

Schlussbericht

zum Vorhaben

Anbautechnik Sorghumhirse - Ein Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenpektrums

Teilvorhaben 2: Ökologische Untersuchungen zum
Energiehirseanbau (Wasser- und Nährstoffeffizienz)
und Gärrestverwertung



Thema: Verbundvorhaben: Anbautechnik Sorghumhirsen - ein Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenpektrums
Teilvorhaben 2: Ökologische Untersuchungen zum Energiehirseanbau (Wasser- und Nährstoffeffizienz) und Gärrestverwertung

Zuwendungsempfänger: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Förderkennzeichen: 07NR216 bzw. 22021607

Laufzeit: 01.05.2008 bis 30.04.2011

Gefördert durch:



Bundesministerium für
Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMELV für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Impressum

Herausgeber: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Naumburger Str. 98, 07743 Jena
Tel.: 03641 683-0, Fax: 03641 683-390
Mail: pressestelle@tll.thueringen.de

Autoren Dr. Maria Wagner
Dr. Steffi Knoblauch

August 2012

1. Auflage 2012

Copyright:

Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen und der foto-mechanischen Wiedergabe sind dem Herausgeber vorbehalten.

Verzeichnis der Abbildungen

- Abbildung 1 Temperaturverlauf (Monatsmitteltemperaturen, °C) an der Lysimeterstation Butteltstedt in den drei Versuchsjahren
- Abbildung 2 Monatliche Niederschlagssummen an der Lysimeterstation Butteltstedt in den drei Versuchsjahren
- Abbildung 3 Anordnung der Behälter im Modellversuch mit Kleinlysimetern mit Sickerwasserentnahme
- Abbildung 4 Schematische Darstellung der Versuchsanlage im Modellversuch mit Kleinlysimetern
- Abbildung 5 Niederschlagsmengen von Aufgang bis Beregnungsbeginn und Beregnungsmengen bei gestaffelter Wasserversorgung auf den Kleinlysimetern im Vergleich der Fruchtarten in den drei Versuchsjahren
- Abbildung 6 Lysimeteranlage Butteltstedt
- Abbildung 7 Lage des Versuchsstandortes Pahren
- Abbildung 8 Witterung 2010 in Pahren
- Abbildung 9 Wachstumsverlauf der beiden Kulturen in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung im Versuchsjahr 2009 (Mittel aus 4 Wdhlg.)
- Abbildung 10 Bestandeshöhen (Jahresmittel 2009/10) und BBCH-Stadien 2009/10 von Energiemais und Sorghum bicolor zur Ernte im Modellversuch in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung
- Abbildung 11 Trockenmasseertrag von Energiemais und Sorghum bicolor im Modellversuch (Jahresmittel 2009/10) in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung
- Abbildung 12 Bodenwasserausschöpfung durch Energiemais und Sorghum bicolor auf Löss und Sand bei Wasserversorgung 0,3/0,2 PET ausgewählter Kleinlysimeter (KL)
- Abbildung 13 Wasserverbrauch von Energiemais (M.) und Sorghum bicolor (S. b.) im Modellversuch (Jahresmittel 2009/10) in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung
- Abbildung 14 Transpirationskoeffizient (TK) von Energiemais und Sorghum bicolor im Modellversuch (Jahresmittel 2009/2010) in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung
- Abbildung 15 Wasser-Ertragsbeziehungen der beiden Kulturen (2009/10)
- Abbildung 16 N-Salden von Mais und Sorghum bicolor auf den beiden Böden in Abhängigkeit von den Wasserstufen (Mittel 2008 bis 2010)
- Abbildung 17 N-Austrag unter Energiemais und Sorghum bicolor in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung (Mittel der Sickerwasserperioden)
- Abbildung 18 Entzug an Hauptnährstoffen der beiden Kulturen auf Sand und Löss (Mittel der Wasserstufen) im Mittel der 3 Versuchsjahre
- Abbildung 19 Gehalte an ausgewählten Rohnnährstoffen von Energiemais und Sorghum bicolor (Mittel 2008-2010) in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung
- Abbildung 20 Theoretische Methanausbeute (NI/kg oTS) und Methanertrag (m³/ha) der beiden Kulturen in Abhängigkeit von Boden und Wasserstufe (Mittel 2009/10)
- Abbildung 21 Verlauf der Bestandeshöhe und des Entwicklungsstadiums von Aussaat (07.05.2009) bis Ernte (01.10.2009) im Lysimeterversuch
- Abbildung 22 Verlauf der Evapotranspiration von Sorghum bicolor unter potenziellen (ber, LÖ1B) und aktuellen (unber, LÖ1) Verdunstungsbedingungen

- Abbildung 23 Zusammenhang zwischen Wasserverbrauch von Aufgang bis Ernte von Sorghum bicolor im Vergleich zu den landwirtschaftlichen Kulturen und Länge der Wachstumszeit unter potenziellen Verdunstungsbedingungen während der Hauptwachstumsperiode
- Abbildung 24 Zeitlicher Verlauf der Bodenwasserausschöpfung durch Sorghum bicolor im Vergleich zu Silomais auf dem Braunerde-Tschernosem (Löss)
- Abbildung 25 Intensität der Bodenwasserausschöpfung (y-Achse: Tiefe in cm, x-Achse: Bodenwassergehalt in Vol.%) von Sorghum bicolor und Silomais 2009 im Vergleich zu Winterweizen 1992 und 1999
- Abbildung 26 Theoretische Methanausbeute (NI/ kg oTS) und Methanertrag (m³/ha) von Sorghum bicolor in Abhängigkeit von Boden, Düngung und Wasserstufe im Lysimeterversuch
- Abbildung 27 Trockenmasseertrag von Sorghum bicolor in den Feldversuchen in Abhängigkeit von Boden und Düngungsstufe 2009
- Abbildung 26 Saatbett im Praxisversuch Pahren im Mai 2010 und Aussaat mit dem Airseeder am 23.05.10
- Abbildung 27 Hirsebestand in Pahren zur Ernte
- Abbildung 28 Einzelpflanzengewicht, Bestandesdichte, Trockenmasseertrag und TS-Gehalt zur Ernte in Pahren 2010
- Abbildung 29 Rohnnährstoffe (Weenders-Analyse) der frisch geernteten Hirsen (Sortenmittel), der Hirse- und Maissilage sowie die Faseranteile der Silagen am Standort Pahren
- Abbildung 30 Biogasausbeuten der Sorghum- und Maissilage in Pahren

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	Ausgewählte bodenphysikalische und -chemische Parameter des Braunerde-Tschernosem aus Löss
Tabelle 2	Ausgewählte bodenphysikalische und -chemische Parameter der Braunerde aus Bändersand
Tabelle 3	Ausgewählte bodenphysikalische und -chemische Parameter der Para-Rendzina aus unterem Keuper
Tabelle 4	Übersicht über die Versuchsvarianten und Untersuchungsparameter im Modellversuch mit Kleinlysimetern
Tabelle 5	Bewirtschaftungsdaten der Kleinlysimeter
Tabelle 6	Varianten im Lysimeterversuch mit Sorghum bicolor 2009
Tabelle 7	N-Düngung der Lysimeter 2009
Tabelle 8	Bewirtschaftung der Lysimeter 2009
Tabelle 9	Varianten im Feldversuch mit Sorghum bicolor 2009
Tabelle 10	Sortenspektrum im Praxisversuch Pahren 2010
Tabelle 11	Bewirtschaftung des Praxisversuchs Pahren 2010
Tabelle 12	N-Entzüge durch das Ernteprodukt in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung 2009 und 2010
Tabelle 13	Sickerwassermengen der Löss- und Sandlysimeter im Verlauf der Sickerwasserperiode
Tabelle 14	Mittlere Nitratkonzentration des Sickerwassers in den Sickerwasserperioden
Tabelle 15	Gärchemische Zusammensetzung von Energiemais und Sorghum bicolor (Mittel der Varianten und Versuchsjahre 2008 bis 2010)
Tabelle 16	Nährstoffverhältnisse von Energiemais und Sorghum bicolor (Mittel der Jahre 2008-2010)
Tabelle 17	Erträge und Trockensubstanzgehalt von Sorghum bicolor im Lysimeterversuch
Tabelle 18	Wasserverbrauch von Sorghum bicolor und Wasserbilanz unter potenziellen und aktuellen Verdunstungsbedingungen auf dem Braunerde-Tschernosem (Löss) 2009
Tabelle 19	Transpirationskoeffizient und Wassernutzungseffizienz von Sorghum bicolor unter potenziellen Verdunstungsbedingungen und natürlichem Niederschlag 2009
Tabelle 20	N-Entzug und N-Salden im Lysimeterversuch 2009
Tabelle 21	Pflanzenzahlen/m ² des Sorghumpraxisversuches Pahren nach Aufgang und zur Ernte 2010

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

ÄWP	Äquivalenter Welkepunkt
BBCH	Von Biologischer Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemischer Industrie entwickelte Skala zur Pflanzenentwicklung
ber	berechnet
BOF	Bodenfeuchte
Ca	Calcium
cm	Zentimeter
d	Tag
dt	Dezitonne
ET	Evapotranspiration
Corg	Organischer Kohlenstoff
et al.	und andere
ha	Hektar
HBT	Hohenheimer Biogastest
kg	Kilogramm
KL	Kleinlysimeter
KW	Kilowatt
l	Liter
m	Meter
MDÄ	Mineraldüngeräquivalent
mg	Milligramm
Mg	Magnesium
ml	Milliliter
mm	Millimeter
N	Stickstoff
nFK	Nutzbare Feldkapazität
NI	Normliter
NAWARO	Nachwachsende Rohstoffe
oTS	Organische Trockensubstanz
P	Phosphor
PET	Potenzielle Evapotranspiration
pH	negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration
rel.	relativ
S	Schwefel
S. b.	Sorghum bicolor
SBA	Stickstoff-Bedarfs-Analyse
TM	Trockenmasse
TK	Transpirationskoeffizient
unber	unberechnet
Vol. %	Volumenprozent
WUE	Wassernutzungseffizienz (water use efficiency)
%	Prozent
°C	Grad Celsius

1 Ziele

1.1 Aufgabenstellung

Die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) ist an dem bundesländerübergreifenden Verbundvorhaben „Anbautechnik Sorghumhirsen - Ein Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenspektrums“ mit ökologischen Untersuchungen zum Energiehirseanbau (Wasser- und Nährstoffeffizienz) und zur Gärrestverwertung im Teilprojekt 2 beteiligt. Ziel des Verbundvorhabens ist es, den Anbau von Sorghumhirsen zur Biogasgewinnung auf trockenem, leichten und mittleren Böden sowohl hinsichtlich anbautechnischer als auch ökologischer Aspekte zu optimieren.

Da derzeit aktuelle und auf den gemäßigten Klimaraum bezogene Angaben zur Wasser- und Nährstoffnutzungseffizienz von Sorghumhirsen fehlen und bisherige Ergebnisse über die Ertragsabhängigkeit von Sorghumhirsen vom Faktor Wasser widersprüchlich sind, wurden im Teilprojekt 2 im Zeitraum von 2008 bis 2010 die Sorghum bicolor-Sorte „*Goliath*“ und als Referenzpflanze die Energiemaissorte „*Atletico*“ unter Modellbedingungen auf zwei verschiedenen Böden (Braunerde-Tschernosem aus Löss und Braunerde aus Sand) mit gestaffelter Wasserversorgung sowie 2009 die Sorghum bicolor-Sorte „*Goliath*“ auf zwei unterschiedlichen Böden (Braunerde-Tschernosem aus Löss und Para-Rendzina aus unterem Keuper) in Feldlysimetern untersucht.

Im Modellversuch mit Kleinlysimetern erfolgten Untersuchungen zu Wasser-Ertrags-Beziehungen, N-Nutzungseffizienz, Bodenwasserentzug, Sickerwasserbildung und Nährstoffauswaschung. Die Feldlysimeter dienten der Bestimmung der aktuellen und potenziellen Evapotranspiration, der Wassernutzungseffizienz und des Aneignungsvermögens von Bodenwasser der Sorghum bicolor-Sorte „*Goliath*“. Der Lysimeterversuch wurde von zwei Feldversuchen auf den Herkunftsflächen der Lysimeter begleitet.

In das Teilprojekt eingebunden waren weiterhin Untersuchungen zum Anbau und zur Gärrestverwertung von Sorghumhirsen in einem ostthüringischen Praxisbetrieb im Saale-Orla-Kreis.

1.2 Stand der Technik

Der Einfluss anhaltender Trockenheit auf die Wassernutzungseffizienz von Sorghum bicolor im Vergleich zu Mais und Sonnenblume ist von MASON et al., 1983 und BREMNER et al., 1986 unter den naturräumlichen Bedingungen Südaustraliens untersucht worden.

In den Untersuchungen von MASON et al., 1983 wurden Mais, Hirse und Sonnenblume ab 38 d nach der Aussaat und Ausbildung eines Blattapparates bis zur Ernte einem dauerhaftem Trockenstress ausgesetzt. Die Pflanzen versuchen daraufhin, ihren Wasserbedarf durch Aufnahme von Bodenwasser zu decken. Aus dem Bodenwasservorrat eines tiefgründigen, feintexturierten Bodens nahmen Hirse, Mais und Sonnenblume 141, 130 und 127 mm auf. Sonnenblume reifte darüber hinaus schneller ab und entging damit der Periode mit maximalem Trockenstress. Im Vergleich zu einer optimal mit Wasser versorgten Variante sanken die Kornerträge auf 70 % bei Hirse, 47% bei Sonnenblume und 3% bei Mais. Es handelte sich hierbei um Sorten für die Körnernutzung, der Ganzpflanzenertrag wurde nicht mitgeteilt. Dennoch wies dieses Ergebnis auf eine deutlich höhere Wassernutzungseffizienz von Sorghum in Bezug auf den Kornertrag im Vergleich zu Körnermais.

Deutliche Unterschiede wurden in der Wurzellängendichte der Kulturen festgestellt. In der Bodenzone 0,2 bis 1 m bildeten Mais und Sorghum mehr Wurzeln als Sonnenblume. Offenbar geschah die Wasseraufnahme je Wurzellängeneinheit der Sonnenblume effektiver als bei Sorghum und Mais.

BREMNER et al., 1986 untersuchten das Bodenwasseraufnahmevermögen von Sorghum bicolor und Sonnenblume unter dem Einfluss einer mehr als 60 Tage anhaltenden Trockenperiode während der Hauptwachstumszeit im Naturraum Südaustralien. Sonnenblume schöpft das Bodenwasser als dikotyle Pflanze schneller, intensiver und tiefer aus. Die maximale Entzugstiefe betrug in zwei aufeinanderfolgenden Jahren 150 und 175 cm, die Entzugsmengen an Bodenwasser beliefen sich auf 270 und 223 mm, resp. 89 und 94 % der nFK in der durchwurzelten Bodenschicht. Hirse war in der Lage, Bodenwasser bis aus 150 cm Tiefe aufzunehmen mit einer

Menge von 212 und 150 mm, resp. 67 und 61 % der nFK im Wurzelraum. Trotz größeren Bodenwasseraneignungsvermögens der Sonnenblume kann diese Eigenschaft in einer Fruchtfolge von Nachteil sein, wenn der Niederschlag nicht ausreicht, um den von Sonnenblume stark ausgeschöpften Bodenwasserspeicher wieder aufzufüllen. Insofern werden Pflanzen mit einem nur mittleren Aneignungsvermögen an Bodenwasser günstiger als Vorfrucht in der Fruchtfolge eingestuft und in Trockenregionen auf einen Anbauwechsel unterschiedlich tief wurzelnder Kulturen in einer Fruchtfolge für einen effizienten Einsatz des Bodenwassers hingewiesen.

In Anbauversuchen im EVA-Projekt stellte sich im Jahr 2006 heraus, dass Energiemais in Trockenjahren im Vergleich zu Sorghum bicolor bis zu 30 % geringere Erträge bildete und vermutlich infolge der Schwächung des pflanzlichen Organismus einen verstärkten Befall mit Maiszünsler zu erleiden hatte. Eine Auswertung der Erträge von Sudangras auf verschiedenen Standorten in Sachsen-Anhalt und Thüringen in Abhängigkeit von der Wasserversorgung (Niederschlag und Bodenwasserbereitstellung) gab andererseits keinen eindeutigen Hinweis darauf, dass Sudangras geringere Ansprüche an die Wasserversorgung stellt und in Trockenjahren dem Mais im Ertrag überlegen ist.

1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Verbundvorhabens erfolgten zwischen den Projektpartnern regelmäßige Absprachen über die Durchführung der acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen (Reihenweite und Standraumzumessung, Aussaat- und Erntetermine, Sortenwahl, Herbizideinsatz, Boniturparameter, Pflanzeninhaltsstoffe, Bodeneigenschaften). In den jährlichen Projekttreffen wurden die Ergebnisse der Einzeljahre präsentiert und diskutiert. Arbeitsschwerpunkte auf diesen Treffen bildeten neben einem allgemeinen Erfahrungsaustausch die Anlage, Durchführung und Auswertung der Versuche. Von den Arbeitstreffen wurden Ergebnisprotokolle angefertigt.

Für den Kleinlysimeterversuch kam neben dem für die Thüringer Ackerebene typischen Lössboden ein Boden aus der Düben-Dahlener Heide zum Einsatz, der auch für Sorghumsortenversuche im TP 1 genutzt wurde und somit Aussagen zur Wassernutzungseffizienz der Hirsen auf leichteren Böden Nordostdeutschlands ermöglicht.

Am 10.05.2010 gab es im Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie ein Arbeitstreffen zur kritischen Auseinandersetzung mit den Ergebnissen zum Wasserverbrauch der Sorghumhirsen, die das JKI Braunschweig (SCHITTENHELM et al., 2009) im Rahmen des EVA II - Teilprojektes 5 veröffentlicht hatte.

Des Weiteren erfolgte eine Zusammenarbeit mit dem landwirtschaftlichen Praxisbetrieb Pahren Agrar GmbH, der sich in den drei Vegetationsjahren des Projektzeitraumes dazu verpflichtete, mit der betriebsüblichen Technik einen Sorghumbestand zu etablieren, das Erntegut in der betriebseigenen Biogasanlage zu vergären und anschließend die Düngewirkung der Gärreste zu untersuchen.

2 Ergebnisse

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 Versuchsbeschreibung

2.1.1.1 Standortbeschreibung

Boden

Im Modellversuch mit Kleinlysimetern handelt es sich um einen Braunerde-Tschernosem aus Löss und eine Braunerde aus Bändersand z. T. über Tieflehm. Die Feldlysimeter Butteltstedt beinhalten einen tiefgründigen Braunerde-Tschernosem aus Löss und eine Para-Rendzina aus unterem Keuper.

Der Braunerde-Tschernosem aus Löss stellt eine typische Bodenform des Thüringer Keuperbeckens dar. Unter einem 40 cm mächtigen Ap/Ah-Horizont folgt bis in 65 cm Tiefe der carbonatfreie Ah-Bv-Horizont und darunter das Ausgangssubstrat Löss (Tab. 1). Die Bodenart ist durchgängig schluffiger Lehm. Mit Grobporengehalten von >7 Vol. %, Bodendichten im Bereich von 1,33 bis 1,64 g/cm³ und Nadelstichporengefüge bestehen günstige Bedingungen für die Durchwurzelung. Die nutzbare Feldkapazität liegt mit 9,3 bis 16,5 Vol. % im mittleren Bereich. Aufgrund der Tiefe des durchwurzelbaren Bodenraumes ist von einem beachtlichen pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrat (etwa 220 mm in 0 bis 200 cm Tiefe) auszugehen.

Tabelle 1: Ausgewählte bodenphysikalische und -chemische Parameter des Braunerde-Tschernosem aus Löss

Horizont		Probe- nahme- tiefe (cm)	CaCO ₃ %	pH	Boden- art	Skelett %	nFK pF 2,5 Vol. %	nFK radiometr. Vol. %	C _{org} %	N _t %
	Tiefe cm									
Ap	0-25	12-18	0,3	6,6	Lu	0,08	15,5	12,0	1,7	0,14
Ah	43	30-36	0,3	6,5	Lu		13,6	13,3	1,2	0,1
Ah-Bv	65	45-51	0,2	6,7	Lu	0,08	9,3	13,8	0,8	0,06
Ckc1	110	75-85	17,8	7,4	Lu	4,4	14,2	13,9	0,3	0,02
Ckc2	160	120-130	15,3	7,6	Lu	8,0	13,4	10,3	0,2	0,02
		130-140			Lu		12,1	10,3		
Ckc3	195	160-170	12,8	7,6	Lu	7,0	16,5	8,5	0,3	0,01
		185-195	12,7	7,7	Lu	0,7	13,4	9,1	0,4	0,02

Herkunftsort der Braunerde aus Bändersand ist die Düben-Dahlener Heide mit vergleichbaren Verhältnissen der Jahresniederschlagssumme (596 mm) und der Jahresdurchschnittstemperatur (8,7 °C) wie am Versuchsstandort im Thüringer Becken. Die Braunerde ist charakterisiert durch einen 27 cm mächtigen Ap/Ah-Horizont und einem darauffolgenden Bv-Horizont bis in 62 cm Tiefe (Tab. 2). Ausgangssubstrat der Bodenbildung ist Sand bis schwach-schluffiger Sand, z. T. mit rostroten Fe-Bändern durchzogen. Unterhalb 80 cm Tiefe finden sich lehmig-sandige und lehmige Schichten mit 5 bis 35 cm Mächtigkeit (Tieflehm) im Wechsel mit sandig-kiesigen oder dunkelrostfarbenen, stark verfestigten Grus-, Kies- und Fe-Konkretionen (5 bis 15 cm) führenden Lagen. Lehmschichten und verockerte, grusführende Lagen können Ursache für Stauwasserbildung sein. Der nutzbare Bodenwassergehalt der sandigen bis schwach schluffig-sandigen Substrate beträgt nach der Druckmessmethode 3,9 bis 11,5 Vol. % (FK bei pF 2,0). Zu ähnlichen Ergebnissen kommt die Neutronensondenmessung mit 6,8 bis 8,5 Vol. %. Für die tiefer gelegenen lehmig-sandigen bis lehmigen Substrate gibt die Druckmessmethode 17,5 bis 20,4 Vol. % nFK an, die Neutronensondenmessungen weist im Jahr 2009 mit 9,5 bis 13,9 Vol. % deutlich niedrigere Werte aus.

Tabelle 2: Ausgewählte bodenphysikalische und -chemische Parameter der Braunerde aus Bändersand

a) Braunerde aus Bändersand (Typ 1)

Horizont		Probe- nahme- tiefe (cm)	CaCO ₃ %	pH	Boden- art	Skelett %	nFK pF 2,0 Vol. %	nFK radiome- trisch ¹ Vol. %	C _{org} %	N _t %
	Tiefe cm									
Ap	0 - 20	15-20	c0	5,2	Su2	4,3	11,5	8,8	1,32	0,10
Ah	27		c0	5,2				8,5	1,29	0,10
Bv	62	43-48	c0		Ss	2,7	5,1	7,0		
Cv1	88	73-78	c0		Ss	0,3	7,5	7,0		
Cv2	119	105-110	c0		Ss	0,2	3,9	6,8		
Cv3	160		c0					6,8		

¹ vorläufige Schätzung aus Neutronensonnenmessung 2008, 2009

b) Braunerde aus Bändersand über Tieflerhm (Typ 2)

Horizont		Probe- nahmetiefe cm	CaCO ₃ %	pH	Boden- art	Skelett %	nFK pF 2,0 Vol. %	nFK radiome- trisch. ¹ Vol. %	C _{org} %	N _t %
	Tiefe cm									
Ap	0-20		c0	5,2				7,7	1,14	0,09
Ah	29	20-25	c0	5,2	Sl2	3,6	14,7	7,0	1,16	0,09
Bv-Ah	39		c0					7,0		
Bv	58	43-48	c0		Su2	22,1	13,0	8,5		
Cv1	81	65-70	c0		Su2	5,5	16,0	8,5		
Cv2	96	85-90	c0		Sl3	2,3	20,4	13,9		
Cv3	140	105-110	c0		Ls2	1,0	17,5	9,5		

¹ vorläufige Schätzung aus Neutronensonnenmessung 2008, 2009

Die Para-Rendzina aus unterem Keuper gehört ebenso wie der Braunerde-Tschernosem aus Löss zu den typischen Bodenformen des Thüringer Keuperbeckens. Sie ist aus carbonathaltigen lockeren und festen Mergelgesteinen hervorgegangen. Der Ap/Ah-Horizont reicht bis in 35 cm Tiefe (Tab. 3). Die Bodenart ist mittel toniger Lehm und der Hauptbodenart Ton zuzuordnen. Darunter folgen lehmige, schluffige und tonige Verwitterungsprodukte des unteren Keupers mit im Tiefenverlauf stark wechselnden Korngrößenanteilen, Skelett- und Carbonatgehalten. Form und Lage der Horizontgrenzen sind aufgrund kryoturbater Umlagerungsprozesse häufig geneigt, keil- und zapfenförmig und begründen die Annahme höherer pflanzenverfügbarer Bodenwas-
sermengen aufgrund zeitweiliger Stauwasserbildungen.

Tabelle 3: Ausgewählte bodenphysikalische und chemische Parameter der Para-Rendzina aus unterem Keuper (K6)

Horizont		Probenahme tiefe cm	CaCO ₃ %	pH	Boden- art	Skelett %	nFK pF 2,5 Vol. %	C _{org} %	N _t %
	Tiefe cm								
Ap-Ah	0-23	4-11	12,6	7,6	Lt3	29,3	8,1	1,23	0,15
I elCv	60	55-61	2,3	7,7	Tu3	42,1	12,6	0,17	0,04
II elCv	79	73-79	< 0,5	7,7	Lu	24,9	8,8	0,23	0,04
III elCv	107	96-102	< 0,5	7,5	Ls2	27,4	10,4	0,25	0,04
IV elCv	148	125-131	< 0,5	7,3	Lu	45,7	8,7	0,21	0,03
V elCv	172	165-171	< 0,5	7,2	Ls2	56,9	9,0	0,35	0,03
VI elCn1	198	180-186	< 0,5	7,1	Tu3	48,2		0,41	0,04
VII Cn2	225	210-216	< 0,5	7,0	Lu	63,7		0,40	0,05

Für den nutzbaren Bodenwassergehalt gibt die Druckmessmethode einen Bereich von 7,0 bis 13,9 Vol. % an. Die Bodenwasserbereitstellung der drei Böden ordnet sich in folgende Rangfolge: Braunerde-Tschernosem aus Löss (mittel bis hoch), Para-Rendzina aus unterem Keuper (mittel), Braunerde aus Bändersand (gering bis mittel).

Klima und Witterung

Die Niederschlags- und Temperaturverhältnisse der im süd-östlichen Teil des Thüringer Beckens, 10 km nördlich von Weimar gelegenen Lysimeterstation Butteltstedt sind durch das Mitteldeutsche Binnenklima charakterisiert.

Die vieljährige Summe des Niederschlags am Standort Butteltstedt (1961-1990) beläuft sich auf 544 mm Niederschlag, davon entfallen 53 % auf den Zeitraum Mai bis September. Das vieljährige Mittel der Tagesmitteltemperatur liegt bei 8,3 °C.

2008

Im Jahresmittel lag die Lufttemperatur mit 9,0 °C um 0,7 K über dem Normalwert. Die Vegetationsperiode 2008 war zu warm und zu trocken, vor allem von Mai bis August (Abb. 1). Die unterdurchschnittlichen Septembertemperaturen resultierten aus den ab der 2. Monatshälfte einsetzenden kühlen Temperaturen. Diese nahmen auf das Pflanzenwachstum von Energiemais und Sorghum bicolor keinen Einfluss mehr, da der Versuch zu diesem Zeitpunkt bereits abgeerntet war.

Der Jahresniederschlag blieb mit 484 mm deutlich unter der vieljährigen Summe. Für die Kleinlysimeter ist der natürliche Niederschlag nur bis zum Einsetzen der kontrollierten Wassergaben (Beginn Hauptwachstumsphase) von Bedeutung. Daher ist im Versuchsjahr 2008 lediglich das Niederschlagsaufkommen vom 22. Juni (Pflanzung der im Gewächshaus mit 2 mm Wasser/Tag vorgezogenen Hirse- und Maispflanzen in die Lysimetergefäße) bis zum Beregnungsbeginn am 25.07. relevant. In diesem Zeitraum fiel mit 47 mm eine unterdurchschnittliche Niederschlagsmenge.

2009

Mit einer Jahresmitteltemperatur von 8,6 °C zeigte sich das Jahr 2009 um 0,3 K zu warm. In der Vegetationsperiode (April bis Oktober) war es um 0,8 K wärmer als normal (Abb. 1). Dieses zu hohe Niveau resultierte aus den zu warmen Monaten April, Mai, Juli, August und September. Deutlich positive Abweichungen wiesen der April (+4 °C) und der August (+2,8 °C) auf. Wesentlich zu kalt zeigte sich der Juni (-1,6 °C), wobei insbesondere die zu kühle erste Dekade (-3,5 °C) das Wachstum der jungen Hirsepflanzen beeinträchtigte.

Die jährliche Niederschlagssumme lag mit 573 mm über dem vieljährigen Vergleichswert, jedoch wurde in der Vegetationsperiode ein um 44 mm geringeres Aufkommen registriert (Abb. 2). Dieses resultierte besonders aus den trockenen Monaten Juni und August mit 59 und 24 % der vieljährigen Monatssumme (Abb. 2). Während der Jungpflanzenentwicklung von Mais war es im Mai überdurchschnittlich feucht und von Hirse im Juni trockener als normal.

2010

Im Jahr 2010 herrschte im Jahresmittel eine um 1,0 K zu kühle Witterung vor. Während der Vegetationsperiode waren lediglich der April (+0,9 K) und der Juli (+3,1 K) zu warm (Abb. 1), letzterer mit Tagesmitteltemperaturen von bis zu 27,4 °C. Besonders kühl erwies sich der Mai. Durchweg unternormale Temperaturen im August führten zu Abreifeverzögerungen von Mais und Hirse.

Der Jahresniederschlag lag mit 611 mm über dem Normalwert. Während der Jungpflanzenentwicklung von Mais war es im Mai überdurchschnittlich feucht (Abb. 2). Ab Mitte Juni bis Ende Juli während der Jugendperiode von Sorghum setzte hingegen eine Trockenperiode ein.

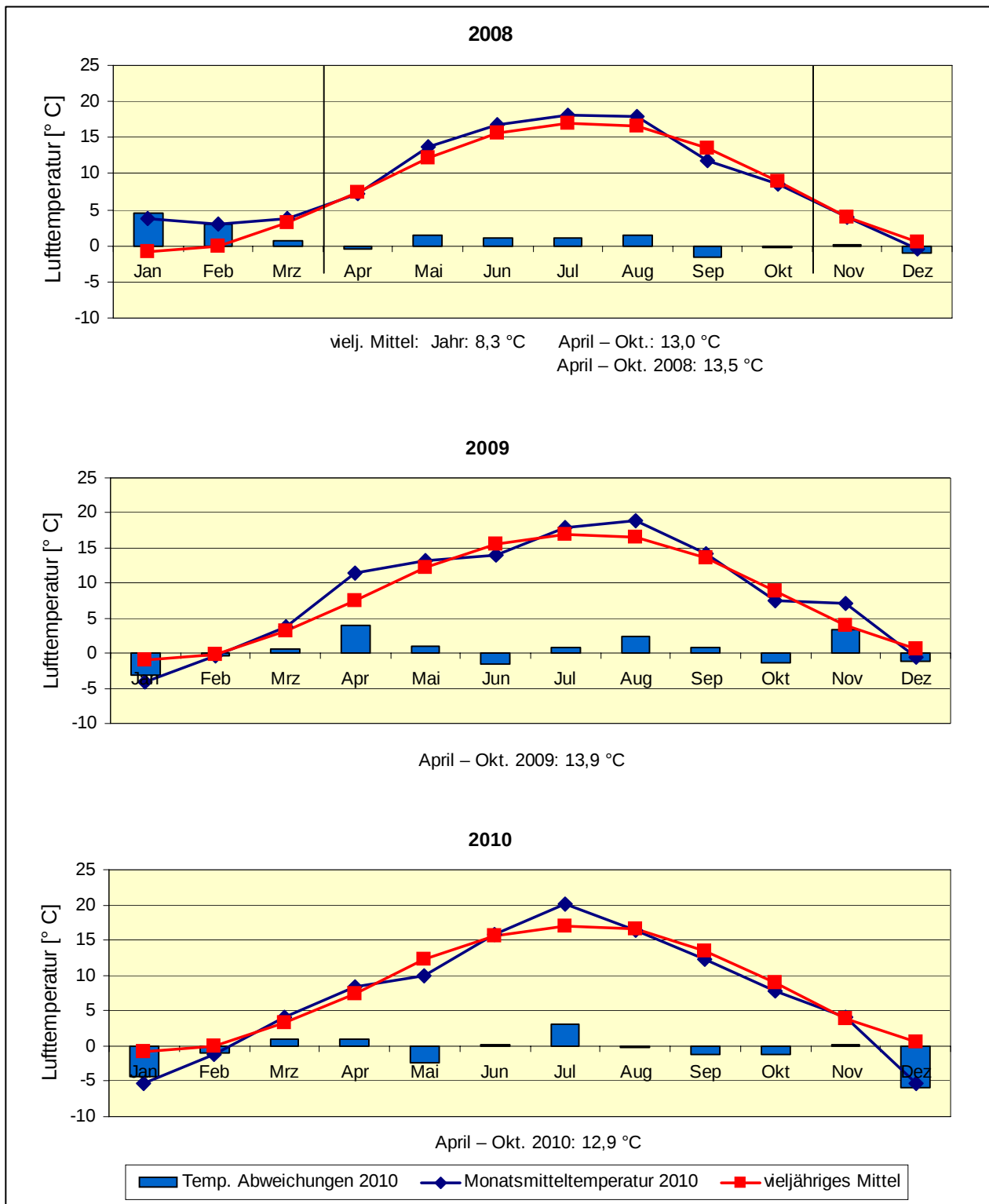


Abbildung 1: Temperaturverlauf (Monatsmitteltemperaturen, °C) an der Lysimeterstation Butteltstedt in den drei Versuchsjahren

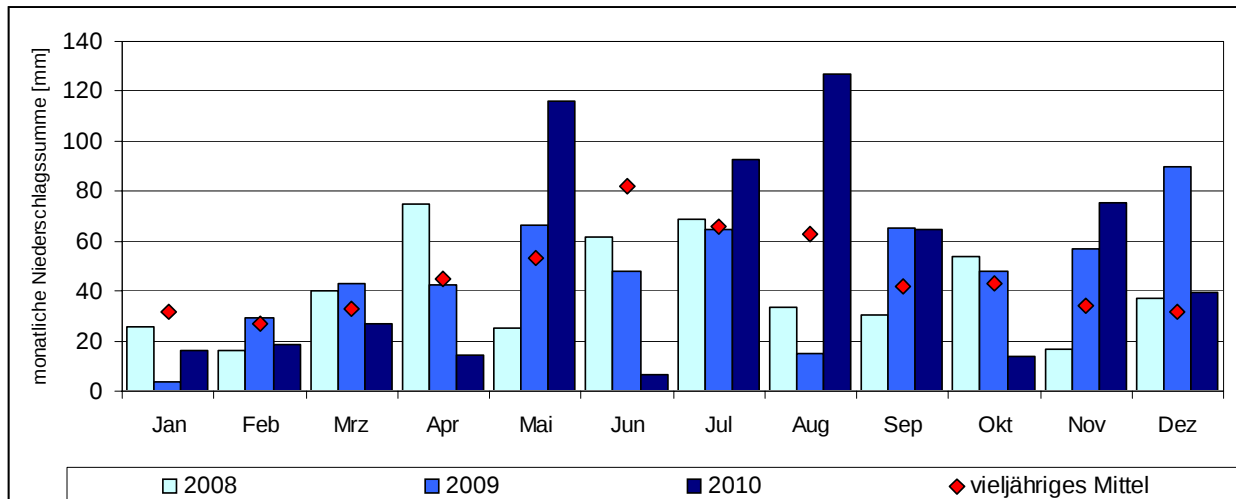


Abbildung 2: Monatliche Niederschlagssummen der drei Versuchsjahre an der Lysimeterstation Buttelstedt

2.1.1.2 Versuchsdurchführung

Modellversuch mit Kleinlysimetern

Die im Kleinlysimeterversuch eingesetzten 48 Lysimeterbehälter sind monolithisch befüllt, besitzen einen Durchmesser von 40 cm (= 0,125 m² Fläche) und eine Tiefe von 1,35 m (Abb. 3 und 4).



Abbildung 3: Anordnung der Behälter im Modellversuch mit Kleinlysimetern mit Sickerwasserentnahme

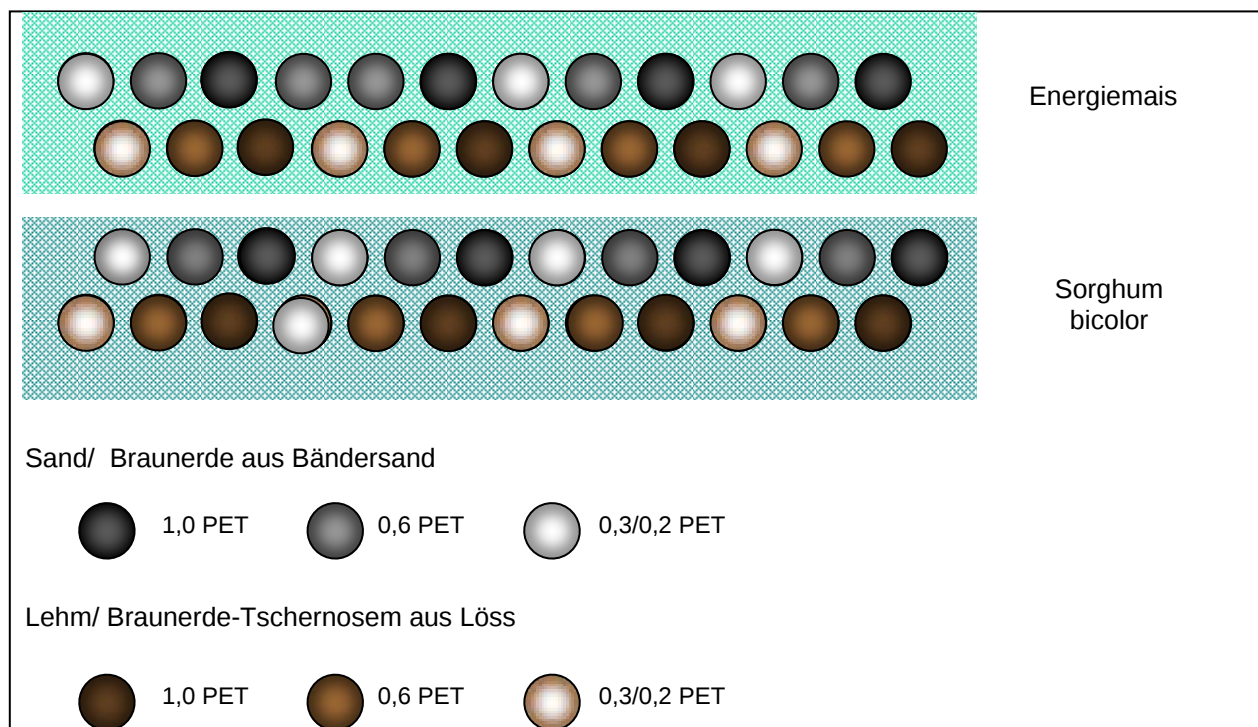


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Versuchsanlage im Modellversuch mit Kleinlysimetern

Mittels eines über der Bodenplatte horizontal eingebauten Saugsondensystems aus keramischen Saugkerzen wird das Sickerwasser wöchentlich unter Einwirkung von Unterdruck gewonnen. Die Ermittlung der Bodenfeuchte erfolgt mit Hilfe einer Am/Be-Neutronensonde in 20 cm-Tiefenabstufungen in vierzehntägigem Abstand zwischen Aussaat und Ernte. Die schichtweisen Messungen bis zu einer Tiefe von 120 cm ermöglichen Aussagen über den Bodenwasserentzug beider Energiepflanzen. Einen Überblick über die Versuchsvarianten vermittelt die Tabelle 4. Der Modellversuch ist in 4-facher Wiederholung angelegt.

Tabelle 4: Übersicht über die Versuchsvarianten und Untersuchungsparameter im Modellversuch mit Kleinlysimetern

Faktor			
Pflanze	Sorghum bicolor (Sorte: Goliath)	Energimais (Sorte: Atletico)	
Boden	Löss (Braunerde-Tschernosem)	Sand (Braunerde)	
Wasserversorgung	1,0 PET	0,6 PET	0,3/0,2 PET
N-Düngung	N-Sollwert		
Parameter	Ertrag und Gärqualität BOF-Ausschöpfung (rel.) Wasserverbrauch (rel.) WUE (rel.)		Sickerwassermenge Nährstoff-Saldo Nährstoffaustrag

Faktor Pflanze

Als Vertreter der Hirsen wurde der mittelspäte wüchsige Hirsehybrid *Goliath* (*Sorghum bicolor* x *bicolor*, im Folgenden als *Sorghum bic.* bezeichnet) ausgewählt. Dieser Sorte wird eine gute Eignung für die Biomasseproduktion auf Trockenstandorten mit einer dem Mais vergleichbaren Ertragsfähigkeit bei 20 bis 30 % geringerem Wasserbedarf zugeschrieben. Die massebildende Energiemaissorte *Atletico* (S 280), ebenfalls für trockenere Standorte geeignet, wurde als Vergleichspflanze ausgewählt. Wöchentlich erfolgte die Ermittlung von Bestandeshöhe, BBCH-Stadien, Blattanzahl, Halmknotenanzahl, Triebbildung und zur Ernte die Ertragsermittlung je Gefäß.

Faktor Boden

Versuchsböden waren der im Abschnitt 2.1.1.1 beschriebene Braunerde-Tschernosem aus Löss, eine typische Bodenform im Thüringer Becken (Lehmboden) mit mittlerer Wasserbereitstellung und die Braunerde aus Bändersand aus der Düben-Dahleener Heide, Nähe der Ortslage Roitzsch/Trossin (Sandboden) mit geringer bis mittlerer Wasserbereitstellung.

Faktor Wasser

Der Einfluss der Wasserversorgung wurde ab Beginn der Hauptwachstumsperiode in drei Abstufungen geprüft. In der ersten Stufe wurde ein Bodenfeuchtegehalt von $> 80\%$ nFK für die Realisierung potenzieller Verdunstungsbedingungen aufrechterhalten durch vollständigen Ausgleich der potenziellen Evapotranspiration der Pflanze (ET) mit Zusatzwasser (1,0 PET). In der zweiten Stufe erfolgte eine Wasserversorgung auf 60 % der PET (0,6 PET) und in der dritten Stufe auf 30 % bzw. in 2010 auf 20 % der PET (0,3/0,2 PET). Im Versuchsjahr 2008 wurde die potenzielle Evapotranspiration von Mais für die Wassersteuerung beider Kulturen (Energiemais, Sorghum bic.) zugrunde gelegt. Die Berechnung erfolgte mit Hilfe des Verdunstungsmodells VERD. Sorghum bicolor erhielt also im Jahr 2008 die gleiche Wassermenge wie Mais, da der tatsächliche Wasserverbrauch dieser Kultur noch nicht bekannt war (Abb. 5).

Im Versuchsjahr 2009 wurde die potenzielle ET von Sorghum bicolor direkt durch Messung der Verdunstung der mit Zusatzwasser versorgten Feldlysimeter ermittelt. Die Verabreichung von Zusatzwasser setzte auf den Feldlysimetern jeweils nach Erreichen eines Wasserbilanzdefizits von -40 bis -60 mm ein, um damit etwa 80 % der nutzbaren Feldkapazität im Wurzelraum aufrechtzuerhalten. Für Mais diente weiterhin die mit Hilfe des Verdunstungsmodelle VERD berechnete potenzielle ET. Im Versuchsjahr 2010 wurden die im Vorjahr mit dem Feldlysimeter ermittelten Verdunstungsparameter von Sorghum bicolor in das Programm VERD eingepflegt und PET für beide Kulturen berechnet. Die höheren Berechnungsmengen für Hirse in den Jahren 2009 und 2010 im Vergleich zum Mais resultierten aus den größeren Verdunstungsmengen der Hirse (Abb. 5). Die Wassermengen wurden in Abhängigkeit vom Verdunstungsanspruch der Atmosphäre in bis zu zwei Gaben pro Woche ausgebracht. Der höhere natürliche Niederschlag bei Mais gegenüber der Hirse in den Jahren 2009 und 2010 ergab sich aus der drei Wochen früheren Aussaat und den in diesem Zeitraum übernormalen Niederschlägen.

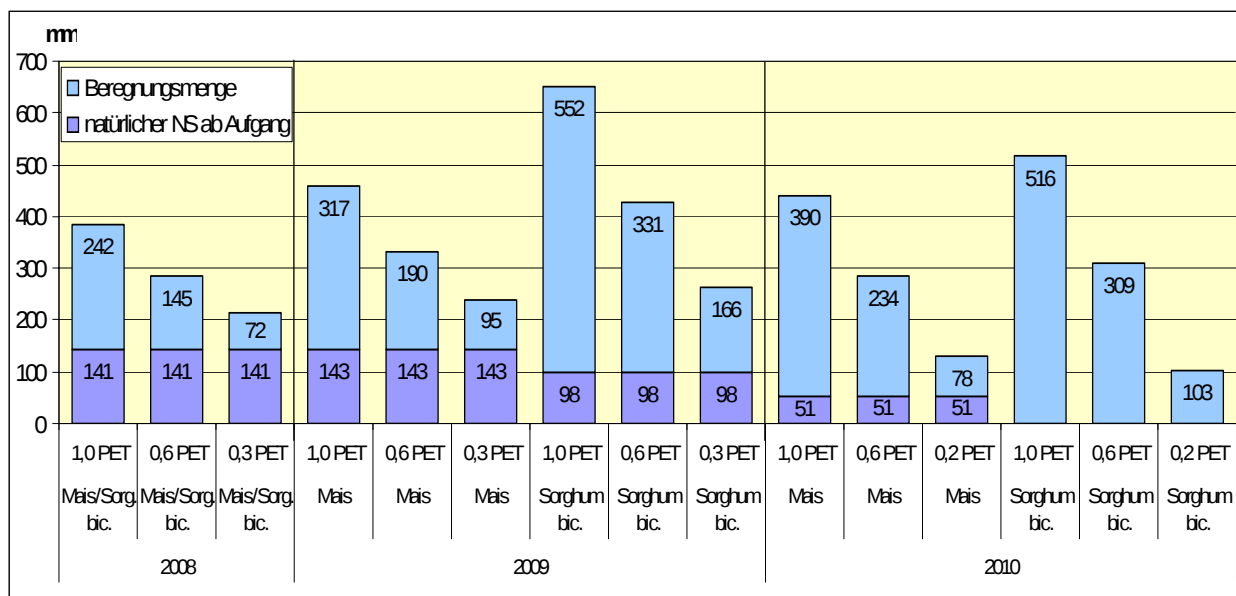


Abbildung 5: Niederschlagsmengen von Aufgang bis Beregnungsbeginn und Beregnungsmengen bei gestaffelter Wasserversorgung auf den Kleinlysimetern im Vergleich der Fruchtarten in den drei Versuchsjahren

Faktor Düngung

Die N-Düngung entsprach dem N-Sollwert für Energiemais und Sorghum bicolor unter der Bedingung optimaler Wasserversorgung abzüglich des Boden-N_{min}-Gehaltes im Frühjahr. Der N-Sollwert bemaß sich nach den Vorgaben des Düngeberatungssystems der TLL (SBA) für

Energiemais auf 220 kg/ha und für Sorghum bicolor auf 230 kg/ha. Zwischen den Böden und den Stufen der Wasserversorgung gab es damit keine Unterschiede im N-Sollwert. Dafür gingen die unterschiedlichen Boden-N_{min}-Gehalte der Varianten im Frühjahr in die N-Düngungsbemessung ein, die durch Beprobung der obersten 30 cm Bodenschicht und eines daraus abgeschätzten Wertes für die Bodenschicht 30 bis 60 cm ermittelt wurden. Auffallend waren im Frühjahr 2009, 2010 und 2011 die jeweils knapp 20 kg/ha geringeren N_{min}-Werte unter Sorghum bicolor im Vergleich zum Mais (Anlage 1).

Anbautechnische Parameter

Die Tabelle 5 vermittelt einen Überblick über die wichtigsten Bewirtschaftungsmaßnahmen in den 3 Versuchsjahren.

Tabelle 5: Bewirtschaftungsdaten der Kleinlysimeter

	2008		2009		2010	
	Energie- mais	Sorghum bicolor	Energie- mais	Sorghum bicolor	Energie- mais	Sorghum bicolor
Aussaat: Pflanzung in KL:	08.05.08 22.06.08	08.05.08 22.06.08	22.04.09	13.05.09	26.04.10	25.05.10
N-Düngung nach SBA	25.06./ 09.07.	25.06./ 09.07.	12.05./ 09.06.	07.05./ 17.06.	26.04./ 16.06.	25.05./ 30.06.
Unkraut- bekämpfung:	manuell bis Bestandesschluss					
Insektizideinsatz:	keine PSM- Maßnahmen		29.05.09 125 g/ha Steward, 28.07.09 125 g/ha Steward	06.07.09 75 ml/ha Karate Zeon, 13.07.09 250 g/ha Pirimor Gran., 28.07.09 125 g/ha Steward	19.07.10 125 g/ha Steward	19.07.10 125 g/ha Steward
Beginn Beregnung: nach Tagen:	25.07.08 78	25.07.08 78	14.07.09 83	14.07.09 62	24.06.10 58	02.07.10 38
Ausgl. der Wasser- bilanz ab:	11.07.08	11.07.08	11.06.09	01.07.09	15.06.10	29.06.10
Erntetermin:	12.09.08	17.09.08	02.09.09	29.09.09	16.09.10	19.10.10
Auswuchstage:	127	132	133	139	143	147

Aussaat

Bedingt durch die Verzögerung der Projektbewilligung 2008 erfolgte anstelle einer direkten Aussaat in die Lysimeterbehälter ab 8. Mai eine Voranzucht der beiden Kulturen in Töpfen. Die Bepflanzung der 48 Kleinlysimeter mit den vorgezogenen Pflanzen wurde im Zeitraum vom 19.06. bis 23.06.08 vorgenommen. In 2009 und 2010 erfolgte die Maisaussaat in der 3. Aprildekade, Sorghum bicolor wurde bei Bodentemperaturen von 14 °C im Tagesmittel 3 bzw. 2010 aufgrund der kühlen Maitemperaturen erst vier Wochen später ausgesät. Die Standraumzumesung der Pflanzen auf der 0,125 m² umfassenden Kleinlysimeterfläche wurde in Anpassung an die Pflanzenzahlen der Sortenversuche mit 1 Maispflanze (= 8 Pfl./m²) und 3 Sorghum bicolor-Pflanzen je Gefäß (24 Pfl./m²) realisiert.

Düngung

Zur Aufrechterhaltung der Gehaltsstufe C erhielt der Boden der Kleinlysimeter mehrmals während des Versuchszeitraumes P, K und Mg. Die Stickstoffdüngung (Kalkammonsalpeter, 27 % N) der Kleinlysimeter wurde jeweils in zwei Gaben geteilt (Anlage 1).

Pflanzenschutz

Die Unkrautregulierung in den Kleinlysimetern und auf deren Umgebungsfläche erfolgte manuell bis zum Bestandesschluss, danach war diese nicht mehr notwendig. Ein höherer Insektizideinsatz erwies sich 2009 als notwendig. Der Energiemais wurde Ende Mai gegen Schmetterlingsraupenbefall, der Lochfraßschäden an den jungen Blättern verursachte, mit dem Insektizid Steward behandelt. Ein starkes Auftreten von Blattläusen, die besonders die jungen Sorghumblätter befielen, erforderte einen zweimaligen Insektizideinsatz. Karate Zeon zeigte nur geringe Wirkung, deshalb wurde ein zweites Mal mit Pirimor Granulat behandelt. Ende Juli wurden beide Kulturen vorbeugend gegen Maiszünsler gespritzt. In der 2. Julihälfte 2010 wurden bei Anflug des Maiszünslers beide Kulturen wiederum präventiv mit Karate Zeon behandelt.

Beregnung

Die differenzierte Wasserversorgung setzte mit Beginn der Hauptwachstumsperiode ein. Da Mais aufgrund des früheren Saattermines diesen Zeitpunkt eher erreicht, begann der Ausgleich der Wasserbilanz 2 bis 3 Wochen früher als bei Sorghum bicolor. Die Wasserversorgung wurde entsprechend der Varianten manuell für jedes Kleinlysimetergefäß getrennt realisiert. Um die höhere Verdunstung aufgrund eines zu erwartenden Oaseneffektes zu kompensieren, wurde die Beregnungsmenge um einen Faktor im Bereich zwischen 1,2 und 1,4 erhöht. Natürlicher Niederschlag > 5 mm wurde mit Hilfe einer Abdeckanlage ferngehalten. Ab Ende August erfolgte eine Einzelabdeckung der Kleinlysimetergefäße bei Niederschlag mit Folie unmittelbar über der Erdoberfläche, da die Wuchshöhe der Sorghumpflanzen die Höhe der Abdeckanlage überschritt.

Ernte

Sorghum bicolor benötigte im Mittel der Versuchsjahre eine fünf Tage längere Aufwuchsdauer (Aussaat bis Ernte) als der Mais. Die Aufwuchsdauer variierte in Abhängigkeit von der Jahreswitterung. Die feucht-kühlen Spätsommertemperaturen 2010 verzögerten die Abreife beider Kulturen. Zur Ernte wurden neben den gärchemischen Qualitätsparametern auch die Bonitürparameter Bestandeshöhe, Halmknoten- und Blattanzahl, Seitentriebbildung, das Einzelpflanzengewicht und die Trockensubstanzgehalte ermittelt, beim Mais wurden Kolbenanzahl und -gewicht gesondert erfasst. Die Darstellung der Analysemethoden ist in der Anlage 2 festgehalten.

Lysimeterversuch (2009)

Die Lysimeteranlage Buttstedt besteht aus zwei räumlich voneinander getrennten Lysimeterkellern mit je acht Feldlysimetern.

Die Lysimeter weisen eine Oberfläche von 2 m² für die Etablierung eines repräsentativen Pflanzenbestandes und eine Tiefe von 2 bzw. 2,5 m für die Gewährleistung eines uneingeschränkten Wurzelwachstums auf (Abb. 6). Sie sind monolithisch befüllt, um das für Stoffumsatz und Wasserbewegung entscheidende Bodengefüge nicht zu stören und befinden sich inmitten eines 32 ha großen Feldschlages, auf dem zur Vermeidung von Oaseneffekten die gleiche landwirtschaftliche Kultur zum Anbau gelangt. Für die Ermittlung der Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag und Verdunstung sind sechs der Lysimeter kontinuierlich wägbare mit einer Genauigkeit von 100 g resp. 0,05 mm (Abb. 5). Das Wägesystem der unter potenziellen Verdunstungsbedingungen gehaltenen Lysimeter (Lys. 13 und 14) wurde im Mai 2009 installiert und die Gewichtsmessungen am 08.06.2009, ab dem Entwicklungsstadium 3-5-Blatt (BBCH 15) begonnen.



Abbildung 6: Lysimeteranlage Buttelstedt

Im Lysimeterversuch werden zwei Böden, zwei Düngungsregime und zwei Wasserstufen geprüft (Tab. 6).

Tabelle 6: Varianten im Lysimeterversuch mit *Sorghum bicolor* 2009

Faktor		
Boden	Braunerde-Tschernosem aus Löss (Lö)	Para-Rendzina aus unterem Keuper (K)
Düngung	mineralische Düngung nach SBA (1)	mineralisch-organische Düngung nach SBA, Anrechnung des Rindergülle-Ges-N (4)
Wasser	natürlicher Niederschlag	Zusatzwasser zur Aufrechterhaltung von ca. 80 % nFK im Wurzelraum (B)

Faktor Boden

Die Böden unterscheiden sich wesentlich im Abflussregime und der Bodenwasserbereitstellung. Für den Braunerde-Tschernosem aus Löss deuten homogene Verhältnisse der Korngrößenzusammensetzung und des Gefüges auf vorwiegenden Matrixfluss, auf der Para-Rendzina die heterogene Substratabfolge auf eine hohe Verlagerungsdisposition aufgrund präferentieller Fließbahnen. Der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat ist auf dem Braunerde-Tschernosem deutlich größer als auf der Para-Rendzina (KNOBLAUCH, 2011).

Faktor Düngung

Die Höhe der N-Düngung ergibt sich aus dem N-Sollwert nach SBA abzüglich des Boden-N_{min}-Gehaltes im Frühjahr (Tab. 7). Für *Sorghum bicolor* werden standortabhängig 210 kg/ha auf der Para-Rendzina und 230 kg/ha auf dem Braunerde-Tschernosem als N-Sollwert angenommen. In der mineralisch-organischen Variante 4 werden im Anbaujahr mit *Sorghum bicolor* 100 kg/ha in Form von Rindergülle ausgebracht. Der N-Gehalt der Rindergülle wird zu 100% angerechnet. Die Prüfung von zwei Düngungsregimen auf zwei Böden dient der Bestimmung der Höhe der unvermeidbaren N-Auswaschung und daraus ableitend standortabhängiger Schwellenwerte für N-Salden.

Tabelle 7: N-Düngung der Lysimeter 2009

Varianten				N _{min} pflanzen- verf. kg/ha	N-Dünge- Empfeh- lung kg/ha	N-Düngermenge		
Boden	Düngung	Wasser				1. Gabe Min-N kg/ha	Gülle-N kg/ha	2. Gabe Min-N kg/ha
Braunerde-Tschernosem	Min-SBA	natürlicher Niederschlag	Lö1	70	160	100		60
Braunerde-Tschernosem	Min-Gülle-Ges-N	natürlicher Niederschlag	Lö4	69	161	51	100	10
Para-Rendzina	Min-SBA	natürlicher Niederschlag	K1	57	153	100		53
Para-Rendzina	Min-Gülle-Ges-N	natürlicher Niederschlag	K4	56	154	44	100	10
Braunerde-Tschernosem	Min-SBA	natürlicher Niederschlag + Zusatzwasser	Lö1B	70	160	100		60

Faktor Wasser

Zwei der mit Löss befüllten Lysimeter werden mit Zusatzwasser zur Bestimmung der potenziellen Evapotranspiration des Pflanzenbestandes (PET) versorgt. Das wird erreicht durch Aufrechterhaltung eines Bodenwassergehaltes im Bereich von 80 % nFK im Wurzelraum. Alle übrigen Lysimeter werden unter natürlichem Niederschlag belassen und liefern unter den jeweiligen Bedingungen der Bodenwasserbereitstellung die aktuelle Evapotranspiration (AET) des Pflanzenbestandes. Durch Vergleich der potenziellen mit der aktuellen Evapotranspiration kann auf den Schwellenwert der Bodenfeuchte geschlossen werden. Dieser Wert ist erreicht, wenn die AET deutlich unter dem Wert der PET sinkt. Da zwischen Wasserverbrauch und Biomassebildung ein weitgehend linearer Zusammenhang besteht (d. h. solange $AET < PET$ und der AET/PET -Quotient kleiner 1 ist), kann davon ausgegangen werden, dass ab diesem Bodenfeuchtegehalt die Biomassebildung nicht mehr uneingeschränkt abläuft. Die Messung der Bodenfeuchte erfolgte mit Hilfe einer Am/Be-Neutronensonde der Fa. Troxler in 20 cm-Tiefenstufen in wöchentlichem Abstand. Zusatzwasser wurde während der Hauptwachstumsperiode jeweils dann verabreicht, wenn das Defizit der Wasserbilanz zwischen Niederschlag und Verdunstung unter -40 bis -60 mm sinkt. Die Berechnungsgaben betrugen 20 bis 30 mm. Die Zusatzwasserversorgung erstreckte sich zwischen dem Entwicklungsstadium BBCH 19/31 und BBCH 51/53.

Die Düngungs- und Bodenvarianten werden in drei bzw. vierfacher Wiederholung geprüft. Für die Bestimmung der potenziellen Verdunstung auf dem Braunerde-Tschernosem und der aktuellen Verdunstung auf beiden Böden stehen je zwei Lysimeter zur Verfügung.

Anbautechnische Parameter

Sorghum bicolor, Sorte *Goliath*, wurde im Versuchsjahr 2009 auf allen Lysimetern etabliert, desgleichen auf einer sie umgebenden Fläche von 50 x 50 m und den beiden begleitenden Feldversuchen auf den Herkunftsflächen der Feldlysimeter. Im weiteren Umkreis gelangt Silomais, Sorte *Gavott* auf dem 32 ha großen Feldschlag zum Anbau. Die einzelnen anbautechnischen Angaben gehen aus Tabelle 8 hervor.

Tabelle 8: Bewirtschaftung der Lysimeter 2009

	Sorghum bicolor (<i>Goliath</i>)
Aussaat	07.05.09, Saattiefe 3 bis 4cm, Reihenabstand 45 cm, Anzahl Pflanzen 25 Stck./m ²
N-Düngung	07.05.09, vor Aussaat, Mineral-N 10.6.09, BBCH 14, Mineral-N 19.6.09, BBCH 16, Gülle-N
Pflanzenschutz	Unkrautbekämpfung manuell Insektizideinsatz: 07.07.09 Karate Zeon, 75 ml/ha 13.07.09 Pirimor Gran., 250 g/ha 27.07.09 Steward, 125 g/ha
Beginn Beregnung: Ausgleich der Wasserbilanz ab..	17.07.09, BBCH 19 01.07.09, BBCH 18
Menge Zusatzwasser	165 mm
Ernte	02.10.09, BBCH 69 (69 bis 71)
Wachstumstage	147

Feldversuch

Begleitend zu den Lysimetermessungen sind für die Versuchsfrage „Unvermeidbare N-Auswaschung“ auf den Herkunftsflächen der Versuchsböden zwei Feldversuche, die ebenso wie die Lysimeter bewirtschaftet werden, angelegt, um die Bodengehalte, insbesondere den N_{min}-Gehalt für die Präzisierung der N-Düngung der Lysimetergefäße zu bestimmen. Darüber hinaus werden zwei zusätzliche Varianten mit einer höheren N-Düngermenge geprüft, um sicherzustellen, dass im Lysimeterversuch der Zielertrag erreicht wird (Tab. 9, Anlage 3).

Tabelle 9: Varianten im Feldversuch mit Sorghum bicolor 2009

Faktor				
Boden	Braunerde-Tschernosem aus Löss (Lö)	Para-Rendzina aus unterem Keuper (K)		
Düngung	mineralische Düngung nach SBA (1)	mineralisch-organische Düngung nach SBA, Anrechnung des Rindergülle-MDÄ-N (2)	mineralische Düngung nach SBA +30 % (3)	mineralisch-organische Düngung nach SBA, Anrechnung des Rindergülle-Ges-N (4)

Anlage 4 gibt Auskunft über die Bewirtschaftungsmaßnahmen im Feldversuch im Versuchsjahr 2009. Die N-Düngung der Feldversuche geht aus der Anlage 5 hervor.

Auf dem Braunerde-Tschernosem (Löss) wird auf einer Feldparzelle in zweifacher Wiederholung die Bodenfeuchte mit Hilfe der Am/Be-Neutronensonde in 20 cm-Tiefenstufen bis in 250 cm Tiefe in wöchentlichem Abstand gemessen, desgleichen in unmittelbarer Nähe auf dem umgebenden Feldschlag unter Silomais, Sorte *Gavott*. Die Aussaat von Silomais erfolgt am 25.04.09 und die Ernte am 03.09.09.

Praxisversuch Pahren

Untersuchungen zum Sorghumanbau und der Düngewirkung von Sorghum-Gärresten waren für die Jahre 2008, 2009 und 2010 in einem Praxisversuch der Pahren Agrar GmbH im Saale-Orla-Kreis (Milchvieh-Ackerbau-Verbundbetrieb), ca.12 km nördlich von Schleiz (Naturraum „Östliches Thüringer Schiefergebirge“) geplant. Die 1991 gegründete Pahren Agrar GmbH bewirtschaftet eine Fläche von 1 800 ha, davon sind 606 ha Marktfrüchte und Nachwachsende Rohstoffe. Das Unternehmen betreibt eine 340 kW el. - Biogasanlage, in welcher der Festmist der aktuell 820 Milchkühe und NAWAROs genutzt werden.

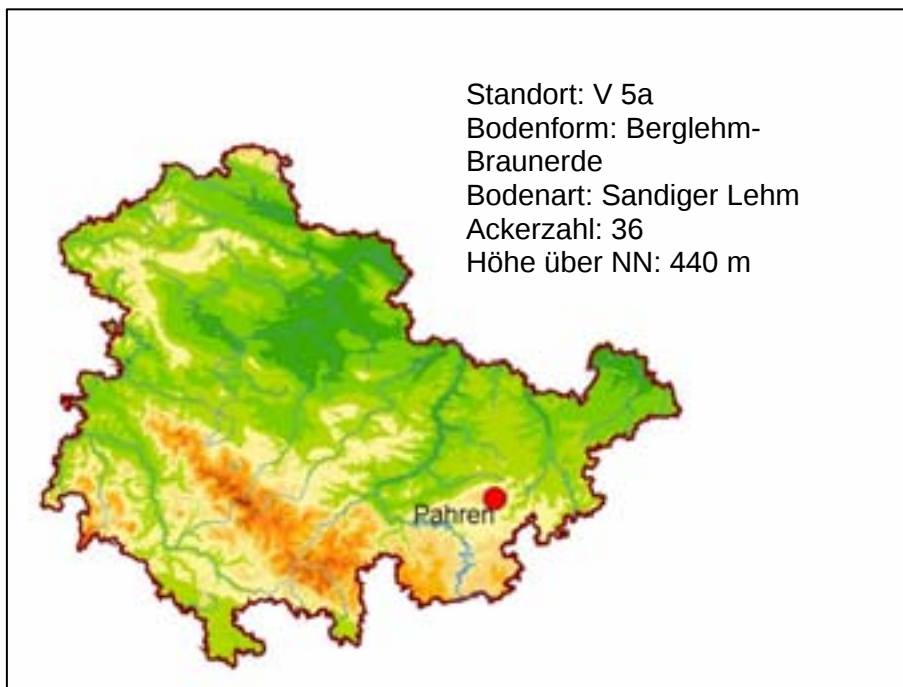


Abbildung 7: Lage des Versuchsstandortes Pahren

Für die Jahre 2008, 2009 und 2010 war ein Anbau von ca. 5 ha Sudangras oder Futterhirse auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche des Betriebes mit anschließender Silierung und Vergärung der Hirsen in der betriebseigenen Biogasanlage vereinbart. Zur Untersuchung der Düngewirkung sollte der Hirse-Gärrest auf eine landwirtschaftliche Nutzfläche ausgebracht werden. Sowohl 2008 als auch 2009 blieben die geplanten Untersuchungen zur Gärrestverwertung ohne Ergebnis, da die Bestandesetablierung nicht oder nur unzureichend gelang. Im letzten Versuchsjahr 2010 entwickelte sich ein Pflanzenbestand aus je 4 verschiedenen Futterhirse- und Sudangrassorten, je Sorte mit einem Flächenumfang von ca. 1 ha (Tab. 10).

Tabelle 10: Sortenspektrum im Praxisversuch Pahren 2010

	Sorte	Züchterhaus
Sudangras (<i>Sorghum bicolor</i> x <i>Sorghum sudanense</i>)	Lussi	Caussade Saaten
	Super Dolce 15	Caussade Saaten
	Nutri Honey	DSV
	GK Csaba	GKI, Szeged
Futterhirse (<i>Sorghum bicolor</i>)	KWS Zerberus	KWS Saat AG
	KWS Maja	KWS Saat AG
	Herkules	Saaten Union GmbH
	Rona 1	GKI, Szeged

Witterung 2010

Die Hauptvegetationszeit 2010 am Standort Pahren war gekennzeichnet durch einen kühlen (-1,6 K) und viel zu nassen (+28 mm) Mai, eine Trockenperiode im Juni (-43 mm), die bis in die dritte Julidekade anhielt und am 23.07.10 durch Starkregenereignis mit 80 mm Niederschlag beendet wurde. Auf den überdurchschnittlich warmen Juli (+3,9 K) folgte ein kühler Spätsommer mit hohen und häufigen Niederschlägen. Rekordniederschlagsaufkommen wurden im Juli (+111 mm) und August (+132 mm) verzeichnet.

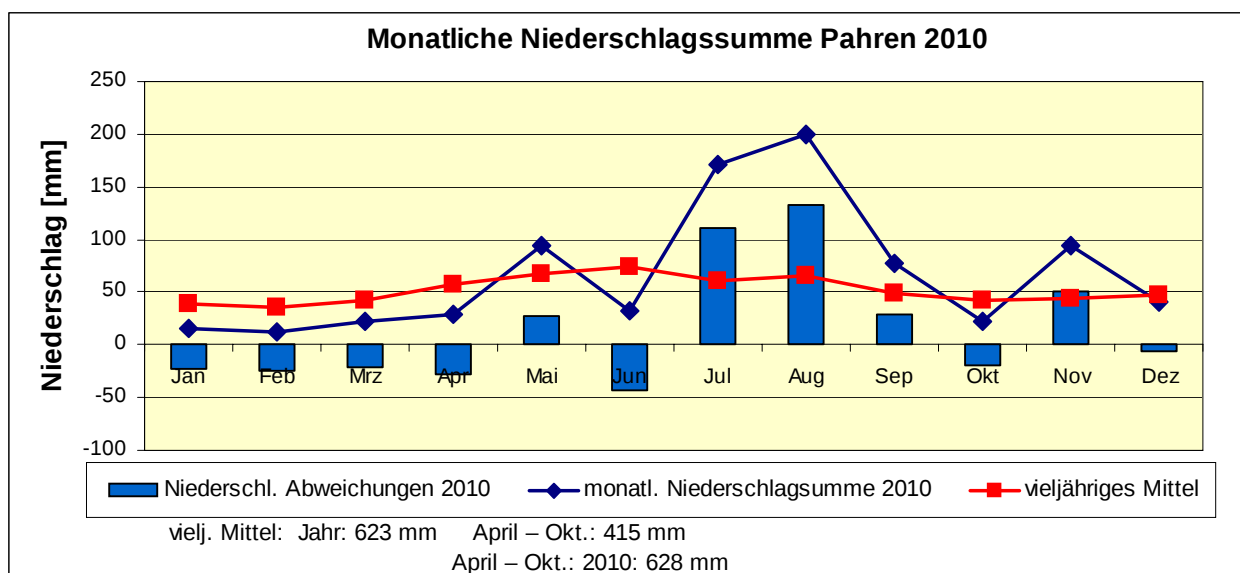
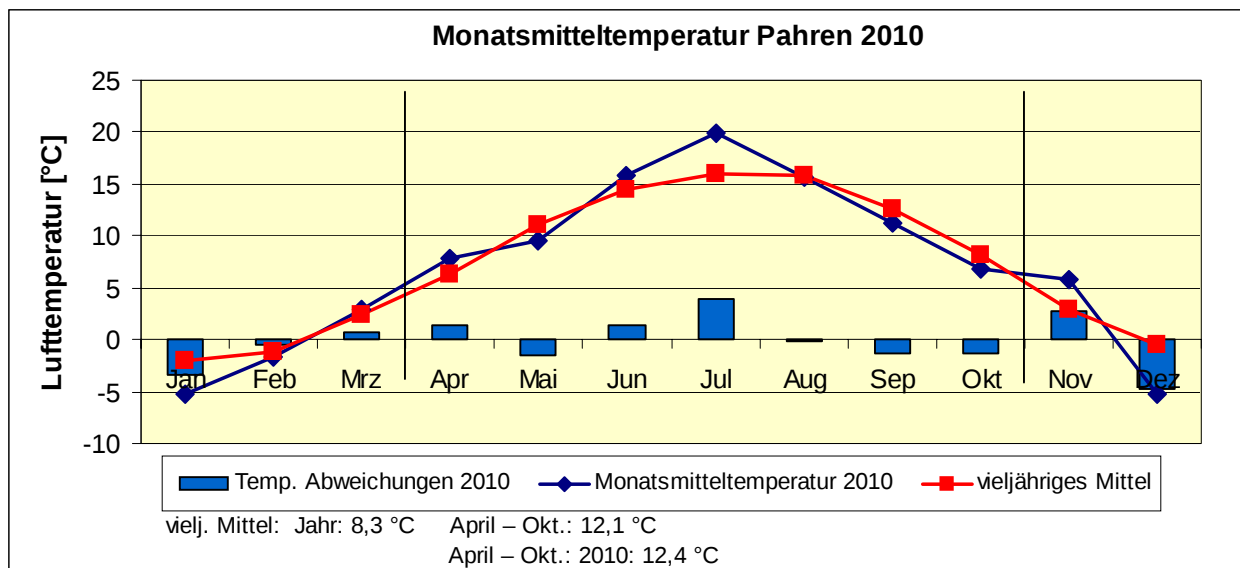


Abbildung 8: Witterung 2010 in Pahren

Die Tabelle 11 gibt einen Überblick über die wichtigsten Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Sorghumanbaufläche des Praxisversuchs im Versuchsjahr 2010. Der Betrieb bewirtschaftet seine Böden seit 1994 pfluglos.

Tabelle 11: Bewirtschaftung des Praxisversuchs Pahren 2010

Vorfrucht	Roggen, danach Zwischenfrucht Futterroggen (Ernte Frühjahr 2010)
Bodenbearbeitung	pfluglos, Scheibenegge am 08.05.10
Saatbettbereitung	17.05.10, 2 x Spatenrollegge
Aussaat	23.05.10, mit Airseeder-Technologie (Fa. Horsch) (Breitbandsaat als Mulchsaat, ca. 25 cm breites Saatband) 40 Kö/m ² bei Sudangras, 25 Kö/m ² bei Futterhirse
Düngung	05.05.10, 150 dt/ha Rindermist; 17.05.10, 18 kg N/ha + 46 kg P/ha 18.05.10, 30 kg N/ha Alzon + 6 kg/ha S
Pflanzenschutz	17.6.09, Gardo Gold, 3 l/ha + Certrol B, 1 l/ha
Ernte	02.11.10, Maishäcksler
Wachstumstage	163

2.1.2 Ergebnisse

2.1.2.1 Modellversuch mit Kleinlysimetern

Phänologie

2008

Im ersten Versuchsjahr konnten die beiden Kulturen aufgrund der Voranzucht in Töpfen und der späteren Umpflanzung in die Kleinlysimeterbehälter ihr Biomassebildungspotenzial nicht voll ausschöpfen. Die zur Ernte erreichten mittleren Bestandeshöhen von 185 cm beim Energiemais und 180 cm bei Sorghum bicolor waren beim Mais knapp 80 cm und bei Sorghum bicolor 115 cm geringer als der Durchschnitt der Folgejahre (Anlage 3). Der Eintritt in die generative Phase und die damit verbundene Reduzierung des Längenwachstums begann bei Mais ab dem 23.07., Sorghum bicolor begann ab 11.08. mit dem Rispenziehen, setzte das Längenwachstum aber bis zur Ernte fort.

2009

Der am 22.04.09 gelegte Mais ging auf dem Löss nach 12 Tagen auf, auf dem Sand etwa 2 Tage später. Bei der am 14.05.09 ausgesäten Hirse war der Aufgang auf beiden Böden aufgrund höherer Temperaturen bereits nach sieben Tagen zu verzeichnen. Kühle Temperaturen in den beiden ersten Junidekaden mit Tagesmitteltemperaturen von zum Teil unter 10 °C führten zu einer verzögerten Jungpflanzenentwicklung. Erst ab Mitte Juli (BBCH 32) setzte eine deutliche Halmstreckung ein (BBCH 32). In der Abbildung 7 ist der Verlauf des Längenwachstums der beiden Kulturen in Abhängigkeit von Boden und Wasserstufe detailliert dargestellt. Der Mais behielt seinen Wachstumsvorsprung gegenüber der Hirse bis Anfang August bei. Das maximale Längenwachstum wurde Mitte Juli mit einer wöchentlichen Zunahme von 79 cm auf dem Löss (BBCH 51-65) und 93 cm auf dem Sand (BBCH 63) erreicht. Danach stagnierte mit Eintritt in das generative Stadium die Wuchshöhenzunahme. Das maximale Längenwachstum bei Sorghum bicolor erstreckte sich über eine deutlich längere Zeitspanne von Mitte Juli bis Ende August. Auf dem Löss wurde ein maximales wöchentliches Längenwachstum von 40 cm, auf dem Sand von 30 cm bonitiert. Im Unterschied zum Mais setzte Sorghum bic. ihr Längenwachstum bis zur Ernte aber noch weiter fort (Abb. 9).

2010

Der am 26.04.10 gelegte Mais benötigte aufgrund der deutlich zu kühlen Temperaturen in den ersten beiden Maidekaden (-2,5 °C in Buttstedt im Vgl. zum vielj. Mittel) fast drei Wochen zum Auflaufen. Er trat zu Beginn der 3. Junidekade in das Stadium der Halmstreckung ein und damit setzte ein rapides Längenwachstum ein, welches sich bis zum Übergang in die generative Phase Anfang August fortsetzte. Auf beiden Böden wurden ab 06.07. maximale wöchentliche Wuchshöhenzunahmen von über 60 cm ermittelt, kurz vor Eintritt in das Stadium des Rispenziehens. Die einen Monat nach dem Mais ausgesäte Hirse war nach 14 Tagen aufgelaufen und trat in der 1. Julidekade in die Phase der Halmstreckung ein. Ab Mitte Juli wurden maximale wöchentliche Wachstumsraten erreicht, auf dem Löss mit 63 cm bei 1,0 PET und 49 cm bei 0,2 PET und auf dem Sandboden mit 45 cm bei 1,0 PET und 30 cm bei 0,2 PET. Die kühlen August- und Septembertemperaturen verzögerten die Abreife, so dass der Eintritt in die generative Phase erst Mitte September einsetzte. Die Anlage 6 informiert über den Wachstumsverlauf der beiden Kulturen in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung im Versuchsjahr 2010. Anlage 7 dokumentiert die unterschiedliche Wuchshöhenentwicklung fotografisch.

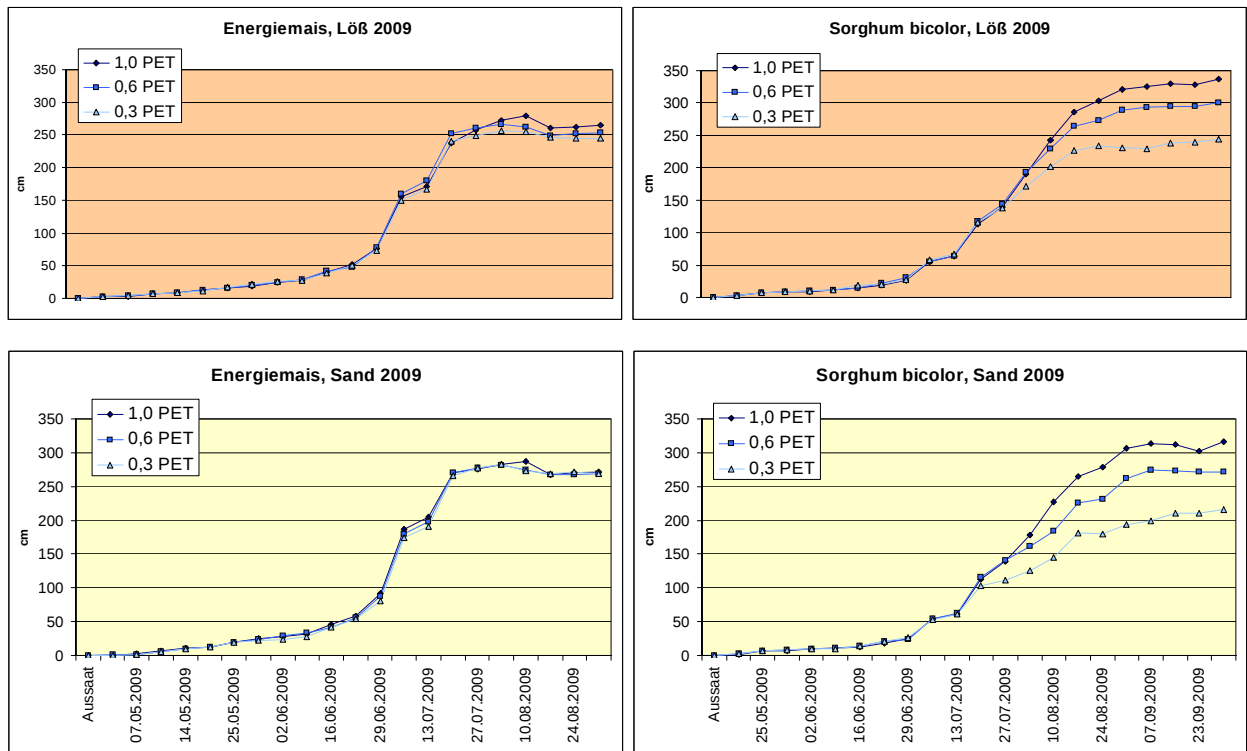


Abbildung 9: Wachstumsverlauf der beiden Kulturen in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung im Versuchsjahr 2009 (Mittel aus 4 Wdh.)

Ebenso wie beim Faktor Boden zeigten sich bezüglich des Längenwachstums beim Mais auch hinsichtlich der verschiedenen Wasserversorgungsstufen nur geringe Unterschiede. Sorghum bicolor reagierte auf die gestaffelte Wasserversorgung deutlich stärker. Auf dem Sandboden zeigten sich Wachstumsverzögerungen zwei Wochen nach Beginn der Differenzierung der Wassergaben, auf dem Löss nach drei Wochen. Die Wachstumsdepression fiel erwartungsgemäß zuerst bei 0,3/0,2 PET auf. Hier kam es auch zu Verzögerungen in der Abreife. Das größte Längenwachstum aller Varianten erreichte Sorghum bicolor bei 1,0 PET auf Löss mit durchschnittlich 350 cm, am geringsten fielen die Wuchshöhen auf Sand bei 0,3/0,2 PET aus (217 cm), hier waren sie kleiner als in dieser Maisvariante (Abb. 10).

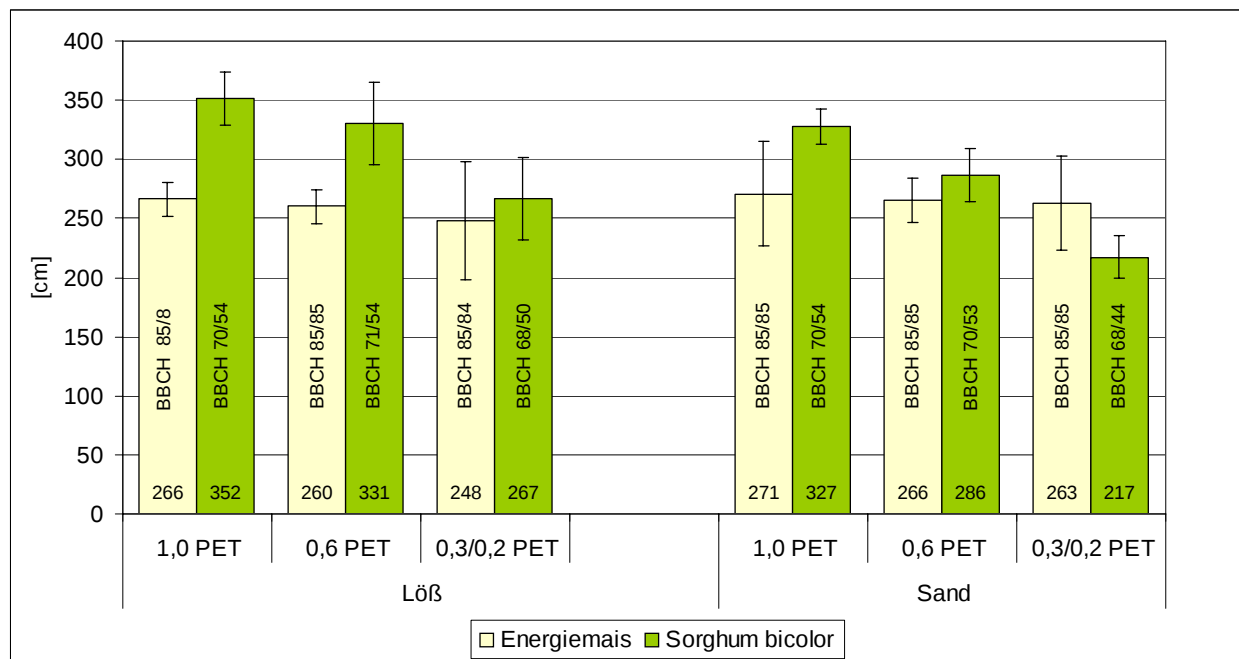


Abbildung 10: Bestandeshöhen (Jahresmittel 2009/10) u. BBCH-Stadien 2009/10 von Energiemais u. Sorghum bicolor zur Ernte im Modellversuch in Abhängigkeit von Boden u. Wasserversorgung

Die im Verlauf der Vegetationsperioden 2009 und 2010 erfassten morphologischen und phänologischen Merkmale sind in der Anlage 8 näher erläutert.

Erträge und Trockensubstanzgehalt

Das Ertragsniveau differierte zwischen den einzelnen Versuchsjahren, jedoch zeigten die Ertragsrelationen zwischen den Prüfgliedern in allen 3 Jahren vergleichbare Abstufungen. Das im Vergleich zu den beiden Folgejahren deutlich geringere Ertragsniveau des ersten Versuchsjahres 2008 resultierte aus den suboptimalen Aussaatbedingungen (Voranzucht in Töpfen). Der Mais erreichte im Mittel der Varianten 150 dt/ha, Sorghum bicolor 172 dt/ha.

Im 2. Versuchsjahr 2009 lag das Ertragsniveau beider Fruchtarten auf den Kleinlysimetern deutlich höher als im Vorjahr (+37 % bei Mais; +46 % bei Sorghum bicolor). Die zur Verfügung stehende Vegetationszeit war mit 133 Tagen beim Mais und 139 Tagen bei der Hirse eine Woche länger als im Vorjahr. Im letzten Versuchsjahr 2010 erzielte der Mais im Mittel der Varianten in etwa den Durchschnittsertrag des Vorjahres, die Erträge von Sorghum bicolor waren ca. 15 % geringer als im Vorjahr, geschuldet den kühlen Spätsommertemperaturen. Die Vegetationsdauer war dementsprechend 10 Tage länger als 2009. Im Vergleich beider Kulturen erzielte im Mittel der Varianten und Jahre Sorghum bicolor einen um 50 dt/ha höheren Trockenmasseertrag als Energiemais. Im Ertragsniveau zeigten sich vor allem bei der Hirse deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung (Abb. 11, Einzeldarstellungen der 3 Versuchsjahre in der Anlage 9).

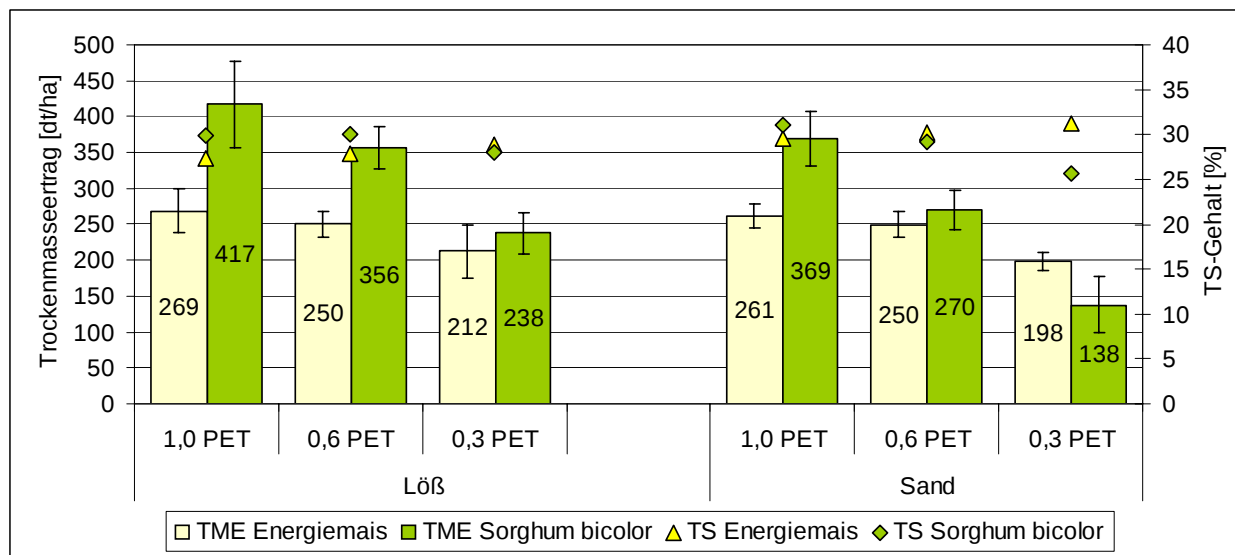


Abbildung 11: Trockenmasseertrag von Energiemais und Sorghum bicolor im Modellversuch (Jahresmittel 2009/10) in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung

Energiemais erreichte im Mittel der Jahre 2009 und 2010 unabhängig von der Zusatzwasserversorgung auf beiden Böden ähnliche Erträge. In der 0,6 PET-Variante waren die Erträge fast ebenso hoch wie unter potenzieller Wasserversorgung, das Ertragsniveau der trockenen 0,3/0,2 PET-Variante lag auf dem Löss um 21 % und auf dem Sand um 24 % niedriger als bei 100 % Ausgleich der Wasserbilanz. Die Ertragsüberlegenheit von Sorghum bicolor kam vor allem auf dem Lössboden zum Tragen. Unter potenziellen Verdunstungsbedingungen war die Trockenmassebildung der Hirse der des Maises auf beiden Böden signifikant überlegen. Auf dem Löss erreicht Sorghum bicolor einen Ertrag von 417 dt/ha und somit einen Mehrertrag gegenüber dem Mais von 148 dt/ha, auf dem Sand einen Mehrertrag von 108 dt/ha. Die Ertragsbildung bei optimaler Wasserversorgung (1,0 PET) sollte unabhängig vom Standort sein. Der trotzdem auf dem Sandboden geringere Trockenmasseertrag kann auf eine nicht ausreichende Nährstoffversorgung von Sorghum bicolor zurückgeführt werden, denn auf dem Sandboden ist der Kalium-Entzug deutlich geringer als auf dem Lössboden (vgl. Tabelle x, Abschnitt Nährstoffgehalte).

Bei Sorghum bicolor geht das Ertragsniveau mit zunehmender Trockenheit deutlich stärker zurück als bei Mais. Auf Löss liegt der Hirseertrag bei 0,3/0,2 PET mit 238 dt/ha nur noch um

10 % höher als beim Mais, auf dem Sandboden fällt der Ertrag mit 138 dt/ha bei sinkendem Wasserangebot unter dem von Mais (-30 %).

Die Trockensubstanzgehalte beider Kulturen bewegten sich zur Ernte mit Werten um 30 % in einem für den Silier- und Gärprozess günstigen Bereich. Nur im letzten Versuchsjahr waren die Gehalte aufgrund der Abreifeverzögerung durch die kühlen Spätsommertemperaturen geringer (25 bis 29 %). Beim Energiemais nahm die Trockensubstanzeinlagerung mit sinkender Wasserversorgung um ca. 4 % zu, bei Sorghum bicolor war die Tendenz gegenläufig. Hier werden bei 0,3/0,2 PET die geringsten TS-Gehalte erreicht. Ursache dafür ist das zur Ernte pflanzenphysiologisch jüngere Entwicklungsstadium der unter trockenen Bedingungen gewachsenen Sorghumpflanzen.

Bodenwasserausschöpfung

2008

Zu Versuchsbeginn verfügten beide Böden nur über einen Teil des pflanzenverfügbaren Bodenwassers (Anlage 10 bis 13). Der Löss wies unter Sorghum einen Anfangswassergehalt von 50 bis 80 % nFK und unter Mais von 80 bis 100 % nFK. Der Wasservorrat des Sandbodens war zu 70 bis 100 % nFK (Sand, Typ 1) bzw. 30 bis 40 % nFK (Sand über Lehm, Typ 2) aufgefüllt, die volumetrischen Bodenwassergehalte lagen aber in der gleichen Größenordnung. Beide Kulturen nahmen das pflanzenverfügbare Bodenwasser auf Sand und Löss in allen Wasserstufen fast vollständig auf. In der untersten Bodenschicht 80 bis 120 cm schöpfte Sorghum bicolor das Bodenwasser bis zum ÄWP aus, während Mais noch einen Restwassergehalt von 10 bis 40 % nFK hinterließ (Anlagen 10 bis 13). Der Bodenwasserentzug der beiden Kulturen hing wesentlich vom Anfangswassergehalt ab.

2009

Zu Vegetationsbeginn wies der Löss nach Vorfrucht Mais Feldkapazität auf, nach Vorfrucht Sorghum in den reduzierten Wasserstufen etwa 90 % nFK (Anlage 14 und 15). Der Sand erreichte nach Vorfrucht Mais Feldkapazität (Sand, Typ 1) bzw. 70 bis 90 % der nFK (Sand über Tieflehm, Typ 2) mit etwas höheren volumetrischen Wassergehalten im Sand über Tieflehm. Nach Vorfrucht Sorghum fiel der Anfangswassergehalt durchweg niedriger aus. Sand, Typ 1 enthielt 6 bis 12 Vol. %, resp 70 % nFK und Sand über Tieflehm 7 bis 21 Vol. %, resp. 40 bis 50 % nFK (Anlage 16 und 17).

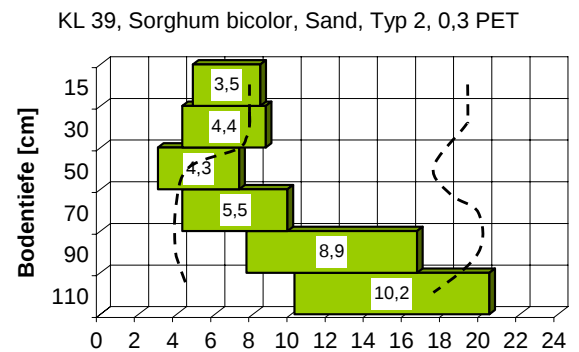
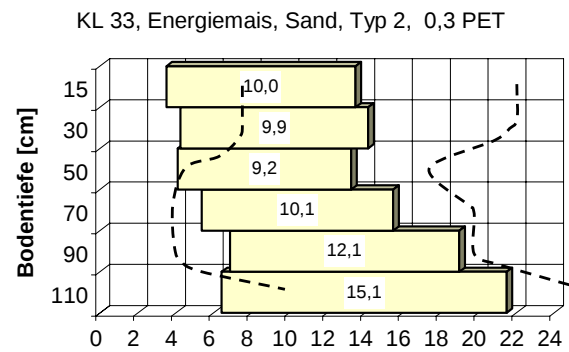
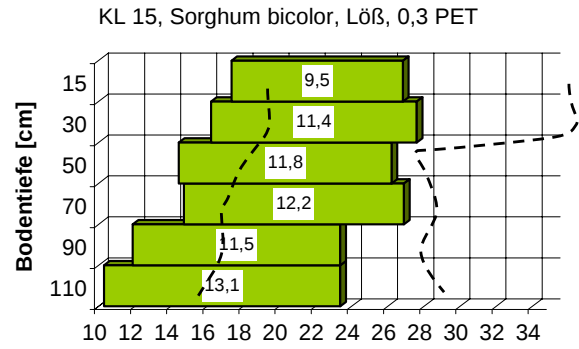
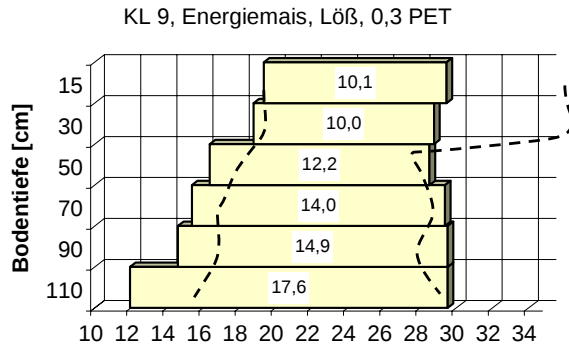
Löss

Beide Kulturen nahmen den Bodenwasserspeicher in der Wasserstufe 1,0 PET kaum in Anspruch, entsprechend einer bedarfsorientierten Wasserversorgung (Anlage 14 und 15).. In der 0,6 PET-Wasserstufe verminderte Mais den Bodenwasservorrat in 0 bis 120 cm Tiefe auf etwa 30 % nFK und entleerte Sorghum den pflanzenverfügbaren Anteil vollständig. In der 0,3 PET-Wasserstufe schöpfte Mais das gesamte pflanzenverfügbare Wasser aus und senkte Sorghum den Bodenwassergehalt unter den ÄWP (Abb. 12). Der Bodenwasserentzug zeigte eine deutliche Abhängigkeit von der Wassersteuerung und war unter Sorghum etwas höher.

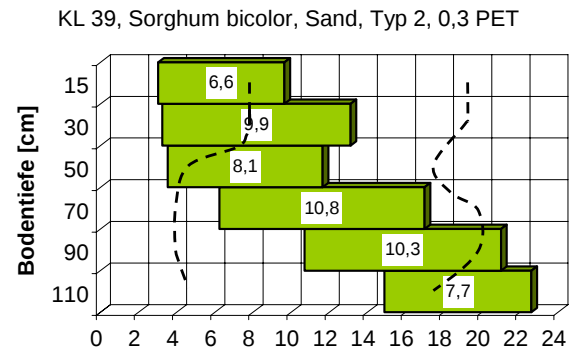
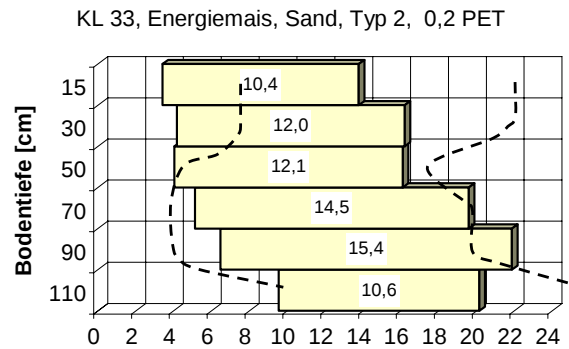
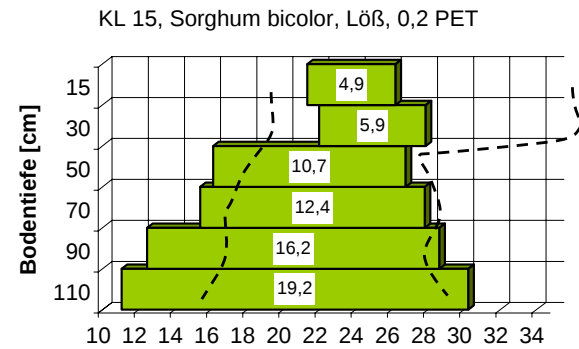
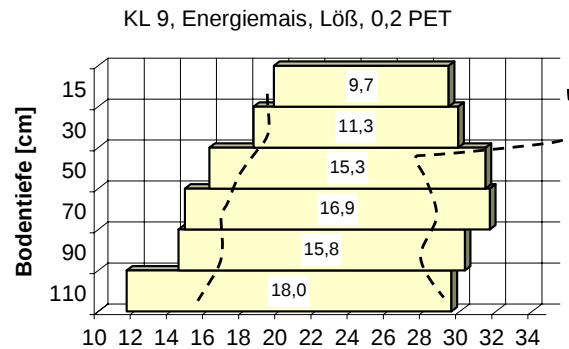
Sand

In der Wasserstufe 1,0 PET blieb der Bodenwassergehalt unter beiden Kulturen im Bereich von Feldkapazität. Eine Wassersteuerung auf 0,6 PET führte unter beiden Kulturen zu einer Bodenwasserausschöpfung auf etwa 30 % nFK (Anlage 16 und 17). In der Wasserstufe 0,3 PET wurde das Bodenwasser bis in 80 cm Tiefe durch beider Kulturen bis zum ÄWP ausgeschöpft, darunter bis in 120 cm Tiefe blieb unter Sorghum ein Restwassergehalt von 30 bis 40 % nFK (Abb. 12), anders als im Vorjahr mit einer am Wasserbedarf von Mais ausgerichteten Wasserversorgung. Vermutlich haben die im Sandboden vorkommenden Ortssteinlagen (Fe-Konkretionen) das Wurzelwachstum begrenzt. Der im Vergleich zu Mais geringere Bodenwasserentzug unter Sorghum war die Folge deutlich unter der FK liegender Anfangswassergehalte.

2009



2010



Bodenwassergehalt [Vol%]

Bodenwassergehalt [Vol%]

Abbildung 12: Bodenwasserausschöpfung durch Energiemais und Sorghum bicolor auf Löss und Sand bei Wasserversorgung 0,3/0,2 PET ausgewählter Kleinlysimeter (KL)
Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar. Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Löss... ÄWP abgeleitet aus Neutronensondennmessung und FK pF 2,5 eines Bodenprofils neben den KL, Sand...ÄWP pF 4,2 und FK pF 2,0).

2010

Zu Versuchsbeginn erreichten beide Böden Feldkapazität, sowohl nach Vorfrucht Mais als auch nach Sorghum (Anlagen 18 bis 21). Aufgrund ergiebiger Niederschläge gelang es bei einigen KL nicht bis zum Einsetzen der Hauptwachstumsperiode das Sickerwasser vollständig abzuleiten. Der Anfangswassergehalt der Sandböden vom Typ 1 (reiner Sand) lag unter Mais deutlich über Feldkapazität und unterschied sich volumetrisch kaum vom Typ 2 (Sand über Lehm). Unter Sorghum wiesen die Sandböden (reiner Sand, Sand über Lehm) Feldkapazität auf und stand im Vergleich zu denen unter Mais weniger pflanzenverfügbares Wasser zur Verfügung (Anlage 20 und 21).

Löss

In der Wasserstufe 1,0 PET senkte Mais den Bodenwasservorrat auf etwa 80 % nFK und nahm Sorghum kaum Bodenwasser auf. Unter einer Wassersteuerung auf 0,6 PET entleerte Mais das Bodenwasser bis in 80 cm vollständig und Sorghum bis in 120 cm Tiefe, wie in den beiden Jahren zuvor (Anlage 18 und 19). Eine Steuerung auf 0,2 PET führte bei beiden Kulturen zu einer Bodenwasseraufnahme unter den ÄWP in der gesamten Bodensäule (Abb. 12).

Sand

Beide Kulturen verminderten den Bodenwassergehalt in der Wasserstufe 1,0 PET auf 100 % nFK (Sand mit mehr als FK zu Vegetationsbeginn) bzw. 50 % nFK (Sand über Lehm) (Anlage 20 und 21). In der Wasserstufe 0,6 PET schöpften Mais das Bodenwasser bis in 80 cm Tiefe und Sorghum bis in 120 cm Tiefe vollständig aus. Unter einer Wassersteuerung auf 0,2 PET nahm Mais das gesamte pflanzenverfügbare Bodenwasser bis in 120 cm Tiefe auf, Sorghum aber nur bis in 80 cm Tiefe, darunter blieb ein Restwassergehalt von 40 bis 50 % nFK zurück (Abb. 12). Wie im Jahr zuvor wird vermutet, dass dafür von der Wurzel kaum durchdringbare Lagen aus Fe-Konkretionen verantwortlich sind. Der im Vergleich zu Mais geringere Bodenfeuchteentzug durch Sorghum war wie im Jahr 2010 die Folge geringerer Anfangswassergehalte. Bei den mit Mais bewachsenen KL Sand stand zusätzlich ein Teil des Sickerwassers, das nicht rechtzeitig abgeführt werden konnte für die pflanzliche Wasserversorgung zur Verfügung.

Der Bodenwasserentzug der KL wird benötigt für die Bestimmung des Wasserverbrauches von Mais und Sorghum in Abhängigkeit von der Höhe der Zusatzwasserversorgung. Beide Kulturen nehmen in der trockensten Versorgungsstufe fast das gesamte pflanzenverfügbare Bodenwasser der 120 bzw. 130 cm-Bodensäule aber auf. Das Potenzial der Pflanzen zur Aufnahme von Bodenwasser zeigen die Kleinlysimeter nicht. Dafür sind die Tiefe und auch die Oberfläche nicht ausreichend. Diese Eigenschaft wird im Jahr 2009 mit Hilfe der Feldlysimeter ermittelt.

Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch ergibt sich aus Niederschlag während der Jungpflanzenentwicklung, plus Zusatzwasser während der Hauptwachstumsperiode plus Aufnahme von Bodenwassers (Abb. 13).

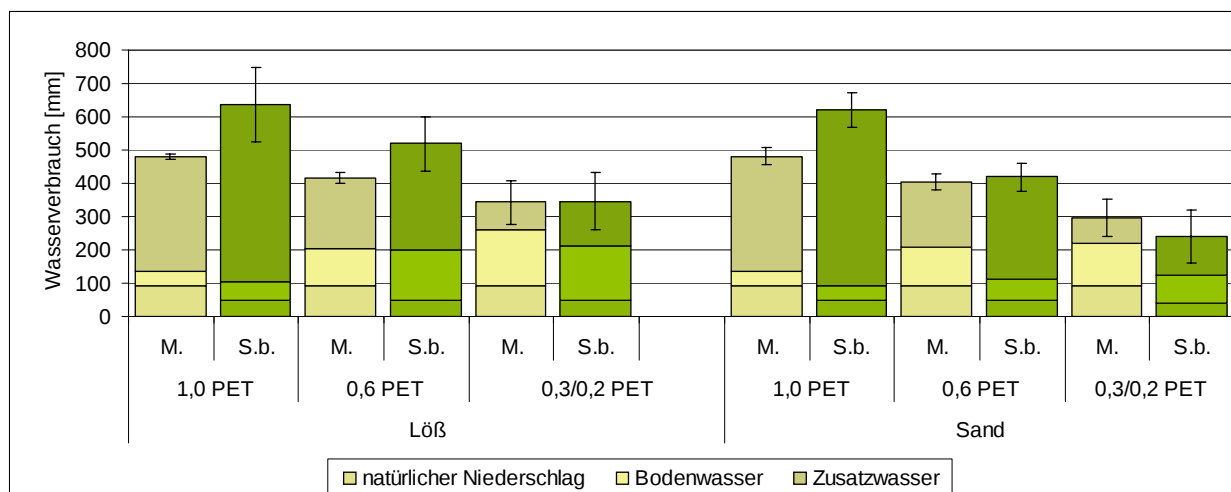


Abbildung 13: Wasserverbrauch von Energiemais (M.) und Sorghum bicolor (S. b.) im Modellversuch (Jahresmittel 2009/10) in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung

Beide Kulturen wurden während ihrer Hauptwachstumsperiode in der 1,0 PET-Wasserstufe entsprechend ihres Wasserbedarfes versorgt und verbrauchten dem entsprechend unterschiedlich viel Wasser. Die Wasserbereitstellung der Böden hatte darauf keinen Einfluss. In den reduzierten Wasserstufen versuchten beide Pflanzen, ihren Wasserbedarf durch Aufnahme von Bodenwasser zu decken. Das Bodenwasser reichte aber nicht aus um potenzielle Verdunstungsbedingungen aufrechtzuerhalten. Aufgrund geringerer Anfangswassergehalte des Sandbodens unter Sorghum im Vergleich zu Mais in beiden Jahren entstand für Sorghum gemessen am Wasserbedarf in der gleichen Wasserstufe ein größerer Trockenstress als für Mais. Das zeigt sich vor allem in der 0,3 bzw. 0,2 PET-Stufe auf dem Sandboden, in der Mais und Sorghum die gleiche Wassermenge aus Zusatzwasser und Bodenwasser zur Verfügung stand. Die Darstellung des Wasserverbrauchs in den einzelnen Versuchsjahren findet sich in der Anlage 22.

Wassernutzungseffizienz und Wasser-Ertrags-Beziehung

Als Maß für die Wassernutzungseffizienz (WUE) wird der Transpirationskoeffizient berechnet. Der Transpirationskoeffizient ist definiert als kg Wasserverbrauch je kg Pflanzen-Trockenmasse (HELLRIEGEL, 1983). Abbildung 14 stellt das Jahresmittel 2009/10 des Transpirationskoeffizienten (TK) von Mais und Sorghum bicolor in Abhängigkeit von der Wasserversorgung auf den beiden Böden dar. Eine Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Versuchsjahre findet sich in der Anlage 23.

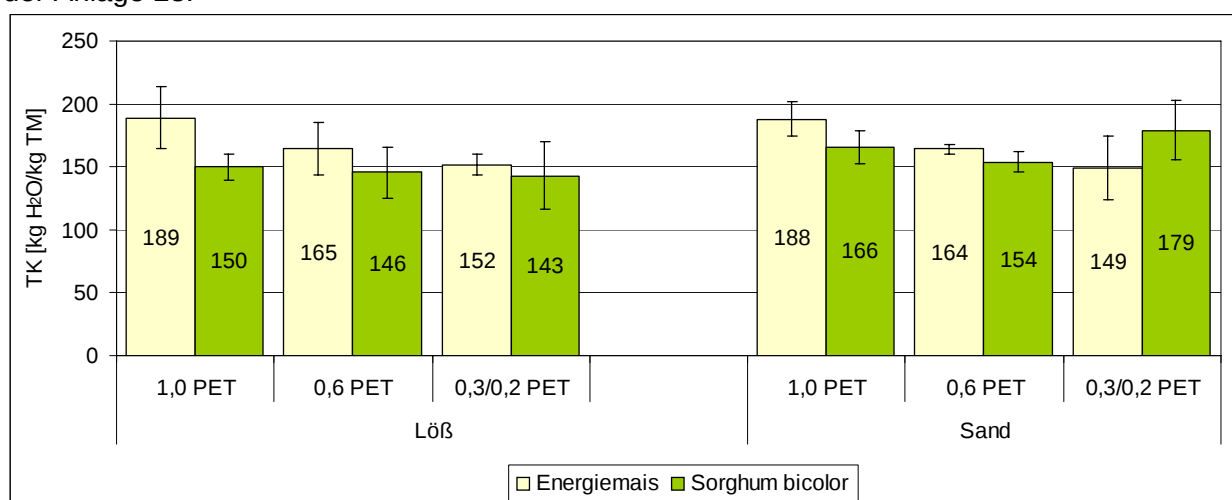


Abbildung 14: Transpirationskoeffizient (TK) von Energiemais und Sorghum bicolor im Modellversuch (Jahresmittel 2009/2010) in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung

Unter potenziellen Verdunstungsbedingungen (1,0 PET) fiel der TK von Sorghum bicolor auf

beiden Böden günstiger aus als beim Energiemais. Mit abnehmendem Wasserangebot ging diese Vorzüglichkeit von Sorghum bic. gegenüber Energiemais zurück. Ab der Versorgungsstufe 0,3/0,2 PET stieg der TK von Sorghum bic. auf dem Sandboden über den Wert von Energiemais. Der TK von Energiemais fiel am günstigsten in der 0,3 PET-Variante auf dem Lössboden aus. Ursachen dafür können biochemische Anpassungsreaktionen der Pflanze an Trockenstress während der Jugendphase sein, aufgrund dessen die Wassernutzungseffizienz während der Hauptwachstumsperiode verbessert wurde oder geringere unproduktive Verluste über Evaporation aufgrund geringerer Zusatzwassermengen. Der TK von Sorghum bic. war auf dem Lössboden günstiger als auf dem Sand.

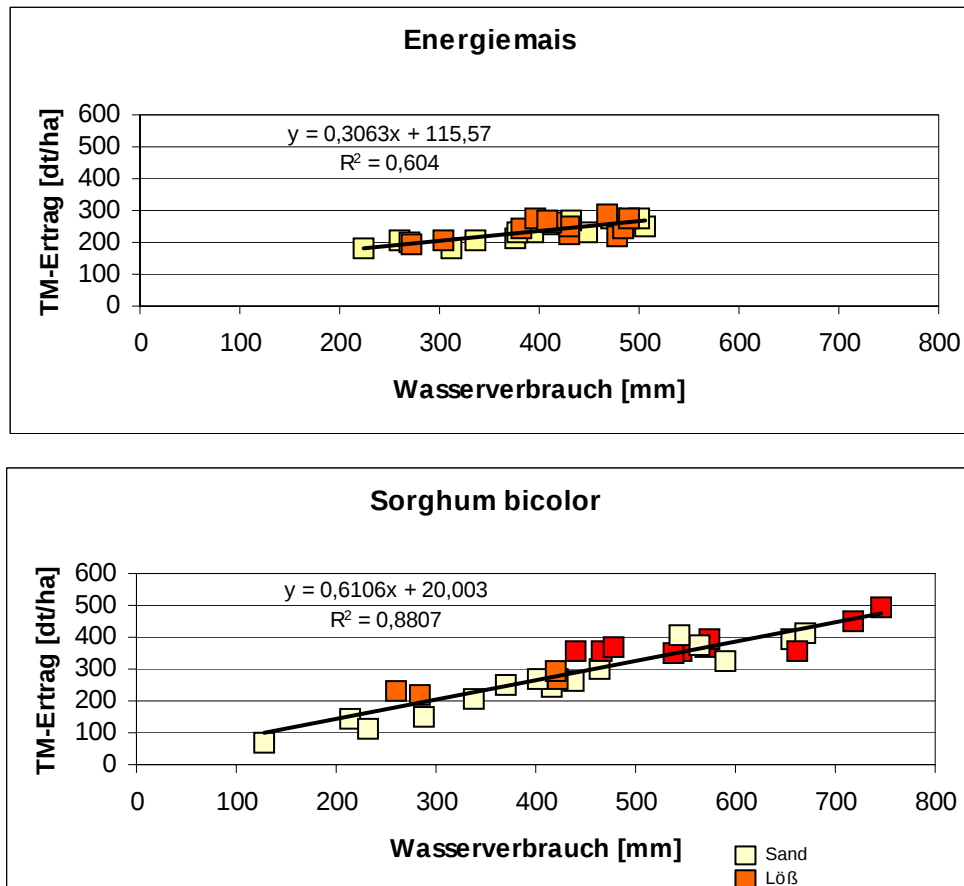


Abbildung 15: Wasser-Ertrags-Beziehungen der beiden Kulturen (2009/10)

Die Unterschiede in der Effizienz der Wassernutzung konnten durch die Bestimmung der Wasser-Ertrags-Beziehung verdeutlicht werden. Der Ertrag nahm bei beiden Kulturen proportional zum Wasserverbrauch zu, wobei Sorghum bicolor besser in der Lage war das angebotene Wasser in Biomasse umzusetzen. Bei geringer Wasserversorgung setzte jedoch der Mais besonders auf dem Sandboden das Wasser effizienter zur Ertragsbildung ein. Die Wasserverfügbarkeit, die sich aus Bodenwasserbereitstellung und den Niederschlägen in der Vegetationszeit ergibt, begrenzt die Erträge. Ob das Ertragspotenzial von Sorghum in der Praxis ausgeschöpft werden kann, hängt entscheidend von der Wasserbereitstellung ab.

N-Salden

Da der N-Saldo eine bedeutsame Größe zur Bewertung der Gewässerträglichkeit einer Kultur ist, werden im Folgenden die N-Parameter genauer beleuchtet. Der Energiemais wies im Mittel 2009/10 mit 1,0 % N in der Trockenmasse höhere N-Gehalte auf als Sorghum bicolor mit 0,8 %. Je besser die Wasserversorgung war, desto geringer fiel der N-Gehalt von Sorghum bicolor aus, vermutlich aufgrund eines Verdünnungseffektes. Die höheren N-Gehalte des Maises führten im Mittel der Jahre zu einem 10 % höheren N-Entzug im Vergleich zur Hirse. Die N-Entzüge waren bei beiden Kulturen auf dem Lössboden höher.

Tabelle 12: N-Entzüge durch das Ernteprodukt in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung 2009 und 2010

Kultur	Boden	Wasserstufe	Gesamt-N (%)		Ertrag(dt TM/ha)		N-Entzug (kg/ha)	
			2009	2010	2009	2010	2009	2010
Energie-mais	Löss	1,0 PET	1,16	0,85	254,1	283,2	294,1	239,8
		0,6 PET	1,17	0,92	242,5	257,9	283,7	237,4
		0,3 PET	1,23	1,14	232,7	168,3	286,3	186,8
	Sand	1,0 PET	1,01	0,77	253,7	270,9	255,0	209,3
		0,6 PET	1,04	0,84	254,6	245,1	263,5	205,6
		0,3/0,2 PET	1,13	1,04	199,9	196,4	226,4	204,1
Sorghum bicolor	Löss	1,0 PET	0,48	0,70	457,9	375,7	220,9	260,4
		0,6 PET	0,61	0,69	368,9	344,0	223,2	235,5
		3,0 PET	0,87	0,88	258,6	216,9	223,7	189,4
	Sand	1,0 PET	0,59	0,66	396,6	341,9	232,0	225,8
		0,6 PET	0,77	0,79	276,6	263,9	213,0	207,9
		3,0 PET	1,22	1,34	162,2	114,2	197,1	146,7

Die anhand der Zufuhr an Dünger-N zu Vegetationsbeginn und dem N-Entzug durch das Erntegut ermittelten N-Salden der einzelnen Versuchsjahre sind in der Anlage 1 dargestellt. Die schematische Darstellung der Jahresmittel 2008 bis 2010 findet sich in der Anlage 24.

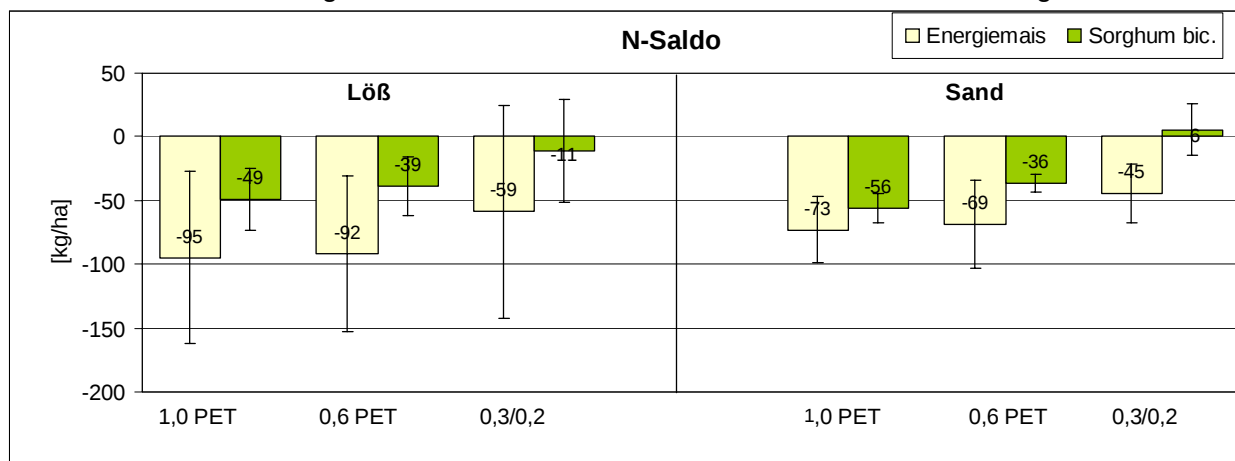


Abbildung 16: N-Salden von Mais und Sorghum bicolor auf den beiden Böden in Abhängigkeit von den Wasserstufen (Mittel 2008 bis 2010)

Unter dem Einfluss empfehlungskonformer N-Düngung mit fast gleich hohen N-Sollwerten (200 bzw. 220 kg/ha für Energiemais, 200 bzw. 230 kg/ha für Sorghum) fielen die N-Salden mit Ausnahme der geringsten Wasserversorgungsstufe von Sorghum bicolor auf dem Sand durchweg negativ aus. Die stärker negativen N-Salden unter Energiemais im Vergleich zu Sorghum bicolor sind im Zusammenhang mit dem höheren N-Entzug von Energiemais und dem höheren $N_{\min}$ -Gehalt des Bodens im Frühjahr (Anlage 1), der eine geringere N-Düngermenge nach sich zog zu sehen. Es zeigt sich in beiden Fällen, dass empfehlungskonforme N-Düngung mit negativen N-Salden zu einer Minderung der N-Verlagerung aus der Wurzelzone beitragen kann.

Sickerwassermengen und N- Austrag

Anhand der wöchentlichen Beprobung in der Sickerwasserperiode ließ sich der zeitliche und mengenmäßige Verlauf des Sickerwasseranfalls und der Nitrat-N-Auswaschung aufzeigen. In den Sandlysimetern fielen in den Sickerwasserperioden mit durchschnittlich (88 mm) 25 % mehr Sickerwasser als in den Lösslysimetern (65 mm) an. In den Lösslysimetern war die mittlere Sickerwassermenge unter Mais im Mittel der Jahre um 30 % höher als unter Sorghum bicolor, entsprechend dem stärkeren Bodenwasserentzug durch Sorghum bicolor. In den Sandlysimetern war hingegen die Menge unter Sorghum bicolor um 14 % höher als unter Energiemais.

Tabelle 13: Sickerwassermengen der Löss- und Sandlysimeter im Verlauf der Sickerwasserperiode (dar. 2010/11 bis 31.7.2011, Sickerwasserbildung noch nicht vollständig abgeschlossen)

Boden	Wasser- stufe	2008/09		2009/10		2010/11	
		Energiemais	Sorghum bic.	Energiemais	Sorghum bic.	Energiemais	Sorghum bic.
mm							
Löss	1,0 PET	83	51	108	47	71	54
	0,6 PET	85	72	122	84	33	27
	0,3 PET	68	71	80	56	30	21
	Ø	79	65	104	62	45	34
Sand	1,0 PET	97	117	113	148	79	99
	0,6 PET	98	120	82	90	43	68
	0,3 PET	117	112	69	61	33	34
	Ø	104	116	88	100	52	67

Im Verlauf der Sickerwasserperiode traten erhebliche Schwankungen auf, während des Winterhalbjahres begann die Sickerwasserbildung auf den Sandlysimetern eher, die höchsten Sickerwassermengen wurden im Mittel der Jahre im Mai gewonnen. Die größeren Sickerwassermengen und die kürzere Verweildauer im Sandboden belegen seine niedrigere Wasserspeicherefähigkeit und hohe Wasserdurchlässigkeit. Der höhere Sickerwasseranfall in den Sandlysimetern ging erwartungsgemäß mit einer höheren mittleren Nitratkonzentration einher (Tab. 14).

Sie beträgt im Mittel der Sickerwasserperioden knapp 80 mg/l und war um 40 % höher als die der Lössböden mit 47 mg/l, beide Böden zeigten eine beträchtliche Streuung der Werte zwischen den einzelnen Kleinlysimetern und innerhalb des Untersuchungszeitraumes.

Tabelle 14: Mittlere Nitratkonzentration des Sickerwassers in den Sickerwasserperioden

Boden	Wasser- stufe	2008/09		2009/10		2010/100	
		Energiemais	Sorghum bic.	Energiemais	Sorghum bic.	Energiemais	Sorghum bic.
mg/l							
Löss	1,0 PET	76,2	20,3	41,9	3,8	2,9	2,7
	0,6 PET	104,7	20,7	77,4	5,7	18,3	20,3
	0,3 PET	89,4	43,8	174,6	8,2	106,5	32,9
	Ø	90,1	28,3	98,0	5,9	42,5	18,6
Sand	1,0 PET	127,3	29,2	83,1	22,4	38,6	36,3
	0,6 PET	108,6	88,5	106,9	50,8	67,5	33,1
	0,3 PET	104,4	125,5	110,5	80,7	95,2	110,0
	Ø	113,4	81,1	100,2	51,3	67,1	59,8

Bemerkenswert waren die deutlich geringeren Nitratkonzentrationen unter Sorghum bicolor auf beiden Böden, mit Ausnahme der trockenen Sandvariante. In den Lösslysimetern waren sie im Mittel der Wasserstufen um 77 % geringer als unter Energiemais, in den Sandlysimetern um 32 %. Mit abnehmender Wasserversorgung war allerdings ein Anstieg der mittleren Nitratkonzentration im Sickerwasser zu verzeichnen, der auf den Sandböden besonders stark hervortrat und mit einer Abnahme der pflanzlichen N-Aufnahme einherging (geringere N-Aufnahme durch eingeschränktes Wachstum). Entsprechend den Nitratkonzentrationen fielen auch die N-Austräge aus. Die N-Austräge unter Energiemais waren sichtlich höher als unter Sorghum bicolor (Abb. 17).

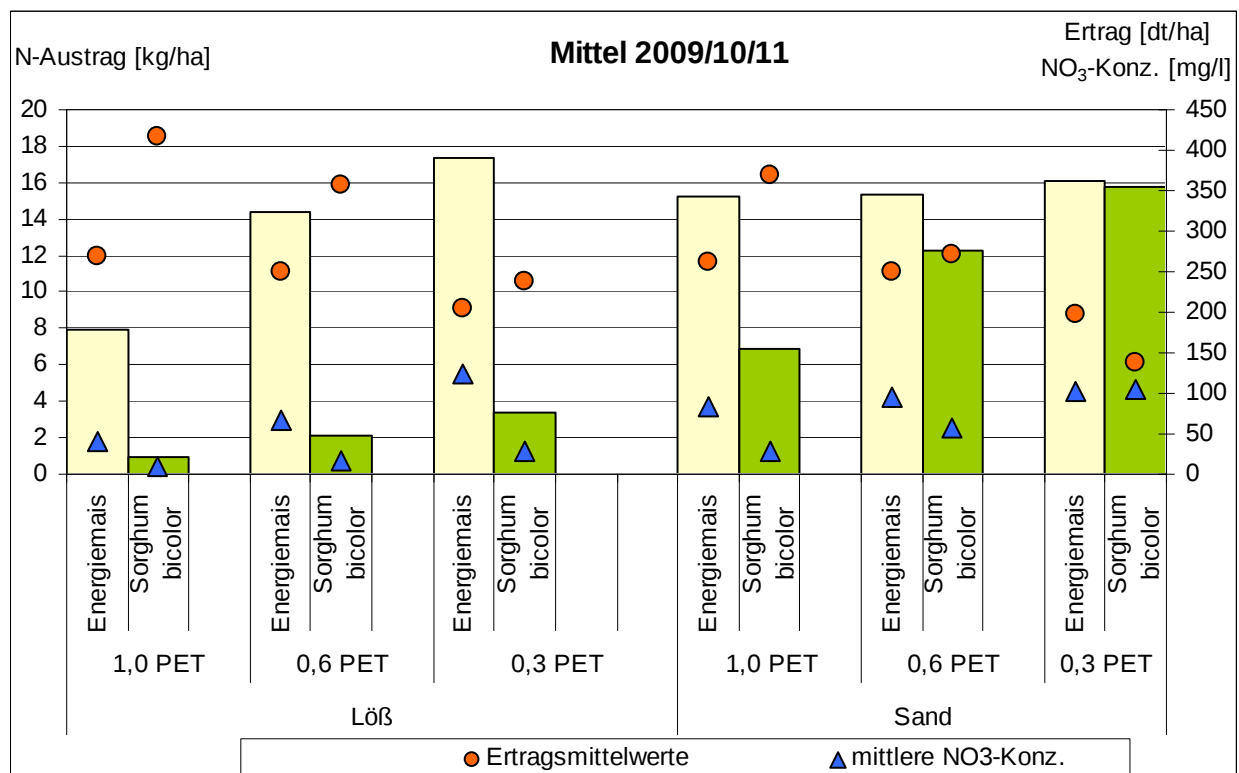


Abbildung 17: N-Austrag unter Energiemais und Sorghum bicolor in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung (Mittel der Sickerwasserperioden)

Die geringste N-Fracht (1 kg/ha) war unter Sorghum bicolor auf dem Lössboden bei vollem Ausgleich der Wasserbilanz vorzufinden. Sie stieg mit abnehmender Wasserversorgung auf 3 kg/ha an. Unter Energiemais wurden auf diesem Boden im Mittel 8 kg/ha ausgewaschen, die höchsten Verluste traten auf Löss unter 0,3/0,2 PET mit Werten von 17 kg/ha auf. Auf den Sandböden war die N-Auswaschung beider Kulturen höher. Bei Mais war sie in allen 3 Wasserstufen mit ca. 15 kg/ha nahezu identisch, während der N-Austrag unter Sorghum bicolor mit abnehmender Wasserversorgung deutlich anstieg und in der geringsten Wasserstufe den Austrag des Mais erreichte, bedingt durch den geringsten Ertrag und N-Entzug. Die geringeren Werte unter Sorghum bicolor sind vermutlich mit der stärkeren Tiefenausschöpfung des Bodenwassers und des darin enthaltenen Stickstoffs zu sehen. Sowohl die im Vergleich zu Energiemais geringeren N-Entzüge als auch die höheren N-Salden unter Sorghum bicolor können diese Beobachtung nicht erklären. Im Verlauf der drei Versuchsjahre zeigt sich aber unabhängig von den Faktoren Pflanze, Wasser, Boden eine abnehmende Tendenz der Nitratkonzentration des Sickerwassers und der N-Auswaschung (Tab. 14, Anlage 25) an der die Wirkung mehrjährig negativer N-Salden deutlich wird. Im Jahr 2010/11 gibt es keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen der N-Auswaschung unter Sorghum bicolor und Energiemais (Anlage 25). Der Einfluss der N-Salden der Bewirtschaftung zeigt sich in der Regel nicht im gleichen Jahr. Bei einer mittleren Sickerwasserspende von 65 mm unter Löss beträgt die theoretische jährliche Verlagerungsstrecke des Bodenwassers und darin gelösten Stickstoffs 21 cm und von 88 mm unter Sand 73 (reiner Sand) bzw. 44 cm (Sand über Tieflerhm). Demnach ist die N-Auswaschung vor allem im ersten Versuchsjahr das Ergebnis einer vor Versuchsbeginn erfolgten Bewirtschaftung, die nicht bekannt ist. Sorghum bicolor mit seinem tiefer reichenden Wurzelsystem hat offenbar dazu beigetragen Nitrat aus tieferen Bodenschichten mehr als Energiemais aufzunehmen und dadurch die N-Auswaschung schon im ersten Versuchsjahr unter dem Wert der KL mit Mais zu reduzieren.

Nährstoffgehalte und gärchemische Zusammensetzung

Obwohl die Trockenmasseerträge von Sorghum bicolor im Mittel über den Maiserträgen lagen, entzog der Mais dem Boden mehr Stickstoff und geringfügig mehr Phosphor als Sorghum bicolor. Auffallend war der hohe Kaliumbedarf beider Kulturen. Besonders hohe Entzüge wies Sorghum bicolor auf dem Lössboden auf. Der Kalziumentzug von Sorghum bicolor war auf beiden Böden etwas höher als der von Mais.

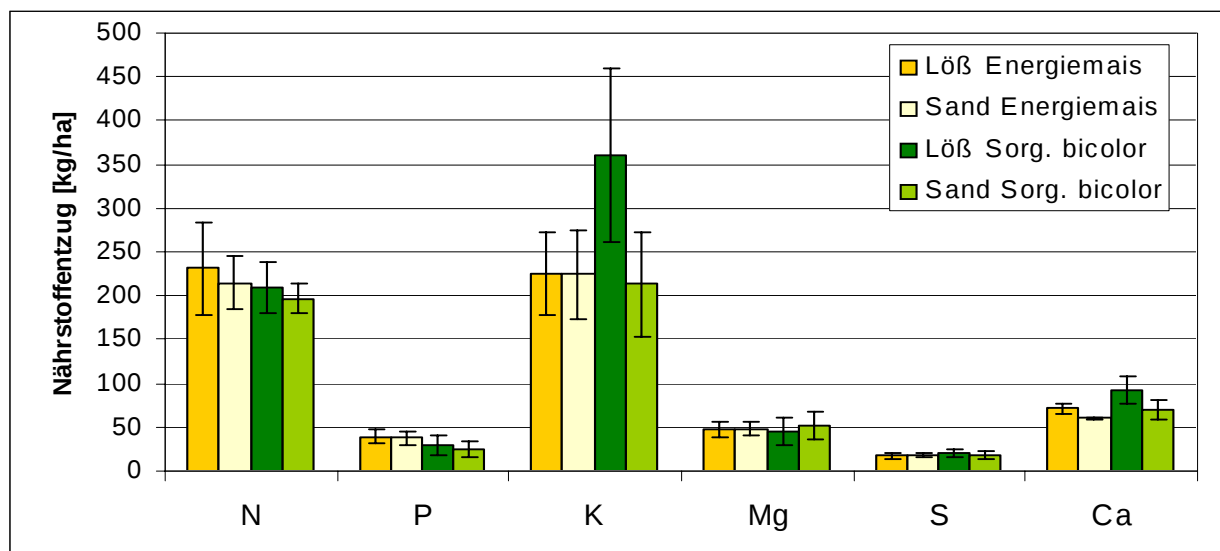


Abbildung 18: Entzug an Hauptnährstoffen der beiden Kulturen auf Sand und Löss (Mittel der Wasserstufen) im Mittel der 3 Versuchsjahre

In der Anlage 26 und 27 sind neben den Nährstoffgehalten beider Kulturen auch das Nährstoffverhältnis sowie die Nährstoffentzüge in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung der 3 Versuchsjahre dargestellt. Zwischen den Nährstoffgehalten und -verhältnissen in Abhängigkeit vom Boden gab es nur geringe Unterschiede, die zwischen den Jahren variierten. Lediglich der Magnesiumgehalt der Sorghumpflanzen auf den Sandböden war durchweg höher. Mit abnehmendem Wasserangebot stiegen die N-, K- und Ca-Gehalte in beiden Kulturen an. Die Qualität des Substrates ist ausschlaggebend für das Methanbildungspotenzial. Dabei sind sowohl der Anteil der Gehalte an gärchemisch bedeutsamen Inhaltsstoffen als auch das Nährstoffverhältnis von Bedeutung. Die Ermittlung der theoretischen Biogas-/Methanausbeute erfolgte nach den Berechnungen von SCHATTAUER und WEILAND (2006), welcher die nach der Weender Futtermittelanalyse untersuchten Inhaltsstoffe sowie die den DLG Futterwerttabellen (1997) entnommenen Verdauungsquotienten als Basis dienen. Diese Schätzung diente als Orientierung, um die Relation zwischen den beiden Pflanzenarten in Hinblick auf das Methanertragspotenzial zu ermitteln. Die folgende Tabelle vermittelt einen Überblick über die gärchemische Zusammensetzung und theoretische Methanausbeute von Energiemais und Sorghum bicolor im Mittel aller Varianten und der drei Versuchsjahre. Die Ergebnisse der Einzeljahre und Varianten sind in der Anlage 28 dargestellt.

Tabelle 15: Gärchemische Zusammensetzung von Energiemais und Sorghum bicolor (Mittel der Varianten und Versuchsjahre 2008 bis 2010)

Kennzahl	Maßeinheit	Energiemais "Atletico"	Sorghum bicolor "Goliath"
TME	dt/ha	209	256
Ernteertrag	dt oTS/ha	198	244
organischer Trockensubstanzgehalt (oTS)	% TS	95,0	95,5
TS-Gehalt	% der FM	30,7	30,1
BBCH		85	62
Bestandeshöhe	cm	236	256
Rohasche	% TS	4,24	4,36
Rohprotein	% TS	6,50	5,14
Rohfett	% TS	2,42	0,96
Rohfaser	% TS	21,60	28,98
N-freie Extraktstoffe	% TS	64,62	59,80
theoretische Biogasausbeute	(l/kg oTS)	550,5	447,3
theoretische Methanausbeute	(l/kg oTS)	284,4	228,6
theoretischer Methanertrag	(m³/ha	5654,4	5602,5

Die geschätzten Methanausbeuten zeigen an, dass die Inhaltsstoffzusammensetzung des Energiemaisses für den gärchemischen Prozess und die Methanbildung günstiger als in der Hirse gestaltet ist.

Abbildung 19 stellt die gärchemisch bedeutsamen Fraktionen der Rohnährstoffe beider Kulturen in Abhängigkeit von Boden und Wasserstufe in beiden Versuchsjahren dar. Sorghum bicolor wies in allen Versuchsjahren zur Ernte geringere Rohfett- und Rohproteingehalte, aber deutlich höhere Rohfaseranteile auf als der Energiemais. In Abhängigkeit von der Bodenvariante gab es kaum Unterschiede in der Zusammensetzung der wertgebenden Inhaltsstoffe, die Wasserversorgung beeinflusste besonders den Gehalt an Rohfaser. Die höheren Rohfasergehalte der Hirse bei 1,0 PET waren wahrscheinlich bedingt durch vermehrte Zellulose- und Lignineinlagerungen bei größerer Wuchshöhe. War beim Energiemais mit abnehmender Wasserversorgung ein leichter Anstieg des Rohfasergehaltes zu verzeichnen, sank dieser bei Sorghum bicolor, dafür sind in der trockenen Variante die Rohproteingehalte am höchsten. Dies erklärt sich aus den jüngeren BBCH-Stadien der Hirse bei 0,3/0,2 PET zur Ernte, der verminderten Wuchshöhe und dem etwas höheren Blattanteil.

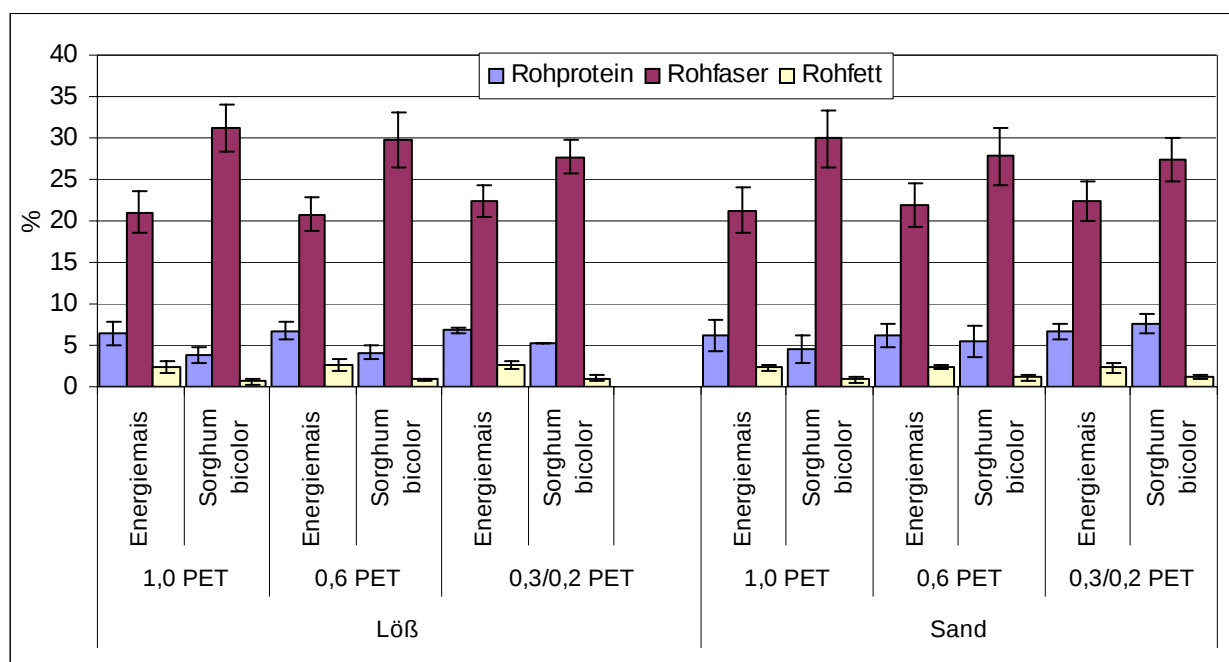


Abbildung 19: Gehalte an ausgewählten Rohnährstoffen von Energiemais und Sorghum bicolor (Mittel 2008-2010) in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung

Neben dem Gehalt an Rohnährstoffen ist auch das Verhältnis der Nährstoffanteile untereinander für das Wachstum der Biogas bildenden Organismen von Bedeutung. Für die optimale Umsetzung der organischen Substanz zu Biogas sollten die Inhaltsstoffe das möglichst günstige Verhältnis von C : N : P : S = 600 : 15 : 5 : 1 aufweisen. Wie aus der Tabelle ersichtlich wird, wies auch hier der Mais das bessere Verhältnis auf.

Tabelle 16: Nährstoffverhältnisse von Energiemais und Sorghum bicolor (Mittel der Jahre 2008-2010)

			Nährstoffverhältnisse			
			C	N	P	S
Energiemais	Löss	1,0 PET	600	14	3	1
		0,6 PET	600	15	3	1
		0,2 PET	600	15	2	1
	Sand	1,0 PET	600	14	3	1
		0,6 PET	600	14	2	1
		0,2 PET	600	16	2	1
		Ø	600	15	2,4	1
Sorghum bicolor	Löss	1,0 PET	600	9	1	1
		0,6 PET	600	10	1	1
		0,2 PET	600	12	1	1
	Sand	1,0 PET	600	10	1	1
		0,6 PET	600	13	1	1
		0,2 PET	600	18	1	1
		Ø	600	12	1	1

Die Abbildung 20 informiert über Methanausbeute und Methanertrag beider Kulturen in Abhängigkeit von den Versuchsvarianten im Mittel der Versuchsjahre 2009 und 2010. Die theoretische Methanausbeute aus Energiemais ist in beiden Versuchsjahren 20 % höher als aus Sorghum bicolor. Zwischen den Versuchsjahren und -varianten gibt es keine ersichtlichen Unterschiede. Hinsichtlich des Methanertrages wird deutlich, dass dieser den Trockenmasseertragsrelationen folgt. Damit erklären sich sowohl die Jahres- als auch die Variantenunterschiede. Die höheren Flächenerträge von Sorghum bicolor bei guter Wasserversorgung kann im Vergleich der Kulturen also zu einer höheren Methangasausbeute je Hektar führen.

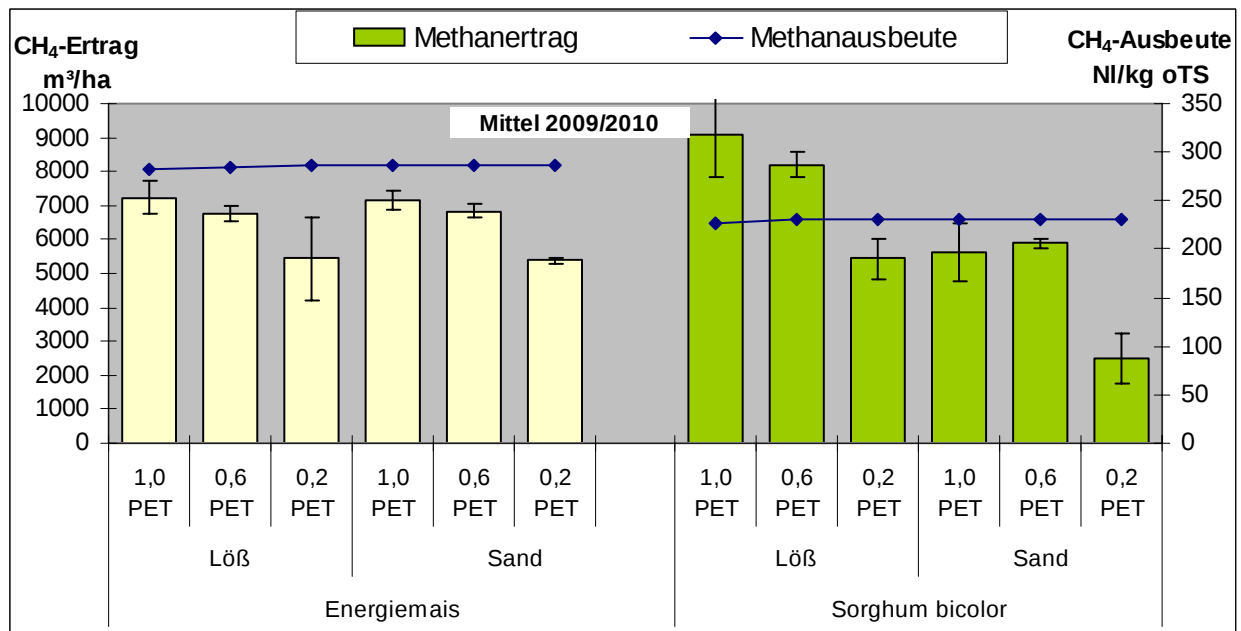


Abbildung 20: Theoretische Methanausbeute (NI/kg oTS) und Methanertrag (m³/ha) der beiden Kulturen in Abhängigkeit von Boden und Wasserstufe (Mittel 2009/10)

2.1.2.2 Feldlysimeterversuch Phänologie

Auf den Feldlysimetern ging Sorghum bicolor etwa 13 Tage nach der Aussaat (07.05.2009) auf. Um unabhängig vom Feldaufgang auf allen Lysimetern 25 Pflanzen je m² etablieren zu können, wurden 35 Körner je m² ausgesät. Das Längenwachstum zeigte während der Streckungsphase (BBCH 30 bis 40) eine kontinuierliche Zunahme um 5 cm je Tag und erreichte kurz vor dem Rispenschieben eine Bestandeshöhe von etwa 281 cm, die bis zur Ernte kaum noch zunahm (Abb. 19). Die Versorgung mit Zusatzwasser ab BBCH19/30 (17.07.2009) bis BBCH 51/53 (28.08.2009) führte zu einer stärkeren Längenzunahme zwischen dem 9-Knoten-Stadium und dem Beginn Rispenschieben mit dem Ergebnis einer im Vergleich zu unberechnet um 78 cm höheren Bestandeshöhe, die bis zur Ernte noch um weitere 10 cm zunahm und insgesamt 368 cm erreichte. Die Beobachtung der phänologischen Entwicklung zeigte, dass Zusatzwasser auch zu einer schnelleren Abreife führt (Abb. 21). Ab dem 10.09.2009 wurden die phänologischen Stadien bei optimaler Wasserversorgung eher erreicht. Zur Ernte befand sich die beregnete Variante im Entwicklungsstadium Beginn Kornbildung (BBCH 71) und die unter natürlichem Niederschlag belassenen Lysimeter auf beiden Böden im Entwicklungsstadium Ende Blüte (BBCH 69).

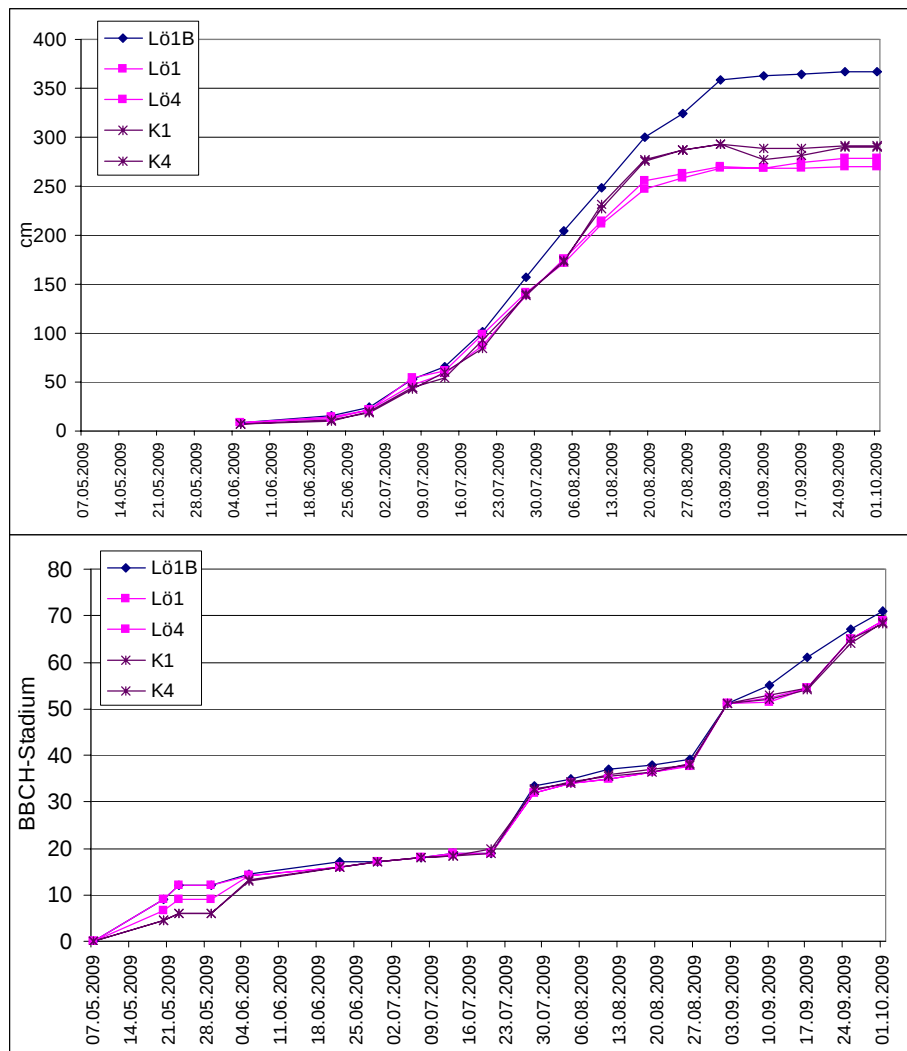


Abbildung 21: Verlauf der Bestandeshöhe und des Entwicklungsstadiums von Aussaat (07.05.2009) bis Ernte (01.10.2009) im Lysimeterversuch

Erträge

Unter dem Einfluss einer anfangs zu kühlen und während der Hauptwachstumsperiode überdurchschnittlich warmen und sehr trockenen Witterung im Monat August erzielte Sorghum bicolor auf dem Braunerde-Tschernosem einen Trockenmasse-Ertrag von 210 dt/ha, entsprechend der Ertragserwartung dieses Standortes (Tab. 17). Auf der Para-Rendzina mit geringerer Bodenwasserbereitstellung wurde ein Trockenmasse-Ertrag von 182 dt/ha erreicht. Die TS-Gehalte betrugen 25,6 und 25,3 % und lagen auf beiden Böden unter dem für die Silierung erforderlichen Wert. Mineralisch-organische Düngung mit 100 kg/ha Gülle-N als Gesamt-N angerechnet führte auf beiden Böden zu etwas geringeren Erträgen. Die Unterschiede waren aber nicht signifikant. Durch Verabreichung von Zusatzwasser zur Aufrechterhaltung potenzieller Verdunstungsbedingungen wurde ein signifikant höherer Trockenmasse-Ertrag von 304 dt/ha erzielt (Lö 1 B). Im Vergleich zu einem Wachstum unter dem Einfluss der trockenen Witterung im Jahr 2009 entsprach das einem Mehrertrag von 94 dt/ha (145%) auf dem Braunerde-Tschernosem und von 122 dt/ha (167%) auf der Para-Rendzina. Der TS-Gehalt betrug 29,6 % und lag signifikant höher im Vergleich zu den unter natürlichen Niederschlagsverhältnissen aufgewachsenen Sorghumhirsen. Zusatzwasser begünstigte über eine schnellere Abreife die Einlagerung von Trockensubstanz.

Tabelle 17: Erträge und Trockensubstanzgehalt von Sorghum bicolor im Lysimeterversuch

Varianten				Frischmasse- ertrag dt/ha	Trockenmas- seertrag dt/ha	TS-Gehalt %
Braunerde- Tschernosem	Min-SBA	Niederschlag + Zusatzwasser	Lö 1 B	1024	304	29,6
Braunerde- Tschernosem	Min-SBA	Niederschlag	Lö 1	821	210	25,6
Braunerde- Tschernosem	Min-Gülle- Ges-N	Niederschlag	Lö 4	827	197	23,8
Para- Rendzina	Min-SBA	Niederschlag	K 1	720	182	25,3
Para- Rendzina	Min-Gülle- Ges-N	Niederschlag	K 4	709	167	23,5

Verdunstung

Der Verlauf der Evapotranspiration (ET) von Sorghum bicolor unter potenziellen und aktuellen Verdunstungsbedingungen auf dem Braunerde-Tschernosem (Löss) ist in Abb. 22 dargestellt. Es zeigt sich, dass die ET ab dem Entwicklungsstadium 8-Blatt (BBCH 18), einer Wuchshöhe von 50 cm und einem Bedeckungsgrad von etwa 50 % einen Tageswert von 2 bis 3 mm/d deutlich überschreitet, was auf den Beginn der Hauptwachstumsperiode mit deutlichem Anstieg des Wasserverbrauches weist.

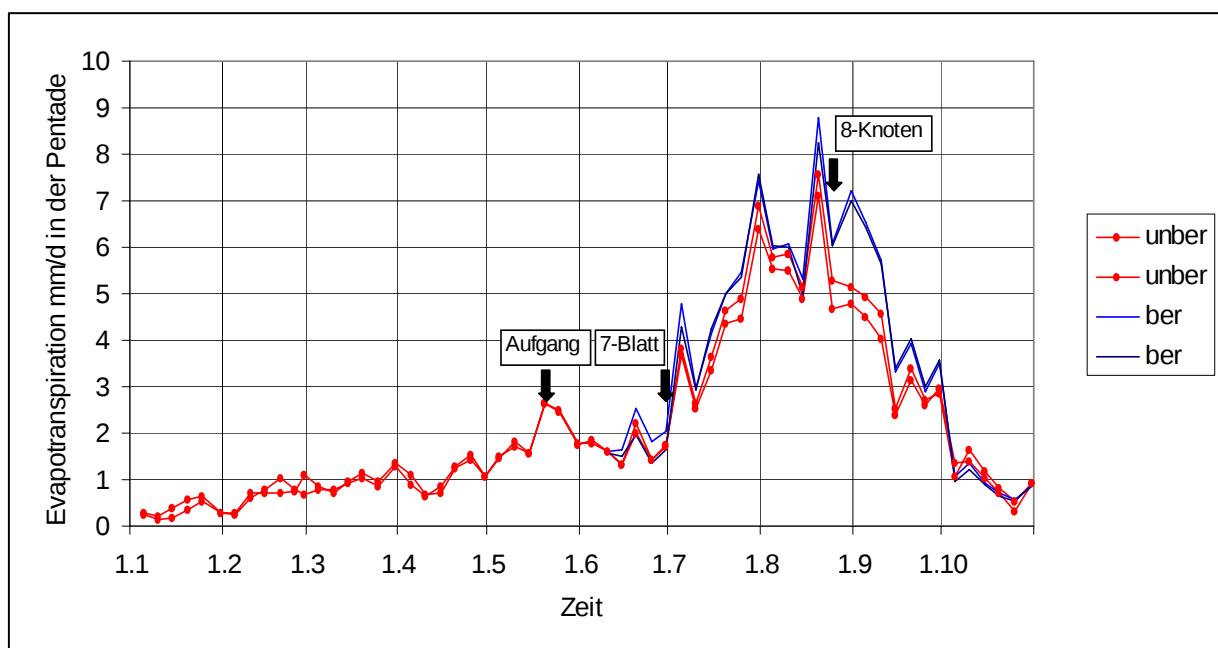


Abbildung 22: Verlauf der Evapotranspiration von *Sorghum bicolor* unter potenziellen (ber, Lö 1 B) und aktuellen (unber, Lö 1) Verdunstungsbedingungen

Der Tageswasserverbrauch der beiden Lysimeter der unberegneten und beregneten Variante folgte daraufhin einem ähnlichen Verlauf, bis ab dem Entwicklungsstadium 7-8-Knoten (BBCH 38) die ET des unberegneten Lysimeters deutlich unter den Wert des beregneten Lysimeters fiel und damit das Erreichen des Schwellenwertes der Bodenfeuchte andeutet. Die während der gesamten Wachstumszeit etwas geringere ET der unberegneten im Vergleich zu den beregneten Lysimetern ist auf eine verzögerte Jungpflanzenentwicklung aufgrund der kühlen Witterung in den ersten beiden Junidekaden zurückzuführen. Der Pflanzenbestand der ab BBCH 19 mit Zusatzwasser versorgten Lysimeter war im Vergleich zu allen anderen Lysimetern von Anfang an etwas stärker entwickelt. Im Mittel der Gesamtwachstumszeit vom 20.05. bis 01.10.2009 verbrauchte *Sorghum bicolor* unter potenziellen Verdunstungsbedingungen pro Tag 4,2 mm Wasser (Tab. 18). Unter den trockenen Witterungsverhältnissen im Jahr 2009 lag der Tageswasserverbrauch von *Sorghum bicolor* auf dem Braunerde-Tschernosem mit 3,62 mm signifikant niedriger. Offenbar hat die aufgenommene Bodenwassermenge nicht ausgereicht, um durch Ausgleich des Niederschlagsdefizites optimale Wuchsbedingungen herzustellen.

Tabelle 18: Wasserverbrauch von *Sorghum bicolor* und Wasserbilanz unter aktuellen (unber) und potenziellen (ber) Verdunstungsbedingungen auf dem Braunerde-Tschernosem (Löss) 2009

Zeitraum		Evapo- transpiration		Niederschlag		Zusatzwasser		Wasserbilanz	
		unber	ber	unber	ber	unber	ber	unber	ber
Gesamtwachstumszeit, Aufgang bis Ernte, 20.05. - 01.10., 134 d	mm	487	568	300	281	8 ¹	165	-179	-122
	mm/d	3,62	4,20	2,3	3,3				
Hauptwachstumsperio- de, 7-8-Blatt bis Ernte, 01.07. - 01.10, 93 d	mm	412	489						
	mm/d	4,43	5,26						

In der Hauptwachstumszeit betrug der mittlere Wasserverbrauch unter potenziellen Verdunstungsbedingungen 5,26 mm/d. Nach ROTH et al. (2005) verbrauchen landwirtschaftliche Kulturen bei optimaler Wasserversorgung unter den klimatischen Verhältnissen des mitteldeutschen Binnenlandklimas während ihrer Hauptwachstumsperiode durchschnittlich 4 mm/d mit einer geringen Jahres- und fruchtartenspezifischen Schwankung von 3,8 bis 4,3 mm/d. Der für

Sorghum bicolor im Jahr 2009 ermittelte Wert liegt deutlich darüber. Auch in der Gegenüberstellung des Gesamtwasserverbrauches von Sorghum bicolor und den hier etablierten landwirtschaftlichen Kulturen zeigte sich der überdurchschnittlich hohe Wasserbedarf dieser Kultur (Abb. 23). Bisher hat sich über mehrere Jahre und Fruchtarten der von ROTH et al. (2005) gezeigte Zusammenhang zwischen Länge der Wachstumszeit und Höhe der Evapotranspiration unter potenziellen Verdunstungsbedingungen bestätigt. Sorghum bicolor fällt mit seinem hohen Wasserverbrauch in einer kurzen Wachstumszeit aus dieser Rangfolge heraus.

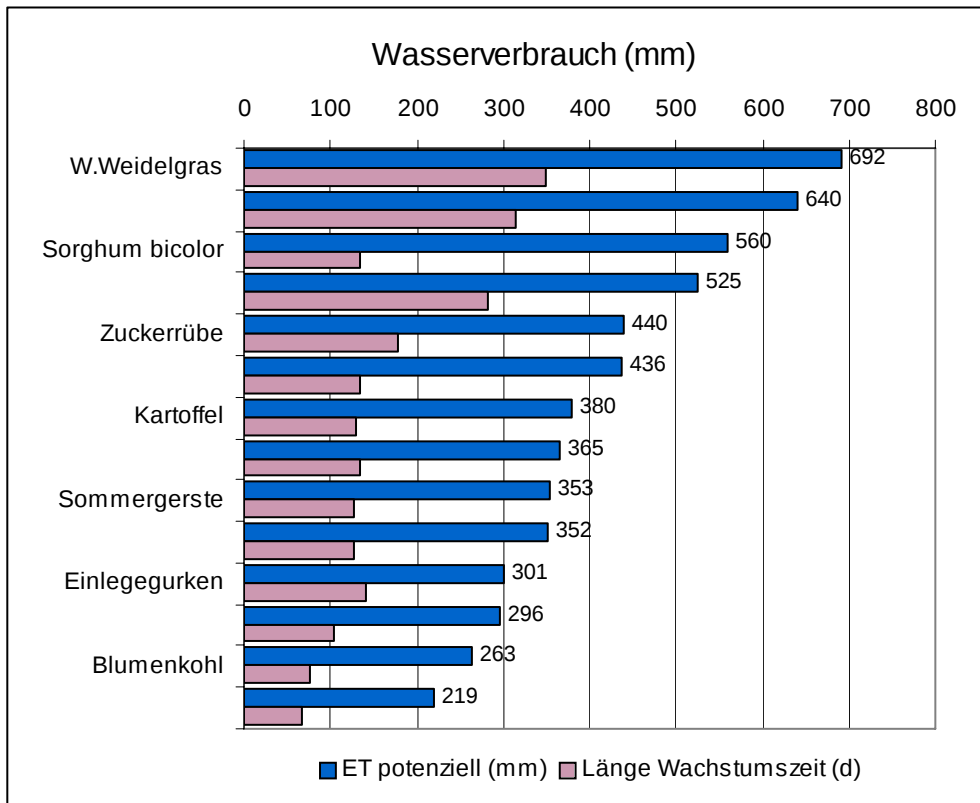


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Wasserverbrauch von Aufgang bis Ernte von Sorghum bicolor im Vergleich zu den landwirtschaftlichen Kulturen und Länge der Wachstumszeit unter potenziellen Verdunstungsbedingungen während der Hauptwachstumsperiode

Bodenwasseraneignung

Sorghum bicolor begann das Bodenwasser tieferer Bodenschichten, unterhalb 50 cm, auf dem Braunerde-Tschernosem ab dem Entwicklungsstadium 7/8-Blatt (29.06.), ab dem auch der Wasserverbrauch deutlich ansteigt, in Anspruch zu nehmen. Das sind etwa 53 Tage nach der Aussaat (07.05.) und 40 Tage nach dem Aufgang. Der Pflanzenbestand hat zu diesem Zeitpunkt eine Höhe von 30 bis 50 cm und einen Bedeckungsgrad von 30 bis 50 %. Im Feldversuch setzte die Tiefenausschöpfung unterhalb 50 cm etwa 15 Tage später ein ab dem 12.07, etwa 58 Tage nach der Aussaat (15.05.09) während des Entwicklungsstadiums 9-Blatt (BBCH 19), 70 cm Wuchshöhe und 75 % Bedeckungsgrad.

Die in unmittelbarer Nähe zum Feldversuch durchgeführten Messungen unter Silomais zeigten einen Zugriff auf das Bodenwasser unterhalb 50 cm Tiefe ab dem 28.06. kurz vor Ausbildung des 1. Knotens während des Übergangs vom BBCH-Stadium 19 auf 31, einer Bestandeshöhe von 80 cm und einem Bedeckungsgrad von ca. 75 %. Die Ausschöpfung des Bodenwassers unterhalb 50 cm begann etwa 64 Tage nach der Aussaat. Die einjährigen Ergebnisse deuten daraufhin, dass Sorghum bicolor unter günstigen Bedingungen der Saatbettbereitung (d. h. z. B. ohne Schadverdichtung, wie auf den Lysimeterböden) einen rascheren Tiefenentzug entwickelt als Silomais. Zum Zeitpunkt der Tiefenausschöpfung war Sorghum bicolor auf den Lysimeterböden noch im BBCH-Stadium 17; Bestandeshöhe und Bedeckungsgrad sind deutlich geringer als bei Silomais (BBCH 31, 80 cm Wuchshöhe, 75 % Bedeckungsgrad).

Im weiteren Wachstumsverlauf erschloss Sorghum bicolor auf dem Braunerde-Tschernosem das pflanzenverfügbare Bodenwasser bis in 210 cm Tiefe. Im Feldversuch blieb es im Vergleich zum Lysimeterboden beim zeitlich verzögerten Zugriff auf das Bodenwasser tieferer Bodenschichten und war die maximale Entzugstiefe mit 170 und 190 cm etwas geringer. Silomais setzte die Ausschöpfung des Bodenwassers nur bis in 150 cm Tiefe fort.

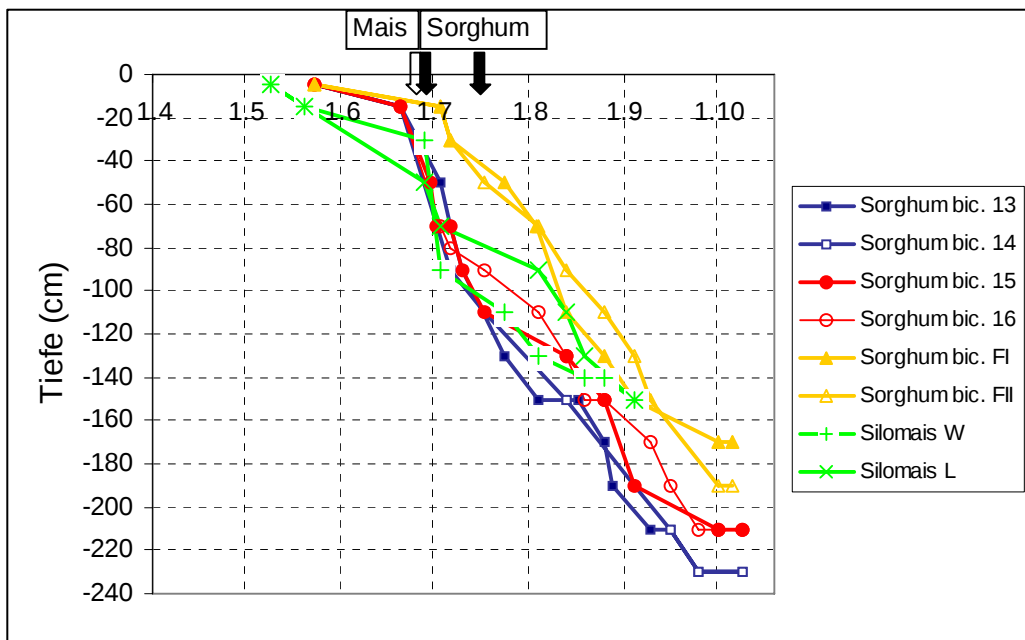


Abbildung 24: Zeitlicher Verlauf der Bodenwasserausschöpfung durch Sorghum bicolor im Vergleich zu Silomais auf dem Braunerde-Tschernosem (Löss)

Die Bodenwasserausschöpfung lief im Jahr 2009 unter dem Einfluss trockener Witterung von Juni bis August (61 % des langjährigen Niederschlages, +0,5 °K der langjährigen Temperatur) und überdurchschnittlich feuchter (155 %) und warmer (+0,7 °K) Witterung im September ab.

Die Intensität der Bodenwasserausschöpfung zeigt Abbildung 25.

Sorghum bicolor stand im Jahr 2009 nach dem Anbau der Kulturen Silomais (2005), Braugerste (2006), Winterraps (2007) und Winterweizen (2008). Auf den unter natürlichen Niederschlägen belassenen Lysimetern hat es in diesem Zeitraum keine Sickerwasserbildung gegeben und auch zu Vegetationsbeginn 2009 war der Bodenwasserspeicher nicht vollständig aufgefüllt (Abb. 23, Lö 15 und Lö 16). Das trifft zu Wachstumsbeginn von Sorghum bicolor im Jahr 2009 auch auf die mit Zusatzwasser versorgten Lysimeter Lö 13 und 14 zu (Abb. 23). Der Anfangswassergehalt der 200 cm-Bodenzone lag 2009 im Bereich von 70 bis 80 % nFK.

Unter der Bedingung trockener Witterung in den Monaten Juni und August und überdurchschnittlichen Temperaturen ab Juli bis September wurde das pflanzenverfügbare Bodenwasser bis in 180 cm Tiefe nahezu vollständig ausgeschöpft. Da der Bodenwasserspeicher zu Vegetationsbeginn nicht vollständig aufgefüllt war, entsprach das einer Bodenwassermenge von 170 mm. Auch auf den mit Zusatzwasser versorgten Lysimetern fand eine beachtliche Bodenwasserausschöpfung statt. Trotz Beregnung ab Unterschreiten einer Wasserbilanz von -60 bis -40 mm gelang es nicht durchgängig einen Bodenwassergehalt von 80 % nFK im Wurzelraum aufrechtzuerhalten und entstand zur Ernte ein Bodenfeuchtedefizit von -150 mm. Sorghum bicolor hatte schon vor Beginn der Zusatzwasserversorgung am 17.07., ab dem Entwicklungsstadium BBCH19 eine Entzugstiefe von 110 cm erreicht. Die daraufhin fortgesetzte Beregnung zur Aufrechterhaltung eines Wasserdefizites < -60 bis -40 mm hielt die weitere Tiefenausschöpfung nicht auf.

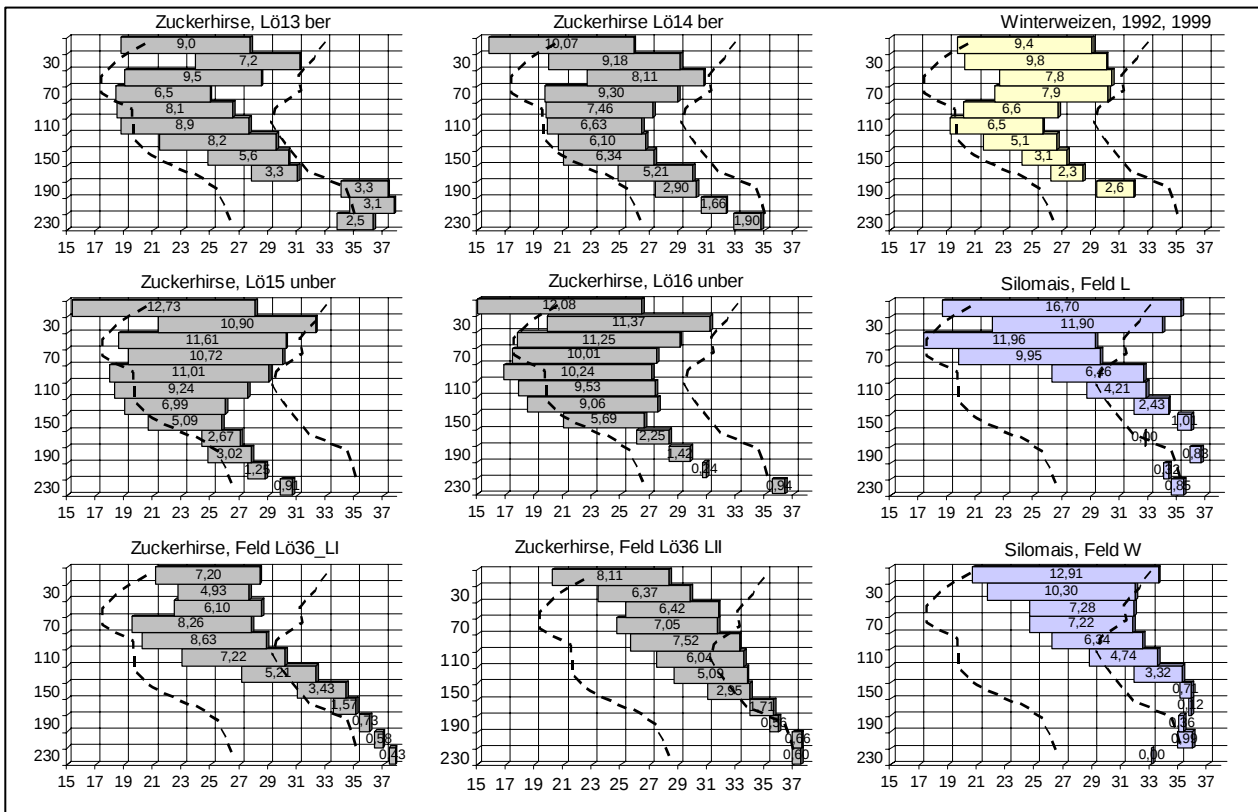


Abbildung 25: Intensität der Bodenwasserausschöpfung (y-Achse: Tiefe in cm, x-Achse: Bodenwassergehalt in Vol %) von *Sorghum bicolor* und Silomais 2009 im Vergleich zu Winterweizen 1992, 1999. Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich

Auf den Feldparzellen war die Intensität der Bodenwasserausschöpfung weniger stark ausgeprägt. Im Unterschied zu den Feldlysimetern fanden *Sorghum bicolor* und Silomais aber einen nahezu vollständig aufgefüllten Bodenwasserspeicher vor. *Sorghum bicolor* nahm aus dem pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrat 108 mm in Anspruch, in etwa wie Silomais mit 120 mm. Wie bereits im zeitlich verzögerten Tiefenentzug im Vergleich zu den Lysimeterböden erkennbar, scheint *Sorghum bicolor* auf dem Feldschlag in ihrem Vermögen Bodenwasser auszuschöpfen, eingeschränkt gewesen zu sein. Ein Grund dafür kann in einem nicht optimalen Saatbett mit Verdichtungen in der Ackerkrume gesehen werden. Insgesamt ist einzuschätzen, dass *Sorghum bicolor* mit ihrem Bodenwasseraneignungsvermögen in die Gruppe tiefwurzeln-der Ackerkulturen, wie z. B. Winterweizen einzuordnen ist.

Wassernutzungseffizienz

Der Transpirationskoeffizient von *Sorghum bicolor* belief sich unter weitgehend potenziellen Verdunstungsbedingungen (durch Vermeiden einer Wasserbilanz < -60 bis -40 mm) auf 184 kg H₂O/kg Trockenmasse und lag im Bereich des Wertes für Silomais, Sorte Pirat ermittelt im Jahr 1993 (Tab. 19). Entsprechend der Besonderheiten des C4-Metabolismus von *Sorghum bicolor* und Silomais liegt der TK deutlich niedriger im Vergleich zu der C3-Pflanze Winterweizen, ermittelt 1992. Der Trockenmasseertrag, der unter potenziellen Verdunstungsbedingungen von *Sorghum bicolor* erzielt wurde, lag aber um das 1,6-fache über dem Wert von Silomais, Sorte Pirat. Der Wasserverbrauch von *Sorghum bicolor* zur Erzielung dieses TM-Ertrages war allerdings auch um 1,6-fach höher.

Tabelle 19: Transpirationskoeffizient und Wassernutzungseffizienz von *Sorghum bicolor* unter potenziellen Verdunstungsbedingungen und natürlichem Niederschlag 2009

	Länge der Wachstumszeit (Aufgang bis Ernte)	Trocken- masse- ertrag	Wasser- verbrauch	Transpirations- koeffizient	Wasser- nutzungs- effizienz
	d	kg/m ²	mm	kg H ₂ O/kg TM	kg ha ⁻¹ mm ⁻¹
	unter potenziellen Verdunstungsbedingungen in der Hauptwachstumszeit				
<i>Sorghum bicolor</i>	134	3,04	568	184	54,3
Silomais (1993)	135	1,89	361	191	52,4
Winterweizen (1992)	262	1,58	545	345	29,0
	unter aktuellen Verdunstungsbedingungen (natürlicher Niederschlag), tiefgründiger Braunerde-Tschernosem (Löss)				
<i>Sorghum bicolor</i>	134	2,01	480	229	43,7
	unter aktuellen Verdunstungsbedingungen (natürlicher Niederschlag), Para-Rendzina (unterer Keuper)				
<i>Sorghum bicolor</i>	134	1,59	385	242	41,3

Unter der Bedingung natürlicher Niederschläge mit unternormalen Niederschlägen in der Hauptwachstumszeit von Juni bis August stieg der Transpirationskoeffizient von *Sorghum bicolor* auf dem tiefgründigen Braunerde-Tschernosem (Löss) auf 229 kg H₂O/kg TM und auf der Para-Rendzina aus unterem Keuper auf 252 kg H₂O je kg TM.

Der geringere Wasserverbrauch auf der Para-Rendzina deutet daraufhin, dass das Bodenwasserbereitstellungsvermögen im Vergleich zum Braunerde-Tschernosem geringer ist und *Sorghum bicolor* ihren Wasserbedarf auf diesem Standort weniger zu decken vermochte. Den Messungen der Bodenfeuchteausschöpfung zufolge hat *Sorghum bicolor* vom Bodenwasservorrat des Braunerde-Tschernosem 170 mm in Anspruch genommen. Die Differenz aus Wasserverbrauch und Niederschlag während der Gesamtwachstumszeit, ermittelt aus der Gewichtsänderung der Lysimeter, beläuft sich auf diesem Boden auf -179 mm und bestätigt den aus der Änderung der Bodenfeuchte-Messwerte abgeleiteten Betrag der Bodenfeuchteausschöpfung. Auf der Para-Rendzina wird die Bodenfeuchte nicht gemessen. Hier kann nur die Differenz aus der Gewichtsänderung der Lysimeter eine Vorstellung über den Betrag der Bodenfeuchteausschöpfung geben. Sie beläuft sich im Mittel der beiden Lysimeter K 6 und K 7 auf 114 mm. Der höhere Wasserverbrauch je kg TM bzw. die geringere Wassernutzungseffizienz unter den Bedingungen der Jahreswitterung 2009 im mitteldeutschen Trockengebiet im Vergleich zu optimaler Wasserversorgung bringt zum Ausdruck, dass die Aufnahme des Bodenwassers zur Deckung des pflanzlichen Wasserbedarfes mit einer Einschränkung der Biomassebildung einhergegangen ist. Wenn nur die Wassermenge aus Niederschlag und Bodenwasser für die Erzielung von etwa 200 dt/ha TM zur Verfügung steht, würde nach den Ergebnissen in der Tabelle 19 *Sorghum bicolor* mehr Wasser benötigen als Silomais, Sorte *Pirat*. Allerdings gehört Silomais, Sorte *Pirat* heute nicht mehr zum Sortenspektrum. Ein direkter Vergleich einer Energiemais-Sorte im Jahr 2009 war auf den Feldlysimetern aufgrund des dort etablierten Versuchsprogramms (standortabhängige Schwellenwerte N-Salden) nicht möglich. Die hier erzielten Ergebnisse zur Wassernutzungseffizienz von *Sorghum bicolor* bei unterschiedlicher Wasserversorgung bestätigen die im Modellversuch mit Kleinlysimetern gefundenen Wasser-Ertrags-Beziehungen von *Sorghum bicolor* im Vergleich zu Energiemais.

N-Entzug und N-Salden

Unter der Bedingung empfehlungskonformer N-Düngung mit einem N-Sollwert von 230 kg/ha auf dem Braunerde-Tschernosem (Löss) und 210 kg/ha auf der Para-Rendzina (unterer Keuper) lagen die N-Entzüge mit 205 bis 210 kg/ha auf dem Braunerde-Tschernosem und 179 bis 194 kg/ha auf der Para-Rendzina etwas unter dem N-Sollwert (Tab. 20). Die N-Gehalte schwankten zwischen 0,81 bis 1,23 %. Durch Verabreichung von Zusatzwasser erhöhte sich der N-Entzug auf 237 kg/ha, der N-Gehalt sank auf 0,78 %. Die N-Salden waren durchweg negativ. Der durch Zusatzwasser signifikant höhere Ertrag führte zu einem stärker negativen N-Saldo.

Tabelle 20 : N-Entzug und N-Saldo im Lysimeterversuch 2009

	N-Düngung		Trockenmasseertrag	N-Entzug	N-Saldo
	N-Sollwert kg/ha	N-Düngung kg/ha			
Lö 1 B	230	160	304	237	-77
Lö 1	230	160	210	205	-45
Lö 4	230	161	197	210	-49
K 1	210	153	182	179	-26
K 4	210	154	167	194	-40

Gärchemische Zusammensetzung

Die Methanausbeute lag im Bereich der Werte der Kleinlysimeter und der Feldversuche (Abb. 26). Die Methanerträge folgten den Trockenmasseerträgen und lagen am höchsten in der Variante mit Zusatzwasser-Versorgung.

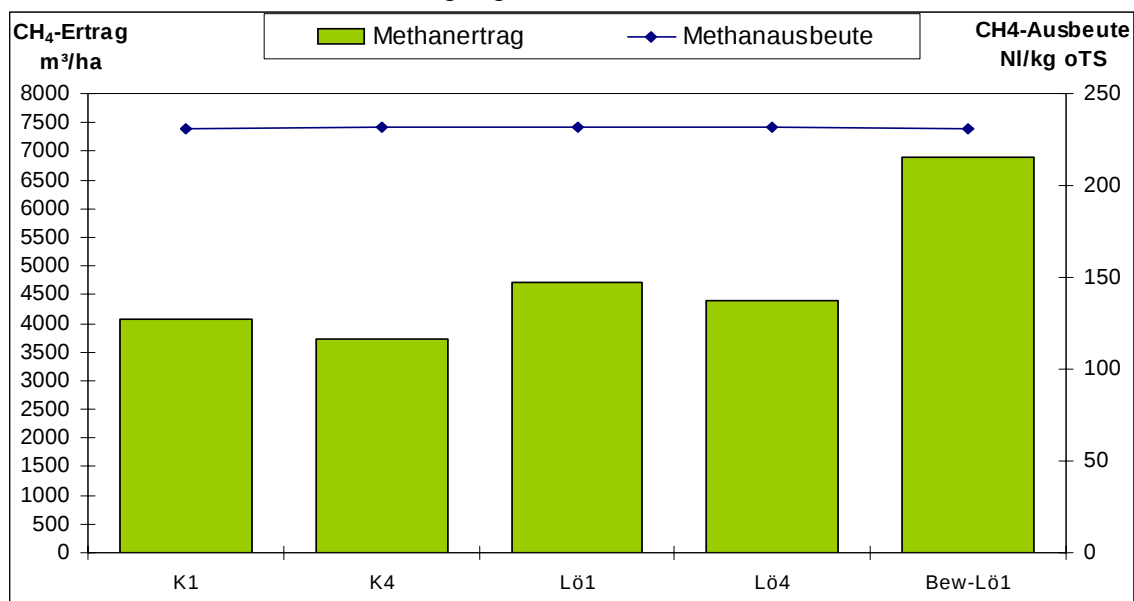


Abbildung 26: Theoretische Methanausbeute (NI/kg oTS) und Methanertrag (m³/ha) von *Sorghum bicolor* in Abhängigkeit von Boden, Düngung und Wasserstufe im Lysimeterversuch

2.1.2.3 Feldversuche

Phänologie

Sorghum bicolor standen auf dem Feldversuch 144 Wachstumsstadien zur Verfügung. Die Pflanzen auf dem Braunerde-Tschernosem (Löss) waren zur Ernte mit einer durchschnittlichen Länge von 318 cm um 8 % größer als auf der Para-Rendzina (Keuper) mit 292 cm. Zur Ernte wurden auf dem Braunerde-Tschernosem signifikant höhere Pflanzenzahlen (25 Pfl./m²) als auf der Para-Rendzina (16 Pfl./m²) ermittelt, was darauf hindeutet, dass der Feldaufgang und die Wachstumsbedingungen für *Sorghum bicolor* hier günstiger waren (Aussaatmenge 37 Körner/m²).

Erträge

Die größeren Wuchshöhen verbunden mit der höheren Pflanzenzahl/m² auf dem Löss resultierten in einem höheren Ertragsniveau gegenüber dem Keuper (+16 %) (Abb. 27). Im Vergleich zu den Ergebnissen in den Feldversuchen der Station Friemar (Lössboden) und Heßberg (Verwitterungsboden) der Sorte *Goliath* mit 192 und 196 dt/ha und dem Lysimeterversuch mit 203 (Löss) und 175 (Keuper) dt/ha waren die Erträge der beiden Feldversuche auf dem Löss- und Keuperboden mit 148 und 125 dt/ha unterdurchschnittlich. Die vergleichsweise geringen Erträge sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf ungünstige Bedingungen in der Saatbettbereitung zurückzuführen.

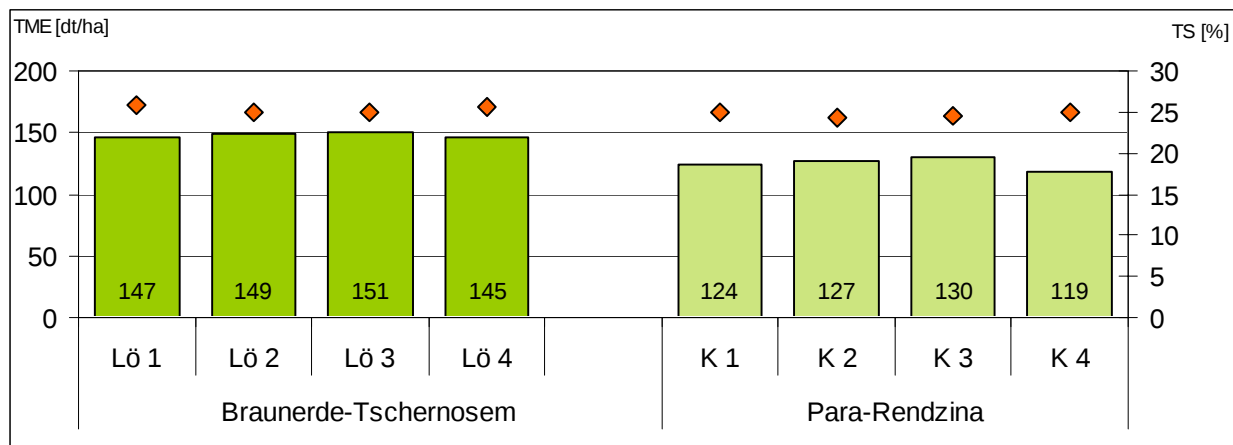


Abbildung 27: Trockenmasseertrag von *Sorghum bicolor* in den Feldversuchen in Abhängigkeit von Boden und Düngungsstufe 2009

Auf dem Löss kam es zu einer geringfügig höheren Trockensubstanzeinlagerung, aber insgesamt waren die TS-Gehalte mit 24 % unbefriedigend. Zwischen den Düngungsvarianten sind keine signifikanten Unterschiede erkennbar. Lediglich auf der Para-Rendzina zeichnete sich in der Variante SBA +30 % ein etwas höherer Ertrag und in der Variante Mineral-N + Gülle-N mit 100 %-Anrechnung des Gülle-N ein etwas niedrigerer Ertrag im Vergleich zur Düngung nach SBA mit Mineraldünger (Variante 1) ab.

N-Entzug und N-Salden

Auf dem Braunerde-Tschernosem waren höhere N-Entzüge (172 kg/ha) festzustellen als auf der Para-Rendzina (140 kg/ha), entsprechend den höheren Erträgen (Abb. 26). Der N-Gehalt von *Sorghum bic.* auf den beiden Böden unterschied sich kaum (1,16 zu 1,12 %). Dafür gab es deutliche Unterschiede innerhalb der Düngungsvarianten. Die N-Düngung +30 % führte zu einem deutlich höheren N-Gehalt (Anlage 29).

Empfehlungskonforme N-Düngung mit N-Sollwerten von 210 kg/ha (Para-Rendzina) und 230 kg/ha (Braunerde-Tschernosem) führte auf dem Braunerde-Tschernosem zu einem etwa ausgeglichenen (-5 kg/ha) und auf der Para-Rendzina leicht positiven N-Saldo (+16 kg/ha), wie aus Anlage 30 ersichtlich wird.

Am höchsten fielen die N-Salden auf beiden Böden in der mineralisch-organischen Variante 2 mit Anrechnung des MDÄ der Rindergülle aus. Auf der Para-Rendzina waren es in dieser Variante knapp +50 kg/ha. Eine um 30% höhere mineralische N-Düngung hinterließ auf dem Braunerde-Tschernosem einen N-Saldo von +12 kg/ha und auf der Para-Rendzina von +42 kg/ha. Der Ertrag lag auf beiden Böden nur geringfügig höher im Vergleich zu allen übrigen Varianten, dafür um so mehr der N-Gehalt und damit auch der N-Entzug. Die Erhöhung der N-Düngung um 30% hatte für *Sorghum bicolor* keinen Ertragsvorteil gebracht, dafür den N-Saldo höher ausfallen lassen. Das traf auch auf die gärchemische Ausbeute zu, die sich in der Berechnungsformel wesentlich aus den Inhaltsstoffen Rohfett (XL), Rohprotein (XP) und Kohlenhydrate (XF, NfE) ergibt.

Das Niveau der Methanausbeute deckte sich mit den Ergebnissen aus dem Modellversuch mit Kleinlysometern (Abb. 20). Der Methanertrag lag bedingt durch das geringere Ertragsniveau deutlich niedriger (Anlage 31).

2.1.2.4 Praxisversuch Pahren

Im Versuchsjahr 2008 wurde die Sorghum bicolor-Sorte *Super Sile 18* in Pahren auf einer Fläche von 5 ha angebaut. Die Aussaat erfolgte am 19.05.2008, die Ernte am 29.09.08. Die fehlende Unkrautbekämpfung führte zu einem sehr starken Unkrautbesatz und dementsprechend geringen Ertrag von nur 44,6 dt/ha TM bei einem TS-Gehalt von ca. 27 %. Durch die geringe Erntemenge war es nicht möglich eine separate Silierung und Vergärung durchzuführen. Deshalb entfielen die geplanten Untersuchungen. Im 2. Versuchsjahr 2009 musste der aus mehreren Sorten bestehende Sorghum-Bestand wegen zu geringer Bestandesdichte und starker Verunkrautung bereits im Jungpflanzenstadium gänzlich umgebrochen werden. Erst im 3. Versuchsjahr gelang eine für die Silagebereitung ausreichende Bestandesetablierung. Jedoch wurden die angestrebten Pflanzenzahlen/m² bei weitem nicht erreicht (Tab. 21). Grund hierfür dürfte das durch die pfluglose Bodenbearbeitung für die feinkörnigen Hirsen unzureichend feine Saatbett sein (Abb. 26). Auch kam es bei der Aussaat mit dem Airseeder (Zinken-Grubbersämaschine, welche bei einem Strichabstand von 25 cm ein Saatband von ca. 25 cm erzeugt) zu einigen Fehlstellen.



Abbildung 26: Saatbett im Praxisversuch Pahren im Mai 2010 und Aussaat mit dem Airseeder am 23.05.10

Tabelle 21: Pflanzenzahlen/m² des Sorghumpraxisversuches Pahren nach Aufgang und zur Ernte 2010

		Pflanzenzahl/m ²	
		Aufgangsbönotur 14.06.10 (BBCH 13)	Ernte 02.11.10
Sorghum bicolor x Sorghum sudanense Zielbestand: 40 Pfl./m ²	Lussi	21	21
	Super Dolce 15	7	10
	Nutri Honey	12	12
	GK Csaba	8	8
Sorghum bicolor Zielbestand: 25 Pfl./m ²	KWS Zerberus	15	19
	KWS Maja	5	7
	Herkuels	3	4
	Rona 1	5	6

Die am 17.06.10 durchgeführte Unkrautbekämpfung (Gardo Gold + Certrol B) zeigte eine gute Wirkung gegen das vorrangig aus Amaranth, Ackerstiefmütterchen und Weißem Gänsefuß bestehende Unkrautspektrum.

Die kühlen Temperaturen am Standort verzögerten die Mais- und Hirseabreife, so dass die Hirsen erst am 02.11.10 geerntet wurden. Zu diesem Zeitpunkt wiesen alle Pflanzen leichte Frostschäden auf (Abb. 27). Das gesamte Sortenspektrum war in das generative Stadium eingetreten, aber es bestanden deutliche Sortenunterschiede im Entwicklungsstadium (BBCH 51 bis 61). Zur Ernte wurden Bestandeshöhen zwischen 224 und 263 cm erreicht, die sudanesebetonten Sorten hatten im Mittel 5 bis 7 und die Bicolorsorten 2 bis 3 ertragswirksame Bestockungstriebe gebildet (Anlage 32). Lager trat im Unterschied zu den Beständen der Thüringer Sorghumsortenversuche in Heßberg und Friemar nicht auf. Eventuell hat die geringe Bestandesdichte dazu beigetragen, dass die Einzelpflanzen eine höhere Standfestigkeit entwickelten.



Abbildung 27: Hirsebestand in Pahlen zur Ernte

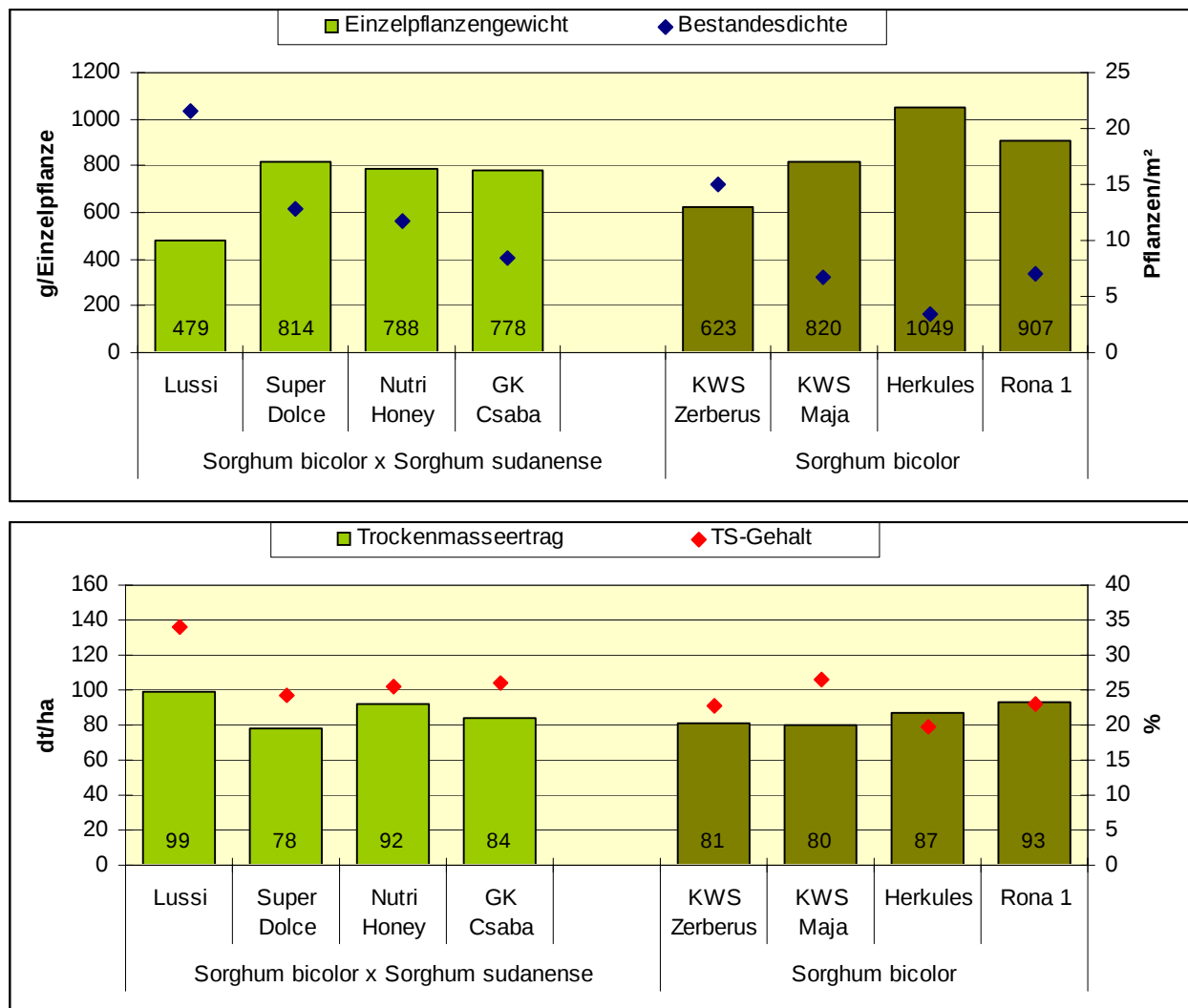


Abbildung 28: Einzelpflanzengewicht, Bestandesdichte, Trockenmasseertrag und TS-Gehalt zur Ernte in Pahren 2010

Das niedrige Ertragsniveau von unter 100 dt/ha resultierte aus den zu geringen Bestandesdichten. Trotz des späten Erntetermins erreichten nur einige Sorten siliertechnisch günstige TS-Gehalte (28 bis 32 %). Die höchsten TS-Gehalte erzielte die Sorte *Lussi* mit 34 %, *Nutri Honey*, *KWS Zerberus* und *KWS Maja* erreichten immerhin noch über 25 % TS. Die geringste TS-Einlagerung wies *Herkules* auf (< 20 %).

Nach der Ernte erfolgte die Einsilierung aller 8 Hirsesorten in ein gemeinsames Silo. Durch die terminlich späte Vergärung der Hirsen in der Biogasanlage konnten im Projektzeitraum keine Untersuchungen zum Gärrest erhoben werden. Jedoch konnte neben quantitativen und qualitativen Ertragsparametern ein Vergleich der Sorghumsilage mit einer gleichzeitig vom Nachbargut gewonnenen Maissilage (gleicher Aussaattermin wie Hirsen) hinsichtlich Qualitätsparametern und Biogasausbeute (Hohenheimer Biogastester) durchgeführt werden. Wie bereits beschrieben, ist das Biogasbildungspotenzial einer Pflanzenart in erster Linie von der chemischen Zusammensetzung des Pflanzenmaterials zur Ernte abhängig. Bei der Nutzungsrichtung „Biogaserzeugung“ wird zur Erzielung hoher Biogasausbeuten eine schnelle und weitgehende Vergärbarkeit der organischen Substanz angestrebt. Während Proteine, Fette, lösliche Kohlenhydrate und Stärke leicht verdaulich sind, gelten Ligninanteile und Lignin-Cellulose-Komplexe als im Biogasprozess sehr schwer oder nicht abbaubar und mindern die Methanausbeute (WEILAND, 2001).

Die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung des Erntegutes der einzelnen Sorghumsorten waren als gering einzuschätzen (Anlage 33). Hingegen gab es zwischen den Mais- und Sorghumsilagen größere Differenzierungen, vor allem hinsichtlich des Gehaltes an Rohnährstoffen und dem Lignin-Cellulose-Anteil im Substrat (Abb. 29).

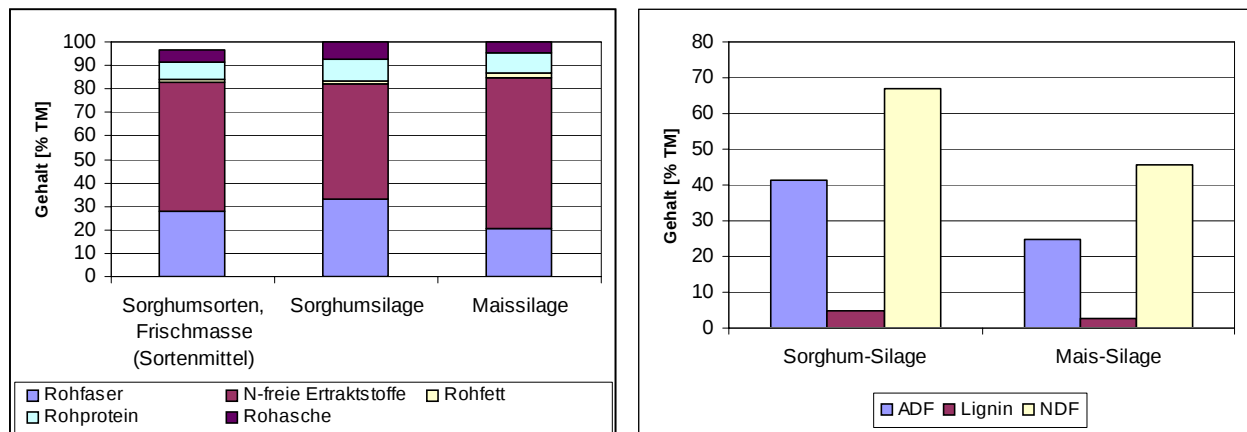


Abbildung 29: Rohnährstoffe (Weenders-Analyse) der frisch geernteten Hirsen (Sortenmittel), der Hirse- und Maissilage sowie die Faseranteile der Silagen am Standort Pahren

Die höheren Faseranteile sowie geringeren Anteile der leicht verdaulichen Rohnährstoffe der Sorghum-Silage könnten die geringere Biogasausbeute der Hirsen gegenüber dem Mais begründen (Abb. 30).

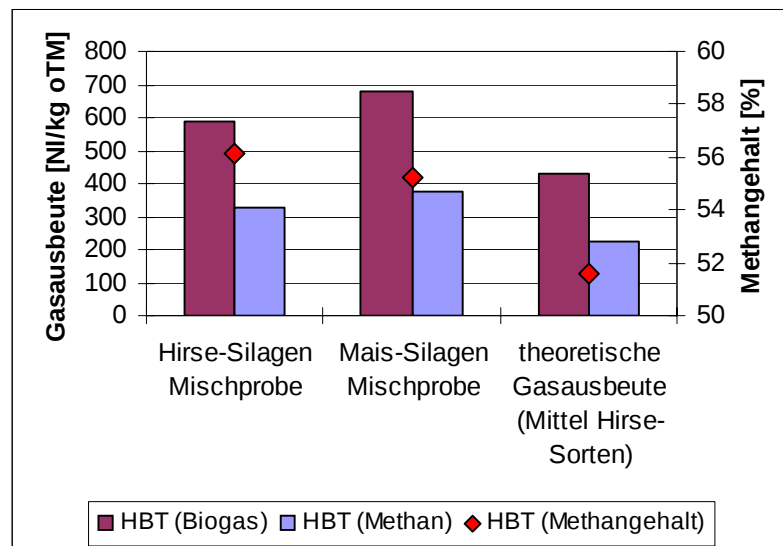


Abbildung 30: Biogasausbeuten der Sorghum- und Maissilage in Pahren

Die Schätzung der Biogas- bzw. Methanausbeute anhand der Rohnährstoffe und Verdauungsquotienten (SCHATTAUER und WEILAND, 2006) ergab deutlich niedrigere Ausbeuten als der Hohenheimer Biogastest.

Die günstige Zusammensetzung des Gärsäurespektrums und der pH-Wert um 4,2 waren bei beiden Silagen positiv zu bewerten und unterstrichen die hohe Lagerstabilität beider Silagen. Die höheren Ethanol-Gehalte in der Sorghum-Silage ließen aber eine Hefeaktivität vermuten. Die in den Silagen ermittelten Gehalte an Makro- und Mikronährstoffen waren in der Hirsesilage zumeist höher (Anlage 34). Inwieweit diese den Gärprozess fördern oder hemmen wird derzeit noch kontrovers diskutiert.

2.1.3 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

Im Modellversuch mit Kleinlysimetern zeigte sich in allen 3 Versuchsjahren, dass Sorghum bicolor, Sorte *Goliath* bei optimaler Wasserversorgung höhere Erträge als Energiemais, Sorte *Atletico* liefert und die Wassernutzungseffizienz besser ist. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen ZSEMBELI et al., 2011. Sie fanden, dass Sorghum bicolor, Sorte *Sucrosorgho* im Vergleich zu einer Maishybride (PR37F73) einen um 54 % höheren Ertrag, erzielt dafür aber nur 10 % mehr Wasser verbraucht. Beide erhalten die gleiche Wassermenge und sind gemessen am ET/Wasserinput-Verhältnis mit 105 % bei Mais und 117 % bei Sorghum optimal mit Wasser versorgt.

Mit abnehmender Wasserversorgung fällt der Ertrag von *Sorghum bicolor* stärker als der von Energiemais und die Wassernutzungseffizienz von *Sorghum bicolor* wird ab einem Wasserangebot von 0,3 PET auf dem Sandboden ungünstiger als die von Energiemais. Beide Kulturen erhielten in den Jahren 2009 und 2010 entsprechend ihres unterschiedlichen Wasserbedarfes unterschiedliche Wassermengen. In der 1,0 PET-Variante bekommt *Sorghum bicolor* das 1,5 fache an Wasser im Vergleich zum Mais. Der Wasserbedarf für *Sorghum bicolor* leitet sich 2009 aus den Verdunstungsmessungen der parallel auf den wägbaren Feldlysimetern angebauten Sorghumhirsen ab, der von Energiemais aus Berechnungen mit dem Verdunstungsmodell VERD, das mit Verdunstungswerten der Feldlysimeter für Mais parametrisiert ist. Im Jahr 2010 erfolgt die Berechnung für beide Kulturen mit dem Verdunstungsmodell VERD, das auch mit den Messwerten für *Sorghum* parametrisiert worden ist. Die reduzierten Wasserstufen erhalten jeweils 60 und 30 bzw. 20 % der potenziellen Evapotranspiration der beiden Fruchtarten. Da *Sorghum bicolor* in der 0,3/ 0,2-PET-Stufe auf dem Sandboden mit geringstem Ertrag und geringerer Wassernutzungseffizienz im Vergleich zu Energiemais, ihren Wasserbedarf weniger als Mais durch Aufnahme von Bodenwasser decken konnte und ihr damit die gleiche Wassermenge zur Verfügung stand wie Mais, hat in dieser trockensten Stufe für *Sorghum bicolor* ein stärkerer Trockenstress bestanden als für Mais. Insofern ist der Vergleich nicht ganz korrekt. Das ändert aber nichts an der Aussage, dass die Wassernutzungseffizienz von *Sorghum bicolor* mit geringer werdendem Wasserangebot sinkt.

Die Ergebnisse der Feldlysimeter bestätigen diesen Trend. Unter weitgehend potenziellen Verdunstungsbedingungen durch Verabreichung von 165 mm Zusatzwasser zuzüglich 281 mm Niederschlag und Aufrechterhaltung eines Bodenwassergehaltes von etwa 80 % nFK im Wurzelraum wird für *Sorghum bicolor* ein Transpirationskoeffizient von 184 kg H₂O je kg TM erzielt. Der Wasserverbrauch in der Gesamtwachstumsperiode beläuft sich auf 568 mm. ZSEMBELI et al., 2011 ermittelten für *Sorghum bicolor*, Sorte *Sucrosorgho* bei optimaler Wasserversorgung einen vergleichbaren Wert von 533 mm. Mit geringer werdendem Wasserangebot aus Niederschlag und Bodenwasser steigt der Transpirationskoeffizient auf dem Braunerde-Tschernosem auf 229 und auf der Para-Rendzina auf 242 kg H₂O je kg TM an. Das heißt die Wassernutzungseffizienz sinkt, der Transpirationskoeffizient ist der reziproke Wert zur Definition der Wassernutzungseffizienz.

Die Wasser-Ertrags-Beziehung stellt das unterschiedliche Ertragsbildungspotenzial der beiden Kulturen in Abhängigkeit vom Faktor Wasser deutlich dar. Bei einem Wasserangebot von etwa 300 mm erzielen beide den gleichen Ertrag, bei höherem Angebot produziert *Sorghum* mehr Trockenmasse als Mais, bei geringerem reduziert *Sorghum* den Trockenmasse-Ertrag stärker als Mais.

SCHITTENHELM (2009) kommt in seinen Untersuchungen zu einem anderen Ergebnis. *Sorghum bicolor*, Sorte *Sucrosorgho* 506, ist unter starkem Trockenstress (Notfallbewässerung) dem Mais der Sorte *Atletico* im Ertrag und in der Wassernutzungseffizienz überlegen. Auch MASON et al. (1983) stellen fest, dass Hirse auf Trockenstress mit deutlich geringeren Ertragsdepressionen reagiert als Mais, allerdings unter den klimatischen Verhältnissen in Australien mit höheren Temperaturen. Mehrere Autoren weisen daraufhin, dass *Sorghum bicolor* bei extrem trockenen Bedingungen, unter denen der Mais vertrocknet, in eine Trockenstarre fällt und bei wieder einsetzender Wasserversorgung weiter wächst.

Der mit den Feldlysimetern ermittelte Wasserverbrauch von *Sorghum bicolor* in der Hauptwachstumsperiode (01.07. bis 01.10.2009) beträgt unter potenziellen Verdunstungsbedingungen (1,0 PET) 489 mm. Das entspricht einem Tageswasserverbrauch von 5,26 mm. In den beiden Wasserstufen würde *Sorghum bicolor* bei 0,6 PET 293 mm (3,15 mm Tageswasserverbrauch) und bei 0,3 PET 146 mm (1,58 mm Tageswasserverbrauch) zur Verfügung stehen. Der natürliche Niederschlag 2009 vom 01.07. bis 01.10.2009 beläuft sich am Standort Buttstedt auf 146 mm. Das bedeutet, die im Jahr 2009 in der Hauptwachstumsperiode von *Sorghum bicolor* am Standort Buttstedt gefallene Niederschlagsmenge entspricht der Wasserversorgung in der 0,3 PET-Variante. Im vieljährigen Mittel wird für den Zeitraum vom 1. Juli bis 1. Oktober für den Standort Buttstedt eine Niederschlagsmenge von 171 mm angegeben. Damit werden unter normalen Niederschlagsverhältnissen nur 36 % des Wasserbedarfes von *Sorghum bicolor* gedeckt. Die 0,3-PET-Variante entspricht damit etwa mittleren Trockenverhältnissen in einer Region im mitteldeutschen Trockengebiet. Selbst unter niederschlagsnormalen Verhältnissen wäre es nicht mehr als eine 0,4-PET-Wasserversorgung und unter diesen Bedingungen ist nach

bisherigem Kenntnisstand die Wassernutzungseffizienz von Sorghum bicolor schlechter als die von Mais. Eine Wasserversorgung im Bereich von 1,0 PET ist für das mitteldeutsche Trockengebiet eher unwahrscheinlich.

Es ist zu vermuten, dass in dem Experiment von SCHITTENHELM deutlich trockenere Verhältnisse als im eigenen Versuch mit 0,2/0,3 PET geprüft worden sind. Weiter ist unklar, inwieweit die häufig zu kühlen Temperaturen für Sorghum bicolor während der Jugendperiode die Wassernutzungseffizienz beeinflusst haben. Zumindest weisen phänologische Beobachtungen auf eine sehr langsame Jungpflanzenentwicklung, offenbar aufgrund der für Sorghum in der gemäßigten Klimaregion nicht ausreichenden Temperaturen, die sich am Standort Buttelstedt in den drei Junidekaden auf 14,5 °C, 16,3 °C und 15,8 °C belaufen. In den drei Versuchsjahren sinken die Temperaturen zwischen Aussaat und 8-Blatt-Stadium, dem Beginn der Hauptwachstumsperiode bis auf 7,0 °C, 2,1 °C und 2,5 °C. Als Optimaltemperaturen gelten für Sorghum mehr als 12 bis 16 °C.

Auf den Feldlysimetern mit Braunerde-Tschernosem aus Löss, der günstige Bedingungen für die Durchwurzelung und Wasserversorgung bietet, zeigt sich eine andere Eigenschaft von Sorghum bicolor. Im Unterschied zum Mais ist das Aneignungsvermögen von Bodenwasser stärker ausgebildet. Im Versuchsjahr 2009 nimmt Sorghum bicolor 170 mm aus dem Bodenwasservorrat auf und verbraucht während der Hauptwachstumsperiode 412 mm Wasser. Damit wird eine Wasserversorgung von 0,84 PET realisiert. Die Aufnahme von 170 mm Bodenwasser bedeutet, dass der Bodenwassergehalt in der 200 cm-Bodenzone fast bis zum Welkepunkt ausgeschöpft wird. Der Schwellenwert, ab dem die Evapotranspiration eingeschränkt wird, liegt aber höher, denn die Bodenwasserausschöpfung bis zum ÄWP ist mit einer Einschränkung der Biomassebildung einhergegangen. Die Wassernutzungseffizienz von Sorghum bicolor fällt unter diesen Bedingungen unter dem Wert einer Wasserversorgung, die einen Bodenwassergehalt von etwa 80 % der nutzbaren Feldkapazität aufrechterhält, d. h. der Transpirationskoeffizient liegt höher (229 versus 184 kg H₂O/kg TM).

Die im Kleinlysimeterversuch 2009 und 2010 auf den Sandböden beobachtete nicht vollständige Ausschöpfung des Bodenwassers in 80 bis 120 cm Tiefe trotz eines hohen Wasserdefizites deutet daraufhin, dass das Wurzelwachstum auf schwer durchdringbaren Bodenzonen, die in den Sandböden der Düben-Dahlemer Heide in Form von Tonlagen oder Fe-Konkretionen häufig vorkommen begrenzt sein kann. Im Folgeprojekt soll das Bodenwasseraneignungsvermögen verschiedener Sorghumarten und -sorten auf zwei Böden mit unterschiedlicher Durchwurzelbarkeit und Wasserbereitstellungsvermögen deshalb näher untersucht werden.

Unter dem Einfluss empfehlungskonformer N-Düngung mit N-Sollwerten von 220 kg/ha für Energiemais und 230 kg/ha für Sorghum bicolor wird im Modellversuch mit Kleinlysimetern in allen Wasserversorgungsstufen ein negativer Stickstoffsaldo erreicht. Die N-Salden fallen unter potenziellen Verdunstungsbedingungen beim Energiemais mit -95 kg/ha auf Löss und -73 kg/ha auf Sand stärker negativ aus als bei Sorghum bicolor mit -49 kg/ha auf Löss und -56 kg/ha auf Sand. Das unterstreicht das größere N-Aufnahmevermögen von Mais, ist aber auch die Folge eines nach Vorfrucht Mais um etwa 20 kg/ha höheren N_{min}-Gehalte im Boden im Frühjahr. Mit geringer werdendem Wasserangebot nehmen die N-Salden zu, bleiben aber immer noch negativ. Damit übereinstimmend liegen auch die N-Salden von Sorghum bicolor im Lysimeterversuch mit -26 bis -49 kg/ha im negativen Bereich. Das bestätigt das Potenzial empfehlungskonformer N-Düngung, auch für Sorghum bicolor die N-Auswaschung aus der Wurzelzone zu minimieren.

Unter Sorghum bicolor waren die Nitratkonzentration des Sickerwassers und die N-Auswaschung in den ersten beiden Versuchsjahren deutlich geringer als unter Mais, wobei eine an den pflanzlichen Wasserbedarf ausgerichtete Wasserzufuhr jeweils den geringsten N-Austrag zur Folge hatte. Der Sandboden zeigt aufgrund seines geringeren Wasserspeichervermögens erwartungsgemäß ein höheres N-Verlagerungsrisiko. Die Beobachtung höherer N-Auswaschung unter Mais im Vergleich zu Sorghum relativiert sich im dritten Versuchsjahr. Die kaum noch erkennbaren Unterschiede in der N-Auswaschung und der deutlich geringere Betrag der N-Auswaschung spiegeln die Wirkung der unter beiden Kulturen beobachteten negativen N-Salden wider. Dennoch deuten die anfangs niedrigeren Nitratkonzentrationen des Sickerwassers unter Sorghum auf das Potenzial dieser Pflanze, mit dem im Vergleich zu Mais tiefer reichenden Wurzelsystem mehr N aus dem Unterboden aufzunehmen und damit einen zusätzli-

chen Beitrag für die Minimierung der N-Auswaschung aus der Wurzelzone zu leisten. Wie von Röhricht et. al. (2008) festgestellt, weisen Sorghumhirsen eine für den gärchemischen Prozess ungünstigere Zusammensetzung der Rohnährstoffe und der Fraktion der Kohlenhydrate auf. Der beschriebene höhere und schwerer abbaubare Rohfasergehalt und der niedrigere Anteil an leicht umsetzbaren stickstofffreien Extraktstoffen bestätigte sich auch in den Ergebnissen der Pflanzen auf den Kleinlysimetern. Mais weist im Mittel der Versuchsjahre, Boden und Wasserstufen einen Rohfasergehalt von 21,6 % i. d. TS auf, Sorghum bicolor von 28,9 % i.d.TS. Der Gehalt an NfE beträgt für Mais 64,6 und für Sorghum bicolor 59,8 %. Für Mais wird im Kleinlysimeterversuch eine deutlich höhere theoretische Methanausbeute als für Sorghum bicolor ausgewiesen. Aber erst mit der Relation des Trockenmasseertrages ist ein Vergleich der Methanausbeuten zwischen den Kulturen je Flächeneinheit zu kalkulieren. Da die TM-Erträge von Sorghum bicolor im Mittel aller Wasserstufen im Kleinlysimeterversuch höher sind und der Methanertrag der TM-Ertragsrelation folgt gibt es keine Unterschiede in der mittleren Methangasausbeute je Flächeneinheit zwischen den beiden Kulturen.

Die Ergebnisse des Hirseanbaus unter landwirtschaftlichen Praxisbedingungen in Pahren unterstreichen die Notwendigkeit einer sorgfältigen Saatbettbereitung für die feinkörnige Hirse (TKM um 30 g) sowie einer rechtzeitigen Herbizidbehandlung (BBCH 13-15). Die im Betrieb seit 1994 praktizierte pfluglose Bodenbearbeitung in Verbindung mit der beim Mais erfolgreich eingesetzten Aussaattechnik (Airseeder) erwies sich für die Etablierung eines Sorghumbestandes als suboptimal, die angestrebten Bestandesdichten wurden nicht erreicht. Der unterlassene oder zu späte Herbizideinsatz führte neben der geringen Bestandesdichte im ersten Versuchsjahr zu sehr geringen Erträgen, im zweiten Versuchsjahr zum Umbruch des Jungpflanzenbestandes, da kein verwertbarer Aufwuchs mehr zu erwarten war. Im dritten Versuchsjahr mit optimaler Unkrautbekämpfung hätte der Ertrag bei besserer Bestandesdichte höher ausfallen können, was die ermittelten Einzelpflanzengewichte bestätigen.

Interessant ist, dass die mit dem HBT ermittelte Biogasausbeute der Sorghumsilage um 40 % höher war als der theoretische Schätzwert.

2.1.4 Schlussfolgerungen

- Sorghum bicolor hat einen größeren Wasserbedarf als Mais und setzt den Faktor Wasser im Bereich optimaler Wasserversorgung in einen höheren Ertrag um, sichtbar an einer besseren Wassernutzungseffizienz. Mit abnehmendem Wasserangebot geht diese Vorzüglichkeit zurück und wird die Wassernutzungseffizienz von Mais günstiger. Unter den Niederschlagsverhältnissen im mitteldeutschen Trockengebiet, ist davon auszugehen, dass die Wassernutzungseffizienz von Sorghum bicolor geringer als die von Mais ist, was die in der Regel niedrigen Trockenmasse-Erträge von Sorghum bicolor in den Feldversuchen erklärt.
- Diese im Vergleich zu Untersuchungen im wärmeren Südaustralien widersprüchlichen Ergebnisse sind vermutlich auf die für das Pflanzenwachstum von Sorghum unteroptimalen Temperaturen, vor allem während der Jungpflanzenentwicklung zurückzuführen. Für die züchterische Weiterentwicklung der Sorghumarten und -sorten könnte die Auswahl von Sorten mit einer größeren Toleranz gegenüber der in unseren Regionen vorkommenden Temperaturen von Vorteil sein.
- Der häufig vorzufindenden Sortenbeschreibung, dass Sorghum bicolor im Vergleich zu Mais eine um 20 bis 30 % geringere Wassermenge für vergleichbare Erträge benötigt, kann zumindest für die Sorte *Goliath* nicht uneingeschränkt zugestimmt werden.
- Die andererseits in Trockenjahren beobachtete Ertragsüberlegenheit von Sorghum ist eher mit dem besseren Bodenwasseraneignungsvermögen gegenüber Mais zu erklären. Inwieweit diese Eigenschaft von Vorteil sein kann, hängt von der Wasserbereitstellung der Böden ab und muss in Anbauempfehlungen für den Landwirt umgesetzt werden.
- In einem der drei Jahre war der Bodenwasserspeicher nach Anbau von Sorghum nicht vollständig aufgefüllt. Der Einfluss von Sorghum auf die Wasserversorgung der Folgefrucht aus dem Bodenwasserspeicher muss unter dem Aspekt unterschiedlicher Wasserbereitstellung des Standortes beachtet werden.
- Die hier dargelegten Erkenntnisse gelten für die Sorghum bicolor Sorte *Goliath* mit hohem Ertragsniveau, die derzeit aufgrund ihrer Lagerneigung nicht mehr zu den besonders empfeh-

lungswerten Sorten für die Praxis zählt. Von den Sorghum sudanense-Arten ist bekannt, dass sie eine kürzere Wachstumszeit benötigen und als ertragsschwächer gelten. Die Ermittlung von Wasser-Ertrags-Beziehungen für diese Gruppe, die in der Praxis verbreiteter ist, wird für erforderlich gehalten. Inzwischen hat sich das Sortenspektrum erweitert und ist die Frage zu klären, ob auch neuere Sorten von Sorghum bicolor- und Sorghum sudanense-Hybriden, die an die Temperaturverhältnisse schon besser angepasst sind, den Ertrag bei abnehmenden Wasserangebot in gleichem Maße reduzieren wie die Sorte *Goliath* und das gleiche Bodenwasseraneignungsvermögen entwickeln.

- Das Bodenwasseraneignungsvermögen ist für die Sorghum bicolor, Sorte *Goliath* bisher nur auf einem tiefgründigen Lösslehm mit günstigen Bedingungen für die Durchwurzelung ermittelt worden. Für die Ausweitung von Anbauempfehlungen auf andere Standorte sollte diese Eigenschaft von Sorghumarten und -sorten auch unter ungünstigeren Bedingungen der Durchwurzelung und der Wasserbereitstellung geprüft werden.
- Der N-Sollwert, der bisher für Sorghumhirsen angenommen worden ist, liegt auf hohem Niveau und begründet die Annahme einer dadurch größeren Lagerneigung. Die Höhe des N-Sollwertes wird derzeit durch N-Steigerungsversuche in einem bereits bestätigten Folgeprojekt überprüft. Inwiefern durch geringere N-Sollwerte N-Salden und N-Auswaschung beeinflusst werden ist unklar und sollte durch Fortsetzung der bereits laufenden Lysimeterversuche weiter bearbeitet werden. Die anfangs beobachtete Reduzierung der N-Auswaschung unter Sorghum hat sich im dritten Versuchsjahr nicht wieder bestätigt. Weitere Untersuchungsjahre müssen zeigen, ob diese Vorzüglichkeit tatsächlich besteht.
- Fehlgeschlagene Versuche der Etablierung von Sorghum im Praxisbetrieb zeigen, dass besondere Sorgfalt auf die Saatbettbereitung für die Aussaat der feinkörnigen Hirse und die Unkrautregulierung der im Jugendstadium unter unseren Temperaturbedingungen nur zögernd aufwachsenden Pflanzenbestände gelegt wird. Der theoretisch ermittelte Biogasertrag ist geringer als beim Mais. Ein Vergleich dieser Berechnungsmethode mit dem Hohenheimer Biogastest hat aber gezeigt, dass die tatsächliche Ausbeute höher liegt. Trotzdem bleibt es dabei, dass Sorghum ihr Ertragspotenzial ausschöpfen muss, um einen gleich hohen Biogasertrag zu erzielen.

2.1.5 Zusammenfassung

Derzeit fehlen für den gemäßigten Klimaraum Angaben zum Wasserverbrauch und zur Wasser- und Nährstoffnutzungseffizienz von Sorghumhirsen. Lysimeterversuche sind geeignet, dieser Fragestellung nachzugehen.

In Kleinlysimetern wurden in drei aufeinanderfolgenden Jahren die Sorghum bicolor-Sorte *Goliath* und als Referenzpflanze die Energiemaissorte *Atletico* auf zwei verschiedenen Böden (Braunerde-Tschernosem aus Löss, Braunerde aus Sand) mit gestaffelter Wasserversorgung unter Modellbedingungen geprüft. Gleichzeitig wurde 2009 zur Ermittlung der aktuellen und potenziellen Verdunstung, der Wassernutzungseffizienz und des Bodenwasseraneignungsvermögens von Sorghum bicolor die Feldlysimeteranlage Buttstedt genutzt.

Sorghum bicolor produziert unter potenziellen Verdunstungsbedingungen und mitteleuropäischem Binnenlandklima sehr hohe Erträge, deutlich über Energiemais. Das erfordert aber auch große Wassermengen, die diese Kultur effizienter als der Mais nutzt. Die Wassernutzungseffizienz von Sorghum bicolor ist bei ausreichender Wasserversorgung besser als die von Energiemais. Mit abnehmendem Wasserangebot geht diese Vorzüglichkeit zurück. Unter den Niederschlagsverhältnissen im mitteleuropäischen Trockengebiet ist die Wassernutzungseffizienz von Energiemais günstiger im Vergleich zu Sorghum bicolor. Die Erträge können aber etwa gleich groß sein. Dafür ist Sorghum bicolor mehr als Mais in der Lage, ihren Wasserbedarf durch Aufnahme von Bodenwasser zu decken.

Im Modellversuch mit Kleinlysimetern war die Nitratkonzentration des Sickerwassers in den ersten beiden Versuchsjahren im Sandboden fast doppelt so hoch wie im Lössboden, auf beiden Böden unter Hirse jedoch deutlich geringer als unter Mais. Unter dem Einfluss empfehlungskonformer N-Düngung sind die N-Salden beider Kulturen in allen drei Jahren negativ. Der deutlich geringere N-Austrag im dritten Versuchsjahr und die kaum noch erkennbaren Unterschiede zwischen den Kulturen zeigen die Wirkung durchgehend negativer N-Salden. Dennoch hat

Sorghum bicolor durch ihr tiefer reichendes Wurzelsystem dazu beigetragen, die anfangs hohen N-Austräge zusätzlich zu reduzieren. Hinsichtlich der prozentualen Zusammensetzung der wertgebenden Inhaltsstoffe wies der Energiemais für den gärchemischen Prozess und die Methanbildung günstigere Werte auf als Sorghum bicolor. Die theoretisch berechnete Methan- ausbeute des Energiemaisses lag in beiden Versuchsjahren um 20 % höher als die von Sorghum bicolor. Da der Methanertrag der Trockenmasseertragsrelation folgt, erreichten beide Kulturen im Modellversuch mit Kleinlysimetern bedingt durch den höheren Sorghumertrag ähnliche Ergebnisse.

2.1.6 Literaturverzeichnis

BREMNER, P. M.; PRESTON, C.; FAZEKAS de St. GROTH (1986): A. Field Comparison of Sunflower and Sorghum in a Long Drying Cycle. I Water Extraction. In: Aust. J. Agric. Res. 37, S. 483-493

DLG Futterwerttabellen für Wiederkäuer (1997): Universität Hohenheim. 7. Auflage. DLG-Verlag Frankfurt am Main

HELLRIEGEL, H. (1983): Beiträge zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Ackerbaues. Braunschweig, 1983

KNOBLAUCH, S. (2011): Ermittlung der Bodenwasserbereitstellung einer skelettreichen Para-Rendzina aus unterem Keuper im Vergleich zum Braunerde-Tschernosem aus Löss mit Hilfe der wägbaren Feldlysimeter Butteldstedt. In: Tagungsband 14, Gumpensteiner Lysimetertagung 2011, S. 83-90

KTBL (2005): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, Arbeitsgruppe „Biogaserträge“

MASON, W. K. et al. (1983): Water Balance of Three Irrigated Crops on Fine-Textured Soils of the Riverine Plain. In: Aust. J. Agric. Res., 34, S. 183-191.

RÖHRICHT, C.; ZANDER, D.; ADAM, L. (2008): Alternativen zum Mais? Anbau von Sorghum- hirsen für die Bigasproduktion. Neue Landwirtschaft 1/2008, S. 45-47

ROTH, D., GÜNTHER, R., KNOBLAUCH, S. und MICHEL, H. (2005): Wasserhaushaltsgrößen von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. Ergebnisse der TLL-Lysimeterstation. In Schriften- reihe der TLL, Heft 1. 159 S.

SCHATTAUER, A., WEILAND, P. (2006): Grundlagen der anaeroben Fermentation. Handrei- chung Biogasgewinnung und -nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow S. 25-33

SCHITTENHELM, S.; KRUSE, S. (2009): Wassernutzungseffizienz von Energiepflanzen. 2. Symposium Energiepflanzen am 17./18. November 2009 in Berlin

WEILAND, P. (2001): Grundlagen der Methangärung - Biologie und Substrate. In Biogas als regenerative Energie - Stand und Perspektiven. VDI Berichte Nr. 1620. VDI Gesellschaft Energietechnik. Tagung am 19. und 20 Juni 2001 in Hannover

ZSEMBELI, J.; KOVÁCS, G.; MÁNDOKI, A. (2011): Water use efficiency of maize and different sorghum hybrids under lysimeter conditions. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung 2011, S. 227-230

2.2 Verwertung

- Die Ergebnisse der potenziellen Evapotranspiration, des Verlaufs, der Tiefe und Intensität der Bodenwasseraneignung von Sorghum bic., Sorte *Goliath* sowie des Schwellenwertes der Bodenfeuchte werden in Verdunstungsmodellen umgesetzt.
- Mit Hilfe dieses um Sorghum bicolor – Parameter erweiterten Berechnungsverfahrens können die Ergebnisse Eingang in Anbauempfehlungen für den Landwirt finden. Der Vorteil von Sorghum bicolor, einer größeren Bodenwasseraneignung kann sich nur auf Standorten mit entsprechender Wasserbereitstellung auszahlen. Dabei ist zu beachten, dass der nachfolgenden Kultur noch genug Bodenwasser zur Verfügung gestellt werden kann.

- Das Ergebnis einer geringeren Wassernutzungseffizienz von *Sorghum bicolor*, Sorte *Goliath* im Bereich geringer Wasserversorgung, wie sie unter den Bedingungen im mitteldeutschen Trockengebiet der Fall ist, relativiert die Aussage der Pflanzenzüchter, dass Sorghum für den gleichen Ertrag weniger Wasser als Mais benötigt und gibt den Hinweis, nach Sorten zu suchen, die eine bessere Wassernutzungseffizienz entwickeln. Eine geringere Anfälligkeit gegenüber niedrigen Temperaturen könnte dabei eine Rolle spielen.
- Empfehlungskonforme N-Düngung mit einem N-Sollwert von 220 kg/ha hat über negative N-Salden einen Beitrag für niedrige N-Auswaschung leisten können. Die im dritten Jahr deutlich sinkende N-Auswaschung bestätigt diese Annahme.
- Die Ergebnisse werden für die Interpretation der Prüfung weiterer Sorghumhybride und -sorten im bereits bestätigten Folgeprojekt „Pflanzenbauliche, Ökonomische und Ökologische Bewertung von Sorghumarten und -hybriden als Energiepflanzen“ Eingang finden.
- Insbesondere für die Bewertung der N-Auswaschung unter Sorghum sind die bisher vorliegenden Ergebnisse der drei Versuchsjahre eine wichtige Randbedingung für die Interpretation folgender Messreihen.

2.3 Erkenntnisse von Dritten

- SCHITTENHELM et al. (2009):
Unter Bedingung optimaler Wasserversorgung (60 bis 80 % nFK Bodenfeuchte) ermitteln SCHITTENHELM et al. (2009) für Mais, Sorte *Aletico* und Futterhirse, Sorte *Sucrosorgho* vergleichbare Erträge (22,5 und 22,2 t ha⁻¹ Trockenmasse) und Wassernutzungseffizienzen (WNE) (60 und 57 kg ha⁻¹ mm). In eigenen Untersuchungen (Feldlysimeter) erzielt Futterhirse, Sorte *Goliath* unter optimaler Wasserversorgung (60 bis 80 % nFK, 1,0 PET) 2009 einen Trockenmasse-Ertrag von 30,2 t ha⁻¹ und fällt die WNE mit 54 kg ha⁻¹ mm⁻¹ etwas ungünstiger aus. Unter Trockenstress (15 bis 30 % nFK) liegt der Trockenmasse-Ertrag von Mais unter dem von Futterhirse und verwertet Futterhirse das Wasser effizienter als Mais (WNE Futterhirse: 96 kg ha⁻¹ mm⁻¹; WNE Mais: 80 kg ha⁻¹ mm⁻¹). In eigenen Untersuchungen (Modellversuch mit Kleinlysimetern) senkt Futterhirse den Trockenmasse-Ertrag unter Trockenstress (0,2 bzw. 0,3 PET) stärker als Mais.
- ZSEMBELI et al. (2011):
Sorghum bicolor, Sorte *Sucrosorgho* verbraucht bei optimaler Wasserversorgung 533 mm. Der in den eigenen Untersuchungen ermittelte Wert von 568 mm für *Sorghum bicolor*, Sorte *Goliath* liegt in der gleichen Größenordnung. *Sorghum bicolor*, Sorte *Sucrosorgho* erzielt im Vergleich zur Maishybride (PR 37F73) einen um 54 % höheren Ertrag und verbraucht dafür aber nur 10 % mehr Wasser. Dieses Ergebnis bestätigt den Befund eigener Untersuchungen einer besseren Wassernutzungseffizienz von *Sorghum bicolor* im Bereich optimaler Wasserversorgung im Vergleich zu Energiemais.

2.4 Veröffentlichungen

WAGNER, M.; KNOBLAUCH, S. (2011): Wassernutzungseffizienz und Wasserverbrauch von *Sorghum bicolor* im Vergleich zu Energiemais. In: Tagungsband 14. Gumpensteiner Lysimeter-tagung 2011, S. 215-218

Anlagen

Anlage 1

N-Sollwerte, N-Düngung und N-Entzüge der beiden Kulturen in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung in den einzelnen Versuchsjahren

N-Düngung										
	Boden	PET	N-Sollwert	N _{min} 0...60 cm	1. Gabe	2. Gabe	TME	N-Gehalt	N-Entzug	N-Saldo
			kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	dt/ha	% TM	kg/ha	kg/ha
2008										
					25.06.	09.07.				
Energie-mais	Löss	1,0	200	33	70	100	162	1,21	195	-25,4
		0,6		33			164	1,21	199	-28,6
		0,3		33			135	1,13	152	17,7
	Sand	1,0	200	63	70	70	162	1,34	217	-77,2
		0,6		63			151	1,32	198	-57,6
		0,3		63			129	1,28	165	-24,5
					25.06.	09.07.				
	Sorghum bicolor	Löss	1,0	200	33	70	100	246	0,81	193
0,6			33		208			0,88	183	-13,3
0,3			33		160			0,93	148	22,5
Sand		1,0	200	64	70	70	189	1,12	209	-68,8
		0,6		64			140	1,33	184	-43,9
		0,3		64			89	1,60	141	-1,0
2009										
				12.05.	09.06.					
Energie-mais	Löss	1,0	220	77	100	34	254	1,16	294	-159,8
		0,6		95			243	1,17	283	-149,3
		0,3		85			233	1,23	281	-147,4
	Sand	1,0	220	54	100	57	254	1,01	254	-96,6
		0,6		76			255	1,04	264	-107,3
		0,3		60			200	1,13	227	-70,1
				07.05.	17.06.					
Sorghum bicolor	Löss	1,0	230	67	100	66	458	0,48	220	-54,0
		0,6		67			369	0,61	223	-57,1
		0,3		59			259	0,87	222	-56,5
	Sand	1,0	230	59	100	83	397	0,59	232	-48,6
		0,6		30			277	0,77	214	-31,5
		0,3		53			162	1,22	194	-10,8
2010										
				26.04.	16.06.					
Energie-mais	Löss	1,0	220	68	100	40	283	0,85	240	-99,8
		0,6		66			258	0,92	237	-97,4
		0,3		51			168	1,14	187	-46,9
	Sand	1,0	220	45	100	65	271	0,77	209	-44,3
		0,6		72			245	0,84	206	-40,6
		0,3		55			196	1,04	204	-39,1
				25.05.	30.06.					
Sorghum bicolor	Löss	1,0	230	25	100	90	376	0,70	260	-70,4
		0,6		23			344	0,69	236	-45,5
		0,3		35			217	0,88	189	0,6
	Sand	1,0	230	45	100	75	342	0,66	226	-50,9
		0,6		62			264	0,79	208	-32,9
		0,3		62			114	1,34	147	28,3

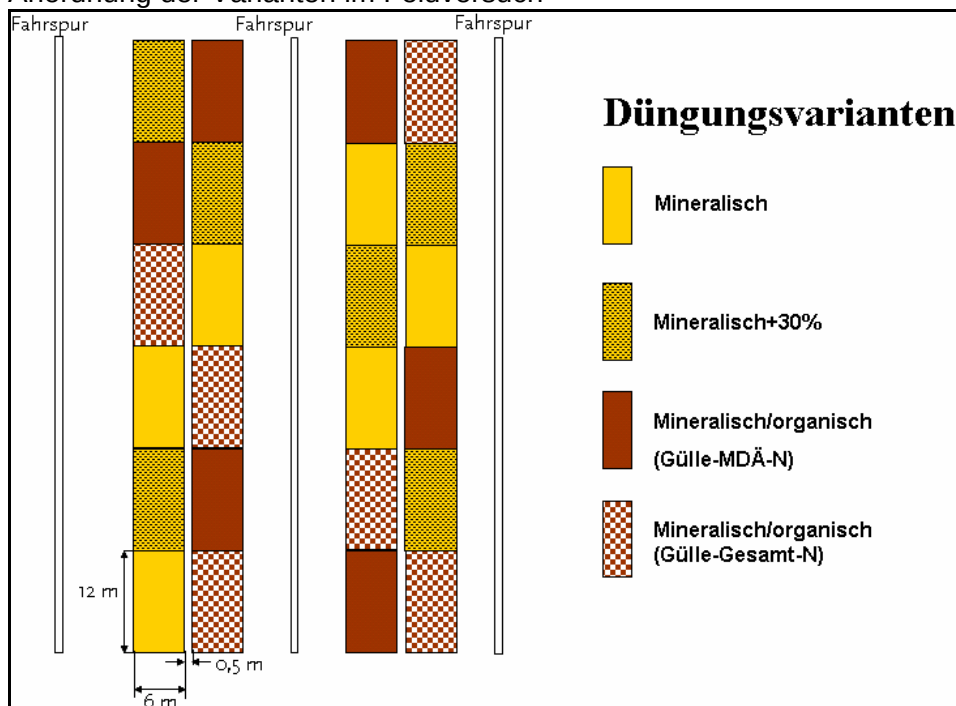
Anlage 2

Analysemethoden der in der TLL untersuchten Parameter

Parameter	Verfahren
Trockenmasse	Trockenschrank
Rohasche	Trockenveraschung im Muffelofen
Rohfett	Petroletherextraktion nach HCL-Hydrolyse
Rohfaser	Fibertec
Rohprotein	Kjeldahldestillation
Gesamtzucker	Luff-Schoorl nach ethanolischer Extraktion
N-freie-Extraktstoffe	Rechengröße (= TS-(Ra+Rp+Rfa+Rfett)
Ca, P, Na, Mg, K	Röntgenfluoreszenzanalyse
Cu, Mn, Zn, Fe, S, Cl	Röntgenfluoreszenzanalyse
ADF, Lignin, NDF	Fibertec
Stärke	Polarimetrie nach HCl-Auflschluss
ELOS	Cellulasemethode
Ammoniak	Mikrodiffusion u. anschl. Titration mit Schwefelsäure
Gärsäurespektrum	GC im wässrigen Extrakt ohne Methylierung
Methan	Hohenheimer Biogasertragstest
Sickerwasser	
NH ₄	Ammoniumstickstoff mittels Fließanalytik und spektr. Detektion
Nitrat	Ionenchromatographie
Nitrit	Ionenchromatographie
Sulfat	Ionenchromatographie
MRDP	Photometrie (nach Filtration mit Faltenfilter MN 617 G1/4)
pH-Wert	Potentiometrie
Elektrische Leitföh.	Potentiometrie
HCO ₃	Titrimetrie
TP	Photometrie (nach K ₂ S ₂ O ₈ -Auflschluss)
K	mit ICP-OES
Mg	mit ICP-OES

Anlage 3

Anordnung der Varianten im Feldversuch



Anlage 4

Bewirtschaftung der Feldversuche 2009

	Sorghum bicolor (Goliath)	
	Braunerde-Tschernosem (Löss)	Para-Rendzina (unterer Keuper)
Aussaat	15.05.09 37 Körner/m ² , 50 cm Reihenabstand	15.05.09 37 Körner/m ² , 50 cm Reihenabstand
N-Düngung	08.05.09, vor Aussaat, Mineral-N 09.06.09, BBCH 14, Mineral-N 12.06.09, BBCH 16, Gülle-N	05.05.09, vor Aussaat, Mineral-N 09.06.09, BBCH 14, Mineral-N 18.06.09, BBCH 16, Gülle-N
Pflanzenschutz	17.6.09 Gardo Gold, 4 l/ha 0 07.07.09 Karate Zeon, 75 ml/ha 0 13.07.09 Pirimor Gran., 250 g/ha 0 27.07.09 Steward, 125 g/ha	19.06.09 Gardo Gold, 4 l/ha 0 07.07.09 Karate Zeon, 75 ml/ha 0 13.07.09 Pirimor Gran., 250 g/ha 0 27.07.09 Steward, 125 g/ha

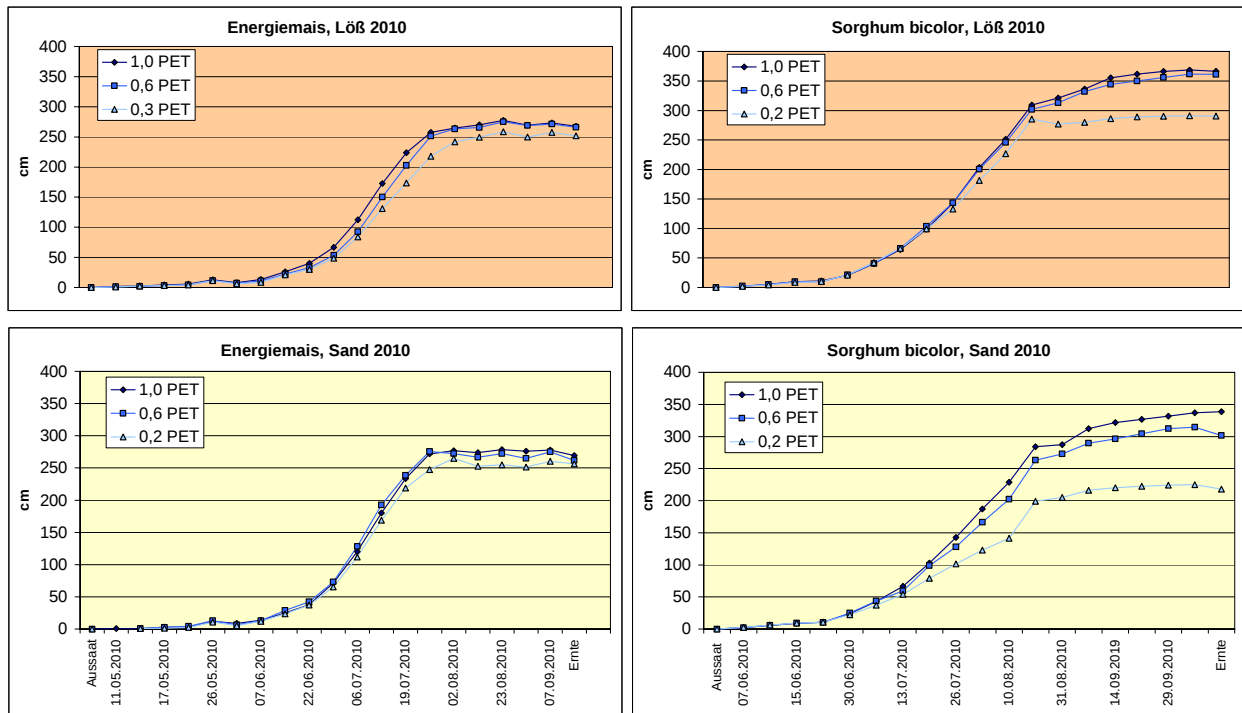
Anlage 5

N-Düngung der Feldversuche 2009

Varianten			N _{min} - pflanzen- verfügbar kg/ha	N-Dünge- Empfehlung kg/ha	N-Düngermenge		
Boden	Düngung				1. Gabe Min-N kg/ha	Gülle-N kg/ha	2. Gabe Min-N kg/ha
Braunerde-Tschernosem	Min-SBA	Lö1	70	160	100		60
Braunerde-Tschernosem	Min-Gülle-MDÄ-N	Lö2	71	194	84	100	10
Braunerde-Tschernosem	Min-SBA +30%	Lö3	72	202	130		72
Braunerde-Tschernosem	Min-Gülle-Ges-N	Lö4	69	161	51	100	10
Para-Rendzina	Min-SBA	K1	57	153	100		53
Para-Rendzina	Min-Gülle-MDÄ-N	K2	58	187	77	100	10
Para-Rendzina	Min-SBA +30%	K3	54	200	130		70
Para-Rendzina	Min-Gülle-Ges-N	K4	56	154	44	100	10

Anlage 6

Wachstumsverlauf der beiden Kulturen in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung im Versuchsjahr 2010 (Mittel aus 4 Wdhlg.)



Anlage 7



Mais (re) und Sorghum bicolor (li) im Kleinlysimeterversuch am 23.06.10



Mais (re) und Sorghum bicolor (li) im Kleinlysimeterversuch am 16.07.10



Mais (re) und Sorghum bicolor (li) im Kleinlysimeterversuch am 10.09.10

Anlage 8

Ausgewählte Boniturparameter der beiden Kulturen zum Erntetermin 2009 und 2010

Energie- mais		Blattanzahl 2009		Halmknotenanzahl 2009		Kolbenansatz 2009	
		Löss	Sand	Löss	Sand	Löss	Sand
	1,0 PET	12	11	12	12	2,3	2
	0,6 PET	12	10	12	12	2,3	1,8
	0,3 PET	11	7	11	11	2,5	1,8
Sorghum bicolor		Blattanzahl 2009		Halmknotenanzahl 2009		Bestockungstrieb 2209	
		Löss	Sand	Löss	Sand	Löss	Sand
	1,0 PET	7	7	12	11	0	0
	0,6 PET	8	9	12	12	0	0
	0,3 PET	9	10	12	12	0	0

Energie- mais		Blattanzahl 2010		Halmknotenanzahl 2010		Kolbenansatz 2010	
		Löss	Sand	Löss	Sand	Löss	Sand
	1,0 PET	9	8	11	12	2,5	1,3
	0,6 PET	9	7	11	12	2,5	1,3
Sorghum bicolor	0,3 PET	10	8	10	11	1,8	1,5
		Blattanzahl 2010		Halmknotenanzahl 2010		Bestockungstrieb 2010	
		Löss	Sand	Löss	Sand	Löss	Sand
	1,0 PET	10	9	14	15	0	0
	0,6 PET	9	9	14	13	0	0
	0,3 PET	8	9	10	9	0	0

Blattanzahl 2009/2010

Bei den Maispflanzen war bis zum Anfang Juli eine kontinuierliche Zunahme der Blattanzahl zu verzeichnen. Es wurden auf beiden Böden maximal 14 grüne Blätter bonitiert. Danach starben vermehrt Blätter der unteren Blattetage ab. Auf dem Löss setzte dieser Prozess bei 1,0 PET im BBCH 42 drei Wochen früher ein als bei 0,6 und 0,3/0,2 PET (BBCH 64). Auf der trockenen Variante (0,3 PET) war zur Ernte 2009 im Mittel 1 Blatt/Pflanze weniger zu verzeichnen, 2010 gab es diesen Trend nicht.

Auf dem Sand setzte die Verringerung der Anzahl der grünen Blätter bei allen Wasserstufen ab Anfang August ein (BBCH 67). Zum Erntezeitpunkt 2009 hatten die Maispflanzen der trockenen 0,3/0,2 PET-Variante auf dem Sand vier Blätter weniger als unter potenziellen Verdunstungsbedingungen.

Bei Sorghum bicolor betrug die maximale Anzahl grüner Laubblätter/Pflanze auf beiden Böden ebenfalls 14. Ende Juni waren auf den Hirse-Lysimetern die ältesten Blätter abgestorben. In der 2. Augustdekade wurde die maximale Blattanzahl (BBCH 37 im Variantendurchschnitt) festgestellt. Nach dem Einsetzen der differenzierten Wasserversorgung vergilbte der untere Blattapparat bei den 0,3/0,2 PET-Varianten stärker als bei den besser mit Wasser versorgten Varianten. Jedoch kam es besonders 2009 durch den verzögerten Entwicklungsfortschritt unter den trockenen Bedingungen zu einer vermehrten Blattneubildung, so dass zum Erntetermin auf den trockenen Varianten mehr Blätter/Hirsepflanze zu verzeichnen war.

Halmknoten 2009/2010

Der Energiemais bildete im Mittel 12 Halmknoten aus. Zwischen den beiden Böden gab es in der Zahl der ausgebildeten Halmknoten keine Unterschiede. Bis zum 10. August nahm die Halmknotenanzahl zu (BBCH 67-70), danach war kein wesentliches Längenwachstum mehr zu verzeichnen. Auf beiden Böden hatte die 0,3/0,2 PET-Variante zur Ernte einen Halmknoten weniger ausgebildet.

Auch bei Sorghum bicolor können zur Ernte im Mittel 12 Halmknoten gezählt werden. Auf beiden

Böden nimmt die Nodienzahl bei 1,0 und 0,6 PET bis zum 17. September zu, bei 0,3 PET bis zum Zeitpunkt der Ernte Ende September. Obwohl die Pflanzenlänge bei 0,3 PET deutlich geringer ausfällt, war die Halmknotenzahl 2009 in etwa gleich, die Internodien dafür kürzer. In 2010 wurden in der trockenen Variante deutlich weniger Halmknoten gebildet. Auffallend war, dass in der trockenen Variante die Halmknoten weniger deutlich ausgebildet waren, häufig nur fühlbar und visuell kaum wahrnehmbar.

Kolbenansatz 2009/2010

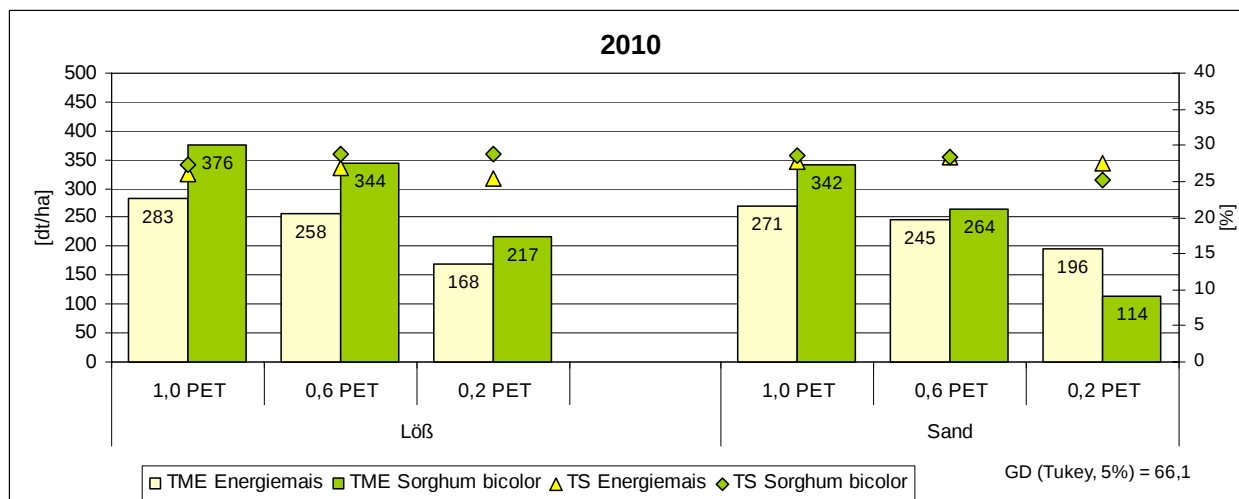
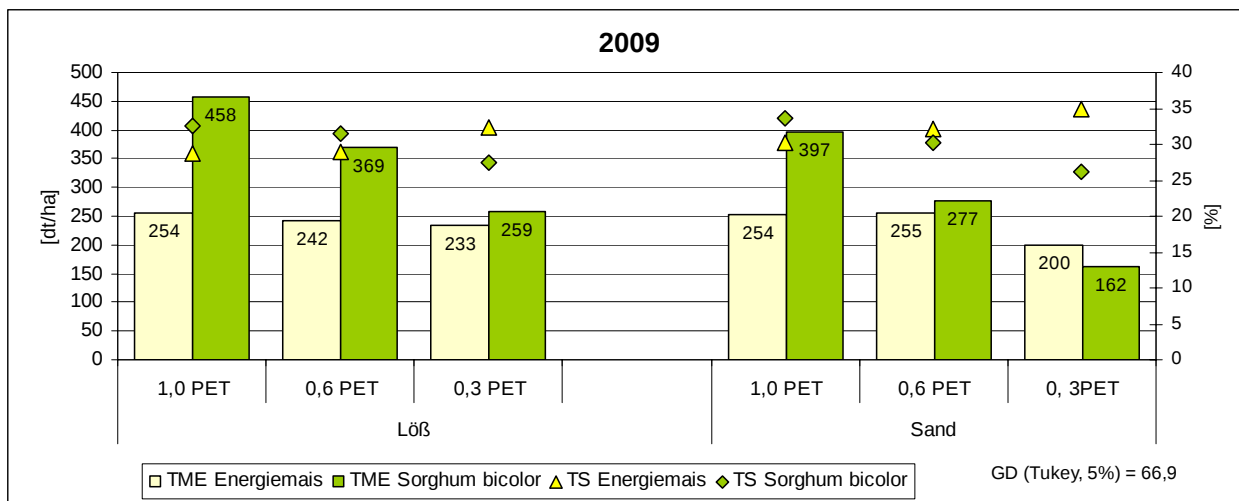
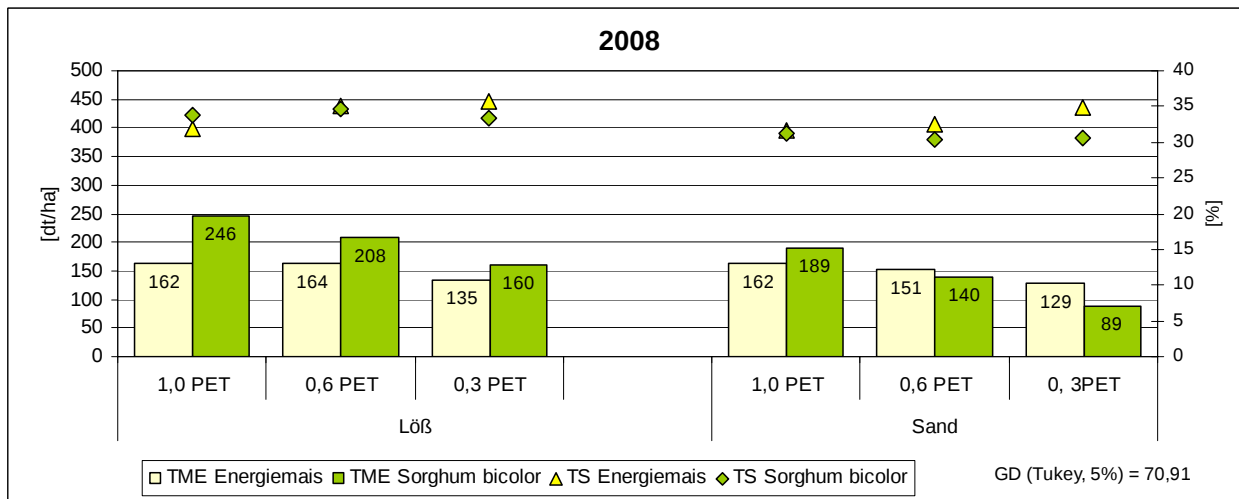
Der Beginn der Kolbenbildung beim Mais war 2009 bei allen Varianten ab 22. Juli und 2010 ab 26. Juli festzustellen. Im Durchschnitt wurden auf den Sandlysimetern geringfügig weniger Kolben angesetzt als auf dem Lössboden.

Triebzahl 2009/2010

Die Sorghumpflanzen begannen im BBCH-Stadium 17 mit der Bildung von Seitentrieben. Auf dem Löss wurden im Mittel 3 Seitentriebe, auf dem Sand 2 Seitentriebe/Pflanze gebildet. Auf beiden Böden begann bei 1,0 und 0,6 PET das Absterben der Seitentriebe mit Beginn der 2. Augustdekade. Auf dem Löss hatten die Hirsepflanzen zu diesem Zeitpunkt eine mittlere Wuchshöhe von 225 cm (BBCH 36), auf dem Sand von 186 cm (BBCH 34). Auf den trockenen Varianten setzte dieser Prozess schon eine Woche früher ein und das Absterben der Triebe erfolgte innerhalb eines kürzeren Zeitraums. Zum Erntetermin waren keine grünen Seitentriebe mehr vorhanden.

Anlage 9

Trockenmasseerträge und TS-Gehalte der beiden Kulturen in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung in den einzelnen Versuchsjahren.

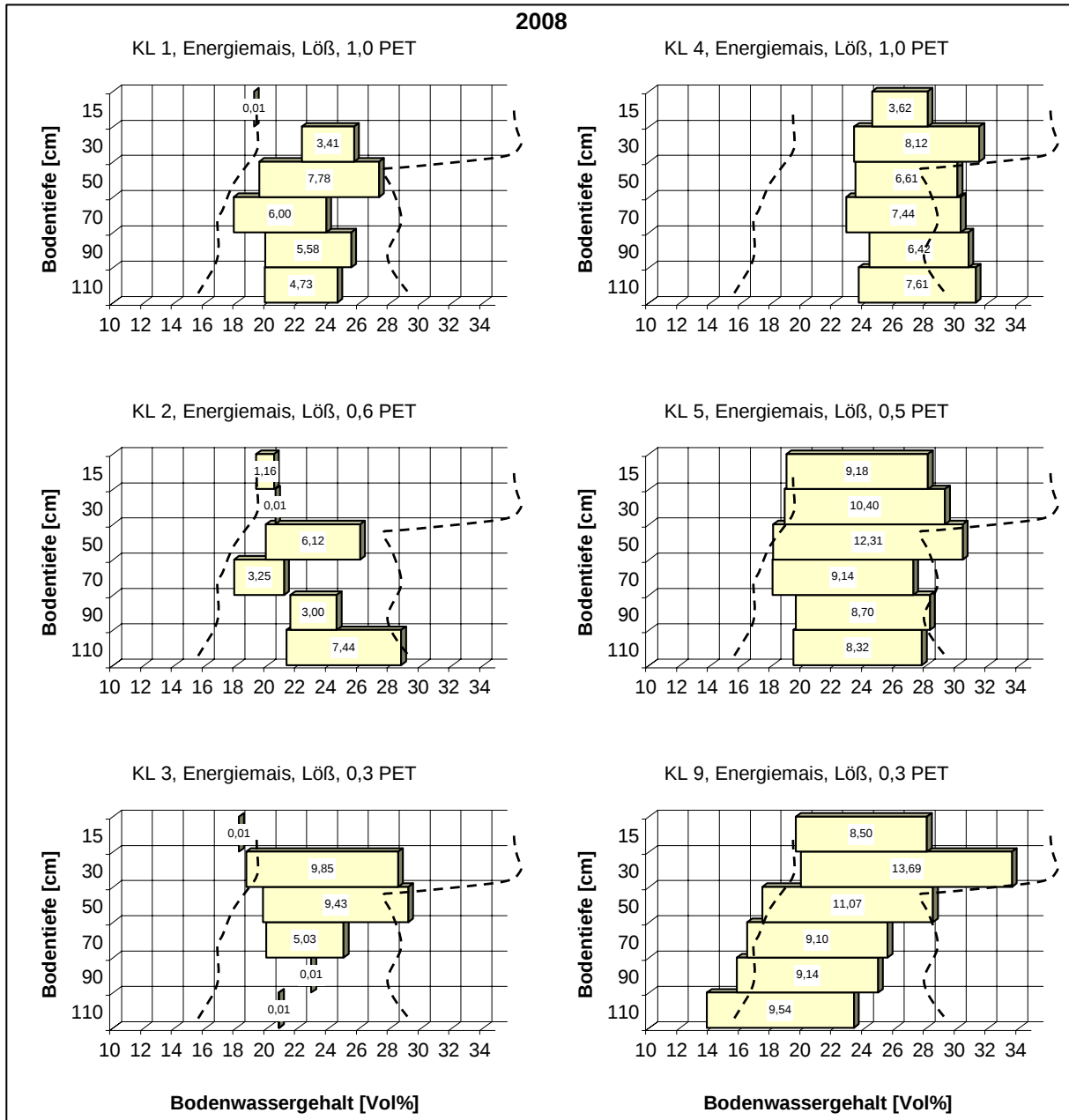


Anlage 10

Bodenwasserausschöpfung von Energiemais auf Löss in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2008.

Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar.

Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Löss - ÄWP abgeleitet aus Neutronensondenmessung und FK pF 2,5).



Anlage 11

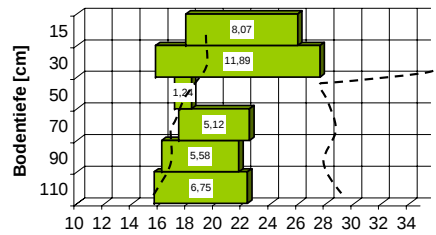
Bodenwasserausschöpfung von Sorghum bicolor auf Löss in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2008

Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar.

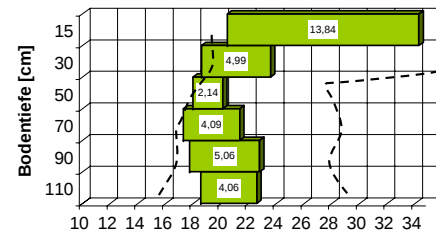
Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Löss... ÄWP abgeleitet aus Neutronensondennmessung und FK pF 2,5).

2008

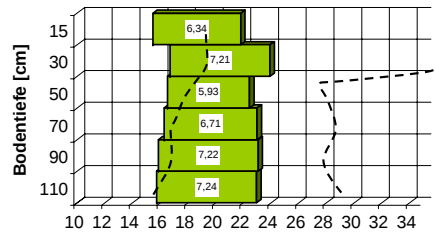
KL 13, Sorghum bicolor, Löss, 1,0 PET



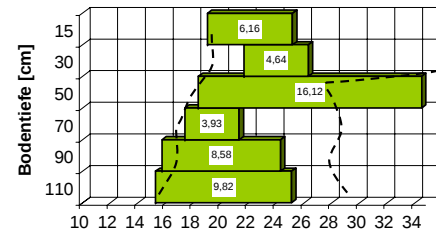
KL 16, Sorghum bicolor, Löss, 1,0 PET



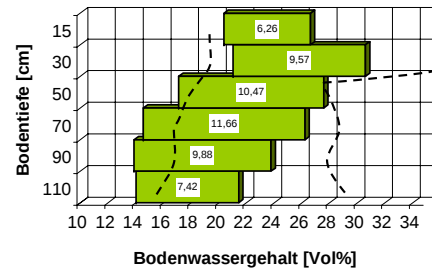
KL 14, Sorghum bicolor, Löss, 0,6 PET



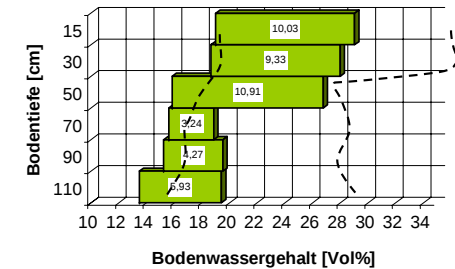
KL 17, Sorghum bicolor, Löss, 0,6 PET



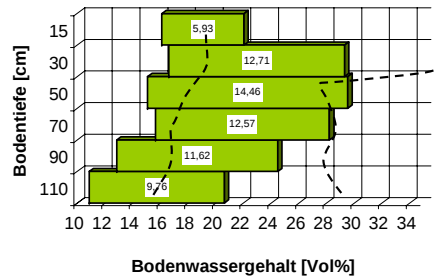
KL 20, Sorghum bicolor, Löss, 0,6 PET



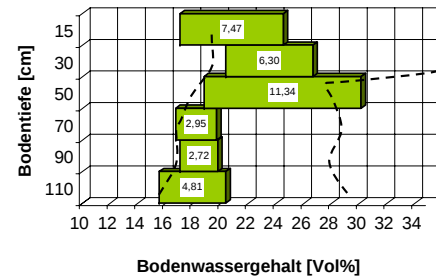
KL 23, Sorghum bicolor, Löss, 0,6 PET



KL 15, Sorghum bicolor, Löss, 0,3 PET



KL 18, Sorghum bicolor, Löss, 0,3 PET



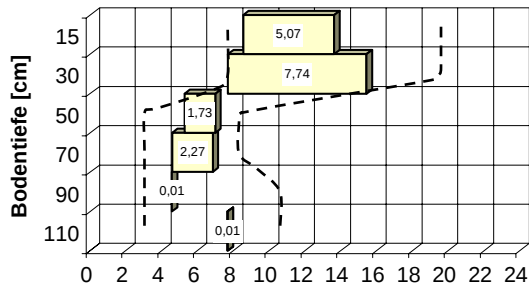
Anlage 12

Bodenwasserausschöpfung von Energiemais auf Sand in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2008

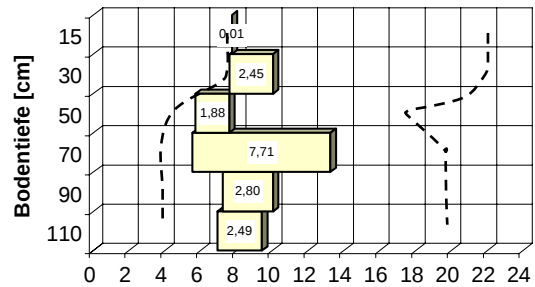
Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar. Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Sand...ÄWP pF 4,2 und FK 2,0).

2008

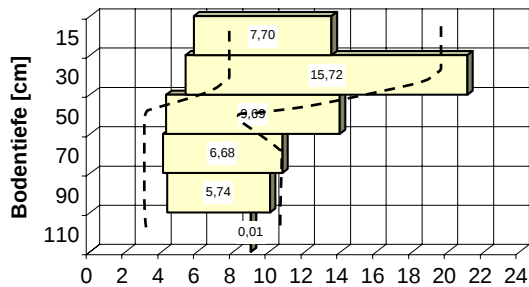
KL 25, Energiemais, Sand, Typ 1, 1,0 PET



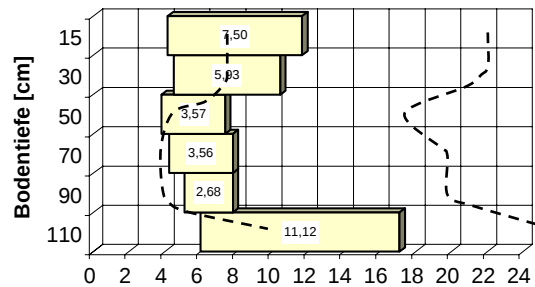
KL 31, Energiemais, Sand, Typ 2, 1,0 PET



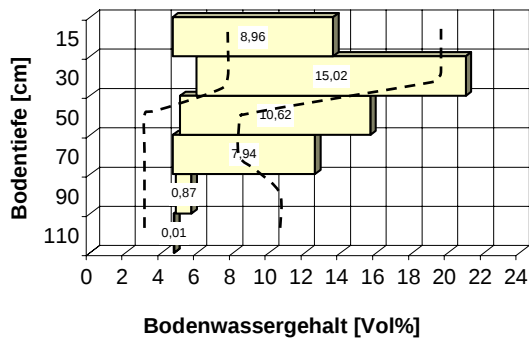
KL 26, Energiemais, Sand, Typ 1, 0,6 PET



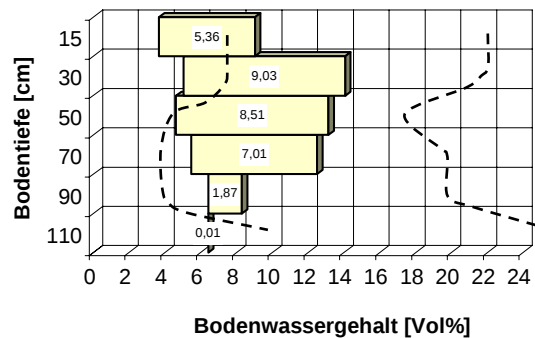
KL 35, Energiemais, Sand, Typ 2, 0,6 PET



KL 27, Energiemais, Sand, Typ 1, 0,3 PET



KL 33, Energiemais, Sand, Typ 2, 0,3 PET



Anlage 13

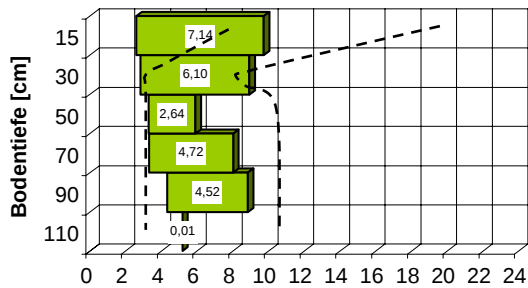
Bodenwasserausschöpfung von Sorghum bicolor auf Sand in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2008

Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar.

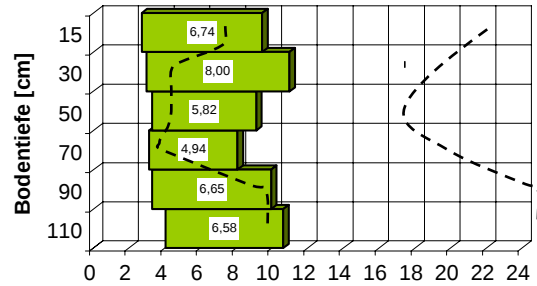
Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Sand...ÄWP pF 4,2 und FK 2,0).

2008

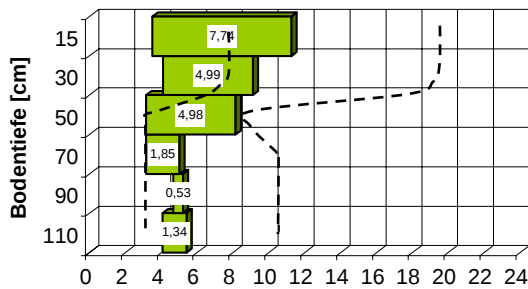
KL 40, Sorghum bicolor, Sand, Typ 1, 1,0 PET



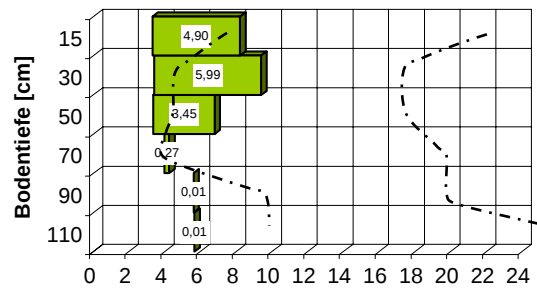
KL 43, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 1,0 PET



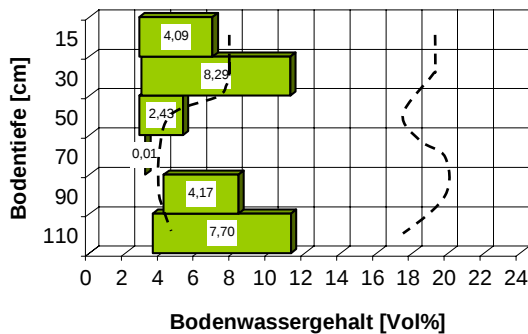
KL 41, Sorghum bicolor, Sand, Typ 1, 0,6 PET



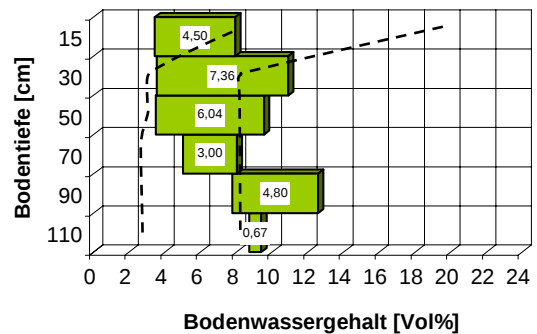
KL 44, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 0,6 PET



KL 39, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 0,3 PET



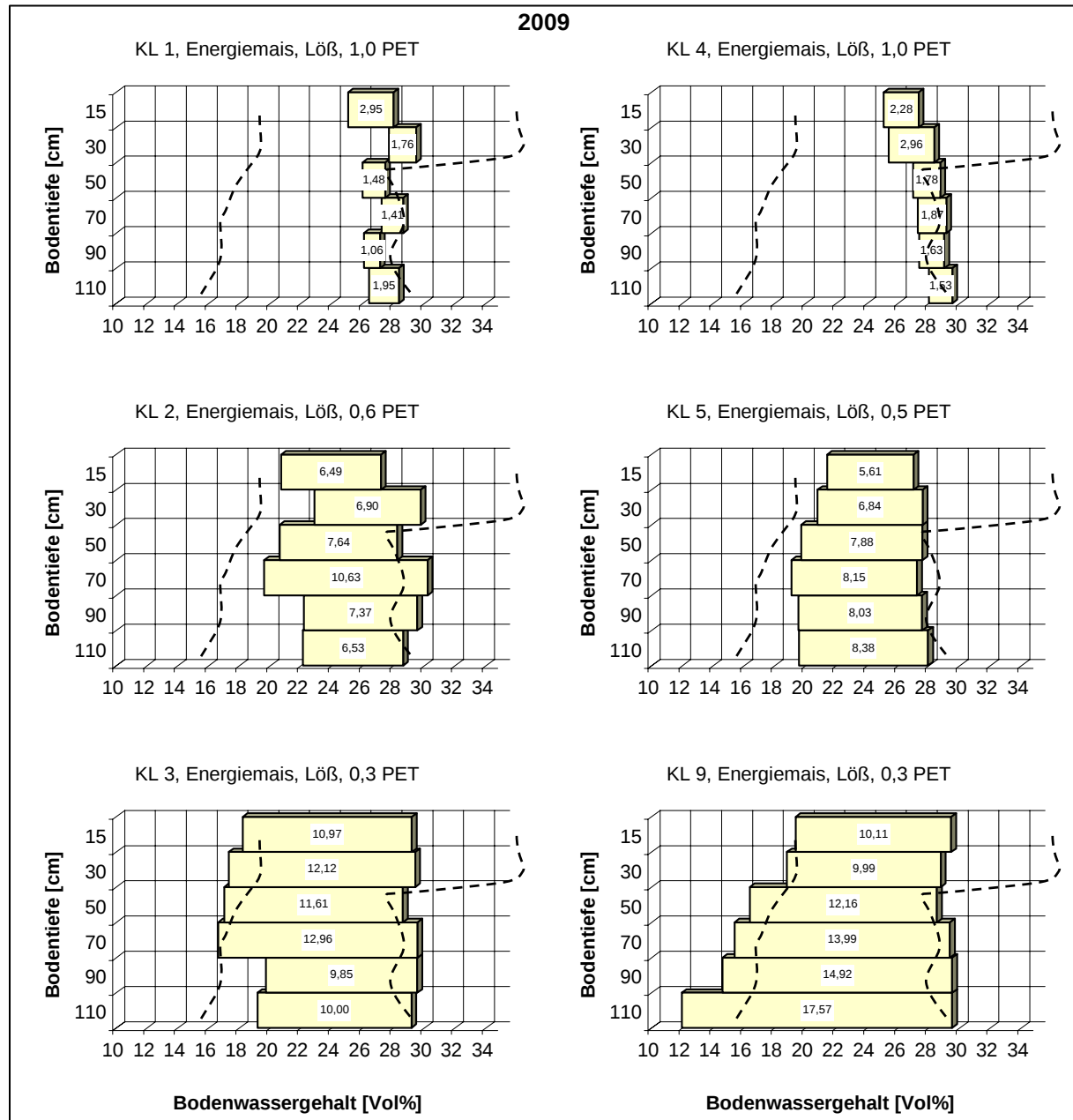
KL 42, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 0,3 PET



Anlage 14

Bodenwasserausschöpfung von Energiemais auf Löss in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2009

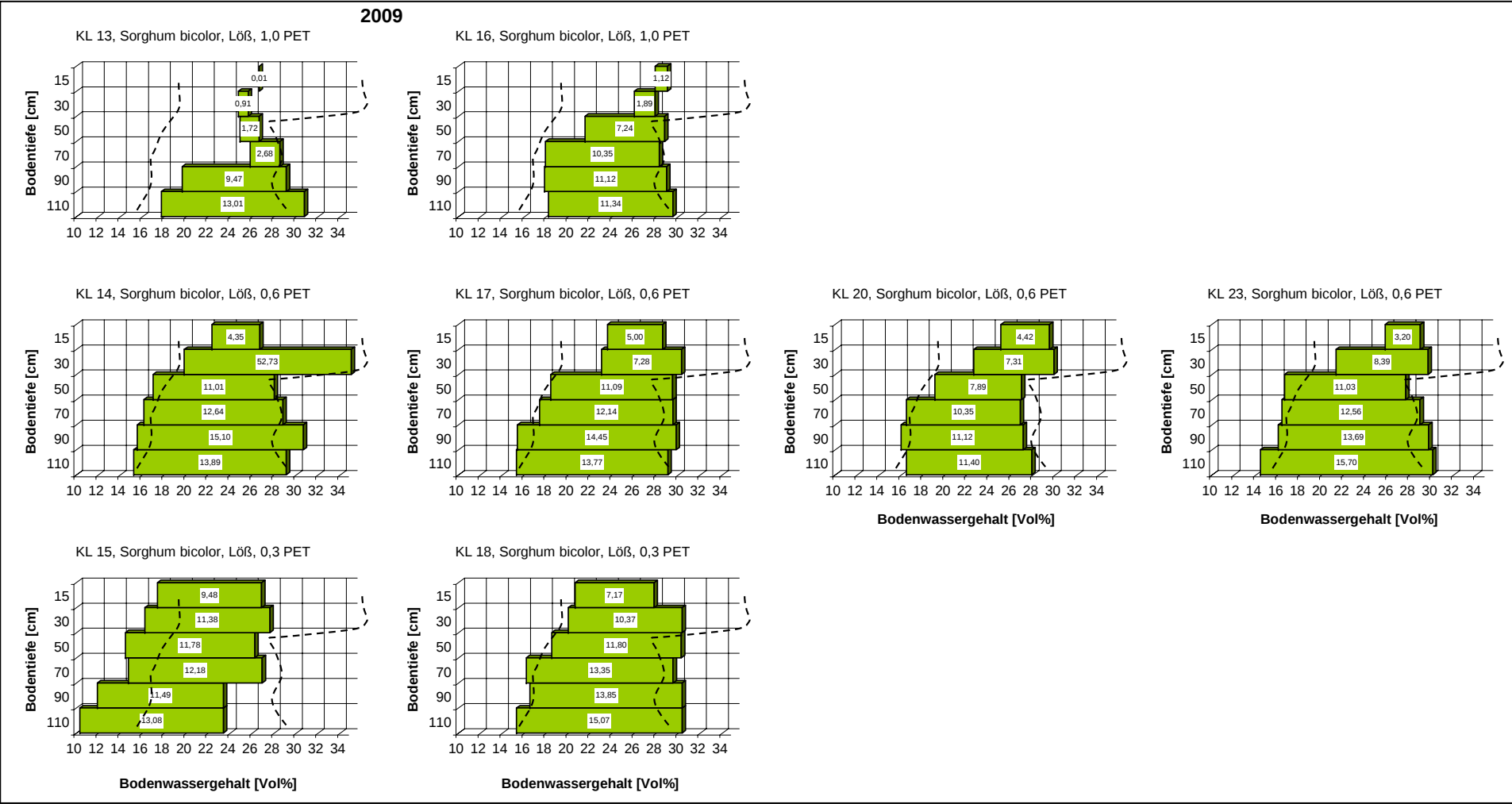
Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar. Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Löss... ÄWP abgeleitet aus Neutronensondenmessung und FK pF 2,5).



Anlage 15

Bodenwasserausschöpfung von Sorghum bicolor auf Löss in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2009
Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar.
Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Löss... ÄWP abgeleitet aus Neutronensonden-
messung und FK pF 2,5).

70



Anlage 16

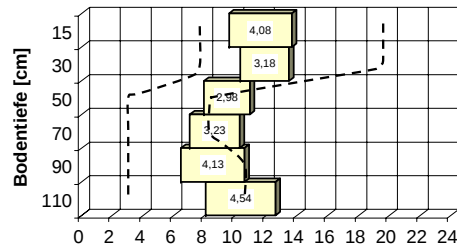
Bodenwasserausschöpfung von Energiemais auf Sand in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2009

Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar.

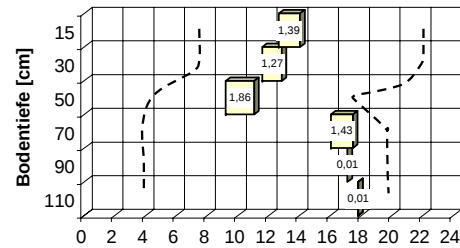
Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Sand...ÄWP pF 4,2 und FK 2,0).

2009

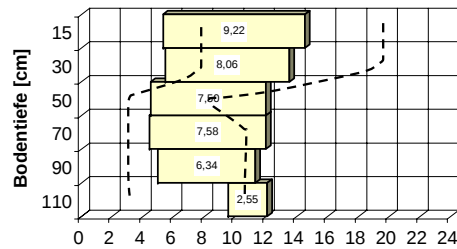
KL 25, Energiemais, Sand, Typ 1, 1,0 PET



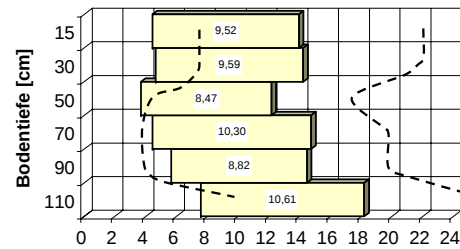
KL 31, Energiemais, Sand, Typ 2, 1,0 PET



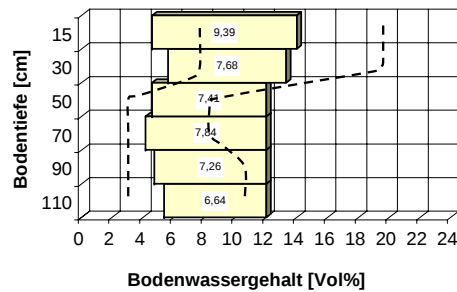
KL 26, Energiemais, Sand, Typ 1, 0,6 PET



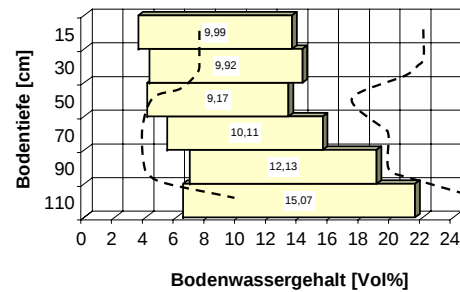
KL 35, Energiemais, Sand, Typ 2, 0,6 PET



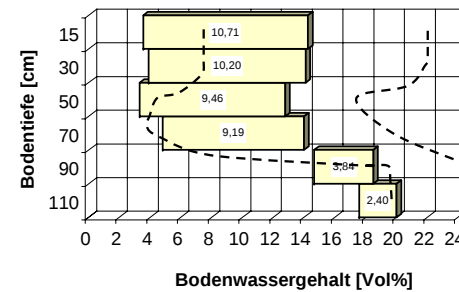
KL 27, Energiemais, Sand, Typ 1, 0,3 PET



KL 33, Energiemais, Sand, Typ 2, 0,3 PET



KL 36, Energiemais, Sand, Typ 2, 0,3 PET



Anlage 17

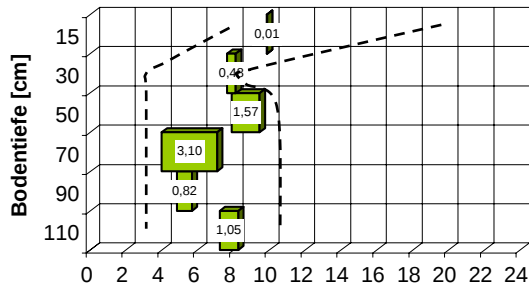
Bodenwasserausschöpfung von Sorghum bicolor auf Sand in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2009

Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar.

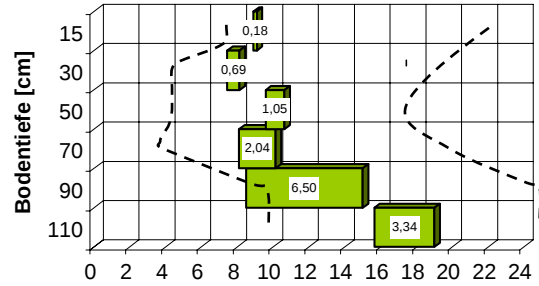
Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Sand...ÄWP pF 4,2 und FK 2,0).

2009

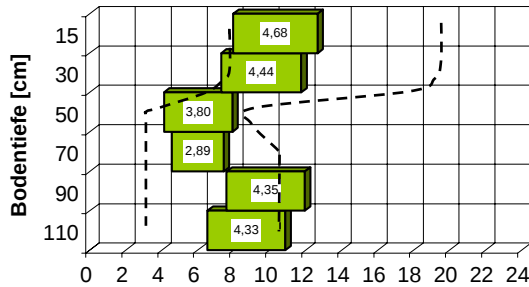
KL 40, Sorghum bicolor, Sand, Typ 1, 1,0 PET



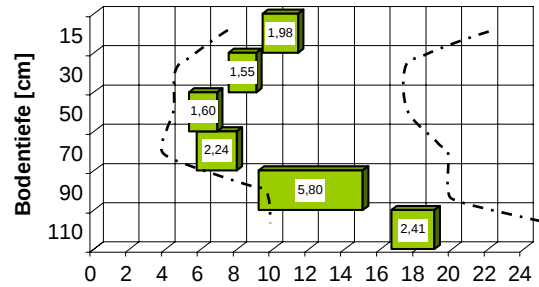
KL 43, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 1,0 PET



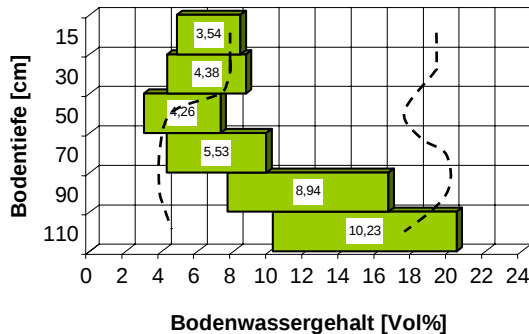
KL 41, Sorghum bicolor, Sand, Typ 1, 0,6 PET



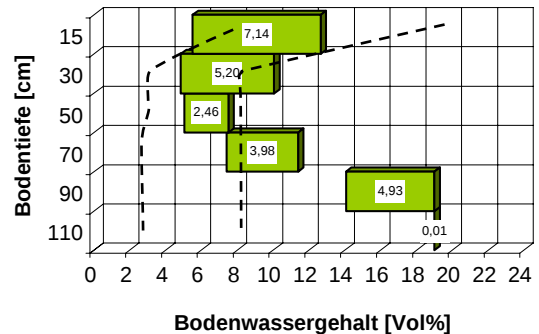
KL 44, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 0,6 PET



KL 39, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 0,3 PET



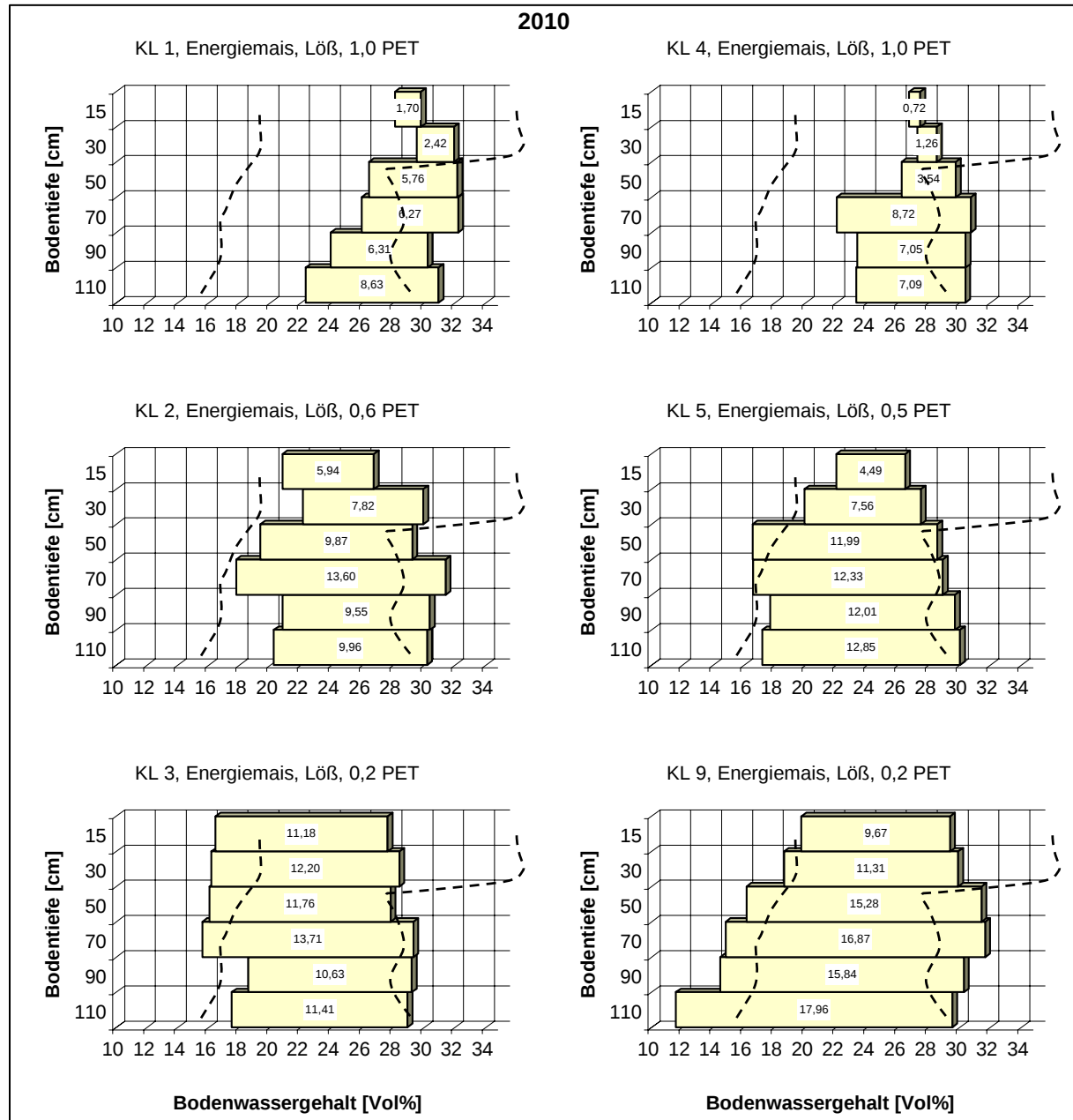
KL 42, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 0,3 PET



Anlage 18

Bodenwasserausschöpfung von Energiemais auf Löss in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2010

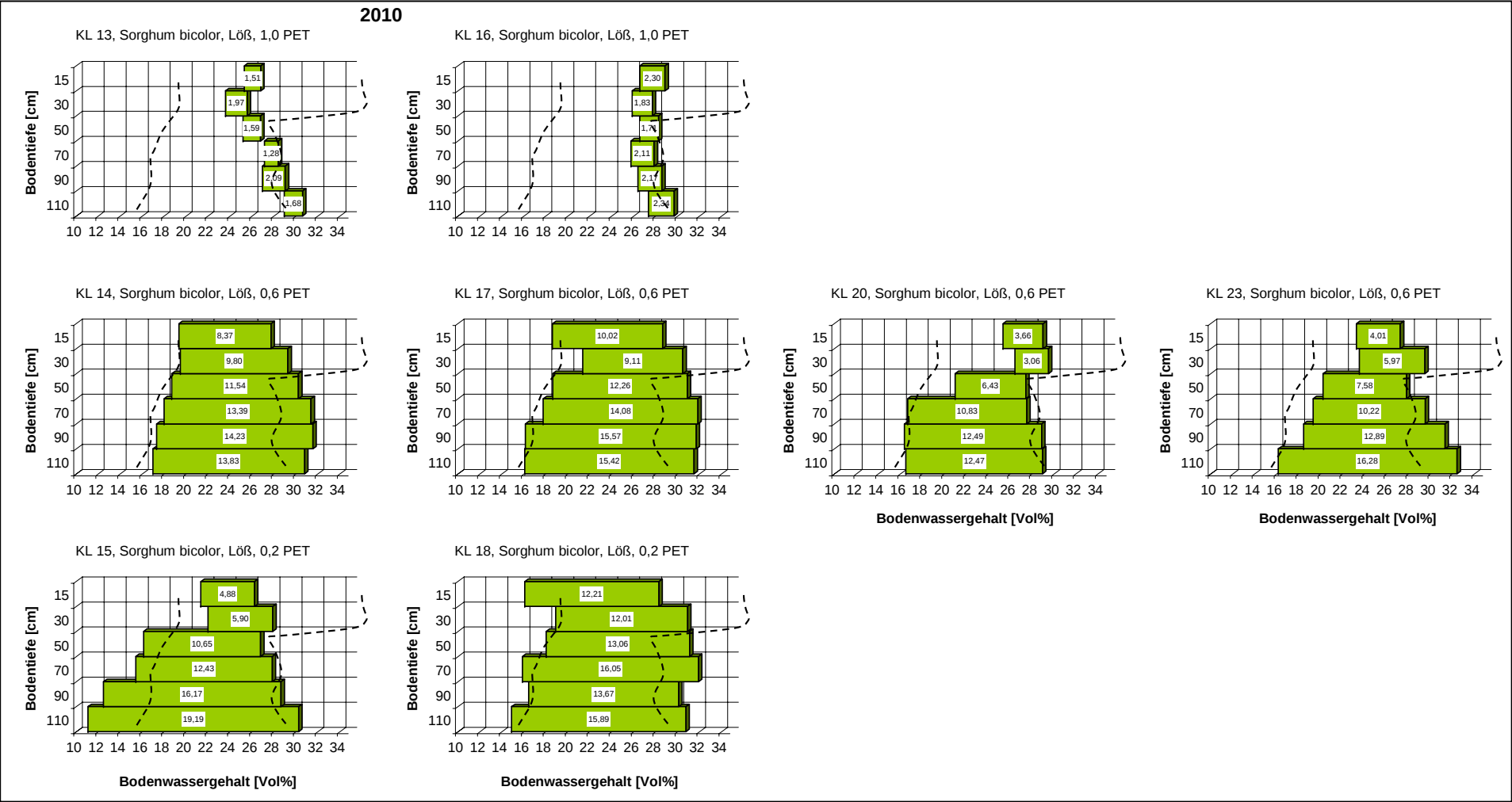
Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar. Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Löss... ÄWP abgeleitet aus Neutronensondenmessung und FK pF 2,5).



Anlage 19

Bodenwasserausschöpfung von Sorghum bicolor auf Löss in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2010
Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar. Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Löss... ÄWP abgeleitet aus Neutronensondenmessung und FK pF 2,5).

2010



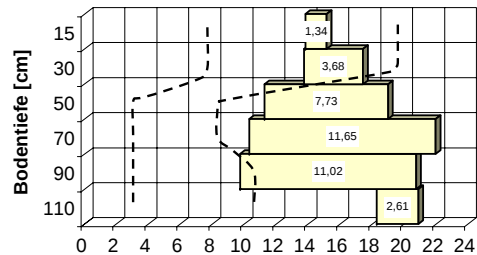
Anlage 20

Bodenwasserausschöpfung von Energiemais auf Sand in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2010

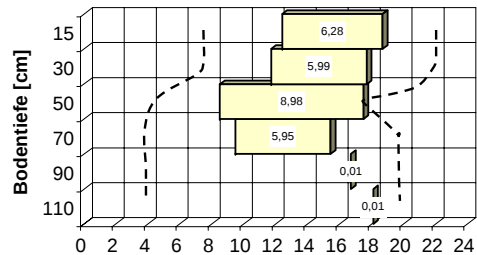
Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar. Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Sand...ÄWP pF 4,2 und FK 2,0).

2010

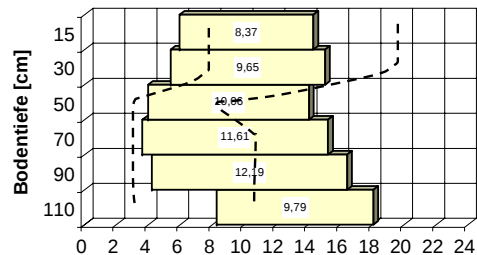
KL 25, Energiemais, Sand, Typ 1, 1,0 PET



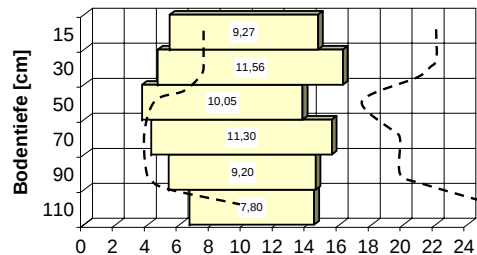
KL 31, Energiemais, Sand, Typ 2, 1,0 PET



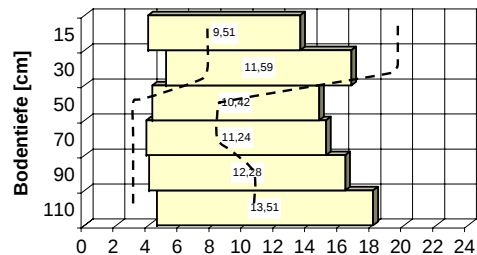
KL 26, Energiemais, Sand, Typ 1, 0,6 PET



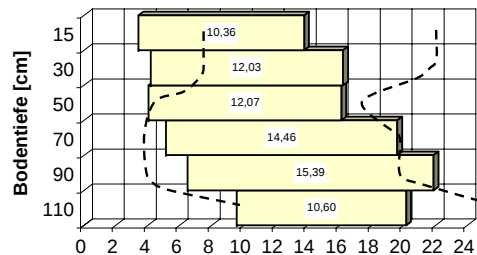
KL 35, Energiemais, Sand, Typ 2, 0,6 PET



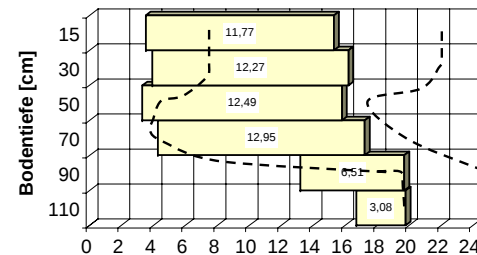
KL 27, Energiemais, Sand, Typ 1, 0,2 PET



KL 33, Energiemais, Sand, Typ 2, 0,2 PET



KL 36, Energiemais, Sand, Typ 2, 0,2 PET



Bodenwassergehalt [Vol%]

Bodenwassergehalt [Vol%]

Bodenwassergehalt [Vol%]

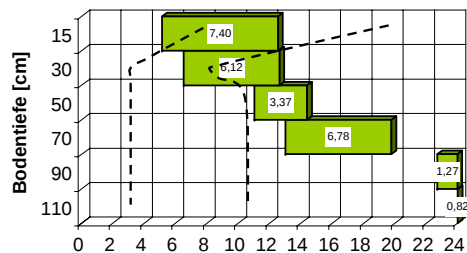
Anlage 21

Bodenwasserausschöpfung von Sorghum bicolor auf Sand in Abhängigkeit von der Wasserversorgung im Versuchsjahr 2009

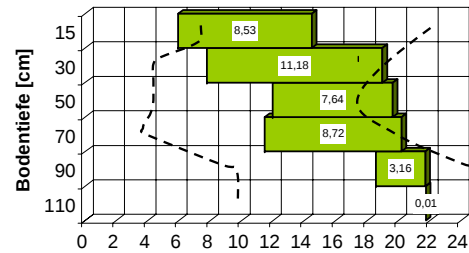
Die Balken stellen den Anfangs- und Endwassergehalt sowie die Entzugsmenge in Vol. % dar. Die gestrichelten Linien markieren den ÄWP und die FK bzw. den pflanzennutzbaren Bodenwasserbereich (Sand...ÄWP pF 4,2 und FK 2,0).

2010

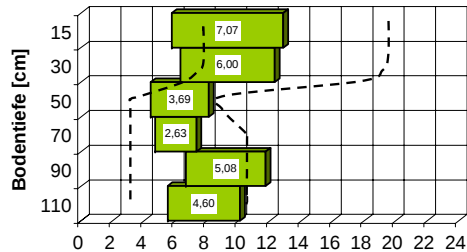
KL 40, Sorghum bicolor, Sand, Typ 1, 1,0 PET



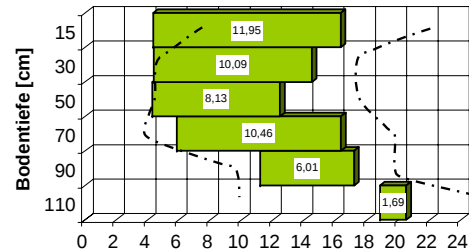
KL 43, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 1,0 PET



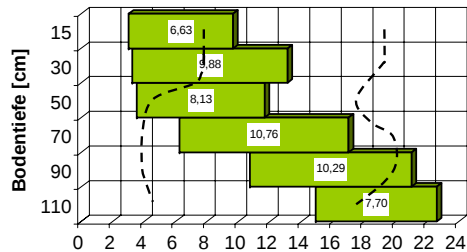
KL 41, Sorghum bicolor, Sand, Typ 1, 0,6 PET



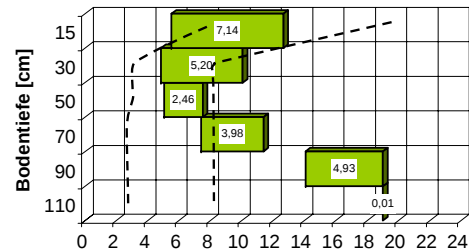
KL 44, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 0,6 PET



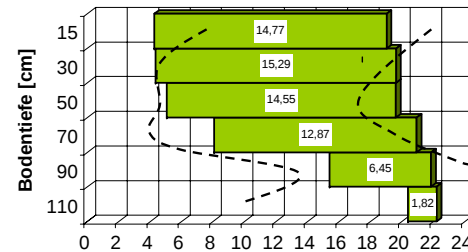
KL 39, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 0,3 PET



KL 42, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 0,3 PET

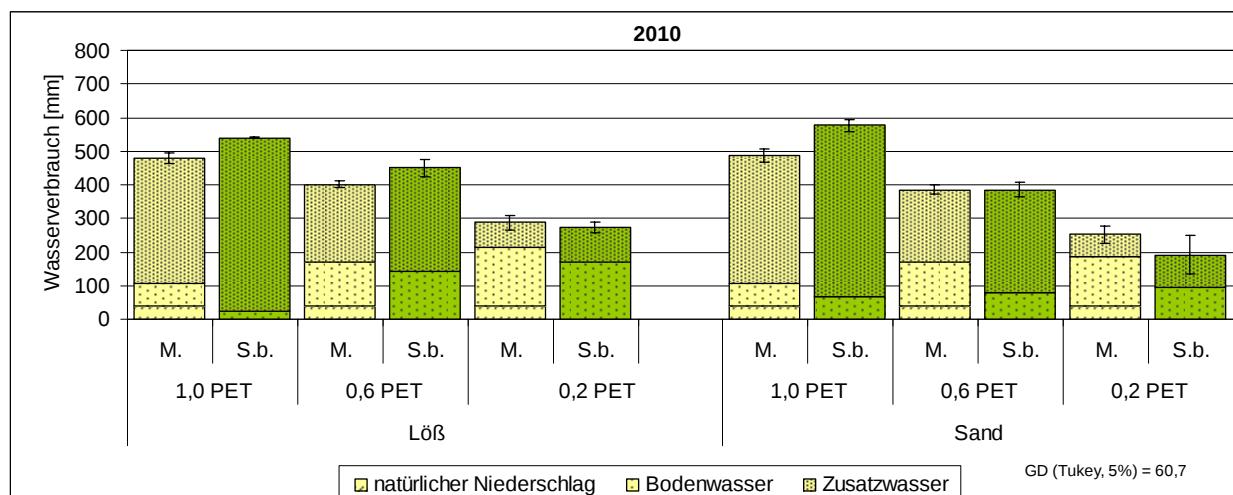
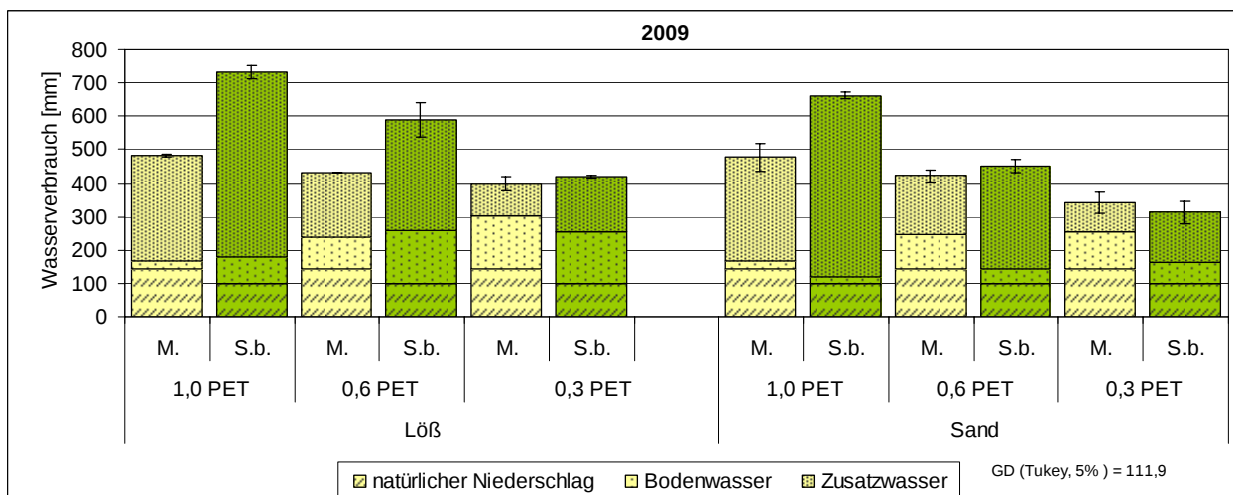
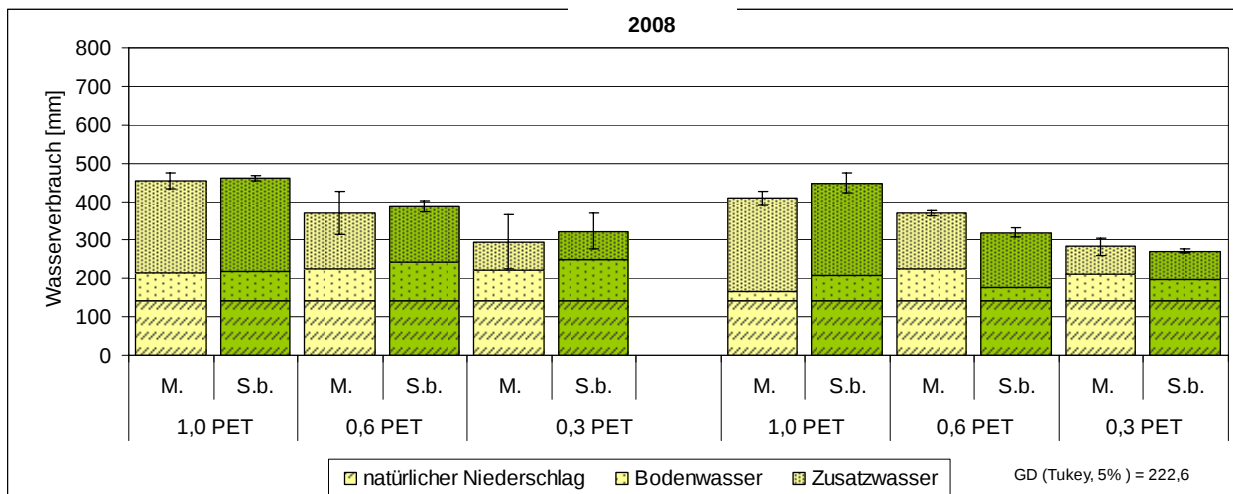


KL 45, Sorghum bicolor, Sand, Typ 2, 0,3 PET



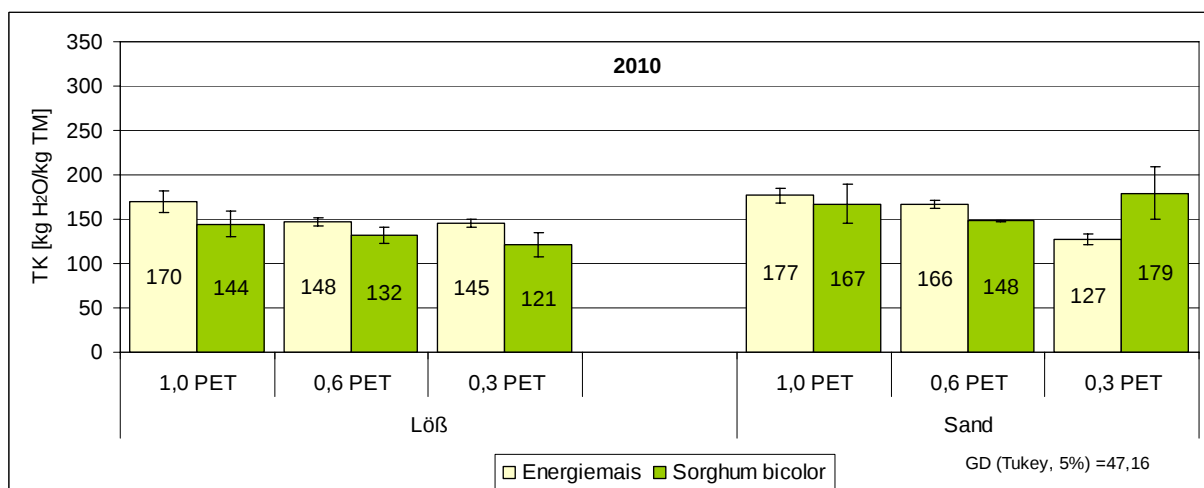
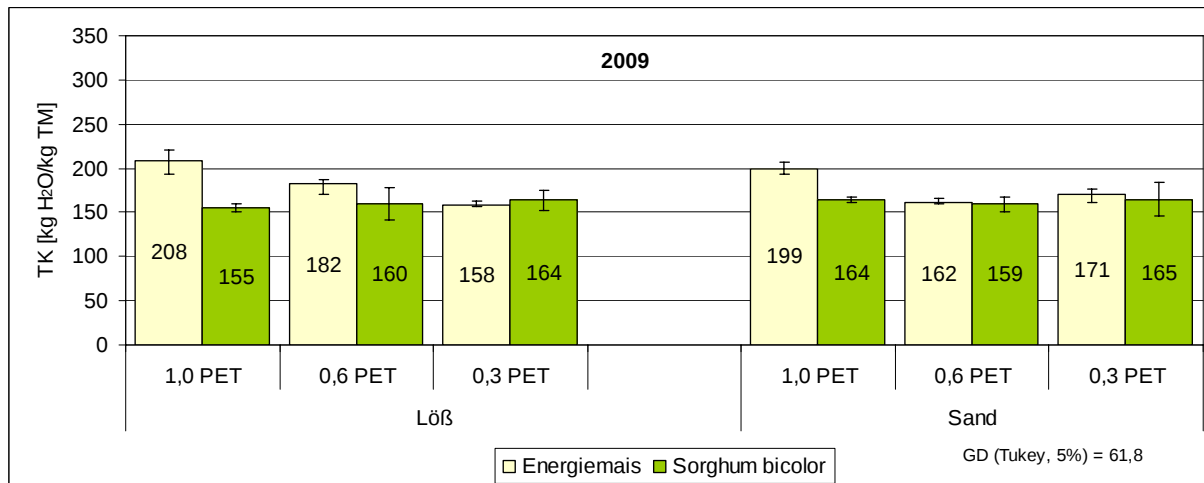
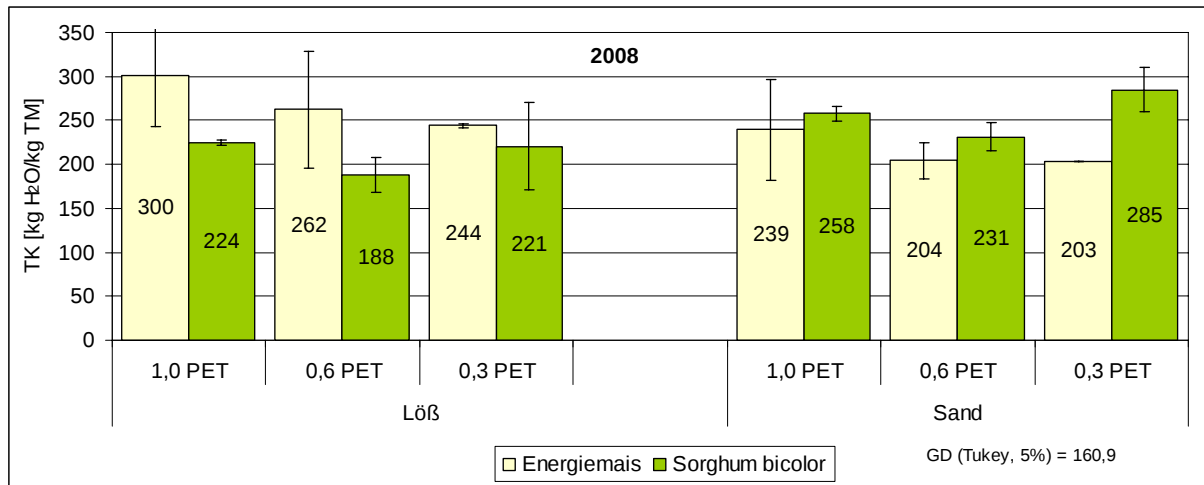
Anlage 22

Wasserverbrauch von Energiemais (M.) und Sorghum bicolor (S. b.) im Modellversuch in Abhängigkeit vom Boden in den einzelnen Versuchsjahren



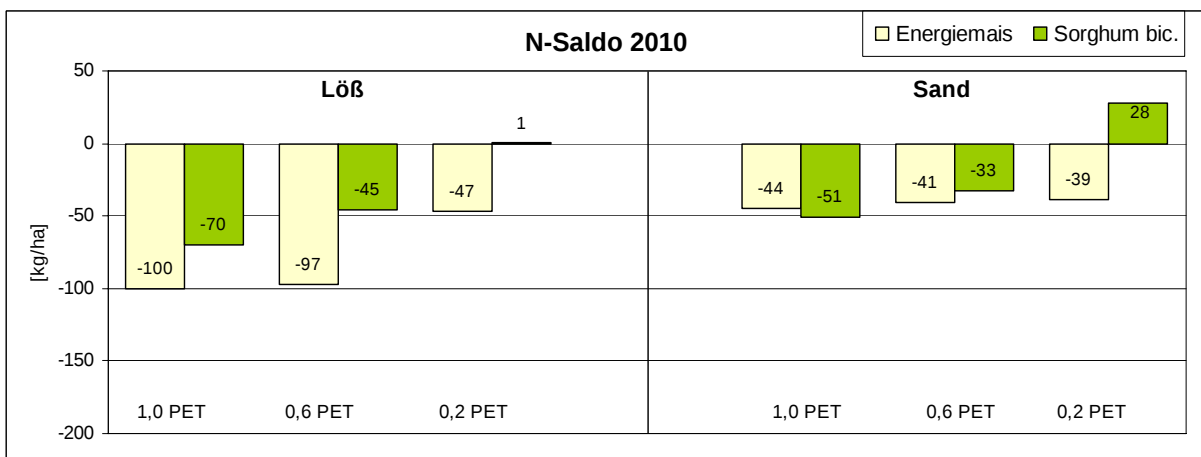
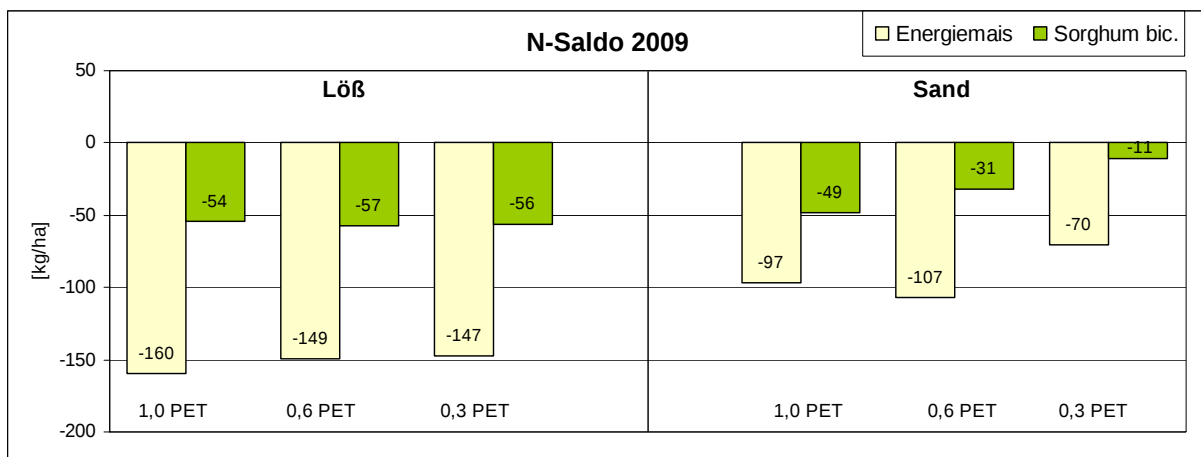
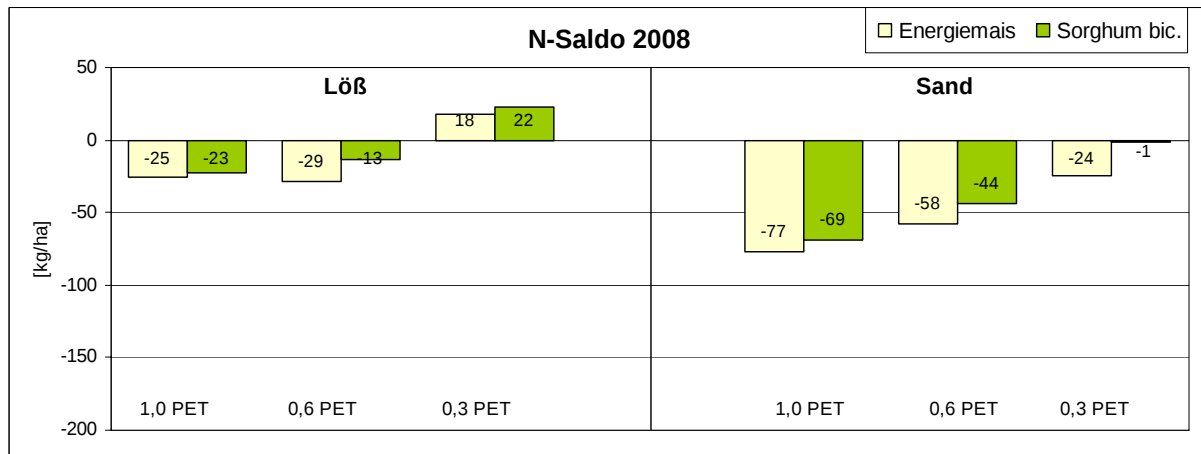
Anlage 23

Transpirationskoeffizient (TK) von Energiemais und Sorghum bicolor im Modellversuch in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung in den einzelnen Versuchsjahren



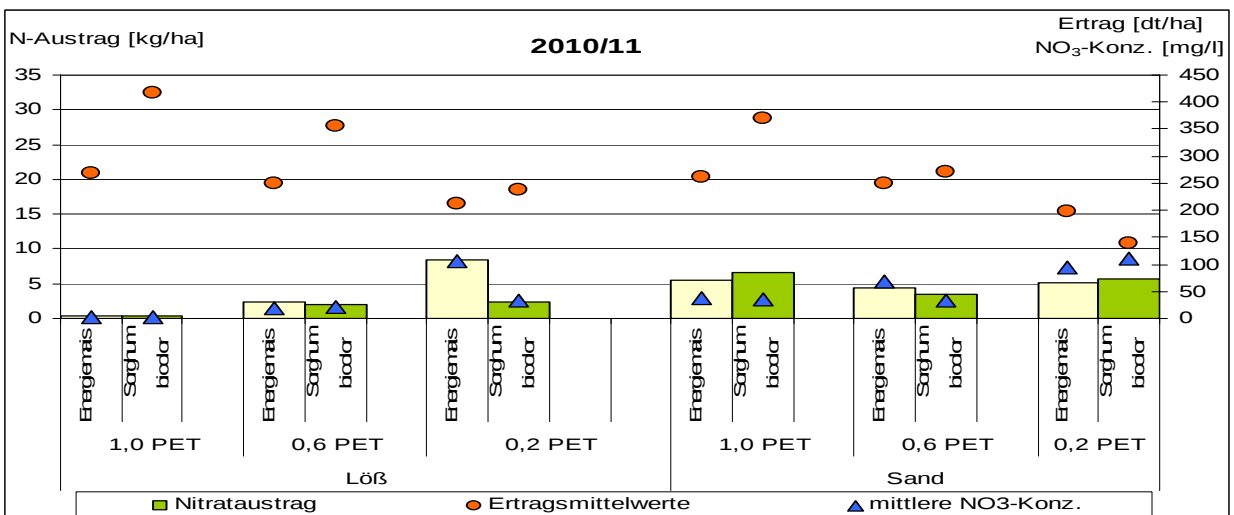
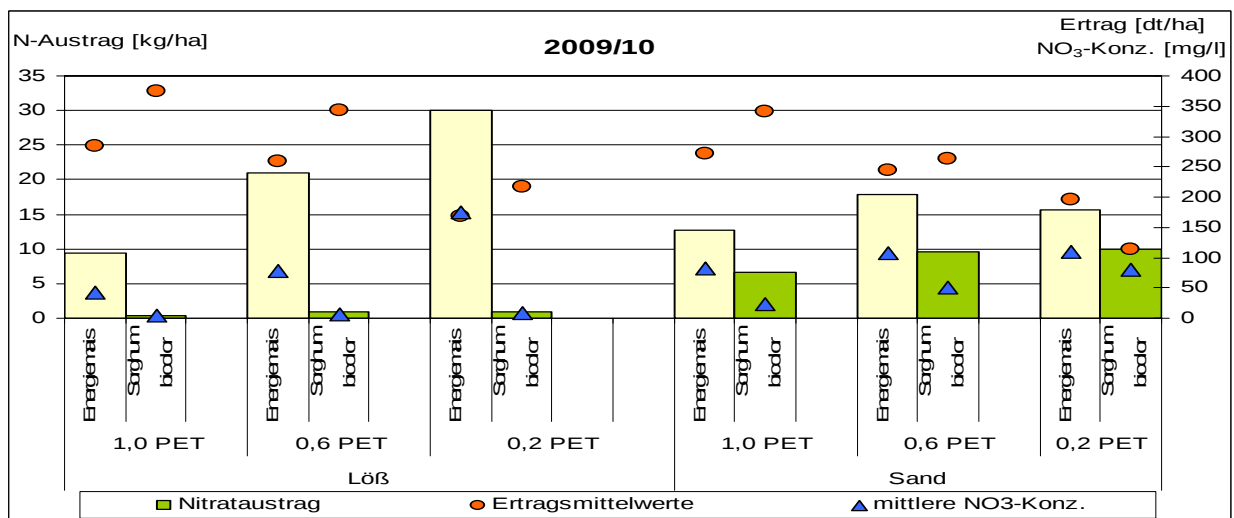
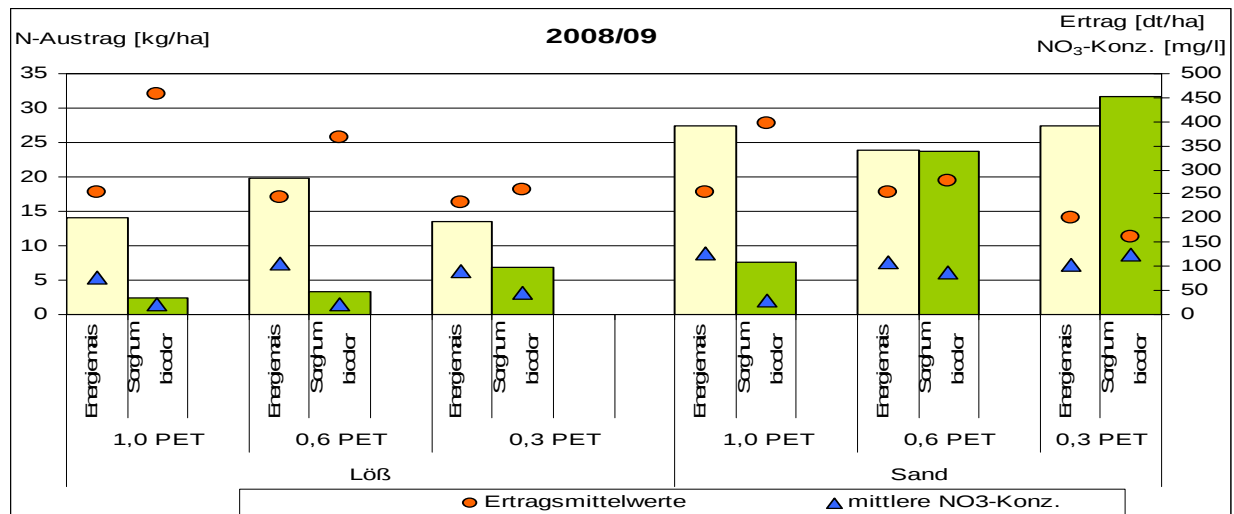
Anlage 24

N-Salden von Mais und Sorghum bicolor auf den beiden Böden in Abhängigkeit von den Wasserstufen in den einzelnen Versuchsjahren



Anlage 25

N-Austrag unter Energiemais und Sorghum bicolor in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung in den einzelnen Mittel der Sickerwasserperioden



Anlage 26

Übersicht Nährstoffgehalte und Nährstoffentzüge von Mais und Sorghum bicolor in den 3 Versuchsjahren (Mittel aus vier Wiederholungen)

	Boden	PET	TM- Ertrag (dt/ha]	Nährstoffgehalte												Nährstoffentzüge					
				Roh- asche	Roh- protein	Roh- fett	Roh- faser	NfE	C	N	P	K	Mg	S	Ca	N	P	K	Mg	S	Ca
				(% TM)												(kg/ha)					
2008																					
Energie- mais	Lös	1,0	162,3	4,78	7,4	3	18,2	64,7	45,7	1,21	0,23	1,17	0,24	0,09	0,40	196,8	38,0	189,9	38,3	14,4	65,1
		0,6	164,0	4,98	7,2	3,2	18,9	63,8	45,7	1,21	0,22	1,15	0,24	0,09	0,41	198,4	36,1	188,6	39,0	14,3	67,2
		0,3	134,8	4,29	6,7	2,9	20,3	64	45,8	1,13	0,16	1,01	0,24	0,09	0,46	151,6	21,8	136,1	31,8	11,9	62,3
	Sand	1,0	161,9	4,45	8,1	2,5	18,4	64,8	45,9	1,34	0,26	1,29	0,27	0,11	0,40	217,0	42,1	208,9	43,4	17,6	65,4
		0,6	151,2	4,26	7,6	2,4	18,8	65,1	46,1	1,32	0,20	1,07	0,30	0,11	0,48	199,6	30,9	161,8	46,0	16,8	72,6
		0,3	107,9	4,36	7,6	2,2	19,7	64,2	45,9	1,40	0,16	1,19	0,27	0,10	0,44	151,0	17,4	128,4	28,6	11,1	47,1
Sorghum bicolor	Löss	1,0	245,8	4,15	4,7	0,4	28,2	60,4	45,2	0,81	0,10	1,16	0,13	0,07	0,35	197,8	24,6	285,1	32,2	16,1	86,5
		0,6	207,7	4,29	5,1	0,7	25,9	61,8	45,4	0,88	0,09	1,22	0,14	0,07	0,41	183,3	18,4	253,4	29,7	14,8	84,1
		0,3	159,9	4,49	5,3	0,7	25,4	61,9	44,9	0,93	0,07	1,38	0,13	0,07	0,45	147,9	11,9	220,6	21,3	11,5	72,3
	Sand	1,0	188,7	3,3	6,4	0,7	26,2	61,2	45,5	1,12	0,10	0,92	0,25	0,09	0,40	211,8	18,2	174,0	47,7	17,5	75,5
		0,6	140,3	3,69	7,6	0,9	23,9	61,6	45,2	1,33	0,10	1,12	0,25	0,10	0,46	185,9	13,7	157,1	34,4	13,4	64,0
		0,3	88,7	4,43	9	1	24,5	58,5	45,3	1,60	0,10	1,19	0,27	0,11	0,60	141,7	9,0	105,6	24,2	9,8	53,3
2009																					
Energie- mais	Löss	1,0	254,1	4,41	7,2	2,4	21,7	64,29	45,1	1,16	0,20	1,03	0,20	0,08	0,27	294,1	51,6	261,7	51,3	21,4	69,6
		0,6	242,5	4,63	7,5	2,6	20,4	64,87	45,0	1,17	0,21	1,07	0,21	0,09	0,29	283,7	50,4	259,4	50,7	20,9	69,8
		0,3	232,7	4,67	7,3	2,8	23	62,23	45,3	1,23	0,19	1,14	0,24	0,09	0,37	286,3	43,3	265,3	55,4	19,8	85,0
	Sand	1,0	253,7	3,77	6,2	2,5	21,5	66,03	45,5	1,01	0,21	1,07	0,21	0,08	0,22	255,0	54,0	271,5	52,5	20,0	56,6
		0,6	254,6	3,75	5,9	2,6	22,9	64,85	45,4	1,04	0,20	1,04	0,22	0,08	0,24	263,5	50,2	264,8	56,0	21,5	62,1
		0,3	199,9	3,89	6,5	2,9	24,5	62,21	45,8	1,13	0,17	1,20	0,23	0,09	0,29	226,4	33,2	239,9	45,8	17,0	58,4
Sorghum bicolor	Löss	1,0	457,9	5,26	2,88	0,53	33,6	57,73	44,8	0,48	0,11	1,13	0,13	0,06	0,25	220,9	51,7	517,4	59,1	25,8	114,5
		0,6	368,9	4,92	3,49	0,84	31,8	58,95	44,9	0,61	0,10	1,17	0,17	0,07	0,31	223,2	38,0	431,6	61,2	24,1	112,9
		0,3	258,6	6,19	5,3	0,94	29,2	58,37	44,7	0,87	0,10	1,53	0,20	0,08	0,41	223,7	26,6	395,6	51,5	19,8	104,7
	Sand	1,0	396,6	3,03	3,37	0,73	32,9	59,97	46,1	0,59	0,11	0,71	0,21	0,07	0,24	232,0	44,8	279,6	84,1	27,6	94,8
		0,6	276,6	4,08	4,52	0,94	29,4	61,06	45,6	0,77	0,11	1,00	0,25	0,08	0,31	213,0	31,5	275,8	68,9	22,8	86,9
		0,3	162,2	4,84	7,18	1,16	29,3	57,52	45,3	1,22	0,12	1,32	0,28	0,10	0,40	197,1	20,1	214,1	45,1	16,4	64,2

	Boden	PET	TM- Ertrag (dt/ha)	Nährstoffgehalte												Nährstoffentzüge					
				Roh- asche	Roh- protein	Roh- fett	Roh- faser	NfE	C	N	P	K	Mg	S	Ca	N	P	K	Mg	S	Ca
				(% TM)												(kg/ha)					
2010																					
Energie- mais	Löss	1,0	283,2	4,8	4,88	1,69	23,3	65,3	45,4	0,85	0,16	1,00	0,20	0,07	0,29	239,3	44,7	283,2	57,8	20,2	81,6
		0,6	257,9	4,56	5,47	1,89	22,9	65,1	45,6	0,92	0,16	1,02	0,21	0,07	0,31	237,9	41,3	263,1	54,2	19,2	79,4
		0,3	168,3	3,85	6,5	2,11	24	63,6	45,9	1,14	0,15	1,02	0,25	0,09	0,38	192,2	25,6	171,6	41,9	15,2	63,6
	Sand	1,0	270,9	3,71	4,33	1,89	23,8	66,3	45,9	0,77	0,16	1,10	0,21	0,07	0,21	209,5	43,6	298,0	55,5	18,6	56,3
		0,6	245,1	3,44	4,77	2,21	23,7	65,9	46,4	0,84	0,17	0,97	0,24	0,08	0,25	205,9	40,9	237,3	58,8	20,2	61,5
		0,3	196,4	3,75	5,89	1,69	22,8	65,9	45,9	1,04	0,14	1,09	0,25	0,09	0,32	203,3	26,7	214,1	49,1	17,7	62,3
Sorghum bicolor	Löss	1,0	375,7	5,13	3,79	1,04	31,8	58,2	44,85	0,70	0,11	1,18	0,16	0,07	0,27	262,0	41,7	443,3	60,5	26,0	100,3
		0,6	344,0	4,65	3,84	1,04	31,6	58,9	45,10	0,69	0,09	1,18	0,16	0,07	0,26	236,5	32,3	405,9	53,3	22,5	89,4
		0,3	216,9	5,04	5,2	1,36	28,6	59,8	44,75	0,88	0,08	1,34	0,16	0,07	0,31	189,8	17,8	290,6	34,7	14,5	66,8
	Sand	1,0	341,9	3,02	3,68	1,24	30,7	61,3	45,60	0,66	0,12	0,82	0,22	0,08	0,24	226,5	41,4	281,0	75,9	25,7	81,0
		0,6	263,9	3,43	4,39	1,45	30,2	60,5	45,50	0,79	0,12	1,00	0,24	0,08	0,25	209,1	30,6	262,6	62,3	22,1	65,7
		0,3	114,2	4,54	6,76	1,56	28,5	58,7	44,85	1,34	0,11	1,47	0,23	0,09	0,33	153,0	12,1	167,8	26,7	10,3	37,7

Anlage 27

Nährstoffverhältnis von Mais und Sorghum bicolor in den drei Versuchsjahren in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung

Jahr	Fruchtart	Boden	Wasser- versorgung	Nährstoffverhältnisse			
				C	N	P	S
				optimal 600 : 15 : 5			
2008	Energiemais	Löss	1,0 PET	600	16	3	1
		Löss	0,6 PET	600	16	3	1
		Löss	0,3 PET	600	15	2	1
		Sand	1,0 PET	600	18	3	1
		Sand	0,6 PET	600	17	3	1
		Sand	0,3 PET	600	18	2	1
2009	Energiemais	Löss	1,0 PET	600	15	3	1
		Löss	0,6 PET	600	16	3	1
		Löss	0,3 PET	600	16	2	1
		Sand	1,0 PET	600	13	3	1
		Sand	0,6 PET	600	14	3	1
		Sand	0,3 PET	600	15	2	1
2010	Energiemais	Löss	1,0 PET	600	11	2	1
		Löss	0,6 PET	600	12	2	1
		Löss	0,2 PET	600	15	2	1
		Sand	1,0 PET	600	10	2	1
		Sand	0,6 PET	600	11	2	1
		Sand	0,2 PET	600	14	2	1
2008	Sorghum bicolor	Löss	1,0 PET	600	11	1	1
		Löss	0,6 PET	600	12	1	1
		Löss	0,3 PET	600	12	1	1
		Sand	1,0 PET	600	15	1	1
		Sand	0,6 PET	600	18	1	1
		Sand	0,3 PET	600	21	1	1
2009	Sorghum bicolor	Löss	1,0 PET	600	6	2	1
		Löss	0,6 PET	600	8	1	1
		Löss	0,3 PET	600	12	1	1
		Sand	1,0 PET	600	8	1	1
		Sand	0,6 PET	600	10	2	1
		Sand	0,3 PET	600	16	2	1
2010	Sorghum bicolor	Löss	1,0 PET	600	9	1	1
		Löss	0,6 PET	600	9	1	1
		Löss	0,2 PET	600	12	1	1
		Sand	1,0 PET	600	9	2	1
		Sand	0,6 PET	600	10	2	1
		Sand	0,2 PET	600	18	1	1

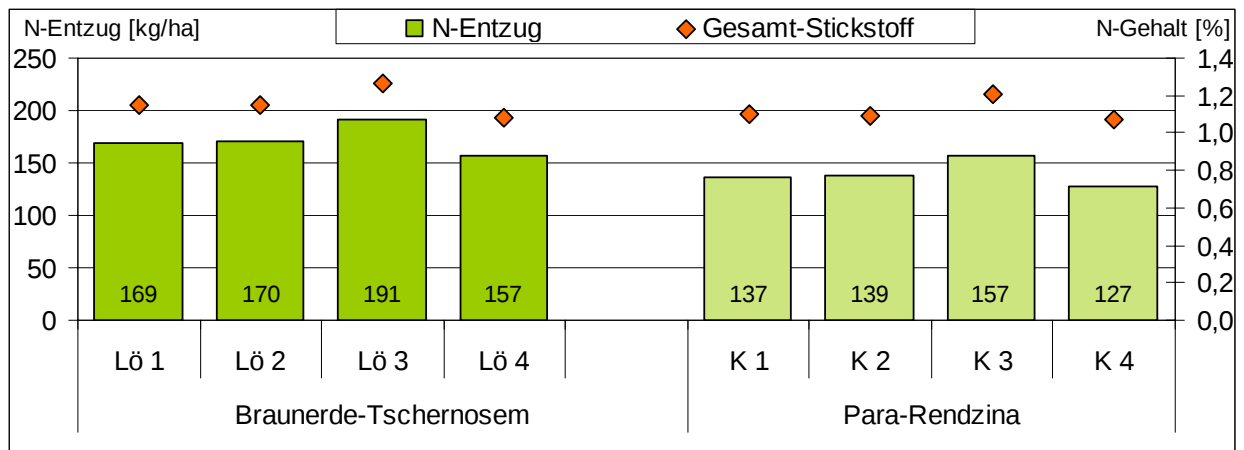
Anlage 28

Gärchemische Zusammensetzung und Gasausbeuten von Energiemais und Sorghum bicolor in Abhängigkeit von Boden und Wasserversorgung in den einzelnen Versuchsjahren

Substrat	Erntetermin	Boden	Wasser- stufe	BBCH Ernte	Bestandes- höhe	TS-Gehalt % der FM	TME dt/ha	Rohasche	Rohprotein	Rohfett	Rohfaser	NfE		Biogasausbeute	Methanausbeute	Methangehalt	Ernteertrag	Methan
								[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	oTS (%)	[l/kg oTS]	[l/kg oTS]	[%]	(dt oTS/ha)	(m³/ha)
Energiemais, Atletico	12.09.2008	Löß	1,0 PET	85	187,0	31,8	162,3	4,8	7,4	3,0	18,2	64,7	94,7	544,98	283,38	52,00	153,67	4354,8
	12.09.2008	Löß	0,6 PET	85	192,3	35,1	164,0	5,0	7,2	3,2	18,9	63,8	94,6	544,60	283,39	52,04	155,14	4396,4
	12.09.2008	Löß	0,3 PET	85	173,0	35,8	134,8	4,3	6,7	2,9	20,3	64	95,2	544,55	282,40	51,86	128,30	3623,1
	12.09.2008	Sand	1,0 PET	85	185,3	31,6	161,9	4,5	8,1	2,5	18,4	64,8	95	542,71	281,90	51,94	153,81	4336,0
	12.09.2008	Sand	0,6 PET	85	183,5	32,4	151,2	4,3	7,6	2,4	18,8	65,1	94,7	545,44	282,74	51,84	143,23	4049,8
	12.09.2008	Sand	0,3 PET	85	187,7	34,9	128,6	4,4	7,6	2,2	19,7	64,2	94,4	544,12	281,77	51,78	121,38	3420,1
Energiemais, Atletico	2008		Mittel	85	184,8	33,6	150,5	4,5	7,4	2,7	19,1	64,4	94,8	544,4	282,6	51,9	142,6	4030,0
Sorghum bicolor, Goliath	17.09.2008	Löß	1,0 PET	66	217,3	33,8	245,8	4,2	4,7	0,4	28,2	60,4	94,7	444,78	226,43	50,91	232,74	5270,1
	17.09.2008	Löß	0,6 PET	66	200,5	34,8	207,7	4,3	5,1	0,7	25,9	61,8	94,6	443,48	226,43	51,06	196,52	4449,8
	17.09.2008	Löß	0,3 PET	65	167,4	33,4	159,9	4,5	5,3	0,7	25,4	61,9	95,2	439,35	224,49	51,10	152,20	3416,8
	17.09.2008	Sand	1,0 PET	66	185,3	31,1	188,7	3,3	6,4	0,7	26,2	61,2	95	445,04	228,19	51,27	179,25	4090,2
	17.09.2008	Sand	0,6 PET	66	153,2	30,5	140,3	3,7	7,6	0,9	23,9	61,6	94,7	442,29	227,97	51,54	132,87	3029,1
	17.09.2008	Sand	0,3 PET	63	131,7	30,6	88,7	4,4	9,0	1,0	24,5	58,5	94,4	437,96	227,01	51,83	83,73	1900,9
Sorghum bicolor, Goliath	2008		Mittel	65	175,9	32,3	171,8	4,1	6,4	0,7	25,7	60,9	94,8	442,1	226,8	51,3	162,9	3692,8
Energiemais, Atletico	02.09.2009	Löß	1,0 PET	84	264,8	28,7	254,1	4,4	7,2	2,4	21,7	64,29	95,3	549,71	284,50	51,76	242,16	6889,4
	02.09.2009	Löß	0,6 PET	85	253,8	28,9	242,5	4,6	7,5	2,6	20,4	64,87	95	551,66	286,08	51,86	230,34	6589,7
	02.09.2009	Löß	0,3 PET	85	244,8	32,3	232,7	4,7	7,3	2,8	23	62,23	94,3	553,36	287,20	51,90	219,48	6303,3
	02.09.2009	Sand	1,0 PET	85	272,3	30,2	253,7	3,8	6,2	2,5	21,5	66,03	95,6	554,93	286,48	51,62	242,56	6949,0
	02.09.2009	Sand	0,6 PET	85	269,3	32,1	254,6	3,8	5,9	2,6	22,9	64,85	96,1	551,47	284,65	51,62	244,64	6963,7
	02.09.2009	Sand	0,3 PET	85	269,0	35,0	199,9	3,9	6,5	2,9	24,5	62,21	95	554,49	287,24	51,80	189,89	5454,4
Energiemais, Atletico	2009		Mittel	85	262,3	31,2	239,6	4,2	6,8	2,6	22,3	64,1	95,2	552,6	286,0	51,8	228,2	6524,9
Sorghum bicolor, Goliath	29.09.2009	Löß	1,0 PET	70	336,7	32,5	457,9	5,3	2,9	0,5	33,6	57,73	95,1	451,96	228,77	50,62	435,45	9961,7
	29.09.2009	Löß	0,6 PET	71	299,9	31,4	368,9	4,9	3,5	0,8	31,8	58,95	95,6	450,34	228,75	50,80	352,69	8067,9
	29.09.2009	Löß	0,3 PET	68	243,5	27,4	258,6	6,2	5,3	0,9	29,2	58,37	95,3	443,14	226,65	51,15	246,43	5585,3
	29.09.2009	Sand	1,0 PET	70	316,2	33,7	396,6	3,0	3,4	0,7	32,9	59,97	95,6	459,47	233,10	50,73	379,16	8838,3
	29.09.2009	Sand	0,6 PET	70	271,4	30,2	276,6	4,1	4,5	0,9	29,4	61,06	95,5	452,87	230,91	50,99	264,19	6100,5
	29.09.2009	Sand	0,3 PET	66	216,0	26,1	162,2	4,8	7,2	1,2	29,3	57,52	95,1	448,81	231,18	51,51	154,25	3565,8
Sorghum bicolor, Goliath	2009		Mittel	69	280,6	30,2	320,1	4,7	4,5	0,9	31,0	58,9	95,4	451,1	229,9	51,0	305,4	7019,9
Energiemais, Atletico	16.09.2010	Löß	1,0 PET	85	267,5	26,1	283,2	4,8	4,9	1,7	23,3	65,3	94,9	550,78	282,06	51,21	268,73	7579,8
	16.09.2010	Löß	0,6 PET	85	266,0	26,8	257,9	4,6	5,5	1,9	22,9	65,1	95,4	548,77	281,82	51,35	246,04	6933,9
	16.09.2010	Löß	0,2 PET	84	251,5	25,4	168,3	3,9	6,5	2,1	24	63,6	94,8	554,29	285,80	51,56	159,50	4558,7
	16.09.2010	Sand	1,0 PET	85	269,7	28,6	270,9	3,7	4,3	1,9	23,8	66,3	95,1	558,08	285,62	51,18	257,63	7358,2
	16.09.2010	Sand	0,6 PET	85	261,8	28,5	245,1	3,4	4,8	2,2	23,7	65,9	95,2	559,19	287,05	51,33	233,37	6699,0
	16.09.2010	Sand	0,2 PET	85	256,3	27,6	196,4	3,8	5,9	1,7	22,8	65,9	94,9	555,76	285,34	51,34	186,41	5319,1
Energiemais, Atletico	2010		Mittel	85	262,1	27,2	237,0	4,0	5,3	1,9	23,4	65,4	95,1	554,5	284,6	51,3	225,3	6408,1
Sorghum bicolor, Goliath	19.10.2010	Löß	1,0 PET	54	366,3	27,4	375,7	5,1	3,8	1,0	31,8	58,2	96,6	444,55	226,27	50,90	362,91	8211,5
	19.10.2010	Löß	0,6 PET	54	361,3	28,8	344,0	4,7	3,8	1,0	31,6	58,9	96,1	449,26	228,68	50,90	330,56	7559,4
	19.10.2010	Löß	0,2 PET	51	290,8	28,7	216,9	5,0	5,2	1,4	28,6	59,8	95,9	446,21	228,55	51,22	208,01	4754,1
	19.10.2010	Sand	1,0 PET	54	338,8	28,6	341,9	3,0	3,7	1,2	30,7	61,3	96,8	453,19	230,72	50,91	330,94	7635,3
	19.10.2010	Sand	0,6 PET	53	301,5	28,4	263,9	3,4	4,4	1,5	30,2	60,5	96,6	451,80	230,80	51,08	254,91	5883,3
	19.10.2010	Sand	0,2 PET	44	218,0	25,1	114,2	4,5	6,8	1,6	28,5	58,7	96,2	446,09	229,87	51,53	109,82	2524,5
Sorghum bicolor, Goliath	2010		Mittel	52	312,8	27,8	276,1	4,3	4,6	1,3	30,2	59,6	96,4	448,5	229,1	51,1	266,2	6094,7

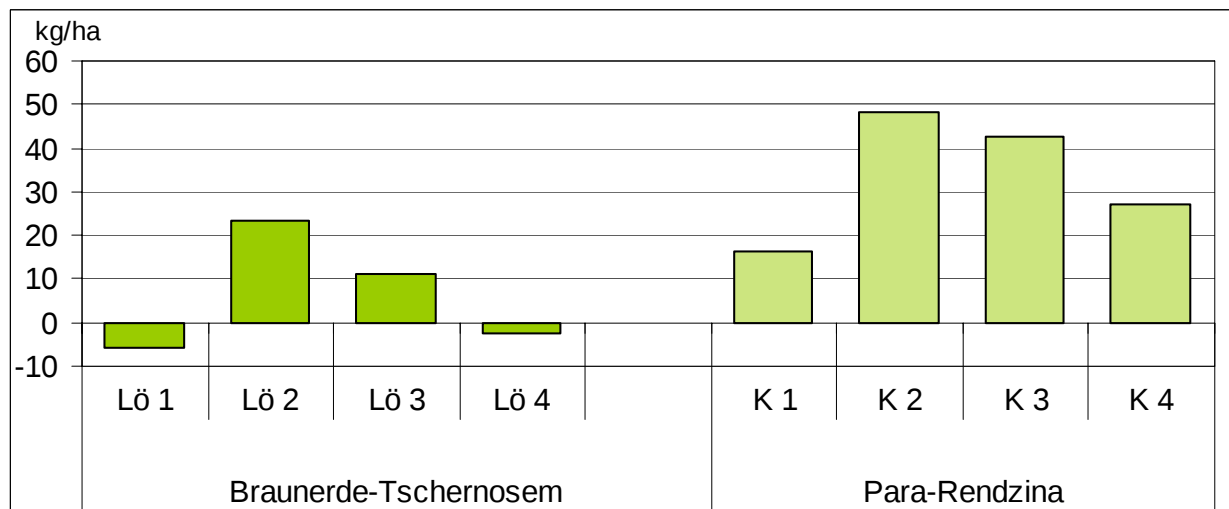
Anlage 29

N-Gehalte und N-Entzüge von *Sorghum bicolor* auf dem Feldversuch in Abhängigkeit von Boden und Düngungsstufe 2009



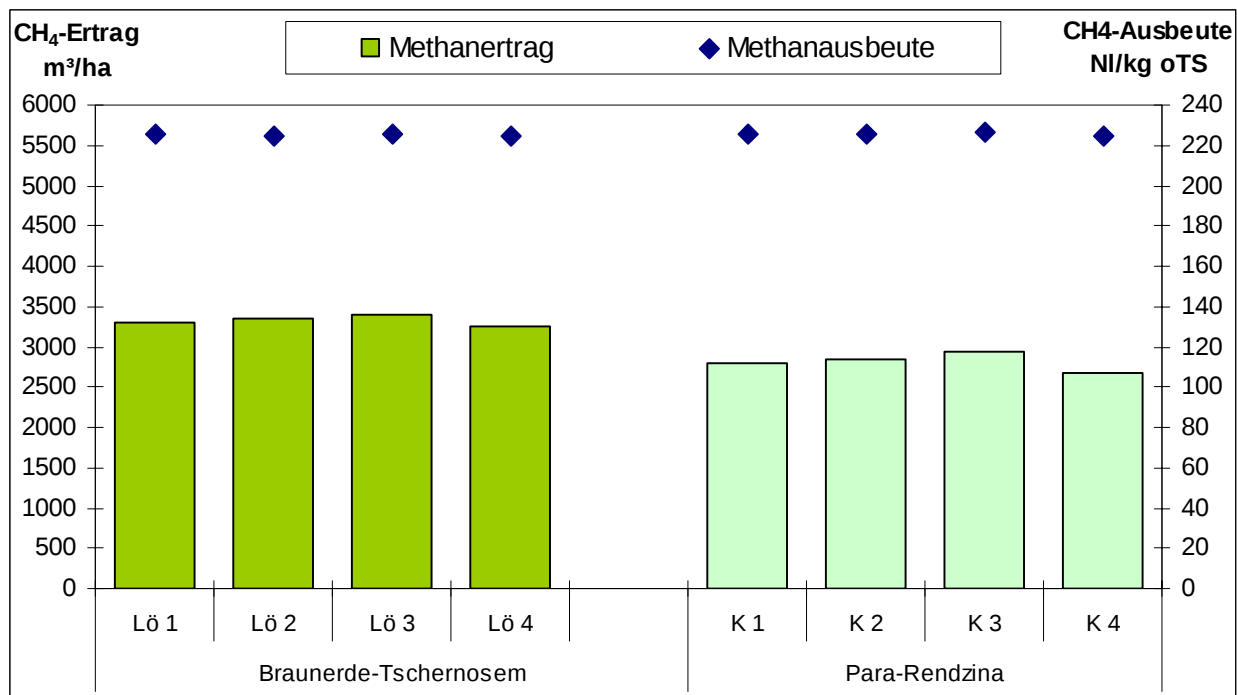
Anlage 30

N-Saldo unter *Sorghum bicolor* auf dem Feldversuch in Abhängigkeit von Boden und Düngungsstufe 2009



Anlage 31

Theoretische Methanausbeute (NI/kg oTS) und Methanertrag [m³/ha] von Sorghum bicolor in den Feldversuchen 2009



Anlage 32

Boniturparameter, Erträge und Nährstoffgehalte der Sorghumsorten zur Ernte im Praxisbetrieb Pahren 2010

	Sorte	Bestandes-höhe (cm)	Triebe je Pflanze (Anzahl)	BBCH	TS-Gehalt (% FM)	TM-Ertrag (dt/ha)	Rohasche	Rohfett	Rohfaser	Rohprotein	NfE	Gesamt-zucker
							(% TS)					
Sorghum bicolor x Sorghum sudanense	Lussi	263	5	55-59	34,10	99,0	4,72	1,23	31,3	7,3	55,4	17,4
	Super Dolce 15	232	7	59-61	24,25	78,3	5,11	0,93	27	7,34	59,6	24,7
	Nutri Honey	228	6	59-61	25,60	91,5	5,34	1,03	25,4	8,19	60	25,1
	GK Csaba	224	5	61	25,89	84,4	5,45	0,82	27	7,92	58,8	24,5
Sorghum bicolor	KWS Zerberus	237	2	53-55	22,87	80,6	5,78	0,62	29,1	6,8	27,7	20,2
	KWS Maja	239	3	53	26,55	80,1	5,29	1,34	27,8	7,13	58,5	22,8
	Herkules	251	3	51	19,73	86,6	5,99	1,14	28,5	7,2	57,2	21,2
	Rona 1	261	2	55-61	23,11	93,5	5,52	1,13	25,8	8,21	59,4	27,3

Anlage 33

Silagequalitätsparameter von Sorghumsilage (Sortenmischung) im Vergleich zu Maissilage 2011 im Praxisversuch Pahren

Parameter	Einheit	Sorghumsilage	Mais-Silage
H	% der TM	6,32	6,71
C	% der TM	45,90	46,20
Ethanol	% der TM	5,55	1,85
Essigsäure	g/kg FM	6,83	6,32
Essigs.+ Propions.	% der TM	3,14	2,19
Propionsäure	g/kg FM	< 0,05	< 0,05
Isobuttersäure	g/kg FM	< 0,05	< 0,05
Buttersäure	g/kg FM	< 0,05	< 0,05
Summe Buttersäure	% der TM	< 0,05	0,02
Isovaleriansäure	g/kg FM	< 0,05	0,07
Valeriansäure	g/kg FM	< 0,05	< 0,05
Capronsäure	g/kg FM	< 0,05	< 0,05
Cumarsäure	mg/kg FM	2.350,00	1.862,50
Ferulasäure	mg/kg FM	773,25	1.029,00
Trockensubstanz	% der FM	21,75	28,88
Rohasche	% der TM	7,39	4,74
Rohprotein	% der TM	9,47	8,35
Rohfaser	% der TM	33,18	20,53
ADF	% der TM	41,18	24,70
Lignin	% der TM	4,91	2,76
NDF	% der TM	67,05	45,55
Rohfett	% der TM	0,95	2,09
Gesamtzucker	% der TM	< 1,00	< 1,00
Stärke	% der TM	< 3,00	26,85
ELOS	% der TM	43,93	65,10
N-freie Extraktst.	% der TM	49,03	64,33
Ca (RFA)	% der TM	0,38	0,20
P (RFA)	% der TM	0,33	0,28
Na (RFA)	mg/kg TM	< 35,0	< 35,0
Mg (RFA)	% der TM	0,26	0,15
K (RFA)	% der TM	2,06	1,37
Cu (RFA)	mg/kg TM	7,72	5,05
Mn (RFA)	mg/kg TM	25,10	22,15
Zn (RFA)	mg/kg TM	34,75	25,65
Fe (RFA)	mg/kg TM	116,75	83,05
S (RFA)	% der TM	0,14	0,11
Br (RFA)	mg/kg TM	10,55	5,65
Al (RFA)	mg/kg TM	87,33	64,83
Cl (RFA)	% der TM	0,14	0,13
Si (RFA)	% der TM	0,95	0,49
Sr (RFA)	mg/kg TM	20,23	11,85
Ammoniak	g/kg FM	0,10	0,10
pH-Wert		4,28	4,18

Anlage 34

Makro- und Mikronährstoffgehalte der Sorghumsorten zur Ernte im Praxisbetrieb Pahren 2010

	Sorte	Ca (% TM)	P (% TM)	Na (mg/k g TM)	Mg (% TM)	K (% TM)	Cu (mg/k g TM)	Mn (mg/k g TM)	Zn (mg/k g TM)	Fe (mg/k g TM)	S (% TM)	Cl (% TM)
Sorghum bicolor x Sorghum sudanense	Lussi	0,244	0,232	< 35,0	0,149	1,38	5,2	15,4	23,2	69	0,096	0,063
	Super Dolce 15	0,297	0,208	< 35,0	0,182	1,48	6,2	18,9	30,1	113	0,107	0,074
	Nutri Honey	0,285	0,215	< 35,0	0,181	1,62	6,5	20,8	38,1	81	0,115	0,069
	GK Csaba	0,321	0,245	< 35,0	0,157	1,59	6,8	16,8	37,8	62	0,108	0,075
Sorghum bicolor	KWS Zerberus	0,279	0,222	< 35,0	0,187	1,82	5,4	17,9	23,3	74	0,099	0,08
	KWS Maja	0,297	0,226	< 35,0	0,162	1,57	5,2	18,7	33,2	63	0,105	0,051
	Herkules	0,317	0,234	< 35,0	0,226	1,82	5,7	27,1	26,6	76	0,111	0,067
	Rona 1	0,286	0,221	< 35,0	0,178	1,75	6,3	25,8	28,9	72	0,105	0,068

Erfolgskontrollbericht

Zuwendungsempfänger:

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Agrarökologie und landw. Bodenschutz, Referat
450

Förderkennzeichen:

22021607

Vorhabensbezeichnung:

Verbundvorhaben Anbautechnik Sorghumhirsen – Ein Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenpektrums, Teilvorhaben 2: Ökologische Untersuchungen zum Energiehirseanbau (Wasser- und Nährstoffeffizienz) und Gärrestverwertung

Berichtszeitraum:

01.05.2008 - 31.07.2011

Abschlussbericht

Bearbeiter:

Projektleiter: Dr. Steffi Knoblauch

Projektbearbeiter: Dr. Maria Wagner, Dr. Steffi Knoblauch

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, z.B. des Förderprogramms - (ggf. unter Angabe des Schwerpunkts)

Die Novellierung des EEG zum 01.01.2009 bewirkte eine Fortsetzung des seit 2004 stetig steigenden Trend der Biogasanlagenanzahl und somit eine Zunahme des Anbauflächenumfangs von Pflanzenarten für die Biogasgewinnung.

Die EEG-Novelle 2012 lässt erwarten, dass flächendeckendem Maisanbau entgegengewirkt werden soll (Beschluss 17. Juni 2011). Die biomasseertragsstarken Sorghumhirsen könnten eine Alternative bilden und somit einen Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenpektrums leisten. Darüber hinaus wird nach geeigneten Energiepflanzen auf Grenzstandorten für Mais (Gebiete mit Sommertrockenheit, Höhenlagen) gesucht.

Das Projekt trägt den Vorgaben des „Förderprogramms Nachwachsende Rohstoffe“ Rechnung.

Ziel des Verbundvorhabens war die Entwicklung des Anbauverfahrens für Sorghumhirsen zur Anbauerweiterung des Energiepflanzenpektrums für die Biogasproduktion auf leichten bis mittleren Böden unter Beachtung der Grundsätze nachhaltiger Landwirtschaft (langfristig stabile und wirtschaftliche Erträge, ökologisch und nährstoffbilanziell ausgewogene Energiepflanzenanbausysteme). Im Teilvorhaben 2 wurden ökologische Untersuchungen zur bislang unzureichend bekannten Wasser- und Nährstoffeffizienz der Sorghumhirsen im Vergleich zum Energiemais vorgenommen. Im Schlussbericht und den Veröffentlichungen wurden daraus Empfehlungen für die Anbaueignung und den Züchtungsbedarf abgeleitet.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen.

- Sorghum bicolor hat einen hohen Wasserbedarf und produziert damit einen größeren Ertrag als Energiemais. Die Wassernutzungseffizienz von Sorghum bicolor ist im Bereich höheren Wasserangebots besser als die von Energiemais. Geprüft wurden die Sorten Goliath und Atletico. Mit abnehmendem Wasserangebot geht diese Vorzüglichkeit zurück und bildet Energiemais mit der gleichen Wassermenge mehr Trockenmasse als Sorghum bicolor. Unter den Niederschlagsverhältnissen im mitteldeutschen Trockengebiet ist die Wassernutzungseffizienz von Mais besser als die von Sorghum bicolor.

- Dafür besitzt Sorghum bicolor ein größeres Bodenwasseraneignungsvermögen als Mais und kann damit Trockenperioden überbrücken. Je nach Wasserbereitstellungsvermögen des Standortes kann daraus eine Ertragsüberlegenheit gegenüber Mais entstehen.
- Optimale Wasserversorgung verhilft Sorghum zu einer schnelleren Abreife, während Mais seine Entwicklung verzögert und umgekehrt.
- Der N-Zufuhr-Abfuhr-Saldo ist unter der Bedingung empfehlungskonformer N-Düngung (Beachtung von N-Sollwert und Boden-Nmin-Gehalt im Frühjahr) bei beiden Kulturen negativ. Unter Mais fällt der N-Saldo stärker negativ aus, aufgrund eines höheren Nmin-Gehaltes im Boden im Frühjahr und höherer N-Entzüge. Dennoch sind die Nitratkonzentration des Sickerwassers und der N-Austrag im ersten Versuchsjahr unter Sorghum bic. deutlich niedriger als unter Mais. Im dritten Versuchsjahr gibt es kaum noch Unterschiede zwischen den Kulturen als Folge der Wirkung negativer N-Salden. Die anfangs deutlich niedrigere Nitratkonzentration des Sickerwassers unter Sorghum bic. kann mit dem N-Entzug aus tiefer liegenden Bodenschichten erklärt werden.
- Die theoretisch berechnete Methanausbeute des Energiemaies lag in beiden Versuchsjahren um 20% höher als die von Sorghum bicolor. Da der Methanertrag der Trockenmasserelation folgt, erzielten beide Kulturen bedingt durch den höheren Sorghumertrag ähnliche Ergebnisse.
- In zwei von drei Jahren war die Durchwurzelung von Sorghum bicolor auf dem Sandboden im Modellversuch mit Kleinlysimetern weniger tief als die von Energiemaies. Vermutlich sind dafür die in den Sandböden der Düben-Dahlener-Heide im Unterboden häufiger vorkommenden Ortssteinlagen verantwortlich. Das Bodenwasseraneignungsvermögen von Sorghum bicolor sollte deshalb auf verschiedenen Standorten weiter geprüft werden.
- Die Etablierung eines Sorghumbestandes für die Ausbringung von Gärresten in einem Praxisbetrieb ist in zwei von drei Jahren fehlgeschlagen und zeigt das noch bestehende Anbaurisiko dieser Kulturart (2008 und 2009 geringer Feldaufgang und Unsicherheit im Herbizideinsatz zur Bekämpfung des starken Unkrautbesatzes, 2010 lückiger Pflanzenbestand aufgrund unzureichend feinkörnigen Saatbettes, hergestellt mit dem Airseeder, einer für Mais üblichen Sätechnik).

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

- Erfindungen, Schutzrechte und Lizenzen wurden nicht angemeldet.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

- Die Anbauwürdigkeit von Sorghum bicolor in Abhängigkeit von den Standortverhältnissen kann mit Hilfe der um Sorghum-bicolor-Parameter erweiterten Verdunstungs- und Pflanzenwachstumsmodelle für den Landwirt ermittelt werden und in standortabhängigen Anbauempfehlungen in die Praxis umgesetzt werden.
- Die nicht erwartete geringere Wassernutzungseffizienz von Sorghum bic. im Vergleich zu Energiemaies unter Trockenstress (0,3 PET) wird mit den für das Pflanzenwachstum unteroptimalen Temperaturen, insbesondere während der Jungpflanzenentwicklung im Zusammenhang gebracht und gibt dem Pflanzenzüchter den Hinweis, Sorten mit besserer Kältetoleranz auszuwählen.
- Der Aussage der Pflanzenzüchter, Sorghum bicolor benötigt weniger Wasser als Mais kann nicht uneingeschränkt zugestimmt werden. Unter Trockenstress gilt diese Aussage nicht. Im Bereich besserer Wasserversorgung kann von dieser Vorzüglichkeit ausgegangen werden.
- Sorghum verfügt über ein tief reichendes Wurzelsystem und versucht damit den hohen Wasserbedarf zu decken. In niederschlagsarmen Gebieten können daraus Nachteile für die Folgefrucht entstehen. Die um Sorghum-bicolor-Parameter ergänzten Verdunstungsmodelle können für verschiedene Böden den Einfluss von Sorghum bicolor auf die Wasserversorgung der Folgefrucht berechnen und dem Landwirt daraus Empfehlungen für die Stellung von Sorghum in der Fruchtfolge geben.

- Empfehlungskonforme N-Düngung (Beachtung des N-Sollwertes und des Boden-Nmin-Gehaltes im Frühjahr) hilft über negative N-Salden die N-Auswaschung aus der Wurzelzone zu minimieren.

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

- Die mit Hilfe der Feldlysimeter Butteltstedt ermittelten Werte der potenziellen Evapotranspiration und des Bodenwasseraneignungsvermögens von Sorghum bicolor (Sorte Goliath) im Verlauf der pflanzlichen Entwicklung sowie der aus den Lysimetermessungen abgeleiteten Reduktionsfunktion (Beziehung zwischen Bodenwassergehalt und AET/PET-Quotient für Braunerde-Tschernosem aus Löß) dienen der Parametrisierung von Verdunstungsmodellen.

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

- Im laufenden Projekt gibt es auf der Basis von drei Untersuchungsjahren eine sichere Aussage für die zu Beginn des Projektes am meisten favorisierte Sorte Goliath. Für die Einschätzung der Wassernutzungseffizienz und des Bodenwasseraneignungsvermögens von Sorghumhirsen ist es unabdingbar diese Messungen auf andere Arten (Sorghum bic. x sudan.) und Sorten auszudehnen. Die TLL verfügt mit ihren Versuchseinrichtungen (wägbare Feldlysimeteranlage Butteltstedt, Kleinlysimeteranlage) über die notwendigen Voraussetzungen dafür.
- Die Bestimmung der Wasserhaushaltsparameter dieser neuen Kultur, deren Arten und Sorten ist für die Züchtung weiterer Sorten eine wichtige Voraussetzung und hilft das Potenzial der Sorghumhirsen für den Anbau in der gemäßigten Zone weiter zu entwickeln.
- Zwei der Feldlysimeter sind mit Mitteln aus diesem Projekt mit Wägesystemen ausgerüstet worden und stehen zukünftig immer für die Ermittlung der potenziellen Verdunstung von Pflanzen (Aufrechterhaltung von > 60 bis 80 % nFK bzw. eines AET/PET-Quotienten von etwa 1,0 während der Hauptwachstumsperiode) zur Verfügung.
- Insbesondere die vorliegende dreijährige Messreihe der N-Auswaschung in Abhängigkeit von den N-Salden unter Sorghum und Mais ist eine wichtige Randbedingung für die Interpretation der N-Auswaschung in den Folgejahren.
- Durch Fortführung der Untersuchungen im bereits bestätigten Verbundprojekt „Pflanzenbauliche, ökonomische und ökologische Bewertung von Sorghumarten- und hybriden als Energiepflanzen“ können diese beiden zuletzt genannten Vorteile genutzt werden.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

- Das zweimalige Misslingen der Bestandesetablierung im Praxisversuch Pahren hat gezeigt, dass eine gute Saatbettbereitung (feinkrümeliges, gut abgesetztes Saatbett) und Herbizideinsatz im Jungpflanzenstadium (langsame Jugendentwicklung der Hirsen) Voraussetzungen für guten Aufgang und eine erfolgreiche Bestandesetablierung sind. Durch die zeitlich späte Vergärung der Hirsensilagen aus dem erst im letzten Versuchsjahr (April 2011) erfolgreich etablierten Sorghumsortenbestand konnten im Bewilligungszeitraum keine Untersuchungen zur Gärrestqualität durchgeführt werden.

5. Präsentationsmöglichkeiten

Während des Projektzeitraumes wurden die Ergebnisse in Form mehrerer Vorträge (Projekttreffen, Beregnungstag Thüringen/ Sachsen, Energiepflanzen-workshop der TLL), eines Posters (Gumpensteiner Lysimetertagung 2011) und von Feldversuchsführungen (Feldtage der TLL, Auszubildende- und Studentenexkursionen) einem Fachpublikum vorgestellt.

6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Ausgaben- und Zeitplanung wurden eingehalten.

Projekttitel: Verbundprojekt: Anbautechnik Sorghumhirsen - ein Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenpektrums; Teilvorhaben 2: Ökologische Untersuchungen zum Energiehirseanbau (Nährstoff-/Wassereffizienz) und Gärrestverwertung

FKZ: 22021607

Projektbeschreibung:

Seit einigen Jahren sind verstärkte Bemühungen im Gange, Sorghumhirsen in Mitteleuropa als Energiepflanze zu etablieren, um das Spektrum des vorrangig auf Mais und Ganzpflanzengetreide ausgerichteten Energiepflanzenanbaus für die Biogasgewinnung vielfältiger und ökologisch ausgewogener zu gestalten. Insbesondere auf Grenzstandorten für Mais (Gebiete mit Sommertrockenheit, Höhenlagen) wird nach alternativen Energiepflanzen gesucht.

Derzeit fehlen für den gemäßigten Klimaraum Angaben zum Wasserverbrauch und zur Wasser- und Nährstoffnutzungseffizienz von Sorghumhirsen. Lysimeterversuche sind geeignet, dieser Fragestellung nachzugehen.

Im Modellversuch mit Kleinlysimetern (monolithisch befüllt, Oberfläche 0,125 m², Tiefe 135 cm) wurden im Zeitraum von 2008 bis 2010 die Sorghum bicolor-Sorte *Goliath* und als Referenzpflanze die Energiemaissorte *Atletico* auf zwei verschiedenen Böden (Braunerde-Tschernosem aus Löß und Braunerde aus Bändersand) mit gestaffelter Wasserversorgung (100, 60 und 30 % der potenziellen Evapotranspiration ab 8-Blatt-Stadium) hinsichtlich Wasser-Ertrags-Beziehungen, Wasserverbrauch, N-Nutzungseffizienz, Sickerwasserbildung und Nährstoffauswaschung bei optimiertem Düngungsregime (N-Düngung nach Düngeempfehlung) untersucht.

Die Feldlysimeteranlage Buttelstedt (monolithisch befüllt, Oberfläche 2 m², Tiefe 250 cm, kontinuierlich wägbare mit einer Genauigkeit von 0,05 mm) diente im Jahr 2009 der Bestimmung der aktuellen und potenziellen Evapotranspiration (Aufrechterhaltung von mehr als 60 bis 80 % nFK ab 8-Blatt-Stadium), der Wassernutzungseffizienz und des Ausschöpfungsvermögens von Bodenwasser der Sorghum bicolor-Sorte *Goliath* auf zwei verschiedenen Böden (Braunerde-Tschernosem aus Löß und Para-Rendzina aus unterem Keuper).

In einem Praxisversuch sollte die Wirkung von Gärresten auf die Ertragsbildung in Form eines kontrollierten Anbauvergleichs getestet werden.

Projektergebnisse:

Sorghum bicolor, Sorte *Goliath* hat einen hohen Wasserbedarf (568 mm von Aufgang bis Ernte) und bildet damit einen beträchtlichen Ertrag (300 dt/ha Trockenmasse), größer als das Ertragspotenzial von Mais. Im Bereich höherer Wasserversorgung ist die Wassernutzungseffizienz von Sorghum bicolor besser als die von Mais. Mit abnehmendem Wasserangebot geht diese Vorzüglichkeit zurück. Unter Trockenstress reduziert Sorghum bicolor die Ertragsbildung stärker als Mais. Unter den Niederschlagsverhältnissen im mitteldeutschen Trockengebiet ist die Wassernutzungseffizienz von Mais günstiger als die von Sorghum bicolor. Dieses Ergebnis ist nicht erwartet worden. In den wärmeren Anbauregionen Südaustraliens entwickelte Sorghum bicolor im Vergleich zum Mais eine bessere Trockentoleranz. Für die Ausbildung dieses Anpassungsmechanismus findet Sorghum bicolor in unseren Anbauregionen vermutlich nicht die für ihr Wachstum optimalen Temperaturen vor. Eine verzögerte Jungpflanzenentwicklung deutet daraufhin.

Dafür ist Sorghum bicolor mehr als Mais in der Lage, ihren Wasserbedarf durch Aufnahme von Bodenwasser zu decken.

Im Modellversuch mit Kleinlysimetern war die Nitratkonzentration des Sickerwassers in den ersten beiden Jahren im Sandboden fast doppelt so hoch wie im Lößboden, auf beiden Böden unter Hirse jedoch deutlich geringer als unter Mais. Unter dem Einfluss empfehlungskonformer N-Düngung waren die N-Salden beider Kulturen in allen drei Jahren negativ. Der im dritten Jahr deutlich geringere N-Austrag und die kaum noch erkennbaren Unterschiede zwischen den Kulturen zeigen die Wirkung negativer N-Salden. Dennoch hat Sorghum bicolor durch ihr tiefer reichendes Wurzelsystem dazu beigetragen, die N-Auswaschung von Anfang an zusätzlich zu reduzieren.

Hinsichtlich der wertgebenden Inhaltsstoffe für die Methanbildung wies der Energiemais günstigere Werte auf als Sorghum bicolor. Da der Methanertrag der Trockenmasseertragsrelation folgt, erreichten beide Kulturen ähnliche Ergebnisse.

Im Praxisbetrieb konnte aufgrund fehlgeschlagener Versuche der Etablierung eines Sorghumbestandes die Wirkung von Gärresten auf den Ertrag nicht geprüft werden.

Project title: Cooperative project: Cultivation techniques of Sorghum – a contribution to the diversification of the spectrum of energy plants;
Sub-project 2: Ecological investigations to the cultivation of Sorghum (water- and nutrient efficiency) and utilisation of the fermentation residues

Project number: 22021607

Project description:

In the last few years there have been efforts to establish sorghum species as fuel plants in Central Europe to make the fuel plant cultivation, which currently is oriented primarily to Maize and hole plants crop, more diverse and ecological. Particularly with regard to regions, which are less suitable for maize (regions with summer dryness, high altitudes) sorghum can be an interesting alternative for biogas production.

At present there is insufficient knowledge about water demand, water- and nutrient use efficiency of sorghum species in the temperate climate zone. Lysimeter trials are suitable to determine these parameters.

By means of small lysimeters (monolithic filled, surface 0,125 m², depth 135 cm) Sorghum bicolor variety *Goliath* and as a reference Maize variety *Atletico* had been examined depending on amount of irrigation water (relating to 100, 60 and 30 % of the potential evapotranspiration of the plant from 8-leaf-stage) by determining water-yield-relations, water consumption, nitrogen use efficiency, drainage runoff and nitrogen leaching on two different soils (haplic phaeozem of loess, cambic umbrisol of sand) in the years 2008 to 2010. The amount of nitrogen fertilization based on fertilizer recommendation.

The field lysimeter Butteldstedt (monolithic filled, surface 2 m², depth 250 cm, continuously weighable with an accuracy of 0,05mm) are used to identify the actual and potential evapotranspiration (irrigation to ensure more than 60 to 80 % plant available water from 8-leaf-stage), the water use efficiency and the soil water withdrawal of sorghum bicolor variety *Goliath* on two different soils (haplic phaeozem originated from loess and stony calcaric regosol) in the year 2009.

In an agricultural farm a practice test should be carried out to find out the impact of fermentation residues on the yield of agricultural crops.

Project results:

Sorghum bicolor, *Goliath* requires large amounts of water (568 mm between emergence to harvest) and produces under optimized water supply a considerable yield (30 tons per hectare dry matter), higher than the potential yield of maize. In the range of higher water supply the water use efficiency of sorghum bicolor is better than the water use efficiency of maize. With decreasing water supply this excellence goes back. Under drought stress Sorghum bicolor reduces the plant growth more than maize. Under the rain fall condition in the central german dry regions the water use efficiency of maize is better than of sorghum bicolor. This result was not expected. In the warmer riverine plain of south-eastern Australia the dry matter of maize grain was reduced as a result of drought stress 38 day after sowing to 3 % and under the same condition the dry matter of sorghum bicolor grain only to 70 % compared to a well irrigated plot (Mason et al., 1983). Apparently sorghum bicolor doesn't find the optimal temperature for their plant growth to develop this adjustment mechanism. The slow growth during the leaf development period supports this assumption.

But Sorghum bicolor is more able to extract soil water than maize to meet its water demand.

In the model test with small lysimeters the nitrate concentration of the seepage water in the first two years was twice as high in the sandy soil than in the loess soil, in both soils under sorghum bicolor much lower than under maize. As a result of nitrogen fertilization according to recommendation the N-balances between N-fertilization and N-removal with harvest product for both cultures are negative in all three years. The smaller N-leaching in the third year and the hardly recognizable differences between the plants indicate the impact of the negative n-balances in the years before. Nevertheless sorghum bicolor has reduced the N-leaching in its first year, probably by means of their deeper rooting system.

With regard to the valuable constituents for methane formation maize showed better values than sorghum bicolor.

Because the methane production depends on amount of dry matter both plants reached the same result.

In the agricultural farm there has been no success to establish a harvestable yield and show the cultivation risks with sorghum. Therefore the impact of fermentation residues on yield could not be determined.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts Verbundprojekt: Anbautechnik Sorghumhirsen - ein Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenspektrums; Teilvorhaben 2: Ökologische Untersuchungen zum Energiehirseanbau (Nährstoff-/Wassereffizienz) und Gärrestverwertung	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Dr. Maria Wagner, Dr. Steffi Knoblauch	5. Abschlußdatum des Vorhabens 31.07.2011
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) Postfach 10 02 62 07702 Jena	7. Form der Publikation
9. Ber.Nr. Durchführende Institution	10. Förderkennzeichen *) 22021607 bzw. 07NR216
11a. Seitenzahl Bericht: 88	11b. Seitenzahl Publikation
12. Literaturangaben: 12	13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) 11055 Berlin
14. Tabellen: 21	15. Abbildungen: 22
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Hofplatz 1, 18276 Gülzow	
18. Kurzfassung Für die Diversifizierung des Energiepflanzenanbaus, insbesondere auf für Mais weniger geeigneten Standorten (Gebiete mit Sommertrockenheit, Höhenlagen) sind seit einigen Jahren Bemühungen im Gange, Sorghumhirsen in Mitteleuropa für den Einsatz als Biogassubstrat zu etablieren. Inwieweit mit Sorghumhirsen wirtschaftlich stabile Erträge produziert werden können, wie die Anbauverfahren dafür gestaltet sein müssen und ob damit auch den Anforderungen an ökologische Ziele Rechnung getragen werden kann war Gegenstand des Verbundvorhabens. Die im Teilvorhaben 2 angesiedelten ökologischen Untersuchungen zielten im Wesentlichen auf die Wasser- und Nährstoffnutzungseffizienz von Sorghumhirsen. In einem Modellversuch mit Kleinlysimetern wurden im Zeitraum von 2008 bis 2010 die Sorghum bicolor-Sorte Goliath und als Referenzpflanze die Energiemaissorte Atletico auf zwei verschiedenen Böden (Braunerde-Tschernosem aus Löß, Braunerde aus Bändersand) mit gestaffelter Wasserversorgung hinsichtlich Wasser-Ertragsbeziehungen, N-Nutzungseffizienz, Sickerwasserbildung und Nährstoffauswaschung untersucht. Mit Hilfe der Feldlysimeter Butteltstedt erfolgte im Jahr 2009 die Bestimmung der aktuellen und potenziellen Evapotranspiration, der Wassernutzungseffizienz und des Aneignungsvermögens von Bodenwasser der Sorghum bicolor-Sorte Goliath auf einem Braunerde-Tschernosem aus Löß. Die Ergebnisse zeigen, dass Sorghum bicolor einen hohen Wasserbedarf hat (568 mm) und damit im Vergleich zu Mais einen deutlich höheren Ertrag erzielen kann (300 dt/ha Trockenmasse). Im Bereich höherer Wasserversorgung ist die Wassernutzungseffizienz von Sorghum bicolor besser als die von Mais. Mit abnehmendem Wasserangebot geht diese Vorzüglichkeit zurück. Unter Trockenstress reduziert Sorghum bicolor den Ertrag stärker als Mais und die Wassernutzungseffizienz wird schlechter. Dafür besitzt Sorghum bicolor ein größeres Bodenwasseraneignungsvermögen als Mais um dem hohen Wasserbedarf entgegenzukommen. Die geringere Wassernutzungseffizienz bei Trockenheit ist nicht erwartet worden und ist vermutlich auf die für Sorghum bicolor in unseren Anbauregionen unteroptimalen Temperaturen zurückzuführen. Die Nitratkonzentration des Sickerwassers war auf beiden Böden unter Sorghum bicolor von Anfang an niedriger als unter Mais. Bis zum dritten Versuchsjahr sinkt der N-Austrag deutlich und sind kaum noch Unterschiede zwischen den Kulturen zu erkennen, was als Folge negativer N-Salden bei beiden Kulturen im Ergebnis empfehlungskonformer N-Düngung zu sehen ist. Dennoch hat offenbar das tiefere Wurzelsystem von Sorghum bic. schon früher als das von Mais eine zusätzliche Reduzierung der N-Auswaschung bewirkt.	
19. Schlagwörter Sorghum bicolor, Energiemaïs, Lysimeter, Wasserverbrauch, Wassernutzungseffizienz, potenzielle Evapotranspiration, Bodenwasseraneignungsvermögen, Trockenmasseertrag, Stickstoffnutzungseffizienz, Stickstoffauswaschung, Methanertrag, Gewässerverträglichkeit, Anbaueignung	
20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMVEL soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.