohlenstoff akkumuliert werden, die Bodenfruchtbarkeit steigt an und es können Lebensräume für eine höhere Agrarbiodiversität geboten werden.

1 Literatur

- Addiscott, T.M., Whitmore, A.P. & Powlson, D.S., 1991: Sources of nitrate leakage: arable farming. In: Farming, fertilizers and the nitrate problem. Addiscott et al. [eds.], p.92-109, CAB international, Wallingford.
- AGEE-Stat, 2009: Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, www.erneuerbare-energien.de (Zugriff: 17.01.10).
- Albritton, D.L., Derwent, R.G., Isaksen, I.S.A., Lal, M. & Wuebbles, D.J., 1995: Trace gas radiative forcing indices. In: Climate change 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. Houghton, L.G. et al. [eds.], p.205-231, Cambridge University Press, Cambridge.
- Amler, 2008: Beitrag zum Qualitäts- und Ertragspotential stress- und trockenheitstoleranter Sorten für Silo- und Energiemais bei optimaler Reife. *Gesunde Pflanzen* 60: 5-13.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K. & Gruber, L., 2007: Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield. *Agric., Ecosys. Environm.* 118: 173-182.
- Andrews, D.J., 1972: Intercropping with sorghum in Nigeria. *Exp. Agric.* 8: 139-150.
- Andrews, D.J. & Kassam, A.H., 1983: The importance of multiple cropping in increasing world food supplies. In: Multiple cropping. Stelly, M., [ed.], *American Society of Agronomy* 27: 1-10.
- Anger, M., 2002: Nitrate leaching from intensively and extensively grazed grassland measured with suction cup samplers and sampling of soil mineral-N. II. Variability of NO_3 and NH_4 values and degree of accuracy of the measurement methods. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165: 648-657.
- Angers, D.A., Voroney, R.P. & Côté, D., 1995: Dynamics of soil organic matter and corn residues affected by tillage practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1311-1315.
- Antony, F., Buttler, C. von, Fiedler, L., Gödecke, B., Hölscher, J., Löloff, A., Schülten, H. & Wacker, H., 2001: Grundwasser – Anwenderhandbuch für die Zusatzberatung Wasserschutz. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie [Hrsg.], Hildesheim.
- Argillier, O., Hébert, Y. & Barrière, Y., 1994: Statistical analysis and interpretation of line x environment interaction for biomass yield in maize. *Agonomie* 14: 661-672.

- Arias, S., DiMarci, O.N., Aello, M.S., Freddi, A.J. & Piazza, A.M., 2008: Crop production, plant fractions and *in situ* degradability of silages from different sorghum hybrids. *J. Anim. Vet. Adv.* 7: 1387-1393.
- Aronsson, H. & Torstensson, G., 1998: Measured and simulated availability and leaching of nitrogen associated with frequent use of catch crops. *Soil Use Manage.* 14: 6-13.
- Aufhammer, W. Kübler, E. & Becker, H.W., 1991: Stickstoffaufnahme und Stickstoffverlagerungspotential unter Maisbeständen. *Mais* 4/91: 30-32.
- Aulakh, M.S., Rennie, D.A. & Paul, E.A., 1982: Gaseous nitrogen losses from cropped and summer-fallow soils. *Canad. J. Soil Sci.* 62: 187-196.
- Aulakh, M.S., Doran, J.W. & Mosier, A.R., 1992: Soil denitrification – significance, measurement, and effects of management. *Adv. Soil Sci.* 18: 1-57.
- Azar, C., 2005: Emerging scarcities – Bioenergy-food competition in a carbon constrained world. In: *Scarcity and Growth Revisited: Natural Resources and the Environment in the New Millennium*. Simpson, R., et al. [eds.], p.98-119, Resources for the Future press, Washington.
- Azar, C., & Berndes, G., 1999: The implication of CO₂-abatement policies on food prices. In: *Sustainable agriculture and environment: Globalization and the impact of trade liberalization*. Dragun, A.K. & Tisdell, C.A. [eds.], p.153-170, Edward Elgar Publishing Ltd., England.
- Bach, M. & Frede, H. G., 2005: Methodische Aspekte und Aussagemöglichkeiten von Stickstoff-Bilanzen. Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft e.V. (FNL), Institut für Landwirtschaft und Umwelt (ilu) [Hrsg.], Bonn.
- Bacon, R.K., Cantrell, R.P. & Axtell, J.D., 1986: Selection for seedling cold tolerance in grain sorghum. *Crop Sci.* 26: 900-903.
- Baesel, J. P., Zimmermann, G. & Reents, H.J., 2008: Effects of genotype and environment on N uptake and partition in organically grown winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Germany. *Euphytica* 163: 347-354.
- Baeumer, K., 1990: Gestaltung der Fruchtfolge. In: *Integrierter Landbau*, Diercks, R. & Heitefuss, R. [Hrsg.], S.110-135, Verlagsunion Agrar.
- Baeumer, K., 1992: *Allgemeiner Pflanzenbau*. 3. Aufl., Ulmer, Stuttgart.
- Bakhsh, A., Kanwar, R.S., Karlen, D.L., Cambardella, C.A., Bailey, T.B., Moorman, T.B. & Colvin, T.S., 2001: N-management and crop rotation effects on yield and residual soil nitrate levels. *Soil Sci.* 166: 530-538.
- Bakken, L.R., Børresen, T. & Njøs, A., 1987: Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Soil Sci.* 38: 541-552.

- Bal, M.A., 2006: Effects of hybrid type, stage of maturity, and fermentation length on whole plant corn silage quality. *Turk. J. Vet. Anim. Sci.* 30: 331-336.
- Baldock, B.O., Higgs, R.L., Paulson, W.H., Jackobs, J.A. & Shrader, W.D., 1981: Legume and mineral fertilizer effects on crop yields in several crop sequences in Upper Mississippi Valley. *Agron. J.* 73: 885-890.
- Balesdent, J. & Balabane, M., 1996: Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biol. Biochem.* 28: 1261-1263.
- Balík, J., Černý, J., Tlustoš, P. & Zitková, M., 2003: Nitrogen balance and mineral nitrogen content in the soil in a long experiment with maize under different systems of N fertilization. *Plant Soil Environm.* 49: 554-559.
- Barber, S.A. 1971: Effect of tillage practice on corn (*Zea mays* L.) root distribution and morphology. *Agron. J.* 63: 724-726.
- Barber, S.A., 1972: Relation of weather to the influence of hay crops on subsequent corn yields on a Chalmers silt loam. *Agron. J.* 64: 8-10.
- Barber, S.A., 1979: Corn residue management and soil organic matter. *Agron. J.* 71: 625-627.
- Barnes, J.P. & Putnam, A.R., 1983: Rye residues contribute weed suppression in no-tillage cropping systems. *J. Chem. Ecol.* 9: 1045-1057.
- Baserga, U., 1998: Landwirtschaftliche CO-Vergärungs-Biogasanlagen. FAT-Bericht 512, Schweiz.
- Benke, M. & Schnack, G., 1995: Impact of defoliation system, frequency of defoliation, sward composition and N fertilization on soil mineral N on grassland. *Das Wirtschaftseigene Futter* 41: 208-218.
- Berger, G., 1992: Untersuchungen zur Wirkung des Zwischenfruchtanbaus auf die winterliche N_{\min} -Dynamik im Boden und auf die N-Konservierungsleistung unter den spezifischen Bedingungen der sandigen Böden des Nordostdeutschen Tieflandes. Diss., Berlin.
- Berendonk, C., 1987: Leistung verschiedener Zwischenfrüchte im Hinblick auf Futtergewinnung, Gründüngung und Nitratverlagerung im Boden. *Das Wirtschaftseigene Futter* 33: 275-286.
- Bergmann, W., 1993: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen: Entstehung, visuelle und analytische Diagnose, Bergmann, W. [Hrsg.], 3. Aufl., Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart.
- Berry, J. & Björkmann, O., 1980: Photosynthetic response and adaption to temperature in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31: 491-543.

- Berzsenyi, Z., Györfy, B. & Lap, D.Q., 2000: Effect of crop rotation and fertilization on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment. *Eur. J. Agron.* 13: 225-244.
- BMU, 2009. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, www.bmu.de (Stand: Juni 2009).
- Boehmel, C., Lewandowski, I. & Claupein, W., 2008: Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. *Agric. Syst.* 96: 224-236.
- Böhm, R., 1998: Urban bias in temperature time series – a case study for the city of Vienna, Austria. *Clim. Chang.* 38: 113-128.
- Bolsen, K.K., Moore, K.J., Coblenz, W.K., Siefers, M.K. & White, J.S., 2003: Sorghum silage. In: *Silage science and technology*. p.609-632, Al-Amoodi, L. [ed.], *Agronomy 42*, Soil Sci. Soc. Am., Madison Wisconsin, USA.
- Bonhomme, R., Derieux, M. & Edmaedes, G.O., 1994: Flowering of diverse maize cultivars in relation to temperature and photoperiod in multilocation field trials. *Crop Sci.* 34: 156-164.
- Bradley, K.L. & Pregitzer, K.S., 2007: Ecosystem assembly and terrestrial carbon balance under elevated CO₂. *Trends Ecol. Evol.* 22: 538-547.
- Braithwaite, R.J., 2002: Glacier mass balance: the first 50 years of international monitoring. *Prog. Phys. Geogr.* 26: 76-95.
- Bravo-F., P. & Uribe, E.G., 1981: Temperature dependance of the concentration kinetics of adsorption of phosphate and potassium in corn roots. *Plant Physiol.* 67: 815-819.
- Brown, R.H., 1987: A difference in N use efficiency in C₃ and C₄ plants and its implication in adaptation and evolution. *Crop Sci.* 18: 93-98.
- Bruce, R.R., Langdale, G.W. & Dillard, A.L., 1990: Tillage and rotation effects on characteristics of a sandy surface soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1744-1747.
- BSA, 2009: Bundessortenamt. www.bundessortenamt.de (Zugriff: 31.07.09)
- Buljovic, Z. & Engels, C., 2001: Nitrate uptake ability by maize roots during and after drought stress. *Plant Soil* 229: 125-135.
- Burkart, S., Manderscheid, R. & Weigel, H.J., 2004: Interactive effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations and plant available soil water content on canopy evapotranspiration and conductance of spring wheat. *Europ. J. Agron.* 21: 401-417.
- Buttlar, C. von, 1996: Erhaltung pflanzengenetischer Ressourcen über den Weg der energetischen Nutzung von Ganzpflanzen am Beispiel von Wintergerste. Diss., Universität Kassel, Cuvillier Verlag, Göttingen.

- Buttlar, H.-B. von, 1997: Wildpflanzenregulierung im Energiepflanzenanbau unter Verzicht auf synthetische Herbizide. Diss., Universität Kassel, Cuvillier Verlag, Göttingen.
- Cabelguenne, M., & Debaeke, P., 1998: Experimental determination and modelling of the soil water extraction capacities of crops of maize, sunflower, soya bean, sorghum and wheat. *Plant Soil* 202: 175-192.
- Callow J.A., Ford-Lloyd B.V. & Newbury H.J. [eds.], 1997. *Biotechnology and Plant Genetic Resources - Conservation and Use*. *Biotechnology in Agriculture* 19.
- Canvin, D.T., Berry, J.A., Badger, M.R., Fock, H. & Osmond, C.B., 1980: Oxygen exchange in leaves in the light. *Plant Physiol.* 66: 302-307.
- Changnon, S.A., 1999: Impacts of 1997-98 El Niño generated weather in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 80: 1819-1827.
- Chmielewski, F.-M. & Rötzer, T., 2001: Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agric. For. Meteorol.* 108: 101-112.
- Chmielewski, F.-M., 2004: Erste Anzeichen des Klimawandels in der Landwirtschaft. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 16: 87-88.
- Chmielewski, F.-M., Müller, A. & Küchler, W., 2004: Mögliche Auswirkungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, gefördert durch das SLfUG, Eigenverlag HU, 106 S.
- Christensen, L.A. & Magleby, R.S., 1983: Conservation tillage use. *J. Soil Water Conserv.* 38: 156-157.
- Chylek, P., Box, J.E. & Lesins, G., 2004: Global warming and the Greenland ice sheet. *Clim. Chang.* 63: 201-221.
- Claassen, P.A.M., Lier, J.B. van, Lopez Contreras, A.M., Niel, E.W.J. van, Sijtsma, L., Stams, A.J.M., Vries, S.S. de & Weusthuis, R.A., 1999: Utilization of biomass for the supply of energy carriers. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 52: 741-755.
- Colnenne, C., Meynard, J.M., Reau, R., Justes, E. & Merrien, A., 1998: Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Ann. Bot.* 81: 311-317.
- Cosper, H.R., 1983: Soil suitability for conservation tillage. *J. Soil Water Conserv.* 38: 152-155.
- Crabtree, R.J., Prater, J.D. & Mbolda, P., 1990: Long-term wheat, soybean, and grain sorghum double-cropping under rainfed conditions. *Agron. J.* 82: 683-686.
- Crasta, O.R., Cox, W.J. & Cherney, J.H., 1997: Factors effecting maize forage quality development in the northeastern USA. *Agron. J.* 89: 251-256.
- Curl, E.A., 1963: Control of plant diseases by crop rotation. *Bot. Rev.* 29: 413-479.

- Debruck, J & Rechart, I., 2004: Sudangras – ein Neuling unter den nachwachsenden Rohstoffen. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 16: 243-244.
- Dersch, G. & Nagl, H., 2001: Ertragspotential und Düngung von Amaranth (*Amaranthus* ssp.). Arbeitsgemeinschaft landwirtschaftlicher Versuchsanstalten (ALVA), Jahrestagung 2001, Wolfpassing.
- Deumlich, D., Glemnitz, M., Hufnagel, J., Wenkel, K.O. & Willms, M., 2008. Ökologie. Im FNR-Verbundprojekt »Energiepflanzenanbau«. www.tll.de/vbp/vbp_idx.htm (Zugriff: 14.11.08).
- Diepenbrock, W., 1987: Die Ertragsbildung der Sonnenblume – Eine Übersicht. Kali-Briefe 18: 639-659.
- DLG, 1997: DLG-Futterwerttabellen Wiederkäuer. Universität Hohenheim Dokumentationsstelle [Hrsg.], 7.Aufl., DLG-Verlag, Frankfurt.
- Doran, P.T., Priscu, J.C., Lyons, W.B., Walsh, J.E., Fountain, A.G., McKnight, D.M., Moorhead, D.L., Virginia, R.A., Wall, D.H. & Clow, G.D., 2002: Antarctic climate cooling and terrestrial ecosystems response. Nature 415: 517-520.
- Dorland, S. & Beauchamp, E.G., 1991: Denitrification and ammonification at low soil temperatures. Canadian J. Soil Sci. 71: 293-303.
- DWD, 2009: Deutscher Wetterdienst, Wetterlexikon, www.dwd.de (Zugriff: 31.07.09)
- Edwards, P.J., Abivardi, C. & Richner, W., 1999: The effects of alternative tillage systems on biodiversity in agroecosystems. In: Agrobiodiversity: Characterization, utilization and management. p.305-329, Wood, D & Lenné, J.M. [eds.], Cabi Publishing, Wallingford, UK.
- Ehlers, W., 1996: Wasser in Boden und Pflanze. Ulmer, Stuttgart.
- Engels, C. & Marschner, H., 1992: Root to shoot translocation of macronutrients in relation to shoot demand in maize (*Zea mays* L.) grown at different root zone temperatures. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. 155: 121-128.
- Engels, C. & Marschner, H., 1996: Effects of suboptimal root zone temperatures and shoot demand on net translocation of micronutrients from the roots to the shoot of maize. Plant Soil 186: 311-320.
- Engels, C., 1993a: Differences between maize and wheat in growth-related nutrient demand and uptake of potassium and phosphorus at suboptimal root zone temperatures. Plant Soil 150: 129-138.
- Engels, T., 1993b: Nitratauswaschung aus Getreide- und Zuckerrübenbeständen bei unterschiedlichem N-Angebot. Diss., Universität Hannover, Grauer Verlag, Wendlingen.

- English, S.D., McWilliam, J.R., Smith, R.C., Davidson, J.L., 1979: Photosynthesis and partitioning of dry matter in sunflower. *Austr. J. Plant Physiol.* 6, p.149-164.
- Es, van H.M. & Yang, C.L., 2005: Maize nitrogen response as affected by soil type and drainage variability. *Precision agric.* 6: 281-205.
- Field, C.B., Campbell, J.E. & Lobell, D.B., 2007: Biomass energy: the scale of the potential resource. *Trends Ecol. Evol.* 23: 65-72.
- Flach, K.W., Barnwell, T.O. & Crosson, P., 1997: Impacts of agriculture on atmospheric carbon dioxide. In: *Soil organic matter in temperate agroecosystems*. p.3-13, Paul, E.A. et al. [eds.], CRC Press, Boca Raton.
- Flaresso, J.A., Gross, C.D. & de Almeida, E.X., 2000: Evaluation of corn (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars for silage production in the Alto Vale do Itajaí region, Santa Catarina, Brazil. *Rev. Bras. Zootec* 29: 1608-1615.
- FNR, 2006. Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. FNR, Gülzow. 86-96.
- FNR, 2010. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, www.fnr.de (Zugriff: 17.01.10).
- Fock, H., Klug, K. & Canvin, D.T., 1979: Effect of carbon dioxide and temperature on photosynthetic CO₂ uptake and photorespiratory CO₂ evolution in sunflower leaves. *Planta* 145: 219-223.
- Foster, C., 1993: The carbon and energy budgets of energy crops. *Energy Convers. Manage.* 34: 897-904.
- Francis, C.A., 1989: Biological efficiencies in multiple-cropping systems. *Adv. Agron.* 42: 1-37.
- Francis, C.A. & Clegg, M.D., 1990: Crop rotations in sustainable production systems. In: *Sustainable agricultural systems*. p.107-122, Edwards, C.A. et al. [eds.], Soil and Water Conservation Society, Iowa, USA.
- Frede, H.-G. & Dabbert, S., 1999: *Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft*. Frede, H.-G. & Dabbert, S. [Hrsg.], 2. Aufl., Ecomed, Landsberg.
- Frese, L., 1995: Erhaltung pflanzengenetischer Ressourcen im Hinblick auf eine Diversifizierung der landwirtschaftlichen Produktion. *Schriften zu genetischen Ressourcen* 1: 136-149.
- Fricke, T., Beyrich, W., Emanuel, M., Neff, R., Reulein, J., Stülpnagel, R. & Wachendorf, M., 2007: Charakterisierung der Mineralstoff- und Organik-Flüsse bei der mechanischen Abpressung extensiver Grünlandaufwüchse. *Mitt. Arbeitsgem. Grünl. Futterb.* 8: 184-187.
- Gäth, S., 1997: Methoden der Nährstoffbilanzierung und ihre Anwendung als Agrar-Umweltindikatoren. In: *Umweltverträgliche Pflanzenproduktion – Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen*. Deutsche Bundes-

- stiftung Umwelt [Hrsg.], Initiativen zum Umweltschutz 5: 115-126, Zeller Verlag, Osnabrück.
- Garnett, T.P. & Smethurst, P.J., 1999: Ammonium and nitrate uptake by *Eucalyptus nitens*: effects of pH and temperature. *Plant Soil* 214: 133-140.
- Gaudchau, M., Luthardt-Behle, T. & Honermeier, B., 2004: Feldversuche zur Kennzeichnung der Biomasseerträge verschiedener Maissorten. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 16: 129-130.
- Gauger, T., 2002: Flächendeckende Kartierung der Gesamtdeposition von Stickstoff in Deutschland. In: Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH (UFZ) – Berichte, 16/2002, Franko, U. [Hrsg.], S. 72-89., Leipzig.
- Gebauer, G., Schubert, B., Schuhmacher, M.I., Rehder, H. & Ziegler, H., 1987: Biomass production and nitrogen content of C₃- and C₄-grasses in pure and mixed culture with different nitrogen supply. *Oecologia* 71: 613-617.
- Geisler, G., 1988: Pflanzenbau. Ein Lehrbuch – Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion. 2. Auflage, Parey, Berlin & Hamburg.
- Gerzabek, M.H., Kirchmann, H. & Pichlmayer, F., 1995: Response of soil aggregate stability to manure amendents in Ultuna long-term soil organic matter experiment, *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 158: 257-260.
- Govaerts, B., Fuentes, M., Mezzalama, M., Nicol, J.M., Deckers, J., Etchevers, J.D., Figueroa-Sandoval, B. & Sayre, K.D., 2007: Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. *Soil Tillage Res.* 94: 209-219.
- Goldstein, I.S., 1981: Composition of biomass. In: *Organic chemicals from biomass*. Goldstein, I.S. [ed.], p. 9-18. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Graß, R., 2003: Direkt- und Spätsaat von Silomais – Ein neues Anbaukonzept zur Reduzierung von Umweltgefährdungen und Anbauproblemen bei Optimierung der Erträge. Diss., Universität Kassel, Cuvillier Verlag, Göttingen.
- Graß, R. & Scheffer, K., 2003: kombinierter Anbau von Energie- und Futterpflanzen im Rahmen eines Fruchtfolgeglieders – am Beispiel Direkt- und Spätsaat von Silomais nach Wintererbsenvorfrucht. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 15: 106-109.
- Graß, R., Reulein, J., Scheffer, K. & Wachendorf, M., 2007: Innovatives Naturschutzverfahren zur energetischen Verwertung von Biomassen aus naturschutzfachlich bedeutsamen Landschaften. In: *Zwischen Tradition und Globalisierung – Beiträge zur 9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau* 1. S. 417-420. Zikeli, S. et al. [Hrsg.], Hohenheim.

- Graß, R., Reulein, J., Scheffer, K., Stülpnagel, R. & Wachendorf, M., 2009: Die integrierte Biogas- und Festbrennstoffherstellung aus Ganzpflanzsilagen. Ber. Landwirtsch. 87: 43-64.
- Greef, J.M., Ott, H., Wulfes, R. & Taube, F., 1999: Growth analysis of dry matter accumulation and N uptake of forage maize cultivars affected by N supply. J. Agric. Sci. 132: 31-43.
- Greenwood, D.J., Lemaire, G., Gosse, G., Cruz, P., Draycott, A. & Neeteson, J.J., 1990: Decline in percentage N of C₃ and C₄ crops with increasing plant mass. Ann. Bot. 66: 425-436.
- Greenwood, D.J., Gastal, F., Lemaire, G., Draycott, A., Millard, P. & Neeteson, J.J., 1991: Growth rate and % N of field grown crops: Theory and Experiments. Ann. Bot. 67: 181-190.
- Grebe, S., Stülpnagel, R. & Wachendorf, M., 2007: Teil- und Ganzpflanzenerträge unterschiedlicher Triticale- und Weizensorten für die Herstellung von Biogas und Ethanol bzw. zur thermischen/stofflichen Verwertung («SUNFUEL»). Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 19: 58-60.
- Grebe, S., Stülpnagel, R. & Wachendorf, M., 2008: Vergleich von Triticale-Sorten und einzelnen Weizen-Sorten hinsichtlich Teil- und Ganzpflanzenerträgen 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.
- Griffith, D.R., Kladvik, E.J., Mannering, J.V., West, T.D. & Parsons, S.D., 1988: Long-term tillage and rotation effects on corn growth and yield on high and low organic matter, poorly drained soils. Agron. J. 80: 599-605.
- Grignani, C., Zavattaro, L., Sacco, D. & Monaco, S., 2007: Production, nitrogen and carbon balance of maize-based forage systems. Eur. J. Agron. 26: 442-453.
- Grove, J.H. & Sumner, M.E., 1982: Yield and leaf composition of sunflower in relation to N, P, K, and lime treatments. Fertil. Res. 3: 367-378.
- Gutser, R., 2006: Bilanzierung von Stickstoffflüssen im landwirtschaftlichen Betrieb zur Bewertung und Optimierung der Düngungsstrategien. Acta Agric. Slovenica 87: 129-141.
- Habyarimana, E., Laureti, D., Di Fonzo, N. & Lorenzoni, C., 2002: Biomass production and drought resistance at the seeding stage and in field conditions in sorghum. Maydica 47: 303-309.
- Habyarimana, E., Laureti, D., De Ninno, M. & Lorenzoni, C., 2004: Performances of biomass sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under different water regimes in Mediterranean region. Ind. Crops Prod. 20, p.23-28.

- Hall, D.O. & House, J.I., 1995: Biomass energy in Western Europe to 2050. *Land Use Policy* 12: 37-48.
- Hammer, K., 1998: Agrarbiiodiversität und pflanzengenetische Ressourcen: Herausforderung und Lösungsansatz. *Schriften zu Genetischen Ressourcen* 10, Zentralstelle für Agrardokumentationen und -Informationen (ZADI), Informationszentrum für Genetische Ressourcen (IGR) [Hrsg.], Bonn.
- Hammer, K., Heller, J. & Engels, J., 2001: Monographs on underutilized and neglected crops. *Gen. Res. Crop Evol.* 48: 3-5.
- Hammer, K., Arrowsmith, N. & Gladis, T., 2003a: Agrobiodiversity with emphasis on plant genetic resources. *Naturwissenschaften.* 90: 241-250.
- Hammer, K., Gladis, T. & Diederichsen, A., 2003b: In situ and on-farm management of plant genetic resources. *Eur. J. Agron.* 19: 509-517.
- Hammer, K., 2004: Resolving the challenge posed by agrobiodiversity and plant genetic resources – an attempt. *J. Agric. Rural Developm. Trop. Subtrop.*, Beiheft 76. Kassel University Press GmbH, 184 pp.
- Hammer, K., Heuser, F., Khoshbakht, K. & Teklu, Y., 2007: Plant genetic resources for breeding. In: *Principles of plant genetics an breeding.* Acquah, G. [ed.], p.87-107, Blackwell Publishing, Malden, USA.
- Hartmann, H., 1994: Energie aus Biomasse. *Landtechnik Bericht* 18. Weihenstephan.
- Hausmann, B.I.G., Obilana, A.B., Blum, A., Ayiecho, P.O., Schiprack, W. & Geiger, H.H., 1998: Hybrid performance of sorghum and its relationship to morphological and physiological traits under variable drought stress in Kenya. *Plant Breeding* 117: 223-229.
- Heichel, G.H., 1976: Agricultural production and energy resources. *Am. Scientist* 64: 64-72.
- Heinz, A., Stülpnagel, R., Kaltschmitt, M., Scheffer, K. & Jazierska, D., 1999: Feucht- und Trockengutlinien zur Energiegewinnung aus biogenen Festbrennstoffen. Vergleich anhand von Energie- und Emissionsbilanzen sowie anhand der Kosten. *Forschungsberichte des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung* 63, Stuttgart, 280 Seiten.
- Heitefuss, R., 2000: *Pflanzenschutz: Grundlagen der praktischen Phytomedizin.* 3.Aufl., Thieme, Stuttgart.
- Heggenstaller, A.H., Anex, R.P., Liebman, M., Sundberg, D.N. & Gibson, L.R., 2008: Productivity and nutrient dynamics in bioenergy double-cropping systems. *Agron. J.* 100: 1740-1748.
- Helsel, Z.R. & Wedin, W.F., 1981: Harvested dry matter from single and double-cropping systems. *Agron. J.* 73: 895-900.

- Hennings, H.H. & Scheffer, B., 2000: Zum Nitrataustrag ins Grundwasser – Stand der Erkenntnisse. *Wasserwirtschaft* 90: 348-355.
- Herrmann, A., Kornher, A. & Taube, F., 2004: Ertragsentwicklung von Silomais und Deutschem Weidelgras – Zuchtfortschritt oder Klimawandel? *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 16: 99-100.
- Herrmann, A. & Taube, F., 2004: The range of the critical nitrogen dilution curve for maize (*Zea Mays* L.) can be extended until silage maturity. *Agron. J.* 96: 1131-1138.
- Herrmann, A. & Taube, F., 2005: Nitrogen concentration at maturity – an indicator of nitrogen status in forage maize. *Agron. J.* 97: 201-210.
- Hesketh, J.D., 1963: Limitations to photosynthesis responsible for differences among species. *Crop Sci.* 3: 493-496.
- Heuser, F., 2004: Einfluss des N- und K-Angebots auf die Gehalte an reduzierenden Zuckern und freien Aminosäuren in Kartoffelknollen sowie die Acrylamidgehalte in Pommes frites. Diplomarbeit, Universität Kiel.
- Hoogwijk, M., Faaij, A., Broek, R. van den, Berdes, G., Gielen, D. & Turkenburg, W., 2003: Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. *Biomass Energy* 25: 119-133.
- Hugger, H., 1989: Sonnenblumen – Züchtung – Anbau – Verarbeitung. Ulmer, Stuttgart.
- Hugger, H., 1992: Stickstoffdüngung zu Mais unter Berücksichtigung der Bodennachlieferung. *Mais* 20: 14-16.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007: Intergovernmental Panel on Climate Change, 14.11.08.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2008: Climate Change and Water. Technical Report VI. Bates, B.C. et al. [eds.], Geneva.
- Janzen, H.H., Beauchemin, K.A., Bruinsma, Y., Campbell, C.A., Desjardin, R.L., Ellert, B.H. & Smith, E.G., 2003: The fate of nitrogen in Agroecosystems: an illustration using Canadian estimates. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 67: 85-102.
- Jerger, D.E., Chynoweth, D.P. & Isaacson, H.R., 1987: Anaerobic digestion of sorghum biomass. *Biomass* 14: 99-113.
- Jin, K., Cornelis, W.M., Gabriels, D., Schiettecatte, W., De Neve, Stefaan, Lu, J., Buysse, T., Wu, H., Cai, D., Jin, J. & Harmann, R., 2008: Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation. *Catena* 75: 191-199.
- Jocić, B. & Sarić, M.R., 1983: Efficiency of nitrogen, phosphorus, and potassium use by corn, sunflower, and sugarbeet for the synthesis of organic matter. *Plant Soil* 72: 219-223.

- Johansson, D.J.A. & Azar, C., 2007: A scenario based analysis of land competition between food and bioenergy production in the US. *Clim. Chang.* 82: 267-291.
- Johnston, A.E. & Jenkinson, D.S., 1989: The nitrogen cycle in the UK arable agriculture. The Fertilizer Society of London, Proceedings No. 286: 1-24.
- Jørgensen, R.N., Jørgensen, B.J., Nielsen, N.E., Maag, M. & Lind, A.-M., 1997: N₂O emission from energy crop fields of *Miscanthus »Giganteus«* and winter rye. *Atmos. Environ.* 31: 2899-2904.
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.-M., Mached, J.-M. & Thelier-Huche, T., 1994: Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Ann. Bot.* 74: 397-407.
- Justes, E., Jeuffroy, M.H. & Mary, B., 1997: Wheat, barley, and Durum wheat. In: Diagnosis of the nitrogen status in crops. Lemaire, G. [ed.], p.73-91, Springer-Verlag, Berlin.
- Karlen, D.L., Varvel, D.G., Bullock, D.G. & Cruse, R.M., 1994: Crop rotation for the 21st century. *Adv. Agron.* 53: 1-45.
- Karpenstein-Machan, M., Scheffer, K. & Pahmeyer, E., 1992: Zweitfruchtanbau – die Chance für alternative Energiegewinnung. *Mais* 3/92: 24-26.
- Karpenstein-Machan, M., 1997: Konzepte für den Energiepflanzenanbau. Perspektiven eines pestizidfreien Anbaus von Energiepflanzen zur thermischen Verwertung im Zweikultur-Nutzungssystem. DLG-Verlag, Frankfurt.
- Karpenstein-Machan, M., 2001: Sustainable cultivation concepts for domestic energy production from biomass. *Crit. Rev. Plant Sci.* 20: 1-14.
- Karpenstein-Machan, M. & Stülpnagel, R., 2000: Biomass yield and nitrogen fixation of legumes monocropped and intercropped with rye and rotation effects on a subsequent maize crop. *Plant Soil* 218: 215-232.
- Kasimir-Klemedtsson, Å., Klemedtsson, L., Berglund, K., Martikainen, P., Silvola, J. & Oenema, O., 1997: Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil Use Manage.* 13: 245-250.
- Kauter, D., Hahnfeld, C. & Claupein, W., 2004: Potenziale und agronomische Probleme von Energiemaisfruchtfolgen. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 16: 47-48.
- Kenward, M.G. & Roger, J.H., 1997: Small sample inference for fixed effects from restricted maximum likelihood. *Biometrics* 53: 983-997.
- Khan, A., Khan, S., Asrar, M. & Khan, M., 1999: Efficiency of intercropping maize, soybean and sunflower on grain yield. *Pakistan J. Biol. Sci.* 2, 1611-1613.
- Khurana, E. & Singh, J.S., 2000: Influence of seed size on seedling growth of *Albizia procera* under different soil water levels. *Ann. Bot.* 86. 1185-1192.

- Kladivko, E.J., Griffith, D.R. & Mannering, J.V., 1986: Conservation tillage effects on soil properties and yield of corn and soya beans in Indiana. *Soil Tillage Res.* 8: 277-287.
- Köhler, K., Duynisveld, W.H.M. & Böttcher, J., 2006: Nitrogen fertilization and nitrate leaching into groundwater on arable soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169: 185-195.
- Kohli, R.K., Singh, H.P. & Batish, D.R., 2001: *Allelopathy in Agroecosystems*. Food Products Press, Oxford.
- Kruse, S., Herrmann, A., Kornher, A. & Taube, F., 2008: Genotype and environmental variation in water soluble carbohydrate content of silage maize. *Field Crops Res.* 106: 191-202.
- KWS (Kleinwanzlebener Saatzucht A.G.), 2008. www.kws.de (Zugriff: 14.11.08).
- Larson, W.E., Clapp, C.E., Pierre, W.H. & Morachan, Y.B., 1972: Effects of increasing amounts of organic residues on continuous corn: II. Organic carbon, nitrogen, phosphorus and sulphur. *Agron. J.* 64: 204-208.
- Lemaire, G., Salette, J., Sigogne, M. & Terrasson, J.-P., 1984: Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. Etude de l'effet du milieu. *Agron.* 4: 423-430.
- Lemaire, G., Charrier, X. & Hébert, Y., 1996: Nitrogen uptake capacities of maize and sorghum crops in different supply conditions. *Agron.* 16: 231-246.
- Lemaire, G., & Gastal, F., 1997: N uptake and distribution on plant canopies. In: *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Lemaire, G. [ed.], p.3-43, Springer-Verlag, Berlin.
- Lewis, W.M. & Phillips, J.A., 1983: Double cropping in the eastern United States. American In: *Multiple cropping*. Stelly, M., [ed.], *Am. Soc. Agron.* 27: 41-50.
- Li, L., Sun, J., Zhang, F., Li, X., Yang, S. & Rengel, Z., 2001: Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Res.* 71: 123-137.
- Li, Y.X., Tullberg, J.N., Freebairn, D.M., McLaughlin & Li, H.W., 2008: Effects of tillage and traffic on crop production in dryland farming systems: II. Long-term simulation of crop production using PERFECT model. *Soil Till. Res.* 100: 25-33.
- Liebman, M. & Dyck E., 1993: Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecol. Appl.* 3: 92-122.
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) 2009a: Landessortenversuch Bayern »Mais für Biogasanlagen 2006«. http://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/23386/lsv_ergebnisse_silomais_fuer_biogas.pdf (Stand: 14.04.2009).

- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) 2009b: Landessortenversuch Bayern »Mais für Biogasanlagen 2007«.
<http://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/28674/uebers.pdf> (Stand: 14.04.2009).
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) 2009c: Landessortenversuch Bayern »Mais für Biogasanlagen 2008«.
<http://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/32931/uebers.pdf> (Stand: 14.04.2009).
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) 2009d: Das Mais-Reifeprognosemodell nach AGPM.
<http://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/08509/> (Stand: 24.05.2009)
- LLH (Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen) 2007: Nährstoffvergleich als Flächenbilanz (früher: Feld-Stall-Bilanz) und Berechnung des betrieblichen Einsatzes von Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft (170 kg N/ha-Obergrenze). In: Fachinformationen – Pflanzenproduktion 03/2007. LLH [Hrsg.].
- LLH (Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen) 2008: Landessortenversuche 2008 Hessen. Silomais – mittelspäte Sorten.
<http://www.hortigate.de/scripts/WebObjects.dll/Hortigate.woa/2/wo/GTNfXdvW86iexCQStJbVB0/2.5.6.3.23.7.1.1.25.1.3.7.5> (Stand: 20.11.08).
- Loomis, R.S. & William, W.A., 1963: Maximum crop productivity: an estimate. *Crop Sci.* 3: 67-71.
- López-Bellido Garrido, R., J. & López-Bellido, L., 2001: Effects of crop rotation and nitrogen fertilization on soil nitrate and wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agron.* 21: 509-516.
- Löpmeier, F.J., 2007: Agrarmeteorologische Aspekte beim anbau von Energiemais. In: *Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiberg* 16: 193- 198, Matzarajis, H & Mayer, H, [Hrsg.], Freiberg..
- LWK MV (Landwirtschaftskammer Mecklenburg-Vorpommern) 2009a: Landessortenversuche Silomais, Energiemais und Körnermais 2006.
<http://www.hortigate.de/scripts/WebObjects.dll/Hortigate.woa/2/wo/M4R7Jiq60FsHSfxTGbbPe0/7.7.6.5.1.23.4.1.1.25.1.3.7.5> (Stand: 23.03.09).
- LWK MV (Landwirtschaftskammer Mecklenburg-Vorpommern) 2009b: Landessortenversuche Silomais, Energiemais und Körnermais 2007.
<http://www.hortigate.de/scripts/WebObjects.dll/Hortigate.woa/2/wo/M4R7Jiq60FsHSfxTGbbPe0/5.7.6.5.1.23.10.1.1.25.1.3.7.5> (Stand: 12.03.09).
- LWK MV (Landwirtschaftskammer Mecklenburg-Vorpommern) 2009c: Landessortenversuche Silomais, Energiemais und Körnermais 2008.
<http://www.hortigate.de/scripts/WebObjects.dll/Hortigate.woa/2/wo/M4R7Jiq60FsHSfxTGbbPe0/10.7.6.5.1.23.0.1.1.25.1.3.7.5> (Stand: 12.03.09).

- LWK N (Landwirtschaftskammer Niedersachsen) 2009: Mais für Biogasanlagen.
<http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/pflanze/nav/74/article/11375.html> (Stand: 17.02.09).
- LWK NW (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen) 2009: Mais.
<http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/tabellen-energiemais-sv-2008.pdf> (Stand: 5.01.09).
- Macdonald, A.J., Powlson, D.S., Poulton, P.R. & Jenkinson, D.S., 1989: Unused fertilizer nitrogen in arable soils – its contribution to nitrate leaching. *J. Sci. Food Agric.* 46: 407-419.
- Mackay, A.D. & Barber, S.A., 1984: Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 818-823.
- Manning, J.V. & Fenster, C.R., 1983: What is conservation tillage? *J. Soil Water Conserv.* 38: 141-143.
- Maqbool, S.B., Devi, P. & Sticklen, M.B., 2001: Biotechnology: Genetic improvement of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *In Vitro Cell. Dev. Biol. – Plant* 37: 504-515.
- Mark, U. & Tevini, M., 1997: Effects of solar ultraviolet-B radiation, temperature and CO₂ on growth and physiology of sunflower and maize seedlings. *Plant Ecol.* 128: 225-234.
- Marschner, H., 1995: Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition, Academic Press, London.
- Mary, B., 1997: Concluding Remarks: N hazard to crops and environment. In: Diagnosis of the nitrogen status in crops. Lemaire, G. [ed.], p.229-236, Springer-Verlag, Berlin.
- McCarl, B.A. & Schneider, U.A., 2001: Greenhouse gas mitigation in U.S. agriculture and forestry. *Science* 294: 2481-2482.
- McKendry, I.G., 2003: Applied climatology. *Progress in Physical Geography* 27: 597-606.
- McVay, K., 2006: Soil management in sustainable production systems. In: Developing and extending sustainable agriculture – a new social contract. P.51-64, Francis, C.A. et al. [eds.], Haworth Press, Oxford.
- Mead, R & Willey, R.W., 1980: The concept of a »Land Equivalent Ratio« and advantages in yields from intercropping. *Exp. Agric.* 16: 217-228.
- Moldenhauer, W.C., Langdale, G.W., Frye, W., McCool, D.K., Papendick, R.I., Smika, D.E. & Fryrear, D.W., 1983: Conservation tillage for erosion control. *J. Soil Water Conserv.* 38: 144-151.

- Möller, K., 1999: Wirkungen einer Reduktion des Stickstoffaufwandes in landwirtschaftlichen Betrieben auf Pflanzenproduktion und Umwelt – Empirische Untersuchungen in West- und Ostniedersachsen. Diss., Universität Göttingen, Hainholz Verlag, Göttingen.
- Moore, P.D., 1982: Evolution of photosynthetic pathways in flowering plants. *Nature* 295: 647-648.
- Morachan, Y.B., Moldenhauer, W.C. & Larson, W.E., 1972: Effects of increasing amounts of organic residues on continuous corn: I. Yields and soil physical properties. *Agron. J.* 64: 199-203.
- Murdock, L.W. & Wells, K.L., 1978: Yields, nutrient removal, and nutrient concentrations of double-cropped corn and small grain silage. *Agron. J.* 70: 573-576.
- Nevens, F. & Reheul, D., 2003: The consequences of Wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. *Soil Tillage Res.* 70: 175-184.
- Nultsch, W., 1986: Allgemeine Botanik. 8.Aufl., Thieme, Stuttgart.
- Nye, P.H., 1966: The effect of the nutrient intensity and buffering power of a soil, and the absorbing power, size and root hairs of a root, on nutrient absorption by diffusion. *Plant Soil* 25.
- Oaks, A.: 1994: Efficiency of nitrogen utilization in C₃ and C₄ Cereals. *Plant Physiol.* 106: 407-414.
- Oberhuber, W. & Edwards, G.E., 1993: Temperature dependance of the linkage of quantum yield of photosystem II to CO₂ fixation in C₄ and C₃ plants. *Plant Physiol.* 101: 507-512.
- Oikeh, S.O., Chude, V.O., Kling, G.J. & Horst, W.J., 2007: Comparative productivity of nitrogen-use efficient maize cultivars and traditional grain sorghum in the moist Savanna of West Africa. *African J. Agric. Res.* 2: 112-118.
- Okoli, P.S.O., Drolsom, P.N. & Scholl, J.M., 1984: Forage production and weed control in a double-cropping program. *Agron. J.* 76: 363-366.
- Osuna-Ortega, J., Mendoza-Castillo, M. del. C. & Mendoza-Onofre, L.E., 2003: Sorghum cold tolerance, pollen production, and seed yield in the central high valleys of Mexico. *Maydica* 48: 125-132.
- Peacock, J.M., 1982: Response and tolerance of sorghum to temperature stress. In: Sorghum in the eighties. p.143-159, Proceedings of the International Symposium on Sorghum. International Crops Research Institute for Semi-Arid Tropics (ICRISAT). House, L.R. et al. [eds.], , Hyderabad, India.
- 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. *J. Agron. Crop Sci.* 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.
- Pinthus, M.J. & Rosenblum, J., 1961: Germination and seedling emergence of sorghum at low temperatures. *Crop Sci.* 1: 293-296.
- Plénet, D. & Cruz, P., 1997: Maize and sorghum. In: *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Lemaire, G. [ed.], p.93-105, Springer-Verlag, Berlin.
- Plénet, D. & Lemaire, G., 2000: Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant Soil* 216: 65-82.
- Prather, M., Derwent, R., Ehalt, D. & Fraser, P., 1995: Other trace gases and atmospheric chemistry. In: *Climate change 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*. Houghton, L.G. et al [eds.], p.73-126, Cambridge University Press, Cambridge.
- Presterl, T., Thiemt, E. & Geiger, E.E., 2000: Züchtung von Mais mit verbesserter Stickstoffeffizienz. In: *Stickstoffeffizienz landwirtschaftlicher Kulturpflanzen*. S. 143-160, Möllers, C. [Hrsg.], Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Pritchard, J., Barlow, P.W., Adam, J.S. & Deri Tomos, A., 1990: Biophysics of the inhibition of the growth of maize roots by lowered temperature. *Plant Physiol.* 93: 222-230.
- Prosser, J.I. & Cox, D.J., 1986: Nitrification. In: *Nitrification*. p.178-193, Prosser, J.I. [ed.], IRL Press, Oxford.
- Putnam, A.R., Defrank, J. & Barnes, J.P., 1983: Exploitation of allelopathy for weed control in annual and perennial cropping systems. *J. Chem. Ecol.* 9: 1001-1010.
- Reeves, D.W., 1997: The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.* 43: 131-167.
- Reich, P.B., Tilman, D., Naeem, S., Ellsworth, D.S., Knops, J., Craine, J., Wedin, D. & Trost, J., 2004: Species and functional group diversity independently influence biomass accumulation and its response to CO₂ and N. *PNAS* 101: 10101-10106.
- Reulein, J., Scheffer, K., Stülpnagel, R., Bühle, L., Zen, W. & Wachendorf, M., 2007: Efficient utilization of biomass through mechanical dehydration of silages. 15th European Biomass Conference & Exhibition, 7-11 May, Berlin.
- Richter, K & Schmalzer, K, 1995: Trockenmasseproduktion und N-Entzug von Silomais nach verschiedenen Zwischenfrüchten und differenzierter Stickstoffdüngung. *Das Wirtschaftseigene Futter* 41: 196-207.

- Richter, C., 2005: Agrikulturchemie und Pflanzenernährung. S.269, Margraf Publishers, Roßdorf.
- Riedell, W.E., Schumacher, T.E., Clay, S.A., Ellsbury, M.M., Pravecek, M. & Evenson, P.D., 1998: Corn and soil fertility responses to crop rotation with low, medium, or high inputs. *Crop Sci.* 38: 427-433.
- Ries, S.K., Wert, V., Sweeley, C.C. & Leavitt, R.A., 1977: Triacontanol: A new naturally occurring plant growth regulator. *Science* 195: 1339-1341.
- Russell, A.E., Laird, D.A. & Mallarino, A.P., 2006: Nitrogen fertilization and cropping system impacts on soil quality in midwestern Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 249-255.
- Samaras, Y., Manetas, Y. & Gavalas, N.A., 1988: Effects of temperature and photosynthetic inhibitors on light activation of C₄-phosphoenolpyruvate carboxylase. *Photosynth. Res.* 16: 233-242.
- SAS[®] Institute Inc., 2002-2003: Statistical Analysis System 9.1, Cary, NC, USA.
- Sauerbeck, D.R., 1993: CO₂-emissions from agriculture: sources and mitigation potentials. *Water, Air Soil Pollut.* 70: 381-388.
- Sauerbeck, D.R., 2001: CO₂ emissions and C sequestration by agriculture - perspectives and limitations. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 60: 253-266.
- Sauerbeck, G., 2004a: Amaranth – Ergänzungspflanze für Mischsilagen mit Mais? *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 16: 35-36.
- Sauerbeck, G., 2004b: Amaranth – Ergebnisse von Anbauversuchen in Norddeutschland in den Jahren 2001-2003. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 16: 153-154.
- Schaff, B.E. & Skogley, E.O., 1982: Diffusion of potassium, calcium, and magnesium in bozeman silt loam as influenced by temperature and moisture.
- Schaub, G. & Vetter, A., 2007: Biokraftstoffe – Eine Übersicht. *Chemie Ingenieur Technik* 79: 569-578.
- Scheffer, K., 1992: Brennstoff aus Biomasse – eine bedeutende Energiequelle für die Zukunft! *Mais* 2/92: 30-33.
- Scheffer, K., 1993: Anbau von Energiepflanzen und ihr Einsatz über Verbrennung und Vergasung – Logistische Anforderungen und ökologische Bewertung. In: *Energie und Biomasse, eine Chance für die Landwirtschaft.* S.138-147, Flaig, H. & Mohr, H. [Hrsg.], Springer, Berlin.
- Scheffer, K. & Stülpnagel, R., 1993: Wege und Chancen bei der Bereitstellung des CO₂-neutralen Energieträgers Biomasse-Grundgedanken zu einem Forschungskonzept. *Der Tropenlandwirt, Beiheft Nr. 49:* 147-161.

- Scheffer, K., 2000: Biomasse – gespeicherte Sonnenenergie aus der Vielfalt der Pflanzenarten – Potenziale, Bereitstellung, Konversion. In: Themen 2000, Sonne – die Energie des 21. Jahrhunderts. Strategien zur Kostensenkung von Solarzellen, Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS), S.34-49, <http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2000-1/th2000-1.pdf> (Zugriff: 14.07.09).
- Scheffer, K., 2003a: Die Bedeutung einer integralen Landwirtschaft. <http://www.castor.de/diskus/sonst/2003/biomasse.html> (Zugriff: 14.07.09).
- Scheffer, K., 2003b: Der Anbau von Energiepflanzen als Chance einer weiteren Ökologisierung der Landwirtschaft. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 14: 114-119.
- Schimel, D., Enting, I.G., Heimann, M., Wigley, T.M.L., Raynaud, D., Alves, D. & Siegenthaler, U., 1995: CO₂ and the carbon cycle. In: Climate change 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. Houghton, L.G. et al [eds.], p.35-71, Cambridge University Press, Cambridge.
- Schneider, U., A. & McCarl, B.A., 2003: Economic potential of biomass based fuels for greenhouse gas emission mitigation. Environ. Resour. Econ. 24: 291-312.
- Scholz, V. & Ellerbrock, R., 2002: The growth productivity, and environmental impact of the cultivation of energy crops on sandy soil in Germany. Biomass Bioenergy 23: 81-92.
- Schröder, J.J., Dijk, W. van & Groot, W.J.M. de, 1996: Effects of cover crops on the nitrogen fluxes in a silage maize production system. Neth. J. Agric. Sci. 44: 293-315.
- Schröder, J.J., Ten Holte, L. & Brouwer, G., 1997: Response of silage maize to placement of cattle slurry. Neth. J. Agric. Sci. 45: 249-261.
- Schröder, J., 2005: Revisiting the agronomic benefits of manure: a correct assessment and exploitation of its fertilizer value spares the environment. Bioresour. Technol. 96: 253-261.
- Sharma, A.R. & Behera, U.K., 2009: Recycling of legume residues for nitrogen economy and higher productivity in maize (*Zea mays*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping systems. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 83: 197-210.
- Shepherd, M.A. & Webb, J., 1999: Effects of overwinter cover on nitrate loss and drainage from a sandy soil: consequences for water management? Soil Use Manage. 15: 109-116.
- Siemens, J., & Kaupenjohann, M., 2002: Contribution of dissolved organic nitrogen to N leaching from four German agricultural soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. 165: 675-681.

- Singh, S.P., 1985: Sources of cold tolerance in grain sorghum. *Can. J. Plant Sci.* 65: 251-257.
- Singh, Y.V., Swarup, A. & Gupta, S.K., 2002: Effect of short-term waterlogging on growth, yield and mineral composition of sorghum. *Agrochimica* 156: 231-239.
- Smith, K., 1997: Soils and the greenhouse effect. *Soil Use Manage.* 13: 229.
- Smith, P., Powelson, D.S., Glendining, M.J. & Smith, J.U., 1998: Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Glob. Chang. Biol.* 4: 679-685.
- Sodikin, E., 1994: Die Ertragsbildung der Wintergetreidearten in Abhängigkeit von Herbizid- und Fungizidmaßnahmen bei Körner- und Ganzpflanzennutzung zur Energiegewinnung. Diss., Universität Kassel.
- Sommer, C. & Brunotte, J., 1997: Kriterien für eine bodenschonende Landbewirtschaftung. In: *Umweltverträgliche Pflanzenproduktion – Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen*. Deutsche Bundesstiftung Umwelt [Hrsg.], *Initiativen zum Umweltschutz* 5: 55-79, Zeller Verlag, Osnabrück.
- Stanford, G., Frere, M.H. & Schwaninger, D.H., 1973: Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. *Soil Sci.* 115: 121-123.
- Strese, E.A., 2001: Die Dynamik der Biomasseentwicklung von alten und neuen Winterweizensorten (*Triticum aestivum* L.). Diss., Universität Kassel.
- Struik, P.C., Deinum, B. & Hoefsloot, J.M.P., 1985: Effects of temperature during different stages of development on growth and digestibility of forage maize. *Neth. J. Agric. Sci.* 33: 404-420.
- Stülpnagel, R., 1998: Dry or humid biomass from agriculture for energy. In: *Sustainable agriculture for food, energy and industry*. p.753-758, El Bassam, N. et al. [eds.], 2nd ed., James & James, London, UK.
- Stülpnagel, R., Buttlar, C. von, Heuser, F. & Wachendorf, M., 2008a: Chancen der Fruchtfolgeerweiterung im Energiepflanzenbau durch das Zweikultur-Nutzungssystem. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss., Göttingen*.
- Stülpnagel, R., Buttlar, C. von, Heuser, F. & Wachendorf, M., 2009: Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands. Teilprojekt 6: Systemversuch zum Zweikultur-Nutzungssystem auf sechs Standorten im Bundesgebiet. *Schlussbericht*.
- Subudhi, P.K., Nguyen, H.T., Gilbert, M.L. & Rosenow, D.T., 2002: Sorghum improvement: Past achievements and future prospects. In: *Crop improvement –*

- Challenges for the twenty-first century. Kang, M.S. [ed.], p.109-160, Food Products Press, New York.
- Taube, F., Wulfes, R. & Südekum, K.-H., 1995: Veränderung der Mineralstoffgehalte in Abhängigkeit von Stickstoffdüngung und Aufwuchszeitraum. *Das Wirtschaftseigene Futter* 41: 219-237.
- Taube, F. & Pötsch, E., 2001: On-farm nutrient balance assessment to improve nutrient management on organic dairy farms. *Grassl. Sci. Eur.* 6: 225-235.
- Thiemt, E.-M., 2002: Untersuchungen zur Bedeutung der Stickstoffeffizienz für die Ertragssicherheit bei Mais. Diss., Universität Hohenheim.
- TLL (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft), 2006: *persönliche Kommunikation*.
- TLL (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft) 2008: Landessortenversuche Thüringen. http://www.tll.de/ainfo/pdf/lv_smm.pdf (Stand: 9.12.08).
- Toews, T., Stülpnagel, R. & Buttlar, C. von, 2008: Mit dem Zweifrucht-System den Gewinn erhöhen. *Top Agrar* 6: 58-60.
- Tollenaar, M., Mihajlovic, M. & Vyn, T.J., 1992: Annual phytomass production of a rye-corn double-cropping system in Ontario. *Agron. J.* 84: 963-967.
- Trenberth, K.E., 1996: Coupled climate system modelling. In: *Climate change. Developing southern hemisphere perspectives*. Giambelluca, T.W. & Henderson-Sellers, A. [eds.], p.63-88, Wiley, New York.
- TrinkwV, 2001: http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/trinkwv_2001/gesamt.pdf (Zugriff: 6.03.2010).
- Turhan, H. & Baser, I., 2004: *In vitro* and *in vivo* water stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Helia* 40: 227-236.
- Turhollow, A.H. & Perlack, R.D., 1991: Emission of CO₂ from energy crop production. *Biomass Bioenergy* 1: 129-135.
- UBA (Umweltbundesamt), 2009: <http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=3639> .(Stand: Feb. 2009).
- Urbazka, P., Graß, R., Haase, T., Schüler, C. & Heß, J., 2009: Fate of legume-derived nitrogen in monocultures and mixtures with cereals. *Agric. Ecosyst. Environ.* 132: 116-125.
- Ulrich, A., 1952: Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 3: 207-228.

- Václavík, J., 1967: Growth response to different constant soil moisture levels in maize (*Zea mays* L.) during the vegetative phase. *Biol. Plant.* 9: 462-472.
- Wachendorf, M., Büchter, M., Volkers, K.C., Bobe, J., Rave, G., Loges, R. & Taube, F., 2006: Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. V. Impact of grass understorey, slurry application and mineral N fertilizer on nitrate leaching under maize for silage. *Grass Forage Sci.* 61: 243-252.
- Wachendorf, M, Fricke, T., Graß, R. & Stülpnagel, R., 2007: Ein neues Konzept für die bioenergetische Nutzung von Grünlandbiomasse. *Mitt. Arbeitsgem. Grünl. Futterb.* 8: 165-168.
- Wagner, D., 2006: Reduktion des Nitrataustrages beim Anbau von Wintererbsen im Zweikultur-Nutzungssystem. Diss., Universität Kassel, Cuvillier Verlag, Göttingen.
- Wahmhoff, W., 2000: Umweltgerechte Landnutzung. In: Stickstoffeffizienz landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. S. 1-8, Möllers, C. [Hrsg.], Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Warren-Wilson, J., 1966: Effect of temperature on net assimilation rate. *Ann. Bot.* 30: 753-761.
- Watson, R.T., Rohde, H., Oeschger, H. & Siegenthaler, U., 1990: Greenhouse gases and aerosols. In: *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*, Houghton, J.T. et al. [eds.], p.1-40, Cambridge University Press, Cambridge.
- Wiesler, F. & Horst, W.J., 1992: Differences between maize cultivars in yield formation, nitrogen uptake and associated depletion of soil nitrate. *J. Agron. Crop Sci.* 168: 226-237.
- Wilhelm, E.P., Mullen, R.E., Keeling, P.L. & Singletary, G.W., 1999: Heat stress during grain filling in maize: Effects on kernel growth and metabolism. *Crop Sci.* 39: 1733-1741.
- Willey, R.W., 1979: Intercropping: Its importance and research needs. Part I: Competition and yield advantages. *Field Crop Abstracts* 32: 1-10.
- Willey, R.W., 1985: Evaluation and presentation of intercropping advantages. *Expl. Agric.* 21: 119-133.
- Wilson, D.R., Muchow, R.C. & Murgatroyd, C.J., 1995: Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. *Field Crops Res.* 43: 1-18.
- Winsor, P., 2001: Arctic sea ice thickness remained constant during the 1990s. *Geophys. Res. Lett.* 28: 1039-1041.
- Xian, G.Y. & Lin, F.H., 1985: Rice based cropping systems and their development in China. *Adv. Agron.* 38: 339-368.

Yu, J., Tuinstra, M.R., Claassen, M.M., Gordon, W.B. & Witt, M.D., 2004: Analysis of cold tolerant in sorghum under controlled environment conditions. *Field Crops Res.* 85: 21-30.

ZALF (Leibnitz-Zentrum für Agrarlandforschung e.V.), 2006: *persönliche Kommunikation*.

Ziadi, N, Brassard, M., Belanger, G., Claessens, A., Tremblay, N., Cambouris, A.N., Nolin, M.C. & Parent, L.-E., 2008: Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for corn in Eastern Canada. *Agron. J.* 100: 271-276.

1 Anhang

A1 Anbaudaten

- A1.1: Saattermine
- A1.2: Erntetermine
- A1.3: Vegetationsdauer
- A1.4: Entwicklungsstadien (BBCH) zur Ernte

A2 Mineralischer Bodenstickstoff (N_{\min})

- A2.1: Frühjahrs- N_{\min} -Werte im Jahr 2006
- A2.2: Nachernte- N_{\min} -Werte im Jahr 2006
- A2.3: Frühjahrs- N_{\min} -Werte im Jahr 2007
- A2.4: Nachernte- N_{\min} -Werte im Jahr 2007
- A2.5: Frühjahrs- N_{\min} -Werte im Jahr 2008
- A2.6: Nachernte- N_{\min} -Werte im Jahr 2008

A3 Ertragsparameter

- A3.1: Trockenmasseerträge
- A3.2: TS-Gehalte

A4 Energetische Parameter

- A4.1: Brennwerte
- A4.2: Energieerträge
- A4.3: Methanausbeuten
- A4.4: Methanerträge

A5 Nährstoffgehalte

- A5.1: N-Gehalte
- A5.2: K-Gehalte
- A5.3: P-Gehalte
- A5.4: Mg-Gehalte
- A5.5: S-Gehalte
- A5.6: Cl-Gehalte

A1 Anbaudaten aller Standorte

A1.1 Saattermine

Tab. A1: Saattermine der Kulturpflanzen aller Vairanten in den drei Versuchsjahren auf den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	1.9	23.8	6.9	8.9	12.9	28.8	6.9	4.9	30.8	6.9	8.9	29.8	23.8	23.8	7.10	17.8	22.8	7.9	6.9	31.8	
Mais	9.5	20.4	28.4	4.5	25.4	6.5	3.5	20.4	6.5	28.4	19.4	28.4	3.5	17.4	8.5	28.4	25.4	4.5	24.4	28.4	
Sonnenbl.	9.5	20.4	28.4	4.5	25.4	6.5	3.5	20.4	6.5	28.4	19.4	28.4	3.5	17.4	8.5	28.4	25.4	4.5	24.4	28.4	
Roggen-Energie	23.9	21.9	26.9	23.9	29.9	24.9	22.9	25.9	8.10	21.9	28.9	8.10	22.9	25.9	8.10	29.9	23.10	20.9	25.9	24.9	
Senf	18.8	6.6	2.7	17.8	28.8	28.8	11.7	14.8	26.6	20.7	18.7	31.7	27.7	17.7	24.8	22.8	29.8	27.9	17.7	1.7	
Roggen-Brot	23.9	21.9	26.9	23.9	29.9	24.9	22.9	25.9	8.10	21.9	28.9	8.10	22.9	25.9	8.10	29.9	23.10	20.9	25.9	24.9	
Senf																					
Zweikultur-Nutzung																					
W-Rübsen	7.10	31.8	6.9	8.9	12.9	24.9	6.9	4.9	30.8	6.9	8.9	23.8	4.9	23.8	7.10	29.9	23.10	7.9	6.9	31.8	
Mais	13.6	8.6	11.6	8.6	15.6	2.7	7.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Sorghum	13.6	8.6	11.6	8.6	6.7	16.6	6.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Sonnenbl.	13.6	8.6	11.6	8.6	15.6	2.7	6.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Mais/Sonnenbl.	13.6	8.6	11.6	8.6	15.6	2.7	7.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Roggen Grünschnitt	7.10	21.9	26.9	23.9	29.9	24.9	22.9	25.9	8.10	21.9	28.9	8.10	22.9	25.9	8.10	29.9	23.10	20.9	25.9	24.9	
Mais	13.6	8.6	11.6	8.6	15.6	2.7	7.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Sorghum	13.6	8.6	11.6	8.6	6.7	16.6	6.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Sonnenbl.	13.6	8.6	11.6	8.6	15.6	2.7	6.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Mais/Sonnenbl.	13.6	8.6	11.6	8.6	15.6	2.7	7.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Roggen-Erbesen	7.10	21.9	26.9	23.9	29.9	24.9	22.9	25.9	8.10	21.9	28.9	8.10	22.9	25.9	8.10	29.9	23.10	20.9	25.9	24.9	
Mais	13.6	8.6	11.6	8.6	15.6	2.7	7.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Sorghum	13.6	8.6	11.6	8.6	6.7	16.6	6.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Sonnenbl.	13.6	8.6	11.6	8.6	15.6	2.7	6.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Mais/Sonnenbl.	13.6	8.6	11.6	8.6	15.6	2.7	7.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Roggen-Gerste	7.10	21.9	26.9	23.9	29.9	24.9	22.9	25.9	8.10	21.9	28.9	8.10	22.9	25.9	8.10	29.9	23.10	20.9	25.9	24.9	
Sudangras	13.6	6.6	24.6	8.6	6.7	16.6	7.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Amarant	13.6	6.6	24.6	8.6	6.7	16.6	7.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Hanf *	13.6	6.6	24.6	8.6	6.7	16.6	7.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	
Mais/Sonnenbl.,Amarant	13.6	8.6	11.6	8.6	15.6	2.7	7.6	4.6	6.6	9.6	6.6	19.6	6.6	19.6	13.6	11.6	20.6	9.6	8.6	11.6	

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A1.2: Erntetermine

Tab. A2: Erntetermine der Kulturpflanzen aller Vairanten in den drei Versuchsjahren auf den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Disse			Rauschholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	15.11	20.10	30.10	22.11	3.11	22.10	22.11	7.11	31.10	16.11	17.11	20.11	22.11	6.11	15.11	22.11	14.11	1.11	22.11	14.11	14.11
Maïs	6.9	17.9	26.8	5.9	14.9	9.9	14.9	25.9	17.9	19.9	2.10	23.9	15.9	17.9	21.10	2.10	2.10	22.9	18.9	8.10	11.9
Sonnenbl.	6.9	12.9	2.9	23.8	28.8	19.8	17.8	21.9	19.9	15.8	28.8	9.9	15.9	17.9	21.10	2.10	2.10	22.9	14.9	23.9	18.9
Roggen-Energie	20.6	1.6	24.6	21.6	9.7	24.6	27.6	19.6	24.6	4.7	26.6	24.6	27.6	14.6	26.6	23.5	5.7	7.7	27.6	19.6	30.6
Senf	20.10	30.10	21.10	12.10	22.10	21.10	17.10	24.10	28.10	3.10	23.10	28.10	26.10	17.10	21.10	14.11	1.11	27.11	10.10	15.10	9.10
Roggen-Brot	25.7	26.7	5.8	25.7	2.8	29.7	18.7	19.7	28.7	25.7	24.7	29.7	24.7	17.7	28.7	23.5	27.7	28.7	25.7	1.8	6.8
Senf	20.10	30.10	21.10	12.10	22.10	21.10	17.10	24.10	28.10	3.10	23.10	30.10	26.10	17.10	21.10	14.11	1.11	-	10.10	15.10	9.10
Zweikultur-Nutzung																					
W-Rübsen	7.6	14.5	10.6	31.5	12.6	27.5	30.5	23.5	29.5	30.5	29.5	27.5	6.6	14.6	10.6	23.5	6.6	12.6	6.6	4.6	9.6
Maïs	10.10	24.10	21.10	27.9	15.10	14.10	11.10	15.10	14.10	3.10	16.10	28.10	11.10	16.10	21.10	12.10	25.10	5.11	11.10	15.10	14.10
Sorghum	27.9	24.10	21.10	27.9	15.10	14.10	10.10	16.10	22.10	3.10	16.10	29.10	11.10	16.10	21.10	12.10	25.10	5.11	11.10	15.10	10.10
Sonnenbl.	10.10	23.10	21.10	27.9	15.10	14.10	4.10	15.10	14.10	3.10	16.10	14.10	13.10	17.10	21.10	-	25.10	5.11	11.10	15.10	13.10
Maïs/Sonnenbl.	10.10	23.10	21.10	27.9	15.10	14.10	5.10	16.10	14.10	3.10	2.10	31.10	13.10	17.10	21.10	-	25.10	5.11	11.10	15.10	13.10
Roggen Grünschnitt	7.6	25.5	17.6	31.5	12.6	3.6	30.5	23.5	29.5	30.5	5.6	27.5	6.6	5.6	10.6	23.5	6.6	12.6	6.6	4.6	9.6
Maïs	10.10	24.10	21.10	27.9	15.10	14.10	11.10	15.10	14.10	3.10	16.10	28.10	11.10	16.10	21.10	12.10	25.10	5.11	11.10	15.10	14.10
Sorghum	27.9	24.10	21.10	27.9	15.10	14.10	10.10	16.10	22.10	3.10	16.10	29.10	11.10	16.10	21.10	12.10	25.10	5.11	11.10	15.10	10.10
Sonnenbl.	10.10	23.10	21.10	27.9	15.10	14.10	4.10	15.10	14.10	3.10	16.10	14.10	13.10	17.10	21.10	-	25.10	5.11	11.10	15.10	13.10
Maïs/Sonnenbl.	10.10	23.10	21.10	27.9	15.10	14.10	5.10	16.10	14.10	3.10	2.10	31.10	13.10	17.10	21.10	-	25.10	5.11	11.10	15.10	13.10
Roggen-Erbisen	7.6	24.5	17.6	31.5	12.6	3.6	30.5	23.5	29.5	30.5	5.6	27.5	6.6	5.6	10.6	23.5	6.6	12.6	6.6	4.6	9.6
Maïs	10.10	24.10	21.10	27.9	15.10	14.10	11.10	15.10	14.10	3.10	16.10	28.10	11.10	16.10	21.10	12.10	25.10	5.11	11.10	15.10	14.10
Sorghum	27.9	24.10	21.10	27.9	15.10	14.10	10.10	16.10	22.10	3.10	16.10	29.10	11.10	16.10	21.10	12.10	25.10	5.11	11.10	15.10	10.10
Sonnenbl.	10.10	23.10	21.10	27.9	15.10	14.10	4.10	15.10	14.10	3.10	16.10	14.10	13.10	17.10	21.10	-	25.10	5.11	11.10	15.10	13.10
Maïs/Sonnenbl.	10.10	23.10	21.10	27.9	15.10	14.10	5.10	16.10	14.10	3.10	2.10	31.10	13.10	17.10	21.10	-	25.10	5.11	11.10	15.10	13.10
Roggen-Gerste	7.6	24.5	17.6	31.5	12.6	3.6	30.5	23.5	29.5	30.5	5.6	27.5	6.6	5.6	10.6	23.5	6.6	12.6	6.6	4.6	9.6
Sudangras	12.10	24.10	2.9	27.9	15.10	7.10	25.9	9.10	22.10	3.10	16.10	9.11	12.10	16.10	21.10	12.10	-	5.11	11.10	11.10	14.10
Amarant	27.9	1.10	21.10	27.9	15.10	7.10	27.9	10.10	22.10	3.10	2.10	30.9	12.10	16.10	21.10	-	25.10	5.11	5.10	11.10	9.10
Hanf *	27.9	24.9	30.9	27.9	15.10	7.10	25.9	9.10	22.10	19.9	18.9	9.9	6.10	17.9	21.10	-	25.10	5.11	27.9	1.10	11.9
Maïs/Sonnenbl./Amarant	10.10	23.10	21.10	27.9	15.10	14.10	5.10	16.10	14.10	3.10	2.10	31.10	13.10	17.10	21.10	-	25.10	5.11	11.10	15.10	13.10

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A1.3: Vegetationsdauer

Tab. A3: Vegetationstage der Kulturpflanzen aller Vairanten in den drei Versuchsjahren auf den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Disse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	76	57	54	76	51	54	78	63	60	72	69	74	86	73	82	47	87	69	77	68	74
Maiss	121	151	121	125	143	127	135	159	135	145	167	152	136	154	177	148	158	151	138	168	137
Sonnenbl.	121	146	128	112	118	106	107	155	137	110	132	134	136	154	177	148	158	151	134	153	144
Roggen-Energie	271	254	273	272	284	275	279	267	261	287	272	275	279	263	263	229	280	259	281	268	281
Senf	62	144	109	55	54	53	96	70	122	73	95	114	89	90	81	80	69	88	13	88	98
Roggen-Brot	306	309	315	306	308	310	300	298	295	308	300	310	306	266	295	229	302	280	309	311	318
Senf	62	73	62	55	54	53	87	70	80	63	86	85	89	90	81	80	69	-	13	69	62
Zweikultur-Nutzung																					
W-Rübsen	244	257	279	266	274	247	267	262	274	267	264	265	282	284	293	229	251	234	273	272	284
Maiss	120	139	133	109	123	105	127	134	131	117	133	149	122	133	125	122	137	139	125	130	126
Sorghum	107	139	133	112	102	121	127	134	139	117	133	150	122	133	125	122	137	139	125	130	122
Sonnenbl.	120	138	133	112	123	105	121	133	131	117	133	131	124	134	125	-	137	139	125	130	125
Maiss/Sonnenbl.	120	138	133	112	123	105	121	134	131	117	119	152	124	134	125	-	137	139	125	130	125
Roggen Grünschnitt	244	247	266	251	257	254	251	241	235	252	251	247	258	254	247	229	251	234	260	253	260
Maiss	120	139	133	109	123	105	127	134	131	117	133	149	122	133	125	122	137	139	125	130	126
Sorghum	107	139	133	112	102	121	127	134	139	117	133	150	122	133	125	122	137	139	125	130	122
Sonnenbl.	120	138	133	112	123	105	121	133	131	117	133	131	124	134	125	-	137	139	125	130	125
Maiss/Sonnenbl.	120	138	133	112	123	105	121	134	131	117	119	152	124	134	125	-	137	139	125	130	125
Roggen-Erbesen	244	246	266	251	257	254	251	241	235	252	251	247	258	254	247	229	251	234	260	253	260
Maiss	120	139	133	109	123	105	127	134	131	117	133	149	122	133	125	122	137	139	125	130	126
Sorghum	107	139	133	112	102	121	127	134	139	117	133	150	122	133	125	122	137	139	125	130	122
Sonnenbl.	120	138	133	112	123	105	121	133	131	117	133	131	124	134	125	-	137	139	125	130	125
Maiss/Sonnenbl.	120	138	133	112	123	105	121	134	131	117	119	152	124	134	125	-	137	139	125	130	125
Roggen-Gerste	244	245	266	251	257	254	251	241	235	252	251	247	258	254	247	229	251	234	260	253	260
Sudangras	122	141	71	112	102	114	111	128	139	117	133	161	123	133	125	122	-	139	125	126	126
Amarant	107	118	120	112	102	114	113	129	139	117	119	121	123	133	125	-	137	139	119	126	121
Hanf *	107	111	99	112	102	114	111	128	139	103	105	100	117	134	125	-	137	139	111	116	93
Maiss/Sonnenbl./Amarant	120	138	133	112	123	105	121	134	131	117	119	152	124	134	125	-	137	139	125	130	125

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A1.4: Entwicklungsstadien (BBCH) zur Ernte

Tab. A4: Erntereifestadien (BBCH) der Kulturpflanzen aller Vairanten in den drei Versuchsjahren auf den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsee			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen			
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	
	Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	35	50	32	36	-	-	39	38	37	-	69	34	35	59	38	-	61	33	33	35	36	15
Mais	85	85	85	85	85	83	85	85	85	83	85	85	85	85	85	85	83	85	85	85	83	83
Sonnenbl.	85	85	85	83	85	83	84	87	87	83	71	85	81	85	85	85	81	87	87	83	83	83
Roggen-Energie	83	73	77	75	85	83	83	83	83	77	83	75	83	77	83	59	85	85	85	75	83	77
Senf	37	85	74	35	35	-	75	61	85	69	67	77	69	73	65	-	60	35	80	72	78	78
Roggen-Brot	92	92	92	92	92	92	92	90	89	93	89	89	92	92	89	59	87	89	92	92	89	87
Senf	37	35	16	35	33	-	73	60	67	67	65	71	65	71	65	-	60	-	75	32	61	61
Zweikultur-Nutzung																						
W-Rübsen	77	77	80	73	83	75	77	80	79	69	79	69	79	85	81	71	85	85	76	80	79	79
Mais	83	85	75	83	69	65	85	75	83	83	75	83	75	83	83	83	73	85	83	71	71	71
Sorghum	73	75	71	69	51	61	85	69	73	69	54	75	81	73	69	83	57	79	69	52	65	65
Sonnenbl.	83	87	85	83	69	81	86	81	85	75	81	83	85	85	85	-	71	89	83	79	75	75
Mais/Sonnenbl.	83	85	83	83	67	65	86	75	83	75	75	83	73	83	83	-	73	85	83	71	71	71
Roggen Grünschnitt	71	71	75	59	83	71	70	67	69	65	71	65	71	77	77	59	83	83	65	75	65	65
Mais	83	85	75	83	69	65	85	75	83	83	75	83	75	83	83	83	73	85	83	71	71	71
Sorghum	73	75	71	69	51	61	85	69	73	69	54	75	81	73	69	83	57	79	69	52	65	65
Sonnenbl.	83	87	85	83	69	81	86	81	85	75	81	83	85	85	85	-	71	89	83	79	75	75
Mais/Sonnenbl.	83	85	83	83	67	65	86	75	83	75	75	83	73	83	83	-	73	85	83	71	71	71
Roggen-Erbisen	65	71	77	38	83	71	55	67	69	51	71	61	61	77	77	59	83	83	63	75	65	65
Roggen-Erbisen	65	63	-	38	82	-	55	67	-	51	71	0	61	71	-	59	77	-	63	69	-	-
Mais	83	85	75	83	69	65	85	75	83	83	75	83	75	83	83	83	73	85	83	71	71	71
Sorghum	73	75	71	69	51	61	85	69	73	69	54	75	81	73	69	83	57	79	69	52	65	65
Sonnenbl.	83	87	85	83	69	81	86	81	85	75	81	83	85	85	85	-	71	89	83	79	75	75
Mais/Sonnenbl.	83	85	83	83	67	65	86	75	83	75	75	83	73	83	83	-	73	85	83	71	71	71
Roggen-Gerste	71	71	77	59	83	71	70	67	69	65	71	61	61	77	77	59	83	83	65	75	65	65
Roggen-Gerste	71	75	-	59	85	-	72	77	-	69	71	-	73	85	-	59	85	-	71	83	-	-
Sudangras	77	79	30	69	51	61	80	71	85	75	61	79	85	71	65	83	-	-	73	56	69	69
Amarant	77	77	75	77	69	77	81	71	85	75	85	77	85	85	85	-	79	89	85	77	77	77
Hanf*	77	77	77	77	75	77	79	85	89	69	61	71	83	83	-	-	85	87	85	77	75	75
Mais/Sonnenbl.,Amarant	83	85	83	83	67	65	86	75	83	75	75	83	73	83	83	-	73	85	83	71	71	71

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A2 Mineralischer Bodenstickstoff (N_{min})

A2.1 Frühjahrs-N_{min}-Werte im Jahr 2006

Tab.: A5: Frühjahrs-N_{min}-Werte in den einzelnen Bodenhorizonten an den sieben Versuchstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werlte			Witzenhausen		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Senf; Mais (Atletico)	28	21	14	28	29	15	53	34	23	40	14	6	43	28	11	-	-	-	22	11	0
Senf; Mais (Stamm)	28	21	14	28	29	15	53	34	23	40	14	6	43	28	11	-	-	-	22	11	0
Senf - Sonnenbl.	28	21	14	28	29	15	53	34	23	40	14	6	43	28	11	-	-	-	22	11	0
Senf - Sonnenbl. (Alisson)	28	21	14	28	29	15	53	34	23	40	14	6	43	28	11	-	-	-	22	11	0
WR-Energie (Ballistic) - Senf	16	12	10	25	10	10	10	5	4	12	10	4	31	14	3	9	4	6	12	4	2
WR-Energie (So.2) - Senf	16	12	10	25	10	10	10	5	4	12	10	4	31	14	3	9	4	6	12	4	2
WR-Brot (Visello) - Senf	8	8	10	10	10	10	8	6	6	12	11	4	31	14	3	9	4	6	13	4	2
WR-Brot (So.2) - Senf	8	8	10	10	10	10	8	6	6	12	11	4	31	14	3	9	4	6	13	4	2

Hauptfrucht-Nutzung

Zweikultur-Nutzung

WRü - Mais	12	12	10	24	20	10	13	10	5	15	7	3	149	12	2	4	2	12	13	4	1
WRü - Sorghum	12	12	10	24	20	10	13	10	5	15	7	3	149	12	2	4	2	12	13	4	1
WRü - Sonnenbl.	12	12	10	24	20	10	13	10	5	15	7	3	149	12	2	4	2	12	13	4	1
WRü - Mais/Sonnenbl.	12	12	10	24	20	10	13	10	5	15	7	3	149	12	2	4	2	12	13	4	1
Roggen - Mais	8	8	10	12	10	12	5	1	1	12	6	2	31	14	3	7	11	22	11	4	2
Roggen - Sorghum	8	8	10	12	10	12	5	1	1	12	6	2	31	14	3	7	11	22	11	4	2
Roggen - Sonnenbl.	8	8	10	12	10	12	5	1	1	12	6	2	31	14	3	7	11	22	11	4	2
Roggen - Mais/Sonnenbl.	8	8	10	12	10	12	5	1	1	12	6	2	31	14	3	7	11	22	11	4	2
WR/WE - Mais	8	8	10	14	17	25	6	6	5	11	5	2	42	15	5	8	6	27	13	5	2
WR/WE - Sorghum	8	8	10	14	17	25	6	6	5	11	5	2	42	15	5	8	6	27	13	5	2
WR/WE - Sonnenbl.	8	8	10	14	17	25	6	6	5	11	5	2	42	15	5	8	6	27	13	5	2
WR/WE - Mais/Sonnenbl.	8	8	10	14	17	25	6	6	5	11	5	2	42	15	5	8	6	27	13	5	2
WR/WG - Sudangras	12	8	10	31	24	22	12	9	5	17	7	3	31	14	3	6	2	17	16	7	1
WR/WR - Amaranth	12	8	10	31	24	22	12	9	5	17	7	3	31	14	3	6	2	17	16	7	1
WR - Hanf *	12	8	10	31	24	22	12	9	5	17	7	3	31	14	3	6	2	17	16	7	1
WR/WG - Mais/Sonnenbl./Amarant	12	8	10	31	24	22	12	9	5	17	7	3	31	14	3	6	2	17	16	7	1

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A2.2 Nachernte-N_{min}-Werte im Jahr 2006

Tab. A6: Nachernte-N_{min}-Werte im Jahr 2006 in den einzelnen Bodenhorizonten an den sieben Versuchstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werlte			Witzenhausen		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
	Hauptfrucht-Nutzung																				
Senf, Mais (Atletico)	-	-	-	37	77	55	22	7	9	12	3	16	36	7	9	9	5	34	8	22	36
Senf, Mais (Stamm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Senf - Sonnenbl.	-	-	-	19	0	0	21	8	5	18	6	5	33	5	2	12	8	36	9	4	2
Senf - Sonnenbl. (Alisson)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Energie (Ballistic) - Senf	20	8	10	10	10	0	11	4	1	24	5	13	34	12	4	3	11	23	9	2	2
WR-Energie (So.2) - Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Brot (Visello) - Senf	12	12	10	10	10	0	11	4	1	57	7	1	29	12	5	6	8	23	6	2	2
WR-Brot (So.2) - Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zweikultur-Nutzung																					
WRü - Mais	20	8	10	37	10	10	22	8	5	16	3	0	25	7	7	21	17	94	24	9	7
WRü - Sorghum	20	9	10	10	10	10	14	7	1	13	1	0	14	6	4	7	5	27	8	2	2
WRü - Sonnenbl.	24	8	10	10	27	10	19	7	5	21	3	0	29	12	5	-	-	-	25	5	3
WRü - Mais/Sonnenbl.	24	8	10	14	10	10	12	4	5	22	5	1	32	11	6	-	-	-	15	6	4
Roggen - Mais	8	8	10	37	37	10	14	6	5	10	1	0	22	7	4	7	10	35	14	9	9
Roggen - Sorghum	20	8	10	28	10	10	11	7	4	8	1	0	11	7	4	10	6	30	8	4	5
Roggen - Sonnenbl.	12	8	10	14	14	10	17	7	1	17	2	0	23	10	4	-	-	-	16	2	2
Roggen - Mais/Sonnenbl.	12	8	23	28	19	14	12	4	1	11	1	0	21	10	5	-	-	-	12	2	2
WR/WE - Mais	16	8	10	14	10	10	14	12	7	12	2	0	21	10	5	10	7	41	7	10	3
WR/WE - Sorghum	20	8	10	14	10	10	13	7	6	10	2	0	14	32	6	6	5	22	4	2	2
WR/WE - Sonnenbl.	12	8	10	10	10	10	16	6	1	15	2	1	18	9	4	-	-	-	10	2	2
WR/WE - Mais/Sonnenbl.	12	12	10	19	10	10	9	4	1	6	1	1	19	10	4	-	-	-	11	2	3
WR/WG - Sudangras	12	8	10	10	10	10	8	5	1	10	12	0	26	7	6	5	4	22	10	3	3
WR/WR - Amaranth	12	8	10	10	14	10	13	10	7	20	3	2	31	5	4	-	-	-	2	2	2
WR - Hanf *	12	8	14	10	10	10	8	1	1	15	5	3	28	11	6	-	-	-	5	2	2
WR/WG - Mais/Sonnenbl./Amarant	12	8	10	14	10	10	16	11	6	13	1	1	-	-	-	-	-	-	13	2	2

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A2.3 Frühjahrs-N_{min}-Werte im Jahr 2007

Tab. A7: Frühjahrs-N_{min}-Werte im Jahr 2007 in den einzelnen Bodenhorizonten an den sieben Versuchstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf, Mais (Atletico)	27	25	23	24	28	12	38	18	8	31	14	4	38	14	11	14	12	15	25	18	8
Senf, Mais (Stamm)	27	25	23	24	28	12	38	18	8	31	14	4	38	14	11	14	12	15	25	18	8
Senf - Sonnenbl.	27	25	23	24	28	12	38	18	8	31	14	4	38	14	11	14	12	15	25	18	8
Senf - Sonnenbl. (Alisson)	27	25	23	24	28	12	38	18	8	31	14	4	38	14	11	14	12	15	25	18	8
WR-Energie (Ballistic) - Senf	12	21	23	10	10	10	7	4	1	27	8	3	17	13	4	11	6	5	9	6	9
WR-Energie (So.2) - Senf	12	21	23	10	10	10	7	4	1	27	8	3	17	13	4	11	6	5	9	6	9
WR-Brot (Visello) - Senf	12	21	23	10	10	10	7	5	1	27	8	3	6	5	2	9	7	5	7	8	11
WR-Brot (So.2) - Senf	12	21	23	10	10	10	7	5	1	27	8	3	6	5	2	9	7	5	7	8	11
Zweikultur-Nutzung																					
WRü - Mais	12	12	14	10	10	10	8	1	1	21	16	16	15	10	4	8	5	6	3	2	3
WRü - Sorghum	12	12	14	10	10	10	8	1	1	21	16	16	15	10	4	8	5	6	3	2	3
WRü - Sonnenbl.	12	12	14	10	10	10	8	1	1	21	16	16	15	10	4	8	5	6	3	2	3
WRü - Mais/Sonnenbl.	12	12	14	10	10	10	8	1	1	21	16	16	15	10	4	8	5	6	3	2	3
Roggen - Mais	20	21	23	10	10	10	10	5	6	28	6	4	9	12	5	10	4	6	6	3	7
Roggen - Sorghum	20	21	23	10	10	10	10	5	6	28	6	4	9	12	5	10	4	6	6	3	7
Roggen - Sonnenbl.	20	21	23	10	10	10	10	5	6	28	6	4	9	12	5	10	4	6	6	3	7
Roggen - Mais/Sonnenbl.	20	21	23	10	10	10	10	5	6	28	6	4	9	12	5	10	4	6	6	3	7
WR/WE - Mais	43	21	23	10	10	10	5	5	1	29	9	4	15	8	4	9	5	8	5	3	6
WR/WE - Sorghum	43	21	23	10	10	10	5	5	1	29	9	4	15	8	4	9	5	8	5	3	6
WR/WE - Sonnenbl.	43	21	23	10	10	10	5	5	1	29	9	4	15	8	4	9	5	8	5	3	6
WR/WE - Mais/Sonnenbl.	43	21	23	10	10	10	5	5	1	29	9	4	15	8	4	9	5	8	5	3	6
WR/WG - Sudangras	12	33	32	12	10	10	9	11	9	28	11	6	13	7	4	9	6	8	4	4	5
WR/WR - Amaranth	12	33	32	12	10	10	9	11	9	28	11	6	13	7	4	9	6	8	4	4	5
WR - Hanf *	12	33	32	12	10	10	9	11	9	28	11	6	13	7	4	9	6	8	4	4	5
WR/WG - Mais/Sonnenbl./Amarant	12	33	32	12	10	10	9	11	9	28	11	6	13	7	4	9	6	8	4	4	5

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A2.4 Nachernte-N_{min}-Werte im Jahr 2007

Tab. A8: Nachernte-N_{min}-Werte im Jahr 2007 in den einzelnen Bodenhorizonten an den sieben Versuchstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werlte			Witzenhausen		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf; Mais (Atletico)	12	8	14	21	10	15	8	1	1	17	10	9	8	4	21	66	29	14	5	5	5
Senf; Mais (Stamm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Senf - Sonnenbl.	16	8	10	26	14	9	16	6	1	28	11	7	16	9	3	25	21	8	39	13	6
Senf - Sonnenbl. (Alisson)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Energie (Ballistic) - Senf	24	12	14	16	15	9	-	-	-	-	-	-	17	5	3	14	7	13	9	6	2
WR-Energie (So.2) - Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Brot (Visello) - Senf	8	12	10	18	21	18	-	-	-	-	-	-	13	4	3	11	6	7	13	4	4
WR-Brot (So.2) - Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zweikultur-Nutzung																					
WRü - Mais	16	21	14	21	13	11	27	17	11	15	7	3	46	6	4	27	24	25	28	6	7
WRü - Sorghum	8	25	14	23	27	27	12	7	5	21	7	8	57	7	6	23	11	10	33	29	15
WRü - Sonnenbl.	20	12	14	25	9	10	23	12	1	18	8	3	22	6	5	16	6	8	19	6	3
WRü - Mais/Sonnenbl.	24	21	23	17	19	12	14	7	1	15	5	3	32	12	7	19	10	14	29	8	6
Roggen - Mais	16	12	14	14	5	7	8	4	6	15	2	3	30	6	4	23	10	11	43	15	16
Roggen - Sorghum	20	21	14	21	38	32	9	5	5	19	7	5	26	9	3	46	15	17	22	50	37
Roggen - Sonnenbl.	8	12	10	12	3	1	17	5	1	14	5	4	22	11	3	12	6	4	21	7	5
Roggen - Mais/Sonnenbl.	16	12	14	17	4	4	13	4	1	15	5	5	33	9	5	35	18	20	25	12	8
WR/WE - Mais	20	12	10	26	8	7	8	1	6	15	5	6	27	7	4	24	12	10	18	6	5
WR/WE - Sorghum	12	21	14	17	17	17	8	5	5	19	6	4	30	6	3	41	34	29	23	24	20
WR/WE - Sonnenbl.	20	21	14	15	5	2	11	1	1	15	3	2	21	7	4	28	8	4	17	9	4
WR/WE - Mais/Sonnenbl.	16	12	10	16	10	3	8	4	1	16	5	5	22	8	4	18	10	5	14	6	4
WR/WG - Sudangras	24	16	14	27	31	30	13	4	1	41	7	5	22	7	3	-	-	-	31	9	6
WR/WR - Amaranth	20	16	14	14	6	10	25	9	8	19	7	5	21	8	5	10	23	51	20	6	11
WR - Hanf *	16	16	14	12	3	2	23	4	1	18	5	4	7	8	2	14	7	4	9	3	3
WR/WG - Mais/Sonnenbl./Amarant	12	8	10	15	4	4	29	8	6	20	6	2	17	5	3	21	9	6	18	9	5

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A2.5 Frühjahrs-N_{min}-Werte im Jahr 2008

Tab. A9: Frühjahrs-N_{min}-Werte im Jahr 2008 in den einzelnen Bodenhorizonten an den sieben Versuchstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf, Mais (Atletico)	27	25	23	-	-	-	48	26	18	17	6	3	39	26	17	35	25	0	15	6	3
Senf, Mais (Stamm)	27	25	23	-	-	-	48	26	18	17	6	3	39	26	17	35	25	0	15	6	3
Senf - Sonnenbl.	27	25	23	-	-	-	48	26	18	17	6	3	39	26	17	35	25	0	15	6	3
Senf - Sonnenbl. (Alisson)	27	25	23	-	-	-	48	26	18	17	6	3	39	26	17	35	25	0	15	6	3
WR-Energie (Ballistic) - Senf	20	21	23	23	21	23	11	14	17	10	5	4	25	22	27	17	14	14	9	4	3
WR-Energie (So.2) - Senf	20	21	23	23	21	23	11	14	17	10	5	4	25	22	27	17	14	14	9	4	3
WR-Brot (Visello) - Senf	12	21	23	23	19	12	13	13	14	9	2	4	24	31	33	15	10	10	9	4	3
WR-Brot (So.2) - Senf	12	21	23	23	19	12	13	13	14	9	2	4	24	31	33	15	10	10	9	4	3
Zweikultur-Nutzung																					
WRü - Mais	12	21	23	21	19	32	10	11	7	9	1	1	21	12	6	15	9	9	7	3	1
WRü - Sorghum	12	21	23	21	19	32	10	11	7	9	1	1	21	12	6	15	9	9	7	3	1
WRü - Sonnenbl.	12	21	23	21	19	32	10	11	7	9	1	1	21	12	6	15	9	9	7	3	1
WRü - Mais/Sonnenbl.	12	21	23	21	19	32	10	11	7	9	1	1	21	12	6	15	9	9	7	3	1
Roggen - Mais	12	21	28	14	7	12	13	17	14	11	3	10	19	27	23	21	13	12	9	16	3
Roggen - Sorghum	12	21	28	14	7	12	13	17	14	11	3	10	19	27	23	21	13	12	9	16	3
Roggen - Sonnenbl.	12	21	28	14	7	12	13	17	14	11	3	10	19	27	23	21	13	12	9	16	3
Roggen - Mais/Sonnenbl.	12	21	28	14	7	12	13	17	14	11	3	10	19	27	23	21	13	12	9	16	3
WR/WE - Mais	12	21	23	15	9	17	14	17	18	12	3	9	18	25	32	16	14	10	8	2	0
WR/WE - Sorghum	12	21	23	15	9	17	14	17	18	12	3	9	18	25	32	16	14	10	8	2	0
WR/WE - Sonnenbl.	12	21	23	15	9	17	14	17	18	12	3	9	18	25	32	16	14	10	8	2	0
WR/WE - Mais/Sonnenbl.	12	21	23	15	9	17	14	17	18	12	3	9	18	25	32	16	14	10	8	2	0
WR/WG - Sudangras	8	21	14	21	9	13	9	10	11	10	1	4	23	28	35	17	12	11	8	3	2
WR/WR - Amaranth	8	21	14	21	9	13	9	10	11	10	1	4	23	28	35	17	12	11	8	3	2
WR - Hanf *	8	21	14	21	9	13	9	10	11	10	1	4	23	28	35	17	12	11	8	3	2
WR/WG - Mais/Sonnenbl./Amaranth	8	21	14	21	9	13	9	10	11	10	1	4	23	28	35	17	12	11	8	3	2

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A2.6 Nachernte-N_{min}-Werte im Jahr 2008

Tab. A10: Nachernte-N_{min}-Werte im Jahr 2008 in den einzelnen Bodenhorizonten an den sieben Versuchstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf; Mais (Atletico)	74	88	19	18	18	23	18	5	1	33	18	4	14	5	4	23	9	6	15	56	29
Senf; Mais (Stamm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Senf - Sonnenbl.	39	17	19	27	0	0	19	8	1	24	14	6	6	1	3	54	36	7	14	5	2
Senf - Sonnenbl. (Alisson)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Energie (Ballistic) - Senf	12	8	10	5	5	1	17	6	1	12	2	2	6	10	2	10	6	7	7	1	1
WR-Energie (So.2) - Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Brot (Visello) - Senf	12	8	10	6	5	3	13	8	1	20	2	2	5	3	2	8	5	7	8	1	1
WR-Brot (So.2) - Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zweikultur-Nutzung																					
WRü - Mais	90	12	28	121	18	10	8	4	1	98	8	4	39	6	2	60	31	8	61	12	7
WRü - Sorghum	129	63	50	80	16	8	9	5	1	79	9	5	46	19	5	20	12	9	90	42	5
WRü - Sonnenbl.	121	12	10	79	10	5	10	4	1	36	5	2	17	4	3	23	14	4	57	4	2
WRü - Mais/Sonnenbl.	66	17	10	61	12	7	9	2	1	25	3	2	37	11	4	31	35	14	43	5	2
Roggen - Mais	31	8	10	44	9	1	8	4	1	83	10	5	17	7	5	41	34	22	51	15	11
Roggen - Sorghum	24	12	10	25	6	2	8	5	2	59	7	3	20	6	4	13	7	8	31	6	3
Roggen - Sonnenbl.	12	8	10	63	16	2	8	2	1	18	3	2	12	4	3	10	5	2	14	2	2
Roggen - Mais/Sonnenbl.	24	12	10	127	27	7	9	2	1	18	4	2	14	4	4	38	20	17	20	4	2
WR/WE - Mais	27	12	10	116	20	5	8	2	1	48	5	2	8	4	3	20	26	18	34	10	11
WR/WE - Sorghum	12	12	10	55	13	3	14	6	1	38	3	4	14	6	3	11	10	12	49	5	1
WR/WE - Sonnenbl.	12	8	10	54	20	2	10	4	1	18	4	2	11	4	4	10	4	4	14	5	1
WR/WE - Mais/Sonnenbl.	12	8	10	81	18	5	8	2	1	17	3	2	12	4	3	12	9	8	22	2	1
WR/WG - Sudangras	0	0	0	45	12	7	8	4	1	21	2	2	11	5	3	11	7	3	13	1	1
WR/WR - Amaranth	12	8	10	6	4	5	12	6	1	14	2	2	7	4	3	10	4	3	11	2	2
WR - Hanf *	16	8	10	37	6	3	7	2	1	22	5	2	5	1	1	5	3	3	8	6	5
WR/WG - Mais/Sonnenbl./Amarant	12	8	10	95	13	15	7	2	1	15	2	2	8	4	3	20	2	8	14	2	1

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A3 Ertragsparameter

A3.1: Trockenmasseerträge

Tab.A11: Jahrestrockenmasseerträge aller Varianten im Mittel der drei Versuchsjahre an den sieben Versuchsstandorten. Erträge mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich pro Standort nicht signifikant voneinander ($\alpha=0,05$).

	Dornburg		Gülzow		Düsse		Rauisch.		Straubing		Werthe		Witzenhausen		
Hauptfrucht-Nutzung															
Senf, Mais (Atletico)	17,6	. b c	17,4	a . c .	25,0	. . . d . f	21,2	a b	27,0	. b c	19,4	. b .	23,2	. . . . e f g
Senf, Mais (Stamm)	17,5	. b c	18,7	. b c d	26,6	. . . . f	23,0	. b	28,4	. . c	18,5	. b c	22,5	. . . d . f g
Senf - Sonnenbl.	12,9	a b .	12,1	a b .	16,4	a b c . .	16,3	a b	19,3	a . c	11,0	a . c	14,9	a b	
Senf - Sonnenbl. (Alisson)	11,3	. b .	11,2	a . .	14,3	a b . . .	19,9	a b	17,1	a b .	8,6	a . .	13,8	a	
WR-Energie (Ballistic) - Senf	19,1	. b c	15,0	a . c .	18,8	. b . d . .	20,2	a b	19,0	a . c	14,2	a b .	17,5	a . c d e . .	
WR-Energie (So.2) - Senf	18,8	. b c	14,8	a . c .	17,9	. b . e . .	20,4	a b	18,7	a . c	14,3	a b .	16,6	a . c d . . .	
WR-Brot (Visello) - Senf	16,2	. b c	15,3	a . c .	14,3	a b	14,4	a .	14,3	a . .	14,2	a b .	15,2	a . c	
WR-Brot (So.2)- Senf	15,7	. b c	15,5	a . c .	13,7	. b	14,8	a b	14,9	a . .	13,7	a b .	13,8	a	
Zweikultur-Nutzung															
WRü - Mais	18,8	. b c	17,1	a . c .	26,2	. . . . f	23,2	. b	23,2	a . c	17,1	. b c	23,5	. . . . e f g
WRü - Sorghum	17,8	. b c	13,7	a . . d	23,3	. . c d e f	19,3	a b	17,6	a b .	14,0	a b .	17,4	a . c d e . .	
WRü - Sonnenbl.	16,0	. b c	17,1	a . c .	20,2	. b . . . f	18,9	a b	19,5	a . c	13,3	a b .	19,1	a f .	
WRü - Mais/Sonnenbl.	18,1	. b c	16,2	a . c .	22,2	. . c d e f	20,4	a b	20,4	a . c	14,1	a b .	21,7	. . . . d . f g
Roggen - Mais	21,1	. . c	21,8	. . c d	27,0	. . . . f	23,1	. b	27,1	. b c	20,4	. b .	24,2	. . . . . f g
Roggen - Sorghum	18,3	. b c	16,9	a . c .	24,1	. . . d e f	22,2	a b	20,2	a . c	16,4	a b .	18,9	a f .	
Roggen - Sonnenbl.	19,2	. b c	20,6	. . c d	22,3	. . c d e f	21,3	a b	21,4	a . c	16,9	a b .	20,5	. b c . . f g	
Roggen - Mais/Sonnenbl.	19,8	. b c	21,2	. . c d	24,5	. . . d e f	21,8	a b	22,1	a . c	18,8	. b c	22,3	. . . . d . f g
WRWE - Mais	20,9	. . c	22,9	. . c .	26,2	. . . . f	23,9	. b	23,7	a . c	20,1	. b .	24,6	. . . . . f .
WRWE - Sorghum	18,6	. b c	17,1	a . c .	23,5	. . . d e f	20,1	a b	19,6	a . c	17,0	. b c	18,2	a g	
WRWE - Sonnenbl.	20,1	a . c	20,1	. b c d	20,8	a . . d e f	22,1	a b	19,9	a . c	18,4	. b c	21,4	. . c . . f g	
WRWE - Mais/Sonnenbl.	19,9	. b c	21,3	. . c d	22,5	. . c d e f	20,5	a b	21,4	a . c	18,2	. b c	22,1	. . . . d . f g
WRWG - Sudangras	19,0	. b c	28,3	a . c .	25,8	. . . . f	20,0	a b	22,8	a . c	19,3	. b c	19,7	a f .
WRWR - Amaranth	18,4	. b c	14,4	a . . d	18,3	. b . d . .	18,3	a b	17,2	a b .	12,7	a b .	16,8	a . c d . . .	
WR - Hanf *	19,3	. b c	20,4	. . c d	26,6	. . . . f	18,3	a b	17,2	a . c	15,4	a b .	17,3	a . c d e . .
WRWG - Mais/Sonnenbl./Amarant	19,0	. b c	20,6	. . c d	24,5	. . . d e f	22,7	a b	19,0	a b .	17,0	a b .	22,3	. . . . d . f g

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A3.2: TS-Gehalte

Tab. A12: Trockensubstanzgehalte [% i. TM] der Pflanzen aller Varianten im Mittel der drei Versuchsjahre an den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauschholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhäusen			
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	
Hauptfrucht-Nutzung																						
Senf	15,7	10,5	13,8	10,3	10,3	13,5	10,4	14,2	15,4	9,9	9,9	11,8	14,3	15,0	14,7	17,8	13,9	6,3	11,2	8,9	13,2	
Mais (Athletico)	26,1	30,3	28,5	28,9	22,9	26,0	29,8	32,7	33,4	28,7	23,0	22,1	34,2	34,2	36,4	42,3	26,9	34,0	29,2	28,1	29,2	
Mais (Stamm)	24,1	31,5	27,1	29,4	23,7	25,5	32,5	33,2	37,2	28,3	30,3	25,0	33,9	33,3	41,5	32,2	28,4	39,6	30,9	29,0	29,0	
Sonnenbl. (Methasol)	17,8	22,8	23,3	17,2	14,6	15,8	15,5	24,4	29,4	29,5	16,6	22,3	24,0	24,4	24,5	28,6	23,3	22,5	19,1	21,9	25,9	
Sonnenbl. (Alisson)	-	26,0	22,9	19,6	17,4	15,8	17,4	30,4	26,1	30,2	20,6	22,1	28,2	32,7	22,6	28,0	26,0	27,0	22,8	21,6	27,9	
WR-Energie (Balistic)	39,7	32,4	39,2	31,5	47,4	39,2	33,6	37,5	39,0	42,6	34,7	28,7	42,4	36,3	42,2	43,5	39,9	48,3	32,6	33,3	41,1	
Senf	16,1	47,0	25,6	12,3	13,1	15,2	22,8	17,5	46,5	23,3	20,3	20,8	19,9	23,5	19,0	15,9	12,9	13,1	27,1	23,2	28,1	
WR-Brot (Visello)	80,4	69,3	88,4	85,5	84,4	87,8	80,8	63,1	74,4	87,6	78,2	82,7	50,7	-	83,7	86,8	87,8	87,1	65,8	55,9	80,8	
Senf	16,2	18,7	26,6	12,3	12,4	19,1	26,6	15,8	19,0	23,1	16,4	18,0	18,1	24,1	20,0	14,5	11,0	-	18,0	15,6	13,9	
Zweikultur-Nutzung																						
WRü	19,4	17,9	22,9	19,8	25,7	16,5	15,0	24,6	19,3	13,2	18,2	13,5	19,4	36,0	26,3	19,6	25,3	36,3	16,2	18,1	22,8	
Mais	22,5	21,3	20,7	25,0	17,4	19,3	31,7	23,5	27,8	24,7	17,8	23,8	31,8	18,5	22,7	27,1	21,3	17,4	26,8	17,5	17,3	
Sorghum	26,5	21,6	22,0	22,8	18,0	22,5	25,8	22,7	25,7	25,9	17,6	22,9	27,2	19,1	20,5	21,2	21,6	19,4	23,0	17,4	22,2	
Sonnenbl.	17,5	20,2	20,1	14,7	16,9	16,7	23,4	20,5	23,7	25,5	17,0	19,3	27,5	17,0	22,4	-	21,1	19,4	22,8	16,5	16,3	
Mais/Sonnenbl.	19,8	20,6	20,9	22,1	16,1	16,9	24,6	21,6	23,7	23,7	14,5	21,1	22,5	18,6	21,4	-	22,2	17,3	24,0	16,3	17,2	
WR	33,5	32,6	36,6	24,9	37,2	34,2	24,6	35,6	29,3	23,2	32,5	18,6	32,7	34,5	35,6	31,0	38,8	39,9	29,2	30,5	32,6	
Mais	25,3	19,9	19,7	25,8	17,7	18,8	32,6	24,7	28,2	25,4	17,1	25,3	31,7	27,3	23,6	29,2	21,5	18,0	26,6	17,1	17,1	
Sorghum	25,2	20,8	17,1	21,7	17,4	21,8	27,8	22,4	24,5	26,3	17,9	24,6	26,0	25,7	20,7	20,7	22,2	18,4	23,0	16,3	20,4	
Sonnenbl.	16,3	20,4	15,3	15,4	17,6	15,4	23,0	20,0	23,9	22,5	16,5	19,5	25,0	21,9	21,3	-	20,5	19,2	21,5	16,6	16,9	
Mais/Sonnenbl.	18,2	20,1	16,2	23,6	16,8	16,2	25,4	21,6	23,6	22,0	14,6	22,1	21,4	23,3	20,6	-	22,0	17,7	24,0	16,3	17,2	
WR/WE	33,9	35,4	36,9	24,7	38,9	35,3	25,0	37,4	26,1	20,2	32,5	18,9	32,2	36,6	34,2	25,2	39,6	37,0	28,9	29,3	26,9	
Mais	25,6	23,3	16,0	25,8	18,4	19,6	34,0	24,2	28,9	23,7	18,0	24,7	31,0	26,8	23,0	27,6	23,9	17,4	26,8	17,6	19,9	
Sorghum	24,2	21,6	16,2	21,6	17,1	21,7	27,8	21,9	23,1	26,0	18,2	24,2	27,1	26,5	19,6	20,9	21,5	19,2	22,7	16,6	19,5	
Sonnenbl.	17,7	20,2	16,1	17,4	16,6	13,5	23,8	18,0	24,1	21,0	15,6	20,8	25,2	18,9	21,0	-	21,9	18,1	22,1	16,6	15,4	
Mais/Sonnenbl.	19,0	20,6	15,1	24,5	17,1	16,4	24,5	19,7	25,1	22,6	15,0	20,5	22,8	22,0	22,0	-	19,9	18,3	23,7	16,3	16,5	
WR/WG	30,5	33,5	40,1	25,2	42,2	36,5	25,6	36,3	26,1	17,3	30,5	21,8	32,5	37,1	35,8	31,3	41,5	42,4	29,9	29,2	34,6	
Sudangras	19,8	23,3	-	25,1	18,7	20,5	26,0	25,0	27,2	24,4	21,0	24,1	26,5	24,5	23,4	25,0	-	22,0	24,1	17,8	22,6	
Amarant	20,6	20,6	19,4	14,9	16,4	16,2	20,5	20,7	22,4	18,7	16,5	22,8	24,4	24,2	23,8	-	27,0	32,0	20,6	14,2	20,9	
Hanf *	32,4	34,6	28,8	32,1	29,1	29,3	36,9	34,3	42,9	34,2	26,5	31,4	26,3	25,0	30,3	-	32,8	31,8	34,0	30,6	31,4	
Mais/Sonnenbl./Amarant	19,1	20,4	15,8	20,4	16,4	16,5	25,9	18,5	24,9	19,3	15,1	28,8	-	22,5	21,7	-	22,3	18,6	22,7	16,1	17,9	

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A4 Bioenergetische Parameter

A4.1 Brennwerte

Tabelle 13: Brennwerte der Biomassen in den drei Versuchsjahren auf den sieben Versuchsstandorten in MJ kg TM⁻¹.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werlfe			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mais (Atletico)	17,7	17,5	17,9	18,1	18,6	20,2	17,3	17,9	18,6	16,6	17,6	18,3	17,5	17,3	18,1	17,0	19,5	19,4	-	-	-
Mais (Stamm)	17,6	17,7	17,9	18,3	18,7	20,0	17,5	18,3	18,6	18,4	18,2	19,0	17,2	17,4	18,5	16,6	19,0	19,4	18,7	18,7	18,6
Sonnenbl. (Methasol)	18,1	18,4	18,3	17,8	16,7	19,9	17,3	19,1	20,0	16,5	17,0	20,0	17,1	17,2	19,8	18,3	19,8	18,9	19,9	20,2	19,9
Sonnenbl. (Alisson)	18,7	17,6	16,8	18,5	18,6	20,0	18,2	19,1	20,0	17,0	17,6	18,4	19,2	16,3	19,9	16,6	19,5	19,4	21,7	18,9	20,6
WR-Energie (Ballistic)	17,3	18,2	17,8	18,1	18,6	19,1	17,5	18,7	18,4	17,0	17,7	18,8	17,0	16,7	18,3	-	19,2	19,0	18,4	18,7	18,2
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Brot (Visello) - Korn -	18,0	18,1	17,9	18,4	18,6	21,0	17,0	18,1	17,9	18,6	18,8	17,3	16,8	16,9	18,6	-	19,1	18,2	18,4	18,4	18,2
- Stroh -	17,3	18,0	18,4	18,0	18,9	18,9	17,7	18,2	18,2	17,1	17,5	17,0	17,0	17,6	18,3	-	19,7	18,4	18,2	18,5	17,6
Zweikultur-Nutzung																					
WRü	17,6	17,2	17,6	17,9	19,0	18,4	17,2	18,4	18,3	16,5	17,4	18,5	16,3	18,3	19,2	-	21,1	19,1	17,7	19,3	19,1
Mais	17,3	17,5	17,4	17,1	18,0	19,0	17,4	17,7	18,5	16,5	17,6	17,6	17,4	16,7	18,9	16,9	19,0	19,2	18,6	18,7	18,6
Sorghum	17,3	17,4	17,4	16,6	18,1	18,5	17,4	17,6	18,0	16,3	16,9	17,6	17,2	16,7	18,3	17,2	18,5	18,9	18,5	17,9	18,1
Sonnenbl.	17,5	17,4	17,4	16,7	18,1	18,5	18,2	17,6	18,0	17,7	16,9	17,6	19,0	16,7	18,3	20,0	17,9	18,1	20,0	17,9	18,1
Mais/Sonnenbl.	17,9	17,5	18,3	18,1	18,1	18,8	17,5	17,8	18,3	17,5	17,5	17,8	18,2	16,6	18,1	19,0	18,5	18,8	19,0	18,5	18,8
WR	18,2	18,0	17,9	18,2	18,6	19,2	17,9	18,8	18,7	16,9	17,5	18,7	17,0	17,5	18,8	-	19,2	19,4	18,5	18,5	18,3
Mais	17,4	17,4	17,3	18,1	18,3	19,4	17,4	17,6	18,4	15,8	17,5	18,0	17,4	16,7	18,9	16,9	18,6	19,3	18,4	18,5	18,3
Sorghum	17,1	17,1	17,5	17,2	17,9	18,8	17,4	17,6	17,6	16,5	17,3	18,4	17,2	16,7	18,3	17,3	18,8	19,0	18,4	18,1	18,2
Sonnenbl.	18,6	17,6	16,9	18,0	18,3	18,1	18,2	17,5	19,4	15,9	17,1	18,9	19,0	16,7	18,3	-	19,2	19,0	19,6	18,9	19,6
Mais/Sonnenbl.	18,0	17,4	17,4	16,0	17,9	18,7	17,3	18,0	18,2	16,8	17,4	17,7	18,2	16,6	18,1	-	19,1	18,9	18,6	18,3	18,8
WR/WG	18,1	18,0	18,0	18,2	18,5	19,1	17,9	18,5	18,7	17,0	17,5	18,7	17,2	17,5	18,8	-	19,3	19,4	18,4	18,6	18,5
Mais	17,3	17,4	17,6	16,9	18,3	18,7	17,4	17,6	18,4	16,2	16,5	18,0	17,3	16,8	19,0	17,9	18,7	18,9	18,2	18,2	18,4
Sorghum	17,3	17,2	17,0	16,8	18,0	18,5	17,2	17,4	17,8	16,3	16,7	18,2	17,0	16,5	18,4	17,5	18,6	18,9	18,1	18,1	18,0
Sonnenbl.	18,6	17,7	16,9	18,8	18,0	17,8	17,9	18,1	19,0	17,4	16,6	19,2	20,3	18,4	19,2	-	19,4	19,7	18,9	18,5	19,0
Mais/Sonnenbl.	17,6	17,2	16,8	16,8	17,7	18,0	17,0	17,6	18,4	16,5	16,6	17,7	17,9	17,4	18,1	-	19,3	18,6	18,7	18,2	18,7
WR/WG	17,8	18,0	17,6	17,7	18,5	18,9	17,5	18,6	18,7	16,5	16,8	18,2	17,1	17,1	18,5	-	19,4	19,5	18,8	18,3	18,3
Sudangras	17,2	17,4	17,4	16,6	18,1	18,8	17,5	17,5	17,8	16,8	17,2	16,1	17,4	16,6	18,4	17,6	-	18,8	18,3	17,9	17,9
Amarant	15,9	16,4	15,9	15,9	17,3	16,3	16,1	16,0	16,3	15,5	14,4	19,2	16,1	15,5	15,4	16,1	17,2	18,2	17,3	16,6	16,6
Hanf *	18,0	18,2	17,0	17,0	18,2	18,5	17,9	18,3	18,8	16,2	17,2	16,8	16,1	15,6	16,5	17,9	18,8	18,9	18,6	18,0	17,9
Mais/Sonnenbl./Amarant	17,9	17,2	16,9	17,8	18,0	18,1	17,3	17,2	18,0	16,1	17,2	18,6	-	15,6	16,5	-	19,3	19,4	20,6	18,4	18,1

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A4.2 Energieerträge

Tabelle 14: Jahres-Energieerträge auf Basis des Brennwertes in den drei Versuchsjahren auf den sieben Versuchsstandorten in GJ ha⁻¹.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen			
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	
Hauptfrucht-Nutzung																						
Senf: Mais (Atletico)	252	351	237	324	321	274	347	431	450	289	406	311	336	547	409	263	420	361	431	442	367	
Senf: Mais (Stamm)	245	354	241	373	331	289	403	458	477	342	473	349	379	518	476	235	348	405	458	373	381	
Senf - Sonnenbl.	151	221	241	215	213	158	281	223	306	320	216	218	303	314	286	200	243	138	340	227	279	
Senf - Sonnenbl. (Alisson)	-	184	174	196	221	147	241	190	276	366	286	291	298	306	194	115	189	133	329	205	262	
WR-Energie (Ballistic) - Senf	253	260	329	217	227	334	305	236	282	272	299	296	292	279	234	-	165	298	259	310	273	
WR-Energie (So.2) - Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
WR-Brot (Visello) - Senf	275	258	263	254	209	379	277	226	247	179	222	225	253	274	244	-	186	337	257	236	251	
WR-Brot (So.2) - Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Zweikultur-Nutzung																						
WRü - Mais	296	386	299	374	250	301	495	401	509	340	396	476	437	381	419	213	312	285	500	424	392	
WRü - Sorghum	328	334	266	296	169	273	460	307	472	328	288	379	358	293	279	192	232	210	378	272	312	
WRü - Sonnenbl.	256	284	297	314	310	297	394	298	386	324	318	332	326	352	354	-	282	223	340	376	338	
WRü - Mais/Sonnenbl.	297	338	325	323	284	284	443	325	424	357	319	398	381	371	335	-	318	216	411	417	391	
Roggen - Mais	332	449	342	494	390	339	524	423	516	389	423	387	465	528	450	255	345	409	504	461	374	
Roggen - Sorghum	324	346	303	347	285	314	523	329	446	347	394	430	360	383	316	196	278	317	411	297	333	
Roggen - Sonnenbl.	284	358	385	382	423	342	474	340	418	367	377	370	352	424	402	-	323	325	399	407	357	
Roggen - Mais/Sonnenbl.	308	391	359	395	404	340	513	379	435	371	377	393	356	439	393	-	372	347	430	449	360	
WR/WE - Mais	327	458	329	500	372	387	544	413	457	335	442	462	383	451	430	240	377	391	475	480	399	
WR/WE - Sorghum	335	349	308	321	249	356	526	316	412	326	323	406	376	381	269	227	281	314	385	274	338	
WR/WE - Sonnenbl.	316	379	387	365	382	367	471	309	365	330	409	440	351	386	374	-	383	332	410	420	369	
WR/WE - Mais/Sonnenbl.	293	404	358	379	386	377	464	360	386	298	376	397	354	402	390	-	343	353	441	419	369	
WR/WG - Sudangras	289	397	258	389	297	298	464	465	453	329	323	366	383	417	398	200	-	373	448	329	305	
WR/WR - Amaranth	258	426	270	208	270	298	336	287	332	243	266	438	265	314	293	-	239	239	367	296	238	
WR - Hanf*	300	410	323	400	355	348	535	504	417	225	361	350	228	329	325	-	295	297	335	369	250	
WR/WG - Mais/Sonnenbl./Amarant	326	367	313	411	358	358	502	353	456	292	400	492	149	470	396	-	350	309	481	433	349	

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A4.3 Methanausbeuten

Tabelle 15: Methanausbeuten der Biomassen in den drei Versuchsjahren auf den sieben Versuchsstandorten in l kg oTS⁻¹.

	Dornburg			Gülzow			Disse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mais (Athletico)	292	294	302	298	293	296	291	298	302	298	297	309	297	301	304	302	297	306	293	297	305
Mais (Stamm)	292	295	303	297	292	296	290	302	302	293	302	304	293	299	304	300	300	303	293	296	294
Sonnenbl. (Methasol)	286	269	285	292	273	299	281	288	297	292	273	297	289	276	298	310	291	293	296	298	306
Sonnenbl. (Alisson)	292	271	287	299	288	299	287	287	297	290	281	305	294	283	298	312	285	282	309	289	303
WR-Energie (Balistic)	288	293	292	293	292	295	292	291	292	291	294	297	293	297	297	292	291	294	290	290	291
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Brot (Visello) - Korn -	362	360	360	363	363	361	363	361	364	359	360	362	361	360	362	-	361	359	362	359	362
- Stroh -	173	272	272	178	289	274	272	281	272	176	278	277	180	274	269	175	291	-	179	271	279
Zweikultur-Nutzung																					
WRü	295	294	291	286	306	287	300	295	294	295	291	297	293	291	295	292	309	295	292	300	299
Mais	300	294	306	300	294	294	294	295	296	300	294	295	301	288	285	302	291	290	296	288	304
Sorghum	254	255	255	254	256	255	253	254	254	252	256	255	255	258	257	275	255	255	255	257	255
Sonnenbl.	284	279	291	278	280	295	280	295	295	313	278	297	327	273	276	-	287	284	295	284	296
Mais/Sonnenbl.	301	288	300	287	282	292	291	293	294	313	286	292	308	285	291	-	294	285	294	290	293
WR	271	273	292	276	272	291	275	275	273	296	293	296	273	274	277	271	272	270	275	274	294
Mais	301	293	304	296	293	298	294	293	296	298	293	296	300	295	287	299	292	286	295	288	291
Sorghum	254	254	257	255	256	255	254	253	253	252	243	255	254	253	256	254	255	255	254	258	255
Sonnenbl.	299	283	284	272	280	287	282	284	296	321	283	290	292	289	311	-	290	285	290	278	297
Mais/Sonnenbl.	302	291	295	296	286	290	290	295	290	298	288	298	297	299	283	-	298	296	288	284	295
WRWE	270	272	291	276	273	287	276	274	274	275	272	276	272	275	277	274	272	272	273	274	274
Mais	301	293	306	299	292	297	291	294	298	299	292	298	297	295	286	302	294	287	295	289	292
Sorghum	254	255	256	255	256	255	253	254	254	252	254	255	254	253	260	254	242	255	254	257	254
Sonnenbl.	279	290	284	288	279	283	286	291	296	294	272	285	294	297	288	-	292	290	286	275	290
Mais/Sonnenbl.	298	289	294	302	288	290	290	290	296	304	284	292	304	304	295	-	296	287	293	285	295
WRWG	275	274	275	286	286	287	277	274	279	276	273	276	274	278	280	275	274	277	277	273	272
Sudangras	254	254	254	254	256	257	254	253	253	254	255	255	254	254	256	254	-	255	254	257	254
Amarant	257	257	259	256	258	261	393	258	257	255	256	256	256	258	258	257	259	258	256	259	257
Hanf *	258	257	258	259	256	260	255	258	255	258	260	256	259	257	257	260	258	256	257	256	255
Mais/Sonnenbl./Amarant	292	282	294	295	286	292	292	277	294	289	287	277	-	291	287	-	289	295	315	285	283

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A4.4 Methanerträge

Tabelle 16: Jahres-Methanerträge in den drei Versuchsjahren auf den sieben Versuchsstandorten in m³ ha⁻¹.

	Dornburg			Gützow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen			
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	
Hauptfrucht-Nutzung																						
Senf; Mais (Atletico)	3.953	5.606	3.820	5.122	4.777	3.859	5.528	6.819	7.015	4.933	6.579	5.066	5.410	8.104	6.535	4.544	6.146	5.486	5.780	6.841	5.881	
Senf; Mais (Stamm)	3.830	5.691	3.928	5.829	4.913	4.094	6.295	7.249	7.430	5.181	7.596	5.421	6.066	7.549	7.427	4.120	5.265	6.130	6.184	5.641	5.794	
Senf - Sonnenbl.	2.067	2.848	3.306	3.178	2.735	2.127	3.918	2.971	4.085	5.039	3.112	2.854	4.633	3.591	3.863	3.062	3.116	1.832	3.933	2.945	3.874	
Senf - Sonnenbl. (Alisson)	-	2.525	2.642	2.848	2.950	1.971	3.275	2.516	3.683	5.596	4.122	4.273	4.101	3.940	2.600	1.995	2.432	1.681	3.665	2.757	3.456	
WR-Energie (Ballistic) - Senf	3.993	3.938	5.128	3.370	3.405	4.887	4.780	3.490	4.292	4.347	4.692	4.236	4.731	4.475	3.578	3.726	2.425	4.455	3.866	3.702	4.186	
WR-Energie (So.2) - Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
WR-Brot (Visello) - Senf	4.027	4.185	4.244	3.694	3.514	5.786	4.750	2.863	3.315	2.622	3.694	4.091	3.305	3.118	3.419	839	2.983	2.952	3.858	3.687	4.415	
WR-Brot (So.2) - Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Zweikultur-Nutzung																						
WRü - Mais	4.760	6.104	4.695	6.063	3.756	4.311	7.955	6.171	7.715	5.694	6.093	7.305	7.135	5.927	5.850	5.872	4.435	4.057	7.568	6.061	5.802	
WRü - Sorghum	4.718	4.800	3.868	4.338	2.997	3.720	6.680	4.282	6.526	4.924	4.154	5.323	5.248	4.127	3.682	5.139	3.075	2.816	5.185	3.729	4.326	
WRü - Sonnenbl.	3.831	4.165	4.450	4.702	4.390	4.182	5.813	4.318	5.592	5.375	4.731	4.887	5.358	5.221	4.785	-	3.850	3.033	4.945	5.267	4.898	
WRü - Mais/Sonnenbl.	4.566	5.166	4.899	4.785	4.062	3.995	6.902	4.777	6.252	5.821	4.810	5.874	5.946	5.683	4.721	-	4.503	2.979	5.962	5.851	5.597	
Roggen - Mais	5.076	6.819	5.375	7.511	5.624	4.921	8.068	6.350	7.631	6.597	6.662	5.799	7.342	8.345	6.340	6.121	4.970	5.633	7.399	6.567	5.636	
Roggen - Sorghum	4.526	4.862	4.605	4.937	3.928	4.400	7.338	4.530	6.107	5.262	5.712	5.884	5.175	5.594	4.257	4.505	3.694	4.174	5.462	4.042	4.731	
Roggen - Sonnenbl.	3.989	5.074	5.911	5.291	5.869	4.880	6.583	4.748	5.719	6.244	5.792	5.189	5.049	6.189	5.544	-	4.392	4.334	5.327	5.497	5.134	
Roggen - Mais/Sonnenbl.	4.540	5.749	5.552	6.198	5.710	4.882	7.691	5.494	6.215	5.981	5.839	5.907	5.397	6.655	5.418	-	5.207	4.719	6.007	6.245	5.306	
WRWE - Mais	5.020	6.923	5.153	7.765	5.412	5.668	8.343	6.251	6.844	5.483	6.960	6.837	6.045	7.106	6.056	5.668	5.415	5.505	7.041	6.952	5.768	
WRWE - Sorghum	4.652	4.910	4.680	4.577	3.454	4.974	7.395	4.394	5.566	4.767	4.654	5.427	5.385	5.575	3.664	4.902	3.651	4.127	5.152	3.718	4.603	
WRWE - Sonnenbl.	4.292	5.425	5.918	5.101	5.318	5.192	6.692	4.360	5.068	4.878	6.015	5.859	4.701	5.650	5.120	-	5.153	4.390	5.472	5.637	5.090	
WRWE - Mais/Sonnenbl.	4.317	5.927	5.578	5.856	5.535	5.439	6.953	5.246	5.595	4.727	5.643	5.666	5.356	6.185	5.591	-	4.695	4.800	6.191	5.834	5.252	
WRWG - Sudangras	4.084	5.577	-	5.763	4.278	4.211	6.545	6.369	6.212	4.827	4.752	5.227	5.408	6.132	5.361	4.804	-	4.964	5.917	4.423	4.176	
WRWR - Amaranth	3.661	6.002	3.944	3.087	3.903	4.233	5.770	3.933	4.575	3.541	4.030	5.455	3.790	4.683	4.111	-	3.202	3.191	4.930	4.003	3.292	
WR - Hanf*	4.115	5.680	4.662	5.757	5.034	4.844	7.379	6.743	5.615	3.362	5.173	4.863	3.295	4.840	4.467	-	3.873	3.960	4.418	5.002	3.430	
WRWG - Mais/Sonnenbl./Amarant	4.545	5.113	4.559	6.004	5.242	5.031	7.483	4.280	6.062	4.522	5.829	5.039	-	6.994	5.109	-	4.507	4.244	6.496	5.930	4.497	

* am Standort Straubing Quinoa statt Hanf

A5 Nährstoffgehalte

A5.1 N-Gehalte

Tab. A17: N-Gehalte [% i. TM] der Pflanzen aller Varianten im Mittel der drei Versuchsjahre an den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düse			Rauischholzhausen			Straubing			Werlte			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	-	-	-	-	3,3	-	-	2,2	3,1	3,3	1,4	3,9	2,2	2,4	2,4	-	4,1	-	2,9	3,2	3,0
Mais (Atletico)	1,4	1,1	1,1	1,3	1,2	1,4	1,1	1,0	0,9	1,1	1,1	1,0	1,2	1,1	1,0	1,1	1,3	1,1	1,1	1,2	0,9
Mais (Stamm)	1,4	1,1	1,1	1,3	1,2	1,4	1,0	-	0,9	0,9	-	1,0	1,1	1,2	1,0	1,1	1,3	1,0	1,1	1,1	0,9
Sonnenbl. (Methasol)	1,6	1,4	1,4	1,5	1,5	2,3	1,6	1,1	1,5	1,5	1,2	1,1	1,1	1,2	1,6	1,8	2,0	2,5	1,2	1,7	1,1
Sonnenbl. (Alisson)	1,5	1,4	1,4	1,3	1,7	2,3	1,4	-	1,5	1,5	-	1,1	1,2	1,3	1,6	1,6	1,4	1,9	1,2	1,3	1,1
WR-Energie (Ballistic)	0,8	1,4	1,0	1,0	1,2	1,1	1,0	1,3	0,8	0,9	1,3	1,5	1,2	1,1	1,4	1,0	1,2	1,0	0,9	1,2	0,9
Senf	1,8	1,4	1,8	2,8	3,3	3,3	1,4	2,0	1,8	2,5	1,4	1,8	2,7	1,7	2,5	2,3	1,8	-	1,3	1,3	1,6
WR-Brot (Visello)	1,7	1,8	1,8	1,5	1,9	1,7	1,7	1,9	1,5	2,2	1,8	1,6	2,0	1,6	1,7	-	1,8	1,7	1,6	1,9	1,5
Senf	1,5	-	2,7	3,1	3,2	3,8	1,4	2,6	2,6	1,6	1,3	1,8	2,9	1,5	2,0	2,5	2,8	-	1,2	1,7	2,7
Zweikultur-Nutzung																					
WRü	1,6	1,7	1,1	1,3	1,8	1,6	2,2	1,4	1,4	2,1	1,7	1,8	1,6	1,3	1,7	1,0	1,5	1,7	1,3	1,9	1,2
Mais	1,2	1,2	1,5	1,4	1,3	1,7	1,1	1,3	1,1	0,9	1,1	1,2	1,2	1,4	1,7	1,3	1,4	1,8	1,0	1,3	1,5
Sorghum	1,3	1,4	1,7	1,2	1,7	1,8	0,9	1,2	1,0	0,6	1,6	1,4	1,2	1,6	1,9	1,2	1,6	1,5	1,3	2,1	1,5
Sonnenbl.	1,4	1,3	1,5	1,6	1,4	2,0	1,0	1,6	1,2	1,4	0,9	1,3	1,3	1,7	1,5	-	1,3	1,9	1,2	1,4	1,2
Mais/Sonnenbl.	1,4	1,4	1,6	1,3	1,5	1,9	0,9	1,3	1,1	1,2	1,0	1,2	1,7	1,5	1,7	-	1,5	2,0	1,1	1,6	1,2
WR	1,1	1,3	1,0	1,5	1,3	1,3	1,5	1,4	1,0	1,5	1,2	1,2	1,3	1,0	1,3	0,9	1,3	0,7	1,4	1,1	1,0
Mais	1,2	1,2	1,7	1,2	1,2	1,7	1,1	0,9	1,0	0,7	1,0	1,3	1,2	1,1	1,6	1,0	1,3	1,8	0,9	1,3	1,2
Sorghum	1,2	1,4	2,2	1,3	1,8	1,7	0,9	1,0	0,9	0,6	1,5	1,5	1,2	0,9	1,4	1,2	1,7	1,6	1,1	2,2	1,3
Sonnenbl.	1,4	1,3	1,9	1,5	1,2	2,4	1,1	1,6	1,0	0,9	0,9	1,7	1,5	1,2	1,7	-	1,2	1,7	1,2	1,3	1,2
Mais/Sonnenbl.	1,2	1,3	1,9	1,5	1,3	2,1	0,9	1,2	0,9	0,8	1,2	1,6	1,6	1,1	1,9	-	1,6	2,0	0,9	1,7	1,1
WR/WE	0,9	1,1	1,0	1,4	1,1	1,0	1,6	1,1	1,9	1,4	1,1	1,5	1,1	1,1	1,2	1,1	1,3	0,9	1,2	1,1	1,3
Mais	1,1	1,0	1,6	1,4	1,2	1,5	0,9	1,0	0,9	0,7	1,1	1,2	0,8	0,8	1,5	1,2	1,2	1,7	0,8	1,3	1,1
Sorghum	1,1	1,3	2,0	1,4	1,8	1,7	0,9	1,0	1,2	0,6	1,2	1,3	0,9	0,8	1,3	1,3	1,7	1,6	1,1	2,1	1,1
Sonnenbl.	1,3	1,2	1,8	1,5	1,1	2,6	1,0	1,4	1,1	1,2	0,9	1,4	1,1	1,0	1,3	-	1,3	1,8	1,0	1,4	1,1
Mais/Sonnenbl.	1,1	1,1	1,8	1,5	1,2	1,9	0,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,2	1,1	1,0	1,7	-	1,5	1,7	0,9	1,5	1,2
WR/WG	1,1	1,2	1,0	1,2	1,3	1,3	1,5	1,2	1,3	1,5	1,2	1,0	1,2	1,1	1,4	1,1	1,4	0,9	1,5	1,1	1,0
Sudangras	1,0	1,1	1,1	1,3	1,7	2,1	1,0	0,9	0,9	0,7	1,3	1,1	1,0	1,0	1,5	1,0	-	1,4	1,1	1,8	1,0
Amarant	1,7	1,9	2,4	1,1	2,1	2,8	1,2	1,8	1,4	1,1	1,5	1,4	1,6	1,8	1,7	-	3,1	2,2	1,4	2,3	1,5
Hanf	1,7	1,1	1,9	1,6	1,2	2,0	0,7	1,1	0,5	1,1	2,2	1,2	2,3	1,5	1,3	-	1,6	1,4	1,1	1,1	0,9
Mais/Sonnenbl.,Amarant	1,2	1,3	2,0	1,7	1,1	2,2	0,9	1,5	1,1	0,9	1,2	1,2	-	1,3	1,6	-	1,5	1,3	1,3	2,0	1,1

A5.2 K-Gehalte

Tab. A18: Kaliumgehalte [% i. TM] der Pflanzen aller Varianten im Mittel der drei Versuchsjahre an den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mais (Atletico)	1,3	1,2	1,2	1,1	1,4	1,0	1,5	1,5	1,1	1,3	0,9	1,0	1,1	0,9	2,3	0,9	1,4	1,1	1,1	1,1	1,0
Mais (Stamm)	1,6	1,1	1,1	1,3	1,3	1,2	1,9	1,4	1,1	1,3	0,6	1,0	1,1	0,8	2,3	1,0	1,3	1,0	1,3	1,2	0,8
Sonnenbl. (Methasol)	3,6	3,1	3,1	3,3	3,8	3,1	4,1	3,4	2,3	3,5	2,0	3,0	2,6	2,8	2,3	3,0	3,8	4,1	3,1	3,7	2,3
Sonnenbl. (Alisson)	3,4	2,6	2,6	3,6	3,4	3,1	3,9	3,4	2,3	3,4	1,5	2,9	2,5	3,5	2,3	2,1	3,4	3,7	2,9	3,4	2,5
WR-Energie (Ballistic)	1,6	1,5	1,2	1,5	1,1	1,5	2,0	1,3	1,0	1,6	1,5	2,6	1,6	0,7	1,3	1,3	1,3	1,1	1,4	1,6	1,0
Senf	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
WR-Brot (Visello)	-	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,6	0,7	0,5	0,7	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	-	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5
Senf	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Zweikultur-Nutzung																					
WRü	1,6	2,3	1,9	1,9	2,0	2,5	1,8	2,1	1,8	3,3	2,2	2,6	1,8	1,5	2,4	1,2	2,0	2,8	2,1	2,5	1,8
Mais	1,0	1,2	1,0	1,2	1,6	1,3	1,2	1,3	1,0	1,0	1,3	1,4	1,0	1,2	1,1	0,9	1,5	1,3	1,0	1,7	1,4
Sorghum	1,5	1,7	1,5	1,5	2,2	1,4	1,2	1,4	1,3	1,1	1,9	1,4	1,3	2,9	1,7	1,3	1,8	1,3	1,5	2,7	1,6
Sonnenbl.	3,2	3,1	2,4	3,5	2,5	2,3	4,1	3,9	2,6	2,7	2,6	3,1	3,1	1,5	2,1	-	3,3	2,7	2,8	3,5	2,8
Mais/Sonnenbl.	2,1	2,0	1,7	2,1	2,6	2,1	2,4	2,8	2,1	2,0	2,0	2,2	2,0	1,7	1,7	-	2,6	2,6	2,0	3,5	1,9
WR	1,7	1,7	1,4	2,0	1,4	1,7	2,4	1,6	1,7	2,2	1,5	2,3	1,7	0,8	1,2	1,2	1,4	1,2	2,3	1,9	1,7
Mais	1,2	1,3	1,6	1,5	1,7	1,1	1,0	1,3	1,1	1,2	1,3	1,3	1,0	1,0	1,2	0,9	1,4	1,3	1,1	2,0	1,2
Sorghum	1,4	1,7	2,2	1,5	2,2	1,2	1,0	1,3	1,2	1,1	1,7	1,4	1,3	1,2	1,4	1,6	1,9	1,6	1,4	3,0	1,4
Sonnenbl.	3,1	2,9	2,6	3,5	2,6	2,7	3,9	3,8	2,6	2,9	3,0	3,3	3,1	2,5	2,0	-	2,9	2,8	3,2	3,1	2,4
Mais/Sonnenbl.	2,1	2,2	2,4	2,1	2,8	2,1	2,1	2,4	2,0	2,1	2,3	2,1	2,0	1,9	1,9	-	2,6	3,1	2,0	3,6	2,0
WR/WE	1,7	1,5	1,3	2,2	1,3	1,6	2,0	1,4	1,6	2,2	1,6	2,4	1,6	1,4	1,8	1,3	1,5	1,1	2,0	2,0	1,8
Mais	1,1	1,3	1,5	1,4	1,5	1,1	1,2	1,4	1,0	0,9	1,3	1,1	0,9	1,1	1,0	1,0	1,5	1,2	1,0	1,8	1,1
Sorghum	1,4	1,8	2,2	2,0	2,5	1,2	1,2	1,5	1,7	1,0	1,9	1,4	1,3	1,4	1,6	1,3	3,6	1,7	1,6	2,8	1,3
Sonnenbl.	3,1	2,9	2,7	3,6	2,9	2,8	2,9	3,5	2,7	3,0	2,2	2,8	3,4	2,5	1,6	-	3,3	2,7	3,6	3,4	3,4
Mais/Sonnenbl.	2,1	2,4	2,3	2,7	2,6	1,9	2,7	2,6	1,9	1,6	2,3	2,0	2,2	2,0	1,5	-	3,0	2,2	2,1	3,4	1,8
WR/WG	1,9	1,6	1,4	2,3	1,4	1,6	2,0	1,4	1,8	2,2	1,7	2,4	1,8	1,5	1,3	1,4	1,5	1,2	2,2	1,9	1,8
Sudangras	1,5	1,5	1,5	1,9	2,1	1,6	1,5	1,6	1,1	1,2	1,7	1,3	1,3	1,4	1,5	1,2	0,0	1,0	1,6	3,3	1,4
Amarant	4,5	4,5	4,2	4,7	4,5	3,9	5,1	5,2	4,8	5,5	5,0	5,3	4,2	3,7	4,9	3,3	3,7	2,9	3,8	5,7	4,2
Hanf	1,9	1,2	1,6	1,9	1,6	1,3	1,4	1,4	1,2	1,2	1,9	1,7	4,8	3,9	4,3	1,5	3,0	1,3	1,1	1,4	1,4
Mais/Sonnenbl./Amarant	2,4	2,6	2,6	2,9	2,6	2,3	2,2	3,7	1,9	3,0	2,1	3,7	0,0	1,7	1,7	-	2,5	2,2	2,6	3,9	2,2

A5.3 P-Gehalte

Tab. A19: P-Gehalte [% i. TM] der Pflanzen aller Varianten im Mittel der drei Versuchsjahre an den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mais (Atletico)	0,21	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,15	0,23	0,21	0,18	0,23	0,19	0,17	0,17	0,23	0,19	0,23	0,16	0,20	0,23	0,17
Mais (Stamm)	0,22	0,17	0,17	0,20	0,20	0,30	0,14	0,24	0,21	0,14	0,26	0,16	0,18	0,17	0,23	0,17	0,22	0,16	0,20	0,21	0,20
Sonnenbl. (Methasol)	0,33	0,32	0,32	0,21	0,40	0,30	0,32	0,32	0,31	0,22	0,28	0,19	0,25	0,25	0,33	0,26	0,43	0,35	0,31	0,30	0,22
Sonnenbl. (Alisson)	0,28	0,25	0,25	0,18	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,22	0,30	0,22	0,29	0,26	0,33	0,29	0,38	0,23	0,29	0,25	0,25
WR-Energie (Ballistic)	0,21	0,21	0,18	0,19	0,20	0,20	0,24	0,22	0,13	0,24	0,24	0,29	0,21	0,11	0,18	0,20	0,25	0,16	0,19	0,23	0,17
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Brot (Visello)	-	0,26	0,26	0,23	0,30	0,30	0,32	0,39	0,30	0,37	0,33	0,31	0,38	0,32	0,29	-	0,38	0,31	0,32	0,34	0,27
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zweikultur-Nutzung																					
WRü	0,32	0,29	0,30	0,29	0,30	0,30	0,38	0,31	0,27	0,43	0,40	0,35	0,34	0,22	0,35	0,33	0,36	0,36	0,33	0,36	0,37
Mais	0,24	0,19	0,18	0,21	0,30	0,20	0,14	0,21	0,16	0,17	0,33	0,19	0,24	0,19	0,25	0,24	0,25	0,19	0,17	0,23	0,24
Sorghum	0,23	0,23	0,24	0,24	0,30	0,20	0,19	0,21	0,20	0,19	0,34	0,23	0,23	0,28	0,31	0,23	0,36	0,21	0,20	0,35	0,22
Sonnenbl.	0,29	0,30	0,20	0,22	0,30	0,20	0,26	0,34	0,23	0,30	0,30	0,21	0,28	0,22	0,25	-	0,43	0,31	0,22	0,26	0,22
Mais/Sonnenbl.	0,28	0,25	0,24	0,22	0,30	0,20	0,16	0,28	0,20	0,26	0,31	0,16	0,38	0,22	0,30	-	0,35	0,25	0,19	0,33	0,20
WR	0,24	0,23	0,24	0,24	0,20	0,20	0,34	0,25	0,21	0,29	0,30	0,27	0,27	0,11	0,18	0,22	0,27	0,19	0,29	0,29	0,26
Mais	0,25	0,21	0,23	0,20	0,20	0,20	0,16	0,21	0,16	0,18	0,27	0,24	0,28	0,18	0,30	0,20	0,27	0,19	0,17	0,23	0,20
Sorghum	0,23	0,25	0,32	0,24	0,30	0,20	0,20	0,19	0,17	0,18	0,31	0,27	0,26	0,17	0,23	0,26	0,35	0,22	0,20	0,40	0,22
Sonnenbl.	0,38	0,32	0,33	0,21	0,30	0,30	0,26	0,31	0,01	0,24	0,31	0,23	0,33	0,29	0,32	-	0,61	0,31	0,23	0,25	0,22
Mais/Sonnenbl.	0,30	0,29	0,29	0,18	0,30	0,30	0,21	0,28	0,19	0,23	0,38	0,25	0,30	0,24	0,33	-	0,40	0,35	0,19	0,35	0,23
WR/WE	0,22	0,20	0,22	0,26	0,20	0,20	0,29	0,24	0,22	0,30	0,29	0,31	0,25	0,23	0,28	0,25	0,28	0,22	0,00	0,00	0,00
Mais	0,25	0,21	0,23	0,23	0,20	0,20	0,13	0,23	0,17	0,18	0,27	0,23	0,20	0,20	0,26	0,22	0,30	0,26	0,18	0,23	0,19
Sorghum	0,22	0,27	0,30	0,27	0,30	0,20	0,19	0,21	0,23	0,18	0,31	0,26	0,22	0,20	0,26	0,26	0,64	0,28	0,24	0,37	0,18
Sonnenbl.	0,39	0,33	0,30	0,30	0,30	0,30	0,22	0,29	0,26	0,27	0,33	0,23	0,35	0,32	0,29	-	0,44	0,39	0,23	0,29	0,29
Mais/Sonnenbl.	0,29	0,26	0,25	0,24	0,30	0,20	0,22	0,27	0,22	0,28	0,34	0,20	0,31	0,30	0,31	-	0,42	0,32	0,20	0,34	0,23
WR/WG	0,23	0,21	0,22	0,24	0,20	0,20	0,29	0,23	0,23	0,28	0,28	0,27	0,28	0,22	0,21	0,26	0,28	0,21	0,29	0,26	0,26
Sudangras	0,24	0,24	0,24	0,25	0,30	0,30	0,18	0,23	0,16	0,17	0,39	0,22	0,21	0,18	0,30	0,23	0,00	0,22	0,21	0,37	0,21
Amarant	0,61	0,64	0,63	0,51	0,80	0,80	0,61	0,46	0,53	0,51	0,73	0,35	0,70	0,49	0,66	0,64	0,66	0,78	0,56	0,56	0,42
Hanf	0,44	0,29	0,35	0,37	0,20	0,30	0,17	0,32	0,14	0,34	0,66	0,21	0,48	0,34	0,23	0,56	0,41	0,28	0,21	0,24	0,21
Mais/Sonnenbl./Amarant	0,34	0,28	0,33	0,31	0,30	0,30	0,20	0,38	0,25	0,30	0,42	0,29	-	0,23	0,32	-	0,42	0,40	0,26	0,36	0,25

A5.4 Mg-Gehalte

Tab. A20: Mg-Gehalte [% i. TM] der Pflanzen aller Varianten im Mittel der drei Versuchsjahre an den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
	Hauptfrucht-Nutzung																				
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mais (Atletico)	0,16	0,13	0,13	0,19	0,17	0,20	0,10	0,07	0,09	0,12	0,19	0,19	0,18	0,14	0,41	0,17	0,14	0,16	0,14	0,16	0,16
Mais (Stamm)	0,16	0,13	0,13	0,18	0,20	0,30	0,11	0,08	0,09	0,10	0,22	0,13	0,18	0,14	0,41	0,15	0,12	0,13	0,12	0,16	0,16
Sonnenbl. (Methasol)	0,35	0,48	0,48	0,31	0,30	0,50	0,28	0,14	0,29	0,22	0,50	0,32	0,30	0,42	0,66	0,38	0,33	0,49	0,26	0,28	0,39
Sonnenbl. (Alisson)	0,33	0,32	0,32	0,27	0,30	0,50	0,30	0,14	0,29	0,22	0,66	0,28	0,34	0,48	0,66	0,42	0,33	0,40	0,26	0,24	0,40
WR-Energie (Ballistic)	0,06	0,10	0,08	0,10	0,07	0,10	0,06	0,06	0,04	0,07	0,13	0,12	0,09	0,06	0,13	0,08	0,09	0,08	0,08	0,09	0,08
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Brot (Visello)	-	0,08	0,08	0,04	0,10	0,10	0,11	0,11	0,09	0,10	0,11	0,09	0,12	0,11	0,11	-	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zweikultur-Nutzung																					
WRü	0,12	0,15	0,15	0,18	0,25	0,30	0,13	0,11	0,08	0,18	0,23	0,14	0,14	0,11	0,23	0,17	0,21	0,19	0,14	0,16	0,15
Mais	0,16	0,14	0,18	0,20	0,20	0,30	0,13	0,07	0,08	0,11	0,26	0,15	0,21	0,21	0,28	0,19	0,18	0,28	0,13	0,13	0,23
Sorghum	0,17	0,17	0,22	0,23	0,30	0,30	0,14	0,09	0,11	0,10	0,28	0,17	0,20	0,37	0,40	0,24	0,29	0,31	0,19	0,25	0,22
Sonnenbl.	0,28	0,37	0,39	0,32	0,40	0,50	0,24	0,18	0,22	0,26	0,36	0,24	0,37	0,27	0,60	-	0,39	0,52	0,36	0,31	0,42
Mais/Sonnenbl.	0,22	0,24	0,30	0,30	0,30	0,40	0,17	0,11	0,15	0,18	0,35	0,20	0,37	0,30	0,51	-	0,30	0,43	0,26	0,26	0,36
WR	0,08	0,10	0,09	0,11	0,10	0,10	0,08	0,07	0,05	0,10	0,11	0,12	0,10	0,05	0,12	0,08	0,09	0,08	0,11	0,10	0,10
Mais	0,16	0,12	0,18	0,15	0,20	0,40	0,13	0,06	0,08	0,12	0,21	0,15	0,23	0,16	0,26	0,17	0,17	0,27	0,12	0,16	0,23
Sorghum	0,16	0,16	0,24	0,20	0,30	0,40	0,14	0,08	0,09	0,09	0,25	0,19	0,18	0,14	0,31	0,24	0,29	0,31	0,17	0,26	0,24
Sonnenbl.	0,29	0,36	0,34	0,33	0,30	0,60	0,24	0,11	0,20	0,25	0,27	0,28	0,36	0,39	0,68	-	0,36	0,48	0,32	0,30	0,42
Mais/Sonnenbl.	0,22	0,23	0,29	0,23	0,30	0,50	0,20	0,10	0,14	0,19	0,33	0,19	0,30	0,28	0,57	-	0,33	0,44	0,24	0,28	0,33
WR/WWE	0,07	0,10	0,09	0,01	0,09	0,10	0,07	0,05	0,06	0,09	0,12	0,13	0,08	0,10	0,11	0,11	0,09	0,10	0,09	0,10	0,11
Mais	0,16	0,12	0,16	0,16	0,20	0,40	0,12	0,07	0,08	0,09	0,19	0,16	0,19	0,15	0,31	0,16	0,16	0,25	0,12	0,14	0,22
Sorghum	0,16	0,16	0,25	0,21	0,30	0,40	0,13	0,08	0,12	0,09	0,21	0,21	0,15	0,13	0,32	0,22	0,61	0,27	0,16	0,27	0,22
Sonnenbl.	0,28	0,30	0,30	0,25	0,30	0,60	0,31	0,13	0,22	0,27	0,35	0,30	0,35	0,29	0,63	-	0,32	0,51	0,31	0,29	0,29
Mais/Sonnenbl.	0,22	0,23	0,29	0,24	0,30	0,50	0,18	0,10	0,16	0,23	0,38	0,24	0,29	0,24	0,68	-	0,31	0,42	0,23	0,29	0,37
WR/WWG	0,08	0,09	0,10	0,08	0,10	0,10	0,08	0,05	0,06	0,09	0,14	0,12	0,09	0,10	0,13	0,11	0,10	0,09	0,11	0,11	0,09
Sudangras	0,15	0,18	0,18	0,20	0,30	0,50	0,16	0,08	0,09	0,11	0,27	0,19	0,17	0,15	0,41	0,20	0,00	0,29	0,19	0,30	0,22
Amarant	0,40	0,44	0,55	0,46	0,60	1,20	0,30	0,22	0,25	0,23	0,46	0,36	0,46	0,44	0,68	0,58	0,63	0,60	0,35	0,47	0,55
Hanf	0,36	0,25	0,42	0,36	0,30	0,50	0,16	0,17	0,11	0,29	0,53	0,27	0,54	0,43	0,68	0,45	0,30	0,29	0,27	0,22	0,35
Mais/Sonnenbl./Amarant	0,23	0,32	0,34	0,29	0,30	0,50	0,18	0,12	0,19	0,21	0,41	0,34	-	0,30	0,66	-	0,36	0,43	0,37	0,31	0,41

A5.5 S-Gehalte

Tab. A21: S-Gehalte [% i. TM] der Pflanzen aller Varianten im Mittel der drei Versuchsjahre an den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mais (Atletico)	0,10	0,07	0,07	0,08	0,02	0,02	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,09	0,08	0,08	0,11	0,11	0,11	0,10	0,08
Mais (Stamm)	0,11	0,08	0,08	0,08	0,03	0,03	0,10	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,11	0,08	0,08	0,11	0,11	0,09	0,09	0,08
Sonnenbl. (Methasol)	0,22	0,18	0,18	0,17	0,06	0,04	0,19	0,14	0,16	0,21	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,18	0,27	0,19	0,30	0,16	0,16
Sonnenbl. (Alisson)	0,18	0,15	0,15	0,14	0,05	0,04	0,18	0,15	0,16	0,20	0,17	0,14	0,14	0,16	0,23	0,18	0,25	0,19	0,18	0,16	0,16
WR-Energie (Ballistic)	0,04	0,12	0,09	0,08	0,05	0,10	0,08	0,11	0,07	0,08	0,12	0,13	0,13	0,10	0,10	0,12	0,11	0,14	0,13	0,08	0,10
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Brot (Visello)	-	0,12	0,12	0,09	0,01	0,01	0,14	0,14	0,12	0,12	0,11	0,09	0,15	0,15	0,11	0,11	-	0,15	0,14	0,10	0,10
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zweikultur-Nutzung																					
WRü	0,46	0,48	0,45	0,21	0,37	0,10	0,37	0,31	0,16	0,62	0,51	0,46	0,47	0,49	0,58	0,31	0,55	0,56	0,46	0,45	0,33
Mais	0,10	0,08	0,10	0,09	0,03	0,03	0,09	0,10	0,07	0,07	0,09	0,10	0,10	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,16	0,07	0,15
Sorghum	0,10	0,10	0,12	0,09	0,04	0,10	0,09	0,08	0,08	0,06	0,11	0,09	0,10	0,17	0,13	0,12	0,16	0,14	0,09	0,13	0,12
Sonnenbl.	0,17	0,17	0,17	0,19	0,10	0,10	0,18	0,17	0,14	0,21	0,13	0,15	0,19	0,12	0,19	-	0,24	0,27	0,17	0,14	0,17
Mais/Sonnenbl.	0,14	0,13	0,15	0,14	0,07	0,10	0,12	0,12	0,10	0,14	0,10	0,12	0,18	0,14	0,18	-	0,20	0,24	0,12	0,14	0,13
WR	0,10	0,11	0,09	0,10	0,08	0,10	0,11	0,11	0,07	0,14	0,11	0,09	0,10	0,10	0,12	0,11	0,14	0,11	0,12	0,12	0,08
Mais	0,10	0,08	0,11	0,09	0,02	0,05	0,10	0,07	0,07	0,06	0,07	0,08	0,10	0,08	0,12	0,11	0,12	0,16	0,06	0,09	0,09
Sorghum	0,09	0,11	0,15	0,10	0,05	0,05	0,09	0,08	0,07	0,05	0,10	0,10	0,09	0,33	0,11	0,12	0,16	0,16	0,08	0,14	0,09
Sonnenbl.	0,18	0,17	0,19	0,20	0,10	0,10	0,16	0,16	0,14	0,15	0,13	0,16	0,19	0,10	0,21	-	0,21	0,30	0,15	0,11	0,14
Mais/Sonnenbl.	0,13	0,12	0,16	0,12	0,10	0,30	0,12	0,10	0,09	0,11	0,11	0,13	0,16	0,12	0,18	-	0,21	0,28	0,10	0,13	0,13
WR/WWE	0,09	0,10	0,08	0,01	0,07	0,10	0,11	0,11	0,08	0,14	0,11	0,09	0,10	0,09	0,12	0,12	0,13	0,10	0,11	0,12	0,10
Mais	0,09	0,08	0,11	0,09	0,03	0,03	0,08	0,07	0,06	0,06	0,08	0,08	0,14	0,06	0,11	0,11	0,11	0,14	0,06	0,08	0,08
Sorghum	0,09	0,10	0,13	0,11	0,06	0,05	0,09	0,08	0,08	0,06	0,09	0,09	0,09	0,07	0,10	0,11	0,33	0,14	0,08	0,14	0,08
Sonnenbl.	0,17	0,15	0,17	0,17	0,10	0,10	0,14	0,15	0,13	0,20	0,10	0,15	0,08	0,15	0,16	-	0,20	0,24	0,14	0,12	0,12
Mais/Sonnenbl.	0,13	0,12	0,15	0,15	0,07	0,10	0,14	0,11	0,10	0,13	0,11	0,12	0,19	0,13	0,18	-	0,20	0,19	0,10	0,13	0,13
WR/WWG	0,10	0,11	0,09	0,08	0,06	0,10	0,14	0,11	0,08	0,14	0,13	0,08	0,11	0,09	0,14	0,13	0,14	0,13	0,12	0,11	0,09
Sudangras	0,08	0,09	0,09	0,12	0,07	0,05	0,09	0,08	0,07	0,07	0,11	0,09	0,10	0,09	0,12	0,12	0,00	0,15	0,09	0,13	0,08
Amarant	0,28	0,34	0,35	0,29	0,10	0,30	0,34	0,25	0,24	0,30	0,29	0,20	0,35	0,34	0,34	0,42	0,32	0,37	0,25	0,26	0,29
Hanf	0,15	0,09	0,15	0,13	0,03	0,05	0,08	0,09	0,05	0,11	0,20	0,09	0,24	0,22	0,16	0,19	0,20	0,16	0,09	0,07	0,09
Mais/Sonnenbl./Amarant	0,14	0,14	0,19	0,19	0,08	0,10	0,12	0,15	0,11	0,16	0,13	0,15	-	0,14	0,18	-	0,23	0,23	0,15	0,13	0,13

A5.6 CI-Gehalte

Tab. A22: CI-Gehalte [% i. TM] der Pflanzen aller Varianten im Mittel der drei Versuchsjahre an den sieben Versuchsstandorten.

	Dornburg			Gülzow			Düsse			Rauischholzhausen			Straubing			Werthe			Witzenhausen		
	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3	Jahr1	Jahr2	Jahr3
Hauptfrucht-Nutzung																					
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mais (Atletico)	0,21	0,20	0,20	0,12	0,18	0,20	0,12	0,11	0,06	0,12	0,10	0,10	0,12	0,18	0,21	0,11	0,09	0,25	0,11	0,05	0,50
Mais (Stamm)	0,31	0,20	0,20	0,11	0,10	0,20	0,11	0,10	0,06	0,10	0,10	0,10	0,20	0,18	0,21	0,12	0,10	0,26	0,13	0,14	0,50
Sonnenbl. (Methasol)	1,15	0,81	0,81	0,47	0,60	0,30	0,37	0,20	0,14	0,18	0,20	0,10	0,50	0,71	0,70	0,40	0,24	1,37	0,61	0,30	0,70
Sonnenbl. (Alisson)	0,96	0,67	0,67	0,36	0,60	0,30	0,37	0,28	0,14	0,18	0,26	0,10	0,48	0,92	0,70	0,42	0,31	1,54	0,67	0,30	0,70
WR-Energie (Ballistic)	0,35	0,65	0,35	0,21	0,30	0,20	0,16	0,24	0,11	0,10	0,17	0,35	0,28	0,58	0,42	-	0,24	0,13	0,49	0,38	0,17
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WR-Brot (Visello)	-	0,06	0,06	0,08	0,06	0,10	-	0,11	0,11	0,10	-	0,10	0,04	0,12	0,10	-	0,06	0,07	0,11	0,13	0,06
Senf	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zweikultur-Nutzung																					
WRü	0,79	0,95	0,64	0,19	0,86	0,20	0,15	0,35	0,12	0,18	0,28	0,32	0,44	0,84	0,77	-	0,21	0,33	0,62	0,68	0,40
Mais	0,17	0,30	0,15	0,09	0,20	0,10	0,10	0,10	0,04	0,10	0,10	0,10	0,16	0,30	0,28	0,13	0,12	0,17	0,11	0,10	0,15
Sorghum	0,28	0,38	0,35	0,20	0,25	0,20	0,11	0,20	0,08	0,10	0,12	0,10	0,20	0,60	0,42	0,21	0,18	0,20	0,22	0,40	0,36
Sonnenbl.	0,63	0,77	0,75	0,52	0,50	0,40	0,44	0,30	0,13	0,17	0,15	0,10	0,28	0,66	0,69	-	0,28	0,31	0,65	0,30	0,70
Mais/Sonnenbl.	0,43	0,49	0,42	0,29	0,40	0,30	0,22	0,30	0,12	0,15	0,10	0,10	0,23	1,27	0,44	-	0,19	0,34	0,38	0,34	0,51
WR	0,54	0,61	0,32	0,19	0,47	0,20	0,22	0,34	0,12	0,15	0,17	0,32	0,30	0,65	0,39	-	0,30	0,15	0,70	0,45	0,30
Mais	0,18	0,19	0,20	0,10	0,15	0,10	0,11	0,10	0,05	0,10	0,10	0,10	0,12	0,17	0,16	0,12	0,11	0,09	0,11	0,12	0,15
Sorghum	0,31	0,28	0,42	0,15	0,30	0,10	0,10	0,20	0,06	0,10	0,10	0,10	0,21	0,39	0,26	0,25	0,18	0,13	0,22	0,30	0,29
Sonnenbl.	0,59	0,62	0,59	0,67	0,50	0,30	0,33	0,30	0,14	0,19	0,17	0,10	0,57	0,57	0,85	-	0,24	0,23	0,73	0,30	0,73
Mais/Sonnenbl.	0,38	0,41	0,53	0,25	0,40	0,20	0,22	0,10	0,11	0,21	0,11	0,10	0,25	0,45	0,51	-	0,17	0,19	0,40	0,32	0,51
WR/WWE	0,52	0,60	0,29	0,19	0,45	0,20	0,19	0,30	0,12	0,14	0,21	0,33	0,41	0,60	0,58	-	0,28	0,15	0,61	0,47	0,38
Mais	0,14	0,18	0,18	0,11	0,17	0,10	0,11	0,10	0,05	0,10	0,10	0,10	0,28	0,17	0,17	0,12	0,10	0,07	0,11	0,11	0,19
Sorghum	0,31	0,37	0,47	0,20	0,30	0,10	0,11	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12	0,32	0,23	0,22	0,14	0,11	0,21	0,33	0,24
Sonnenbl.	0,60	0,54	0,68	0,66	0,40	0,50	0,44	0,30	0,21	0,23	0,12	0,10	0,19	0,50	0,68	-	0,26	0,16	0,60	0,30	0,70
Mais/Sonnenbl.	0,42	0,52	0,55	0,37	0,30	0,20	0,33	0,20	0,13	0,15	0,11	0,10	0,53	0,47	0,55	-	0,22	0,18	0,43	0,25	0,61
WR/WWG	0,76	0,63	0,40	0,28	0,40	0,20	0,27	0,24	0,12	0,14	0,20	0,31	0,42	0,70	0,42	-	0,28	0,14	0,81	0,50	0,26
Sudangras	0,30	0,24	0,24	0,21	0,20	0,10	0,22	0,20	0,07	0,10	0,13	0,15	0,20	0,57	0,32	0,20	-	0,10	0,22	0,31	0,29
Amarant	0,81	0,77	0,88	0,34	0,30	0,30	0,22	0,40	0,14	0,10	0,26	0,27	0,49	0,71	0,40	0,32	0,22	0,12	0,38	0,41	0,55
Hanf	0,30	0,23	0,33	0,17	0,20	0,10	0,10	0,20	0,08	0,10	0,15	0,13	0,40	0,82	0,11	0,18	0,22	0,13	0,17	0,16	0,18
Mais/Sonnenbl./Amarant	0,47	0,48	0,59	0,50	0,40	0,30	0,22	0,30	0,15	0,14	0,18	0,29	-	0,40	0,53	-	0,22	0,17	0,48	0,33	0,32

Danksagung

Mein Dank gilt Prof. Dr. K. Scheffer, Prof. K. Hammer, Prof. M. Wachendorf, Dr. R. Stülpnagel, Dr. C. von Buttlar, Dr. R. Graß sowie Prof. H.P Piepho für die fachlich kompetente Betreuung und Beratung. Mein weiterer Dank geht an das Team des Fachgebietes Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe für die tolle Unterstützung bei der Versuchsdurchführung am Standort Witzenhausen. Ich bedanke mich auch bei sämtlichen Versuchspartnern sowie der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe.

Vielen Dank Lilith, Ute, Marco, Tobias und Flo und allen anderen, die mich während dieser Zeit unterstützt haben!

Witzenhausen, 2010

