

Stoffstromnetze für Marktfruchtfolgen - ein Instrument für die Optimierung landwirtschaftlicher Betriebe in Wasserschutzgebieten

M. FLAKE, A. HANSEN und E. HEUER

Abstract

Methods of ecological balancing are applied to quantify agricultural conditioned effects on the environment in order to discuss different strategies in terms of an efficient management, that is concerned about drinking water protection. When they are applied to agricultural subjects it is attempted to analyse, as broad as possible, the fluxes of matter that are caused by agricultural activities within the framework of substance flow analysis. If the environmental effects evoked by the means of production, such as fertilizers and pesticides, are analysed as well, then new dimensions for the ecological optimization of the agricultural practice are revealed. Within the framework of two project studies, the fluxes of matter and energy of commercial farms in Lower Saxonian protected water collection areas are investigated. The scope for the projects is an ecological and further economical optimization of farming in protected water collection areas by reducing the means of production. The substance flow analysis primarily focuses on fertilizer input and energy supply. Additionally, ecological achievements such as reduction of pesticides, soil conservation and reduction of the energy consumption are recorded and assessed. The possibilities of the voluntary agreement of the law on water resources management, e.g. reduction of fertilizer input or catch-crop growing and mulching, are calculated by scenarios of the substance flow analysis.

LCA, etc.) an, die ursprünglich aus Analysen industrieller Produktlinien und Produktionsketten entstanden. Stoffstromanalysen können dabei Auswirkungen erfassen, die über die Grenzen des landwirtschaftlichen Betriebes hinausgehen. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Betrachtung der ökologischen Effekte im Zuge der Bereitstellung von Betriebsmitteln wie Mineraldünger oder Pflanzenschutzmittel. Der landwirtschaftliche Betrieb wird als Akteur betrachtet, der nicht nur über die Intensität des Betriebsmitteleinsatzes, sondern auch durch die Auswahl der Betriebsmittel die Quantität der mit ihrem Einsatz verbundenen Umweltwirkungen beeinflusst. Ein besonderes Merkmal landwirtschaftlicher Stoffstromanalysen liegt in der Verknüpfung technischer Systeme (z.B. Schleppereinsatz) mit agrarökologischen Prozessen (z.B. N-Dynamik im Boden).

Im Rahmen verschiedener Projektarbeiten werden die Stoff- und Energieflüsse landwirtschaftlicher Betriebe in niedersächsischen Wasserschutzgebieten untersucht. Ziel dieser Projekte ist, durch die Reduzierung von Betriebsmitteln eine ökologische und auch ökonomische Optimierung zu erreichen. Zunächst steht der für den Trinkwasserschutz wichtige Schritt der Senkung des Nährstoffeinsatzes (speziell N-Düngung) im Vordergrund. In einem folgenden Schritt werden weitere ökologische Leistungen wie die Verminderung der Pflanzenschutzmaßnahmen, der Bodenschutz

und die Reduzierung des Energieeinsatzes erfaßt und bewertet. Die von den Landwirten erbrachten Leistungen werden entsprechend ihrer Effizienz für den Wasserschutz beurteilt und sollen später in einen Rahmenvorschlag für finanzielle Ausgleichsmaßnahmen zum Trinkwasserschutz eingehen (ökonomische Optimierung).

Untersuchungsgegenstand

Der hier exemplarisch vorgestellte Marktfruchtbetrieb liegt im Wasserschutzgebiet Halchter/Ohrum (Landkreis Wolfenbüttel) im Übergangsbereich des nördlichen Harzvorlandes und der Lößbörde Niedersachsens und umfaßt eine Ackerfläche von 320 ha mit einem Anteil von 56 % im Wasserschutzgebiet. Quartäre Lössen bilden neben den anstehenden Kalken das bodenbildende Substrat. Vorherrschende Bodentypen sind Parabraunerden, Pseudogleye und Kolluvien auf den Lössen, Rendzinen und Braunerden auf den Kalken. Die Niederungen der Oker sind geprägt von typischen Auenböden mit ihren Staunäsemersmerkmalen.

Die betriebsübliche Fruchtfolge umfaßt Winterweizen (50 %), Wintergerste (20 %) und Zuckerrüben (30 %), wobei die Flächenstilllegung als Rotationsbrache integriert wird. Anfallendes Stroh und Rübenblatt verbleiben auf dem Acker. Als Zwischenfrucht vor den Zuckerrüben wird teilweise Gelbsenf angebaut, etwa die Hälfte der ZR-Aussaat erfolgt

Einleitung und Zielsetzung

In der Diskussion über eine umweltgerechte Landbewirtschaftung bieten sich zur Quantifizierung von ackerbaulich bedingten Umwelteffekten methodische Verfahren (z.B. Stoffstromanalysen,

Tabelle 1: Liste der Schlepper mit dem jeweiligen Einsatzbereich (Leistungsangabe [kW])

Leistung [kW]	Einsatzbereich
68	Grunddüngung m. Schleuderstreuer, ZR-Aussaat, Walzen
107	AHL-Düngung, Pflanzenschutz, Rübenernte, Getreidetransporte
125	Stoppelbearbeitung, Getreideaussaat (Kreiselegge/Drillmaschine)
134	Pflügen, Tiefmeißel
165	Mähdrescher

Autoren: Dipl.-Geoökol. Michael FLAKE, Dipl.-Geoökol. Anja HANSEN und Edda HEUER, Institut für Geoökologie der TU, Langer Kamp 19c, D-38106 BRAUNSCHWEIG

Tabelle 2: Produktionsfaktoren und Erträge des Betriebes für die Fruchtfolge (*WW/WG/ZR)

Betriebsmittel	Aufwendungen
N-Dünger [kg N/ha]	208 / 181 / 153* (AHL)
PSM [kg Wirkstoff/ha]	4,8 / 4,3 / 7,5*
Anteil Trocknungsgetreide [%]	10
Saatgutwechsel bei Getreide [%]	5
Kalkdünger [kg CaO/ha]	525 (Carbokalk)
Grunddünger [kg/ha] P ₂ O ₅ / K ₂ O	110 / 100
Ertragsniveau [dt/ha]	88 / 88 / 509*

als Mulchsaat. Die *Tabellen 1* und *2* charakterisieren den zur Verfügung stehenden Maschinenpark mit den Einsatzbereichen sowie die eingesetzten Produktionsmittel.

Methodik der ökologischen Bilanzierung

Das hier vorgestellte Projekt bewegt sich im Kontext von Ökobilanzen mit landwirtschaftlichem Bezug. Daher wird die folgende grundlegende Struktur von Produktökobilanzen (WENZEL et al., 1997) auf die landwirtschaftlichen Fragestellungen übertragen:

- Zieldefinition, Festlegung der Systemgrenzen und der Bilanztiefe
- Erstellung der Sachbilanz
- Erstellung der Wirkungsbilanz
- Bilanzbewertung durch Sensitivitätsanalysen und Einbeziehung von Unsicherheiten
- Schwachstellen- und Optimierungsanalyse

Zunächst wird in der **Zieldefinition** die Wahl des Verfahrens begründet und das Ziel der Analyse benannt (vgl. Titel des Beitrags). Daran ausgerichtet werden die Abgrenzung und Wahl des Bilanzraumes als **räumliche** und **zeitliche Systemgrenzen** und die sogenannte **funktionel-**

Tabelle 3: Standardliste der Wirkungskategorien (UBA 1995)

1	**	Verbrauch von Rohstoffen
2	**	Treibhauseffekt
3	**	Ozonabbau
4	*	Humantoxizität
5	*	Ökotoxizität
6	*	Photooxidantienbildung
7	**	Versauerung
8	*	Eutrophierung
9		Flächenverbrauch
10		Lärmbelastung

* Zur jeweiligen Kategorie gehörende Stoffe werden bilanziert

** zugehörige aggregierte Wirkungskategorie wird ausgewiesen

le Einheit bestimmt, auf die die Stoffströme des Bilanzraumes skaliert werden.

In diesem Abschnitt werden in erster Linie die Abhängigkeit des landwirtschaftlichen Maschineneinsatzes von Betriebsstruktur und Standort, die Bereitstellung von Betriebsmitteln und deren Ertragswirksamkeit sowie die damit verbundenen energetischen Aufwendungen und Emissionen festgelegt. Im Rahmen landwirtschaftlicher Untersuchungen können die bilanzierten Umweltwirkungen auf die Produktionsfläche (ha) oder auf den Massenertrag (kg oder dt) bezogen werden. Im Bereich der Düngemittel wird, basierend auf den Arbeiten von PATYK und REINHARDT (1997), die Bereitstellung der wichtigsten in Deutschland eingesetzten mineralischen Düngemittel erfasst. Bei den Pflanzenschutzmitteln (PSM) kann bislang nur die Bereitstellung mittlerer Wirkstoffmengen - im wesentlichen nach einem Ansatz von GREEN (1987) - abgebildet werden. Die zur Infrastruktur zählenden Bereiche der Herstellung, Wartung und Reparatur von verschiedenen Gebäuden, Maschinen, Transportmitteln und Verkehrswegen werden vollständig aus der Bilanzierung herausgenommen (SCHMIDT und SCHORB, 1995).

In der zweiten Stufe der Ökobilanz werden die zur Quantifizierung der Stoff- und Energieflüsse notwendigen Basisdaten zusammengetragen und zu Prozeßmodellen verknüpft. Die **Sachbilanz** liefert schließlich eine disaggregierte Bilanz der erfaßten Stoff- und Energieströme. Dabei ist auf gleichen Detaillierungsgrad der betrachteten Stoffflüsse und eine ausreichend durchgängige Datenbasis zu achten.

In der anschließenden **Wirkungsbilanz** werden die in der Sachbilanz zusammengestellten Daten mittels Gewichtungsfaktoren zu Wirkungskategorien bezüglich ihrer Umweltwirkung aggregiert.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die erfaßten Wirkungskategorien als Teil der Standardliste nach UBA (1995).

Dem zusätzlich ausgewiesenen Nitratbelastungspotential (vgl. *Abbildung 4*) kommt eine Sonderrolle zu, da es nicht über den gesamten Lebensweg bilanziert sondern nur für die eigentliche landwirtschaftliche Produktion bestimmt wird. Zusätzlich stellt es bereits eine aggregierte Größe für Stickstoff aus N₂ und Nitrat dar, da der methodische Ansatz auf dem betrachteten Aggregationsniveau keine sinnvolle Ausweisung von N₂ aus den errechneten Stickstoffverlusten erlaubt. Das bilanzierte Potential stellt daher die Obergrenze der möglichen N-Emissionen in Form von Nitrat in Grund- und Oberflächengewässer dar.

Für die **Bewertung** werden die bilanzierten Wirkungen einer Bewertungslogik unterzogen. Hier existieren verschiedene formalisierte Verfahren, die die einzelnen Umweltwirkungen unterschiedlich gewichten und aggregieren (z.B. Eco-Indicator, GOEDKOOPT, 1995) - im Extremfall bis hin zu eindimensionalen Ökopunkten (AHBE et al., 1990). Statt einer formalisierten Bewertung kann ebenso eine verbal-argumentative Interpretation der Ergebnisse vorgenommen werden.

Die Durchführung von **Sensitivitätsanalysen** und die **Einbeziehung von Unsicherheiten** bei den Basisdaten sichert die Ergebnisse der Bewertung ab. Die **Schwachstellen- und Optimierungsanalyse** erfolgt anhand von Berechnungen plausibler Szenariensimulationen aus der landwirtschaftlichen Praxis (vergleiche *Abbildung 4*).

Dabei sei darauf hingewiesen, daß eine direkte Vergleichbarkeit der Bewertungsergebnisse verschiedener Ökobilanzen nur gegeben ist, wenn die Bilanzierung auf den gleichen Annahmen beruht, die verwendeten Daten eine ähnliche Qualität besitzen und in denselben Systemgrenzen bilanziert wird.

Die Projektarbeiten in den Wasserschutzgebieten gliedern sich nach folgendem Schema:

Ebene des Einzelbetriebes

- Erstellung der Stoff- und Energiebilanzen für die betriebsübliche Bewirtschaftung

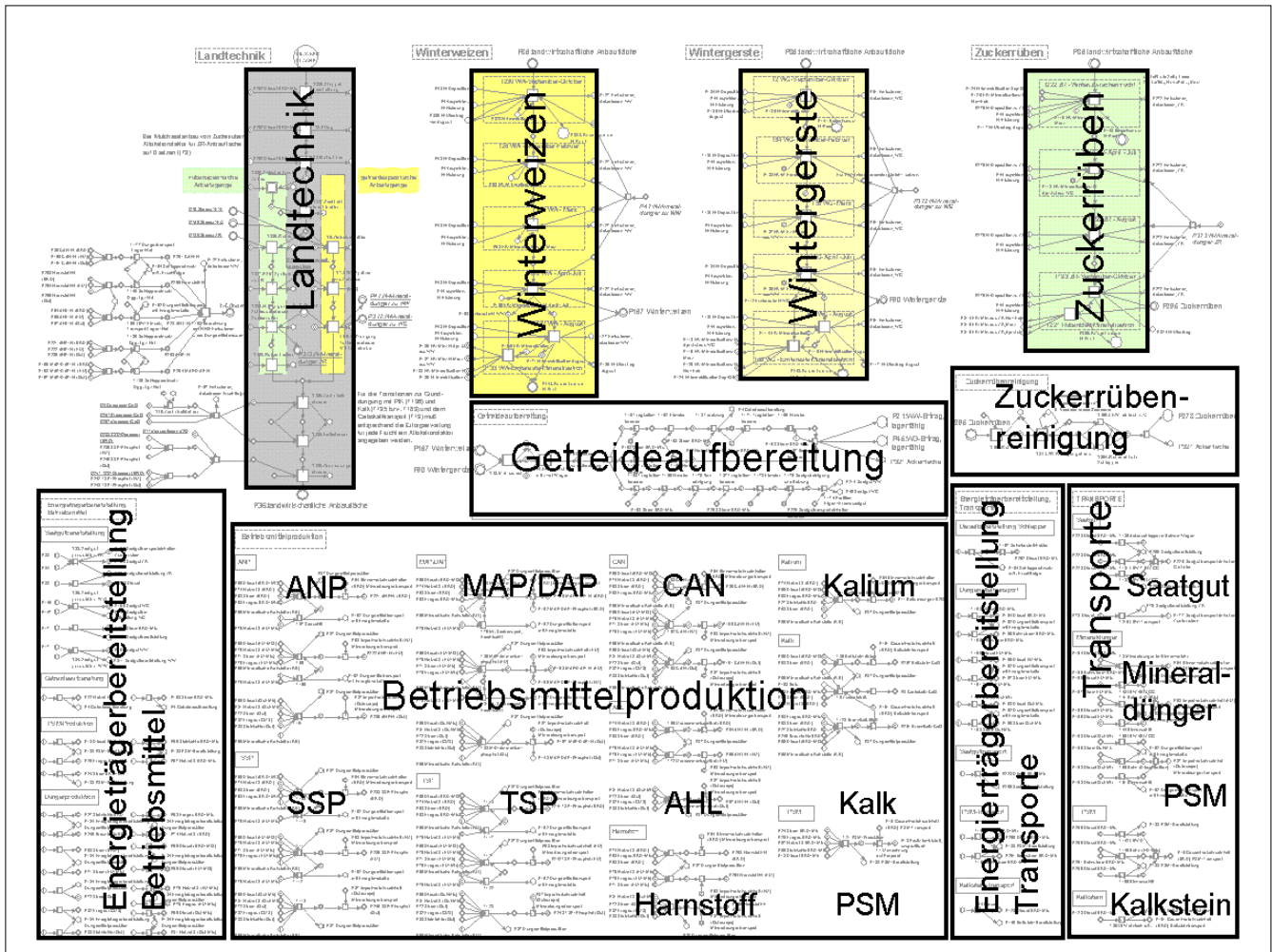


Abbildung 1: Gesamtübersicht des modellierten Stoffstromnetzes

- Szenariosimulationen aus dem Maßnahmenkatalog der Freiwilligen Vereinbarungen
 - Senkung des Düngenniveaus, Zwischenfruchtanbau, Mulchsaatverfahren
- Szenarien zur Integration von extensiven Kulturen
 - Braugerste, Hafer
- Szenarien zum Anbau von nachwachsenden Rohstoffen und Energiepflanzen
 - Öllein, Hanf, Ganzpflanzennutzung zur Energieerzeugung

Gebietsebene (Wasserschutzgebiet oder Einzugsgebiet)

- Erstellung der Stoff- und Energiebilanzen für die schlagbezogene Bewirtschaftung
- Georeferenzierung der Betriebe und Aufstellung von flächenhaften Bilanzierungen
- Definition von gebietsbezogenen Optimierungszielen und -potentialen

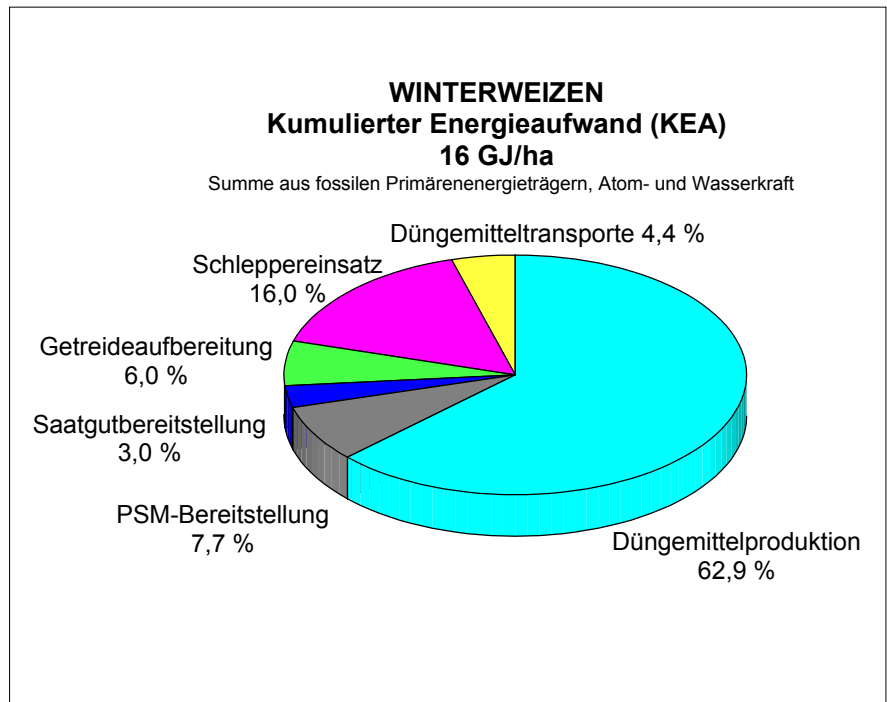


Abbildung 2: Anteile der Lebenswegabschnitte am kumulierten Energieaufwand (KEA) des Winterweizenanbaus im Marktfruchtbetrieb (1 ha, 280 kg N/ha, 88 dt/ha)

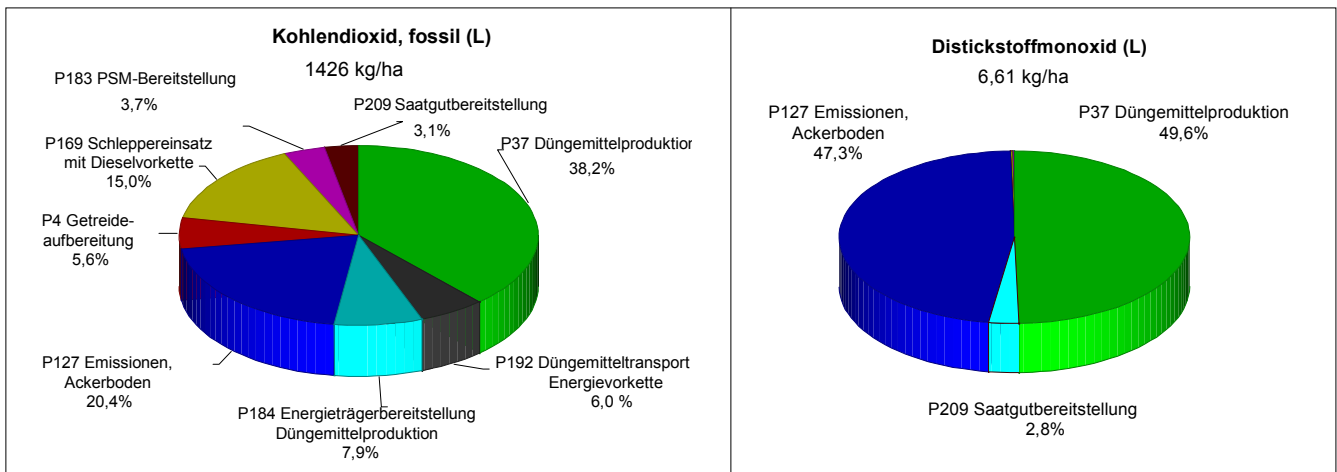


Abbildung 3: Sachbilanz der Emissionen von Kohlenstoffdioxid (links) und Distickstoffmonoxid (rechts) beim Winterweizenanbau (vgl. Abbildung 2)

Entwicklung der landwirtschaftlichen Stoffstromnetze

Die Stoffstromnetze der verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen werden in möglichst voller Intensität bestimmt und können so modular zu Fruchtfolgen, Betriebsbetrachtungen oder Anbauvergleichen gruppiert werden (vgl. Abbildung 1). Die Bilanzierung reicht im Lebenswegabschnitt der Bereitstellung von Betriebsmitteln bis zur Förderung von Energieträgern und mineralischen Rohstoffen aus den Lagerstätten zurück. Die Umsetzung des methodischen Ansatzes wird mit der auf der Theorie der Petri-Netze basierenden Ökobilanzsoftware Umberto® (SCHMIDT und HÄUSLEIN, 1997) durchgeführt. Besondere Beachtung in den Stoffstromnetzen finden die Transitionen Pflanzenwachstum, Düngung, Pflanzenschutzmittel und Bo-

denbearbeitung. Die Parametersätze der einzelnen Module werden auf die produktionstechnischen Bedingungen der Betriebe angepaßt.

Bei der Betrachtung des Nährstoffhaushalts und der Ertragsbildung wird die N-Düngung als die eigentlich ertragsbestimmende und aufgrund der potentiellen Emissionen verschiedener N-Verbindungen auch als ökologisch relevanteste Düngung behandelt. Zur Beschreibung der Abhängigkeit der Ertragsbildung vom N-Angebot werden Ansätze aus einem ökologisch-ökonomischen Planungsmodell von KRAYL (1993) übernommen und modifiziert. Mit Hilfe von zeitperioden- und standortspezifischen N-Verlustkoeffizienten wird der errechnete N-Überschuß einer Zeitperiode in N-Verluste und in übertragbaren Stickstoff unterteilt. Die Ertragsbildung

wird über quadratische relative N-Ertragsfunktionen angenähert (vgl. Abbildung 6). Die N-Düngung wird dabei relativ zum N-Düngungsniveau für den maximalen Ertrag angegeben.

Eine Gesamtübersicht des an den Beispielbetrieb angepaßten Stoffstromnetzes ist der Abbildung 1 zu entnehmen. Der obere Teil des Netzes beschreibt die ackerbaulichen Tätigkeiten und die Wechselwirkungen im System Boden-Pflanze. Im unteren Bereich werden die Stoff- und Energieflüsse für die Bereitstellung der landwirtschaftlichen Produktionsmittel (Mineraldünger, Saatgut, etc.) und der Endenergieträger (Diesel, Strom, etc.) berechnet.

Ergebnisse

Angesichts der allgemein anerkannten Bedeutung von Energiebilanzen für eine ökologische Schwachstellenanalyse von Produktlinien wird als Ergebnisbeispiel der kumulierte Energieaufwand (KEA) an fossilen Energieträgern, Kern- und Wasserkraft für den Anbau von Winterweizen als Marktfrucht zusammengefaßt und sektoral ausgewiesen. Hier läßt sich erkennen, daß die primärenergetischen Aufwendungen für die Erzeugung von Winterweizen zu ca. zwei Drittel durch die Herstellung und den Transport von Düngemitteln bestimmt werden. Mit deutlichem Abstand folgen die energetischen Aufwendungen im Zusammenhang mit dem Schleppereinsatz, wobei der Anteil der Bereitstellung von Diesel bei ca. 10 % liegt. Für die PSM-Bereitstellung ist mit etwa 90 % der energetischen Aufwendungen die eigentliche

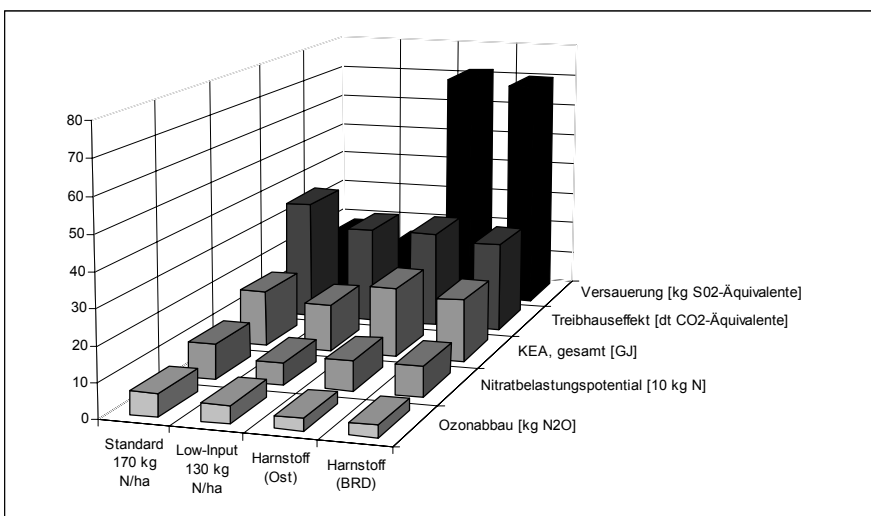


Abbildung 4: Gegenüberstellung ausgewählter Umweltwirkungen der betrachteten Szenarien

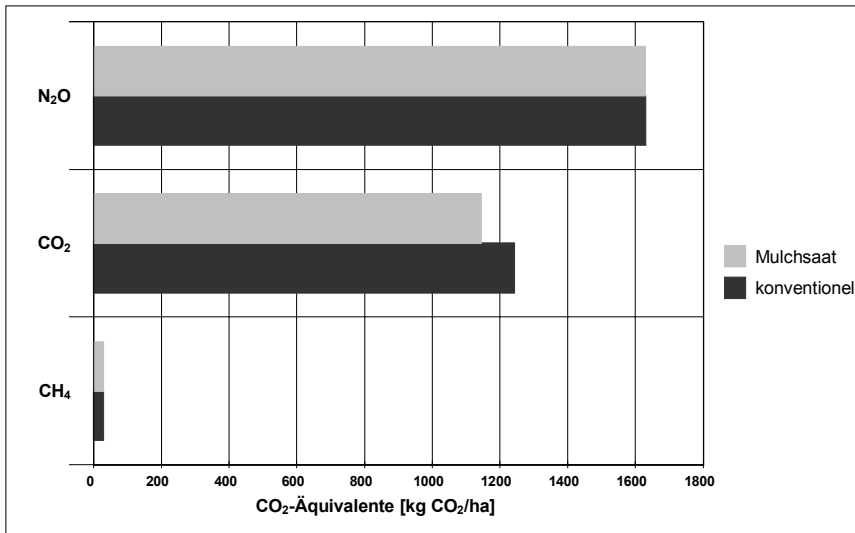


Abbildung 5: Emission von N₂O, CO₂ und CH₄ in CO₂-Äquivalenten für ein Szenario mit Mulchsaatverfahren bei Zuckerrüben verglichen mit konventioneller Aussaat

Produktion maßgeblich. Bei der Getreideaufbereitung fallen ca. 75 % der energetischen Aufwendungen im Zusammenhang mit der Trocknung an. Der Anteil der CO₂-Emissionen an der Wirkungskategorie Treibhauseffekt, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten, beträgt ca. 40 %. Da der KEA zu fast 90 % vom Einsatz fossiler Energieträger geprägt wird, dominiert die Düngemittelbereitstellung auch die CO₂-Bilanz für den Winterweizenanbau. Die Emissionen

von der landwirtschaftlichen Fläche selbst sind auf die CO₂-Freisetzung im Zuge der Reaktion des eingesetzten Düngekalks mit den Säurekomponenten des Bodens zurückzuführen. Die Bilanz der N₂O-Emissionen wird mit der Düngemittelproduktion und den Emissionen von der landwirtschaftlichen Fläche im wesentlichen nur durch zwei Bereiche beeinflusst. Der Anteil der N₂O-Emissionen an den CO₂-Äquivalenten beträgt fast 60 % (vgl. Abbildung 5). Bei der

Düngemittelproduktion treten die prozessspezifischen N₂O-Emissionen überwiegend bei der Herstellung des Vorprodukts Salpetersäure auf. Die Emissionen von der Ackerfläche ergeben sich nach BOUWMAN (1996) aus der natürlichen Hintergrundbelastung und den an den N-Düngereinsatz gekoppelten Emissionen. Nach dieser Vorgehensweise liegt der Anteil der anthropogen bedingten N₂O-Emissionen an den Emissionen von der Ackerfläche bei etwa zwei Drittel.

Ergänzend werden anhand ausgewählter Wirkungskategorien die ökologischen Optimierungspotentiale durch Variation des landwirtschaftlichen Betriebsmitteleinsatzes und Produktionsverfahrens dargestellt (Abbildung 4). Ausgehend von einem betriebsüblichen Anbauverfahren sind die Effekte eines reduzierten Düngereinsatzes (130 kg N/ha) als Low-Input-Variante und ein Wechsel der Düngerform (Calciumammoniumnitrat (CAN) zu Harnstoff) bei unterschiedlichen Herkunftsregionen für verschiedene Wirkungskategorien dargestellt. Für die Gesamtbilanz zeigen sich Optimierungsmöglichkeiten von 10-20 %, sofern Optimierungen in einer Kategorie nicht durch wesentlich höhere Belastungen bei anderen Wirkungen erkauft werden, wie dies anhand der Zunahme des Versauerungspotentials bei den Harnstoff-Szenarien verdeutlicht wird. Bei der Zuckerrübensaat werden im Beispielbetrieb aus Gründen des Bodenschutzes vielfach Mulchsaatverfahren angewendet. Bei dieser Bilanzierung fällt vor allem der Schleppereinsatz und die damit verbundenen CO₂-Emissionen ins Gewicht. Bei Vergleich der Emissionen für einen Hektar Zuckerrübenfläche wird für die Mulchsaat ein geringerer CO₂-Ausstoß prognostiziert, der in der Größenordnung von 100 kg/ha liegt. Je nach Mulchsaatverfahren - mit oder ohne Zwischenfruchteinsaat, unterschiedlicher Anzahl von Grubbergängen - kann sich diese Einschätzung auch ins Gegenteil verkehren.

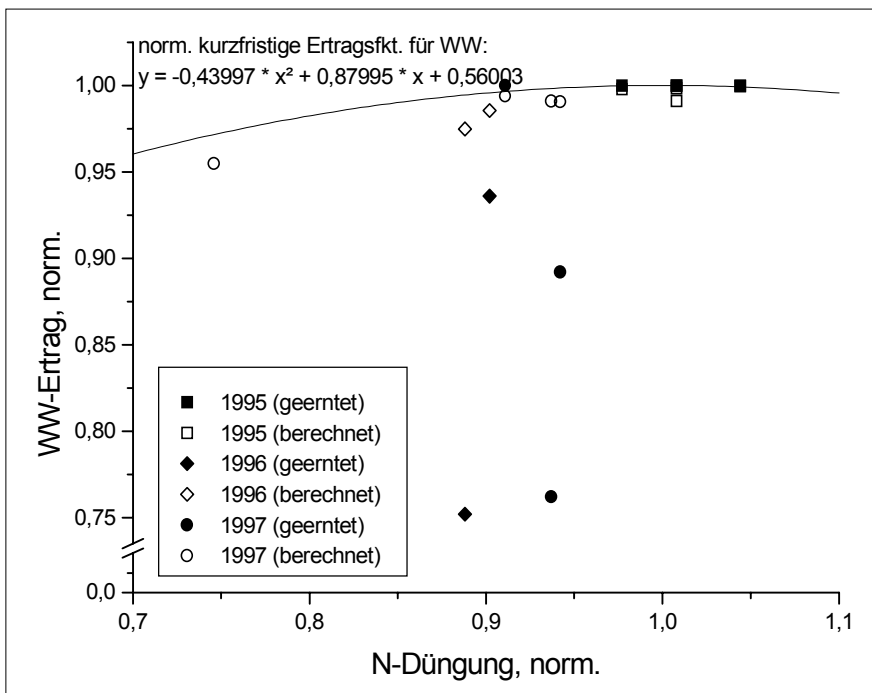


Abbildung 6: Berechnete und geerntete WW-Erträge (Relativerträge) und die zugrundeliegende Relativertragsfunktion in Abhängigkeit von der relativen N-Düngung (Optimalertrag im Betriebsmittel: 88 dt WW/ha, N-Düngung: 208 kg N/ha)

Abschließend sind hier in Abbildung 6 die erwirtschafteten den im Stoffstromnetz über die Wachstumstransitionen berechneten Weizenenerträge als Relativerträge der Jahre 1995 bis 1997 gegenübergestellt. Bei zwei der neun vorliegenden Vergleichswerte kann das verwendete Modell den Ertrag nicht hinreichend

nachbilden (Abweichung größer als 20 %). Die vorliegenden Witterungsdaten liefern vorerst keinen Erklärungshinweis auf diese Diskrepanz, da sowohl die Temperaturen als auch die Niederschläge für die entsprechenden Jahre keine außergewöhnlichen Abweichungen aufweisen. Als Erklärung sind noch weitere, im Modell nicht berücksichtigte Einflüsse denkbar, wie z.B. starker Schädlings- oder Pilzbefall.

Fazit

Grundsätzlich ist die Anwendung von Stoffstromanalysen im landwirtschaftlichen Kontext ein geeignetes Mittel, die Umweltwirkungen des gesamten Agrarsektors zu erfassen und ökologische Entwicklungsziele zu definieren. Die bisherigen Arbeiten zeigen, daß Stoffstromanalysen auf Marktfruchtbetrieben unterschiedlicher Struktur einsetzbar sind. Die Abbildung der technischen Systeme und der Betriebsmittelbereitstellung las-

sen sich in Abhängigkeit der verfügbaren Basisdaten für die Landwirtschaft allgemein gut darstellen. Die Simulation dynamischer agrarökologischer Prozesse ist mit Stoffstromnetzen dagegen nur bedingt möglich. Daher wird zur Formulierung standortspezifischer Schutzziele im Trinkwasserschutz die Kopplung der Stoffstromnetze mit anderen Modelltypen vorgeschlagen. Die Integration monetärer Flüsse in das Stoffstromnetz (in der Bearbeitung) ermöglicht Parallelstudien zu den ökologischen und ökonomischen Effekten bei veränderter Wirtschaftsweise, so daß eine Optimierung der Betriebe im Sinne des Trinkwasserschutzes vorgenommen werden kann.

Literatur

AHBE, S., A. BRAUNSCHWEIG und R. MÜLLER-WENK, 1990: Methodik der Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung. BUWAL-Schriftenreihe Umwelt Nr. 133, Bern.

BOUWMAN A. F., 1996: Direct immission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **46**, 53-70.

GOEDKOOP, M., 1995: The eco-indicator 95, final report. NOH report **9523**, Novem, Utrecht.

GREEN, M.B., 1987: Energy in Pesticide Manufacture, Distribution and Use. In: HELSEL, Z.R. (Hrsg.): *Energy in Plant Nutrition and Pest Control*. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokio.

KRAYL, E., 1993: Strategien zur Verminderung der Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft. Vauk, Kiel.

PATYK, A. und G. REINHARDT, 1997: Düngemittel - Energie und Stoffstrombilanzen. Vieweg, Wiesbaden.

SCHMIDT, M. und A. SCHORB, 1995: Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. Springer, Berlin.

SCHMIDT, M. und A. HÄUSLEIN, 1997: Ökobilanzierung mit Computerunterstützung: Produktbilanzen und betriebliche Bilanzen mit dem Programm Umberto. Springer, Berlin.

UBA, 1995: Ökobilanz für Getränkeverpackungen. UBA-Texte **52/95**, Umweltbundesamt, Berlin.

WENZEL, H., M. HAUSCHILD und L. ALTING, 1997: Environmental assessment of products. Vol. 1: Methodology, tools and case studies in product development. Chapman & Hall, London.