



N-fertilizer application is an important measure to improve yield stability in sugar beet cultivation. On the other hand it may affect the environment. An inappropriate or excessive application may influence the quality of groundwater and semi-natural ecosystems.

Different parameters of N-fertilizer use in sugar beet cultivation are studied based on data of a survey among farmers. Data of 1020 fields gathered in the years 2004, 2010 and 2011 showed an amount of N-fertilizer application between 122 kg N ha⁻¹ and 128 kg N ha⁻¹ for the different years. The N-balance decreased from 12 kg N ha⁻¹ (2004) to -24 kg N ha⁻¹ (2011). The corrected sugar yield increased from 10.6 t ha⁻¹ in 2004 to 12.9 t ha⁻¹ in 2011 and an increased efficiency of N-fertilizer could be documented. Agriculture is one of the main sources of direct N₂O-emissions, which arise mostly out of N-fertilizer. The greenhouse gas emissions from sugar beet cultivation are about 2 t CO₂eq ha⁻¹ and thus equal to the standard values implemented by the EU.

To reduce environmental impact caused by leaching and greenhouse gas emissions without affecting economic aspects poses one of the actual challenges in sugar beet cultivation in commercial farms.

Keywords: N-fertilizer application, efficiency, greenhouse gas emissions, N₂O, farm survey

1. Einleitung

Durch die Zielvorgabe der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) bis 2015 sowie die geplante Überarbeitung der Düngeverordnung (DüV) in diesem Jahr wird die Relevanz von landwirtschaftlichen Anbaumaßnahmen für die Umwelt aktuell deutlich. Vor allem die Stickstoff-Düngung steht dabei im Fokus (WRRL, 2000/60/EC; DüV, 2007).

Schon seit langem ist bekannt, dass eine hohe Ertragssicherheit bei Zuckerrüben auch bei einer geringen N-Düngung gegeben ist (Ladewig und Märländer, 1993). Während eine angemessene N-Düngung den Rübenertrag erhöhen kann (Stockfisch und Märländer, 2002), senkt eine unverhältnismäßig hohe N-Düngung den Bereinigten Zuckerertrag. Der Standardmelasseverlust steigt mit steigender N-Düngung und der Zuckergehalt sinkt (Hoffmann und Rother, 2000), was sich negativ auf die Qualität der Rüben und somit auf die Effizienz der Verarbeitung auswirkt (Märländer et al., 2003). Der Aufwand in der Zuckerfabrik erhöht sich bei gleichzeitig sinkenden Gewinnen. Die Optimierung der N-Düngung ist also relevant in Hinsicht auf die ökonomischen und ökologischen Aspekte der Wertschöpfungskette, d.h. den Ertrag, die Verarbeitungsqualität der Rüben und die Umweltwirkungen.



Belastungen für die Umwelt aus der N-Düngung ergeben sich bei der Herstellung des Düngers, bei der Lagerung und während und nach der Ausbringung (*Brentrup und Pallière, 2008*) v.a. durch Auswaschungen und Emissionen. Neben der Menge können auch der Ausbringungszeitpunkt, die -technik sowie der maschinelle Aufwand, die Bodenbeschaffenheit, die Witterung und die Düngerform die Wirkung des Düngers und die Höhe der Verluste beeinflussen. Bei der N-Mineralisierung im Boden bildet sich zunächst Ammoniak (NH_3), welches durch gasförmige Freisetzungen zur Eutrophierung und Versauerung terrestrischer und aquatischer Ökosysteme führt (*Wahmhoff, 2011*). NH_3 geht in Wasser zu Ammonium (NH_4^+) über. Bei leicht durchlässigen Sandböden ist dies für Einträge ins Grundwasser verantwortlich (*Scheffer und Schachtschabel, 2002*). Überwiegend erfolgt die Auswaschung jedoch als Nitrat (NO_3^-). Dies entsteht bei der Nitrifikation. NH_4^+ wird zu Nitrit (NO_2^-) umgewandelt und durch Bakterien dann zu NO_3^- umgesetzt. Belastetes Grundwasser ist der bedeutendste Eintragspfad von NO_3^- in Oberflächengewässer (*UBA, 2012*). Aber auch durch Drän- und Sickerwasser können NH_4^+ und NO_3^- in Oberflächengewässer gelangen (*Jarvis et al., 2011*). Direkte Verluste entstehen auf dem Feld durch Freisetzungen von Lachgas (N_2O) nach der Ausbringung des Düngers (*Bouwman et al., 2002a*). Dieses klimaschädliche Gas leistet im besonderen Maße einen Beitrag zur Belastung der Atmosphäre aufgrund seiner hohen Klimawirksamkeit.

Mit Hilfe einer Betriebsbefragung unter Zuckerrübenanbauern in Deutschland wurden Praxis-Daten zur N-Düngung erhoben (*Stockfisch et al., 2013*) und analysiert. Verschiedene Kennwerte werden genutzt, um Auswirkungen der Höhe und Art der N-Düngung abzubilden und zu bewerten. Des Weiteren werden klimarelevante Emissionen des Zuckerrübenbaus mit den Befragungsdaten anhand vorliegender Standardwerte aus der Literatur abgeschätzt. Beispielhaft wird die Komplexität dieser Berechnungen anhand der eingesetzten Düngerformen verdeutlicht.

Optionen für eine weitere Effizienzsteigerung im ökologischen und ökonomischen Bereich werden abschließend abgeleitet.

2. Material und Methoden

Die Grundlage der Daten bildet die Betriebsbefragung zur Produktionstechnik im Zuckerrübenanbau in Deutschland für die Jahre 2010 und 2011 (*Stockfisch et al., 2013*). Insgesamt wurden in beiden Jahren Daten zu 788 Schlägen (2010: 393, 2011: 395) erhoben. Die Landwirte gaben Auskunft über Anbaumaßnahmen, Ertrag und Qualität der Zuckerrüben auf dem größten Zuckerrübenschlag ihres Betriebes.



Eine bereits im Jahr 2004 unter Betriebsleitern durchgeführte bundesweite Befragung zum Zuckerrübenanbau wurde, sofern parallele Daten vorlagen, zum Vergleich herangezogen (Wießner et al., 2010). Außerdem wurde eine Expertenschätzung des Jahres 2010 (Buhre et al., 2011) den Betriebsangaben aus den Jahren 2010 und 2011 gegenübergestellt. Um die in Deutschland herrschenden spezifischen Unterschiede für die Zuckerrüben-Anbauggebiete zu berücksichtigen, wurde eine Einteilung in Regionen vorgenommen (Stockfisch et al., 2013). Diese erfolgte anhand der Bundesländergrenzen in Nord (Schleswig-Holstein, Niedersachsen), West (Nordrhein-Westfalen Westfalen), Süd (Hessen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg, Bayern) und Ost (Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Sachsen).

Alle Maßnahmen wurden dabei stets von der Ernte der Vorfrucht bis zur Lagerung der Rüben in der Miete am Feldrand betrachtet. Für die N-Düngung bedeutet dies, dass alle ausgebrachten Dünger ab Ernte der Vorfrucht berücksichtigt wurden, einschließlich der N-Düngung zur Zwischenfrucht und aller organischen Dünger. Für letztere wurde die für Zuckerrüben verfügbare Menge Stickstoff angerechnet (LWK Nds., 2012). Für die Nährstoffgehalte organischer und mineralischer Düngemittel wurden Standardwerte angesetzt (LWK Nds., 2007; LWK Nds., 2009). Darüber hinaus wurden in Bezug auf die N-Düngung N_2O -Emissionen vom Feld nach Ausbringung des Düngers mit 1 % des gedüngten Stickstoffs angesetzt (IPCC, 2006). Dieser Emissionsfaktor wird unabhängig von der Fruchtart und der Art des verwendeten N-Düngers benutzt (Dobbie und Smith, 2003). Indirekte Emissionen von N_2O blieben unberücksichtigt.

Für die Darstellung der Effizienz wurde die Düngung ins Verhältnis zum Bereinigten Zuckerertrag (BZE) gesetzt. Das Verhältnis der gesamten organischen und mineralischen N-Düngung (inklusive der Düngung zur Zwischenfrucht) in $kg\ N\ ha^{-1}$ zum BZE in $t\ ha^{-1}$ dient als Effizienzindikator und wird als Quotient q bezeichnet (Fuchs und Stockfisch, 2009). Die Quotienten wurden schlagspezifisch berechnet. Die schlagspezifischen q -Werte wurden zur Medianberechnung für Teilmengen der Daten oder für den Gesamt-Median herangezogen. Die Isoeffizienz-Linien kennzeichnen das mittlere Verhältnis zwischen N-Düngung und BZE für ein Anbaujahr entlang des gesamten Spektrums von N-Düngergaben.

Mit den schlagbezogenen Aufzeichnungen wurde der Bilanzsaldo als Schlagbilanz berechnet. Dadurch ist eine differenzierte Bewertung der einzelnen Schläge möglich (Bach und Wrede, 2005). Die Nährstoffabfuhr durch die geernteten Zuckerrüben ($1,8\ kg\ N\ t^{-1}$ Rüben-Frischmasse) wurde dabei von der N-Zufuhr durch die Düngung subtrahiert (DüV, 2007). Die Grundnährstoffe Phosphor und Kalium werden in Bezug auf ihr Saldo hier nicht betrachtet, da die Düngung oft nicht spezifisch zu Zuckerrüben erfolgt, sondern innerhalb der Fruchtfolge zu bewerten ist. Eine Bilanzierung ist nur über einen längeren Zeitraum sinnvoll (Scheffer und Schachtschabel, 2002).



Phosphor und Kalium fließen aber in die Ermittlung der Treibhausgasemissionen des Anbaus ein. Die Angaben für diese Dünger sowie für CaO wurden nach Entzug berechnet (P_2O_5 : 0,95 kg t⁻¹ Rübenfrischmasse, K_2O : 2,5 kg t⁻¹ Rübenfrischmasse, CaO: 4 kg t⁻¹ Rübenfrischmasse) (Hydro Agri, 1993).

Die Berechnung der klimarelevanten Emissionen erfolgte gemäß den Standardwerten des Rechentools *Biograce* (2013). Dieses erlaubt Kalkulationen von Treibhausgasemissionen für Biokraftstoffe und wurde im Mai 2013 von der EU als freiwilliges Zertifizierungssystem anerkannt (EU, 2013/256/EU). Um eine Vergleichbarkeit untereinander zu gewährleisten, werden die Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und N₂O in CO₂-Äquivalente (CO₂eq) umgerechnet (EU, 2009, Annex V.C 5.). CO₂ dient als Ausgangswert für die Höhe des Beitrags der Treibhausgase zur Klimaerwärmung. Die Grundlage bildet die Verweildauer der Gase in der Atmosphäre über einen bestimmten Zeitraum (IPCC, 2007). So ist CH₄ über 100 Jahre gesehen 23-mal klimawirksamer als CO₂. Für N₂O ergibt sich eine Treibhauswirksamkeit (Global Warming Potential, GWP) von 296 (EU, 2009).

Die standardisierten Treibhausgas-Emissionskoeffizienten (nach Edwards et al., 2011) berücksichtigen die Emissionen bei der Herstellung, beim Transport und bei der Lagerung für alle Aufwendungen im Zuckerrübenanbau, d.h. Dünger, Pflanzenschutz, Saatgut und Diesel (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Standardisierte Treibhausgas-Emissionskoeffizienten für die Aufwandmengen im Zuckerrübenanbau (nach *Biograce-Rechentool*, 2013)

	Emissionskoeffizient
N (min.+org.)	5880,6 g CO ₂ eq kg ⁻¹
P₂O₅	1010,7 g CO ₂ eq kg ⁻¹
K₂O	576,1 g CO ₂ eq kg ⁻¹
CaO	129,5 g CO ₂ eq kg ⁻¹
Pflanzenschutz	10971,3 g CO ₂ eq kg ⁻¹
Saatgut	3540,3 g CO ₂ eq kg ⁻¹
Diesel	87,64 g CO ₂ eq MJ ⁻¹

Bei der N-Düngung werden zusätzlich die nach der Ausbringung auf dem Feld entstehenden direkten N₂O-Emissionen berücksichtigt, die nach UNFCCC (2007) abgeschätzt werden können:



$$N_2O_{direct,N,t} = (F_{SN,t} + F_{ON,t}) * EF_1 * MM_{N_2O} * GWP_{N_2O} \quad (1)$$

$N_2O_{direct,N,t}$ Direkte N_2O -Emissionen in t CO_2eq (t N)⁻¹

$F_{SN,t}$ gedüngter mineralischer N in t

$F_{ON,t}$ gedüngter organischer N in t

EF_1 Emissionsfaktor N_2O in % des gedüngten N

MM_{N_2O} Molekülmasse in t N_2O (t N)⁻¹

GWP_{N_2O} Treibhauspotenzial von N_2O in kg CO_2eq (kg N_2O)⁻¹

also

$$CO_2eq \text{ aus } N_2O_{direkt} = x \text{ kg } N_{gedüngt} * 0,01 * 44/28 * 296 \quad (2)$$

Die Werte werden in kg $CO_2eq \text{ ha}^{-1}$ angegeben. Der Dieserverbrauch des Maschineneinsatzes in L wird dafür mit Hilfe des Heizwertes für Diesel von 35,87 MJ l⁻¹ umgerechnet (*BDB^e, 2013*). Beim Pflanzenschutz beziehen sich die Emissionen auf die Menge Aktivsubstanz im Pflanzenschutzmittel.

Der BZE berechnet sich unter Berücksichtigung von Rübenenertrag (t ha⁻¹), Zuckergehalt (%), Standardmelasseverlust (% auf Rüben-Frischmassen) und Standardfabrikverlust (0,6 %) (*Märländer et al., 2003*).

Die statistischen Auswertungen und die graphischen Darstellungen wurden mit dem Softwarepaket SAS (Version 9.3, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA), sowie der Software Sigma Plot (Version 11.0, Systat Software, Inc. SigmaPlot for Windows) durchgeführt. Da die Daten teilweise nicht normalverteilt waren, wurden parameterfreie Tests nach Kruskal- Wallis herangezogen und die Daten in Ränge überführt. Für die Darstellung von Durchschnittswerten wurde aufgrund der fehlenden Normalverteilung der Daten bei der Betrachtung der Bewertungskriterien für die N-Düngung der Median gewählt.

3. Ergebnisse

3.1 Höhe der N-Düngung

Auf den Schlägen der befragten Betriebe (Betriebsbefragung) bzw. auf der Rübenanbaufläche (Expertenschätzung) wurde am häufigsten zwischen 81 und 120 kg N ha⁻¹ zu Zuckerrüben gedüngt (Abb. 1). Vergleicht man die Ergebnisse der Betriebsbefragung zur Produktionstechnik für alle Jahre über alle Düngerstufen, zeigt sich kein ausgeprägter Jahreseinfluss. Im Anbaujahr 2004 düngten 24,1 % der befragten Betriebe zwischen 41 und 80 kg N ha⁻¹, während es im Jahr 2010 24,7 % und in 2011 26,6 % waren. Der Anteil der Schläge, die mit 81 bis 120 kg N ha⁻¹ gedüngt wurden, nahm über die Jahre von 41,6 % (2004)