

Kornertrag, Stickstoffparameter und Energieeffizienz von Körnermais bei unterschiedlichen mineralischen und organischen Düngestrategien mit 180 kg N/ha in einem Langzeitdüngungsversuch in der Steiermark

Grain yield, nitrogen parameter and energy efficiency of grain maize under different mineral and organic fertilization strategies with 180 kg N/ha in a long-term fertilization trial in Styria

Gerhard Moitzi^{1*}, Johannes Schantl², Manfred Drexler², Walter Jansel², Andreas Lamprecht², Christoph Hödl², Helmut Wagentristsl¹, Reinhard W. Neugschwandtner³

¹ Universität für Bodenkultur Wien, Department für Agrarwissenschaften, Versuchswirtschaft
Groß-Enzersdorf, Schloßhofer Straße 31, A-2301 Groß-Enzersdorf

² Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 10 Land- und Forstwirtschaft, Referat 7 Landwirtschaftliches Schulwesen, Versuchsstation für Pflanzenbau, A-8361 Hatzendorf 110

³ Universität für Bodenkultur Wien, Department für Agrarwissenschaften, Institut für Pflanzenbau, Konrad-Lorenz-Straße 24, A-3430 Tulln an der Donau
* Korrespondierender Autor: gerhard.moitzi@boku.ac.at

Einreichung: 10. März 2026, überarbeitete Einreichung: 8. April 2026, Annahme: 8. April 2026

Zusammenfassung

Auf einem Hohertragsstandort im steirischen Bezirk Hartberg-Fürstenfeld (Kalsdorf) wurden in einem Langzeitdüngungsversuch mit Stickstoff (N) in zehn Versuchsjahre (2011–2016, 2018, 2020–2022) der Kornertrag, der N-Entzug, die N-Bilanz und die Energieeffizienz untersucht. Die untersuchten Düngungsvarianten (ungedüngt, neun Düngungsvarianten mit 180 kg N/ha davon sieben mineralisch und zwei organisch mit Biogasgülle gedüngt) mit je vier Wiederholungen sind in einer generalisierten Gitteranlage in unvollständigen Blöcken integriert. Der gesamte Energieinput, der sich aus dem direkten Energieinput (Heizöl und Strom für Trocknung, Kraftstoff für die Feldbewirtschaftung) und dem indirekten Energieinput (mineralischer N-Dünger, Saatgut, Pflanzenschutz, Landmaschinen) zusammensetzt, betrug bei der ungedüngten Kontrollvariante 19,0 GJ/ha, bei den mineralischen Düngungsvarianten 30,7 GJ/ha und Biogasgüllevarianten 20,6 GJ/ha. Die Trocknungsenergie betrug bis 47 % und die Mineraldüngerenergie bis 21 % des gesamten Energieinputs. Die untersuchten sieben mineralischen Düngungsvarianten zeigten keine signifikanten Unterschiede im Kornertrag, welcher zwischen 14,76 und 15,03 t/ha lag. Mit hoher Energieeffizienz erbrachte die Biogasgülle geringere Kornerträge: 11,80 t/ha (einmal appliziert) und 12,62 t/ha (zweimal appliziert). Eine zweimalige Düngerapplikation ist energieeffizienter als eine einmalige. Die mittlere N-Bilanz betrug in der ungedüngten Kontrollvariante –57,1 kg N/ha, in den mineralischen Düngungsvarianten +24,6 kg N/ha und in den Biogasgüllevarianten +58,4 kg N/ha. Mit zunehmenden Kornertrag nahm die N-Bilanz ab.

Schlagwörter: Mineraldünger, Biogasgülle, Stickstoffbilanz, Energieinput, Energienutzungseffizienz

Summary

At a high-yield site in the Styrian district of Hartberg-Fürstenfeld (Kalsdorf), a long-term nitrogen (N) fertilization trial was conducted over ten experimental years (2011–2016, 2018, 2020–2022) to investigate grain yield, N uptake, N balance, and energy efficiency. The fertilization treatments (unfertilized, nine treatments with 180 kg N/ha, including seven mineral and two biogas slurry treatments) each with four replications were arranged in a generalized lattice design with incomplete blocks. The total energy input, consisting of direct energy input (heating oil and electricity for drying, fuel for field operations) and indirect energy input (mineral N fertilizer, seeds, plant protection, machinery), amounted to 19.0 GJ/ha for the unfertilized control, 30.7 GJ/ha for the mineral fertilization variants, and 20.6 GJ/ha for the biogas slurry variants. Drying energy accounted for up to 47%, and mineral fertilizer energy accounted for up to 21% of the total energy input. The seven mineral fertilization variants showed no significant differences in grain yield, which ranged between 14,757 and 15,025 kg/ha. Biogas slurry fertilization produced lower grain yields (11,803 kg/ha – single application, 12,622 kg/ha – twice application) with high energy efficiency. A twice application is more energy efficient than a single application. The average N balance was –57.1 kg N/ha for the unfertilized control, +24.6 kg N/ha for the mineral treatments, and +58.4 kg N/ha for the biogas slurry treatments. With increasing grain yield, the N balance decreased.

Keywords: mineral fertilizer, biogas digestate, nitrogen balance, energy-input, energy use efficiency

Open Access. © 2026 Gerhard Moitzi, Johannes Schantl, Manfred Drexler, Walter Jansel, Andreas Lamprecht, Christoph Hödl, Helmut Wagentristsl, Reinhard W. Neugschwandtner, published by BOKU University (www.boku.ac.at). 

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 3.0 License.

<https://doi.org/10.2478/boku-2026-0003>

1. Einleitung

In der Pflanzenproduktion kann die photosynthetische Energiebindung in Nutzpflanzen durch Managementmaßnahmen, wie Bodenbearbeitung, Pflanzenschutz, Düngung und Beregnung, gesteigert werden. Dafür ist technische direkte Energie in Form von Kraftstoffen und Elektrizität und indirekte Energie für die Produktion von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln (Dünger- und Pflanzenschutzmittel, Landmaschinen) notwendig. Die Standortfaktoren Bodenbonität und Klima determinieren die flächenbezogene Nettophotosynthese und die Energieeffizienz. Ein energieeffizienter Pflanzenbau zeichnet sich durch einen standortangepassten Betriebsmitteleinsatz aus. Das Konzept der standortgerechten Landwirtschaft richtet ihre Leistungsziele nach Möglichkeiten des Standortes aus und optimiert die Produktion durch die Nutzung der natürlichen Grundlagen (Guggenberger et al., 2020). Für einen gezielten und standortgerechten Einsatz von organischen und mineralischen Düngern mit geringen Umweltbelastungen sind ausreichend Daten über Standorteigenschaften und Wirkungsweise der Düngermittel notwendig (Amberger, 1980). Hinsichtlich der Umweltwirkungen des Düngermiteinsatzes zeigte sich, dass der Indikator Stickstoffbilanz (N-Bilanz = zugeführte N-Menge durch die Düngung minus die durch Ernte des Korns vom Feld abgeführte N-Menge) ein guter Deskriptor für die Nitratverlagerung ist. So konnte auf fruchtbaren Ackerbaustandorten im Norden Deutschlands in langjährigen On-Farm-Untersuchungen zu Nitratverlagerungen aufgezeigt werden, dass in konventionellen Fruchtfolgen um bis zu 50 % geringere produktbezogene Nitrat- auswaschungen (kg NO₃-N/kg Getreideeinheit) auftraten als in ökologischen Fruchtfolgen (Biernat et al., 2020). Neben der N-Bilanz können pflanzenbauliche Produktionssysteme auch durch unterschiedliche Kennzahlen für die Energieeffizienz beschrieben werden und haben eine unterschiedliche Aussagekraft (Hülsbergen et al., 2001; Moitzi et al., 2021; Arvidsson, 2010). Direkter Energieinput, indirekter Energieinput und gesamter Energieinput geben die flächenbezogene Energieintensität an, jedoch ohne Berücksichtigung der photosynthetisch produzierten Biomasse. Durch den Ernteproduktbezug wird die flächenbezogene Energieintensität zur produktbezogenen Energieintensität (EI). Die energetische Berücksichtigung des Biomasseertrages in den Kennwerten Nettoenergieoutput (NEO) und Energienutzungseffizienz (ENE = Energieoutput/Energieinput-Verhältnis) gibt Auskunft über den Zusammenhang von der oberirdischen Biomassebildung und Energieinput. Die Kurvenverläufe von NEO und ENE sind im Ertragsge-

setz des abnehmenden Ertragszuwachses nach Mitscherlich (1948) begründet.

Ab einem Düngungsniveau von 120 kg N/ha bei Winterweizen im Marchfeld (Ostösterreich) nimmt die Energieeffizienz bei Winterweizen ab. Mit dem zugrunde liegenden Konzept der Energieeffizienzanalyse im Pflanzenbau können somit energetisch optimale N-Düngermengen abgeleitet werden (Moitzi et al., 2020).

Frühere Energieeffizienzanalysen bei Körnermais (*Zea mays* L.) zeigten, dass die Trocknungsenergie für die Körnertrocknung nach der Ernte und die Energie für die Herstellung der mineralischen N-Düngemittel die größten Energieinputkomponenten sind (Moitzi et al., 2015). Die Düngerart (mineralisch, organisch) mit der Düngermenge sind ein wesentlicher Managementfaktor in der Nutzpflanzenproduktion. Studien von Sartori et al. (2005) und Pimentel (2009) zeigten, dass die Verwendung von organischen Wirtschaftsdüngermitteln (Stallmist, Flüssigmist) in der Nutzpflanzenproduktion zur höheren Energieeffizienz führen als mit Mineraldünger.

Eine Studie zur Kornertrags-, Stickstoffbilanz- und Energieeffizienz-orientierten Stickstoffmineraldüngung am Standort Kalsdorf in der Steiermark zeigte, dass eine standortangepasste N-Düngung sich aus ökologischer Sicht an einer ausgeglichenen N-Bilanz orientieren soll. Hier ist die optimale N-Düngermenge niedriger als bei der Orientierung an der höchsten Energieeffizienz (Moitzi et al., 2026).

Die Folgestudie basiert ebenfalls auf dem im Jahr 2010 an der Versuchsstation für Pflanzenbau der Steiermärkischen Landesregierung in Kalsdorf bei Ilz gestarteten Langzeitdüngungsversuch bei Körnermais. In dieser Studie wird der Einfluss unterschiedlicher Düngestrategien mit 180 kg N/ha (sieben mineralisch gedüngte Varianten, zwei organisch gedüngte mit Biogasgülle Varianten sowie eine ungedüngte Kontrolle) auf Kornertrag, N-Entzug, N-Bilanz und Kennwerte der Energieeffizienz (Energieinput, Energieoutput, Nettoenergieoutput, Energienutzungseffizienz, Energieintensität) in zehn Versuchsjahren (2011–2016, 2018, 2020–2022) untersucht.

2. Material und Methode

2.1. Standort und Versuchsdesign

Der langjährige Düngungsversuch befindet sich in einer Gunstlage in der Steiermark, im Südosten Österreichs (A-8401 Kalsdorf bei Ilz im Feistritztal; Koordinaten: E: 15,953002, N: 47,092419) auf einem mittelschweren Pseu-

dogley mit 28 % Sand, 55 % Schluff und 17 % Ton. Der Humusgehalt (Trockenverbrennung) liegt bei 2 %. Der Boden ist ausreichend mit Phosphor (Calcium-Acetat-Lactat), Kalium (Calcium-Acetat-Lactat) und Magnesium (Methode Schachtschabel) versorgt: 53 mg P/kg, 177 mg K/kg, 89 mg Mg/kg. Der Standort ist durch das illyrische Klima geprägt. Als Übergangsklima zwischen dem alpinen, pannonischen und mediterranen Klima zeichnet es sich durch hohe Niederschläge, eine hohe Sonnenstundenzahl sowie eine häufig hohe Luftfeuchtigkeit aus. Die Mittelwerte der monatlichen Temperaturen und Niederschläge der Versuchsjahre und deren Abweichung in den einzelnen Versuchsjahren finden sich in Moitzi et al. (2026).

Der Stickstoffdüngungsversuch wurde 2010 in einer generalisierten Gitteranlage mit 10 Versuchsvarianten (Kontrolle, sieben mineralische Düngungsvarianten mit 180 kg N/ha und zwei Varianten mit Biogasgülle mit 180 kg N/ha, Tabelle 1) mit je vier Wiederholungen in sieben unvollständigen Blöcken angelegt. Die Netto-Parzellengröße beträgt 12,6 m² (9 m × 1,4 m). Die einzelnen Düngungsvarianten variieren hinsichtlich Düngerart (Kalkammonsalpeter (KAS): 27 % N, Harnstoff (UREA): 46 % N, ENTEC® 26 (ENTEC): 26 % N, Linzer STAR (LS): 15 % N, 6,6 % P, 12,5 % K, Biogasgülle von einem Schweinemastbetrieb) und Ausbringzeitpunkt (April zur Aussaat (mineralische Varianten) bzw. vor der Aussaat (Biogasgülle), Anfang Mai (EC 12), Ende Mai/Anfang Juni (EC 18). Nähere Informationen zu den mineralischen Düngemitteln finden sich in Moitzi et al. (2026).

Zwei Düngungsvarianten mit einer Biogasgülle wurden zum Vergleich zu den mineralischen 180 kg N/ha Varianten verwendet: eine einmalige Applikation der Biogasgülle vor der Aussaat (180 kg N_{jw}/ha) und eine zweimalige Applikation der Biogasgülle (100 kg N_{jw}/ha vor der Aussaat und 80 kg N_{jw}/ha Ende Mai). Der feldfallende Stickstoff (N_{ff}) der Biogasgülle wurde mit 87 % vom Gesamtstickstoff laut chemischer Analyse berechnet. Für die applizierte Biogasgülle-N-Menge wurde eine 80-prozentige Jahreswirkung (= jahreswirksamer Stickstoff der Biogasgülle, N_{jw}) von N_{ff} angesetzt. Die Ausbringung der Biogasgülle erfolgte vor der Aussaat mit Prallteller und Ende Mai mit einem Schleppschlauchverteiler.

Mais wurde in den Versuchsjahren zwischen 2011 und 2022, mit Ausnahme der Jahre 2017 und 2019 aufgrund des Befalls der jungen Maispflanzen mit den Larven des Maiswurzelbohrers (*Diabrotica virgifera* LeConte), zehnmal als Monokultur angebaut. Nähere Informationen zu Bodenbearbeitung, Saatbettbereitung, Anbau, Sorten, Pflanzenschutz, Ernte und Bestimmung des N-Gehaltes der Körner finden sich in Moitzi et al. (2026).

Tabelle 1. Faktorlevel des Versuchsfaktors Düngungsvariante
Table 1. Factor level of the experimental factor fertilization treatment

Düngungsvarianten	kg N/ha
Kontrolle	0
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	180
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	180
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	180
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	180
Biogasgülle: 180 kg N _{jw} /ha vor der Aussaat	180
Biogasgülle: 100 kg N _{jw} /ha vor der Aussaat + 80 kg N _{jw} /ha Ende Mai	180

KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N), N_{jw} = jahreswirksamer Stickstoff pro ha

2.2. Stickstoffbilanz und Energieeffizienz

Die Formeln für die Berechnungen der Kennzahlen für N-Entzug und N-Bilanz (Biernat et al. 2020) und die Energieeffizienz (Hülsbergen et al., 2001; Alluvione et al., 2011) sind in der Tabelle 2 dargestellt. Der Energieoutput im Kornertrag beschreibt die photosynthetische Bindung der Solarstrahlung in der Biomasse. Da der Energieeinsatz für die menschliche Arbeit im Vergleich zu den anderen Energiekomponenten gering ist, wird dieser nicht berücksichtigt (Alluvione et al., 2011; Fluck, 1992).

Auf Basis von Richtwerten (Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung, 2025; KTBL-Feld-

Tabelle 2. Formeln für Kennzahlen der N-Bilanz und der Energieeffizienz
Table 2. Formulas for the indicators of N balance and energy efficiency

Parameter	Definition	Einheit
N-Entzug (NE)	NE = Kornertrag ₁) × N-Gehalt	kg/ha
N-Bilanz (NB)	NB = gedüngte N-Menge – N-Entzug	kg/ha
Direkter Energieinput (Ed)	Ed = Diesel für Feldarbeiten + Heizöl und Strom für Trocknung	GJ/ha
Indirekter Energieinput (Ei)	Ei = Saatgut + Dünger + Pflanzenschutz + Landmaschinen	GJ/ha
Gesamter Energieinput (E)	E = Ed + Ei	GJ/ha
Energieoutput (EO)	EO = Kornertrag × Bruttoenergiegehalt ₁)	GJ/ha
Nettoenergieoutput (NEO)	NEO = EO – E	GJ/ha
Energienutzungseffizienz (ENE)	ENE = EO/E	GJ/GJ
Energieintensität (EI)	EI = E/Kornertrag ₃)	MJ/kg

1) absolute Trockenmasse, 2) 18,95 MJ/kg Trockenmasse (DLG 1997), 3) 14 % Kornfeuchte

arbeitsrechner, 2025) und den durchgeführten Feldarbeitsgängen mit einer ortsüblichen Mechanisierung wurde der Kraftstoffbedarf bestimmt (Tabelle 3). Die aufgewendeten Mengen an Betriebsmitteln (Kraftstoff, Strom, Mineraldünger, Herbizide und Saatgut) für das Produktionssystem Körnermais wurden mit den Energieäquivalenten (Tabelle 4) multipliziert. Für die Trocknung der erntefeuchten Körner auf 14 % Kornfeuchte in einem Durchlauftrockner wurde ein spezifischer Heizölverbrauch von 0,11 l/kg Wasserentzug und ein Stromverbrauch von 0,03 kWh/kg Wasserentzug herangezogen (Rossrucker, 1977).

2.3. Statistik

Für die statistische Auswertung wurde IBM® SPSS® Statistics 24 verwendet. Die Voraussetzungen für die Varianzanalyse (ANOVA) wurden mit dem Levene-Test auf Homogenität der Varianzen und dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung der Residuen überprüft. Die Effekte von Düngung (D) und Jahr (J) auf die abhängigen Variablen (Kornertrag, N-Parameter und Energieeffizienzindikatoren) wurden mittels zweifaktoriellen ANOVA-Tests berechnet. Mehrfachvergleiche zur Trennung der Mittelwerte wurden mit dem Student-Newman-Keuls-Verfahren ($p < 0,05$) durchgeführt. Da der N-Gehalt nicht für jede Ernteprobe analysiert wur-

Tabelle 3. Mittlerer Kraftstoffbedarf für einzelne Arbeitsgänge im Produktionssystem Körnermais

Table 3. Mean fuel demand for each field operation of the production system grain maize

Feldarbeitsgang	Mittlerer Kraftstoffbedarf (l/ha)
Grundbodenbearbeitung im Herbst (Streichblechpflug), schwerer Boden, 4 Schar, 1,52 m 110 kW)	32,2
Abschleppen im Frühjahr (6 m, 102 kW)	5,0
Kreiselegge im Frühjahr (3 m, 102 kW)	15,7
Pneumatische Einzelkornsaat (8 Reihen, 6 m, 54 kW)	4,6
Herbizidapplikation, Feldspritze (12 m Arbeitsbreite, 54 kW)	2,0
Mineraldünger-Applikation, Schleuderdüngerstreuer (800 l Tank, 54 kW)	1,5
Ausbringung von Biogassgülle, Pumptankwagen (12 m ³) mit Schleppschlauchverteiler (12 m), 120 kW	11,2
Körnermaisernte (6-reihiger Pflückvorsatz, 275 kW)	35,1
Einlegen von Biogassgülle nach der Ausbringung (6 m Saatbettkombination, 102 kW)	6,2
Korntransport Feld-Hof (2 km, Dreiseitenkippanhänger, 18 t 83 kW)	4,0
Häckseln von Maisstroh (bodennah) mit Schlegelmulcher	16,8

Tabelle 4. Energieäquivalente von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln
Table 4. Energy equivalents of farm facilities

Betriebsmittel	Energieäquivalent	Quelle
Dieselmotorkraftstoff, Heizöl	39,6 MJ/l	(Hülsbergen et al. 2001; Sørensen et al. 2014)
Elektrizität	12 MJ/kWh	
Mineralischer N-Dünger		
KAS ¹	39,4 MJ/kg N	(Alluvione et al., 2011)
UREA ¹	48,5 MJ/kg N	(Alluvione et al., 2011)
Mineralischer P-Dünger	11,1 MJ/kg P-P ₂ O ₅	(Dal Ferro et al., 2017)
Mineralischer K-Dünger	6,6 MJ/kg K-K ₂ O	(Dal Ferro et al., 2017)
Synthetische Herbizide	238 MJ/kg Aktivsubstanz	(Dal Ferro et al., 2017)
Saatgut	105 MJ/kg	(Dal Ferro et al., 2017)
Landmaschinen	1956 MJ/ha	(Biedermann, 2009)

¹ Für Linzer STAR und ENTEC sind in der Literatur keine Werte für Energieäquivalente verfügbar. Für Linzer STAR wurde aufgrund der ähnlichen N-Verteilung der Wert von KAS herangezogen. Für ENTEC aufgrund des höheren Anteiles an NH₄-N als an NO₃-N der Wert von UREA. Die Ammoniaksynthese mit dem Haber-Bosch-Verfahren ist ein endothermer Prozess, während die Oxidation von Ammoniak zur Salpetersäure (Nitrat) mit dem Ostwald-Verfahren ein exothermer Prozess ist.

de, sondern nur in einer Mischprobe aus den vier Wiederholungen, konnte keine zweifaktorielle ANOVA durchgeführt werden. Für den N-Gehalt wurde somit für den Faktor Düngungsvariante und für den Faktor Versuchsjahr je eine einfaktorielle ANOVA berechnet.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Kornertrag

Der Kornertrag lag im Mittel über alle Düngungsvarianten und Jahre bei 13,44 t/ha. Die Kornerträge schwankten im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren zwischen 10,56 t/ha (2013) und 15,40 t/ha (2011). Der mittlere Kornertrag der beiden Biogassgüledüngungsvarianten war um 5,94 t/ha (+95 %) höher als jener der Kontrolle (mit 6,27 t/ha). Die höchsten Kornerträge wurden mit Mineraldünger erzielt, gefolgt von Biogassgülle. Der mittlere Kornertrag aller mineralischen Düngungsvarianten betrug 14,81 t/ha und war um 2,60 t/ha (+21 %) höher als der mittlere Kornertrag der beiden Biogassgüledüngungsvarianten mit 12,21 t/ha und um 8,51 t/ha (+136 %) höher als der Kornertrag der Kontrolle. Beim Kornertrag der mineralischen Düngungsvarianten gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede. Innerhalb der Biogassgüledüngungs-

varianten führte die zweimalige Applikation im Vergleich zur einmaligen Applikation zu einem um 0,82 t/ha (+7 %) höheren Kornertrag (Tabelle 5).

3.2. Stickstoffparameter

Die Mittelwerte über alle Düngungsvarianten und Jahre waren: 1) N-Gehalt des Kornes: 1,18 %, 2) N-Entzug 137,8 kg/ha und 3) N-Bilanz: +23,2 kg/ha (Tabelle 5).

Die N-Gehalte des Kornes schwankten im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren von 1,11 % (2013) bis 1,30 % (2022). Die N-Gehalte waren in den mineralisch gedüngten Varianten im Mittel um +10 % höher als in jenen mit Biogasgülle gedüngten und um +14 % höher als in der Kontrolle. Der N-Gehalt in den mineralischen Düngungsvarianten unterschied sich nicht. Eine zweimalige Applikation von Biogasgülle führte zu einem höheren N-Gehalt als in der Kontrolle, eine einmalige Applikation jedoch nicht (Tabelle 5).

Tabelle 5. Kornertrag, N-Entzug, N-Bilanz und Energiekennzahlen von Körnermais bei Düngermengen von 180 kg N/ha (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 5. Grain yield, N uptake, N balance and indicators of energy efficiency of grain maize at fertilization treatments of a rate of 180 kg N/ha (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten (D)	Kornertrag	N-Gehalt	N-Entzug	N-Bilanz	Energieinput (GJ/ha)			EO	NEO	ENE	EI
	(t/ha)	(g/100 g TM)	(kg/ha)	(kg/ha)	Direkt	Indirekt	Σ	(GJ/ha)	(GJ/ha)	(GJ/GJ)	(MJ/kg)
Kontrolle	6,27 ^a	1,07 ^a	57,1 ^a	-57,1 ^a	12,1 ^a	6,9 ^c	19,0 ^a	102,2 ^a	84,2 ^a	5,64 ^a	3,08 ^f
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	14,76 ^d	1,20 ^c	154,6 ^{de}	25,4 ^{bc}	17,3 ^d	12,7 ^d	30,0 ^c	240,5 ^d	210,5 ^d	8,10 ^{cd}	2,06 ^{cd}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	14,93 ^d	1,21 ^c	154,2 ^{de}	25,2 ^{bc}	16,8 ^{cd}	12,7 ^d	29,5 ^c	243,3 ^d	213,7 ^d	8,32 ^d	2,00 ^c
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	14,51 ^d	1,20 ^c	150,6 ^d	29,4 ^c	17,3 ^d	12,7 ^d	30,0 ^c	236,5 ^d	206,7 ^d	8,05 ^{cd}	2,09 ^{cd}
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	15,01 ^d	1,22 ^c	157,1 ^{de}	22,9 ^{bc}	16,4 ^c	13,8 ^c	30,2 ^c	244,6 ^d	214,4 ^d	8,16 ^{cd}	2,04 ^{cd}
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	15,03 ^d	1,22 ^c	157,7 ^{de}	22,2 ^{bc}	17,3 ^d	14,4 ^f	31,7 ^d	244,9 ^d	213,2 ^d	7,81 ^b	2,14 ^{de}
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	14,74 ^d	1,22 ^c	154,2 ^{de}	25,9 ^{bc}	17,5 ^d	14,4 ^f	31,9 ^d	240,2 ^d	208,3 ^d	7,56 ^b	2,20 ^c
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	14,73 ^d	1,25 ^c	158,8 ^c	21,2 ^b	17,5 ^d	14,4 ^f	31,9 ^d	240,1 ^d	208,2 ^d	7,58 ^b	2,20 ^c
Biogasgülle: 180 kg N _{jw} /ha vor der Aussaat	11,80 ^b	1,09 ^{ab}	110,9 ^b	69,1 ^c	15,3 ^b	5,3 ^a	20,6 ^b	192,4 ^b	171,8 ^b	9,47 ^c	1,81 ^b
Biogasgülle: 100 kg N _{jw} /ha vor der Aussaat + 80 kg N _{jw} /ha Ende Mai	12,62 ^c	1,12 ^b	122,2 ^b	47,7 ^d	15,5 ^b	5,5 ^b	20,9 ^b	205,7 ^c	184,8 ^c	9,95 ^f	1,71 ^a
Jahr (J)											
2011	15,43 ^c	1,25 ^d	166,7 ^h	-5,8 ^a	19,1 ^f	11,5	30,6 ^f	251,4 ^c	220,0 ^f	8,24 ^{ef}	2,00 ^c
2012	15,17 ^c	1,17 ^{ab}	154,1 ^f	6,9 ^b	16,9 ^{cd}	11,3	28,2 ^{de}	247,3 ^c	219,1 ^f	8,85 ^g	1,86 ^b
2013	10,40 ^a	1,11 ^a	100,4 ^a	60,6 ^g	17,3 ^d	11,1	28,4 ^c	169,4 ^a	141,1 ^a	5,89 ^a	2,89 ^g
2014	12,81 ^c	1,15 ^{ab}	127,4 ^{bc}	33,6 ^{ef}	15,4 ^c	11,2	26,6 ^c	208,8 ^{cd}	182,3 ^c	7,88 ^{de}	2,14 ^d
2015	12,48 ^{bc}	1,15 ^{ab}	123,7 ^b	37,3 ^f	12,6 ^b	11,3	23,9 ^b	203,4 ^c	179,5 ^c	8,50 ^f	2,00 ^c
2016	13,32 ^d	1,13 ^a	130,9 ^{cd}	30,1 ^{de}	15,5 ^c	11,3	26,8 ^c	217,1 ^d	190,4 ^d	8,03 ^{de}	2,10 ^d
2018	15,18 ^c	1,14 ^{ab}	149,6 ^f	11,4 ^b	11,2 ^a	11,5	22,7 ^a	247,4 ^d	224,7 ^f	11,00 ^h	1,56 ^a
2020	14,74 ^c	1,20 ^{bc}	153,1 ^f	7,8 ^b	20,5 ^g	11,2	31,7 ^g	240,2 ^c	208,5 ^c	7,65 ^{cd}	2,17 ^{de}
2021	13,00 ^{cd}	1,22 ^{cd}	137,4 ^c	23,7 ^c	17,2 ^d	11,2	28,4 ^c	211,9 ^{cd}	183,5 ^{cd}	7,44 ^{bc}	2,25 ^c
2022	11,87 ^b	1,30 ^c	134,7 ^{de}	26,3 ^{cd}	16,1 ^c	11,2	27,3 ^d	193,4 ^b	166,1 ^b	7,15 ^b	2,35 ^f
ANOVA											
D	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
J	***	***	***	***	***	ns	***	***	***	***	***
D × J	ns		***	***	***	ns	***	ns	ns	***	***

TM = Trockenmasse, KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N), N_{jw} = jahreswirksamer Stickstoff pro ha. Der Kornertrag ist auf einen Feuchtigkeitsgehalt von 14 % standardisiert. NEO = Nettoenergieoutput, ENE = Energienutzungseffizienz, EI = Energieinput. Signifikanzniveaus: ns = nicht signifikant, p < 0,001 (***). Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsvarianten sowie der Versuchsjahren sind durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

Der N-Entzug mittels des Kornertrages schwankte im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren zwischen 100,4 kg N/ha (2013) und 166,7 kg N/ha (2011). Den geringsten N-Entzug hatte die Kontrolle mit 57,1 kg N/ha. Der mittlere N-Entzug der beiden Biogasgülledüngungsvarianten war mit 116,6 kg N/ha signifikant höher (+38,9 kg N/ha, +104 %) als jener der Kontrolle. Der mittlere N-Entzug aller mineralischen Düngungsvarianten betrug 155,5 kg N/ha und war um 98,4 kg N/ha (+172 %) höher als jener der Kontrolle und um 38,9 kg N/ha (+33 %) höher als jener der Biogasgüllevarianten. Innerhalb der mineralischen Düngungsvarianten zeigten die Variante „UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat“ mit 158,8 kg N/ha (+101,7 kg/ha bzw. +178 % gegenüber Kontrolle) den höchsten N-Entzug. Der N-Entzug unterschied sich nicht zwischen den beiden Biogasgüllevarianten (Tabelle 5).

Der N-Entzug der mineralisch gedüngten Varianten unterschied sich in acht der zehn Jahre nicht voneinander. Im Jahr 2021 war der N-Entzug in der Variante „UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat“ und im Jahr 2022 in den Varianten „KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat“ und „ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat“ höher als in den anderen mineralisch gedüngten Varianten. Die zweimalige Applikation von Biogasgülle führte im Vergleich zur einmaligen Applikation in drei Jahren zu einem höheren N-Entzug (2011, 2012 und 2018) und in einem Jahr zu einem niedrigeren N-Entzug (2021), während sich in den weiteren sechs Jahren die Varianten nicht unterschieden (Tabelle 6).

Die N-Bilanz schwankte im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren von -5,8 kg N/ha (2011) bis 60,6 kg N/ha (2013), sie war nur im Jahr 2011 negativ, in allen wei-

teren neun Jahren positiv. Die N-Bilanz war im Mittel über alle Jahre in der Kontrolle mit -57,1 kg N/ha negativ, die N-Bilanzen lagen bei den mineralischen Düngungsvarianten zwischen 21,2 und 29,4 kg N/ha (im Durchschnitt: 24,6 kg N/ha) und waren signifikant geringer als in den beiden Biogasgülledüngungsvariante mit 69,1 (einmalige Applikation) und 47,7 kg N/ha (zweimalige Applikation) (Tabelle 5).

Die N-Bilanz der mineralisch gedüngten Varianten unterschied sich in fünf der zehn Jahre nicht voneinander. In den Jahren 2012, 2013, 2015, 2020 und 2022 wiesen einzelne oder mehrere Varianten höhere bzw. niedrigere N-Bilanzen als die anderen auf, wobei kein Trend über die Jahre erkennbar war. Die zweimalige Applikation von Biogasgülle führte im Vergleich zur einmaligen Applikation in vier der zehn Jahren zu einer niedrigeren N-Bilanz (2011, 2012, 2013 und 2018), während sich in den weiteren sechs Jahren die Varianten nicht unterschieden (Tabelle 7).

Ein negativer Zusammenhang zwischen Kornertrag und N-Bilanz konnte in allen Düngungsvarianten und in der Kontrolle festgestellt werden. Eine ausgeglichene N-Bilanz in den Düngungsvarianten würde theoretisch bei einem Kornertrag von 19,30 t/ha erreicht werden (Abbildung 1).

3.3. Energieinput

Die Mittelwerte des Energieinputs über alle Düngungsvarianten und Jahre waren: 1) direkter Energieinput: 16,3 GJ/ha, 2) indirekter Energieinput: 11,3 GJ/ha und 3) gesamter Energieinput: 27,6 GJ/ha. Die zweifache Varianzanalyse zeigte

Tabelle 6. N-Entzug (kg N/ha) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 6. N uptake (kg N/ha) of grain maize as affected by the fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	78,6 ^a	77,6 ^a	35,9 ^a	52,7 ^a	42,5 ^a	52,2 ^a	64,4 ^a	66,6 ^a	53,4 ^a	47,0 ^a
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	186,1 ^c	170,7 ^d	121,3 ^c	142,8 ^b	127,2 ^{bc}	141,0 ^c	167,8 ^c	157,5 ^c	155,0 ^d	176,5 ^d
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	183,7 ^c	168,6 ^d	126,7 ^c	137,5 ^b	144,5 ^c	151,3 ^c	165,5 ^c	169,6 ^{cd}	157,7 ^d	142,5 ^c
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	182,5 ^c	177,0 ^d	112,1 ^c	130,3 ^b	144,5 ^c	153,5 ^c	161,8 ^c	161,0 ^c	146,5 ^d	137,0 ^c
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180,6 ^c	181,1 ^d	108,2 ^c	146,6 ^b	145,4 ^c	164,8 ^c	150,7 ^c	175,7 ^d	155,6 ^d	152,8 ^c
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180,5 ^c	166,8 ^d	112,8 ^c	145,3 ^b	140,8 ^c	147,0 ^c	165,8 ^c	178,8 ^d	160,8 ^d	179,0 ^d
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180,9 ^c	171,9 ^d	116,9 ^c	137,7 ^b	135,9 ^b	148,6 ^c	169,8 ^c	179,1 ^d	152,1 ^d	149,0 ^c
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	185,8 ^c	170,4 ^d	121,3 ^c	146,1 ^b	127,1 ^{bc}	154,4 ^c	184,6 ^c	168,2 ^{cd}	176,2 ^c	156,8 ^c
Biogasgülle: 180 kg N _{pw} /ha vor der Aussaat	131,0 ^b	109,6 ^b	69,5 ^b	116,7 ^b	116,5 ^b	94,2 ^b	109,5 ^b	139,0 ^b	115,0 ^c	108,3 ^b
Biogasgülle: 100 kg N _{pw} /ha vor der Aussaat + 80 kg N _{pw} /ha Ende Mai	167,9 ^c	147,1 ^c	81,8 ^b	118,5 ^b	112,6 ^b	102,3 ^b	155,9 ^c	136,1 ^b	101,4 ^b	98,5 ^b

KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N), N_{pw} = jahreswirksamer Stickstoff pro ha. Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsvarianten sowie der Versuchsjahren sind durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

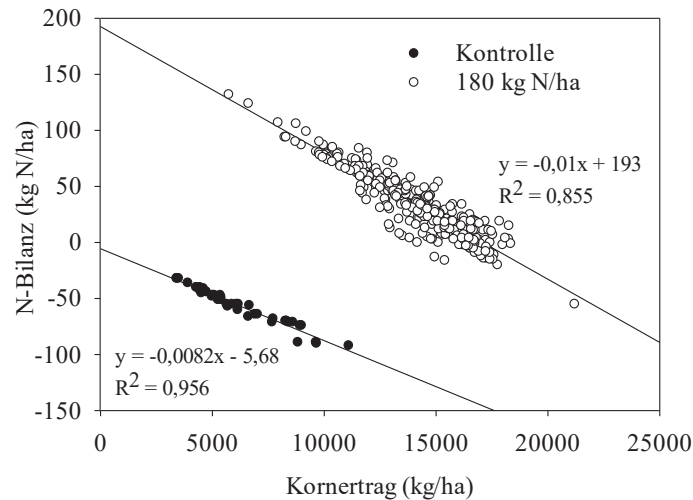


Abbildung 1. N-Bilanz in Abhängigkeit vom Kornertrag in der Kontrolle und den Düngungsvarianten (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)
Figure 1. N-balance in dependence of grain maize yield in the control and fertilization treatments (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

einen signifikanten Haupteffekt der Düngung auf den indirekten Energieinput und eine Interaktion von $D \times J$ für den direkten und gesamten Energieinput (Tabelle 5). Der direkte Energieinput lag im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren zwischen 11,2 GJ/ha (2018) und 20,5 GJ/ha (2020). Der direkte Energieinput war in den mineralisch gedüngten Varianten im Mittel mit 1,8 GJ/ha um +11 % höher als in jenen mit Biogasgülle gedüngten und mit 3,3 GJ/ha um +27 % höher als in der Kontrolle (mit 12,1 GJ/ha) (Tabelle 5). Der direkte Energieinput war in allen Jahren in der Kontrolle am niedrigsten, mit Ausnahme der einmaligen Applikation von Biogasgülle, die im Jahr 2012 auch einen niedrigen Wert aufwies. In drei Jahren (2011, 2013 und 2016) unterschied

sich der direkte Energieinput nicht zwischen den Düngungsvarianten. Einzelne mineralische Düngungsvarianten hatten in einigen Jahren höhere Werte als andere Varianten, insbesondere jene mit Biogas gedüngte Varianten. Der direkte Energieinput unterschied sich in keinem Jahr zwischen der einmaligen und zweimaligen Biogasgülleapplikation (Tabelle 8). Der indirekte Energieinput lag im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren zwischen 11,2 GJ/ha (2013) und 11,5 GJ/ha (2011 und 2018). Der indirekte Energieinput war in den mineralisch gedüngten Varianten im Mittel mit 13,6 GJ/ha um +152 % höher als in jenen mit Biogasgülle gedüngten und mit 6,7 GJ/ha um +97 % höher als in der Kontrolle (mit 6,9 GJ/ha).

Tabelle 7. N-Bilanz (kg N/ha) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 7. N balance (kg N/ha) of grain maize as affected by the fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	-78,5 ^a	-77,8 ^a	-36,0 ^a	-52,8 ^a	-42,5 ^a	-52,0 ^a	-64,3 ^a	-66,8 ^a	-53,5 ^a	-47,0 ^a
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	-6,3 ^b	9,3 ^{bc}	58,8 ^{bc}	37,3 ^b	52,8 ^{bc}	39,0 ^b	12,5 ^b	22,5 ^c	25,0 ^c	3,5 ^b
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	-3,8 ^b	11,5 ^{bc}	53,3 ^b	42,3 ^b	35,5 ^b	28,5 ^b	14,5 ^b	10,3 ^{bc}	22,3 ^c	37,5 ^c
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	-2,3 ^b	2,8 ^b	68,0 ^{bc}	49,8 ^b	35,3 ^b	26,5 ^b	18,5 ^b	19,3 ^c	33,5 ^c	43,0 ^c
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	-10,8 ^b	-1,0 ^b	72,0 ^{bc}	33,3 ^b	35,0 ^b	15,3 ^b	29,3 ^b	4,3 ^b	24,3 ^c	27,3 ^c
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	-0,5 ^b	13,0 ^{bc}	67,3 ^{bc}	34,5 ^b	39,3 ^{bc}	33,0 ^b	14,0 ^b	1,0 ^b	19,5 ^c	1,0 ^b
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	-1,0 ^b	8,3 ^{bc}	63,0 ^{bc}	42,3 ^b	44,0 ^{bc}	31,5 ^b	10,5 ^b	1,0 ^b	28,0 ^c	31,0 ^c
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	-5,8 ^b	9,3 ^{bc}	61,3 ^{bc}	34,3 ^b	52,8 ^{bc}	25,5 ^b	-4,8 ^b	11,8 ^{bc}	4,0 ^b	23,3 ^c
Biogasgülle: 180 kg N _{jw} /ha vor der Aussaat	49,0 ^c	70,5 ^d	110,5 ^d	63,3 ^b	63,5 ^c	86,0 ^c	70,3 ^c	41,0 ^d	65,0 ^d	71,8 ^d
Biogasgülle: 100 kg N _{jw} /ha vor der Aussaat + 80 kg N _{jw} /ha Ende Mai	2,0 ^b	23,0 ^c	88,0 ^c	51,5 ^b	57,5 ^{bc}	67,5 ^c	13,8 ^b	33,8 ^d	68,8 ^d	71,5 ^d

KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N), N_{jw} = jahreswirksamer Stickstoff pro ha. Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsvarianten sowie der Versuchsjahren sind durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

Tabelle 8. Direkter Energieinput (GJ/ha) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 8. Direct energy input (GJ/ha) of grain maize as affected by the fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	13,0 ^a	14,5 ^a	12,7 ^a	11,8 ^a	8,5 ^a	12,8 ^a	8,6 ^a	15,0 ^a	12,2 ^a	10,4 ^a
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	20,7 ^b	17,1 ^{bc}	18,7 ^b	16,0 ^{bc}	12,8 ^{bc}	15,7 ^b	11,7 ^b	21,7 ^c	19,9 ^d	18,6 ^{cd}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	20,3 ^b	17,3 ^{bc}	18,1 ^b	15,8 ^{bc}	13,7 ^{bc}	16,0 ^b	11,0 ^b	21,5 ^c	17,7 ^{bcd}	16,8 ^{cd}
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	19,9 ^b	18,9 ^c	20,0 ^b	15,6 ^{bc}	13,6 ^{bc}	16,5 ^b	10,8 ^b	21,7 ^c	17,5 ^{bcd}	17,1 ^{cd}
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	19,0 ^b	16,9 ^{bc}	16,0 ^b	16,5 ^c	13,1 ^{bc}	14,8 ^b	11,3 ^b	22,0 ^c	17,3 ^{bcd}	16,6 ^{cd}
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	20,6 ^b	17,1 ^{bc}	18,9 ^b	16,7 ^c	14,0 ^{bc}	16,0 ^b	11,2 ^b	21,7 ^c	18,7 ^{cd}	18,3 ^d
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	20,3 ^b	17,3 ^{bc}	18,3 ^b	14,5 ^b	13,8 ^c	16,4 ^b	15,1 ^d	22,6 ^c	19,0 ^d	17,9 ^d
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	20,4 ^b	18,5 ^c	18,2 ^b	16,1 ^{bc}	12,4 ^b	16,5 ^b	13,5 ^c	21,2 ^c	19,5 ^d	19,0 ^d
Biogasgülle: 180 kg N _{pw} /ha vor der Aussaat	17,7 ^b	15,3 ^{ab}	16,6 ^b	15,6 ^{bc}	12,8 ^{bc}	15,0 ^b	9,9 ^b	20,0 ^{bc}	16,0 ^{bc}	13,9 ^{bc}
Biogasgülle: 100 kg N _{pw} /ha vor der Aussaat + 80 kg N _{pw} /ha Ende Mai	20,2 ^b	17,2 ^{bc}	16,4 ^b	15,8 ^{bc}	12,3 ^b	15,5 ^b	10,2 ^b	18,6 ^b	15,4 ^b	13,1 ^b

KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N), N_{pw} = jahreswirksamer Stickstoff pro ha. Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsvarianten sowie der Versuchsjahren sind durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

Der gesamte Energieinput lag im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren zwischen 22,8 GJ/ha (2018) und 31,7 GJ/ha (2020). Der gesamte Energieinput war in den mineralisch gedüngten Varianten im Mittel mit 30,7 GJ/ha um +48 % höher als in jenen mit Biogasgülle gedüngten und mit 11,7 GJ/ha um +62 % höher als in der Kontrolle (mit 19,0 GJ/ha) (Tabelle 5).

Er war in allen Jahren in der Kontrolle sowie in den Jahren 2012, 2013, 2016 und 2022 in beiden mit Biogas gedüngten Varianten und im Jahr 2018 in der einfach mit Biogasgülle gedüngten Variante am niedrigsten. In sieben der zehn Jahren hatten Varianten mit ENTEC, UREA und KAS bzw. UREA teilweise einen höheren gesamten Energieinput als Varianten mit KAS bzw. LS und KAS. Die Applikation von Biogasgülle führte in allen Jahren zu einem geringeren gesamten Energieinput als die mineralisch gedüngten Varianten. Die zweimalige Applikation von Biogasgülle führte im Vergleich zur einmaligen Applikation nur im Jahr 2017 zu einem höheren gesamten Energieinput (Tabelle 9).

Der mittlere gesamte jährliche Energieinput ist bei den Biogasgüllevarianten um 1,6 GJ/ha (+ 8 %) und bei der mineralischen Düngungsvarianten mit 180 kg N/ha um 11,7 GJ/ha (+ 62 %) höher als in der Kontrolle (Abbildung 2). Dieser teilt sich in den direkten Energieinput und indirekten Energieinput (in %:%) wie folgt auf: 1) Kontrolle: 64:36, 2) mineralischen Düngungsvarianten 180 kg N/ha: 56:44, 3) Biogasgülle: 74:26.

Denn größten Anteil am gesamten Energieinput nimmt die Trocknungsenergie (Heizöl und Strom) ein: 1) Kontrolle:

39 %, 2) mineralischen Düngungsvarianten: 40 % und 3) Biogasgüllevarianten: 47 %. Der Anteil des Energieinputs über die mineralische Düngung mit 180 kg N/ha am Gesamtenergieinput beträgt 21 %. Der Energieinput über das Saatgut beträgt 16 % in der Kontrolle, 10 % bei den mineralischen Düngungsvarianten und 15 % bei den Biogasgüllevarianten. Der Energieinput über die Landmaschinen beträgt 10 % in der Kontrolle, 6 % bei den mineralischen Düngungsvarianten und 10 % bei den Biogasgüllevarianten. Der Energieinput über die PK-Düngung hat einen Anteil von 8 % (Kontrolle) und 6 % (mineralische Düngungsvarianten). Den geringsten Anteil am gesamten Energieinput nimmt der chemische Pflanzenschutz mit weniger als 1,5 % ein (Abbildung 2).

Die mittlere Kornfeuchte bei der Ernte über alle Jahre und Versuchsvarianten betrug 27,3 % bei einer Variation von 18,1 % bis 39,8 % (Daten nicht gezeigt). Der Wasserentzug auf 14 % Kornfeuchte bedarf technischer Trocknungsenergie. Der mittlere Wasserentzug bei der Körnermaistrocknung betrug 2500 kg/ha bei einer Spannweite von mindestens 469 kg/ha bis maximal 4376 kg/ha. Der Heizölbedarf in einem Durchlauftrockner für die Trocknung auf eine Kornfeuchte von 14 % steigt linear mit der Erntefeuchte. Für die Trocknung von durchschnittlich 16,22 t/ha Nassmais (Durchschnittsertrag über alle Versuchsjahre bei einer Düngermenge von 180 kg N/ha) mit einer mittleren Feuchte von 27,3 % auf 14 % ist eine Heizölmenge von 275 l/ha notwendig. Der Heizölbedarf nimmt um 128 ml/100 kg Nassmais zu, wenn die Kornfeuchte um 1 % bei der Ernte höher ist (Abbildung 3).

Tabelle 9. Gesamter Energieinput (GJ/ha) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 9. Total energy input (GJ/ha) of grain maize as affected by the fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	20,2 ^a	21,4 ^a	19,4 ^a	18,6 ^a	15,5 ^a	19,7 ^a	15,4 ^a	21,8 ^a	19,0 ^a	17,2 ^a
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	33,7 ^c	29,8 ^b	31,2 ^b	28,6 ^c	25,5 ^c	28,4 ^b	24,6 ^c	34,3 ^c	32,5 ^{cd}	31,3 ^{bc}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	33,2 ^c	30,0 ^{bc}	30,6 ^b	28,4 ^c	26,5 ^{cd}	28,7 ^b	24,1 ^c	34,1 ^c	30,3 ^c	29,4 ^b
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	32,8 ^c	31,6 ^{bc}	32,4 ^b	28,2 ^c	26,4 ^{cd}	29,2 ^b	23,4 ^c	34,4 ^c	30,1 ^c	29,7 ^{bc}
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	33,1 ^c	30,8 ^{bc}	29,7 ^b	30,3 ^d	27,0 ^d	28,7 ^b	25,0 ^c	35,8 ^{cd}	31,1 ^{cd}	30,4 ^{bc}
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	35,2 ^c	31,5 ^{bc}	33,1 ^b	31,0 ^d	28,4 ^c	30,4 ^b	25,5 ^c	36,0 ^{cd}	33,0 ^d	32,7 ^{bc}
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	34,9 ^c	31,7 ^{bc}	32,5 ^b	28,8 ^c	28,3 ^c	30,8 ^b	29,4 ^d	37,0 ^d	33,3 ^d	32,2 ^{bc}
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	35,1 ^c	32,9 ^c	32,4 ^b	30,5 ^d	26,9 ^d	30,9 ^b	27,8 ^d	35,5 ^{cd}	33,8 ^d	33,4 ^c
Biogasgülle: 180 kg N _{pw} /ha vor der Aussaat	23,3 ^b	20,6 ^a	21,7 ^a	20,8 ^b	18,1 ^b	20,3 ^a	15,1 ^a	25,2 ^b	21,2 ^b	19,2 ^a
Biogasgülle: 100 kg N _{pw} /ha vor der Aussaat + 80 kg N _{pw} /ha Ende Mai	25,8 ^b	22,5 ^a	21,5 ^a	21,0 ^b	17,7 ^b	20,8 ^a	17,3 ^b	23,8 ^b	20,6 ^b	18,3 ^a

KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 %), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N), N_{pw} = jahreswirksamer Stickstoff pro ha. Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsvarianten sind durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

3.4. Energieeffizienzparameter

Die Mittelwerte der Energieeffizienzparameter über alle Düngungsvarianten und Jahre waren: 1) Energieoutput (EO): 219,0 GJ/ha, Nettoenergieoutput (NEO): 191,9 GJ/ha, Energienutzungseffizienz (ENE): 8,06 GJ/GJ und Energieintensität (EI): 2,13 MJ/kg. Die zweifache Varianzanalyse zeigte signifikante Haupteffekte für den EO und NEO und eine Interaktion von D × J für die ENE und die EI (Tabelle 5). Der EO schwankte im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren von 169,4 GJ/ha (2013) bis 251,4 GJ/ha (2011). Der EO war in den mineralischen Düngungsvarianten, zwischen den es keine statistisch signifikanten Unter-

schiede gab, am höchsten. Der mittlere EO aller mineralischen Düngungsvarianten betrug 241,4 GJ/ha und war signifikant höher (+42,4 GJ/ha; +21 %) als der mittlere EO der beiden Biogasgülledüngungsvarianten mit 199,1 GJ/ha und der Kontrolle (+139,2 GJ/ha; +136 %). Innerhalb der Biogasgülledüngungsvarianten führte die zweimalige Applikation im Vergleich zur einmaligen Applikation zu einem um 13,3 GJ/ha (+7 %) höheren EO (Tabelle 5).

Der NEO schwankte im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren von 141,1 GJ/ha (2013) bis 224,7 GJ/ha (2018). Der NEO war in der Kontrolle am niedrigsten und in den mineralisch gedüngten Varianten am höchsten, wobei es keine Unterschiede in der NEO zwischen den mineralisch ge-

Tabelle 10. Energienutzungseffizienz (GJ/GJ) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 10. Energy use efficiency (GJ/GJ) of grain maize as affected by the fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	7,09 ^a	7,44 ^a	3,37 ^a	5,41 ^a	5,11 ^a	4,91 ^a	7,11 ^a	6,13 ^a	4,91 ^a	4,92 ^a
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	8,07 ^b	8,63 ^b	6,33 ^b	8,22 ^b	8,49 ^b	8,28 ^b	10,94 ^{bc}	7,31 ^b	7,60 ^{bc}	7,14 ^b
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	8,27 ^b	8,67 ^b	6,52 ^b	8,05 ^b	8,69 ^b	8,53 ^b	11,53 ^{bcd}	7,59 ^b	7,84 ^{bcd}	7,52 ^b
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	8,04 ^b	8,58 ^b	6,05 ^b	7,60 ^b	8,66 ^b	8,44 ^b	11,70 ^{bcd}	7,16 ^b	7,44 ^{bc}	6,79 ^b
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	8,33 ^b	8,84 ^b	6,34 ^b	7,70 ^b	8,50 ^b	8,92 ^b	10,85 ^{bc}	7,52 ^b	7,59 ^{bc}	7,06 ^b
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	7,78 ^b	8,35 ^b	5,80 ^b	7,21 ^b	8,02 ^b	8,41 ^b	10,90 ^{bc}	7,25 ^b	7,41 ^{bc}	7,03 ^b
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	7,61 ^b	8,42 ^b	5,68 ^b	7,48 ^b	7,85 ^b	8,01 ^b	9,52 ^{ab}	7,23 ^b	7,27 ^b	6,55 ^b
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	7,98 ^b	8,19 ^b	5,94 ^b	7,39 ^b	8,15 ^b	7,91 ^b	9,81 ^{ab}	6,96 ^b	7,11 ^b	6,41 ^b
Biogasgülle: 180 kg N _{pw} /ha vor der Aussaat	9,32 ^c	10,39 ^c	6,09 ^b	9,82 ^c	10,66 ^c	8,21 ^b	13,47 ^{cd}	9,50 ^c	8,49 ^{cd}	8,81 ^c
Biogasgülle: 100 kg N _{pw} /ha vor der Aussaat + 80 kg N _{pw} /ha Ende Mai	9,89 ^c	10,97 ^d	6,73 ^b	9,96 ^c	10,88 ^c	8,71 ^b	14,57 ^d	9,85 ^c	8,74 ^d	9,26 ^c

KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N), N_{pw} = jahreswirksamer Stickstoff pro ha. Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsvarianten sind durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

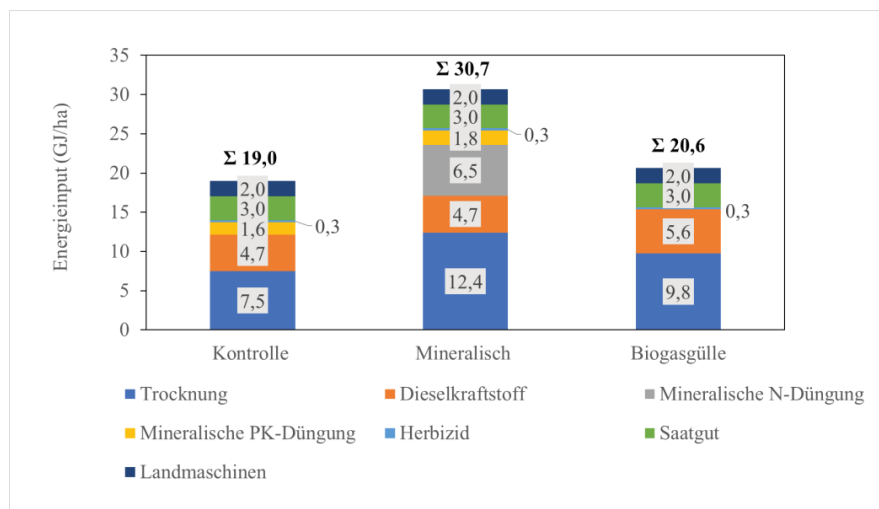


Abbildung 2. Zusammensetzung des jährlichen Energieinputs in der ungedüngten Kontrolle und Düngungsvarianten mit 180 kg N/ha im Produktionssystem Körnermais (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Figure 2. Composition for the yearly energy input in the unfertilized control and in the fertilization treatments with 180 kg N/ha in the production system grain maize (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

düngten Varianten gab. Die NEO war in den Varianten mit Biogasgülle niedriger als in den mineralisch gedüngten Varianten. Im Vergleich zur Kontrolle war die NEO der mineralisch gedüngten Varianten im Mittel um +126,5 GJ/ha (+150 %) und der Biogasgülle mit einmaliger Applikation um +87,6 GJ/ha (+104 %) und mit zweimaliger Applikation um +100,6 GJ/ha (+120 %) höher. Eine zweimalige Applikation von Biogasgülle führte im Vergleich zur einmaligen Applikation zu einer um +13,0 GJ/ha (+8 %) höheren NEO (Tabelle 5).

Die ENE schwankte im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren von 5,89 GJ/GJ (2013) bis 11,00 GJ/GJ

(2018). Die ENE war im Mittel aller Jahre in der Kontrolle am niedrigsten, gefolgt von den mineralisch gedüngten Varianten und dann jenen mit Biogasgülle gedüngten Varianten. Im Vergleich zur Kontrolle war die ENE der drei mineralisch mit KAS gedüngten Varianten um +2,52 GJ/GJ (+45 %) höher, die mit ENTEC gedüngte um +2,17 GJ/GJ (+38 %) höher, die mit UREA gedüngte um +1,93 (+34 %) höher und jene der mit Biogasgülle gedüngten Varianten um +4,07 GJ/GJ (+72 %) höher. Eine zweimalige Applikation von Biogasgülle führte im Vergleich zur einmaligen Applikation zu einer um +0,48 GJ/GJ (+5 %) höheren ENE

Tabelle 11. Energieintensität (MJ/kg) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 11. Energy intensity (MJ/kg) of grain maize as affected by the fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	2,32 ^c	2,21 ^c	4,87 ^b	3,07 ^c	3,24 ^c	3,38 ^b	2,37 ^b	2,67 ^c	3,33 ^d	3,34 ^c
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	2,02 ^b	1,89 ^b	2,62 ^a	2,00 ^{ab}	1,93 ^b	1,99 ^a	1,50 ^a	2,23 ^b	2,15 ^{abc}	2,29 ^b
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	1,97 ^b	1,88 ^b	2,50 ^a	2,03 ^{ab}	1,88 ^b	1,92 ^a	1,42 ^a	2,15 ^b	2,09 ^{abc}	2,18 ^b
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	2,03 ^b	1,90 ^b	2,71 ^a	2,15 ^b	1,88 ^b	1,94 ^a	1,39 ^a	2,28 ^b	2,20 ^{cd}	2,41 ^b
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	1,96 ^b	1,85 ^b	2,58 ^a	2,13 ^b	1,93 ^b	1,83 ^a	1,51 ^a	2,17 ^b	2,16 ^{abc}	2,31 ^b
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	2,10 ^b	1,96 ^b	2,84 ^a	2,27 ^b	2,04 ^b	1,94 ^a	1,50 ^a	2,25 ^b	2,21 ^{bc}	2,33 ^b
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	2,14 ^b	1,94 ^b	2,88 ^a	2,19 ^b	2,08 ^b	2,04 ^a	1,72 ^a	2,26 ^b	2,25 ^{bc}	2,50 ^b
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	2,04 ^b	2,00 ^b	2,75 ^a	2,22 ^b	2,00 ^b	2,06 ^a	1,76 ^a	2,35 ^b	2,29 ^c	2,55 ^b
Biogasgülle: 180 kg N _{pw} /ha vor der Aussaat	1,75 ^a	1,57 ^a	2,74 ^a	1,69 ^a	1,53 ^a	2,04 ^a	1,25 ^a	1,72 ^a	1,93 ^{ab}	1,87 ^a
Biogasgülle: 100 kg N _{pw} /ha vor der Aussaat + 80 kg N _{pw} /ha Ende Mai	1,65 ^a	1,49 ^a	2,43 ^a	1,64 ^a	1,50 ^a	1,88 ^a	1,17 ^a	1,66 ^a	1,88 ^a	1,77 ^a

KAS = Kalkamonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N), N_{pw} = jahreswirksamer Stickstoff pro ha. Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsvarianten sind durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

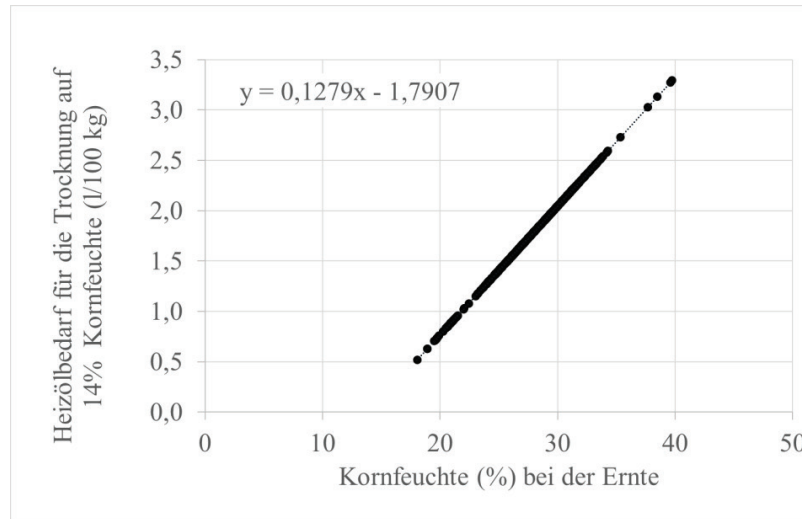


Abbildung 3. Heizölbedarf (l/100 kg Nassmais) bei der Maistrocknung auf 14 % Kornfeuchte in einem Durchlauftrockner bei unterschiedlicher Kornfeuchte bei der Ernte

Figure 3. Heating oil requirement (l/100 kg wet maize) for drying of wet grain maize to 14% grain moisture in a continuous flow dryer at different grain moisture content at harvest

(Tabelle 5). Die mineralisch gedüngten Varianten unterschieden sich in keinem Jahr voneinander. Die UREA und KAS und die UREA gedüngten Varianten unterschieden sich im Jahr 2018 nicht von der Kontrolle. Die zweimalige Applikation von Biogasgülle führte im Vergleich zur einmaligen Applikation nur in einem der zehn Jahre (2012) zu einer höheren ENE (Tabelle 10).

Die EI schwankte im Mittel aller Varianten zwischen den einzelnen Jahren von 1,56 MJ/ha (2018) bis 2,89 MJ/ha (2013). Die EI war im Mittel aller Jahre in der Kontrolle am höchsten, gefolgt von den mineralischen Düngungsvarianten (−0,98 MJ/kg, −32 %) und den mit Biogasgülle gedüngten Varianten (−1,32 MJ/kg, −43 %). Im Mittel aller Jahre war die EI bei einmaliger Applikation von Biogasgülle höher als bei zweimaliger Applikation (+0,10 MJ/kg, +6 %) (Tabelle 5). Die EI war in allen Jahren in der Kontrolle am höchsten. In sechs der zehn Jahre war die EI den mineralisch gedüngten Varianten höher als in den mit Biogas gedüngten Varianten, in zwei Jahren gab es keine signifikanten Unterschiede (Tabelle 11).

4. Diskussion

Kornertrag und N-Gehalte schwanken deutlich zwischen den Jahren und somit auch die davon abhängigen Parameter N-Entzug und N-Bilanz. Die N-Düngung erhöhte sowohl die Kornerträge als auch die N-Gehalte des Kornes (mit Ausnahme der einmaligen Biogasgülledüngungsapplikation), wo-

durch auch die davon abhängigen Parameter N-Entzug und N-Bilanz deutlich erhöht wurden. Bei beiden, Kornertrag und N-Gehalt des Kornes, war die mineralische Düngung wirksamer als die organische Düngung. Innerhalb der mineralischen Düngungsvarianten kam es zu keinen Unterschieden beim Kornertrag und dem N-Gehalt des Kornes, während innerhalb der Biogasgülledüngungsvarianten eine zweimalige im Vergleich zur einmaligen Applikation zu höheren Kornerträgen, aber vergleichbaren N-Gehalten des Kornes führte. Im Vergleich zur Kontrolle waren die Zunahme der Kornerträge bzw. des N-Gehaltes im Korn innerhalb der mineralischen Düngungsvarianten von +136 % bzw. +14 % und innerhalb der organischen Düngungsvarianten von +95 % bzw. +10 % höher. Das führte dazu, dass der N-Entzug bei den mineralischen Varianten um +172 % und bei den organischen Varianten um +104 % höher war als in der Kontrolle.

In der Studie von Brückler et al. (2017) wurde österreichweit in der Periode 2003–2016 ein mittlerer Kornertrag von 6,04 t/ha für biologisch produzierten Körnermais und 9,46 t/ha für konventionell produzierten Körnermais ausgewiesen. Vergleicht man diese Durchschnittserträge und die im Grünen Bericht (2025) für den Zeitraum von 2011 bis 2022 mit einem durchschnittlichen Kornertrag von 10,30 t/ha ausgewiesenen Kornerträge mit dem in unserer Studie erhobenen mittleren Kornertrag von 6,27 t/ha in der ungedüngten Kontrollvariante, von 14,81 t/ha in den mineralisch gedüngten Varianten und von 12,21 t/ha in den Biogasgüllevarianten, so kann festgestellt werden, dass es sich bei Kalsdorf um einen hochproduktiven Standort handelt,

bei dem die limitierenden Faktoren Licht und Wasser nicht sehr einschränkend sind. Auf Hohertragsstandorten lassen sich beides, Kornertrag und N-Gehalt des Kornes durch die N-Düngung erhöhen.

Die N-Bilanz war im Mittel über alle Varianten in neun der zehn Jahre positiv, das bedeutet, dass mehr N gedüngt als mit dem Erntegut abgeführt wurde. Die positiven N-Bilanzen der mineralischen Düngevarianten waren niedriger als jene der organisch gedüngten, wobei eine zweimalige Applikation von Biogasgülle im Vergleich zur einmaligen Applikation in vier der zehn Jahren zu einer niedrigeren N-Bilanz führte.

Die N-Bilanz von $-57,1 \text{ kg N/ha}$ in der ungedüngten Kontrollvariante weist auf eine hohe Stickstoffnachlieferung auf diesem Hohertragsstandort hin. Eine ausgeglichene N-Bilanz würde bei 180 kg N/ha einen theoretischen durchschnittlichen Kornertrag von $19,30 \text{ t/ha}$ erreichen (Abbildung 1). Der mittlere gemessene Kornertrag von $14,81 \text{ t/ha}$ in den mineralischen Düngungsvarianten und $12,21 \text{ t/ha}$ in den Biogasgüllevarianten zeigt, dass andere standortbedingte Faktoren (z. B. Niederschlagsdefizite) die Biomassebildung limitieren.

Der Jahreseffekt war deutlich (Tabelle 5), wobei das Jahr 2018 hervorzuheben ist. Durch die optimalen meteorologischen Witterungsbedingungen in den Monaten Mai, Juni und Juli 2018 mit 19°C bis 23°C Monatsmitteltemperatur und 115 bis 150 mm Monatsniederschlag wurde der Körnermais sehr energieeffizient produziert.

Die Energieeffizienz wird erhöht, indem der flächenbezogene Energieinput insbesondere die der Trocknung und die der mineralischen Düngung reduziert werden. Da die Trocknung den höchsten Energieinput aufweist können Minderungsmaßnahmen in der Sortenwahl (frühereifere Körnermaissorten) sowie im Konservierungsverfahren (Nassmaiskonservierung) gesetzt werden. Ältere Energieeffizienzanalysen für den Hohertragsstandort Wagendorf (Gemeinde St. Veit in der Südsteiermark) zeigten bei der Körnermaistrocknung ebenfalls einen sehr hohen Energieinput über Heizöl. Bei einer mittleren Kornfeuchte bei der Ernte von 22 % und einem Nassmaisertrag von 12421 t/ha bei einer mineralischen Düngung von 175 kg N/ha wurde ein mittlerer Heizölverbrauch bei der Trocknung auf 14 % Kornfeuchte von 124 l/ha festgestellt (Moitzi et al., 2015). Der fossile Energieinput (z. B. Heizöl) kann beträchtlich reduziert werden, wenn erneuerbare Energieträger, z. B. in Kombination mit Biomasse-Nahwärmeversorgungsanlagen oder mit Biogasanlagen für die Trocknung verwendet werden. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft würde bei einer Biometanisierung von Gülle aus der Tierhaltung zusätzliche Abwärme aus Blockheizkraftwerken für die Trocknung von

Körnermais zur Verfügung stehen, wodurch der flächenbezogene und produktbezogene fossile Energieeinsatz beträchtlich reduziert werden könnte. Die Trocknung des erntefeuchten Körnermaises entfällt ganz, wenn dieser nach der Ernte der Nassmaiskonservierung für die Erzeugung von Maisstärke, Bioethanol und Zitronensäure zugeführt wird. Wegen des geringeren Energieinputs und trotz geringerer Kornerträge waren die Biogasgüllevarianten energieeffizienter als die mineralischen Düngungsvarianten, was auch in Moitzi et al. (2015) festgestellt wurde. Vergleicht man die beiden Biogasgüllevarianten, so war die Variante mit der zweimaligen Applikation energieeffizienter als die Variante mit einmaliger Applikation: EO: $+13,3 \text{ GJ/ha}$ (+7 %), NEO: $+13,0 \text{ GJ/ha}$ (+8 %), EI: $-0,10 \text{ MJ/kg}$ (−6 %). Zudem war auch die N-Bilanz um $21,4 \text{ kg N/ha}$ geringer. Dies dürfte mit dem Zeitpunkt der Applikation erklärt werden, da N-Verluste über NH_3 -Volatilisation bei der Ausbringung sehr davon bestimmt werden (Maris et al., 2021).

Bei einem Düngungsniveau von 180 kg N/ha hat die mineralische N-Düngerart keinen nennenswerten Effekt auf den Kornertrag, N-Bilanz und Energieeffizienz. Untersuchungen an einem Trockenstandort im Marchfeld an Winterweizen zeigten bei ortsüblichen Düngermengen positive Auswirkungen der Düngerart und der Gabenteilung auf die Energieeffizienz, mit einer höheren Energieeffizienz bei der Verwendung von stabilisierten Harnstoff (Moitzi et al., 2020).

5. Schlussfolgerungen

Am Hohertragsstandort wird der Effekt der Düngerstrategie auf Kornertrag, N-Bilanz und Energieeffizienz durch die meteorologischen Bedingungen (Niederschlagmenge und -verteilung) in der Vegetationsperiode stark mitbestimmt. Die N-Bilanz als guter Deskriptor für die Nitratverlagerung nimmt mit steigenden Kornertrag ab. Die mineralischen Düngungsvarianten mit 180 kg N/ha zeigten nur geringe Unterschiede im Kornertrag, N-Bilanz und Energieeffizienz. Die Düngung von Körnermais mit Biogasgülle ist energieeffizienter als die mineralische Düngung, wobei die zweimalige Biogasgülleapplikation noch eine höhere Energieeffizienz aufweist als die einmalige Applikation.

Literaturverzeichnis

Alluvione, F., Moretti, B., Sacco, D., Grignani, C. 2011. EUE (energy use efficiency) of cropping systems for a sustainable agriculture. *Energy* 36 (7), 4468–4481.

- Amberger, A. 1980. Grenzen der Düngung für Ertrag und Qualität. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* (31), 246–256.
- Arvidsson, J. 2010. Energy use efficiency in different tillage systems for winter wheat on a clay and silt loam in Sweden. *European Journal of Agronomy* 33 (3), 250–256.
- Biedermann, G. 2009. Kumulierter Energieaufwand (KEA) der Weizenproduktion bei verschiedenen Produktionssystemen (konventionell und ökologisch) und verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen (Pflug, Mulchsaat, Direktsaat). Diplomarbeit, Institut für Landtechnik, Universität für Bodenkultur, Wien, Österreich.
- Biernat, L., Taube, F., Vogeler, I., Reinsch, T., Kluß, C., Loges, R. 2020. Is organic agriculture in line with the EU-Nitrate directive? On-farm nitrate leaching from organic and conventional arable crop rotations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 298, 106964.
- Brückler, M., Resl, T., Reindl, A. 2017. Comparison of organic and conventional crop yields in Austria. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 68 (4), 223–236.
- Dal Ferro, N., Zanin, G., Borin, M. 2017. Crop yield and energy use in organic and conventional farming: A case study in north-east Italy. *European Journal of Agronomy* 86, 37–47.
- DLG 1997. Futterwerttabellen Wiederkäuer. 7. erweiterte und überarbeitete Auflage. Hg. v. DLG-Verlags-GmbH, Eschorners Landstraße 122, Frankfurt am Main, Deutschland.
- Fluck, R.C. 1992. *Energy in farm production*. Elsevier, Amsterdam, London, New York, Tokyo.
- Guggenberger, T., Fritz, C., Finotti, E., Herndl, M., Ofner-Schröck, E., Terler, G., Steinwider, A. 2020. Grundzüge einer standortgerechten Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://raumberg-gumpenstein.at/forschung/hot-topic/klimawandel/klimaschutz-in-der-landwirtschaft-linksammlung.html> (abgerufen am 25. Juli 2025).
- Hülsbergen, K.-J., Feil, B., Biermann, S., Rathke, G.-W., Kalk, W.-D., Diepenbrock, W. 2001. A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 86 (3), 303–321.
- KTBL-Feldarbeitsrechner 2025. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). Online verfügbar unter <https://www.ktbl.de/webanwendungen/feldarbeitsrechner> (abgerufen am 25. Juli 2025).
- Maris, S. C., Abalos, D., Capra, F., Moscatelli, G., Scaglia, F., Cely Reyes, G. E., Ardenti, F., Boselli, R., Ferrarini, A., Mantovi, P., Tabaglio, V., Fiorini, A. 2021. Strong potential of slurry application timing and method to reduce N losses in a permanent grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 311, 107329.
- Mitscherlich, E. A. 1948. *Die Ertragsgesetze*. Berlin, Deutschland: Akademie-Verlag.
- Moitzi, G., Neugschwandtner, R. W., Kaul, H.-P., Wagentristsl, H. 2021. Energy Efficiency of Continuous Rye, Rotational Rye and Barley in Different Fertilization Systems in a Long-Term Field Experiment. In: *Agronomy* 11 (2), 229.
- Moitzi, G., Spiegel, H., Sandén, T., Vuolo, F., Essl, L., Neugschwandtner, R. W., Wagentristsl, H. 2020. Energieeinsatz und Energieeffizienz von Winterweizen bei unterschiedlicher mineralischer Stickstoffdüngung im Marchfeld. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 71 (2), 55–67.
- Moitzi, G., Schantl, J., Drexler, M., Jansel, W., Lamprecht, A., Hödl, C., Wagentristsl, H., Neugschwandtner, R. W. 2026. Kornertrags-, stickstoffbilanz- und energieeffizienz-orientierte Stickstoffmineraldüngung von Körnermais in einem Langzeitdüngungsversuch in der Steiermark. *Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 77 (1), 12–28.
- Moitzi, G., Thünauer, G., Robier, J., Gronauer, A. 2015. Energieeinsatz und Energieeffizienz in der Körnermaisproduktion bei unterschiedlicher Stickstoffdüngung in der Südsteiermark. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 66 (1-2), 25–37.
- Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL) 2025. Richtwerte Kraftstoffverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft. Wien. Online verfügbar unter <https://oekl.at/oekl-richtwerte/kraftstoffverbrauch/> (abgerufen am 25. Juli 2025).
- Pimentel, D. 2009. Energy Inputs in Food Crop Production in Developing and Developed Nations. *Energies* 2 (1), 1–24.
- Rossrucker, H., 1977. Die Kosten der Trocknung von Körnermais – ihre Berechnung und Problematik. *Landtechnische Schriftenreihe Heft 33*, Österreichisches Kuratorium für Landtechnik (ÖKL), Wien.
- Sartori, L., Basso, B., Bertocco, M., Oliviero, G. 2005. Energy Use and Economic Evaluation of a Three Year Crop Rotation for Conservation and Organic Farming in NE Italy. *Biosystems Engineering* 91 (2), 245–256.
- Sørensen, C. G., Halberg, N., Oudshoorn, F. W., Petersen, B., Dalgaard, R. 2014. Energy inputs and GHG emissions of tillage systems. *Biosystems Engineering* 120, 2–14.