

Kornertrags-, stickstoffbilanz- und energieeffizienz-orientierte Stickstoffmineraldüngung von Körnermais in einem Langzeitdüngungsversuch in der Steiermark

Grain yield, nitrogen balance and energy efficient oriented mineral nitrogen fertilization of grain maize in a long-term fertilization trial in Styria

Gerhard Moitzi^{1*}, Johannes Schantl², Manfred Drexler², Walter Jansel², Andreas Lamprecht²,
Christoph Hödl², Helmut Wagentrustl¹, 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: 23. Jänner 2026, überarbeitete Einreichung: 25. Februar 2026, Annahme: 25. Februar 2026

Zusammenfassung

Auf einem Hohertragsstandort in der Südsteiermark wurden in einem Langzeitdüngungsversuch mit Stickstoff (N) für zehn Versuchsjahre (2011–2016, 2018, 2020–2022) der Kornertrag, die N-Bilanz und die Energieeffizienz in elf mineralisch gedüngte Varianten mit 115, 145, 180, 210 und 240 kg N/ha sowie einer ungedüngten Kontrolle hinsichtlich optimaler N-Düngermenge untersucht. Kalkammonsalpeter wurde bei allen Düngermengen verglichen. Bei einer Düngermenge von 180 kg N/ha wurden zudem unterschiedliche Düngerarten (Kalkammonsalpeter, Linzer STAR, ENTEC® 26, Harnstoff), Ausbringzeitpunkte und der Anzahl der Gaben verglichen. Der Kornertrag und der N-Gehalt im Korn stiegen mit der N-Düngung, wobei die höchsten Gaben keine Effekte mehr zeigten. Die N-Düngung erhöhte auch die N-Bilanz (Summe aus N-Düngung minus N-Entzug) und die Energienutzungseffizienz (ENE = Energieoutput/Energieinput). Sehr hohe Düngermengen erhöhten jedoch die N-Bilanz stark und führten zu einer Abnahme der ENE. Als optimale Düngermenge für eine ausgeglichene N-Bilanz wurden 139 kg N/ha und für die höchste ENE 167 kg N/ha berechnet. Der Wert für die ENE deckt sich mit den nationalen Empfehlungen für eine sachgerechte Düngung. Eine optimale standortangepasste N-Düngermenge sollte sich aus ökologischer Sicht jedoch an der N-Bilanz orientieren. Bei einer Düngermenge von 180 kg N/ha hatten die Varianten keinen Einfluss auf den Kornertrag und einen geringen auf die N-Bilanz und die Energieeffizienz.

Schlagwörter: Hohertragsstandort, Mineraldüngerarten, N-Entzug, energieeffiziente Düngung, N-Düngungsoptimum

Summary

At a high-yield site in southern Styria, a long-term nitrogen (N) fertilization trial was conducted over ten experimental years (2011–2016, 2018, 2020–2022) to investigate grain yield, N balance and energy efficiency in eleven mineral-fertilized treatments with 115, 145, 180, 210 and 240 kg N/ha, as well as an unfertilized control, with respect to the optimal N fertilizer rate. Calcium ammonium nitrate was used for all fertilizer rates. At an application rate of 180 kg N/ha, different fertilizer types (calcium ammonium nitrate, Linzer STAR, ENTEC® 26, urea), application times and numbers of split applications were additionally compared. Grain yield and N content in the grain increased with N fertilization, while the highest N rates no longer showed any additional effect. Nitrogen fertilization also increased the N balance (sum of N fertilization minus N uptake), and improved energy use efficiency (ENE = energy output/energy input). However, very high N rates strongly increased the N balance and led to a decrease of the ENE. The optimal N rates for a balanced N balance were calculated at 139 kg N/ha and for the highest ENE at 167 kg N/ha. The value of the ENE is in line with national recommendations for appropriate fertilization. Anyhow, an optimal, site-adapted N fertilization rate should be based from an ecological point on the N balance. At a fertilization rate of 180 kg N/ha, the different variants had no effect on grain yield and only a minor effect on N balance and energy efficiency.

Keywords: high-yield site, mineral fertilizer types, N uptake, energy-efficient fertilization, N fertilization optimum

Open Access. © 2026 Gerhard Moitzi, Johannes Schantl, Manfred Drexler, Walter Jansel, Andreas Lamprecht, Christoph Hödl, Helmut Wagentrustl, 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-2026-0002>

1. Einleitung

Der Europäische Green Deal mit dem Ziel bis 2050, ein klimaneutrales Europa zu erreichen, legt einen starken Fokus auf den Übergang zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft und einem nachhaltigeren Lebensmittelsystem, um zum Klimaschutz und zur Erhaltung der biologischen Vielfalt beizutragen. Die Europäische Kommission beabsichtigt, die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu den 1990er-Jahren um 50–55 % zu reduzieren (European Commission, 2020). Die zentralen Herausforderungen für das Erreichen von nachhaltigen Agrarsystemen im Rahmen des Green Deals: verringerte Erträge, Flächenbedarf, Stickstoffbedarf, Veränderungen in der Ernährung, Lebensmittelverschwendung, Verteilung und Zugang zu Nahrung sowie externe Effekte laut Boix-Fayos und Vente (2023), die in ihrer Studie zwei Ansätze für eine nachhaltige Landwirtschaft mit potenzieller Komplementarität zur Erfüllung der in den verschiedenen europäischen Politiken und Strategien verankerten Ziele nachhaltiger Landwirtschaft vorschlagen: Nachhaltige Intensivierung mit Fokus auf umweltfreundliche Produktion und Agrarökologie mit Fokus auf Ökologie, soziale Gerechtigkeit und Ernährungssouveränität. Darin kommt dem Konzept der standortgerechten Landwirtschaft eine Leitfunktion zu, in der sich die Leistungsziele und die Produktionsintensität nach Möglichkeiten des Standortes orientieren (Guggenberger et al., 2020).

Der Standort mit der Bodenfruchtbarkeit und den klimatischen Bedingungen determinieren die Intensität des Betriebsmitteleinsatzes (vor allem von Düngermitteln). Pflanzenbauliche Produktionssysteme können durch unterschiedliche Kennzahlen (Kornertrag, N-Entzug, N-Bilanz und Energieeffizienz) hinsichtlich unterschiedlicher Produktionsintensitäten beschrieben werden, welche eine unterschiedliche Aussagekraft haben (Hülsbergen et al., 2001; Moitz et al., 2021; Arvidsson, 2010). Während die N-Bilanz ein guter Deskriptor für die Nitratverlagerung ist (Biernat et al., 2020) und somit die ökologisch-orientierte Produktionsintensität beschreibt, zeigen die Kurvenverläufe von Kornertrag, Nettoenergieoutput (= Energieoutput minus Energieinput) und Energienutzungseffizienz (= Energieoutput/Energieinput), welche im Ertragsgesetz des abnehmenden Ertragszuwachses nach Mitscherlich (Mitscherlich, 1948) begründet sind, die kornertrags- und energieeffizienz-orientierte Produktionsintensität.

In dieser Studie liegt der Schwerpunkt in der Optimierung der mineralischen N-Düngung von Körnermais auf einem Hohertragsstandort hinsichtlich Kornertrag, N-Bilanz und Energieeffizienz, basierend auf einem im Jahr 2010 gestarte-

ten Langzeitdüngungsversuch mit Körnermais an der Versuchsstation für Pflanzenbau der Steiermärkischen Landesregierung in Kalsdorf bei Ilz.

Im ersten Schritt wurde der Effekt von unterschiedlichen Düngestrategien (elf mineralisch gedüngte Varianten mit 115, 145, 180, 210 und 240 kg N/ha sowie eine ungedüngte Kontrolle) auf Kornertrag, N-Entzug, N-Bilanz und Kennwerte der Energieeffizienz (Energieinput, Energieoutput, Nettoenergieoutput, Energienutzungseffizienz, Energieintensität) untersucht. Anschließend wurde auf Basis der berechneten Kennzahlen zur N-Bilanz und Energieeffizienz die optimale mineralische N-Düngermenge für die Produktion von Körnermais abgeleitet.

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: 47,092419 N, 15,953002 E) auf einem mittelschweren Pseudogley. Gemäß der Bodenanalyse im Jahr 2023 liegt mit der Bodentextur (28 % Sand, 55 % Schluff und 17 % Ton) ein sandiger Lehm vor, welcher einen pH-Wert (CaCl_2) von 6,5 aufweist. Der Humusgehalt (Trockenverbrennung) liegt bei 2 %. Der Gehalt an „pflanzenverfügbarem“ Phosphor und Kalium (Calcium-Acetat-Lactat) ist ausreichend: 53 mg P/1000 g, 177 mg K/1000 g. Der „pflanzenverfügbare“ Magnesiumgehalt (Methode nach Schachtschabel) mit 89 mg Mg/1000 g ist ebenfalls ausreichend.

Der Standort ist durch das illyrische Klima geprägt. Als Übergangsklima zwischen dem alpinen, pannonischen und mediterranen Klima zeichnet es sich durch hohe Niederschläge, hohe Sonnenstundenzahl sowie häufig hohe Luftfeuchtigkeit aus. Die monatlichen Temperaturen und Niederschläge sind als Mittelwert aus den einzelnen Versuchsjahren sowie als Abweichung in den einzelnen Versuchsjahren in den Tabellen 1 und 2 dargestellt (Österreichische Hagelversicherung, 2024).

Der Stickstoffdüngungsversuch wurde 2010 in einer generalisierten Gitteranlage mit zwölf Versuchsvarianten mit je vier Wiederholungen in sieben unvollständigen Blöcken angelegt (Versuchsstation für Pflanzenbau Hatzendorf, 2024). Die Netto-Parzellengröße beträgt 12,6 m² (= 9 m × 1,4 m). Die zwölf Versuchsvarianten mit der Kulturführung sind umfassend in dem Versuchsbericht (Versuchsstation für Pflanzenbau Hatzendorf, 2024) beschrieben. Die einzel-

Tabelle 1. Durchschnittliche Monatsmitteltemperatur (°C) und deren Abweichungen in den einzelnen Versuchsjahren in Kalsdorf bei Ilz
Table 1. Monthly mean temperature (°C) and deviation in the experimental years in Kalsdorf bei Ilz

	Mittelwert 2011– 2022	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Jan	1,2	-1,2	-0,2	-1,2	+0,8	+1,8	-1,2	+1,8	-1,2	-0,2	+0,8
Feb	2,5	-2,5	-3,5	-1,5	+0,5	-0,5	+3,5	-3,5	+3,5	+1,5	+2,5
Mrz	6,6	-0,6	+2,4	-2,6	+3,4	+0,4	+0,4	-2,6	+0,4	-0,6	-0,6
Apr	12,5	+1,5	-0,5	+0,5	+0,5	-0,5	+0,5	+3,5	+0,5	-3,5	-2,5
Mai	16,5	+0,5	+0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	+2,5	-0,5	-2,5	+1,5
Jun	21,0	-1,0	0,0	-1,0	-1,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	+2,0	+2,0
Jul	22,8	-2,8	-0,8	+1,2	-0,8	+1,2	+0,2	+0,2	-0,8	+1,2	+1,2
Aug	21,7	+0,3	+0,3	+0,3	-2,7	+2,3	-1,7	+1,3	+0,3	-1,7	+1,3
Sep	17,0	+2,0	0,0	-2,0	-1,0	0,0	+1,0	0,0	+1,0	+1,0	-2,0
Okt	11,2	-1,2	-1,2	+0,8	+1,8	-1,2	-1,2	+1,8	-0,2	-1,2	+1,8
Nov	6,1	-3,1	+0,9	-0,1	+1,9	+1,9	-1,1	+0,9	-1,1	-1,1	+0,9
Dez	1,7	+0,3	-0,7	+0,3	+0,3	+1,3	-1,7	+0,3	-0,7	+0,3	+0,3
o	11,7	-0,6	-0,2	-0,5	+0,3	+0,5	-0,1	+0,5	0,0	-0,4	+0,6

nen Versuchsvarianten variieren hinsichtlich Düngermenge (0, 115, 180, 210, 240 kg N/ha), Düngerart (N-Form, N-Gehalte, sowie weitere Nährstoffe) und Ausbringzeitpunkt (April zur Aussaat, Anfang Mai (EC 12), Ende Mai/Anfang Juni (EC 18)). Die Düngerarten sind in Tabelle 3 dargestellt, die Versuchsvarianten ergeben sich aus Kombinationen von Düngermenge, Düngerart und Ausbringzeitpunkt. Die Düngung wurde in einigen Varianten in einer Gabe, in anderen Varianten als Gabenteilung in zwei Gaben ausgebracht (Tabelle 4).

Tabelle 2. Durchschnittliche Monatsniederschläge (mm) und deren Abweichungen in den einzelnen Versuchsjahren in Kalsdorf bei Ilz
Table 2. Monthly mean precipitation (mm) and deviation in the experimental years in Kalsdorf bei Ilz

	Mittelwert 2011– 2022	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Jan	25	-12	-20	+28	+12	+16	0	+7	-22	+3	-12
Feb	47	-41	-33	+65	+53	-25	+53	+8	-23	-24	-31
Mrz	31	+4	-29	+48	-11	-10	+5	+35	-7	-20	-13
Apr	41	-3	+34	-9	+9	-12	+8	-15	-12	-14	+15
Mai	112	-26	+41	+22	+16	-2	+1	+38	-70	+9	-30
Jun	100	+63	+7	-25	+3	-51	-5	+15	+72	-57	-22
Jul	111	+8	+100	-93	+32	-1	-26	+7	+32	-31	-26
Aug	104	-1	-31	-9	+55	-58	-8	-18	+100	+8	-38
Sep	72	-24	+41	+30	+23	+11	-55	-2	+14	-42	+4
Okt	67	+9	+55	-33	-12	+79	+20	-44	+25	-46	-54
Nov	51	-50	+20	+73	-1	-46	+19	-2	-35	+15	+6
Dez	28	-4	-10	-11	+15	-26	-25	-18	+46	+28	+5
Σ	787	-78	+174	+85	+196	-125	-13	+10	+119	-172	-196

Tabelle 3. Düngernamen, deren N-Gehalte, N-Formen sowie weitere Nährstoffe
Table 3. Fertilizer names, their N contents, N forms, and other nutrients

Düngername	Abkürzung	N-Gehalt	N-Form	Weitere Nährstoffe
Kalkammonsalpeter	KAS	27 %	13,5 % NO ₃ -N, 13,5 % NH ₄ -N	10 % Ca
Linzer STAR	LS	15 %	6 % NO ₃ -N, 9 % NH ₄ -N	6,6 % P, 12,5 % K, 3 % S, 0,01 % Zn, 3,2 % Ca
ENTEC® 26 ¹⁾	ENTEC	26 %	7,5 % NO ₃ -N, 18,5 % NH ₄ -N	13 % S
Harnstoff	UREA	46 %	CH ₄ N ₂ O	

1) Ein Nitrifikationsinhibitor verzögert die Umwandlung von Ammoniumstickstoff zu Nitrat.

In den Versuchsjahren zwischen 2011 und 2022 wurde Körnermais zehnmal (Tabelle 5) hintereinander in Monokultur angebaut. Nur in den Jahren 2017 und 2019 wurde wegen des Befalls der jungen Maispflanzen mit den Larven des Maiswurzelbohrers (*Diabrotica virgifera*) Körnerhirse (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) angebaut.

Ende Oktober/Anfang November wurde mit einem Streichblechpflug auf 30 cm gepflügt. Im März erfolgte ein Abschleppen mit einer Ackerschlepppe und danach die Saatbettbereitung mit einer Kreiselegge. Die Maisaussaat erfolgte mit einer pneumatischen Einzelkornsämaschine (Reihenweite: 70 cm). Die spätreifen Körnermaissorten mit einer FAO-Reifezeit zwischen 420 und 440 stammen von DEKALB®. Im Rahmen des Pflanzenschutzes wurde üblicherweise eine Herbizidapplikation durchgeführt, nur in den Jahren 2013 und 2016 wurde wegen der geringen Wirkung der ersten Applikation eine zweite Applikation durchgeführt (Tabelle 5).

Tabelle 4. Faktorlevel des Versuchsfaktors Düngungsvariante
Table 4. Factor level of the experimental factor fertilization variant

Düngungsvarianten	Σ kg N/ha
Kontrolle	0
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 60 kg N/ha Ende Mai	115
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Ende Mai	145
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
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	210
KAS: 120 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	240

KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N)

Tabelle 5. Beschreibung des Produktionssystems Körnermais in den einzelnen Versuchsjahren
Table 5. Description of the maize production system in the experimental years

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Sorte	DKC 5170	DKC 5005	DKC 5007	DKC 5007	DKC 5007	DKC 5007	DKC5068	DKC5068	DKC5068	DKC5068
FAO Reifezahl	440	440	440	440	440	440	420	420	420	420
PK-Grunddüngung*	14.4.	23.3.	24.4.	10.4.	13.4.	7.4.	18.4.	17.4.	16.4.	13.4.
Anbauzeitpunkt	19.4.	27.4.	26.4.	11.4.	14.4.	13.4.	23.4.	21.4.	21.4.	21.4.
Erntetermin	6.10.	11.10	16.10.	29.10.	22.10.	6.10.	8.10.	20.10.	5.10.	3.10.
Mittlere Erntefeuchte (%)	28,4	26,5	32,3	27,4	24,5	26,9	20,7	30,0	28,6	28,2
Aussaatstärke (Körner/ha)	89.000	84.000	84.000	79.400	84.000	79.400	81.600	81.600	81.600	81.600
Abstand in der Reihe (cm)	16,0	17,0	17,0	18,0	17,0	18,0	17,5	17,5	17,5	17,5
Herbizid: Ausbringzeitpunkt, Aufwandmenge pro Hektar und Produktname	19.5., Mikado	18.5., Kukuruz	22.5., 1,5 l	9.5., 250 g	12.5., 1,25 l	23.5., 1,25 l	9.5., 1,5 l	8.5.2020, 1,5 l	21.5.2021, 1,5 l	23.05.2022, 1,5 l
	AS VITAL (0,9 l)	Pack (1 l Clío)	MaisTer power ⁹⁾	Arigo ¹¹⁾ + 1,3 l Gardo	Elumis ¹⁴⁾ + 20 g	Elumis ¹⁴⁾ + 20 g Peak ¹⁵⁾	Laudis ¹⁰⁾ + 1,5 l Aspect	Laudis ¹⁰⁾ + 1,5 l Aspect	Laudis ¹⁰⁾ + 1,5 l Aspect	Laudis ¹⁰⁾ + 1,5 l Aspect
	Mikado ¹⁾ + 0,3 l	Star ⁶⁾ + 1 l		Gold ¹²⁾ + 0,3 l Mais-	Peak ¹⁵⁾ + 1,25 l Dual	+ 1,25 l Dual	Pro ³⁾ + 1,5 l	Pro ³⁾ + 1,5 l	Pro ³⁾ + 1,5 l	Pro ³⁾ + 1,5 l
	Buctril ²⁾ + 1,5 l Aspect	Stomp ⁷⁾ Aqua + 1 l		Banvel ¹³⁾ + 0,4 l Neo-	Gold ¹⁶⁾	Gold ¹⁶⁾	Monsoon ¹⁷⁾ + 0,3 l	Monsoon ¹⁷⁾ + 0,3 l	Monsoon ¹⁷⁾ + 0,4 l	Monsoon ¹⁷⁾ + 0,3 l Mais-
	Pro ³⁾ + 1,5 l	Spectrum ⁸⁾		Wett		Mais- Banvel ¹³⁾	Dicamba ¹⁸⁾	Dicamba ¹⁸⁾	Mais- Banvel ¹³⁾	Banvel ¹³⁾
	P-Prof ⁴⁾ + 0,3 l									
	Cambatec ⁵⁾									
			10.6.**, 2 l Laudis ¹⁰⁾			10.6.*, 2 l Laudis ¹⁰⁾ + 0,3 l Mais- Banvel ¹³⁾				

Wirkstoffe: ¹⁾ 300 g/l Sulcotrion; ²⁾ 225 g/l Bromoxynil; ³⁾ 200 g/l Flufenacet + 333 g/l Terbutylazin; ⁴⁾ NPK-Flüssigdünger: 64 g N/l, 256 g P₂O₅/l, 64 g K₂O/l, 0,13 g B/l, 0,05 g Cu/l, 0,26 g Fe/l, 0,15 g Mn/l, 0,01 g Mo/l, 0,05 g Zn/l; ⁵⁾ 480 g/l Dicamba; ⁶⁾ 50 g/l Topramezone + 160 g/l Dicamba; ⁷⁾ 455 g/l Pendimethalin; ⁸⁾ 720 g/l Dimethenamid; ⁹⁾ 31,5 g/l Foramsulfuron + 1,0 g/l Iodosulfuron + 10 g/l Thienicarbazon + 15 g/l Cyprosulfamid; ¹⁰⁾ 44 g/l Tembotrion + 22 g/l Isoxadifen-ethyl; ¹¹⁾ 360 g/kg Mesotrione + 120 g/kg Nicosulfuron + 30 g/kg Rimsulfuron; ¹²⁾ 312,5 g/l S-Metolachlor + 187,5 g/l Terbutylazin; ¹³⁾ 700 g/kg Dicamba + Netzmittel: Isotridecanol-polyglycoether; ¹⁴⁾ 75 g/l Mesotrione + 30 g/l Nicosulfuron; ¹⁵⁾ 750 g/kg Prosulfuron; ¹⁶⁾ 960 g/l S-Metolachlor; ¹⁷⁾ 22,5 g/l Foramsulfuron + 22,5 g/l Isoxadifen-ethyl; ¹⁸⁾ 480 g/l Dicamba; *) 500 kg/ha Hyperkali (8 % P, 15 % K); **) Erforderliche zweite Herbizid-Applikation wegen geringer Wirkung gegen Hühnerhirse (Echinochloa crus-galli) in der ersten Applikation.

Die Ernte der Maiskolben erfolgte händisch. Nach dem Re-
beln der Maiskolben wurde der Wassergehalt der Körner
mit dem Brabender o. H. G. Duisburg gemessen und der
N-Gehalt quantitativ mit der nasschemischen Analyse (Kjel-
dahl-Methode) an der Versuchsstation für Obst- und Wein-
bau Haidegg (Ragnitzstraße 193, 8047 Graz) bestimmt.

2.2. Stickstoffbilanz und Energieeffizienz

Die Formeln für die Berechnungen der Kennzahlen für
N-Entzug und N-Bilanz (Biernat et al. 2020) und die Ener-
gieeffizienz sind in der Tabelle 6 dargestellt. Der N-Entzug
ergibt sich aus der mittels des Kornertrages abgeführten
N-Menge. Die N-Bilanz ergibt sich aus der Differenz der
zugeführte N-Menge durch die Düngung minus die durch
Ernte des Korns vom Feld abgeführte N-Menge.

In der Prozessanalyse für die Energieeffizienz werden die
Stoffströme mittels spezifischer Energieeffizienz-Äquiva-
lente in Energieströme transferiert (Hülsbergen et al., 2001;
Alluvione et al., 2011). Dabei wird der direkte und indirekte

Verbrauch an nicht erneuerbaren Ressourcen berücksichtigt
(Alluvione et al., 2011). Die photosynthetische Bindung der
Solarstrahlung in der Biomasse fließt über den Energieout-
put im Kornertrag ein. Der Energieeinsatz für die menschl-

Tabelle 6. Formeln für Kennzahlen der N-Bilanz und Energieeffizienz
Table 6. 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 – NE	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	MJ/ha
Energieoutput (EO)	EO = Kornertrag ¹⁾ × Bruttoenergiegehalt ²⁾	GJ/ha
Nettoenergieoutput (NEO)	NEO = EO – E	GJ/ha
Energienutzungseffi- zienz (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

che Arbeit wird nicht berücksichtigt, da dieser im Vergleich zu den anderen Energieinputkomponenten gering ist (Alluvione et al., 2011; Fluck, 1992).

Der flächenbezogene Kraftstoffbedarf im Produktionssystem Körnermais mit den unterschiedlichen Düngungsvarianten wurde auf Basis von Richtwerten (Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung, 2025; KTBL-Feldarbeitsrechner, 2025) zu den einzelnen Feldarbeitsgängen (Tabelle 7) berechnet.

Die aufgewendeten Mengen an Betriebsmitteln (Kraftstoff, Strom, Mineraldünger, Herbizide und Saatgut) für das Produktionssystem „Körnermais“ wurden mit den Energieäquivalenten (Tabelle 8) multipliziert. Die verwendeten Energieäquivalente schwanken je nach Dünger und Herstellungsprozess (Noleppa und von Witzke, 2013).

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. Zweifaktorielle ANOVA-Tests wurden für die abhängigen Variablen (Kornertrag, N-Parameter und Energieeffizienzindikatoren) durchgeführt,

Tabelle 7. Mittlerer Kraftstoffbedarf für einzelne Arbeitsgänge im Produktionssystem Körnermais

Table 7. Mean fuel demand for each field operation in 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
Kreisellegge 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
Körnermaisernte (6-reihiger Pflückvorsatz, 275 kW)	35,1
Korntransport Feld-Hof (2 km, Dreiseitenkippanhänger, 18 t 83 kW)	4,0
Häckseln von Maisstroh (bodennah) mit Schlegelmulcher	16,8

Tabelle 8. Energieäquivalente von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln
Table 8. 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		
KAS1	39,4 MJ/kg N	(Alluvione et al., 2011)
UREA1	48,5 MJ/kg N	(Alluvione et al., 2011)
Mineralischer P-Dünger	11,1 MJ/kg P-P2O5	(Dal Ferro et al., 2017)
Mineralischer K-Dünger	6,6 MJ/kg K-K2O	(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.

um den Düngungseffekt (D) und den Jahreseffekt (J) zu erkennen. Mehrfachvergleiche zur Trennung der Mittelwerte wurden mit dem Student-Newman-Keuls-Verfahren ($p < 0,05$) durchgeführt. Da der N-Gehalt nicht für jede Ernteprobe, sondern nur in einer Mischprobe aus den vier Wiederholungen analysiert wurde, konnte dafür keine zweifaktorielle ANOVA durchgeführt werden. Für den N-Gehalt wurde somit für den Faktor Düngungsvariante und für den Faktor Versuchsjahr je eine ein-faktorielle ANOVA berechnet. Der Effekt der Düngungsvariante in einer ausgewiesenen Interaktion von Düngungsvariante $\times$ Jahr wurde mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse für jedes Versuchsjahr einzeln berechnet.

Um ein optimales Niveau der zugeführten mineralischen Düngermenge zu ermitteln, wurde auf Basis der Kontrollvariante (= keine Düngung) und aller mineralischen Düngungsvarianten (115, 145, 180, 210, 240 kg N/ha) für jeden jährlichen Beobachtungsdatensatz eine Kurvenanpassung durchgeführt. Dabei wurden die abhängigen Variablen (Kornertrag, N-Bilanz, NEO, ENE und EI) mit einer quadratischen Funktion ($y = a + b_1x + b_2x^2$) auf die Rate des mineralischen gedüngten N regressiert. Die Raten des mineralischen N (= berechnetes mineralisches N-Optimum) zur Erreichung maximaler Kornerträge und NEO bzw. minimaler ENE und EI wurden durch Gleichsetzen der ersten Ableitung der quadratischen Funktion mit 0 und anschließendes Lösen der Gleichung berechnet (Rossner et al., 2014). Die N-Rate mit einer ausgeglichenen N-Bilanz wurde durch Lösen der quadratischen Funktion bestimmt.

Tabelle 9. Mittlerer Energieinput in der Kontrolle und in den mineralischen Düngungsvarianten des Produktionssystems Körnermais (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 9. Mean energy input in the control and mineral fertilization treatments of the production system grain maize (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten (D)	Σ N	Direkter Energieinput (GJ/ha)				Indirekter Energieinput (GJ/ha)					Σ
	(kg/ha)	Feld ^b wirt- schaftung: Diesel	Trocknung: Heizöl und Strom	Gesamt	Saatgut	N- Dünger	PK- Dünger	Herbizid	Landma- schinen	Indirekt	Energie- input (GJ/ha)
Kontrolle	0	4,6	7,5 ^a	12,1 ^a	3,0	.	1,6	0,3	2,0	6,9 ^a	19,0 ^a
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 60 kg N/ha Ende Mai	115	4,8	9,7 ^b	14,5 ^b	3,0	3,7	1,6	0,3	2,0	10,6 ^b	25,1 ^b
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Ende Mai	145	4,8	10,9 ^{bc}	15,7 ^{bc}	3,0	4,7	1,6	0,3	2,0	11,5 ^c	27,2 ^c
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	4,7	12,6 ^{cd}	17,3 ^{cd}	3,0	5,8	1,6	0,3	2,0	12,7 ^d	30,0 ^d
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	180	4,8	12,1 ^{cd}	16,8 ^{cd}	3,0	5,8	1,6	0,3	2,0	12,7 ^d	29,5 ^d
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	180	4,7	12,5 ^{cd}	17,2 ^{cd}	3,0	5,8	1,6	0,3	2,0	12,7 ^d	29,8 ^{de}
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	4,8	11,6 ^{cd}	16,4 ^{cd}	3,0	5,8	2,8	0,3	2,0	13,8 ^f	30,2 ^d
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	4,7	12,6 ^{cd}	17,3 ^{cd}	3,0	7,5	1,6	0,3	2,0	14,4 ^g	31,7 ^{efg}
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	4,8	12,8 ^{cd}	17,5 ^{cd}	3,0	7,5	1,6	0,3	2,0	14,4 ^g	31,9 ^{efg}
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	4,7	12,8 ^{cd}	17,5 ^{cd}	3,0	7,5	1,6	0,3	2,0	14,4 ^g	31,9 ^{efg}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	210	4,8	13,0 ^{cd}	17,8 ^{cd}	3,0	6,8	1,6	0,3	2,0	13,6 ^e	31,4 ^{efg}
KAS: 120 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	240	4,8	13,3 ^d	18,0 ^d	3,0	7,7	1,6	0,3	2,0	14,6 ^h	32,6 ^g

KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N)

Die Güte der Anpassung der Gleichung wurde durch den Bestimmtheitskoeffizienten (R^2) angezeigt.

ben 180 kg N/ha-Varianten: +69 %, 210 kg N/ha: +74 %, 240 kg N/ha: +76 %.

3. Ergebnisse

3.1. Flächenbezogener Energieinput

Die Mittelwerte des Energieinputs über alle Düngungsvarianten und Jahre waren: direkter Energieinput: 16,5 GJ/ha; indirekter Energieinput: 12,7 GJ/ha und gesamter Energieinput: 29,2 GJ/ha (Tabelle 9). Der gesamte Energieinput teilte sich für die ungedüngte Kontrollvariante wie folgt auf: Diesel für die Feldbewirtschaftung: 24 %, Heizöl und Strom für die Trocknung: 39 %, Saatgut: 16 %, PK-Dünger: 8 %, chemischer Pflanzenschutz: 2 % und Landmaschinen: 11 %. Für die mineralisch gedüngten Varianten ergab sich ein durchschnittlicher Anteil am gesamten Energieinput wie folgt: Diesel für die Feldbewirtschaftung: 16 %, Heizöl und Strom für die Trocknung: 40 %, Saatgut: 10 %, N-Dünger: 21 %, PK-Dünger: 6 %, chemischer Pflanzenschutz: 1 % und Landmaschinen: 7 %. Der gesamte Energieinput der mineralischen N-Düngungsvarianten nahm gegenüber der ungedüngten Kontrolle prozentual wie folgt zu: 115 kg N/ha: +34 %, 145 kg N/ha: +46 %, Durchschnitt der sie-

3.2. Ertragsparameter von Mais

Die Mittelwerte über alle Düngungsvarianten und Jahre waren: Pflanzenhöhe: 290,9 cm, Kornfeuchte: 27,4 % und Kornertrag: 13901 kg/ha (bei 14 % Kornfeuchte). Die zweifache Varianzanalyse zeigte signifikante Haupteffekte für den Kornertrag und signifikante Interaktionen von D × J für die Pflanzenhöhe und die Kornfeuchte (Tabelle 10).

Die Pflanzenhöhe lag in den einzelnen Jahren zwischen 262,3 cm (2013) und 326,2 cm (2018). Gegenüber der ungedüngten Kontrolle veränderte sich die Pflanzenhöhe in den mineralischen N-Düngungsvarianten wie folgt: 115 kg N/ha: +18 %, 145 kg N/ha: +20 %, Durchschnitt der sieben 180 kg N/ha-Varianten: +22 %, 210 kg N/ha: +21 %, 240 kg N/ha: +21 % (Tabelle 10). Die Pflanzenlänge war in allen Jahren in der ungedüngten Kontrolle am niedrigsten. In den sechs Jahren 2011, 2016, 2018 und 2020–2022 unterschied sie sich nicht zwischen den mit N gedüngten Varianten. In den Jahren 2012, 2013 und 2015 unterschied sie sich nicht zwischen den mit zwischen 145 und 180 kg N/ha gedüngten Varianten (Tabelle 11).

Tabelle 10. Pflanzenhöhe, Kornfeuchte, Kornertrag, N-Entzug und N-Bilanz von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 10. Plant height, grain moisture content, grain yield, N uptake and N of grain maize as affected by fertilization treatments (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten (D)	Σ N (kg/ha)	Pflanzenhöhe (cm)	Kornfeuchte (%)	Kornertrag (kg/ha)	N-Gehalt (%)	N-Entzug (kg/ha)	N-Bilanz (kg/ha)
Kontrolle	0	243,0 ^a	30,1 ^d	6274 ^a	1,07 ^a	57,1 ^a	−57,1 ^a
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 60 kg N/ha Ende Mai	115	287,5 ^b	26,6 ^a	12373 ^b	1,11 ^b	117,5 ^b	−2,5 ^b
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Ende Mai	145	292,4 ^c	26,7 ^a	14130 ^c	1,18 ^c	144,4 ^c	0,6 ^b
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	296,9 ^{cd}	27,7 ^c	14757 ^{cd}	1,22 ^{cd}	154,6 ^{de}	25,4 ^{cd}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	180	298,3 ^{cd}	27,1 ^{ab}	14926 ^d	1,21 ^{cd}	154,7 ^{de}	25,2 ^{cd}
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	180	294,1 ^{cd}	27,8 ^c	14514 ^{cd}	1,20 ^{cd}	150,6 ^d	29,4 ^d
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	299,6 ^d	26,6 ^a	15007 ^d	1,22 ^{cd}	157,1 ^{def}	22,9 ^{cd}
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	298,6 ^{cd}	27,5 ^{bc}	15025 ^d	1,22 ^{cd}	157,7 ^{def}	22,2 ^{cd}
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	294,6 ^{cd}	27,9 ^c	14739 ^d	1,22 ^{cd}	154,2 ^{de}	25,8 ^{cd}
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	296,0 ^{cd}	28,0 ^c	14731 ^d	1,25 ^d	158,8 ^c	21,2 ^c
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	210	295,0 ^{cd}	27,9 ^c	15091 ^d	1,23 ^{cd}	159,7 ^{ef}	50,3 ^c
KAS: 120 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	240	295,1 ^{cd}	28,0 ^c	15239 ^d	1,24 ^d	163,3 ^f	76,6 ^f
Jahr (J)							
2011		318,1 ^c	28,6 ^c	15798 ^f	1,24 ^c	169,7 ^g	−5,6 ^a
2012		306,4 ^d	26,7 ^c	15572 ^f	1,20 ^b	161,5 ^f	2,6 ^b
2013		262,3 ^a	32,4 ^g	10855 ^a	1,13 ^a	105,6 ^a	58,5 ^g
2014		264,3 ^a	27,5 ^d	12878 ^b	1,16 ^a	129,8 ^b	34,4 ^f
2015		270,0 ^b	24,7 ^b	12787 ^b	1,16 ^a	128,0 ^b	36,1 ^f
2016		274,4 ^b	26,8 ^c	14217 ^d	1,14 ^a	140,2 ^c	23,9 ^c
2018		326,2 ^f	21,3 ^a	15796 ^f	1,15 ^a	155,7 ^c	8,5 ^c
2020		321,0 ^e	30,5 ^f	15115 ^c	1,23 ^c	161,9 ^f	2,2 ^b
2021		271,5 ^b	29,0 ^c	13556 ^c	1,25 ^c	146,5 ^d	17,7 ^d
2022		295,1 ^c	29,1 ^c	12430 ^b	1,32 ^d	142,5 ^{cd}	21,6 ^{de}
ANOVA							
D		***	***	***	***	***	***
J		***	***	***	***	***	***
D × J		***	***	ns		***	***

KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N). Der Kornertrag ist auf einen Feuchtigkeitsgehalt von 14 % standardisiert. Signifikanzniveaus: ns = nicht signifikant, $p < 0,001$ (***). Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsvarianten sowie der Versuchsjahren sind durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

Die Kornfeuchte bei der Ernte lag in den einzelnen Jahren zwischen 21,3 (2018) und 32,4 % (2013). Sie veränderte sich gegenüber der ungedüngten Kontrolle wie folgt: 115 kg N/ha: −12 %, 145 kg N/ha: −11 %, Durchschnitt der sieben 180 kg N/ha-Varianten: −9 %, 210 kg N/ha: −7 %, 240 kg N/ha: −7 % (Tabelle 10). Im Jahr 2011 unterschied sich die Kornfeuchte nicht zwischen den Düngungsvarianten, in den Jahren 2012–2014, 2016 und 2020 war sie in der

ungedüngten Kontrolle signifikant niedriger als in den mit N gedüngten Varianten, auch in den weiteren Jahren war sie zum Teil in der ungedüngten Kontrolle niedriger als in einigen gedüngten Varianten (Tabelle 12).

Der Kornertrag lag in den einzelnen Jahren zwischen 10855 kg/ha (2013) und 15796 kg/ha (2018). Dieser veränderte sich gegenüber der ungedüngten Kontrolle wie folgt: 115 kg N/ha: +97 %, 145 kg N/ha: +125 %, Durchschnitt

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

Table 11. Plant height (cm) of grain maize as affected by the fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	Σ N (kg/ha)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	0	265,0 ^a	285,4 ^a	200,0 ^a	217,6 ^a	221,3 ^a	211,0 ^a	232,0 ^a	291,3 ^a	240,9 ^a	265,5 ^a
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 60 kg N/ha Ende Mai	115	316,9 ^b	301,9 ^b	250,0 ^b	258,7 ^{bc}	258,9 ^b	278,3 ^b	327,0 ^b	320,0 ^b	271,9 ^b	291,6 ^b
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Ende Mai	145	320,2 ^b	306,3 ^{bc}	266,9 ^{bc}	255,1 ^b	272,5 ^{bc}	278,0 ^b	329,8 ^b	321,1 ^b	279,6 ^b	294,9 ^b
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	324,2 ^b	308,8 ^{bc}	271,9 ^c	279,3 ^d	271,8 ^{bc}	280,7 ^b	337,3 ^b	321,2 ^b	268,9 ^b	305,5 ^b
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	180	324,6 ^b	306,7 ^{bc}	272,3 ^c	269,8 ^{bcd}	281,8 ^c	281,6 ^b	338,0 ^b	329,0 ^b	276,0 ^b	303,3 ^b
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	180	324,4 ^b	305,2 ^{bc}	269,0 ^{bc}	263,0 ^{bcd}	276,8 ^{bc}	271,9 ^b	337,6 ^b	319,7 ^b	273,8 ^b	299,9 ^b
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	321,1 ^b	314,8 ^c	274,8 ^c	278,4 ^d	273,0 ^{bc}	284,9 ^b	341,8 ^b	329,3 ^b	279,8 ^b	298,5 ^b
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	325,4 ^b	312,5 ^{bc}	269,6 ^{bc}	276,1 ^{cd}	277,6 ^{bc}	285,2 ^b	342,4 ^b	329,6 ^b	275,0 ^b	293,0 ^b
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	326,3 ^b	310,6 ^{bc}	265,9 ^{bc}	264,0 ^{bcd}	273,4 ^{bc}	278,2 ^b	337,4 ^b	324,3 ^b	270,7 ^b	294,9 ^b
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	325,0 ^b	307,5 ^{bc}	273,2 ^c	271,5 ^{bcd}	281,1 ^c	281,6 ^b	325,2 ^b	322,7 ^b	272,5 ^b	299,4 ^b
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	210	321,1 ^b	304,6 ^{bc}	268,5 ^{bc}	263,6 ^{bcd}	281,3 ^c	280,8 ^b	334,3 ^b	323,6 ^b	277,4 ^b	295,3 ^b
KAS: 120 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	240	323,5 ^b	312,7 ^c	265,5 ^{bc}	274,4 ^{cd}	271,3 ^{bc}	280,9 ^b	331,9 ^b	320,2 ^b	272,0 ^b	298,9 ^b

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

der sieben 180 kg N/ha-Varianten: +136 %, 210 kg N/ha: +141 %, 240 kg N/ha: +143 %. Der Kornertrag war in der Kontrolle statistisch signifikant niedriger als mit 115 kg N/ha und mit 145 kg N/ha niedriger als mit 180 kg N/ha. Die Varianten mit 180 kg N/ha gedüngten Varianten „KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat“ und „KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai“ unterschieden sich nicht von der mit 145 kg N/ha gedüngten Variante alle anderen mit 180 kg N/ha gedüngten Varianten jedoch schon. Zwischen den Varianten mit 180, 210 und 240 kg N/ha gab es keine Unterschiede beim Kornertrag. Der Kornertrag unterschied sich bei einer Düngermenge von 180 kg N/ha nicht zwischen den Düngerarten, den Ausbringzeitpunkten und der Anzahl der Gaben (Tabelle 10).

3.3. Stickstoffparameter

Die Mittelwerte über alle Düngungsvarianten und Jahre waren: N-Gehalt: 1,20 %, N-Entzug: 144,1 kg/ha und N-Bilanz: +20,0 kg/ha. Die zweifache Varianzanalyse zeigte signifikante Interaktionen von D × J für den N-Entzug und die N-Bilanz (Tabelle 10).

Der N-Gehalt im Korn lag in den einzelnen Jahren zwischen 1,13 (2013) und 1,32 kg N/ha (2022). Er veränderte sich gegenüber der ungedüngten Kontrolle wie folgt: 115 kg N/ha: +4 %, 145 kg N/ha: +10 %, Durchschnitt der sieben 180 kg N/ha-Varianten: +14 %, 210 kg N/ha: +15 %, 240 kg N/ha:

+16 %. Der N-Gehalt im Korn unterschied sich bei einer Düngermenge von 180 kg N/ha nicht zwischen den Düngerarten, den Ausbringzeitpunkten und der Anzahl der Gaben (Tabelle 10).

Der N-Entzug lag in den einzelnen Jahren zwischen 105,6 (2015) und +169,7 kg N/ha (2011). Im Mittel aller Jahre veränderte sich der N-Entzug gegenüber der ungedüngten Kontrolle wie folgt: 115 kg N/ha: +106 %, 145 kg N/ha: +153 %, Durchschnitt der sieben 180 kg N/ha-Varianten: +172 %, 210 kg N/ha: +180 %, 240 kg N/ha: +186 % (Tabelle 10). Der N-Entzug war in allen zehn Jahren in der ungedüngten Kontrolle signifikant am niedrigsten, gefolgt von der Variante mit 115 kg N/ha, deren N-Entzug in allen Jahren bis auf 2013 und 2022 niedriger war als in allen höher gedüngten Varianten. In den Jahren 2011, 2012 und 2018 kam es zu keinen Unterschieden im N-Entzug zwischen 145 und 210 kg N/ha. Die Unterschiede beim N-Entzug waren ab einer Düngermenge von 180 kg N/ha gering. Bei einer Düngermenge von 240 kg N/ha kam es nur in den Jahren 2015 und 2020 im Vergleich zu „KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat“ und „UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat“ und im Jahr 2022 im Vergleich zu „KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai“ und „KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai“ zu einem höheren N-Entzug. Der N-Entzug im Korn unterschied sich bei einer Düngermenge von 180 kg N/ha in sieben der zehn Jahre nicht zwischen den Düngerarten, den Ausbringzeitpunkten und der Anzahl der Gaben, nur in den Jahren 2020–2022 gab es Unterschiede zwischen den Varianten (Tabelle 13).

Tabelle 12. Kornfeuchte (%) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 12. Grain moisture content (%) of grain maize as affected by fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	ΣN (kg/ha)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	0	28,3	29,2 ^c	38,9 ^c	30,6 ^c	24,8 ^{abc}	33,0 ^c	22,2 ^{bc}	32,1 ^c	32,0 ^b	29,5 ^{bc}
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 60 kg N/ha Ende Mai	115	28,1	25,5 ^a	32,4 ^b	27,7 ^{ab}	24,7 ^{abc}	25,4 ^{ab}	20,1 ^{ab}	28,2 ^a	28,3 ^{ab}	26,1 ^a
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Ende Mai	145	27,7	25,9 ^{ab}	31,6 ^{ab}	27,2 ^{ab}	24,7 ^{abc}	26,1 ^{ab}	19,3 ^a	29,7 ^b	27,5 ^a	27,2 ^{ab}
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	29,1	26,8 ^{ab}	31,6 ^{ab}	26,9 ^{ab}	24,3 ^{ab}	26,4 ^{ab}	21,4 ^{ab}	30,9 ^{bc}	29,6 ^{ab}	29,9 ^{bc}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	180	28,6	26,8 ^{ab}	30,6 ^{ab}	26,9 ^{ab}	24,7 ^{abc}	26,2 ^{ab}	20,5 ^{ab}	30,3 ^{bc}	28,1 ^a	28,2 ^{abc}
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	180	28,8	27,7 ^b	32,9 ^b	27,5 ^{ab}	24,7 ^{abc}	26,7 ^{ab}	20,5 ^{ab}	31,2 ^{bc}	28,7 ^{ab}	29,7 ^{bc}
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	27,6	26,1 ^{ab}	29,3 ^a	27,4 ^{ab}	24,1 ^{ab}	24,7 ^a	20,8 ^{ab}	30,2 ^{bc}	27,9 ^a	28,3 ^{abc}
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	28,9	26,6 ^{ab}	32,1 ^b	28,1 ^b	25,1 ^{bc}	25,8 ^{ab}	20,7 ^{ab}	30,4 ^{bc}	28,7 ^{ab}	29,2 ^{bc}
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	29,0	26,5 ^{ab}	32,0 ^b	26,2 ^a	25,2 ^{bc}	26,5 ^{ab}	24,2 ^d	30,7 ^{bc}	29,0 ^{ab}	29,8 ^{bc}
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	28,5	27,5 ^{ab}	31,3 ^{ab}	27,5 ^{ab}	23,8 ^a	26,7 ^{ab}	23,5 ^{cd}	30,8 ^{bc}	29,5 ^{ab}	30,7 ^c
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	210	29,5	25,8 ^{ab}	32,9 ^b	27,7 ^{ab}	24,8 ^{abc}	27,4 ^b	21,1 ^{ab}	30,7 ^{bc}	29,5 ^{ab}	29,7 ^{bc}
KAS: 120 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	240	29,4	26,2 ^{ab}	32,9 ^b	26,8 ^{ab}	25,7 ^c	27,1 ^{ab}	21,0 ^{ab}	30,6 ^{bc}	29,6 ^{ab}	30,8 ^c

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

Die N-Bilanz lag in den einzelnen Jahren zwischen –5,6 (2011) und +58,5 kg N/ha (2013). Im Mittel aller Jahre veränderte sich die N-Bilanz gegenüber der ungedüngten Kontrolle wie folgt: 115 kg N/ha: +96 %, 145 kg N/ha: +101 %, Durchschnitt der sieben 180 kg N/ha-Varianten: +143 %, 210 kg N/ha: +188 %, 240 kg N/ha: +234 % (Tabelle 10). Bei der Kontrolle kam es in allen Jahren und bei den Düngermengen von 110 und mit 145 kg N/ha in allen außer der vier Jahre 2013–2016 zu einer negativen N-Bilanz. Zudem war die N-Bilanz im Jahr 2011 in allen Düngungsvarianten mit 180 kg N/ha negativ. Die höchste N-Bilanz wurde in allen Jahren mit 240 kg N/ha und im Jahr 2022 auch mit 210 kg N/ha gefunden. Die N-Bilanz unterschied sich bei einer Düngermenge von 180 kg N/ha in sieben der zehn Jahre nicht zwischen den Düngerarten, den Ausbringzeitpunkten und der Anzahl der Gaben, nur in den Jahren 2020–2022 gab es Unterschiede zwischen den Varianten (Tabelle 14).

3.4. Indikatoren zur Energieeffizienz

Die Mittelwerte der Energieeffizienzparameter über alle Düngungsvarianten und Jahre waren: Energieoutput: 241,4 GJ/ha, Nettoenergieoutput: 210,7 GJ/ha, Energienutzungseffizienz: 7,94 GJ/GJ und Energieintensität: 2,10 MJ/kg (Tabelle 15).

Der Energieoutput lag in den einzelnen Jahren zwischen 176,9 GJ/ha (2013) und 257,5 GJ/ha (2011). Gegenüber der ungedüngten Kontrolle veränderte sich der Energieoutput in den mineralischen N-Düngungsvarianten wie folgt: 115 kg N/ha: +97 %, 145 kg N/ha: +125 %, Durchschnitt der sieben 180 kg N/ha-Varianten: +136 %, 210 kg N/ha: +141 %, 240 kg N/ha: +143 % (Tabelle 15).

Der Nettoenergieoutput lag in den einzelnen Jahren zwischen 146,7 GJ/ha (2013) und 233,5 GJ/ha (2018). Gegenüber der ungedüngten Kontrolle veränderte sich der Nettoenergieoutput in den mineralischen N-Düngungsvarianten wie folgt: 115 kg N/ha: +110 %, 145 kg N/ha: +141 %, Durchschnitt der sieben 180 kg N/ha-Varianten: +150 %, 210 kg N/ha: +155 %, 240 kg N/ha: +156 % (Tabelle 15). Die Energienutzungseffizienz lag in den einzelnen Jahren zwischen 5,76 GJ/GJ (2013) und 10,70 GJ/GJ (2018). Gegenüber der ungedüngten Kontrolle veränderte sich die Energienutzungseffizienz in den mineralischen N-Düngungsvarianten wie folgt: 115 kg N/ha: +44 %, 145 kg N/ha: +52 %, Durchschnitt der sieben 180 kg N/ha-Varianten: +41 %, 210 kg N/ha: +40 %, 240 kg N/ha: +37 % (Tabelle 15). Die Energienutzungseffizienz war in allen Jahren in der ungedüngten Kontrolle am niedrigsten. Sie unterschied sich in den vier Jahren 2013–2016 nicht zwischen den mit N gedüngten Varianten. In den weiteren sechs Jahren hatte die mit 145 kg N/ha

Tabelle 13. N-Entzug (kg N/ha) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 13. N uptake (kg N/ha) of grain maize as affected by fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	Σ N (kg/ha)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	0	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: 55 kg N/ha zur Aussaat + 60 kg N/ha Ende Mai	115	135,5 ^b	136,6 ^b	81,2 ^b	111,1 ^b	101,6 ^b	114,5 ^b	118,0 ^b	149,3 ^b	108,8 ^b	118,3 ^b
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Ende Mai	145	173,4 ^c	161,5 ^c	94,3 ^{bc}	136,5 ^{cd}	121,7 ^c	143,9 ^{cd}	156,8 ^c	185,7 ^c	147,2 ^c	123,0 ^{bc}
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	186,1 ^c	170,7 ^c	121,3 ^{cd}	142,8 ^d	127,2 ^{cd}	141,0 ^{cd}	167,8 ^c	157,5 ^{bc}	155,0 ^{cde}	176,5 ^f
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	180	183,7 ^c	168,6 ^c	126,7 ^d	137,5 ^{cd}	144,5 ^{de}	151,3 ^{cd}	165,5 ^c	169,6 ^{cde}	157,7 ^{cdef}	142,5 ^{cd}
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	180	182,5 ^c	177,0 ^c	112,1 ^{cd}	130,3 ^{bcd}	144,5 ^{de}	153,5 ^d	161,8 ^c	161,0 ^{bcd}	146,5 ^c	137,0 ^{bcd}
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	180,6 ^c	181,1 ^c	108,2 ^{cd}	146,6 ^d	145,4 ^{de}	164,8 ^d	150,7 ^c	175,7 ^{cde}	155,6 ^{cde}	152,8 ^{de}
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	180,5 ^c	166,8 ^c	112,8 ^{cd}	145,3 ^d	140,8 ^{cde}	147,0 ^{cd}	165,8 ^c	178,8 ^{de}	160,8 ^{cdef}	179,0 ^f
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	180,9 ^c	171,9 ^c	116,9 ^{cd}	137,7 ^{cd}	135,9 ^{cde}	148,6 ^{cd}	169,8 ^c	179,1 ^{de}	152,1 ^{cd}	149,0 ^{de}
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	185,8 ^c	170,4 ^c	121,3 ^{cd}	146,1 ^d	127,1 ^{cd}	154,4 ^d	184,6 ^c	168,2 ^{cd}	176,2 ^f	156,8 ^{def}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	210	180,5 ^c	176,9 ^c	123,3 ^{cd}	128,5 ^{bcd}	151,8 ^c	156,3 ^d	180,2 ^c	169,7 ^{cde}	173,5 ^{ef}	156,9 ^{def}
KAS: 120 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	240	179,0 ^c	178,5 ^c	116,4 ^{cd}	142,0 ^d	153,2 ^c	155,2 ^d	183,3 ^c	182,4 ^c	170,9 ^{def}	172,0 ^{ef}

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

gedüngte Variante die höchste ENE, wobei sich die Unterschiede zu den weiteren mit N gedüngten Varianten in vielen Fällen nicht signifikant unterschieden. Im Vergleich zur am höchsten mit 240 kg N/ha gedüngten Variante war die ENE mit 145 kg N/ha aber in den 2020 und 2022 höher. Die Energienutzungseffizienz unterschied sich bei einer Düngermenge von 180 kg N/ha in neun der zehn Jahre nicht zwischen den Düngerarten, den Ausbringzeitpunkten und der Anzahl der Gaben, nur im Jahr 2022 war sie mit „KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai“ höher als mit „UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai“ und „UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat“ (Tabelle 16).

Die Energieintensität lag in den einzelnen Jahren zwischen 1,57 MJ/kg (2018) und 2,92 MJ/kg (2013). Gegenüber der ungedüngten Kontrolle veränderte sich die Energieintensität in den mineralischen N-Düngungsvarianten wie folgt: 115 kg N/ha: –32 %, 145 kg N/ha: –36 %, Durchschnitt der sieben 180 kg N/ha-Varianten: –41 %, 210 kg N/ha: –31 %, 240 kg N/ha: –30 % (Tabelle 15). Die Energieintensität war in allen Jahren in der ungedüngten Kontrolle am höchsten. Sie unterschied sich in den drei Jahren 2015, 2016 und 2018 nicht zwischen den mit N gedüngten Varianten. In den Jahren 2011, 2012 und 2021 war sie in der mit 145 kg N/ha gedüngte Variante am niedrigsten, wobei sich die Unterschiede zu den weiteren mit N gedüngten Varianten in vielen Fällen nicht signifikant unterschieden. Die Energieintensität unterschied sich bei einer Düngermenge

von 180 kg N/ha nicht zwischen den Düngerarten, den Ausbringzeitpunkten und der Anzahl der Gaben (Tabelle 17).

3.5. Mineralisches N-Düngungsoptimum

Auf Basis der ungedüngten Kontrolle und der mineralischen N-Düngungsvarianten (0, 115, 145, 180, 210, 240 kg N/ha) wurden über die zehn Jahre quadratische Funktionen für den Kornertrag (Abbildung 1), die N-Bilanz (Abbildung 2), den Nettoenergieoutput (Abbildung 3), die Energienutzungseffizienz (Abbildung 4) und die Energieintensität (Abbildung 5) bestimmt.

Das berechnete Optimum für den Kornertrag mit 15340 kg/ha wurde mit 243 kg N/ha erreicht. Der berechnete Wert für die ungedüngte Kontrollvariante von 6213 kg/ha deckt sich mit dem gemessenen Kornertrag von 6274 kg/ha (Abbildung 1, Tabelle 10).

Das berechnete Optimum für eine N-Bilanz = 0 wurde einer Düngung von 139 kg N/ha erreicht. Der berechnete Wert für die ungedüngte Kontrollvariante von –55,5 kg N/ha deckt sich mit der gemessenen N-Bilanz von –57,1 kg N/ha (Abbildung 2, Tabelle 10).

Das berechnete Optimum für den Nettoenergieoutput mit GJ/ha von 214,3 GJ/ha wurde mit 229 kg N/ha erreicht. Der berechnete Wert für die ungedüngte Kontrollvariante von 83,5 GJ/ha deckt sich mit dem gemessenen Wert von 84,2 GJ/ha (Abbildung 4, Tabelle 15).

Tabelle 14. N-Bilanz (kg N/ha) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 14. N balance (kg N/ha) of grain maize as affected by fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	Σ N (kg/ha)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	0	−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: 55 kg N/ha zur Aussaat + 60 kg N/ha Ende Mai	115	−20,5 ^{bc}	−21,5 ^b	33,8 ^b	3,8 ^b	13,3 ^{bc}	0,5 ^b	−3,0 ^{bc}	−34,3 ^b	6,0 ^{bc}	−3,3 ^b
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Ende Mai	145	−28,8 ^b	−16,5 ^b	50,5 ^{bc}	8,5 ^b	23,5 ^{cd}	1,0 ^b	−12,0 ^b	−40,5 ^b	−2,0 ^b	22,0 ^{cd}
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	−6,3 ^c	9,3 ^c	58,8 ^{bcd}	37,3 ^d	52,8 ^{ef}	39,0 ^{cd}	12,5 ^{bc}	22,5 ^d	25,0 ^d	3,5 ^{bc}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	180	−3,8 ^c	11,5 ^c	53,3 ^{bc}	42,3 ^d	35,5 ^{de}	28,5 ^{bcd}	14,5 ^{bc}	10,3 ^{cd}	22,3 ^d	37,5 ^{de}
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	180	−2,3 ^c	2,8 ^c	68,0 ^{cd}	49,8 ^d	35,3 ^{de}	26,5 ^{bcd}	18,5 ^{bc}	19,3 ^{cd}	33,5 ^d	43,0 ^{de}
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	−10,8 ^c	−1,0 ^c	72,0 ^{cd}	33,3 ^{cd}	35,0 ^{de}	15,3 ^{bc}	29,3 ^{cd}	4,3 ^{cd}	24,3 ^d	27,3 ^d
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	−0,5 ^c	13,0 ^c	67,3 ^{cd}	34,5 ^{cd}	39,3 ^{def}	33,0 ^{bcd}	14,0 ^{bc}	1,0 ^c	19,5 ^{cd}	1,0 ^b
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	−1,0 ^c	8,3 ^c	63,0 ^{cd}	42,3 ^d	44,0 ^{def}	31,5 ^{bcd}	10,5 ^{bc}	1,0 ^c	28,0 ^d	31,0 ^d
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	−5,8 ^c	9,3 ^c	61,3 ^{cd}	34,3 ^{cd}	52,8 ^{ef}	25,5 ^{bcd}	−4,8 ^{bc}	11,8 ^{cd}	4,0 ^{bc}	23,3 ^{cd}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	210	29,3 ^d	33,0 ^d	86,8 ^d	81,5 ^e	58,3 ^f	54,0 ^d	29,8 ^{cd}	40,5 ^e	36,5 ^d	53,3 ^{ef}
KAS: 120 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	240	61,0 ^e	61,5 ^e	123,4 ^e	98,0 ^f	86,5 ^g	84,5 ^e	56,8 ^d	57,5 ^f	69,0 ^e	68,0 ^f

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

Das berechnete Optimum für die Energienutzungseffizienz von 8,2 GJ/GJ wurde mit 167 kg N/ha erreicht. Der berechnete Wert für die ungedüngte Kontrollvariante von 5,71 GJ/GJ deckt sich mit dem gemessenen Wert von 5,64 GJ/GJ (Abbildung 4, Tabelle 15).

Das berechnete Optimum für die Energieintensität von 1,90 MJ/kg wurde mit bei 197 kg N/ha erreicht. Der berechnete Wert für die ungedüngte Kontrollvariante von 3,06 MJ/kg Körner für die ungedüngte Kontrollvariante

deckt sich mit dem gemessenen Wert von 3,08 MJ/kg Körner (Abbildung 5, Tabelle 15).

4. Diskussion

Die mineralische N-Düngung von Körnermais führte auf einem Hohertragsstandort in der Südsteiermark zu stark steigenden Kornerträgen sowie auch zu einer Zunahme des N-Gehalts des Kornes, was gemeinsam zu hohen N-Entzügen führte. So nahmen im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle Kornertrag, der N-Gehalt des Kornes und N-Entzug bei 115 kg N/ha um +97 %, +4 % und +106 % und bei 240 kg N/ha um +143 %, +16 % und +186 % zu. Die berechneten N-Düngungsoptima liegen für den Kornertrag bei 243 kg N/ha und bei der N-Bilanz bei 139 kg N/ha.

Eine starke Zunahme des Kornertrages wurde bereits mit 115 kg N/ha beobachtet. Der Kornertrag stieg gering weiter mit 145 kg N/ha und auch in fünf der sieben mit 180 kg N/ha gedüngten Varianten an, wobei sich die Zunahme mit beiden Düngermengen abschwächte. Hohe Düngungsgaben mit 210 und 240 kg N/ha brachten keine höheren Kornerträge als mit 180 kg N/ha mehr. Auch Langzeitdüngungsversuche in Wagendorf und Wagna (Bezirk Leibnitz in der Steiermark) haben gezeigt, dass ab einer Düngermenge von 115 kg N/ha keine statistisch gesicherten Mehrerträge bei Körnermais feststellbar waren (Moitzi et al., 2015).

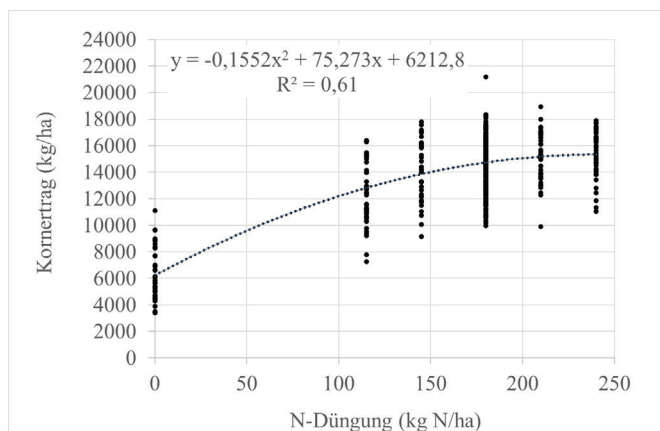


Abbildung 1. Kornertrag von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten (10 Jahre)

Figure 1. Grain yield of grain maize as affected by mineral N-fertilization treatments (10 years)

Tabelle 15. Indikatoren der Energieeffizienz von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)
Table 15. Indicators of energy efficiency of grain maize as affected by fertilization treatments (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten (D)	Σ N (kg/ha)	EO (GJ/ha)	NEO (GJ/ha)	ENE (GJ/GJ)	EI (MJ/kg)
Kontrolle	0	102,2 ^a	84,2 ^a	5,64 ^a	3,08 ^f
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 60 kg N/ha Ende Mai	115	201,6 ^b	176,6 ^b	8,11 ^{de}	2,09 ^{bcd}
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Ende Mai	145	230,3 ^c	203,1 ^c	8,56 ^f	1,97 ^a
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	240,5 ^{cd}	210,5 ^{cd}	8,10 ^{de}	2,06 ^{abcd}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	180	243,3 ^d	213,7 ^{cd}	8,32 ^{cf}	2,00 ^{ab}
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	180	236,5 ^{cd}	206,7 ^{cd}	8,05 ^{de}	2,09 ^{bcd}
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	244,6 ^d	214,4 ^{cd}	8,16 ^{de}	2,04 ^{abc}
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	244,9 ^d	213,2 ^{cd}	7,81 ^{bcd}	2,14 ^{cde}
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	240,2 ^{cd}	208,3 ^{cd}	7,56 ^b	2,20 ^e
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	240,1 ^d	208,2 ^{cd}	7,58 ^b	2,20 ^e
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	210	245,9 ^d	214,5 ^{cd}	7,92 ^{cd}	2,12 ^{bcd}
KAS: 120 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	240	248,4 ^d	215,7 ^d	7,72 ^{bc}	2,17 ^{de}
Jahr (J)					
2011		257,5 ^f	225,2 ^e	7,96 ^d	2,06 ^e
2012		253,8 ^f	224,3 ^e	8,59 ^d	1,91 ^b
2013		176,9 ^a	146,7 ^a	5,76 ^a	2,92 ^g
2014		209,9 ^b	181,9 ^c	7,44 ^c	2,22 ^d
2015		208,4 ^b	182,8 ^c	8,02 ^d	2,08 ^c
2016		231,7 ^d	203,3 ^c	8,07 ^d	2,08 ^c
2018		257,4 ^f	233,5 ^f	10,70 ^e	1,57 ^a
2020		246,3 ^c	212,9 ^f	7,35 ^c	2,24 ^d
2021		220,9 ^c	190,5 ^d	7,20 ^c	2,31 ^c
2022		202,6 ^b	173,2 ^b	6,86 ^b	2,41 ^f
ANOVA					
D		***	***	***	***
J		***	***	***	***
D × J		ns	ns	***	***

KAS = Kalkammonsalpeter (27 % N), LS = Linzer STAR (15 % N), ENTEC = N-Dünger mit Nitrifikationsinhibitor (26 % N), UREA = Harnstoff (46 % N), NEO = Nettoenergieoutput, ENE = Energienutzungseffizienz, EI = Energieinput. Signifikanzniveaus: ns = nicht signifikant, p < 0,001 (***). Signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Düngungsvarianten sowie der Versuchsjahre sind durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

Die N-Düngung führte in einigen Jahren zu niedrigeren Kornfeuchten, womit auch der Bedarf an Trocknungsenergie sinken kann.

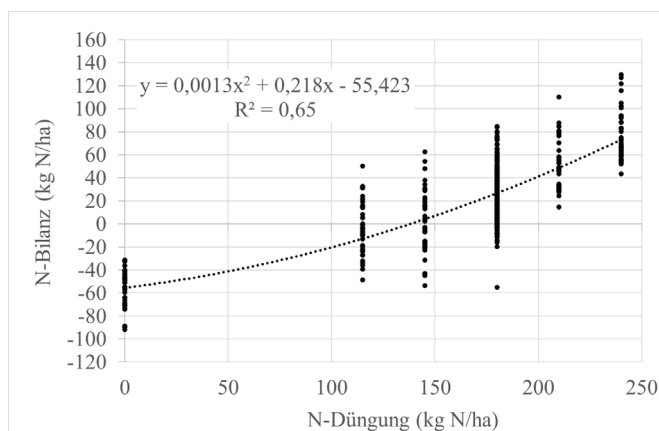


Abbildung 2. N-Bilanz (= N-Düngung – N-Entzug) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten (10 Jahre)
Figure 2. N balance (= N-fertilization – N-uptake) of grain maize as affected by mineral N-fertilization treatments (10 years)

Bei der Düngermenge von 180 kg N/ha wurden Kornertrag noch N-Gehalt des Kornes weder von der Düngerart, den Ausbringzeitpunkten und der Anzahl der Gaben der Gabenteilung beeinflusst, genau so wenig wie der N-Entzug bei dieser Düngermenge in acht von zehn Jahren. Ebenso kam es bei einem Feldversuch mit Gerste und Hafer im Marchfeld (im Osten Österreichs) zwischen KAS und dem langsam wirkendem Depotdünger Basacote® Plus 6M zu keinen Unterschieden beim Kornertrag, dem N-Gehalt des Kornes und dem N-Entzug (Neugschwandtner et al., 2015). Ebenso wurden bei einem mit 160 kg N/ha gedüngtem Winterweizen in einem Versuch im Marchfeld keine Unterschiede beim Kornertrag zwischen den Düngemitteln KAS, UREA und stabilisiertem UREA, jedoch tendenziell höhere N-Gehalte im Korn bei drei statt zwei Düngergaben gefunden, was zu einem höheren N-Entzug bei der Düngung mit KAS und stabilisiertem UREA in einem der beiden Versuchsjahre führte (Moitzi et al., 2020).

Dem N-Management im Pflanzenbau wird eine zentrale Rolle in der Pflanzenproduktion, Umweltschutz und

Tabelle 16. Energienutzungseffizienz (GJ/GJ) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 16. Energy use efficiency (GJ/GJ) of grain maize as affected by fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	Σ N (kg/ha)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	0	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: 55 kg N/ha zur Aussaat + 60 kg N/ha Ende Mai	115	8,45 ^{de}	9,19 ^c	5,56 ^b	7,57 ^b	7,96 ^b	8,64 ^b	11,0 ^{bc}	8,54 ^d	6,53 ^b	7,72 ^c
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Ende Mai	145	8,75 ^c	9,27 ^c	6,02 ^b	7,95 ^b	8,40 ^b	8,66 ^b	12,9 ^c	8,01 ^c	8,09 ^c	7,60 ^c
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	8,07 ^{bcd}	8,63 ^{bc}	6,33 ^b	8,22 ^b	8,49 ^b	8,28 ^b	10,94 ^{bc}	7,31 ^{bc}	7,60 ^{bc}	7,14 ^{bc}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	180	8,27 ^{bcd}	8,67 ^{bc}	6,52 ^b	8,05 ^b	8,69 ^b	8,53 ^b	11,53 ^{bc}	7,59 ^{bc}	7,84 ^{bc}	7,52 ^c
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	180	8,04 ^{bcd}	8,58 ^{bc}	6,05 ^b	7,60 ^b	8,66 ^b	8,44 ^b	11,70 ^{bc}	7,16 ^b	7,44 ^{bc}	6,79 ^{bc}
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	8,33 ^{cde}	8,84 ^{bc}	6,34 ^b	7,70 ^b	8,50 ^b	8,92 ^b	10,85 ^{bc}	7,52 ^{bc}	7,59 ^{bc}	7,06 ^{bc}
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	7,78 ^{bcd}	8,35 ^{bc}	5,80 ^b	7,21 ^b	8,02 ^b	8,41 ^b	10,90 ^{bc}	7,25 ^{bc}	7,41 ^{bc}	7,03 ^{bc}
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	7,61 ^{abc}	8,42 ^{bc}	5,68 ^b	7,48 ^b	7,85 ^b	8,01 ^b	9,52 ^b	7,23 ^{bc}	7,27 ^{bc}	6,55 ^b
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	7,98 ^{bcd}	8,19 ^{bc}	5,94 ^b	7,39 ^b	8,15 ^b	7,91 ^b	9,81 ^b	6,96 ^b	7,11 ^{bc}	6,41 ^b
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	210	7,70 ^{abcd}	8,94 ^{bc}	5,90 ^b	7,16 ^b	8,50 ^b	8,17 ^b	11,2 ^{bc}	7,33 ^{bc}	7,31 ^{bc}	7,00 ^{bc}
KAS: 120 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	240	7,51 ^{ab}	8,64 ^{bc}	5,59 ^b	7,60 ^b	7,93 ^b	7,94 ^b	10,9 ^{bc}	7,14 ^b	7,30 ^{bc}	6,59 ^b

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

Klimawandel zugeschrieben. Durch die Verbesserung der N-Effizienz im Pflanzenbau können potenzielle N-Verluste in die Atmosphäre durch N₂O-Emissionen oder in das Grundwasser mittels NO₃--N reduziert werden und damit ein Beitrag zum Einhalten der planetaren Grenze für den Stickstoffzyklus geleistet werden (Rockström et al., 2009). Für Körnermais wird in einer Metastudie eine globale N-Effizienz (= geernteter N-Ertrag/N-Input × 100; N-Input:

Dünger + biologische N-Fixierung + N-Deposition über die Atmosphäre) von 46 % ausgewiesen, die auf 70 % bis 2050 erhöht werden soll (Zhang et al., 2015).

In unserem Versuch waren trotz hoher N-Entzüge die N-Bilanzen – neben der ungedüngten Kontrolle in allen Jahren – nur bei Düngermengen von 110 und mit 145 kg N/ha in vier der zehn Jahre negativ, sonst jedoch positiv. Das bedeutet, dass rechnerisch nur ein Teil des ausgebrachten N wieder mit dem Erntegut zurückgewonnen werden konnte und somit N aus der Düngung im System verbleibt. Bei einem mit 160 kg N/ha in Form von KAS, UREA und stabilisiertem UREA gedüngtem Winterweizen im Marchfeld konnten über alle Düngungsvarianten und beide Versuchsjahre im Schnitt 61,8 % des ausgebrachten N-Düngers wiedergewonnen werden (Moitzi et al., 2020). Die Düngernutzungseffizienz sinkt zudem mit steigender Düngermenge und schwankt außerdem zwischen Jahren und Kulturarten (Neugschwandtner et al., 2015; Neugschwandtner und Kaul, 2015). Die N-Bilanz erweist sich hier als ein guter Deskriptor für die Nitratverlagerung (Biernat et al., 2020).

In der ungedüngten Kontrollvariante mit einer N-Bilanz von –57,1 kg N/ha ist die N-Versorgung des Körnermaises mit durchschnittlich 57,1 kg N/ha durch die N-Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz und N-Deposition sichergestellt. Aus der Differenzrechnung der negativen N-Bilanz und der N-Deposition von 15 kg N/ha (Um-

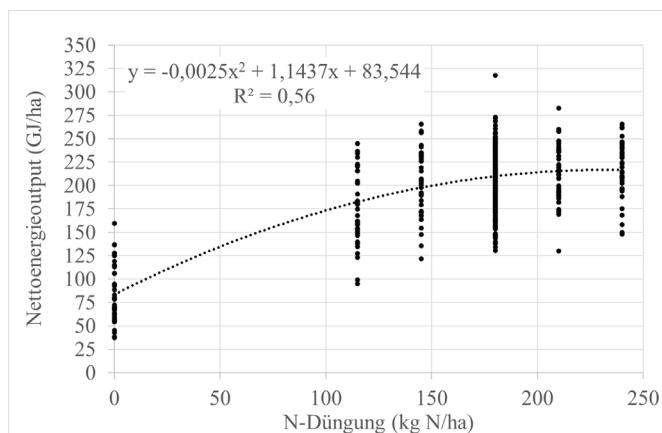


Abbildung 3. Nettoenergieoutput (= Energieoutput – Energieinput) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten (10 Jahre)

Figure 3. Net energy output (= energy output – energy input) of grain maize as affected by mineral N-fertilization treatments (10 years)

Tabelle 17. Energieintensität (MJ/kg) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren (10 Jahre: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Table 17. Energy intensity (MJ/kg) of grain maize as affected by fertilization treatments in each experimental year (10 years: 2011–2016, 2018, 2020–2022)

Düngungsvarianten	Σ N (kg/ha)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2018	2020	2021	2022
Kontrolle	0	2,32 ^d	2,21 ^c	4,87 ^b	3,07 ^b	3,24 ^b	3,38 ^b	2,37 ^b	2,67 ^d	3,33 ^c	3,34 ^d
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 60 kg N/ha Ende Mai	115	1,94 ^{ab}	1,78 ^{ab}	2,94 ^b	2,16 ^a	2,06 ^a	1,90 ^a	1,50 ^a	1,92 ^a	2,60 ^b	2,12 ^a
KAS: 55 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Ende Mai	145	1,87 ^a	1,76 ^a	2,72 ^b	2,05 ^a	1,95 ^a	1,90 ^a	1,27 ^a	2,04 ^{ab}	2,02 ^a	2,15 ^{ab}
KAS: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	2,02 ^{abc}	1,89 ^{ab}	2,62 ^a	2,00 ^a	1,93 ^a	1,99 ^a	1,50 ^a	2,23 ^{bc}	2,15 ^{ab}	2,29 ^{abc}
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 90 kg N/ha Anfang Mai	180	1,97 ^{abc}	1,88 ^{ab}	2,50 ^a	2,03 ^a	1,88 ^a	1,92 ^a	1,42 ^a	2,15 ^{bc}	2,09 ^{ab}	2,18 ^{abc}
KAS: 180 kg N/ha Anfang Mai	180	2,03 ^{abc}	1,90 ^{ab}	2,71 ^a	2,15 ^a	1,88 ^a	1,94 ^a	1,39 ^a	2,28 ^{bc}	2,20 ^{ab}	2,41 ^{abc}
LS: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	1,96 ^{abc}	1,85 ^{ab}	2,58 ^a	2,13 ^b	1,93 ^a	1,83 ^a	1,51 ^a	2,17 ^{bc}	2,16 ^{ab}	2,31 ^{abc}
ENTEC: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	2,10 ^{bc}	1,96 ^{ab}	2,84 ^a	2,27 ^a	2,04 ^a	1,94 ^a	1,50 ^a	2,25 ^{bc}	2,21 ^{ab}	2,33 ^{abc}
UREA: 90 kg N/ha zur Aussaat + KAS: 90 kg N/ha Ende Mai	180	2,14 ^{bc}	1,94 ^{ab}	2,88 ^a	2,19 ^a	2,08 ^a	2,04 ^a	1,72 ^a	2,26 ^{bc}	2,25 ^{ab}	2,50 ^{bc}
UREA: 180 kg N/ha zur Aussaat	180	2,04 ^{abc}	2,00 ^b	2,75 ^a	2,22 ^a	2,00 ^a	2,06 ^a	1,76 ^a	2,35 ^c	2,29 ^{ab}	2,55 ^c
KAS: 90 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	210	2,12 ^{bc}	1,82 ^{ab}	2,78 ^b	2,28 ^a	1,92 ^a	2,01 ^a	1,46 ^a	2,22 ^{bc}	2,23 ^{ab}	2,33 ^{abc}
KAS: 120 kg N/ha zur Aussaat + 120 kg N/ha Ende Mai	240	2,17 ^c	1,89 ^{ab}	2,92 ^b	2,15 ^a	2,06 ^a	2,06 ^a	1,49 ^a	2,29 ^{bc}	2,24 ^{ab}	2,48 ^{abc}

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

weltbundesamt, 2021) stehen bei der Nulldüngung jährlich 42,1 kg N/ha aus der organischen Bodensubstanz für den Mais zur Verfügung. Jeder weitere N-Bedarf darüber muss gedüngt werden.

Langfristig ist dieses Low-Input-System ohne N-Düngung ökologisch nicht nachhaltig, da der organisch gebundene N im Boden abgereichert wird und zudem die Kornerträge

gering sind. Untersuchungen aus Norddeutschland zeigen, das Low-Input-Systeme auf Hohertragsstandorten eine geringere Ökoeffizienz aufweisen, da die produktbezogenen Nitratverlagerungen zunehmen (Biernat et al., 2020).

Ein aus einer ausgeglichenen N-Bilanz (N-Düngung – N-Entzug = 0) abgeleiteter ökologisch orientierter Richtwert für eine angepasste Düngung am Standort Kalsdorf liegt bei 139 kg N/ha. Laut Richtlinien für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland (BMLRT, 2022) werden für die Düngung von Körnermais bei mittlerer Ertragslage (8500–10500 kg/ha) zwischen 120 und 140 kg N/ha empfohlen. Eine Standortkorrektur aufgrund der hohen Ertragserwartung (Ertragslage „hoch 3“: 13500 kg/ha) erhöht die Düngerempfehlung um +40 % auf 168 kg und 196 kg N/ha. Diese Düngerempfehlung ist damit aus ökologischer Sicht als zu hoch anzusehen.

Die Düngung erhöhte den Energieoutput, den Nettoenergieoutput und die Energienutzungseffizienz und reduzierte die Energieintensität. So nahmen im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle der EO, der NEO und die ENE bei 115 kg N/ha um +97 %, +110 % und +44 % und bei 240 kg N/ha um +143 %, +156 % und +37 % zu, während sich die EI um 32 % und –30 % reduzierte. Die höchste Zunahme der ENE wurde bei einer Düngermenge von 145 kg N/ha gemessen, die höchste Abnahme der EI bei 180 kg N/ha.

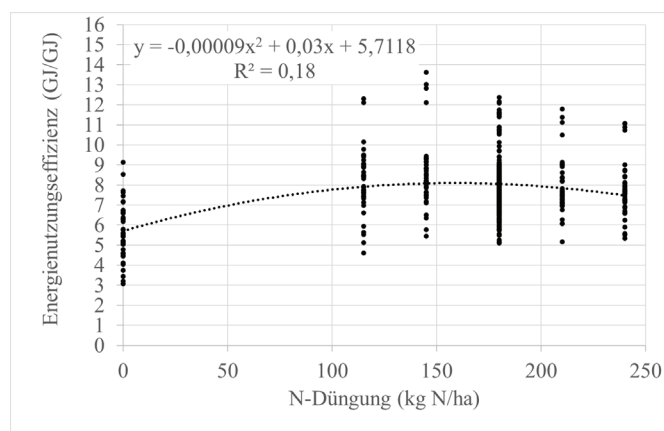


Abbildung 4. Energienutzungseffizienz (= Energieoutput/Energieinput) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten (10 Jahre)

Figure 4. Energy use efficiency (= energy output/energy input) of grain maize as affected by mineral N-fertilization treatments (10 years)

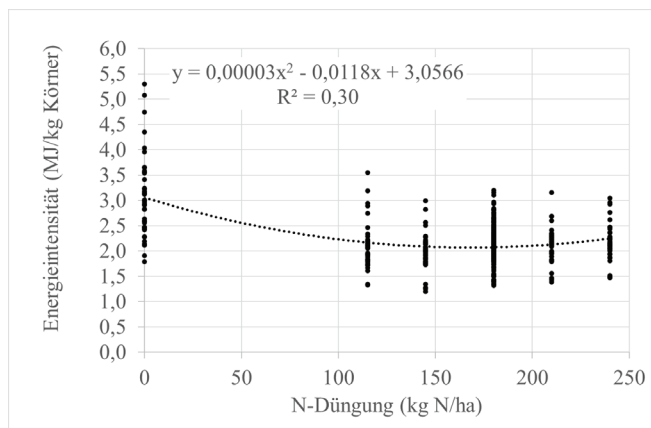


Abbildung 5. Energieintensität (= Energieinput/Kornertrag) von Körnermais in Abhängigkeit der Düngungsvarianten (10 Jahre)

Figure 5. Energy intensity (= energy input/grain yield) of grain maize as affected by mineral N-fertilization treatments (10 years)

Die berechnete N-Düngungsoptima liegen für den NEO bei 229 kg N/ha, bei der ENE bei 167 kg N/ha und bei der EI bei 197 kg N/ha, mit großen Schwankungen für alle drei Parameter zwischen den Jahren.

Die höhere Zunahme von NEO im Vergleich zu EO gegenüber der ungedüngten Kontrolle liegen in der unterschiedlichen Veränderung von EO und gesamtem Energieinput. Während der EO z. B. für alle 180 kg N/ha Varianten um 137 % gegenüber der ungedüngten Kontrolle zunimmt, nimmt der gesamte Energieinput um 71 % zu.

Die Zunahme der ENE durch die N-Düngung wurde auch in einem Langzeitdüngungsversuch am Standort Wagna (Bezirk Leibnitz, Steiermark) festgestellt, wo hingegen eine Abnahme der ENE in einem Langzeitdüngungsversuch am sehr hochproduktiven Standort Wagendorf (Bezirk Leibnitz, Steiermark) festgestellt wurde (Moitzi et al., 2015). Am Standort Wagendorf zeigte die ungedüngte Kontrolle einen mittleren Kornertrag von 10662 kg/ha (2008–2012), während am Standort Wagna dieser bei 5033 kg/ha (2007–2012) lag. Auf Standorten mit einer sehr hohen N-Bereitstellung aus der organischen Bodensubstanz, welche sich in den hohen Kornerträgen am Standort Wagendorf zeigen, führt eine N-Düngung zu einer Abnahme der ENE gegenüber der Nulldüngung. Am Standort Kalsdorf sowie am Standort Wagna steigt die ENE mit Düngung an, wodurch das System effizienter wird. Während die ENE üblicherweise einem konkaven Kurvenlauf folgt, zeigt die EI einen konvexen Verlauf bei steigender Düngung an (Hülsbergen et al., 2002). Auch in unserer Studie sowie die für den Standort Wagna durchgeführte Studie (Moitzi et al., 2015) konnte dies bestätigt werden: Ausgehend von einer hohen EI

bei Nulldüngung bzw. geringer Düngung nimmt diese bei steigender N-Düngung bis zum bestimmten Scheitelpunkt (entspricht der EI orientierten N-Optimum) ab und steigt dann wieder an. Auf sehr hoch produktiven Standorten (z. B. in Wagendorf) lässt sich dieser konvexe Kurvenverlauf nicht nachweisen (Moitzi et al., 2015).

Die Energieeffizienzanalyse zeigte, dass der fruchtbare Ackerbaustandort Kalsdorf in einem Low-Input-System weniger energieeffizient ist als in einem High-Input-System. Für den Kornertrag und für den Nettoenergieoutput (NEO), welche der biologischen Ertragsfunktion nach Mitscherlich (Mitscherlich, 1948) folgen, wurde ein N-Optimum jenseits der Obergrenze von 210 kg N/ha in der Nitrat-Aktionsprogramm-Verordnung (BGBI. II Nr. 495/2022) ermittelt. Die berechneten Optima von 243 kg N/ha für den Kornertrag und 229 kg N/ha für NEO sind aus ökologischer Sicht aber auch aus ökonomischer Sicht nicht praxisverträglich. Daher ist eine Orientierung der mineralischen N-Düngermenge an der N-Bilanz ökologisch sinnvoller, da potenzielle N-Verluste (Nitratverlagerung und Lachgasemissionen) gemindert werden.

Die energieeffizienz-orientierten mineralischen Düngungsoptima für ENE mit 167 kg N/ha und EI mit 197 kg N/ha sind um 20 % bzw. 42 % höher als das ökologisch orientierte, auf der N-Bilanz basierende Düngungsoptimum von 139 kg N/ha. Die energieeffizienz-orientierten mineralischen Düngungsoptima passen damit sehr gut zur Düngerempfehlung bei hoher Ertragserwartung von 168–196 kg N/ha der Richtlinien für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland (BMLRT, 2022).

5. Schlussfolgerungen

Eine Stickstoffdüngung ist für die Erreichung eines guten Kornertrages auf dem Hohertragsstandort zwingend notwendig. Zu hohe Düngermengen führen jedoch zu keinem höheren Kornertrag mehr, erhöhten aber die N-Bilanz und reduzieren die Energienutzungseffizienz. Die optimale standortangepasste N-Düngermenge soll sich aus ökologischer Sicht an einer ausgeglichene N-Bilanz orientieren. Hier ist die optimale N-Düngermenge mit 139 kg N/ha niedriger als bei einer Orientierung an der höchsten Energienutzungseffizienz mit 167 kg N/ha.

Die Düngermenge beeinflusst den Kornertrag, N-Bilanz und die Energieeffizienz stark, während Düngerart, Ausbringzeitpunkte und Anzahl der Gaben keinen Einfluss auf den Kornertrag und nur geringen Einfluss auf die N-Bilanz und die Energieeffizienz haben.

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.
- 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.
- BGBI. II Nr. 495/2022: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft über das Aktionsprogramm zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen. Nitrat-Aktionsprogramm-Verordnung – NAPV. Wien, Österreich.
- 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.
- BMLRT 2022. Richtlinien für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland. 8. Auflage. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Wien, Österreich.
- Boix-Fayos, C., Vente, J. 2023. Challenges and potential pathways towards sustainable agriculture within the European Green Deal. *Agricultural Systems* 207, 103634.
- 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.
- European Commission 2020. A Farm to Fork strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions. European Commission. Brussels.
- 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.
- Hülsbergen, K.-J., Feil, B., Diepenbrock, W. 2002. Rates of nitrogen application required to achieve maximum energy efficiency for various crops: results of a long-term experiment. *Field Crops Research* 77 (1), 61–76.
- KTBL-Feldarbeitsrechner 2025. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). Online verfügbar unter <https://www.ktbl.de/webanwendungen/feldarbeitsrechner>.
- Mitscherlich, E. A. 1948. *Die Ertragsgesetze*. Berlin, Deutschland: Akademie-Verlag.
- Moitzi, G., Neugschwandtner, R. W., Kaul, H.-P., Wagentristl, H. 2020. Efficiency of Mineral Nitrogen Fertilization in Winter Wheat under Pannonian Climate Conditions. *Agriculture* 10 (11), 541.
- Moitzi, G., Neugschwandtner, R. W., Kaul, H.-P., Wagentristl, H. 2021. Energy Efficiency of Continuous Rye, Rotational Rye and Barley in Different Fertilization Systems in a Long-Term Field Experiment. *Agronomy* 11 (2), 229.
- 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.
- Neugschwandtner, R. W., Wagentristl, H., Kaul, H.-P. 2015. Nitrogen yield and nitrogen use of chickpea compared to pea, barley and oat in Central Europe. *International Journal of Plant Production* 9 (2), 291–303.
- Neugschwandtner, R. W., Kaul, H.-P. 2015. Nitrogen uptake, use and utilization efficiency by oat–pea intercrops. *Field Crops Research* 179, 113–119.
- Noleppa, S., von Witzke, H. 2013. Energieeffizienz durch den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in Deutschland. Darstellung der Ergebnisse zum Modul „Energieeffekte“ des Projektes zum gesamtgesellschaftlichen Nutzen des Pflanzenschutzes in Deutschland 2013. Online verfügbar unter <https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/dao/ihe/Veroeff/energieeffizienz/@@download/file/energieeffizienz.pdf>.
- Österreichische Hagelversicherung 2024. Österreichische Hagelversicherung. Agrarwetterservice. Wien. Online verfügbar unter <https://www.hagel.at/agrarwetter/>.

- 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/>.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461 (7263), 472–475.
- Rossner, H., Ritz, C., Astover, A. 2014. Optimisation of fertiliser rates in crop production against energy use indicators. *European Journal of Agronomy* 55, 72–76.
- Rossrucker, H. 1977. Die Kosten der Trocknung von Körnermais – ihre Berechnung und Problematik. Wien: Österreichisches Kuratorium für Landtechnik (ÖKL), Landtechnische Schriftenreihe Heft 33.
- 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.
- Umweltbundesamt 2021. Österreichische Stickstoff- und Phosphorbilanz der Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/landnutzung/klimaschutz/klimaschutz-landwirtschaft>.
- Versuchsstation für Pflanzenbau Hatzendorf 2024. Amt der Steiermärkischen Landesregierung. Graz. Online verfügbar unter <https://www.fachschulen.steiermark.at/cms/ziel/152714107/DE/>.
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., Shen, Y. 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528 (7580), 51–59.