



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 12.12. 2011

Ökobilanzierung des Anbaues von Zwischenkulturen zur Biogasproduktion



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches
Volkswirtschaftsdepartement EVD
Forschungsanstalt
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART
Reckenholzstrasse 191
CH-8046 Zürich
bzw.
Tänikon
CH-8356 Ettenhausen
www.agroscope.admin.ch

Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Futterbaues (AGFF)
Reckenholzstrasse 191
CH-8046 Zürich
<http://www.agff.ch>

Ernst Basler + Partner AG
Zollikerstrasse 65
8702 Zollikon
www.ebp.ch

Schweizerischer Bauernverband
Laurstrasse 10
5200 Brugg
www.bauernverband.ch

Autoren:

Frank Hayer, ART, frank.hayer@art.admin.ch
Deborah Scharfy, ART, deborah.scharfy@art.admin.ch
Gérard Gaillard, ART, gerard.gaillard@art.admin.ch
Victor Anspach, ART, victor.anspach@art.admin.ch
Gregor Albisser Vögeli, ART, jetzt Agrofutura

BFE-Bereichsleiterin: Sandra Hermle

BFE-Programmleiterin: Sandra Hermle

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154350 / 103302

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Glossar	4
Abstract	5
1. Einleitung	9
2. Methodik.....	11
2.1. <i>Ausgewählte Zwischenfrüchte und Varianten</i>	11
2.2. <i>Erstellung der Sachbilanz.....</i>	12
2.2.1. <i>Datengrundlage und Annahmen</i>	12
2.2.2. <i>Berechnung der Feldemissionen.....</i>	13
2.3. <i>Wirkungsabschätzung</i>	15
2.4. <i>Ökonomische Bewertung</i>	15
2.5. <i>Auswertungskonzept</i>	16
2.6. <i>Grenzen der Studie</i>	19
3. Ergebnisse der ökonomischen Analyse und der Ökobilanzierung	20
3.1. <i>Vergleich der Gründungskulturen.....</i>	20
3.1.1. <i>Reduktion des aquatischen Eutrophierungspotentials</i>	20
3.1.2. <i>Umweltwirkung und Kosten des Anbaues.....</i>	21
3.2. <i>Produktion von Grundfutter aus Zwischenkulturen</i>	25
3.2.1. <i>Ressourcenmanagement</i>	25
3.2.2. <i>Nährstoffmanagement</i>	29
3.2.3. <i>Schadstoffmanagement.....</i>	33
3.2.4. <i>Kosten-, Leistungsrechnung.....</i>	37
3.2.5. <i>Zusammenfassung</i>	39
3.3. <i>Stromerzeugung aus Zwischenkulturen</i>	40
3.3.1. <i>Ressourcenmanagement</i>	40
3.3.2. <i>Nährstoffmanagement</i>	46
3.3.3. <i>Schadstoffmanagement:</i>	48
3.3.4. <i>Kosten-, Leistungsrechnung.....</i>	49
3.3.5. <i>Zusammenfassung</i>	52
3.3.6. <i>Schlussfolgerung und Diskussion</i>	53
Auswahl der Ökoinventare zuhanden der ecoinvent-Datenbank...Fehler! Textmarke nicht definiert.	
Literatur	57
Verdankung.....	59
Abbildungsverzeichnis	60
Tabellenverzeichnis	64
Anhang	66

Glossar

Abkürzungen und Einheiten

1,4-DCB	1,4-Dichlorbenzen (CAS-Nummer 106-46-7)
Äq./eq.	Äquivalente
BHKW	Blockheizkraftwerk
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
G	Gülldüngung
GD	Gründüngung
ha	Hektare
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
kWh	Kilowattstunde
M	Mineraldüngung
m ³	Kubikmeter
MJ	Megajoule
MJ ME	Megajoule umsetzbare -, verdauliche Energie
N	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid/Lachgas
NEE	Nicht-erneuerbare Energie/n
NH ₃	Ammoniak
ÖLN	Ökologischer Leistungsnachweis
P	Phosphor
Standardmischung 101	Wick-Hafer-Gemenge, nicht überwinternd
SFr.	Schweizer Franken
Standardmischung 106	Kleegrasmischung: 56 % Westerwold. Raigras, 28 % Alexandrinerklee, 17 % Perserklee
Standardmischung 200	Kleegrasmischung: 57 % Italienisches Raigras, 43 % Rotklee
Standardmischung 210	Kleegrasmischung: 33 % Italienisches Raigras, 20 % Westerwold. Raigras, 33 % Rotklee, 13 % Alexandrinerklee
SZK	Sommerzwischenkulturen
THG	Treibhausgase
TS/TM	Trockensubstanz/Trockenmasse
UE	umsetzbare Energie
UCTE	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity
WZK	Winterzwischenkulturen

Executive Summary

Mit steigender Nachfrage nach erneuerbaren Energien ist die Biogaserzeugung aus pflanzlicher Biomasse auch ein Thema in der Schweiz. Die landwirtschaftliche Nutzfläche, die der Nahrungsmittelproduktion in der Schweiz dient, soll jedoch in ihrer Funktion erhalten und nicht primär zur Bioenergieproduktion genutzt werden. Unter dieser Voraussetzung könnte die Verwendung von Zwischenkulturen als Kosubstrat in Biogasanlagen eine Möglichkeit zur Steigerung der Bioenergieproduktion darstellen, da diese nicht in der Hauptvegetationsperiode angebaut werden und darüber hinaus nicht direkt der Nahrungsmittelproduktion dienen.

Zu den Zielen der vorliegende Studie gehört, zum einen den Anbau von Zwischenkulturen zur Biogaserzeugung als potentielle Alternative zum Anbau von Hauptkulturen zu untersuchen. Zum anderen die Eignung von Zwischenfrüchten zur Grundfutterproduktion zu beleuchten, wobei die Analyse die ökologischen Aspekte und die zusätzlichen Kosten des Anbaus einbezieht. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt jedoch in der Abschätzung der Umweltauswirkungen mithilfe der Ökobilanzierung. Berücksichtigt wurden dabei Treibhausgasemissionen, der Bedarf an nicht-erneuerbaren Energien, die Ozonbildung, Eutrophierung, Versauerung sowie öko- und humantoxische Wirkungen. Bilanziert wurden Gründüngungskulturen (Senf und Phacelia), Sommerzwischenkulturen (Sonnenblumen, Standardmischung 101 und 106 sowie ebenfalls Senf und Phacelia) und Winterzwischenkulturen (Italienisches Raigras und die Standardmischungen 200 und 210) jeweils in verschiedenen Varianten, die sich in der Düngung (0-80 kg Stickstoff), der Anzahl Nutzung (1-3) und der Düngerart (Gülle oder mineralische Düngung) unterscheiden.

Zusammenfassend kann für die Gründüngungen festgehalten werden, dass es nach den vorliegenden Ergebnissen sowohl ökologisch als auch ökonomisch am sinnvollsten ist, diese nicht zu düngen. Zum einen sind die klima-, wasser- und bodenbelastenden Emissionen sowie die Kosten am geringsten, zum anderen ist das Potential zur Reduktion der Eutrophierung, in kg N-Äq. ausgedrückt, am höchsten. Allerdings ist dabei zu bedenken, dass eine Düngung in vielen Fällen eine gute Bestandsentwicklung garantiert und damit die Funktion der Gründüngung sicherstellt.

Für die Grundfüttererzeugung aus Zwischenkulturen ergeben sich unabhängig von der Düngerart folgende Tendenzen. Pro MJ umsetzbare Energie (MJ UE) sind die intensiven Winterzwischenkulturen (WZK) mit 3 Schnitten und die ungedüngte Standardmischung 101 (SM101; Wick-Hafer-Gemenge) die effizientesten Varianten hinsichtlich des Ressourcen-, Schadstoff- und Nährstoffmanagements. In allen betrachteten Kategorien mit Ausnahme des Treibhausgasausstosses und der Versauerung verursachen die intensiveren WZK Varianten mit 3 Schnitten die niedrigsten Effekte. Dabei treten nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Varianten mit 60 kg bzw. 80 kg Stickstoffdüngung auf. Für das Raigras ergibt sich jedoch ein leichter Vorteil gegenüber den beiden Kleeegrasmischungen (SM 210 und SM200). Die Umweltwirkungen der Sommerzwischenkulturen (SZK) sind durchweg höher verglichen mit den intensiven WZK. Als Ausnahme zu nennen ist hier die ungedüngte SM101, die gegenüber den intensiven WZK ein um 74% niedrigeres Versauerungspotential, um 48 % niedrigere Treibhausgasemissionen und ein vergleichbares Potential der aquatischen Toxizität aufweist. Die niedrigsten Anbaukosten pro MJ UE erreichen die mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Unabhängig von der Düngung verursachen dabei die Varianten 3-Schnitt-Raigras mit 80 kg N-Düngung und SM210 3-Schnitt mit 80 kg N die geringsten Kosten in Höhe von 4.4 Rp. pro MJ UE bei mineralischer Düngung und 5 Rp. wenn Gülle zur Düngung verwendet wird. Vergleichsweise hohe Kosten weisen vor allem die

SZK auf, deren Kosten zwischen 5.5 und 8 Rp. pro MJ UE liegen. Allerdings kann keine der Zwischenkulturen hinsichtlich der Kosten mit Mais konkurrieren. Die Bereitstellungskosten von Grundfutter aus Zwischenkulturen sind um 50 – 280 % höher.

Ziel der energetischen Verwertung von Zwischenkulturbiomasse ist die Erzeugung von Strom bzw. Wärme. Um die Umweltwirkung der Erzeugung von Strom aus Zwischenkulturen abschätzen zu können, wurde für diesen Teil der Auswertung zusätzlich zur Produktion und Konservierung der Biomasse die Umweltwirkungen der Biogasproduktion berücksichtigt. Da bei der Stromerzeugung als Koprodukt Wärme anfällt, ist eine Allokation der Umweltwirkungen auf die beiden Produkte angebracht. Die Allokation erfolgte anhand der Exergie. Überdies reduziert der Anbau von Zwischenkulturen auch die Nitratverluste über Winter, eine Leistung, die ansonsten durch den Anbau einer Gründüngung erreicht werden kann. Diese zusätzliche Leistung wird den Zwischenkulturen als Gutschrift angerechnet, indem nur die Umweltwirkungen berücksichtigt werden, die durch Düngung, Ernte, Konservierung im Vergleich zu einer Gründüngung zusätzlich entstehen. Nicht einbezogen wurden dagegen Leistungen, die durch die Nutzung der Anbaubiomasse in einer Biogasanlage entstehen können (z. B. Erhöhung des Düngewertes, weitere Reduzierung der N-Verluste, phytosanitäre Wirkungen, ...).

Betrachtet man die Biogaserzeugung aus Zwischenkulturbiomasse, ergibt sich folgendes Bild.

- Die Stromproduktion aus allen Zwischenkulturen bedarf weniger nicht-erneuerbarer Energie als der Strom des Schweizer Strommixes. Dabei ist der Energiebedarf pro kWh vor allem in den intensiveren Varianten der WZK deutlich niedriger als in den SZK. Lediglich die SM101 und die 2 Schnitt Varianten der SM 106 erreichen einen Energiebedarf, der nur unwesentlich höher ist als der der WZK.
- Eine gesteigerte Düngung führt in fast allen Fällen zu einem gleichbleibenden oder höheren Energiebedarf pro kWh
- In der Regel führt eine gesteigerte Schnitzzahl bei gleichbleibendem Düngerniveau zu einem höheren Energiebedarf pro kWh.
- Der Strom aus allen Zwischenkulturvarianten verursacht, unter der hier getroffenen Annahme, dass jeweils 50 % der Anlagen ohne bzw. mit gasdichtem Nachgärer ausgestattet sind, höher Treibhausgasemissionen pro kWh als der aktuelle Schweizer Strommix. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass der Schweizerische Strommix sehr stark auf Wasser- und Atomkraft basiert und dass die in ecoinvent abgebildete landwirtschaftliche Biogaserzeugung insgesamt pro kWh erzeugten Strom bereits höhere Emissionen aufweist als der Schweizer Strommix.
- Findet die Vergärung in 2-stufigen Anlagen, mit gasdichtem Fermenter und Nachgärer, statt, so verursacht die Stromerzeugung aus 6 Varianten einen geringeren Treibhauseffekt als der Schweizer Strommix.
- Im Vergleich zum Produktionsmix UCTE (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity) erreichen nahezu alle Zwischenkulturen in $\text{kg CO}_2\text{-Äq.} \cdot \text{kWh}_{\text{el}}^{-1}$ gemessen einen niedrigeren Treibhauseffekt.

Darüber hinaus verursachen die 8 Varianten mit dem niedrigsten Treibhausgasausstoss, im Vergleich zum Schweizer Strommix:

- einen höheren Ausstoss von versauernden Substanzen
- in den meisten Fällen eine deutlich höhere Eutrophierung. Lediglich für die Sonnenblumenvarianten ist das Potential negativ, wodurch diese Varianten als günstiger einzustufen sind.
- in neun von zehn Fällen eine im Vergleich mit dem Schweizer Strommix niedrigere aquatische Toxizität, wohingegen im Bezug auf die terrestrische Toxizität und die Humantoxizität der aktuelle Strommix als vorteilhaft einzustufen ist.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht betrachtet ergeben sich folgende Punkte.

- Vor allem das Raigras und die Standardmischungen sind von den Bereitstellungskosten als interessant einzustufen, wohingegen Senf und Phacelia sehr hohe Kosten verursachen.
- Die Varianten mit einer Nutzung (einem Schnitt) erreichen die geringsten Bereitstellungskosten pro kWh Biogasstrom.
- Eine gesteigerte Düngung der Zwischenkulturen bei gleichbleibender Schnitzzahl führt überwiegend zu geringeren Kosten pro kWh.

Eine eindeutige Empfehlung einzelner Varianten kann unter den jetzigen Umständen nicht abgeleitet werden, obwohl 6 Varianten bei einer Vergärung in zweistufigen Anlagen, einen Treibhauseffekt verursachen, der unterhalb des aktuellen Schweizer Strommixes liegt, da diese von den Bereitstellungskosten und dem Ertrag als ungünstig einzustufen sind. Allerdings können aus der Auswertung einige allgemeine Punkte abgeleitet werden.

- Wenn ein möglichst geringer THG-Ausstoss pro kWh das Ziel ist, sind die wenig intensiven SZK, mit geringer Düngung und einem Schnitt, zu bevorzugen. Vorteile dieser Option sind die im Vergleich zur GD nur geringfügig höheren Umwelteffekte pro ha und die niedrigen Auswirkungen pro kWh. Ein Nachteil ist der geringe Ertrag und das dadurch niedrige Reduktionspotential in kg CO₂ Äq. pro ha bei hohen Kosten.
- Wäre das Ziel, ein im Vergleich zum Import von Strom möglichst grosses Reduktionspotential pro ha auszuschöpfen, müssten die intensiveren WZK mit 60 bzw. 80 kg Stickstoffdüngung empfohlen werden. Dies hätte erhöhte Umwelteffekte in einigen anderen Umweltkategorien, allen voran der Versauerung, zur Konsequenz.

Die hier präsentierte Auswertung gibt eine erste Einschätzung der Umwelteffekte der Biogaserzeugung aus Zwischenkulturbiomasse. Allerdings sind die Ergebnisse, wie Kapitel 2.6 erwähnt, unter Berücksichtigung der Grenzen der Studie zu interpretieren. Hier ist vor allem die stark vereinfachte Betrachtung der Biogaserzeugung zu nennen, die nicht die gesamte Komplexität der Biogaserzeugung berücksichtigt. Eine weitere Analyse der Erzeugung von Strom aus Zwischenkulturbiomasse sollte daher die folgenden Fragen beinhalten:

- Inwiefern ändern sich die Ökoinventare der Biogaserzeugung, wenn andere Substrate durch Zwischenkulturbiomasse ersetzt werden?
- Inwiefern ändern sich die Ökoinventare der Biogaserzeugung, wenn energiereiche Zwischenkulturbiomasse zur Ergänzung von Hofdünger im Substratmix eingesetzt wird?
- Mit Hilfe welcher innovativen Systeme kann die Bilanz verbessert werden? Hier sind vor allem das Zweikulturnutzungssystem und Zwischenkulturmischung (z.B. Rübse, Senf, Alexandrinerklee, Perserklee) nennen.
- Wie ändert sich die Wirtschaftlichkeit des Zwischenkulturanbaus bei unterschiedlichen Anbausystemen?
- Wie ändern sich Ökobilanzen und Wirtschaftlichkeit von modernen Biogasanlagen mit unterschiedlichen Fütterungsstrategien?

1. Einleitung

Erneuerbare Energien und die effiziente Nutzung nachwachsender Rohstoffe werden in ganz Europa und den angrenzenden Ländern gefördert, um die Verwendung fossiler Energie und somit die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Darüber hinaus ist die Biogaserzeugung im letzten Jahrzehnt zu einem zweiten Einkommen für Landwirte z.B. in Deutschland geworden. Der Anteil von Strom aus Biomasse am gesamten Stromverbrauch betrug in Deutschland im Jahr 2010 ungefähr 5.5 % (BMU 2011) wohingegen der Anteil in der Schweiz lediglich bei 2.14 % lag (BFE 2011). Dieser Unterschied erklärt sich durch die Tatsache, dass in der Schweiz, im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern, die Stromerzeugung aus Hauptkulturen, allen voran Mais, nicht gefördert wird (Burkard et al. 2009), da sie die Erzeugung von Nahrungsmitteln konkurrenziert. Um negative Auswirkungen des Anbaus zu beschränken, sollten Energiepflanzen soweit möglich auf nicht-landwirtschaftlichen Flächen oder zumindest ausserhalb der Hauptwachstumsperiode produziert werden (Tilman et al. 2009). Unter diesem Gesichtspunkt können Zwischenkulturen eine interessante Alternative darstellen, da sie in der Nebenwachstumsperiode im Herbst nach den Hauptkulturen angebaut werden und darüber hinaus nicht direkt der menschlichen Ernährung dienen.

Zwischenkulturen werden heute schon bei der landwirtschaftlichen Bioenergieproduktion eingesetzt (Bühle et al. 2011; Heggenstaller et al. 2008), wo sie zusätzlich zu landwirtschaftlichen Abfällen als landwirtschaftliche Biomasse in Biogasanlagen verwendet werden. Da sie wie z.B. Kleeegrasmischungen aber häufig als Grundfutter in der Tierproduktion genutzt werden, bedeutet die Verwendung als Biogassubstrat indirekt eine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Allerdings besteht noch ein erhebliches Anbaupotential, da nicht nur aus Gründen der Bodenschonung oder zu geringer Niederschläge, sondern auch aufgrund zusätzlicher Kosten für Saatgut und Feldarbeiten, auf vielen Flächen keine Zwischenkulturen angebaut werden. Zwischenkulturen bieten daher ein Potential, neben den klassischen Funktionen wie z.B. Reduktion von Nitratauswaschung und Erosion sowie Humusaufbau zusätzliche Biomasse zur Energieerzeugung zur Verfügung zu stellen und darüber hinaus den Landwirten ein neue Einkommensquelle zu eröffnen (Kemp 2011).

Die Nachhaltigkeit der wichtigsten Energiepflanzen wurde in verschiedenen Ökobilanzstudien analysiert, mit unterschiedlichen Ergebnissen für die Kulturen und Energieprodukte (Hanegraaf et al. 1998; Pimentel 2003; Zah et al. 2007). Überwiegend sind die Umweltwirkungen der Bioenergieträger in den Kategorien Bedarf an nicht erneuerbaren Energien und dem Treibhausgaspotential niedriger als die der fossilen Referenzen, dafür weisen sie meist eine höhere Eutrophierung und Versauerung auf (Reinhardt & Zemanek 1999). Zwischenkulturen wurde jedoch in keiner Untersuchung berücksichtigt. Mit der vorliegenden Studie soll diese Lücke geschlossen werden. Der Fokus lag dabei auf der Erzeugung von Strom aus der Zwischenkulturbiomasse, jedoch wurden auch Aspekte der Grundfüttererzeugung, Gründüngung und der Ökonomie berücksichtigt. Die Umweltwirkung wurde mit Hilfe der Ökobilanzierung bewertet. Ökobilanzen sind zur umfassenden Bewertung der Umweltauswirkung von landwirtschaftlichen Anbausystemen geeignet. Die Methode SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment; www.agroscope.admin.ch/oekobilanzen/01199/index.html?lang=de) erlaubt es, die Besonderheiten landwirtschaftlicher Systeme zu berücksichtigen (Nemecek et al. 2011a; Nemecek et al. 2011b) und gewährleistet eine Inventarisierung nach ecoinvent Standard (Frischknecht et al. 2007), der weltweit grössten Ökoinventar-Datenbank mit expertengeprüften Datensätzen. Die

ökonomische Analyse der Kosten und Leistungen ist wichtig für die Beurteilung der Nachhaltigkeit im Sinne monetärer Ressourcen, aber auch im Hinblick auf die Erarbeitung von Anbauempfehlungen für Landwirte. Durch den Vergleich der Verfahrenskosten mit dem potentiellen Biogas-Ertrag gehen wir davon aus, dass Landwirte ihre Anbauentscheidungen anhand der Produktionskosteneffizienz der Zwischenkulturen treffen werden.

Hauptziele der Studie sind:

1. Die ökologische Bewertung der Zwischenkulturen hinsichtlich ihrer Eignung zur Biogaserzeugung und Analyse der Schwachstellen der einzelnen Kulturen.
2. Erstellung und Kommunikation von Entscheidungsgrundlagen zuhanden der betroffenen Akteure aus Praxis, Beratung und Behörden.
3. Erstellung von Ökoinventaren für ausgewählte Zwischenkulturen zuhanden der ecoinvent-Datenbank.

2. Methodik

2.1. Ausgewählte Zwischenfrüchte und Varianten

Die Auswahl der zu bilanzierenden Gründüngungen und Zwischenkulturen wurde im Projektteam und mit der Begleitgruppe diskutiert und erfolgte schlussendlich aufgrund der Anbauhäufigkeiten in der Schweiz. Untersucht wurden zwei Gründüngungskulturen (Senf und Phacelia), fünf Sommerzwischenkulturen (Sonnenblumen, Standardmischung 106 und 101, sowie ebenfalls Senf und Phacelia) und drei Winterzwischenkulturen (Italienisches Raigras und die Standardmischungen 200 und 210). Für jede Kultur wurden mehrere Inventare erstellt, die sich in den Saatzeitpunkten, der Schnitthäufigkeit (1-3 Schnitte), den Düngertypen (Rindergülle und Mineraldünger) und der Düngermenge unterscheiden (Tabelle 1). Die Anbaudauer variiert je nach Kategorie. Sie beträgt 3-4 Monate für die Gründüngungen, 1.5-2.5 Monate bei den Sommerzwischenkulturen und 8 bzw. 9 Monate bei den Winterzwischenkulturen. Der dritte Schnitt in den Winterzwischenkulturen findet im Frühjahr Ende April statt. Insgesamt wurden 56 Zwischenkultur-Inventare erstellt. Die Produktionsinventare sind in Tabelle 8 bis Tabelle 12 im Anhang aufgeführt.

Um die Effekte der unterschiedlichen Anbaudauer der Zwischenkulturen auf Eutrophierung und die induzierten Treibhausgas zu berücksichtigen und die gesamte Periode zwischen Ernte einer Hauptkultur im Spätsommer und der Aussaat der nächsten Kultur im Frühjahr in die Analyse einzubeziehen, wurden insgesamt 8 Inventare für die Hauptkultur Silomais unter der Berücksichtigung von vorhergehender Brache, Gründüngung, Sommer- und Winterzwischenkultur erstellt. Silomais-Inventare wurden mit dem Endprodukt Silomais-Silageballen erstellt, mit der gleichen Systemgrenze wie bei den Zwischenkulturen. Dabei wurde ebenfalls, wie bei den Zwischenkulturen, eine mit Gülle gedüngte und einer mineralisch gedüngten Variante berücksichtigt.

Tabelle 1: Varianten der bilanzierte Zwischenkulturen.

Kultur	Dünger	Düngung (kg N)	Aussaat	Schnittzahl	Varianten
Phacelia	Mineralisch/Gülle	0/40/60	Aug./Sept.	1	8
Senf		0/20/60	Aug./Sept.	1	8
SM101		0/30	Aug.	1	4
SM106		0/30/60	Aug.	1/2	8
Sonnenblume		20/30	Aug.	1	4
Raigras		40/60/80	Aug./Sept.	1/3	8
SM200		40/60/80	Aug./Sept.	1/3	8
SM210		40/60/80	Aug./Sept.	1/3	8
				Total	56

2.2. Erstellung der Sachbilanz

2.2.1. Datengrundlage und Annahmen

Die Ökoinventare wurden nach der SALCA-Methode für den Pflanzenbau (Nemecek & Erzinger 2005; Nemecek et al. 2004) unter Beachtung der Qualitätskriterien von ecoinvent (Frischknecht et al. 2007) erstellt. Das System umfasst alle Produktionsmittel, die für den Anbau der Zwischenkulturen bis zur Produktion von Siloballen aufgewendet werden (siehe Abbildung 1) sowie die relevanten direkten und induzierten Feldemissionen. Bei dem Vergleich zwischen mit Gülle bzw. mineralischem Dünger gedüngten Varianten ist anzumerken, dass die Herstellungsprozesse der Düngerarten nicht gleichermassen in die Bilanz von Pflanzenbau-Inventaren einfließen. Bei mineralisch gedüngten Varianten werden die Umweltwirkungen der Herstellung in der Bilanz aufgenommen, wohingegen die Gülle als ein Abfallprodukt der Tierhaltung angesehen wird, was zur Folge hat, dass der Gülle nur die Aufbereitung zur Ausbringung und die Ausbringung selber angerechnet werden (Nemecek & Kägi 2007). Aus Konsistenzgründen wurde dasselbe Vorgehen für die Gärreste gewählt. Die Emissionen, die bei der Lagerung entstehen, sind im System inbegriffen. Emissionen bei der Ausbringung werden der Kultur zugeordnet, in der die Biogasgülle ausgebracht wird, da diese auch die positiven Effekte, z.B. eine geringe Düngung aufgrund der enthaltenen Nährstoffe, angerechnet bekommt.

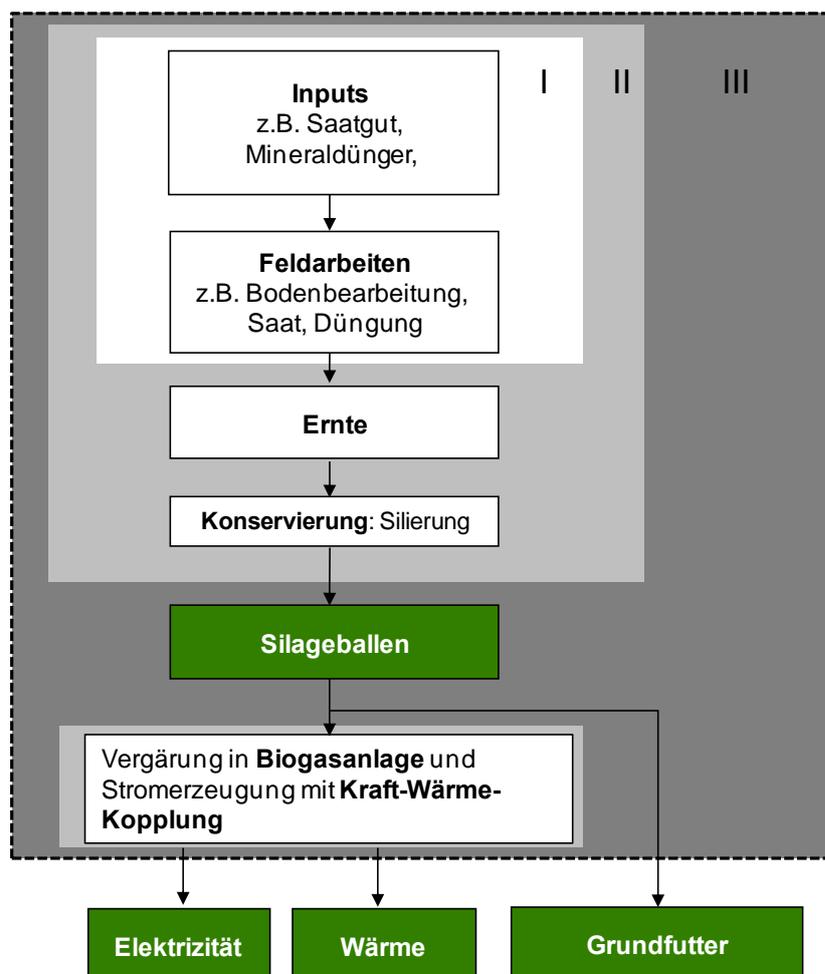


Abbildung 1: Für die Analyse verwendete Systemgrenzen. Systemgrenze I (weiss hinterlegter Bereich) gilt für die Gründüngungskulturen, Systemgrenze II (hellgrau hinterlegt) ist gültig für den Vergleich der Futtererzeugung und Systemgrenze III (Dunkelgrau hinterlegt) für die Energieerzeugung aus Zwischenkulturen.

Für die Zusammenstellung der Sachbilanz kamen unterschiedliche Quellen zur Anwendung. Darüber hinaus waren einige Annahmen nötig, die im Folgenden kurz erläutert sind. Eine Zusammenstellung der Produktionsinventare ist im Anhang (Tabelle 8 - Tabelle 12) aufgeführt. Die Erträge sind in Tabelle 24 zusammengestellt.

- Die Saatgutmengen wurden verschiedenen Literaturquellen entnommen (LBL et al. 2003; Lehmann et al. 1991; Suter et al. 2008).
- Die Anbaumassnahmen sind entsprechend der Schweizer Praxis modelliert (Boessinger et al. 2004), wobei Gülle hälftig mit Schleppschlauch bzw. Fassverschlauchung ausgebracht wird. Informationen zur Düngung entstammen der GRUDAF 2009 (Flisch et al. 2009).
- In den erstellten Zwischenkulturinventaren ist keine Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln enthalten. Pflanzenschutzmittel werden jedoch in den Vorketten eingesetzt. Zu nennen sind hier insbesondere gebeiztes Sonnenblumensaatgut sowie ein indirekter Einsatz, der nötig ist, um das Hafersaatgut der Standardmischung SM 101 (Wick-Hafer-Gemenge) herzustellen. Da in ecoinvent keine Daten zu Hafersaatgut vorliegen, ist dieses mit Weizensaatgut angenähert.
- Die Ertragsdaten der Zwischenkulturen stammen aus Lehmann et al. (1991), wobei in Anlehnung an AGRIDEA (2007) die Feldverluste mit 10 % des Ertrages angesetzt sind. Die Energie und Rohproteingehalte des Erntegutes entstammen der Swissfeed Datenbank (ALP 2011) die Biogaserträge verschiedenen Quellen (Oechsner et al. 2003; Amon 2006; FNR 2008; Hartmann & Sticksele 2009).
- Als Stromertrag wurden 2 kWh pro m³ Biogas angenommen. Dieser Wert berechnet sich aus einem Heizwert von 5.45 kWh pro m³ (FNR 2008) und einem BHKW Wirkungsgrad_{elektrisch} von 38 % (Dauriat et al. 2011).
- Der Trockenmassegehalt bei der Silierung wurde für die Sommer- und Winterzwischenkulturen auf 35 % festgesetzt. Für die Sommerzwischenkulturen Senf, Phacelia und Sonnenblume, die im Herbst trotz anwelken keine Trockenmasse-Gehalte über 30 % erreichen (Aigner & Sticksele 2010; Stülpnagel 2007), wurde mit einem Wert von 25 % gerechnet.
- Ausgangspunkt für die Berechnung Anzahl Siloballen bildet der Frischsubstanzenertrag bei 35 % respektive 25 % TM-Gehalt abzüglich der Feldverluste und ein durchschnittliches Ballengewicht von 900 kg für Maissilageballen bzw. 700 kg für die anderen Kulturen.
- Für die Emissionen aus den Vorketten z.B. Produktion und Transport von Betriebsmitteln wurden Ökoinventare aus der ecoinvent-Datenbank Version 2.2 (ecoinvent Centre 2007) und aus der SALCA-Datenbank Version 081 (Kägi 2008) verwendet, welche die Input- und Outputflüsse für verschiedenste Produkte und Prozesse beinhalten. Die verwendeten Inventare sind in Tabelle 13 aufgeführt.

2.2.2. Berechnung der Feldemissionen

Die Berechnung des Bodenabtrags, der Nährstoffausträge und der Treibhausgasemissionen wurde unter Berücksichtigung aller pflanzenbaulichen Massnahmen und kulturspezifischer Eigenschaften durchgeführt. Überwiegend werden die Emissionen mit Modellen berechnet, die von Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) im Rahmen der Arbeiten an der Methode SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment) erstellt wurden. Für andere Emissionen wie z. B. Lachgas wurden IPCC Emissionsfaktoren verwendet. Das System umfasst den

Zeitraum zwischen der Ernte einer Vorkultur, die bis Mitte August bzw. Mitte September räumt und der Aussaat des Mais im Mai des darauffolgenden Jahres. Der betrachtete Zeitraum beträgt somit 9 bzw. 10 Monate. Die Berücksichtigung der nachfolgenden Kultur gewährleistet die Vergleichbarkeit der direkten Feldemissionen von Gründungen, Sommer- und Winterzwischenkulturen, die sich im Anbauzeitraum erheblich unterscheiden. Im Folgenden sind die Berechnungsgrundlagen für die direkten Feldemissionen aufgeführt.

- Ammoniak (NH_3): Ammoniakverluste bei der Ausbringung von Mineraldüngern wurden gemäss Menzi et al. (1997) berechnet. Die Berechnung der NH_3 -Verluste bei der Ausbringung von Hofdüngern basiert auf Katz (1996) aus Menzi et al. (1997).
- Nitrat (NO_3^-): Die Abschätzung der Nitratauswaschung wurde mit dem Modell SALCA-NO3 beschrieben in Richner et al. (Richner et al. 2011) in der Version 4.6 vorgenommen. Die Berechnung erfolgt auf monatlicher Basis unter Verwendung der N-Mineralisierung im Boden sowie der N-Aufnahme durch die jeweilige Kultur. Zusätzlich wird das Nitrat-Auswaschungsrisiko durch Einsatz von Düngern während ungünstiger Perioden unter Berücksichtigung der Kultur, des Ausbringungsmonats und der potentiellen Wurzeltiefe errechnet. Da die Methode SALCA-NO3 die direkten Feldemissionen nur für den Anbauzeitraum von Aussaat bis zur Ernte berechnet und sich dieser für die betrachteten Varianten zum Teil deutlich unterscheidet, muss zusätzlich die nachfolgende Hauptkultur berücksichtigt werden, um die Umweltwirkung über die gesamte Periode zwischen zwei Hauptkulturen betrachten zu können. Für die vorliegende Analyse wurde Mais als nachfolgende Kultur gewählt, da alle betrachteten Zwischenkulturen aus pflanzenbaulicher Sicht vor Mais angebaut werden können. Insgesamt ergeben sich 6 Varianten für die Hauptkultur Silomais jeweils gülle- bzw. mineralisch-gedüngt mit vorhergehender Brache, Sommer- und Winterzwischenkultur. Die Variante Mais ohne Zwischenkultur dient der Abschätzung des potentiellen Nitratverlustes.
- Lachgas (N_2O): Die Emissionsfaktoren für die Berechnung der Lachgasemissionen stammen aus IPCC 2006. Dabei werden sowohl die direkten als auch die induzierten N_2O -Emissionen berücksichtigt. Direkte Emissionen entstehen bei der Ausbringung von Stickstoffdüngern und der Einarbeitung von Ernterückständen durch die Nitrifikation von NH_3 bzw. die Denitrifikation von NO_3^- im Boden. Darüber hinaus werden weitere N_2O -Emissionen durch den Verlust von NH_3 bei der Ausbringung und NO_3^- durch Auswaschung und die anschliessende Umwandlung über oben genannte Reaktionen induziert. Die direkten Emissionen sind somit abhängig von der Menge an Stickstoff, die dem Boden zugeführt wird. Die induzierten Emissionen können hingegen, je nach Umweltbedingungen, bei gleicher Menge an zugeführtem Stickstoff erheblich schwanken. Um die induzierten Emissionen aus NH_3 und NO_3^- Verlusten abzuschätzen, werden die nach Menzi et al. (1997) und Katz (1996) bzw. Richner et al. (2011) berechneten Verluste verwendet.
- Schwermetalle: Für die Berechnung der Schwermetallemissionen wurde das Modell von Freiermuth (2006) herangezogen, welches eine Input-Output-Bilanz darstellt. Berücksichtigt sind die Einträge durch Saatgut, Dünger, Futter- und Pflanzenschutzmittel und die Entzüge durch Ernteprodukte, Erosion und Auswaschung. Die für die Landwirtschaft relevanten Schwermetalle sind Cadmium, Chrom, Kupfer, Blei, Quecksilber, Nickel und Zink.

Alle Modelle wurden mit den vorgegebenen Werten zur Beschreibung der Region, des Bodens und des Wasserhaushaltes bzw. der Erosionsgefährdung verwendet. Somit entspricht die betrachtete Fläche einer ebenen Ackerfläche im Talgebiet des Schweizer Mittellandes mit einem Tongehalt von 15 %, einem Humusgehalt von 2 %, einem pH-Wert

von 6.7, einer Gründigkeit von 80 cm und einer mittleren P-Versorgung. Infolgedessen unterscheiden sich die einzelnen Zwischenkulturen in ihren direkten Feldemissionen lediglich aufgrund der Bewirtschaftungsmassnahmen und nicht durch weitere Faktoren wie z.B. Hangneigung oder Humusgehalt des Bodens.

2.3. Wirkungsabschätzung

Die Berechnung der Umweltwirkungen erfolgte mit dem Programm Simapro V7.3 von PRé Consultants bv (Niederlande). Für die vorliegende Studie wurde eine Auswahl von Wirkungskategorien getroffen, die sich wie in Nemecek et al. (2011a & 2011b) beschrieben in die drei Gruppen Ressourcenmanagement, Nährstoffmanagement und Schadstoffmanagement einteilen lassen.

Unter das Ressourcenmanagement fallen:

- Der Bedarf an nicht-erneuerbarer Energien, berechnet mit dem oberen Heizwert der fossilen Energieträger nach Frischknecht et al. (2004). Der Bedarf wird in MJ-Äquivalent angegeben.
- Der Treibhauseffekt über 100 Jahre, ermittelt als CO₂-Äquivalent nach der Beschreibung von IPCC (2006).
- Die Bildung von Sommersmog (Ozonbildung). Die Bildung von Photooxidantien wurde nach der Methode EDIP2003 (Hauschild & Potting 2005) unter Anwendung der schweiz-spezifischen Faktoren charakterisiert. Die Einheit ist m²·ppm·h. Dies entspricht der über die Zeit akkumulierten Exposition der Vegetation auf einer bestimmten Fläche oberhalb eines Schwellenwertes von 40 ppb.

Das Nährstoffmanagement wird durch zwei Kategorien beschrieben, die beide nach der Methode EDIP2003 (Hauschild & Potting 2005) mit schweiz-spezifischen Charakterisierungsfaktoren berechnet wurden:

- Die aquatische Eutrophierung, angegeben in kg N-Äquivalent.
- Die Versauerung, berechnet als m² Ökosystem, in dem die kritische Belastungsgrenze durch die Emissionen pro funktionelle Einheit überschritten wird.

Das Schadstoffmanagement wird anhand von drei Kategorien bewertet. Angewendet wurde die in den Niederlanden entwickelte Methode CML01, welche auf dem Multi-Media-Fate Modell Uniform System for the Evaluation of Substances 2.0 (USES2.0) beruht (Huijbregts et al. 2001).

- Terrestrische und aquatische Ökotoxizität, angegeben in kg 1,4-Dichlorbenzen (1,4-DCB) Äquivalenten
- Humantoxizität, ebenfalls in der Einheit kg 1,4-DCB Äquivalenten

2.4. Ökonomische Bewertung

Zur Beurteilung der ökonomischen Effekte wurde eine Kosten-/Leistungsrechnung für alle Inventare durchgeführt. Grundlage bildet ein durchschnittlicher Betrieb im Talgebiet des Schweizer Mittellandes. Die wirtschaftliche Analyse soll ermöglichen, die zusätzlichen Anbaukosten und die zusätzlichen Leistungen (z.B. potentieller Biogas-Ertrag) der verschiedenen Zwischenkulturen aus Sicht des Produzenten zu beurteilen. Für die ökonomische Bewertung wurde bewusst auf eine Zuteilung der Gemeinkosten und der Beiträge auf die Zwischenkultur, wie sie für eine Berechnung der Vollkosten notwendig wäre (Lips & Ammann 2006) verzichtet. Diese Kosten (z.B. Pachtzins für Ackerland) und

Leistungen (z.B. Flächenbeitrag) werden alleine schon durch die Hauptkultur ausgelöst, folglich werden sie beim Anbauentscheid einer Zwischenkultur nicht mehr berücksichtigt. Daher wurde in der ökonomischen Bewertung bewusst auf eine Berechnung der Vollkosten verzichtet, da diese für die Zwischenkulturen zusammen mit einer Hauptkultur erfolgen muss. Während auf der Leistungsseite der mögliche Biogas- oder Futterertrag steht, sind auf der Kostenseite die zusätzlich für die Zwischenkulturen anfallenden Kosten berücksichtigt. Neben den Direktkosten (z.B. Saatgut) umfassen diese auch die Kosten für Maschinen (z.B. Traktor und Sämaschine) und Arbeit (z.B. für das Säen).

Die Berechnung der Anbaukosten und Leistungen wurde für einen Hektar Ackerfläche durchgeführt (Details siehe (Albisser Vögeli et al. 2011)). Alle Arbeitszeitberechnungen basieren auf empirischen Daten (Moriz & Mink 2009; Schick & Stark 2003) und wurden zur Berechnung der Arbeitskosten mit einem Stundenlohn von 28 Schweizer Franken (Gazzarin & Albisser Vögeli 2010) multipliziert. Bei den Maschinenkosten wird der Entschädigungsansatz der Maschinen eingesetzt, somit werden neben den variablen Kosten auch die fixen Kosten anteilmässig berücksichtigt. Alle restlichen Preise, Kosten und Zinsen sind empirischen Erhebungen der Schweizer Landwirtschaft des Jahres 2009 (AGRIDEA 2010; Dux & Schmid 2010) entnommen.

Neben den ökonomischen Grundlagendaten sind folgende Inputs aus den zur Ökobilanzierung verwendeten Produktionsinventaren (Tabelle 8-Tabelle 12) in die Kosten-Leistungs-Analyse eingeflossen:

- Auswahl der Anbauverfahren (z.B. mit oder ohne Pflug, Art der Düngung)
- Treibstoffverbrauch
- Einsatz von Produktionsmitteln (Saatgut, Dünger, Pflanzenschutz)
- Fahrdistanzen (Hof-Feld, Hof-Getreidesammelstelle, Feld-Biogas-Anlage)
- Futtererträge (in dt TS, MJ UE) und Biogas-Ausbeute

Darüber hinaus wurden weitere Annahmen zur ökonomischen Bewertung getroffen:

- Für Gülle wurde kein Preis eingesetzt, sondern angenommen, dass nur die Kosten für die Ausbringung (Maschinen- und Arbeitskosten) anfallen.
- Es wurden keine ökonomischen Auswirkungen der Zwischenkultur auf die folgende Hauptkultur, wie z.B. höhere Herbizidkosten durch verstärkten Durchwuchs der Gründüngung (z.B. Senf), in die Kosten-Leistungs-Analyse berücksichtigt.

2.5. Auswertungskonzept

Die Anbauperiode zwischen zwei Hauptkulturen kann in unterschiedlicher Weise genutzt werden. Hauptziel dieser Studie war es, den Einsatz von Zwischenkulturen als Biogassubstrat zu bewerten. Darüber hinaus dienen Zwischenkulturen jedoch auch der Reduktion der Nitratauswaschung bzw. sind zur Grundfuttererzeugung nutzbar. Da sich die Funktion der Zwischenkultur je nach Verwendungszweck unterscheidet, sind die durchgeführten Vergleiche der jeweiligen Produktion angepasst. Die folgenden Absätze beschreiben das gewählte Vorgehen.

Eines der Hauptziele des Anbaus von Gründüngungspflanzen ist die Verringerung des Nitratverlustes. Somit kann als Produkt des Anbaues die Reduktion des Eutrophierungspotentials im Vergleich zur Brache angesehen werden. Aufgrund des im Kapitel 2.2.2 beschriebenen Vorgehens bei der Berechnung der direkten Feldemissionen

wird dabei die gesamte Periode zwischen zwei aufeinander folgenden Hauptkulturen betrachtet. Die Umweltwirkung der Gründungskultur ergibt sich als Differenz zwischen dem System Silomais ohne Zwischenkultur und Silomais nach einer Gründungskultur.

$$W_{GD} = W_{GD+SM} - W_{B+SM}$$

Wobei:

W	=	Umweltwirkung
GD	=	Gründung
GD+SM	=	Silomais (SM) inklusive vorhergehender Gründungskultur
B+SM	=	Silomais mit vorhergehender Brache

1. Der Vergleich der Gründungskulturen erfolgt in drei Schritten. Erstens wird die Reduktion der Eutrophierung im Vergleich zur Brache aufgezeigt. Im zweiten und dritten Schritt werden die Umweltwirkungen und Kosten präsentiert, die für diese Reduktion pro ha bzw. pro kg Reduktion des Eutrophierungspotentials eingesetzt werden. Die funktionelle Einheit des ersten und zweiten Schrittes ist ha * verfügbarer Anbauzeitraum, wobei dieser für alle Gründungskulturen mit 290 Tagen gleich ist, da der Zeitraum von Ernte der Vorkultur (15. Juli) über den Anbau der Zwischenkultur bis zur Aussaat von Mais im Mai des darauffolgenden Jahres betrachtet wird. Für Schritt drei ist die funktionelle Einheit 1 kg N-Äq., um das Eutrophierungspotential durch den Anbau einer Gründungskultur im Vergleich zur Brache reduziert wird. Die Systemgrenze des Gründungsanbaus ist in Abbildung 1 dargestellt. Für die Gründungskulturen gilt dabei die Systemgrenze I.
2. Zweck der **Futterproduktion** ist es, qualitativ hochwertiges Futter für die Tierproduktion zur Verfügung zu stellen. Daher sind insgesamt zwei funktionelle Einheiten für den Vergleich der Zwischenkulturen nötig. Zur Bewertung der Landnutzungsfunktion wird die Fläche mal Zeit verwendet. Aufgrund des im Kapitel 2.2.2 beschriebenen Vorgehens bei der Berechnung der direkten Feldemissionen entspricht der betrachtete Zeitraum wiederum der gesamten Periode zwischen zwei aufeinander folgenden Hauptkulturen, unabhängig von der realen Anbaudauer der einzelnen Zwischenkulturen. Die Umweltwirkungen der Zwischenkulturen ergeben sich als Differenz zwischen dem System Silomais ohne Zwischenkultur und Silomais nach einer Zwischenkultur.

$$W_{ZK} = W_{S(W)ZK+SM} - W_{B+SM}$$

Wobei:

W	=	Umweltwirkung
ZK	=	Sommer- bzw. Winterzwischenkultur
S(W)ZK+SM	=	Silomais inklusive vorhergehender SZK bzw. WZK
B+SM	=	Silomais mit vorhergehender Brache

Bezüglich der produktiven Funktion der Zwischenkulturen werden die funktionellen Einheiten 1 MJ verdauliche Energie (MJ ME) verwendet, wobei Silomais als Referenz dient. Für den Vergleich gilt die Systemgrenze II (Abbildung 1), die zusätzlich zu Systemgrenze I die Ernte und Konservierung der Zwischenkulturen beinhaltet.

3. Ziel der **energetischen Verwertung** von Zwischenkulturbiomasse ist die Erzeugung von Strom bzw. Wärme. Um die Umweltwirkung der Erzeugung von Strom aus Zwischenkulturen abschätzen zu können, wird für diese Auswertung Systemgrenze III (Abbildung 1) verwendet. Diese umfasst zusätzlich zur Produktion und Konservierung der Zwischenkulturbiomasse die Umweltwirkungen der Biogasproduktion, abgeschätzt als Mittelwert der Ökoinventare „electricity, at cogen with biogas engine, agricultural, alloc. exergy/CH“ und „electricity, at cogen with biogas engine, agricultural covered, alloc.

exergy/CH" aus der ecoinvent Datenbank. Die beiden Inventare unterscheiden sich durch den Fermentationsprozess, der ein- bzw. zweistufig, d.h. in zwei hintereinander geschalteten Fermentern, durchgeführt wird. Die Annahme, dass 50 % der Biogasanlagen ein- bzw. zweistufig aufgebaut sind, basiert auf den Umfrageergebnissen in einem parallel durchgeführten BFE-Projekt (Dauriat et al. 2011).

Die Allokation der Umweltwirkung auf die Koprodukte Strom und Wärme erfolgt, in Anlehnung an das Vorgehen in den ecoinvent Inventaren zur Biogaserzeugung beschrieben in Jungbluth et al. (2007), anhand der Exergie der beiden Produkte Die Allokationsfaktoren berechnen sich wie folgt.

$$A_{el} = (E_{el} \times \text{Exergie}_{el.}) / (E_{el} \times \text{Exergie}_{el.} + E_w \times \text{Exergie}_w.)$$

$$A_w = (E_w \times \text{Exergie}_w.) / (E_w \times \text{Exergie}_w. + E_{el} \times \text{Exergie}_{el.})$$

Mit:

A = Allokationsfaktor

E = Ertrag Strom bzw. Wärme

Exergie = Wert der Exergie

el. = elektrisch

w. = Wärme

Mit einer Exergie von 1 für Strom und 0.17 für Wärme und ausgehend von einer 100 % Nutzung der Wärme ergeben sich folgende Allokationsfaktoren:

$$A_{el} = 0.743$$

$$A_w = 0.257$$

Die Zwischenkulturen erfüllen neben der Produktion von Biomasse ebenfalls die Funktion einer Gründüngung. Aus diesem Grund wurde eine Gutschrift für diesen Aspekt durchgeführt und es werden nur die Umweltwirkungen berücksichtigt, die durch Düngung, Ernte, Konservierung und Biogaserzeugung im Vergleich zu einer Gründüngung zusätzlich entstehen. Die Umweltwirkungen der Produktion von Zwischenkulturbiomasse für die energetische Verwertung berechnen sich wie folgt.

$$W_{S(W)K} = W_{S(W)ZK+SM} - W_{GD+SM}$$

Wobei:

W = Umweltwirkung

ZK = Zwischenkulturen

S(W)ZK+SM = Silomais mit vorhergehender SZK bzw. WZK

GD+SM = Silomais mit vorhergehender Gründüngung bezeichnen

Da die Gutschrift einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat, werden immer die Ergebnisse mit und ohne Gutschrift dargestellt. Der durchgeführte Vergleich basiert auf der funktionellen Einheit kWh mit der Referenz Schweizerischer Strommix („Electricity mix/CH U“ siehe Tabelle 14). Als Hauptkriterium zur Bestimmung der für die Biogasgewinnung geeigneten Zwischenkulturen wurde das Treibhausgaspotential festgelegt, da das primäre Ziel der Erzeugung von Bioenergieträgern eine Reduktion des Treibhausgasausstosses ist. Der Einfluss der hinsichtlich Ertrag der Zwischenkulturen und Vergärung in ein bzw. zweistufigen Anlagen getroffenen Annahmen wird mithilfe von Sensitivitätsanalysen betrachtet.

2.6. Grenzen der Studie

Die hier vorliegende Studie erlaubt einen Vergleich der betrachteten Varianten hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzeugung von Grundfutter und Strom aus Zwischenkulturbiomasse. Allerdings sind bei der Interpretation der Ergebnisse folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Es werden nicht alle Umweltkategorien bewertet. So fehlen z.B. die Effekte auf die Biodiversität, Bodenqualität.
- Die Sachbilanz der Zwischenkulturvarianten basiert nicht auf statistischen Daten, sondern wurden als übliche Praxis modelliert. Die Realität in einzelnen landwirtschaftlichen Betrieben kann deutlich von den getroffenen Annahmen abweichen.
- Die Biogaserzeugung wird nur stark vereinfacht betrachtet, da es nicht Ziel der Studie war, Biogasanlagen zu modellieren. Somit werden Auswirkungen wie z.B. eine veränderte Zusammensetzung des Gärsubstrates durch den Einsatz von Zwischenkulturbiomasse nicht abgedeckt
- Der Schweizer Strommix basiert zu einem erheblichen Teil auf Atomstrom, allerdings wurden die Risiken der Atomstromproduktion und die Endlagerung der radioaktiven Abfälle in der vorliegenden Arbeit nicht bewertet.

3. Ergebnisse der ökonomischen Analyse und der Ökobilanzierung

3.1. Vergleich der Gründüngungskulturen

3.1.1. Reduktion des aquatischen Eutrophierungspotentials

Zu den Hauptfunktionen einer Gründüngung zählt die Reduktion der Nitratauswaschung und damit der Eutrophierung. Durch Anbau einer Gründüngung wird im Vergleich zu einer Brache die Eutrophierung gesamthaft um knapp 21 bis 28 kg N-Äq. reduziert (Abbildung 2). Je nach Gründüngungskultur und Saatzeitpunkt sinken die Vorwinterverluste um durchschnittlich 32 kg NO_3^- -N in den mineralgedüngten Varianten, wobei sich die Werte zwischen 29-34 kg NO_3^- -N bewegen. Die mit Gülle gedüngten Varianten erreichen, aufgrund der höheren Zufuhr von organischer Substanz in den Boden und einer dadurch höheren Mineralisation, ein deutlich grösseres Reduktionspotential. Dies gilt auch für die ersten vier Varianten ohne Düngung, für die angenommen wurde, dass der Boden aufgrund der Zufuhr von organischer Substanz in der Fruchtfolge ebenfalls ein höheres Mineralisierungspotential aufweist. Im Vergleich zur Aussaat im September ist der NO_3^- -N Verlust der im August ausgesäte Gründüngungen um 4 kg niedriger. Zwischen den beiden Gründüngungskulturen Senf und Phacelia ergeben sich nur geringe Unterschiede, die im Durchschnitt unter 1 kg NO_3^- -N liegen.

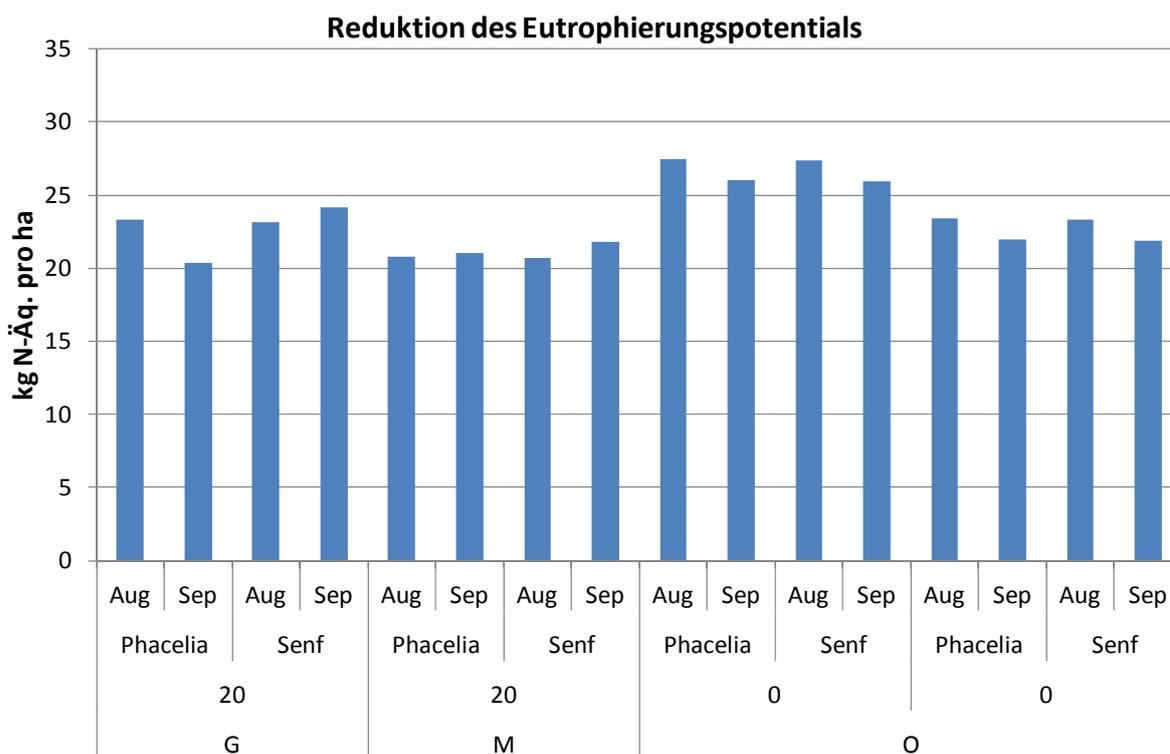


Abbildung 2: Reduktion des aquatischen Eutrophierungspotential durch Anbau der Gründüngungskulturen Senf und Phacelia mit der Nachfolgekultur Silomais in den Anbauvarianten Gülldüngung (G), Mineraldüngung (M) oder ungedüngt (O), mit 0 und 20 kg N, sowie Saatzeitpunkt August oder September. Die ersten vier Varianten ohne Düngung befinden sich in einer Fruchtfolge mit organischer Düngung und somit erhöhtem Mineralisierungspotential.

Die Tatsache, dass die Eutrophierung weniger stark sinkt als die Nitratverluste, lässt sich durch folgende Punkte erklären:

- Der Anbau der Gründungskulturen und die Produktion der verwendeten Betriebsmittel verursachen Emissionen, die ebenfalls eine eutrophierende Wirkung haben.
- Aufgrund der regionalisierten Charakterisierungsfaktoren wird der Verlust von 1 kg Stickstoff in der Kategorie aquatische Eutrophierung nur mit einem Wert von 0.7 kg N-Äq. bewertet.

3.1.2. Umweltwirkung und Kosten des Anbaues

Neben der Reduzierung der Nährstoffanreicherung verursacht der Anbau der Gründungskultur jedoch auch negative Umweltauswirkungen, die im Folgenden aufgeführt werden.

Bezogen auf die Fläche, betrachtet für den Anbauzeitraum von 290 Tagen, benötigt der Anbau von Senf bzw. Phacelia 2'869-4'959 MJ-Äquivalente (Abbildung 3). Der Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie (NEE) wird vorrangig durch die Bodenbearbeitung und die Düngung verursacht. Deutlich geringer ist der Anteil der Düngerausbringung, der Aussaat sowie des Saatgutes. Im Vergleich zu den ungedüngten Varianten ist der Energiebedarf organisch- oder mineralisch-gedüngter Varianten durch die Düngerproduktion und die Ausbringung um 478 bzw. 1'628 MJ erhöht. Die mineralgedüngten Varianten weisen aufgrund der Produktion der Stickstoffdünger den höchsten Energiebedarf auf (Abbildung 3). Der Energieeinsatz übersteigt den der güllegedüngten Varianten um 1'151 MJ, wobei die Produktion der Düngermittel 1'239 MJ benötigt. Die Differenz beruht auf dem höheren Energieaufwand der Gülleausbringung im Vergleich zur Mineraldüngung. Der Anbau von Senf benötigt geringfügig weniger Energie als der Anbau von Phacelia, da kein Walzen nach der Aussaat nötig ist. Bei einer Septemberaussaat von Senf entfällt zusätzlich das Mulchen des Bestandes, weswegen diese Variante jeweils den geringsten Energieeinsatz aufweist.

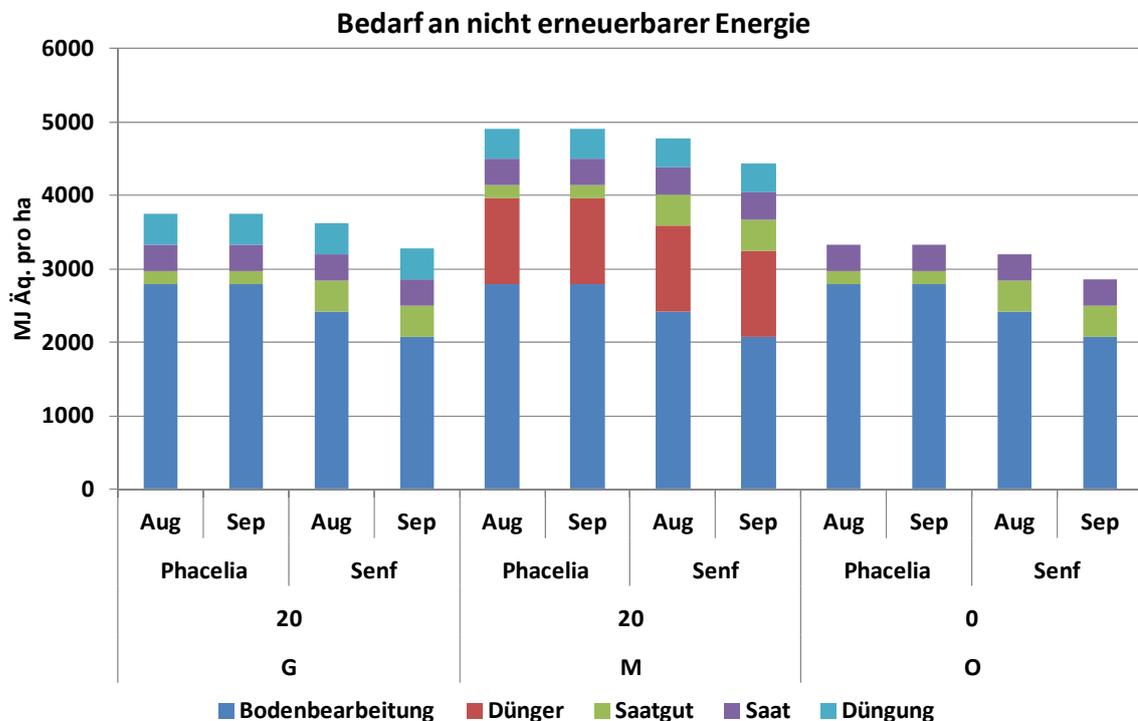


Abbildung 3: Nicht-erneuerbarer Energiebedarf der Gründungskulturen Senf und Phacelia in den Anbauvarianten Güllendüngung (G), Mineraldüngung (M) oder ungedüngt (O), mit 0 und 20 kg N, sowie Saatzeitpunkt August oder September. Die funktionelle Einheit ha wird für den möglichen Anbauzeitraum von 290 Tagen betrachtet.

Die niedrigsten Treibhausgasemissionen werden wiederum von den nichtgedüngten Varianten verursacht. Die höchsten Effekte treten in den mineralisch gedüngten Varianten auf. Im Durchschnitt verursachen die ungedüngten Varianten Treibhausgasemissionen von 530 kg CO₂-Äq. Die güllegedüngten Varianten liegen bei 866 kg CO₂-Äq. und die mineralgedüngten bei 905 kg CO₂-Äq. Die Spannweite liegt dabei zwischen 467 und 1'065 kg CO₂-Äq (Tabelle 2). Als Treibhausgase spielen, mit einem Anteil von 57-78 % am gesamten THG-Ausstoss, massgeblich N₂O aus Feldemissionen bzw. der Düngerproduktion sowie CO₂ aus dem Einsatz von Energieträgern eine Rolle (21-41 %). Die Lachgasverluste entstehen bei der Ausbringung der Dünger, durch den Verbleib des Aufwuchses auf dem Feld oder werden durch den Nitratverlust induziert. Bei den mineralgedüngten Varianten treten zusätzlich Verluste in der Düngerproduktion auf. Der CO₂-Ausstoss wird zum grössten Teil durch die Feldarbeiten verursacht. Zusätzlich führt der Energiebedarf bei der Düngerproduktion zu Emissionen von ungefähr 56 kg CO₂. Aufgrund des geringeren Aufwuchses der im September gesäten Varianten und der daraus resultierenden geringeren Lachgasemission sind die Treibhausgasemissionen bei den ungedüngten Varianten im Durchschnitt um 106 und bei den gedüngten um 204 kg CO₂-Äq. niedriger als in den im August gesäten. Versauernde Emissionen wie NH₃, NO_x, und SO₂ entstehen vor allem durch Feldemissionen (NH₃) und bei Bodenbearbeitungsprozessen (NO_x, SO₂). Der Anbau einer Hektare Gründüngung kann potentiell 17-284 m² Ökosystem mit Versauerung gefährden (Tabelle 2). Das höchste Potential verursachen die güllegedüngten Varianten durch das bei und nach der Düngung entweichende Ammoniak. Diese Varianten erreichen im Durchschnitt knapp 263 m² und liegen damit um das 4.8 bzw. 14.9 über den mineralisch - bzw. nicht gedüngten Varianten. Das Potential der im September gesäte Güllevarianten liegen bei gleicher Düngung, aufgrund des geringeren Sättigungsdefizites der Luft zum Zeitpunkt der Düngung, um 40 m² höher als das der im August gesäten Gründüngungskulturen. Die weiteren Unterschiede sind auf NO_x-Emissionen aus dem Nitrifikations-Denitrifikationsprozess zurückzuführen. Das Ozonbildungspotential der Gründüngungen Senf und Phacelia erreicht 4'246-6'677 m²·ppm·h (Tabelle 2). Zum Potential tragen in erster Linie Stickoxide bei. Deren Anteil liegt im Durchschnitt bei 89 %. Die restliche Wirkung wird nahezu vollständig von Kohlenmonoxid-, Methan- und NMVOC-Emissionen verursacht. Alle weiteren Stoffe sind für lediglich 0.2 % des Potentials verantwortlich. Der grösste Anteil der ozonbildenden Emissionen, im Durchschnitt 73 %, wird durch Feldarbeiten hervorgerufen, gefolgt von den direkten Feldemissionen (10 %) sowie Emissionen aus der Düngerherstellung und -ausbringung (9 %). Aufgrund des höheren Energieeinsatzes weisen die mineralisch gedüngten Varianten das höchste Potential auf. Es liegt im Durchschnitt 750 bzw. 1'598 m² ppm h höher als in den gülle- bzw. ungedüngten Varianten. Das aquatische Ökotoxizitätspotential von Senf und Phacelia liegt bei 1.3-8.8 kg 1,4-Dichlorobenzol-Äquivalenten pro Hektare (Tabelle 2). Die höchsten Werte erreichen die güllegedüngten Varianten, da durch Gülle mehr Schwermetalle zugeführt werden als über mineralischen Stickstoffdünger.

Die Anbaukosten der Gründüngung liegt zwischen 586 und 918 SFr. pro ha, mit den niedrigsten Kosten in den ungedüngten Varianten (Abbildung 1 & Tabelle 2). Bei einer Düngung von 20 kg N muss mit Mehrkosten von etwa 100 SFr. pro ha gerechnet werden, wobei die Unterschiede zwischen Mineral- und Gölledüngung nur gering sind. Die relevantesten Kostenfaktoren, bei der Anlage einer Gründüngung, sind die Maschinenkosten, die Arbeiterledigungskosten und die Saatgutkosten. Während die Saatgutkosten in allen Varianten mit Fr. 120 für Senf und Fr. 105 für Phacelia gleich hoch sind, unterscheiden sich die Kosten bei den Maschinen und der Arbeiterledigung. Dabei

sind die Kosten bei den nicht gedüngten Varianten aufgrund der fehlenden Ausbringungskosten für Dünger niedriger als bei den gedüngten Varianten. Bei Phacelia liegen die Maschinen- und Arbeiterledigungskosten zwischen rund 700 und 800 Fr. pro ha. Für Senf ergibt sich ein Unterschied durch den Saatzeitpunkt. Da bei früh gedrilltem Senf eventuell gemulcht werden muss, fallen mit rund 160 Fr. pro ha höhere Kosten an als bei spät gedrillten Senf. Insgesamt liegen die Maschinen- und Arbeiterledigungskosten für Senf zwischen rund 460 und 720 Fr. pro ha. Da alle Gründüngungen nicht geerntet werden, sind die Gesamtkosten mit rund 580 bis 900 Fr. pro ha sehr gering. Allerdings wird bei diesen Verfahren auch kein direkter Ertrag erzielt.

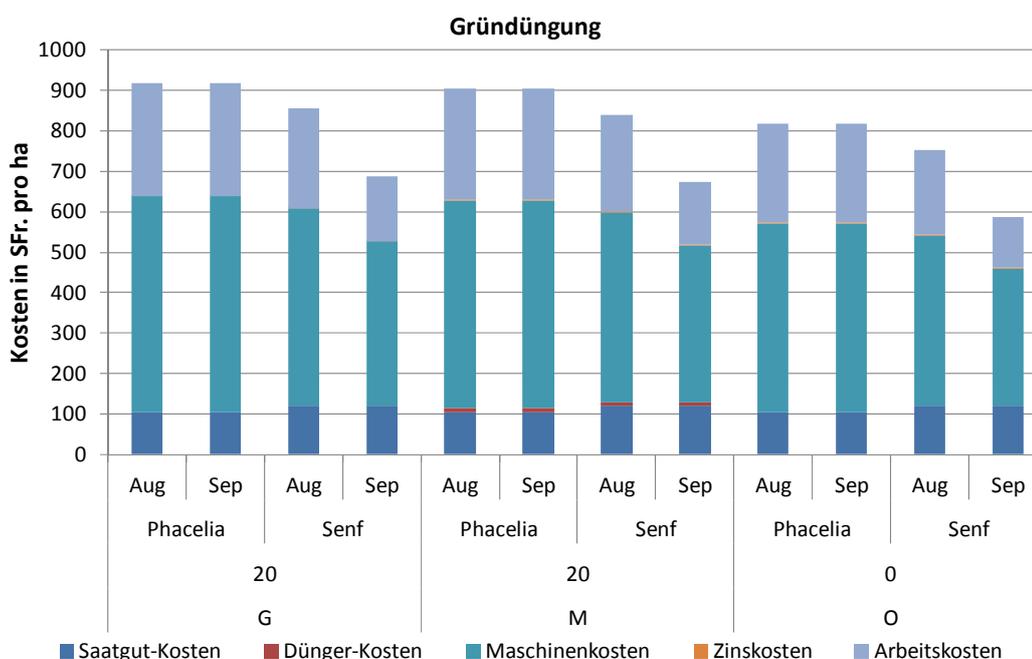


Abbildung 4: Kosten des Anbaus der Gründüngungskulturen Phacelia und Senf in den Anbauvarianten Gülledüngung (G), Mineraldüngung (M) oder ungedüngt (O), mit 0 und 20 kg N, sowie Saatzeitpunkt August oder September.

Um die Gründüngungsvarianten besser hinsichtlich ihrer primären Funktion zu beurteilen, sind in Tabelle 3 die Umweltwirkungen pro kg N-Äquivalent dargestellt um das das Eutrophierungspotential, im Vergleich zur Brache, durch den Anbau einer Gründüngung reduziert wird. Dabei wird deutlich, dass sich die einzelnen Varianten wesentlich unterscheiden. Generell weisen die ungedüngten Varianten die niedrigsten Umwelteffekte und Kosten pro ha und pro Reduktion des Eutrophierungspotentials auf (Tabelle 2 und 3). Vergleicht man die Gülle- und Mineraldüngung über die fünf Umweltwirkungen und die Kosten, zeigt sich, dass die Mineraldüngung zwar eine geringeren Versauerung und aquatischen Ökotoxizität verursacht, jedoch mehr Energie benötigt. Daraus ergeben sich höhere THG-Emissionen und ein höheres Ozonbildungspotential. Zusätzlich weisen die mineralgedüngten Varianten die höchsten Kosten auf. Zusammenfassend kann für die Gründüngungen festgehalten werden, dass es nach den hier vorliegenden Ergebnissen sowohl ökologisch als auch ökonomisch am sinnvollsten ist, diese nicht zu düngen. Zum einen sind die klima-, wasser- und bodenbelastenden Emissionen sowie die Kosten am geringsten, zum anderen ist das Potential die Eutrophierung, in kg N-Äq. ausgedrückt, zu reduzieren am höchsten. Allerdings ist dabei zu bedenken, dass eine Düngung in vielen Fällen eine gute Bestandsentwicklung garantiert und damit die Funktion der Gründüngung sicherstellt.

Tabelle 2: Umweltwirkungen und Kosten von einer Hektare Gründüngung in den Anbauvarianten ungedüngt sowie gedüngt mit 20 kg verfügbarem N aus Gülle- oder Mineraldüngung. Saatzeitpunkt ist August oder September. Die Werte sind Netto-Angaben, unter Berücksichtigung der Umweltwirkungen von Brache.

			NEE (MJ-Äq.)	THG (kg CO ₂ -Äq.)	Versauerung (m2)	Eutrophierung (kg N-Äq.)	Aq. Ökotox. (kg 1,4 DB-Äq.)	Ozonbildung (m2·ppm·h)	Zus. Anbaukosten (SFr./ha)
Gülle	Phacelia	Aug	3'809	910	282	-23.3	8.76	6'104	918
		Sept	3'809	784	243	-20.4	8.76	5'908	918
	Senf	Aug	3'689	1'024	284	-23.2	8.78	6'042	854
		Sept	3'347	745	244	-24.1	8.66	5'184	687
Mineral	Phacelia	Aug	4'959	951	55	-20.8	2.53	6'677	904
		Sept	4'959	814	54	-21.0	2.53	6'465	904
	Senf	Aug	4'840	1'065	57	-20.7	2.62	6'615	840
		Sept	4'497	790	55	-21.8	2.50	5'763	673
ohne Düngung	Phacelia	Aug	3'331	582	17	-27.5	1.27	5'089	817
		Sept	3'331	487	17	-26.1	1.27	4'941	817
	Senf	Aug	3'211	584	19	-27.4	1.39	4'853	753
		Sept	2'869	467	17	-25.9	1.27	4'246	586

Tabelle 3: Umweltwirkung der Gründüngungsvarianten auf Basis der Reduktion des Eutrophierungspotentials um 1 kg N-Äq.

			Δ NEE (MJ-Äq.)	Δ THG (kg CO ₂ -Äq.)	Δ Versauerung (m2)	Δ Aq. Ökotox. (kg 1,4 DB-Äq.)	Δ Ozonbildung (m2·ppm·h)	Zus. Anbaukosten (SFr.)
Gülle	Phacelia	Aug	163	39	12.1	0.38	262	39
		Sept	187	38	11.9	0.43	290	45
	Senf	Aug	159	44	12.3	0.38	261	37
		Sept	139	31	10.1	0.36	215	28
Mineral	Phacelia	Aug	238	46	2.6	0.12	321	43
		Sept	236	39	2.6	0.12	307	43
	Senf	Aug	234	51	2.8	0.13	320	41
		Sept	206	36	2.5	0.11	265	31
ohne Düngung	Phacelia	Aug	121	21	0.6	0.05	185	30
		Sept	128	19	0.7	0.05	190	31
	Senf	Aug	117	21	0.7	0.05	177	28
		Sept	111	18	0.7	0.05	164	23
Minimum			111	18	0.6	0.05	164	23
Maximum			238	51	12.3	0.43	321	45

3.2. Produktion von Grundfutter aus Zwischenkulturen

Die Auswirkung der Grundfutterproduktion aus Zwischenkulturen wird im Folgenden anhand der funktionellen Einheiten Umweltwirkung pro ha, pro MJ umsetzbare Energie (UE) angegeben. Als Vergleichsbasis wird zusätzlich die Umweltwirkung der im Projekt ebenfalls bilanzierten Maisvarianten dargestellt. Im Vordergrund steht die Grundfutterproduktion. Aus diesem Grund werden nur die zur Fütterung geeigneten Kulturen präsentiert.

3.2.1. Ressourcenmanagement

Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie

Der Anbau einer Hektare Zwischenkultur benötigt einen Einsatz an nicht-erneuerbaren Energien von 5'645 MJ bis zu 17'256 MJ (Abbildung 5 und Abbildung 6). Bei gleicher Menge verfügbaren Stickstoffs benötigt die Herstellung der mineralischen Dünger inklusive Transport je nach Menge einen um 1'679-4'477 MJ höheren Energieeinsatz als die Bereitstellung über Gülle. Dieser Mehrbedarf wird nur zu einem geringen Teil durch die energieintensivere Ausbringung der Gülle ausgeglichen. Der Unterschied zwischen der Ausbringung mineralischer Dünger und Gülle beträgt 73 bis maximal 191 MJ. In der Summe ist der NEE in den mineralisch gedüngten Varianten um 1'663-4'478 MJ höher als in den güllegedüngten. Die einzelnen Varianten unterscheiden sich durch die Höhe der Düngung und die Anzahl der Nutzungen sowie die damit zusammenhängenden Prozesse wie die Düngerherstellung, -ausbringung und die Ernteprozesse, die aufgrund der Ertragsunterschiede variieren. Ein um 20-30 kg N erhöhte Düngung verursacht im Durchschnitt einen zusätzlichen Energiebedarf von 571 bzw. 1'796 MJ in den gülle- bzw. mineralisch-gedüngten Varianten. In den güllegedüngten Varianten ist der Unterschied hauptsächlich auf den höheren Ertrag zurückzuführen, der einen Anstieg des Energiebedarfs für die Ernte verursacht. In den Varianten mit Mineraldüngung steigt zusätzlich der Bedarf an NEE für die Düngerproduktion. Die Erhöhung der Schnitzzahl von 1 auf 2 bzw. 1 auf 3 verursacht bei gleicher Düngung einen Anstieg des Energiebedarfs um durchschnittlich 2'170 bzw. 4'158 MJ. Gründe sind die zusätzlichen Arbeitsprozesse und der durch den höheren Ertrag gesteigerte Energiebedarf für die Ernte.

Pro MJ UE werden zwischen 175-329 bzw. 242-400 KJ in den gülle- bzw. mineralisch-gedüngten Varianten aufgewendet. Aufgrund der energieintensiven Düngerproduktion ist der Energieeinsatz pro erzeugtem MJ umsetzbare Energie in den mineralisch gedüngten Varianten um 54 bis 99 KJ bzw. um 22-46 % höher. Wird die Schnitzzahl von 1 auf 2 bzw. 1 auf 3 erhöht, verringert sich durch den höheren Ertrag der Energieeinsatz pro MJ UE um 7-25 %. Wird die Düngung um 20 bzw. 30 kg erhöht, steigt die Energieeffizienz in den güllegedüngten Varianten ebenfalls an und zwar um durchschnittlich 4.7 %. Bei mineralischer Düngung sinkt hingegen die Energieeffizienz in allen Varianten, besonders jedoch in den SZK, da die Ertragssteigerung nicht den zusätzlichen Energieaufwand ausgleicht. Einzige Ausnahme ist das Raigras mit drei Nutzungen. Beim Vergleich der Kulturen zeigt sich, dass die intensiven dreischnittigen WZK die niedrigsten Auswirkungen pro MJ UE aufweisen. Lediglich die ungedüngte SM 101 erreicht einen mineralisch gedüngten intensiven WZK vergleichbaren Wert, allerdings bei deutlich niedrigerem Ertrag. Im Vergleich zu Mais ist die Energieeffizienz aller Varianten deutlich geringer.

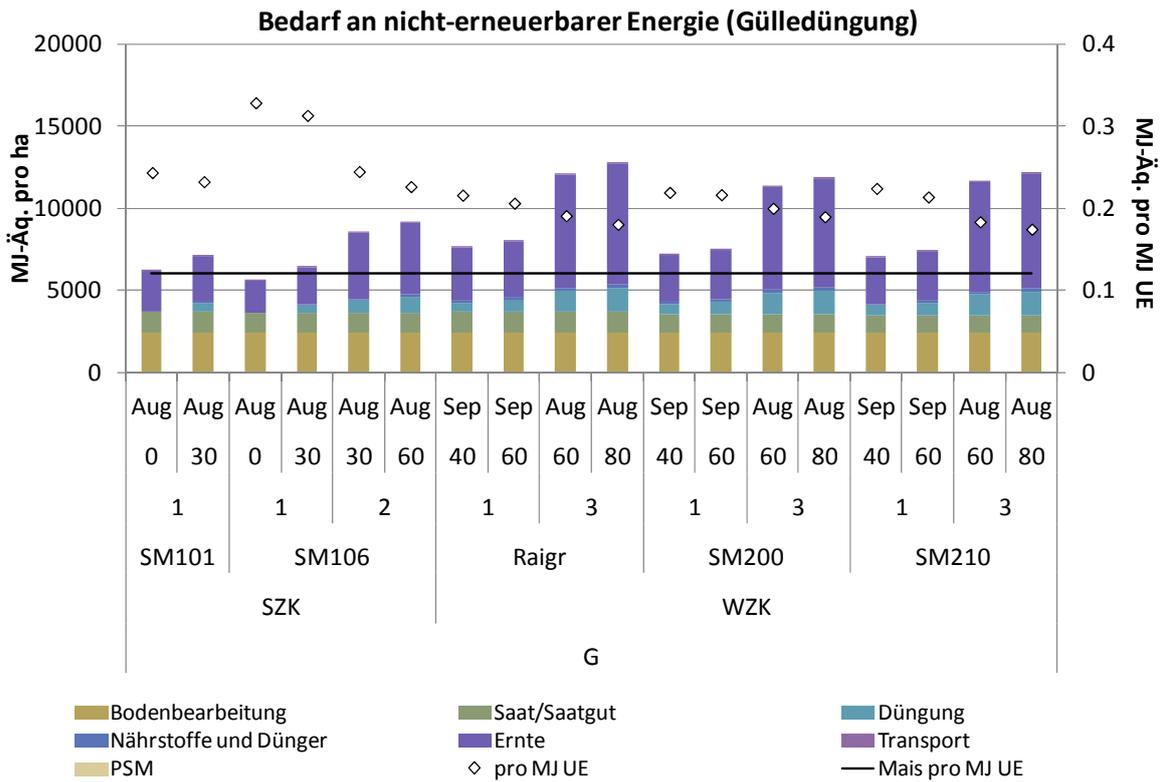


Abbildung 5: Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie (NEE-Bedarf) der gülleüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt den Bedarf der für die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais nötig ist.

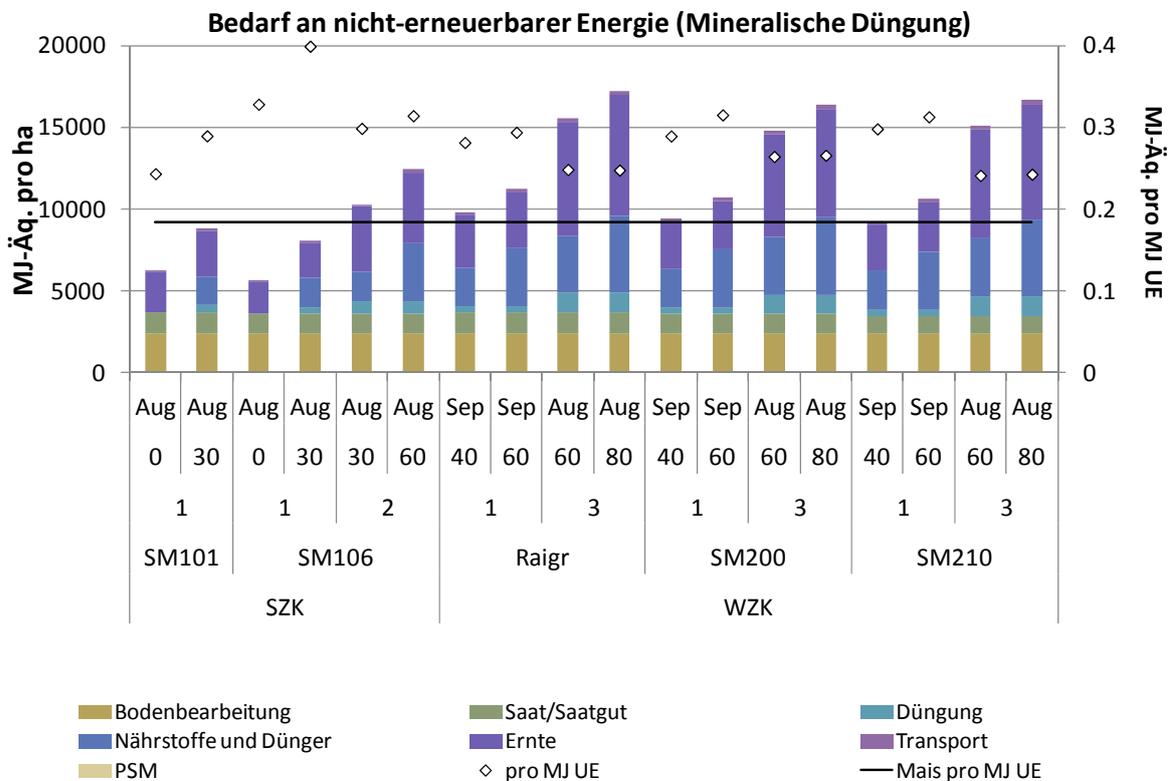


Abbildung 6: Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie (NEE-Bedarf) der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt den Bedarf der für die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais nötig ist.

Ozonbildung

Da diese Wirkungskategorie sehr stark mit dem Energiebedarf korreliert ist (in der vorliegenden Untersuchung beträgt der Korrelationskoeffizient 0.995 in den güllegedüngten bzw. 0.928 in den mineralisch-gedüngten Varianten), wird eine kurze Zusammenfassung präsentiert. Das Ozonbildungspotential liegt zwischen 8'886 und 17'775 bzw. 8'137 und 15'312 $\text{m}^2 \cdot \text{ppm} \cdot \text{h}$ in den mineralisch- bzw. güllegedüngten Varianten (Abbildung 32 & Abbildung 33). Die ungedüngten SM101 und SM106 verursachen ein Potential von 6'843 bzw. 7'345 $\text{m}^2 \cdot \text{ppm} \cdot \text{h}$ pro ha. Der Grossteil wird durch Ernteprozesse, die Bodenbearbeitung gefolgt von der Düngerherstellung und Ausbringung hervorgerufen. Folglich führt eine intensivere Düngung und eine häufigere Schnitzzahl zu einem höheren Potential pro ha.

Treibhausgaspotential

Beim Anbau der Zwischenkultur werden Treibhausgase von 338 kg CO_2 -Äq. pro ha bis zu 1'853 kg CO_2 -Äq pro ha (Abbildung 7 und Abbildung 8) emittiert. Der Ausstoss von Kohlendioxid (aus der Verwendung von fossilen Energieträgern) und Distickstoffmonoxid (aus der Düngerherstellung sowie aus direkten und induzierten Feldemissionen) trägt sowohl bei den güllegedüngten als auch bei den mineralisch gedüngten Varianten 96-98 % zur gesamten Umweltwirkung bei. Je nach Düngungsniveau verschiebt sich der Anteil der beiden genannten Gase. Emissionen von Kohlendioxid tragen zwischen 40 % in den Varianten mit hoher Stickstoffdüngung und annähernd 100 % in der ungedüngten SM101 bei. Der Anteil des Distickstoffmonoxids erreicht bei intensiver Düngung maximal 53 %. Die unter NEE beschriebenen Trends sind, mit einzelnen Abweichungen, auch bei den Treibhausgasemissionen wiederzufinden.

- Bei gleicher Menge verfügbaren Stickstoffs verursachen die Herstellung der mineralischen Dünger inklusive Transport um 49-217 kg CO_2 -Äq. pro ha höhere THG-Emissionen.
- Ein um 20 bzw. 30 kg N erhöhte Düngung verursacht im Mittel zusätzliche Emissionen von 185 bzw. 438 kg CO_2 -Äq pro ha. Eine Erhöhung der Schnitzzahl führt bei gleicher Düngung zu einem Anstieg des Potentials um durchschnittlich 390 kg CO_2 -Äq.
- Pro MJ UE werden zwischen 13-38 bzw. 14-41 g CO_2 -Äq. in den Gülle- bzw. mineralisch gedüngten Varianten emittiert. Durch die Düngerproduktion sind die Emissionen pro erzeugte MJ UE umsetzbare Energie in den mineralisch gedüngten Varianten um 1 bis 6 g bzw. um 6-21 % höher.
- Eine höhere Schnitzzahl verringert aufgrund des gesteigerten Ertrages die THG-Emissionen pro MJ UE um 8-25 %.

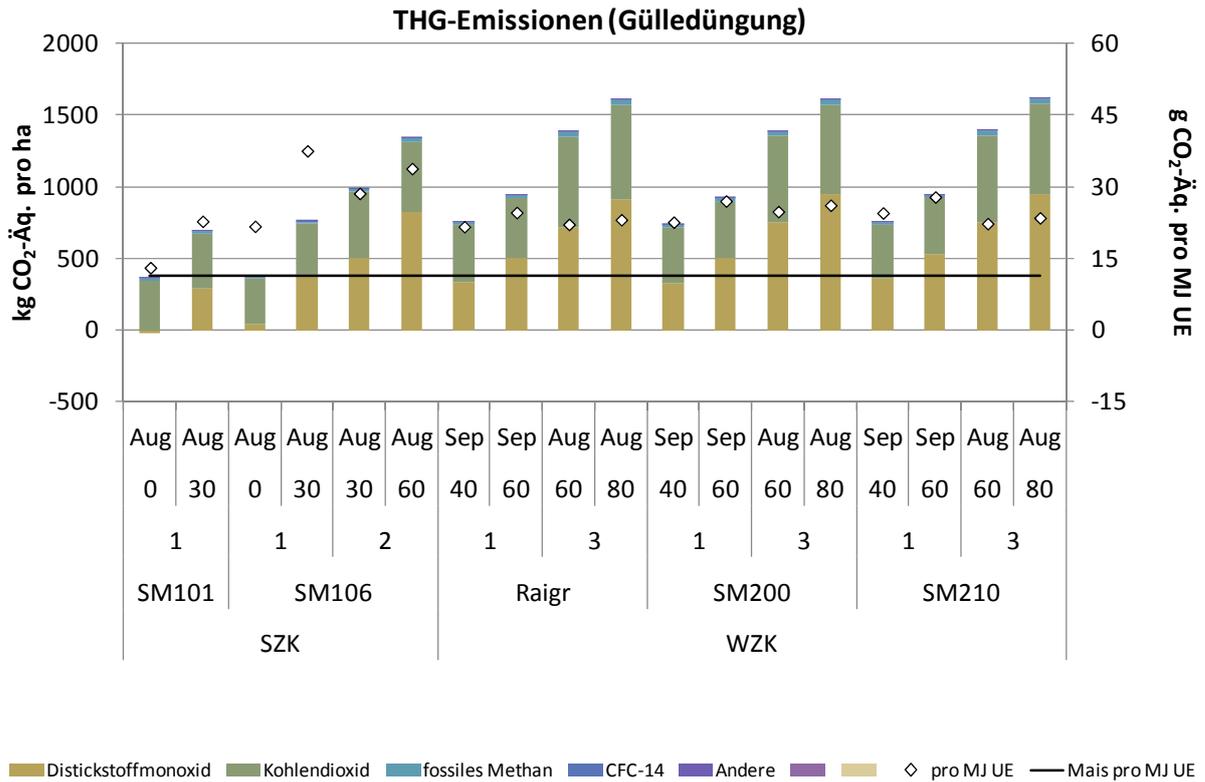


Abbildung 7: Treibhausgasemissionen der gülleüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt die Emissionen, in g CO₂-Äq., die bei der Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais entstehen.

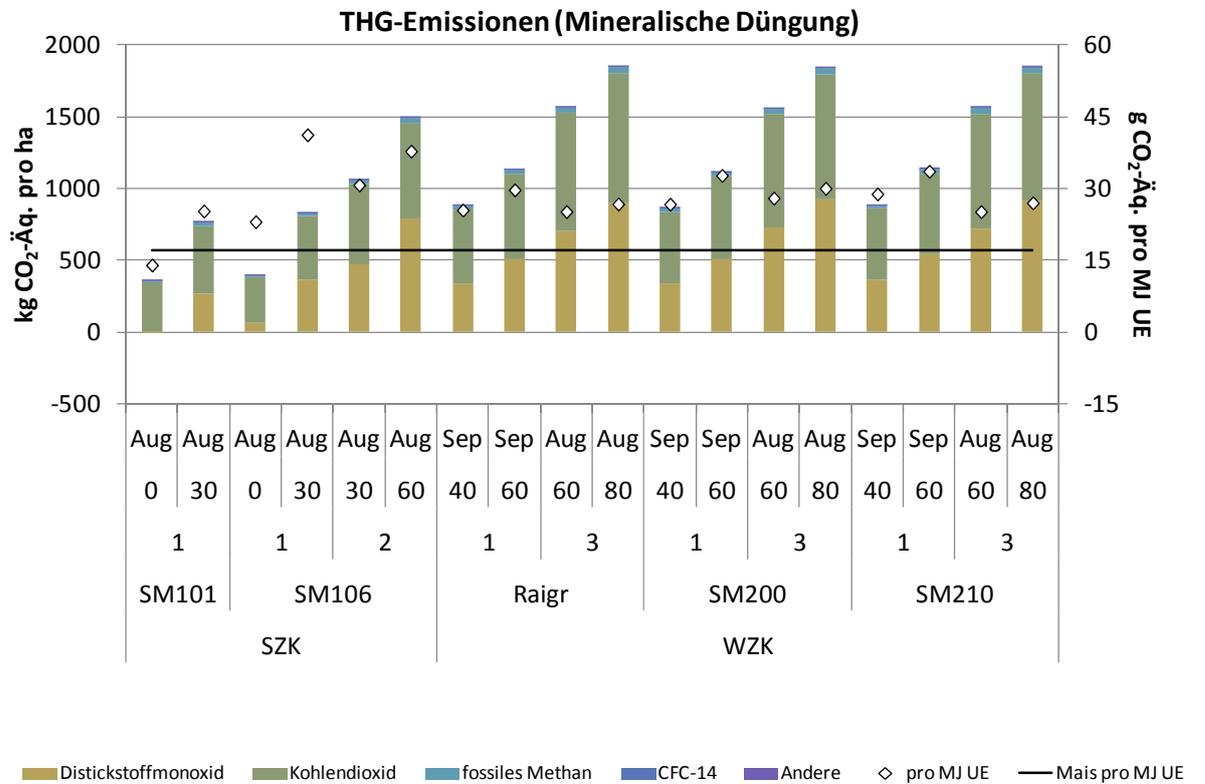


Abbildung 8: Treibhausgasemissionen der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt die Emissionen, in g CO₂-Äq., die bei der Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais entstehen

Anders als in der Wirkungskategorie „Bedarf an nicht-erneuerbaren Energien“ steigt durch Anheben der Düngung um 20 bzw. 30 kg die Auswirkung pro MJ UE in allen Fällen. Auch beim Vergleich der Kulturen untereinander ändert sich die Reihenfolge geringfügig. Die ungedüngte SM101 verursacht die niedrigsten Emissionen pro MJ UE. Zusätzlich erreicht die mit 30 kg gedüngte SM101 einen ähnlich niedrigen Wert wie die Winterzwischenkulturen. Für die Schnitzzahl zeigt sich kein einheitliches Bild. In der Tendenz ergibt sich bei Gülledüngung ein ähnliches Potential für 1 bzw. 3-mal genutzte Varianten wohingegen bei mineralischer Düngung die Erhöhung der Schnitzzahl zu einer deutlich geringeren Wirkung pro MJ führt. Allerdings liegen die Emissionen deutlich, um 14-327 %, über den THG-Emissionen von einem MJ UE aus Mais.

3.2.2. Nährstoffmanagement

Aquatische Eutrophierung

Die Eutrophierung ist im Zusammenhang mit Zwischenkulturen als besondere Umweltwirkung zu betrachten, da Zwischenkulturen die Nitratverluste über Winter - im Vergleich zur Brache - reduzieren, selbst aber ein Eutrophierungspotential verursachen. Aufgrund des in Kapitel 2.5 beschriebene Vorgehens wird die Reduktion gegenüber einer Brache in die vorliegende Auswertung einbezogen. Die Zwischenkulturen verringern das Eutrophierungspotential gegenüber einer Brache um 12 kg N-Äq. in der Standardmischung 200 mit 80 kg Stickstoffdüngung bis zu 30 kg N-Äq. in der ungedüngten SM 106 (Abbildung 9 und Abbildung 10). Sowohl in den Gülle- als auch den mineralisch gedüngten Varianten wird der Potential von den Nitratverlusten dominiert. Die weiteren Emissionen sind für lediglich 1-6 % der Eutrophierung verantwortlich. Folgende Punkte sind zu erkennen:

- Bei gleicher Menge verfügbaren Stickstoffs ist die Reduktion in den güllegedüngten Varianten im Durchschnitt um 3 kg N-Äq. höher, da durch die organischen Düngung eine höheres Verlustpotential in der Brache besteht.
- Eine um 20 bzw. 30 kg N gesteigerte Düngung verringert das Reduktionspotential hervorgerufen durch zusätzliche Nitratverluste um - 14 kg N-Äq. In einzelnen Fällen erhöht sich das Potential jedoch um bis zu 0.46 kg N-Äq. Beides ist durch den Ertrag zu erklären. Im ersten Fall übersteigt die zusätzliche Düngung die durch den höheren Ertrag gesteigerte Stickstoffaufnahme; im zweiten Fall steigt die Aufnahme stärker an als die, durch die höhere Düngung, verursachten zusätzlichen Verluste.
- Eine Erhöhung der Schnitzzahl in der Standardmischung 106 bei gleicher Düngung vergrößert aufgrund des höheren Ertrages das Reduktionspotential um ~ 8 kg N-Äq. In den Winterzwischenkulturen hingegen führt ein weiterer Schnitt zu einem geringeren Reduktionspotential. Dies ist auf die Annahme zurückzuführen, dass auch bei den mehrschnittigen Winterzwischenkulturen eine lineare Stickstoffaufnahme des Bestandes vorliegt. Aufgrund dieser Annahme ist die Stickstoffaufnahme zum letzten Düngungstermin in den 3-Schnitt Varianten nahezu abgeschlossen und das Modell berechnet einen höheren Verlust aus der Düngung. Ausgehend von der Stickstoffbilanz sollte das Potential der einfach bzw. dreifach genutzten Winterzwischenkulturen auf einem vergleichbaren Niveau liegen.
- Trotz der teils höheren Stickstoffdüngung erreichen die Zwischenkulturen ein den Gründüngungen vergleichbares Reduktionspotential. Lediglich in zwei Varianten der SM106 und den intensivsten Varianten der SM 200 und 210 ist das Reduktionspotential deutlich geringer.

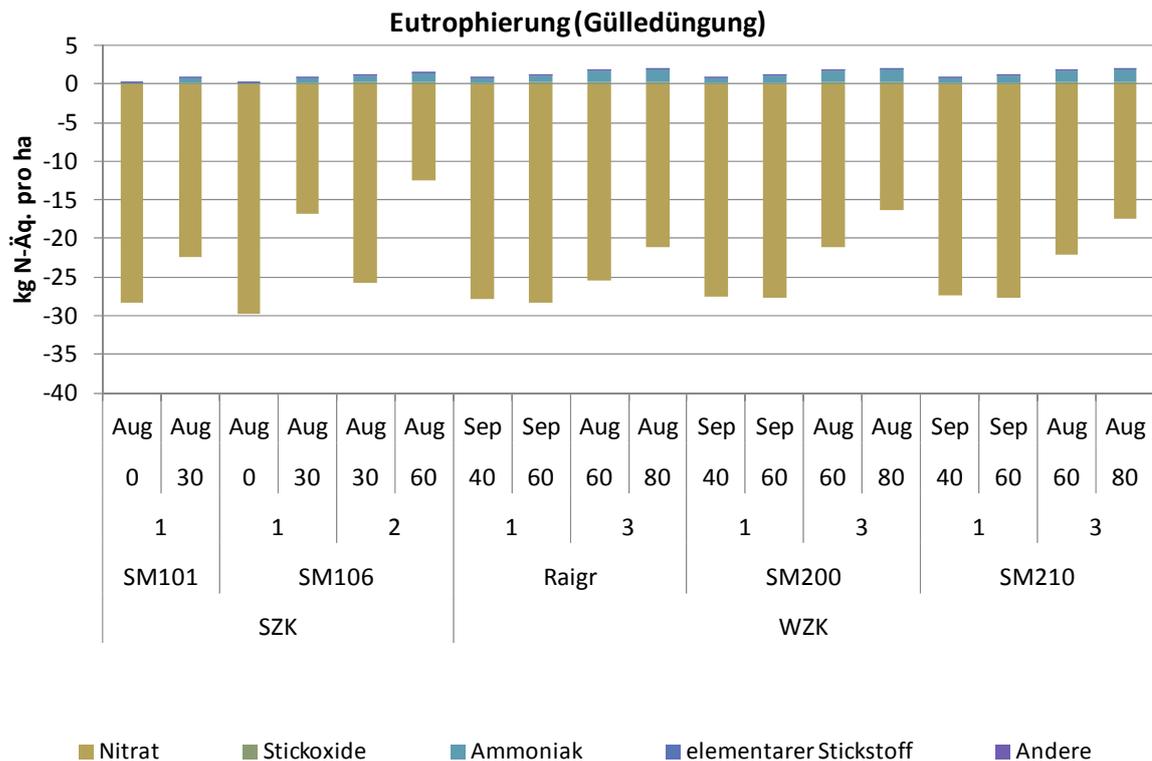


Abbildung 9: Aquatische Eutrophierung der güllegedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum.

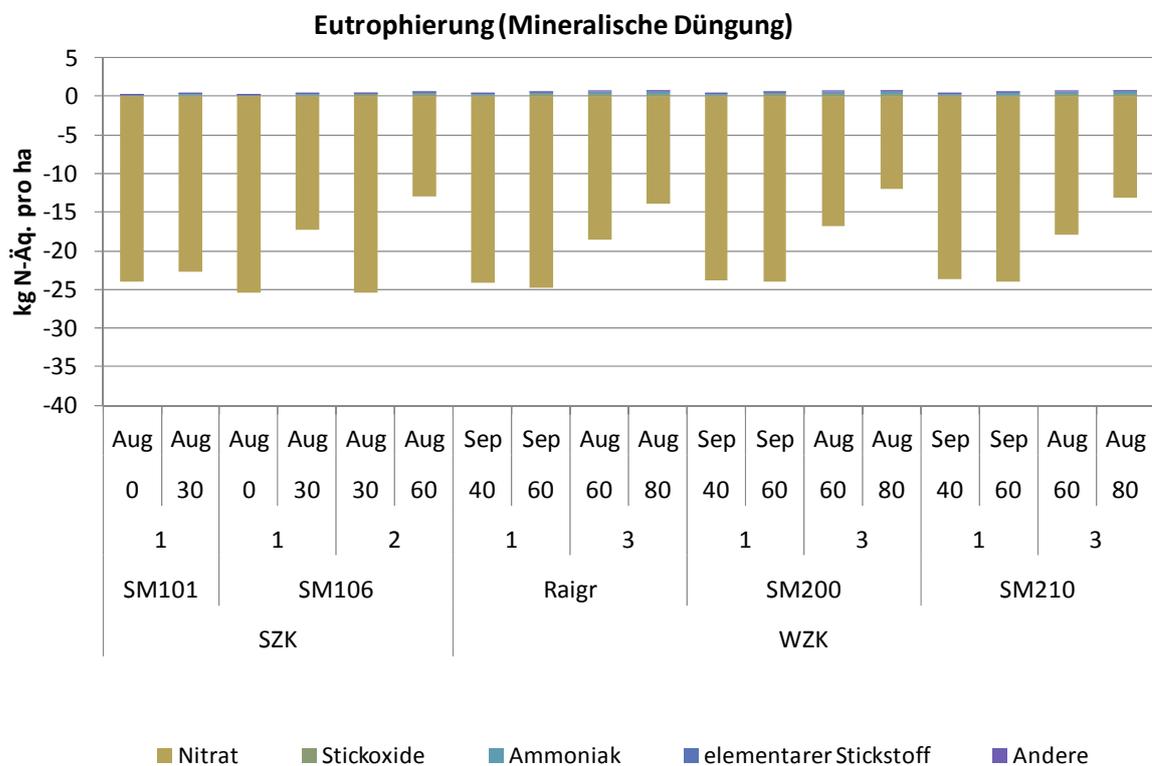


Abbildung 10: Aquatische Eutrophierung der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum.

Versauerung

Das Versauerungspotential wird durch Emission von Ammoniak bei der Ausbringung der Dünger bestimmt. Der Anteil von Ammoniak am gesamten Potential beträgt in den güllegedüngten Varianten 92-94 % (Abbildung 11). Werden Mineraldünger verwendet, liegt der Anteil bei 56-77 %. Neben Ammoniak sind Emissionen von Stickoxiden aus der Düngerherstellung und den Arbeitsprozessen die zweitwichtigste Quelle (Abbildung 12). Die Stickoxide sind für 18-31 % des Potentials in den mineralgedüngten Varianten verantwortlich. In den ungedüngten Varianten dominieren die bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entstehenden Emissionen wie Stickoxide und Schwefeldioxid. Ihr Anteil beträgt 79 bzw. 93 % in den Varianten SM101 sowie SM106. Der Zwischenkulturanbau auf einer Hektare verursacht Emissionen, die einem Versauerungspotential von 24-856 m² entsprechen. Die Gülledüngung verursacht dabei aufgrund der Emissionen während der Ausbringung im Durchschnitt ein 4-fach höheres Potential als die Mineraldüngung. Beim Vergleich der einzelnen Varianten sind die nachfolgenden Punkte zu erkennen:

- Bei einer um 20 bzw. 30 kg N erhöhten Düngung steigt das Potential um 35-228m² an. Besonders deutlich ist der Unterschied zwischen den nichtgedüngten und den mit 30 kg Gülle gedüngten Varianten von SM101 und SM106. Ursache ist das hohe Sättigungsdefizit der Luft im August.
- Wird bei gleichbleibender Gülledüngung die Schnitzzahl gesteigert, erhöht sich auch das Versauerungspotential. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die relative Emissionsrate, bei steigender Güllemenge pro Ausbringung, niedriger ist. Daher verursachen Varianten mit einer auf zwei Schnitte aufgeteilten Düngung ein um ~ 110 m² höheres Potential als einfach genutzte Varianten. Wird die Ausbringung auf drei statt auf einen Termin verteilt, steigt das Potential um ~ 278 m² an. Bei mineralischer Düngung hat die Anzahl der Schnitte und damit der Düngergaben einen deutlich geringeren Einfluss, da hier alleine die Menge an verfügbarem Stickstoff ausschlaggebend ist. Die Differenz zwischen Varianten mit gleicher Düngung, aber unterschiedlicher Schnitzzahl, beruht auf den zusätzlichen Arbeitsprozessen.
- Pro MJ UE betrachtet können die höheren Emissionen, die eine Aufteilung der Gülledüngung auf 2 oder 3 Gaben hervorruft, durch die Ertragssteigerung ausgeglichen werden. Das Versauerungspotential sinkt um durchschnittlich 6 %. Da in den mineralisch gedüngten Varianten der Unterschied pro ha zwischen einer und zwei bzw. drei Nutzungen wesentlich kleiner ist, verringert sich das Versauerungspotential pro MJ UE bei häufigerer Nutzung durch den höheren Ertrag um durchschnittlich 34 %.
- Die Intensivierung der Düngung führt im Allgemeinen zu einem höheren Versauerungspotential pro MJ UE. Der Anstieg beträgt zwischen 3 und 40 % in den gedüngten Varianten.
- Im Vergleich zu Mais verursacht die Bereitstellung eines MJ UE aus den güllegedüngten Zwischenkulturen ein zwischen 3.2- und 5.3-fach höheres Versauerungspotential. Bei mineralischer Düngung ist der Unterschied deutlich geringer. Der Faktor liegt zwischen 1.4 und 2.2. Die ungedüngten Varianten von SM101 und SM106 weisen hingegen ein niedrigeres Potential pro MJ UE als Mais auf.

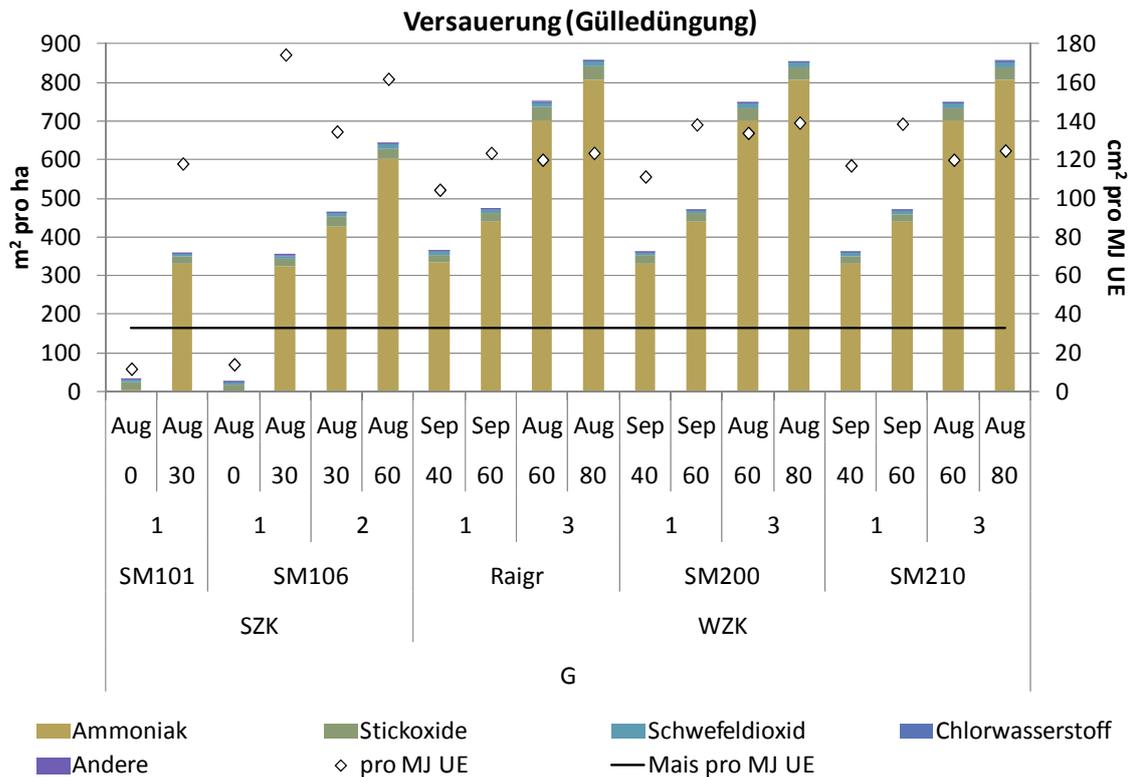


Abbildung 11: Versauerungspotential der gülleüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, in cm², das durch Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais entsteht.

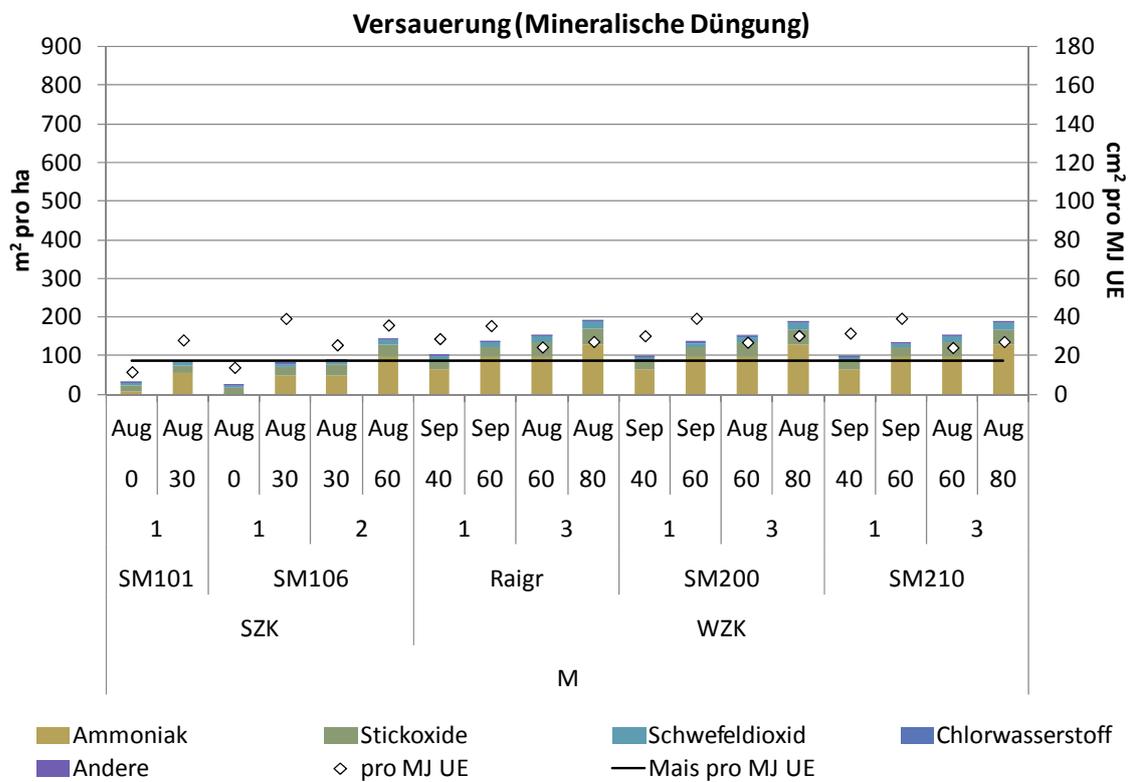


Abbildung 12: Versauerungspotential der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, in cm², das durch Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais entsteht.

3.2.3. Schadstoffmanagement

Terrestrische Toxizität

In der vorliegenden Untersuchung wird die terrestrische Toxizität hauptsächlich von Schwermetallen bestimmt, da Pflanzenschutzmittel in den Zwischenkulturen nicht eingesetzt werden. Lediglich über das Hafer-Saatgut findet in den SM101-Varianten ein bedeutender indirekter Input statt. Nahezu alle Güllevarianten weisen ein positives Toxizitätspotenzial auf wohingegen die mineralisch gedüngten Varianten aufgrund der Schwermetallbilanz ein negatives Potential aufweisen. In allen Varianten mit einem negativen Potential übersteigt die Summe aus Entzug und den Verluste über Erosion und Auswaschung die Einträge an Schwermetallen in den Boden. Die Emissionen aus den Vorketten sind für die Ergebnisse von untergeordneter Bedeutung. Für beide Düngerarten sind Chrom und Quecksilber die entscheidenden Elemente. Um die Ergebnisse zu deuten, ist zu erwähnen, dass im Schwermetallmodell ein Allokationsfaktor berechnet wird, der den Eintrag über Betriebsstoffe in Relation zum gesamten Eintrag inklusive der natürlichen Deposition setzt. Folglich wird, je grösser der Eintrag über die Dünger und Pflanzenschutzmittel ist, ein um so grösserer Anteil der Schwermetallbilanz der Kultur zugeordnet. Daher sind, aufgrund der höheren Einträge in den intensiv mineralisch gedüngten Varianten, die negativen Potentiale höher als in den Varianten mit niedrigerer Düngung (Abbildung 13 und Abbildung 14). Auf eine Darstellung der Ergebnisse pro MJ UE wird hier verzichtet, da diese aufgrund der negativen Ergebnisse nur schwerlich zu interpretieren sind.

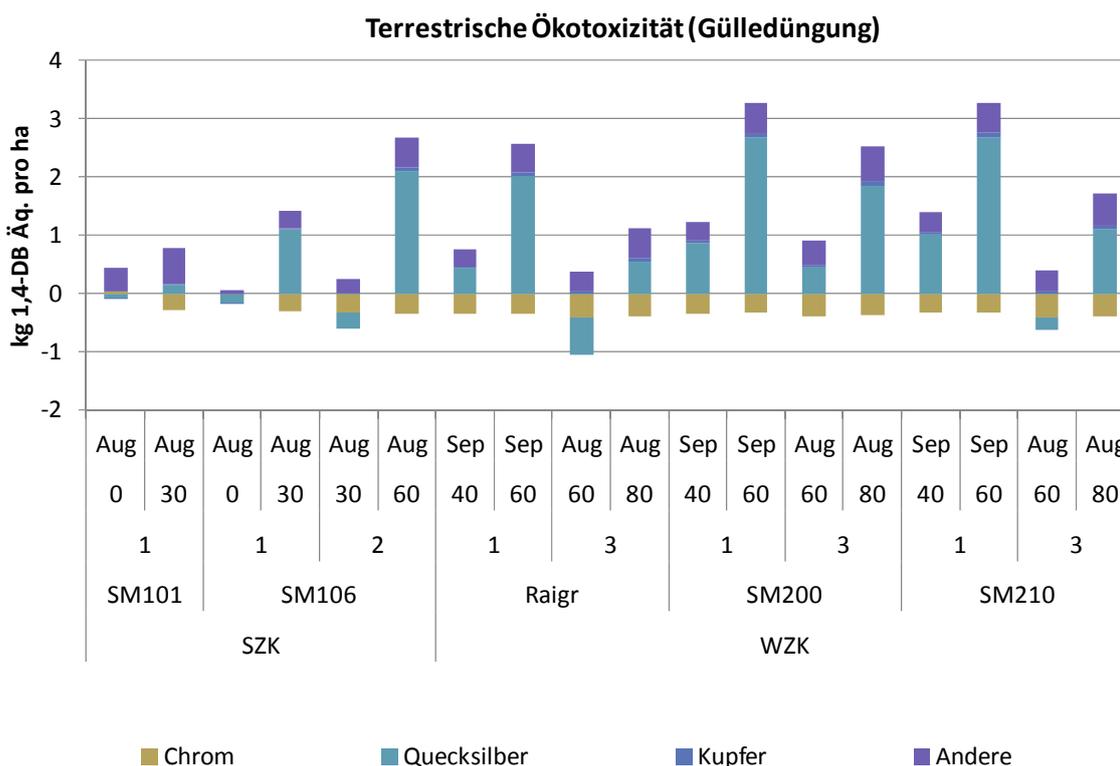


Abbildung 13: Terrestrische Ökotoxizität der güllegedüngten Zwischenkulturen in kg 1,4-DCB-Äq. nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum.

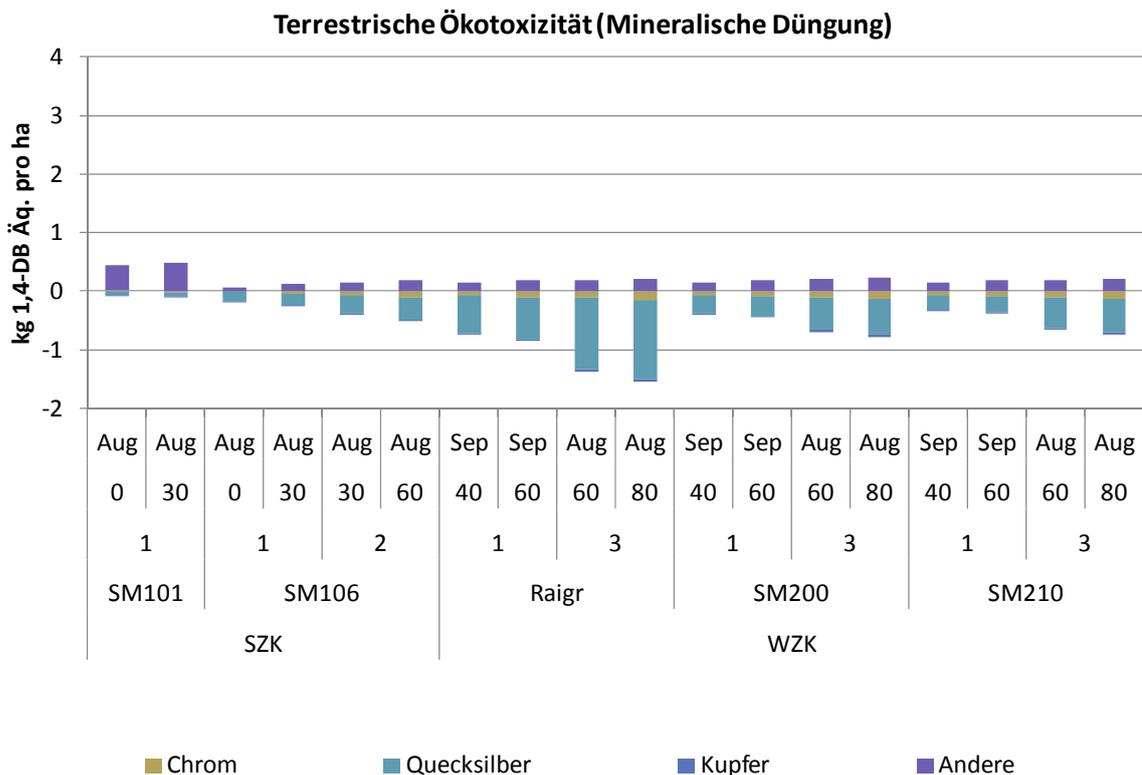


Abbildung 14: Terrestrische Ökotoxizität der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen in kg 1,4-DCB-Äq. nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum.

Aquatische Toxizität

Das aquatische Toxizitätspotential wird von Kupferionen, die durch Auswaschung und Erosion in Gewässer gelangen, sowie Emissionen von Barium in den Vorketten, vor allem in der Dieselproduktion, dominiert. Einzige Ausnahme ist die Standardmischung 101, die durch den indirekten Input von Isoproturon aus dem Anbau des Hafersaatgutes eine sehr hohe Toxizität aufweist (Abbildung 15 & Abbildung 16). In allen anderen Varianten tragen Kupferionen und Barium zusammen im Durchschnitt 50 % zum gesamten Potential bei. Emissionen von Quecksilber und Chrom in Oberflächengewässer und Grundwasser, die die Ursache für das terrestrische Ökotoxizitätspotential sind, spielen in der aquatischen Toxizität aufgrund ihrer niedrigen Charakterisierungsfaktoren nur eine untergeordnete Rolle. Der Einfluss einer steigenden Düngung ist deutlich geringer als für die terrestrische Toxizität. Dies ist wiederum durch die Allokation zu erklären. Die Deposition von Kupfer ist deutlich niedriger als der Eintrag über Dünger. Eine gesteigerte Düngung führt somit nicht zu einem deutlichen Anstieg des Toxizitätspotentials, da bereits bei geringer Düngermenge nahezu die gesamte Umweltwirkung auf die Kultur alloziert wird. Die Unterschiede in den einzelnen Düngerstufen werden vielmehr durch Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger in der Ernte bzw. der Düngerherstellung hervorgerufen. Es lassen sich für beide Düngertypen dieselben Tendenzen erkennen. Eine Erhöhung der Schnitzzahl führt aufgrund des Ertragsanstiegs zu einer geringeren Toxizität pro funktionelle Einheit. Die SZK liegen auf einem Niveau mit den 1-Schnitt-Varianten der WZK mit Ausnahme der ungedüngte SM 106, die auf dem Niveau der 3-Schnitt-Varianten der WZK liegt. Im Vergleich zu Mais erreichen die ZK pro MJ UE aufgrund der im Mais eingesetzten Pflanzenschutzmittel durchweg ein niedrigeres Potential.

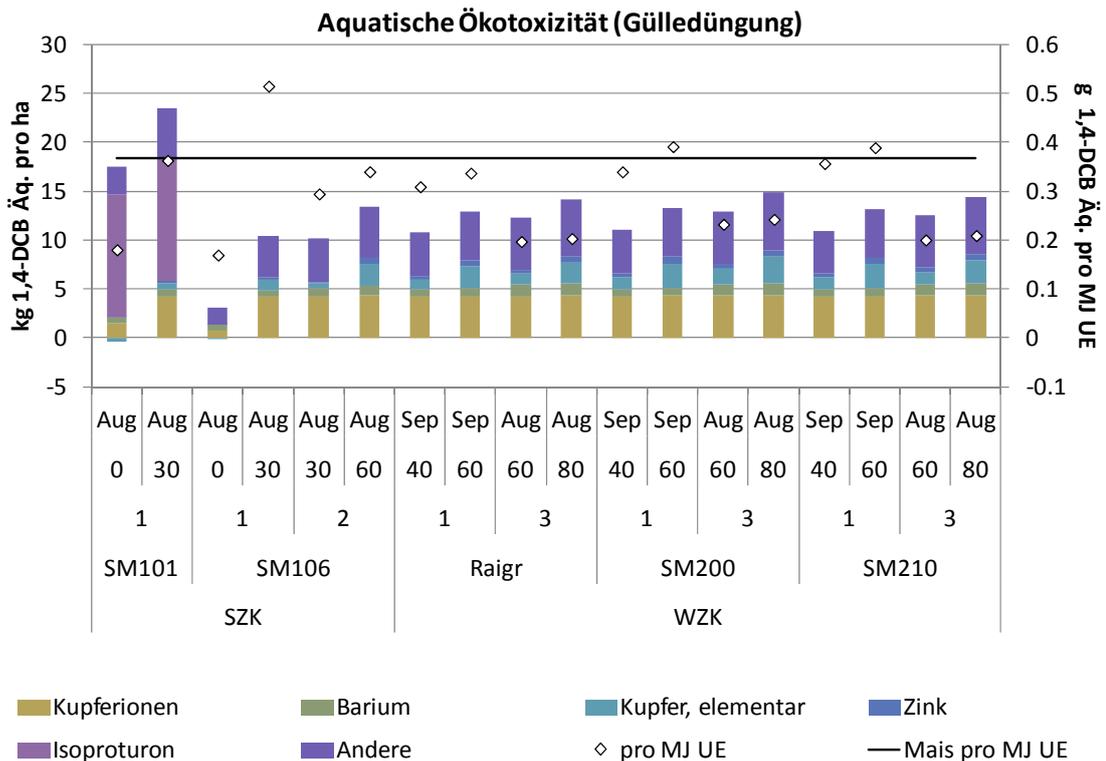


Abbildung 15: Aquatische Ökotoxizität der güllegedüngten Zwischenkulturen in kg bzw. g 1,4-DCB-Äq. nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbare Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, das durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.

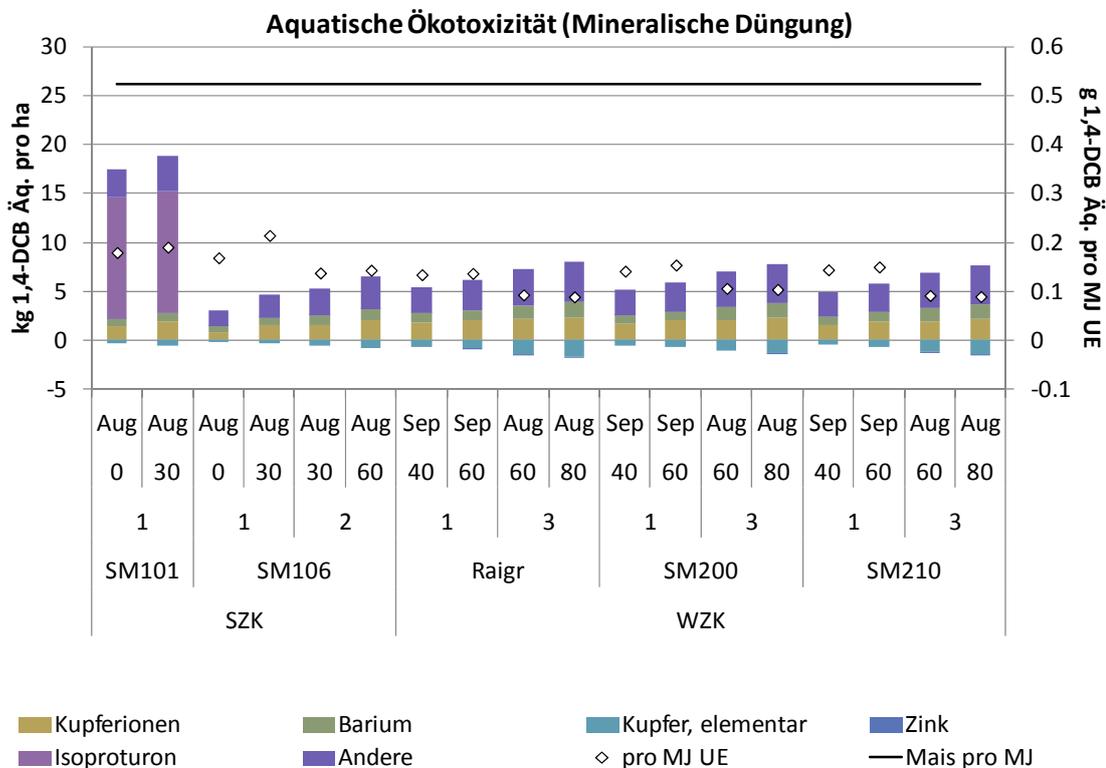


Abbildung 16: Aquatische Ökotoxizität der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen in kg bzw. g 1,4-DCB-Äq. nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbare Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, das durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.

Humantoxizität

Die Humantoxizität wird überwiegend durch die Nutzung fossiler Energieträger und die dabei entstehenden Emissionen bestimmt. Hauptsächlich sind dies aromatische polyzyklische Kohlenwasserstoffe (PAK), Arsen, Chrom VI und Nickel. Wobei die PAK und Chrom-Emissionen zusammen ungefähr 81 %, Arsen und Nickel zusammen 12 % zum gesamten Potential beitragen (Abbildung 17, Abbildung 18). Ähnlich der Ozonbildung korreliert diese Wirkungskategorie sehr stark mit dem Bedarf an nicht-erneuerbaren Energien. Die Korrelationskoeffizienten entsprechen mit 0.997 in den güllegedüngten - bzw. 0.926 in den Varianten mit mineralischer Düngung denen zwischen Ozonbildung und NEE. Der Grossteil des Potentials wird durch Ernteprozesse und die Bodenbearbeitung gefolgt von der Düngerherstellung und Ausbringung hervorgerufen. Folglich führt eine intensivere Düngung und eine häufigere Schnitzzahl zu einem höheren Potential pro ha. Pro MJ UE ergeben sich folgende Tendenzen: Eine höhere Schnitzzahl führt durch die Ertragssteigerung zu einem niedrigeren Potential pro MJ UE. Wird die Düngung bei gleicher Schnitzzahl erhöht, sinkt bei Gülle Düngung das Potential. Wird hingegen mineralischer Dünger verwendet, verringert sich das Potential nur in den 2- bzw. 3-Schnitt-Varianten, da in den 1-Schnitt-Varianten die Ertragssteigerung nicht ausreichend ist, um die energieintensive Düngerherstellung auszugleichen.

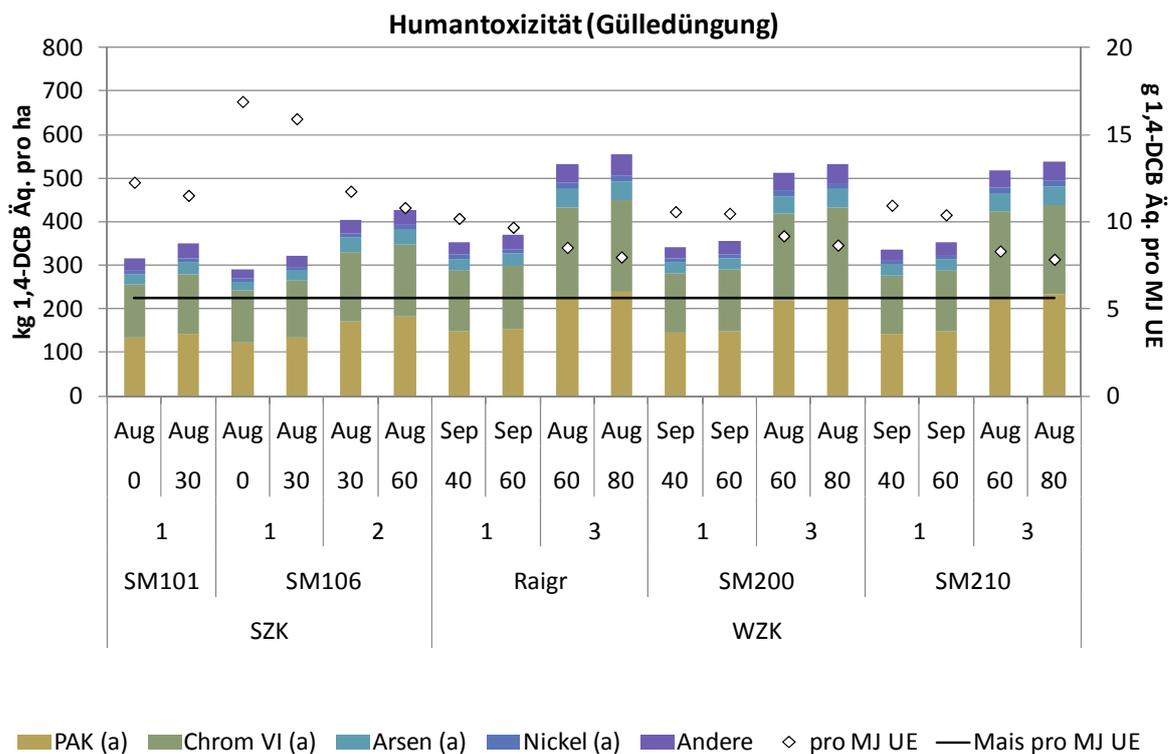


Abbildung 17: Humantoxizität der güllegedüngten Zwischenkulturen in kg bzw. g 1,4-DCB-Äq. nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbare Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, das durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.

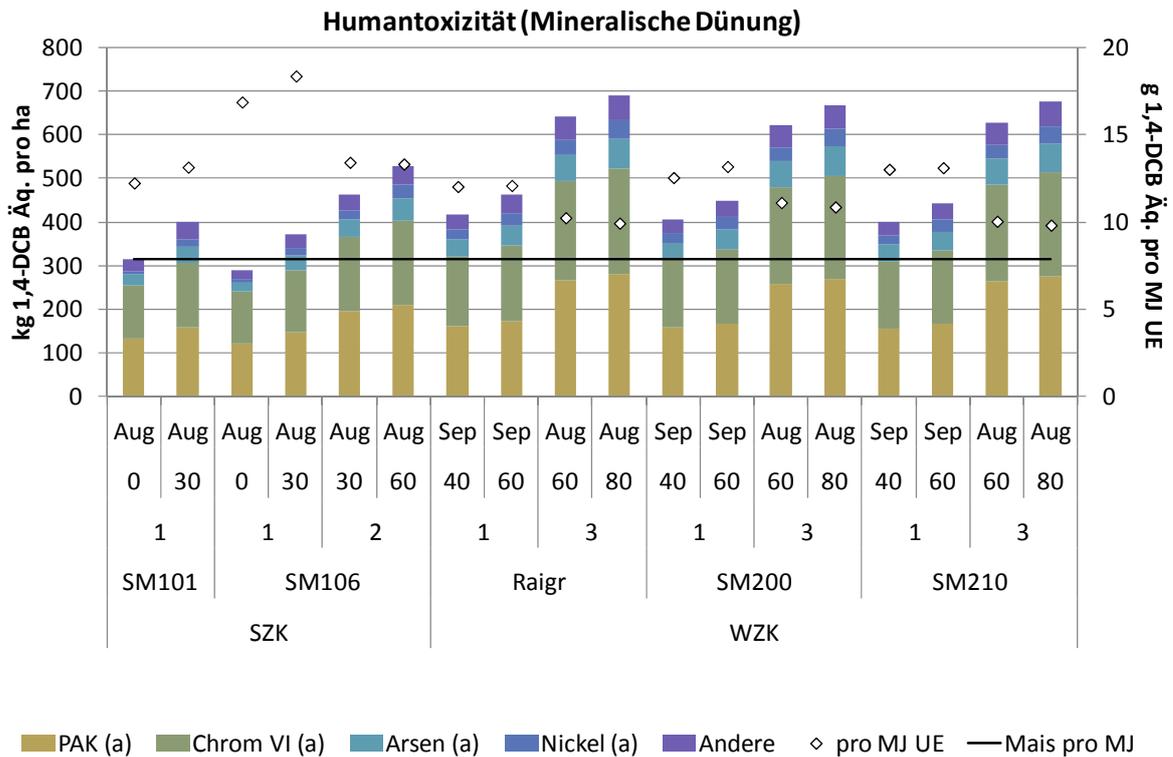


Abbildung 18: Humantoxizität der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen in kg bzw. g 1,4-DCB-Äq. nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbare Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, das durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird

3.2.4. Kosten-, Leistungsrechnung

In den beernteten Sommer- und Winterzwischenkulturen sind die Kosten für Kulturen mit einer Gülledüngung höher als bei einer mineralischen Düngung, da entsprechend höhere Maschinen- und Arbeitserledigungskosten bei der Gülleausbringung anfallen, obwohl für die Gülle kein Preis berücksichtigt wurde, diese somit gratis ab Hof bzw. ab Biogasanlage zur Verfügung steht.

Bei den Zwischenkulturen mit Gülledüngung liegen die Kosten zwischen rund 1'500 (Sm106, 30kg N, Aug.) und 3'500 Sfr. pro ha (Raigras 3-Schnitte, 80 kg N, Aug.). Dabei erhöhen sich durch zunehmende Intensivierungsschritte wie höheres Düngeniveau oder höhere Schnitthäufigkeit entsprechend die Maschinen- und Arbeitskosten je Hektar. Werden die Kosten nicht auf die Fläche bezogen sondern auf die erzeugten Energiegehalte (Futterwerte) gemessen in MJ UE zeigt sich, dass höhere Düngemengen und dadurch höhere Düngekosten bei der SM 106 hinsichtlich der erzeugten Energie in niedrigeren Kosten resultieren. Eine höhere Schnittnutzung bei gleichem Düngeniveau kann niedrigere Kosten je Energieeinheit bewirken, z.B. bei Klee gras SM 106. Dagegen führt eine sehr intensive dreimalige Schnittnutzung bei den Winterzwischenfrüchten aufgrund der hohen Erntekosten zu höheren spezifischen Kosten. Eine zweimalige Schnittnutzung könnte ggf. positivere Resultate bringen, wurde im Rahmen dieser Arbeit aber nicht untersucht. Im Vergleich zu Silomais als Referenzkultur, mit spezifischen Kosten von rund 3 Rp. pro MJ UE, weisen alle Zwischenkulturen deutlich höhere Bereitstellungskosten auf.

Bei den Zwischenkulturen mit mineralischer Düngung liegen die Kosten zwischen rund 1'500 SFr. pro ha (SM106, 30kg N, Aug.) und rund 3'000 Fr. pro ha (Raigras 3-Schnitte, 80 kg N,

Aug.). Damit liegt das Kostenniveau der intensiver gedüngten Varianten deutlich unter denen der Varianten mit Gülledüngung.

Auch bei der mineralischen Düngung erhöhen sich durch zunehmende Intensivierungsschritte die Maschinen- und Arbeitskosten bezogen auf die Fläche, wohingegen die Kosten pro MJ UE leicht niedriger sind. Insgesamt sind die Ergebnisse vergleichbar mit denen der Varianten mit Gülledüngung. Im Vergleich zu Silomais weisen alle Zwischenkulturen deutlich höhere Bereitstellungskosten auf.

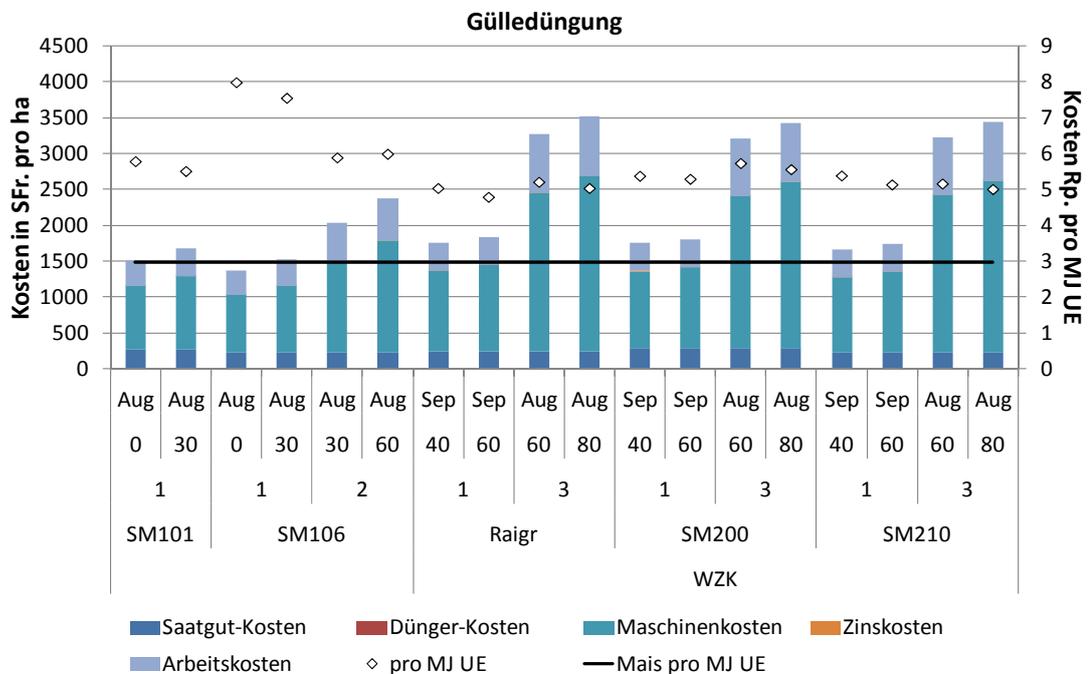


Abbildung 19: Kosten des Anbaus von verschiedenen Sommer- und Winterzwischenkulturen mit Gülledüngung.

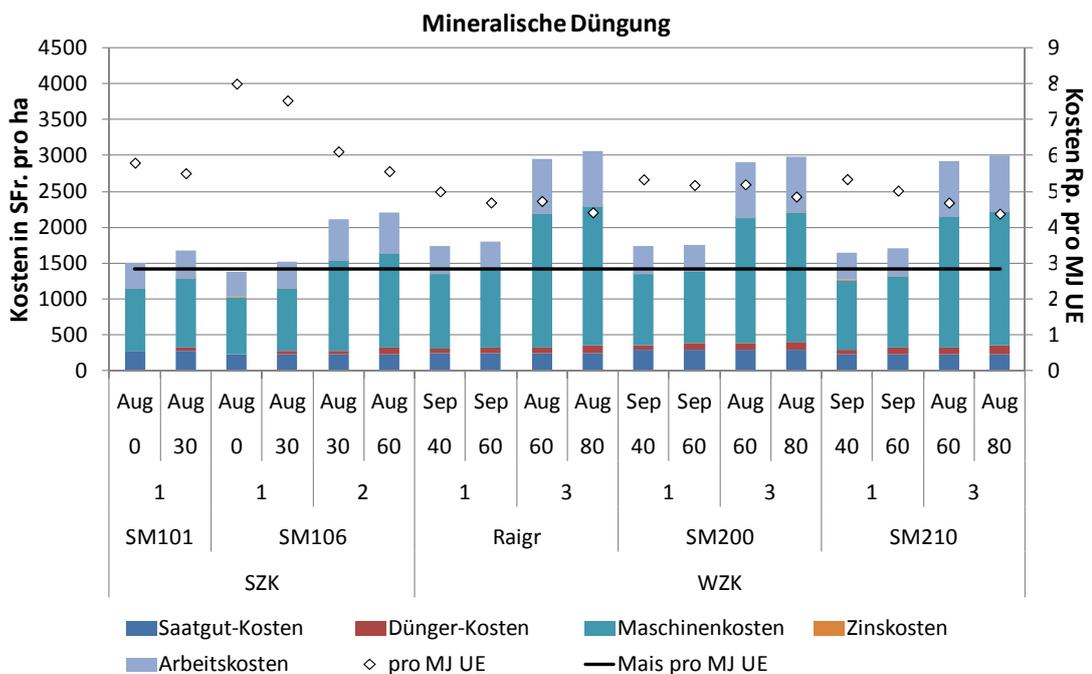


Abbildung 20: Kosten des Anbaus von verschiedenen Sommer- und Winterzwischenkulturen mit mineralischer Düngung.

3.2.5. Zusammenfassung

Wie in der Einleitung bereits geschrieben, stand im Kapitel 3.2 die produktive Funktion der Zwischenkulturen im Vordergrund. Aus diesem Grund wurde keine Gutschrift für den Ersatz einer Gründüngung verwendet, da die Zwischenkultur angebaut wird, um einen bestehenden Bedarf zu decken. Da in der vorliegenden Studie keine der Varianten für beide Düngertypen über alle Umweltwirkungen und die beiden funktionellen Einheiten ha * Anbauzeitraum bzw. MJ UE als eindeutig Beste identifiziert werden konnte, werden im Folgenden die Ergebnisse zusammengefasst, um daraus die am ehesten empfehlenswerten Varianten abzuleiten. Auf einen Vergleich der Ergebnisse pro ha * Anbauperiode wird hierbei verzichtet, da eine gesteigerte Intensität aufgrund einer höheren Schnitzzahl oder Düngung, in den meisten Kategorien zu höheren Umweltwirkungen führt. Ausnahmen treten lediglich in der Eutrophierung sowie der terrestrische und aquatischen Toxizität auf. Diese werden im Folgenden kurz ausgeführt.

- Im Bezug auf die Reduktion der Eutrophierung im Vergleich zu einer Brache erreichen die WZK mit 60 kg Stickstoffdüngung und einer Nutzung ähnliche Werte wie die Varianten mit 40 kg N-Düngung. Zu erklären ist dies durch die höheren Erträge und die dadurch gesteigerte N-Aufnahme, wodurch sich ein geringerer Nitratverlust ergibt.
- Die mit der Intensität ansteigende negative terrestrische Toxizität in den mineralisch gedüngten Varianten ist durch die Allokation zwischen der Deposition und den anderen Einträgen zu erklären. Aufgrund der Auswaschung von Schwermetallen weisen alle Varianten eine negative Bilanz auf. Diese wird auf den Eintrag in den Boden über Deposition sowie über die Produktion (Düngung und weitere Inputs) alloziert. Je höher der Eintrag über die Düngung, desto grösser ist folglich der Anteil der Kultur an der negativen Bilanz.

Unabhängig von der Düngerart ergeben sich folgende Tendenzen. Pro MJ UE sind die intensiven WZK mit 3 Schnitten und die ungedüngte SM101 die effizienteste Varianten hinsichtlich des Ressourcen-, Schadstoff und Nährstoffmanagements. In allen betrachteten Kategorien mit Ausnahme des Treibhausgasausstosses und der Versauerung verursachen die intensiveren WZK Varianten die niedrigsten Effekte. Dabei treten nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Varianten mit 60 kg bzw. 80 kg Stickstoffdüngung auf. Für das Raigras ergibt sich jedoch ein leichter Vorteil gegenüber den beiden Standardmischungen 210 und 200. Die Umweltwirkungen der SZK sind durchweg höher verglichen mit den intensiven WZK. Als Ausnahme besonders zu nennen ist hier die ungedüngte SM101, die gegenüber den intensiven WZK ein um 74 % niedrigeres Versauerungspotential, um 48 % niedrigere Treibhausgasemissionen und ein vergleichbares Potential der aquatische Toxizität aufweist.

Die niedrigsten Anbaukosten pro MJ UE erreichen die mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Unabhängig von der Düngung verursachen dabei die Varianten 3-Schnitt-Raigras mit 80 kg N-Düngung und SM210 3-Schnitt mit 80 kg N die geringsten Kosten in Höhe von 4.4 Rp. pro MJ UE bei mineralischer Düngung und 5 Rp. wenn Gülle zur Düngung verwendet wird. Vergleichsweise hohe Kosten weisen vor allem die SZK auf, die Kosten liegen zwischen 5.5 und 8 Rp. pro MJ UE. Im Vergleich zu Mais sind die Bereitstellungskosten von Grundfutter aus Zwischenkulturen je MJ UE um 50 – 280 % höher.

3.3. Stromerzeugung aus Zwischenkulturen

Die folgende Auswertung der Ergebnisse hat zum Ziel, die einzelnen Zwischenkultur-Varianten hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzeugung von Strom aus Biogas zu bewerten. Wie unter Kap. 2.5 beschrieben, wird dabei die Produktion der Zwischenkulturen und die Erzeugung des Stromes berücksichtigt. Die Erzeugung von Strom aus Biogas wird abgebildet durch den Mittelwert der beiden entsprechenden Ökoinventare in ecoinvent. Die dort verwendeten Faktoren für die Allokation zwischen Strom und Wärme werden auch für den Anbau der Zwischenkulturen verwendet. Da die Zwischenkulturen neben der Produktion von Biomasse ebenfalls die Funktion einer Gründüngung erfüllen wurde eine Gutschrift eingeführt und es werden nur die Umweltwirkungen berücksichtigt, die durch Düngung, Ernte, Konservierung und Biogaserzeugung im Vergleich zu einer Gründüngung zusätzlich entstehen. Die funktionelle Einheit für diesen Vergleich ist 1 kWh erzeugter Strom. Als Referenz wird der Schweizerische Strommix („electricity-mix/CH“) aus ecoinvent verwendet. Der ebenfalls abgebildete Produktionsmix UCTE soll die Umweltwirkungen einer Stromerzeugung verdeutlichen, die stärker auf fossilen Energieträgern als auf Wasserkraft und Atomenergie beruht. Als Hauptkriterium zur Bestimmung der für die Biogasgewinnung geeigneten Zwischenkulturen wurde im Auswertungskonzept das Treibhausgaspotential festgelegt, da es sinnvoll erscheint, Strom aus Biomasse zu erzeugen, dessen Produktion einen geringeren Ausstoss klimaschädlicher Gase verursacht als der Schweizerische Strommix.

3.3.1. Ressourcenmanagement

Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie

Schreibt man den Zwischenkulturen den Bedarf gut, der nötig ist um eine Gründüngung zu etablieren, unter der Annahme, dass die geernteten Zwischenkulturen die Gründüngungsfunktion von Senf und Phacelia ebenfalls erbringen und berücksichtigt somit nur die zusätzlichen Produktionsmittel (höhere Düngung, Ernteprozesse, Konservierung, Vergärung in der Biogasanlage und Stromgewinnung), ergibt sich pro kWh_{el} ein Einsatz von nicht erneuerbaren Energien, der je nach Variante zwischen 1.4-3.9 MJ-Äq. bei Mineraldüngung (Abbildung 22) bzw. 1.3-2.4 MJ-Äq. (Abbildung 21), wenn Gülle zur Düngung verwendet wird, liegt. Pro kWh Strom aus den Zwischenkulturen wird somit ~11-84 % weniger NEE benötigt als für die Erzeugung einer kWh des Strommixes Schweiz.

Die beiden Kulturen Senf und Phacelia haben aufgrund der geringen Trockensubstanzerträge im Herbst und der niedrigen Biogasausbeute pro kg TS den höchsten Energiebedarf pro erzeugte kWh. Dass ein gewisser Ertrag aus Sicht der Energieeffizienz nötig ist, zeigt sich, wenn der potentielle Stromertrag pro ha in Relation zum Energiebedarf pro kWh erzeugten Strom gesetzt wird (Abbildung 23). Der Energiebedarf steigt pro erzeugter kWh_{el} unterhalb eines Ertrages von ~3'000 kWh pro ha deutlich an. Diese Tendenz ist in den mineralisch gedüngten Varianten, aufgrund der Düngerherstellung, deutlicher ausgeprägt. Oberhalb dieser Grenze ist der Bedarf an NEE pro kWh_{el} nahezu identisch.

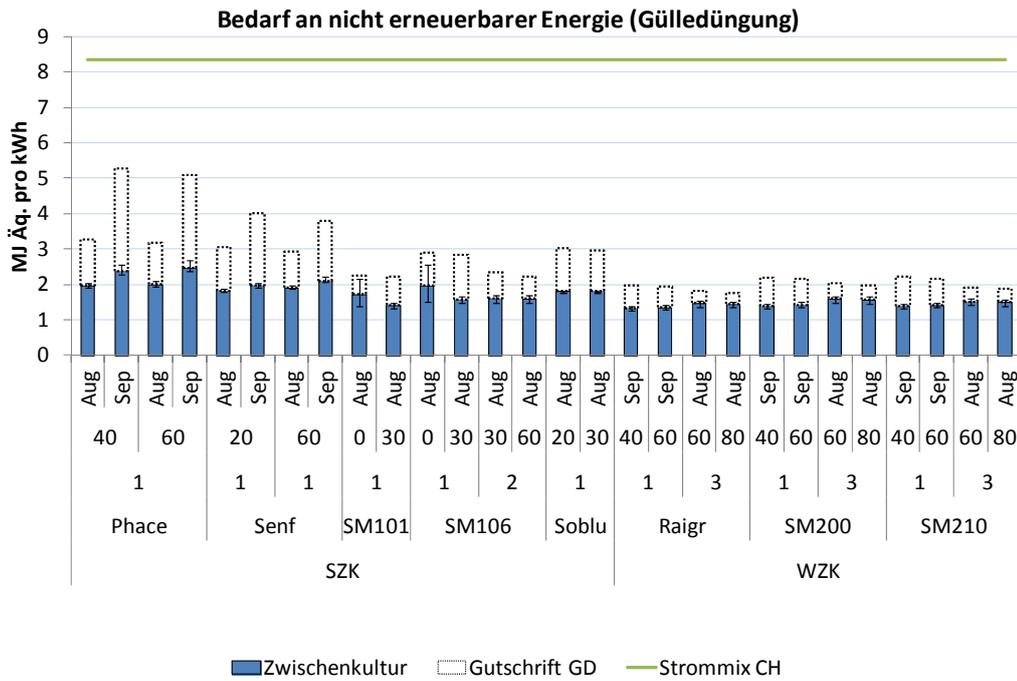


Abbildung 21: Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie (NEE-Bedarf) einer kWh_{el} aus gülleüngten Zwischenfrüchten nach Abzug der für eine Gründüngung durchschnittlich benötigten NEE (blaue Säulen). Der gestrichelte Säulenabschnitte entspricht der Gutschrift für den Ersatz der Gründüngung. Im Vergleich dazu ist der NEE-Bedarf des Schweizerischen Strommixes (grüne Linie) gezeigt. Die Fehlerbalken geben die Spannweite des NEE an wenn der Ertrag, unter Anpassung der ertragsabhängigen Prozesse (z. B. Ballen pressen) und Betriebsstoffe (z. B. Silofolie), um 20 % schwankt.

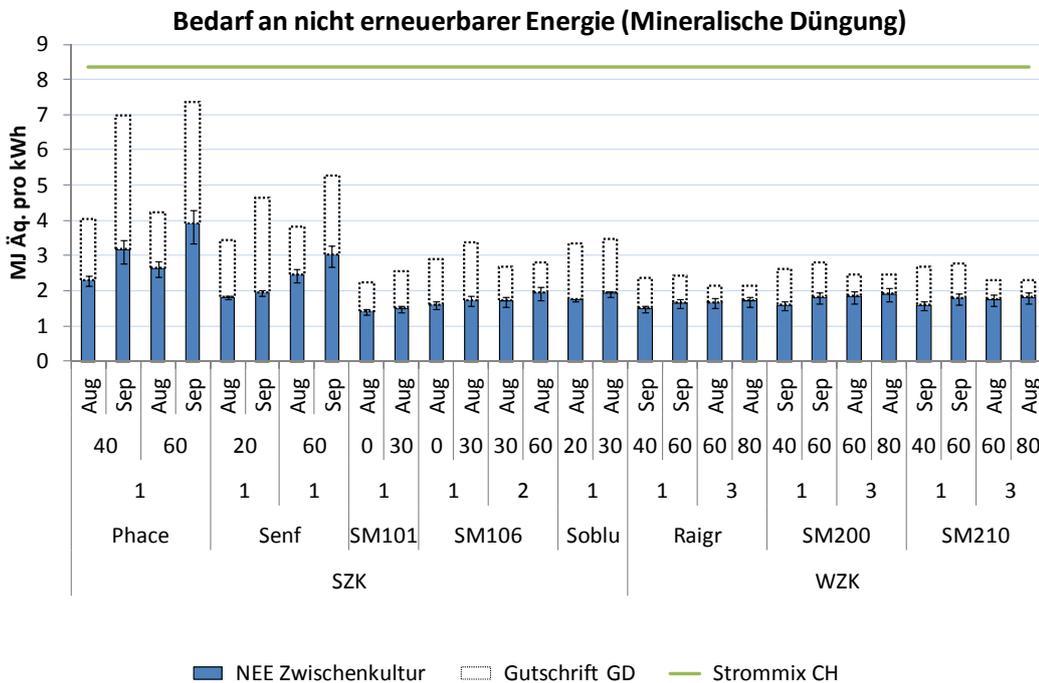


Abbildung 22: Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie (NEE-Bedarf) einer kWh_{el} aus mineralgedüngten Zwischenfrüchten nach Abzug der für eine Gründüngung durchschnittlich benötigten NEE (blaue Säulen). Der gestrichelte Säulenabschnitte entspricht der Gutschrift für den Ersatz der Gründüngung. Im Vergleich dazu ist der NEE-Bedarf des Schweizerischen Strommixes (grüne Linie) gezeigt. Die Fehlerbalken geben die Spannweite an des NEE an wenn der Ertrag, unter Anpassung der ertragsabhängigen Prozesse (z. B. Ballen pressen) und Betriebsstoffe (z. B. Silofolie), um 20 % schwankt.

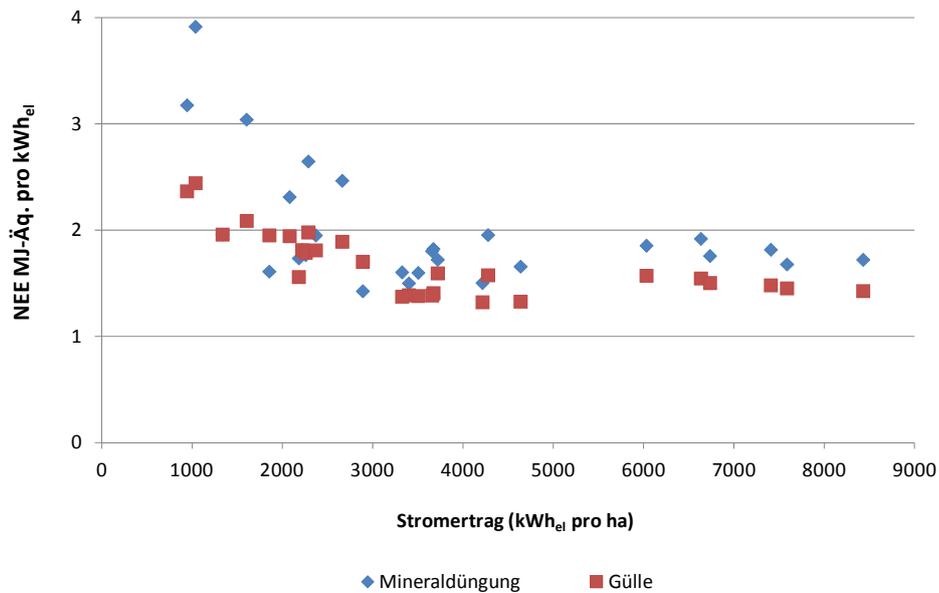


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Stromertrag in kWh_{ei}*ha⁻¹ und Bedarf an NEE pro erzeugter kWh.

Aus dem Ergebnis lässt sich keine allgemeingültige Aussage über eine anzustrebende Schnitzzahl oder Düngung ableiten. Allerdings ist die Tendenz zu erkennen, dass eine höhere Düngung in den mineralgedüngten Zwischenkulturen bei gleicher Schnitzzahl zu einer geringfügigen Steigerung des Energiebedarfs pro funktionelle Einheit führt. In den güllegedüngten Varianten verringert sich der Bedarf in der hier berücksichtigten Spannbreite hingegen leicht, da die Bereitstellung von einem zusätzlichem kg Stickstoff aus Gülle weniger Energie benötigt. Wird die Schnitzzahl bei gleicher Stickstoffdüngung erhöht, ergibt sich in den meisten Fällen ein höherer Energieeinsatz je kWh erzeugten Strom. Dass die Ergebnisse nicht im Wesentlichen von den Ertragsannahmen beeinflusst sind, ergibt die Sensitivitätsanalyse, in der der Ertrag unter Anpassung aller abhängigen Prozesse (z. B. Ballen pressen) und Betriebsstoffe (z. B. Silofolie) um 20 % variiert wurde. Die Analyse, dargestellt als Fehlerbalken in Abbildung 22 und Abbildung 21, zeigt, dass sich der Energieeinsatz nur unterproportional ändert, wenn von einem Mehr- bzw. Minderertrag von 20 % ausgegangen wird. Im Durchschnitt über alle Varianten beträgt die Abweichung 7 %.

Treibhausgasemissionen

Der aus dem Biogas der Zwischenkulturen gewonnene Strom weist bei Mineraldüngung Emissionen von 0.15-0.51 kg CO₂-Äquivalenten pro kWh auf (Abbildung 25). In den mit Gülle gedüngten Varianten liegt das Potential bei 0.15-0.43 kg CO₂-Äq. je kWh_{el} (Abbildung 24). Die THG-Emissionen des Schweizerischen Strommixes betragen pro kWh, aufgrund des hohen Anteils an Wasser- und Kernkraft, nur 0.125 kg CO₂-Äq. Von den hier bilanzierten Varianten unterschreitet keine diesen Wert. In kg CO₂-Äq. pro kWh gemessen, verursacht die Stromerzeugung aus den Kulturen um bis zu 4-fach höhere THG-Emissionen als der Schweizerische Strommix. Die Emissionen des Produktionsmixes UCTE hingegen übersteigen diejenigen aller bilanzierten Varianten um das bis zu 6-fache. Selbst ohne Gutschrift erreichen die meisten Varianten pro kWh_{el} einen niedrigeren Treibhausgasemissionswert als der Strommix UCTE. Auch der Treibhausgasausstoß pro kWh_{el} reagiert nur wenig sensitiv auf eine Ertragsschwankung von ± 20 % wie an den Fehlerbalken in Abbildung 24 und Abbildung 25 zu erkennen ist. Im Durchschnitt über alle Varianten beträgt die Abweichung aufgrund des höheren bzw. niedrigeren Ertrags 2 %.

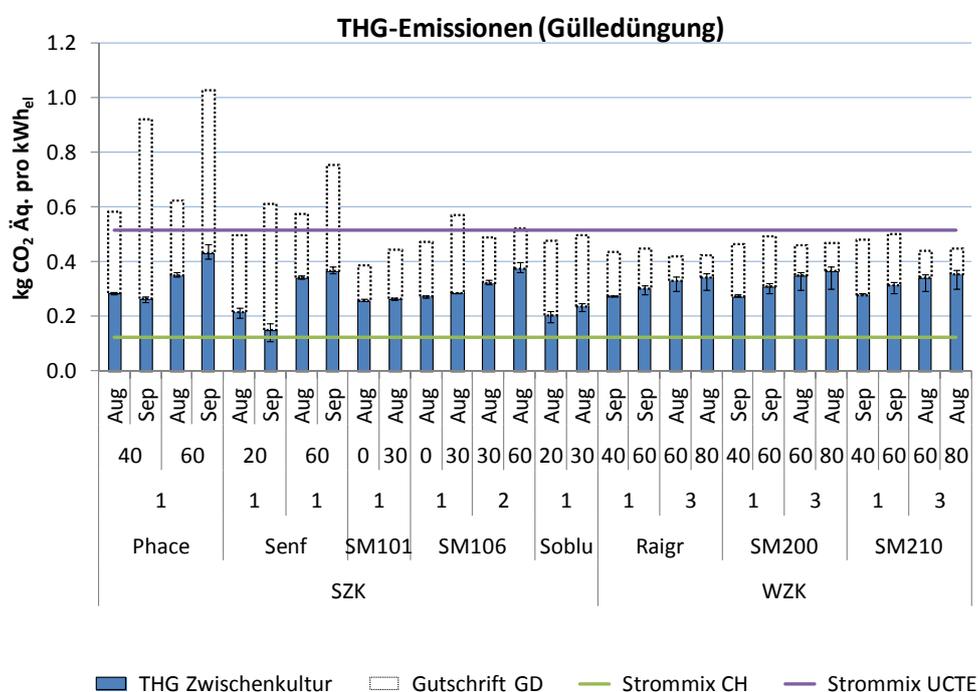


Abbildung 24: Treibhausgasemissionen die bei der Biogasstromproduktion aus güllegedüngten Sommer- und Winterzwischenkulturen (SZK und WZK) zusätzlich entstehen, wenn diese statt einer Gründüngung angebaut werden. Die Fehlerbalken geben die mögliche Schwankungsbreite der Emissionen bei ± 20 % des Biomasseertrags an. Zusätzlich angegeben sind die Treibhausgasemissionen pro kWh Schweizer Strommix (grüne Linie) und pro kWh Strommix UCTE (violette Linie).

Die aufgeführten Ergebnisse werden deutlich von der Auswahl der verwendeten Ökoinventare für die Erzeugung von Strom aus Biogas beeinflusst. In der ecoinvent-Datenbank liegen für die Stromproduktion aus Biogas zwei Ökoinventare vor „electricity, at cogen with biogas engine, agricultural, alloc. exergy/CH“ und „electricity, at cogen with biogas engine, agricultural covered, alloc. exergy/CH“, die sich dadurch unterscheiden, dass die Biogasproduktion entweder einstufig, d.h. mit einem Fermenter oder zweistufig, d.h. in zwei hintereinander geschalteten Fermentern, durchgeführt wird. Im zweiten Fall ist die Methanausbeute höher. Zusätzlich sind die Emissionen bei der Lagerung der Gärreste

reduziert. Dies spiegelt sich wider in einem deutlich geringeren Treibhausgasausstoss (Abbildung 26).

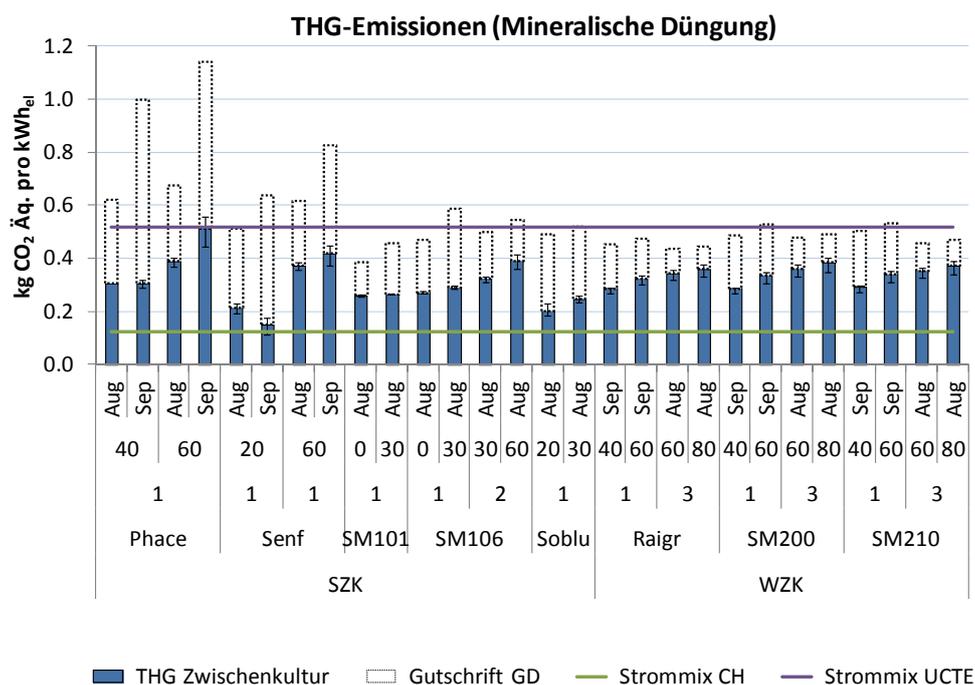


Abbildung 25: Treibhausgasemissionen die bei der Biogasstromproduktion aus mineralgedüngten Sommer- und Winterzwischenkulturen (SZK und WZK) zusätzlich entstehen, wenn diese statt einer Gründüngung angebaut werden. Die roten Fehlerbalken geben die mögliche Schwankungsbreite der Emissionen bei $\pm 20\%$ des Biomasseertrags. Zusätzlich angegeben sind die Treibhausgasemissionen pro kWh Schweizer Strommix (grüne Linie) und pro kWh UCTE (violette Linie).

Bei der Vergärung und Verstromung in zweistufigen Anlagen entstehen Emissionen von 0.16 kg CO₂-Äq. pro kWh Strom. Die Produktion in einstufigen Anlagen verursacht mit 0.37 kg CO₂-Äq. pro kWh einen mehr als doppelt so hohen Effekt. Wie bereits beschrieben beruht die Berechnung auf der Annahme, dass jeweils 50 % der landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Schweiz mit einem bzw. zwei Fermentern ausgestattet sind. Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse sollte abgeschätzt werden, wie sich das THG-Potential des Biogasstroms aus Zwischenkulturen bei ausschliesslich ein- bzw. zweistufiger Vergärung ändert. Würden Zwischenkultursubstrate in einstufigen Biogasanlagen vergoren, erhöht sich das THG-Potential um jeweils 0.1 kg CO₂-Äquivalente pro kWh (Abbildung 26). Dies entspricht im Durchschnitt 33 % bei den mineralgedüngten bzw. 35 % bei den güllegedüngten Varianten somit vergrössert sich die Differenz zwischen dem Strom aus Zwischenkulturen und dem Schweizerischen Strommix. Die Vergärung in zweistufigen Biogasanlagen, die den Grossteil der neugebauten Anlagen ausmachen, verringert das THG-Potential um ebenfalls 0.1 kg CO₂-Äquivalente pro kWh. Bei Produktion in zweistufigen Anlagen lägen die beiden Senfvarianten mit einer Düngung von 20 kg Stickstoff und die Sonnenblumenvariante mit 20 kg Stickstoffdüngung sowohl bei mineralischer wie auch Gülledüngung unterhalb des Treibhauseffekts des Schweizer Strommix.

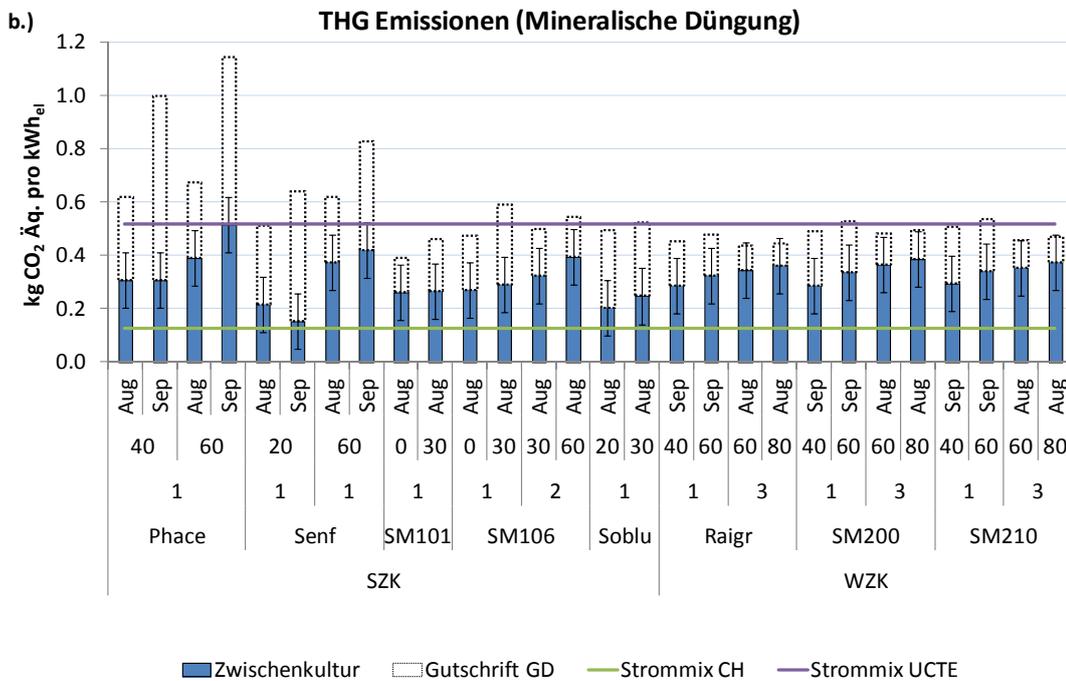
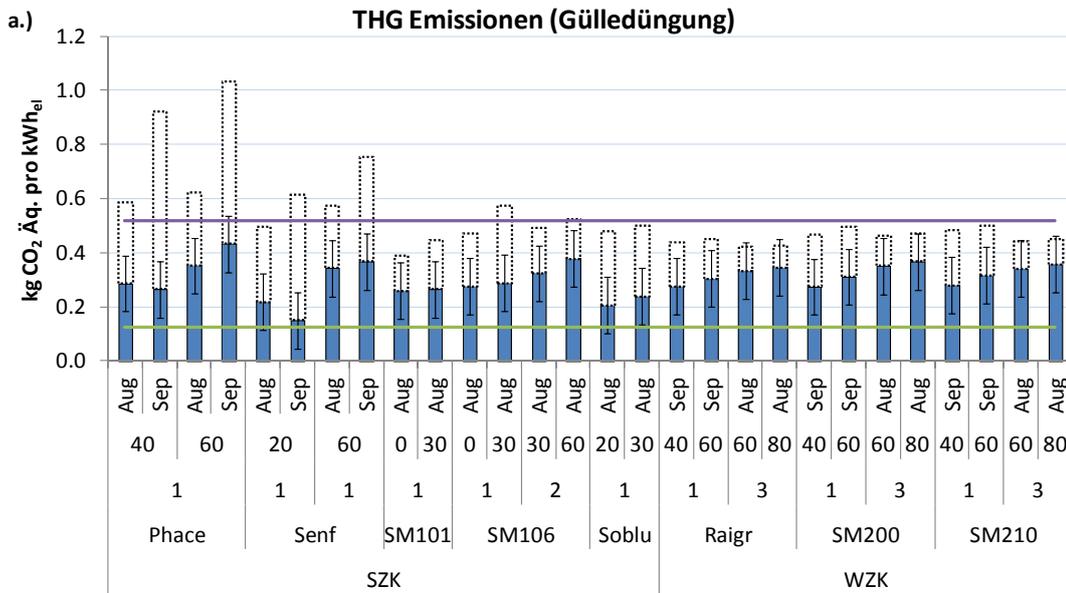


Abbildung 26: Einfluss des Biogasproduktionsinventares auf die Treibhausgasemissionen der Biogasstromproduktion aus gülle- (a) bzw. mineralisch (b) gedüngten Sommer- und Winterzwischenkulturen (SZK und WZK). Der positive Fehlerbalken zeigt das Resultat unter Annahme 100 % einstufige Anlagen, der untere das Resultat bei 100 % zweistufigen Anlagen. Zusätzlich angegeben sind die Treibhausgasemissionen pro kWh Schweizer Strommix (grüne Linie) und pro kWh UCTE (violette Linie).

Zusammenfassend ergibt sich nach Auswertung des THG folgendes Bild. Selbst unter Verwendung einer Gutschrift und der Allokation der Emissionen auf die beiden Koprodukte Strom und Wärme erreicht keine Variante THG-Emissionen, die - bezogen auf die funktionelle Einheit kWh Strom - geringer sind als die des schweizerischen Strommixes. Wird zusätzlich die Annahme getroffen, dass alle Anlagen zweistufige aufgebaut sind, liegen 6 Varianten unterhalb des Schweizer Strommixes. Da der THG-Ausstoß das entscheidende

Kriterium zur Auswahl der Zwischenkulturen hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzeugung von Strom aus Biogas ist, wurden für die Auswertung der nachfolgende Umweltwirkungen die zehn Varianten mit den niedrigsten THG-Emissionen ausgewählt. Diese sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Die zehn Zwischenkulturen mit den niedrigsten THG-Emissionen pro kWh Strom. Aufgeführt sind die berechneten Ergebnisse mit Gutschrift sowie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen.

Dünger	Kultur	kg N * ha ⁻¹	Aussaat	THG-Emissionen in g CO ₂ -Äq. * kWh _{el} ⁻¹				
				Ergebnis	Sensitivität			
					+20 % Ertrag	-20 % Ertrag	100 % zweistufig	100 % einstufig
Gülle	Senf	20	Sep	150	176	111	46	254
Mineral	Phacelia	20	Sep	151	177	113	47	255
Gülle	Sonnenblume	40	Sep	204	222	180	100	308
Gülle	Sonnenblume	20	Aug	205	222	179	101	309
Mineral	Senf	20	Aug	216	231	194	112	320
Mineral	Senf	20	Aug	217	232	195	113	321
Gülle	Sonnenblume	20	Aug	238	250	221	134	342
Gülle	Sonnenblume	30	Aug	247	258	233	143	351
Mineral	Phacelia	30	Aug	259	264	255	155	363
Gülle	125	40	Aug	259	263	254	155	363
Strommix Schweiz				125				
Produktionsmix UCTE				516				

3.3.2. Nährstoffmanagement

Versauerungspotential

Das Versauerungspotential pro kWh Biogasstrom, produziert aus den zehn ausgewählten Varianten liegt, mit 0.051-0.131 m² ungefähr acht bis zwanzigmal so hoch wie das des Schweizerischen Strommixes, der pro kWh ein Potential von 0.006 m² aufweist (Abbildung 27). Die Biogasproduktion und Verstromung verursacht 0.057 m² pro kWh. Dies entspricht 24-63 % des gesamten Versauerungspotentials, wobei hier Ammoniak- (83 %) und NO_x-Emissionen (8.3 %) hauptsächlich verantwortlich sind. Wie bereits im Kapitel 3.2.2 beschrieben spielen beim Anbau vor allem in den güllegedüngten Varianten die Ammoniakemissionen bei der Ausbringung eine entscheidende Rolle, wohingegen bei Mineraldüngung neben Ammoniakemissionen aus der Düngung Stickoxide aus der Düngerherstellung bis zu einem Drittel des Potentials verursachen. Der Einfluss der Gülledüngung ist an den beiden Varianten Phacelia mit einer Düngung von 40 kg Stickstoff zu erkennen, die mit einem Potential von 0.085 und 0.087 m² pro kWh deutlich über den mit 20 kg Stickstoff gedüngten Varianten liegen.

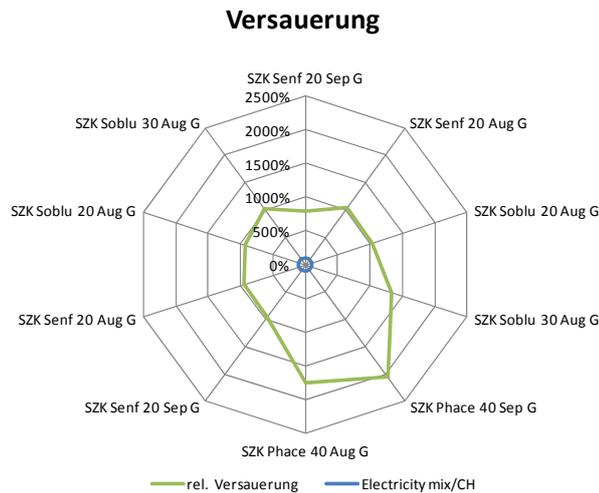


Abbildung 27: Relatives Versauerungspotential von einer kWh Biogasstrom aus den Zwischenkulturen mit den geringsten Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Versauerungspotential des Schweizer Strommixes (100 %). In den dargestellten Werten ist die Gründüngungsgutschrift inbegriffen. SZK = Sommerzwischenkultur; 0, 20, 30, 40 = Stickstoffdüngung in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; M = Mineraldünger; G = Gülle

Aquatische Eutrophierung

Das Eutrophierungspotential des aus Zwischenkulturen gewonnenen Biogasstroms erreicht Werte zwischen 2.2 und 12.7 g N-Äq. pro kWh (Abbildung 28). Dies entspricht dem 150- bis 890-fachen des Schweizerischen Strommixes ($1.4 \cdot 10^{-2}$ g N-Äq. pro kWh). Die Bereitstellung der Biomasse trägt hauptsächlich zur Eutrophierung bei, der Anteil liegt bei 83-99.5 %, wohingegen die Vergärung und Stromproduktion lediglich 0.3-9 % des Potentials verursacht. Ursächlich sind im Wesentlichen Nitratverluste im Anbau der Biomasse. Für die Sonnenblumenvarianten ergibt sich ein negatives Potential, da sie im Herbst eine geringfügig höhere Stickstoffaufnahme aufweisen als die Gründüngungen. Pro kWh ist die Differenz zwischen Strom aus den Sonnenblumenvarianten und dem Strommix mit 0.09 und 0.33 g N-Äq. allerdings gering.

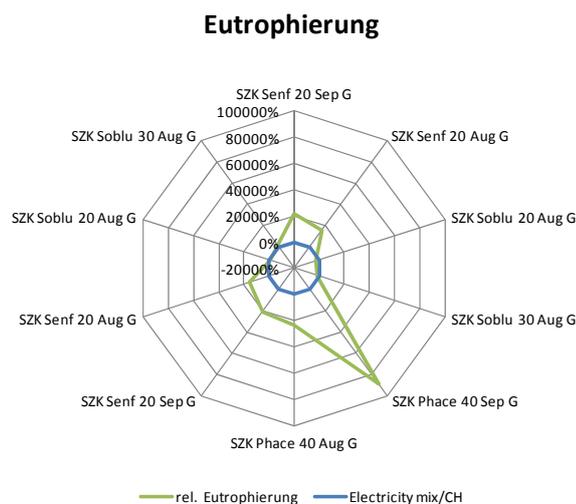


Abbildung 28: Relatives Eutrophierungspotential von einer kWh Biogasstrom aus den Zwischenkulturen mit den geringsten Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Eutrophierungspotential des Schweizer Strommixes (100 %). In den dargestellten Werten ist die Gründüngungsgutschrift inbegriffen. SZK = Sommerzwischenkultur; 0, 20, 30, 40 = Stickstoffdüngung in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; M = Mineraldünger; G = Gülle

3.3.3. Schadstoffmanagement:

Aquatische-, terrestrische Ökotoxizität und Humanoxizität

Als weitere Umweltwirkungen wurden die terrestrische und aquatische Ökotoxizität sowie die Humantoxizität ausgewertet. Die terrestrische Ökotoxizität des Stromes aus Biogas liegt zwischen $-3.6E-04$ und $1.5E-03$ 1,4-DCB-Äq. pro kWh. In den Varianten, die eine positive Toxizität aufweisen, liegt das Potential um das 3-64-fache über dem des Schweizerischen Strommixes. Das Maximum wird hier von der Variante Phacelia im September gesät und mit 40 kg N aus Gülle gedüngt erreicht. In diesen Varianten wird der Schwermetalleintrag über Dünger selbst unter Berücksichtigung von Verlusten über der Erosion und Auswaschung nur zum Teil wieder über die Ernteprodukte von der Fläche exportiert. Einige Varianten weisen aufgrund des Schwermetallentzugs pro kWh Strom ein negatives Potential auf (Abbildung 29). In diesen Varianten übersteigt der Schwermetallentzug über die Ernteprodukte und durch Erosion sowie Auswaschung den Eintrag über die Düngemittel, oder die Gründüngung verursacht eine höhere Toxizität als die betrachtete Zwischenkultur. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Systemgrenze die Ausbringung der Gärreste und somit die Rückführung der Schwermetalle nicht beinhaltet. Das Vorgehen gewährleistete die Konsistenz zum Vorgehen bei organischer Düngung. In Kulturen, die mit organischen Düngemitteln gedüngt werden, wird der Schwermetallgehalt der gedüngten Kultur zugerechnet, da diese ebenfalls von den zugeführten Nährstoffen profitiert.

Das aquatische Ökotoxizitätspotential des Biogasstroms aus den ausgewählten Zwischenkulturen liegt zwischen $1.4E-04$ und $2.4E-03$ kg 1,4-DCB-Äq. pro kWh. Ursächlich verantwortlich für das Potential sind durch den Anbau hervorgerufene Schwermetallemissionen in Oberflächengewässer. Mit einer Ausnahme verursachen alle Varianten ein um 1.1-8.8-fach geringeres Potential als die Produktion von Strom des Schweizerischen Strommixes ($1.24E-03$ kg 1,4-DCB-Äq.). Die mit $2.42E-03$ kg 1,4-DCB-Äq. pro kWh um knapp 50 % höhere Toxizität in der Variante Phacelia mit 40 kg Stickstoffdüngung ausgesät im September erklärt sich durch höheren Kupfer- und Zink-Emissionen in Oberflächengewässer. Ursache ist die höhere Düngung, die, aufgrund der Septembersaat, nicht zu einer deutlichen Ertragssteigerung führt.

Die Produktion von Strom aus den ausgewählten Zwischenkulturen verursacht eine Humantoxizität pro kWh, die mit $4.8E-02$ - $8.9E-02$ kg 1,4-DCB-Äq. 2.4-4.5-mal so hoch ist wie das einer kWh des Schweizer Strommixes (0.019 kg 1,4-DCB-Äq.). Ursächliche Emissionen sind vor allem polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Chrom VI und Arsen aus der Verbrennung von Treibstoffen bei der Bodenbearbeitung und der Ernte. Beim Strom des Strommixes wird das Potential ebenfalls im Wesentlichen durch PAK, Chrom VI und Arsen verursacht, allerdings sind die Emissionen der einzelnen Stoffe pro kWh um den Faktor 3-30 geringer.

Schadstoffmanagement

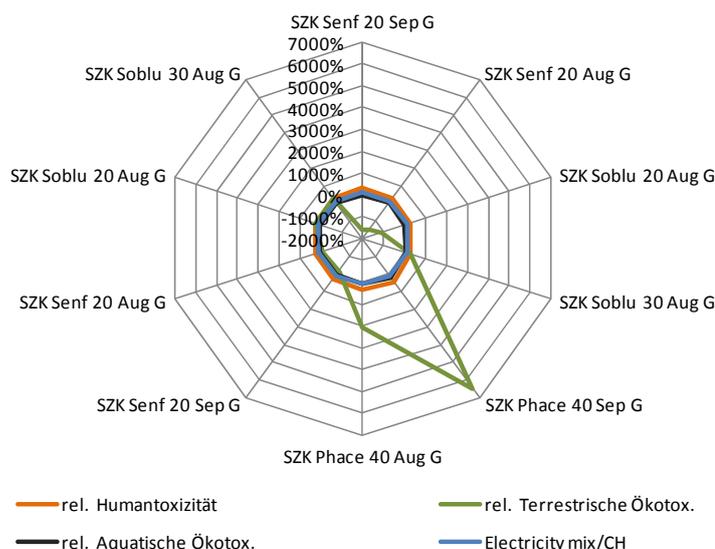


Abbildung 29: Relatives Toxizitätspotential von einer kWh Biogasstrom aus den Zwischenkulturen mit den geringsten Treibhausgasemissionen, im Vergleich zum Toxizitätspotential des Schweizer Strommixes (100 %). In den dargestellten Werten ist die Gründüngungsgutschrift inbegriffen. SZK = Sommerzwischenkultur; 0, 20, 30, 40 = Stickstoffdüngung in kg * ha⁻¹; M = Mineraldünger; G = Gülle

3.3.4. Kosten-, Leistungsrechnung

Um die Wettbewerbsfähigkeit der betrachteten Zwischenkulturen gegenüber anderen Energiepflanzen wie Maissilage und Grassilage beurteilen zu können, werden an dieser Stelle die spezifischen Bereitstellungskosten je Energieeinheit (produzierte kWh Strom) vorgestellt. Die Schnittstelle für alle Energiepflanzen ist frei Silo. Die Energieproduktion der Zwischenkulturen basiert auf den bereits vorgestellten Annahmen (spezifische Ernteerträge, spezifischer Biogasertrag, Verstromung im BHKW mit einem Wirkungsgrad von 38%). Bei den Bereitstellungskosten der Zwischenkulturen werden nur die Ernte-, Transport- und Konservierungskosten berücksichtigt. Da in der Schweiz von den meisten Betrieben im Rahmen des ÖLN bereits Gründüngungen gesät werden müssen, können die Etablierungskosten (Bodenbearbeitung, Saat, etc.) nicht den Bereitstellungskosten als Biogassubstrat zugerechnet werden.

Für die Vergleichskulturen Silomais und Grassilage gelten folgende Rahmenbedingungen. Die Höhe der Produktionskosten für Silomais liegen bei 5'077 bzw. 5'347 Fr. pro ha in der mineralisch- bzw. mit Gülle gedüngten Variante. Bei 38% TS Gehalt und einem Nettoertrag von 42,6 t/FM können 17'685 kWh Strom erzeugt werden (Tabelle 5). Dies entspricht Anbaukosten von rund 28 bzw. 30 Rp. pro kWh. Grassilage kann zu Kosten von rund 3.460 Fr. pro ha produziert werden. Bei einem Nettoertrag von 40 t/FM und 40% TS-Gehalt können 16'632 kWh Strom erzeugt werden. Dies entspricht Anbaukosten von rund 21 Rp. pro kWh (Tabelle 5).

Tabelle 5: Biogas- und Stromerträge von Silomais und Grassilage je Hektar

Kultur	Menge	Trocken-	Menge	oTS-	Menge	Biogas-	Biogas-	Methan-	Biogasertrag	Methanertrag	Strom-
Einheit	t/ha	masse	TM	Gehalt	oTS	ertrag	ertrag	gehalt	gesamt	gesamt	ertrag
		% TS	t/a	% TS	t/a	NI/kg oTS	m ³ / t FM	%/m ³	m ³ /a	m ³ /a	kWh el
Maissilage	42.6	38.0	16.2	95	15.4	575	200	53	8'843	4'687	17'685
Grassilage	40.0	40.0	16.0	89	14.2	584	208	54	8'316	4'491	16'632

Grundsätzlich weisen die Zwischenkulturen mit Gülledüngung deutlich höhere Kosten je kWh Strom auf als die Varianten mit mineralischer Düngung (Abbildung 30 & Abbildung 31). Dies liegt wie bereits beschrieben an den höheren Maschinen- und Arbeitskosten. Während die meisten Phacelia und Senf Varianten mit Kosten zwischen 26 und 48 Rp. pro kWh zum Teil deutlich höhere Bereitstellungskosten verursachen als die Energiepflanzen Silomais und Grassilage, können bei den Sommer- und Winterzwischenkulturen mit Kosten zwischen 16 und 29 Rp. einige konkurrenzfähige Varianten identifiziert werden. Bei den Sommerzwischenkulturen weist SM 101 das beste Kosten-/Leistungsverhältnis mit 17 bis 18 Rp. pro kWh auf. Aber auch SM 106 kann mit 20 bis 27 zu ähnlichen Kosten wie Silomais bereitgestellt werden. Bei den Winterzwischenkulturen weist vor allem 1-Schnitt Raigras mit 16 Rp. günstige Bereitstellungskosten auf, 3-Schnitt Raigras liegt bei 24 Rp. pro kWh. Auch 1-Schnitt SM 200 und SM 210 stellen mit 18 bis 19 Rp. pro kWh interessante Varianten dar.

Das Produktionskostenniveau für mineralisch gedüngte Sommer- und Winterzwischenkulturen liegt deutlich unter denen mit Gülledüngung. Die Grundaussagen für die einzelnen untersuchten Varianten sind jedoch vergleichbar. Phacelia und Senf Varianten liegen mit Bereitstellungskosten zwischen 26 und 43 Rp. pro kWh zum Teil deutlich über den Bereitstellungskosten der Energiepflanzen Silomais und Grassilage. Bei den Sommer- und Winterzwischenkulturen reduziert sich das Kostenniveau auf 14 bis 26 Rp. Damit können die meisten mineralisch gedüngten Zwischenkulturen zu konkurrenzfähigen Kosten bereitgestellt werden. Bei den Sommerzwischenkulturen weist SM 101 das beste Kosten-/Leistungsverhältnis mit 17 bis 18 Rp. auf. Aber auch SM 106 kann mit 22 bis 25 Rp. pro kWh zu Kosten wie Silomais bereitgestellt werden. Bei den Winterzwischenkulturen weist vor allem 1-Schnitt Raigras mit 14 bis 15 Rp. günstige Bereitstellungskosten auf, 3-Schnitt Raigras liegt bei 19 bis 20 Rp. pro kWh. Auch 1-Schnitt SM 200 und SM 210 stellen mit 16 bis 18 Rp. sehr interessante Varianten dar.

Eine erhöhte Düngung der Zwischenkulturen wirkt sich nicht grundsätzlich positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus, genauso wenig wie eine intensivere Schnittnutzung. Da für den Einsatz als Biogassubstrat jedoch hohe Biomasse-mengen wichtig sind, ist es notwendig auch intensiv genutzte Zwischenkulturen zu konkurrenzfähigen Kosten bereitstellen zu können. Resümierend können Klee-gras und Raigras als wirtschaftlich interessante Kulturen identifiziert werden. Gegenüber Silomais können diese Kulturen vielfach bereits zu konkurrenzfähigen Kosten bereitgestellt werden. Es muss zwar eingeschränkt werden, dass als Referenzkultur herkömmlicher Silomais und nicht spezielle Energiemaissorten mit hohen Biomasse- und Methanhektarerträgen betrachtet wurde, allerdings sind auch im Zwischenkulturanbau noch viele Möglichkeiten für Effizienzgewinne (Sortenwahl, Anbausystem, Fruchtfolgeplanung, etc.) denkbar, die im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden konnten.

Auch gegenüber Grassilage, welche in der Schweiz vergleichsweise zu anderen Kulturen günstig erzeugt werden kann, z.B. da die Mechanisierung auf den Betrieben vorhanden ist und die klimatischen Bedingungen sehr gut sind, können einige 1-Schnitt Varianten von Klee-gras und Raigras zu konkurrenzfähigen Kosten produziert werden.

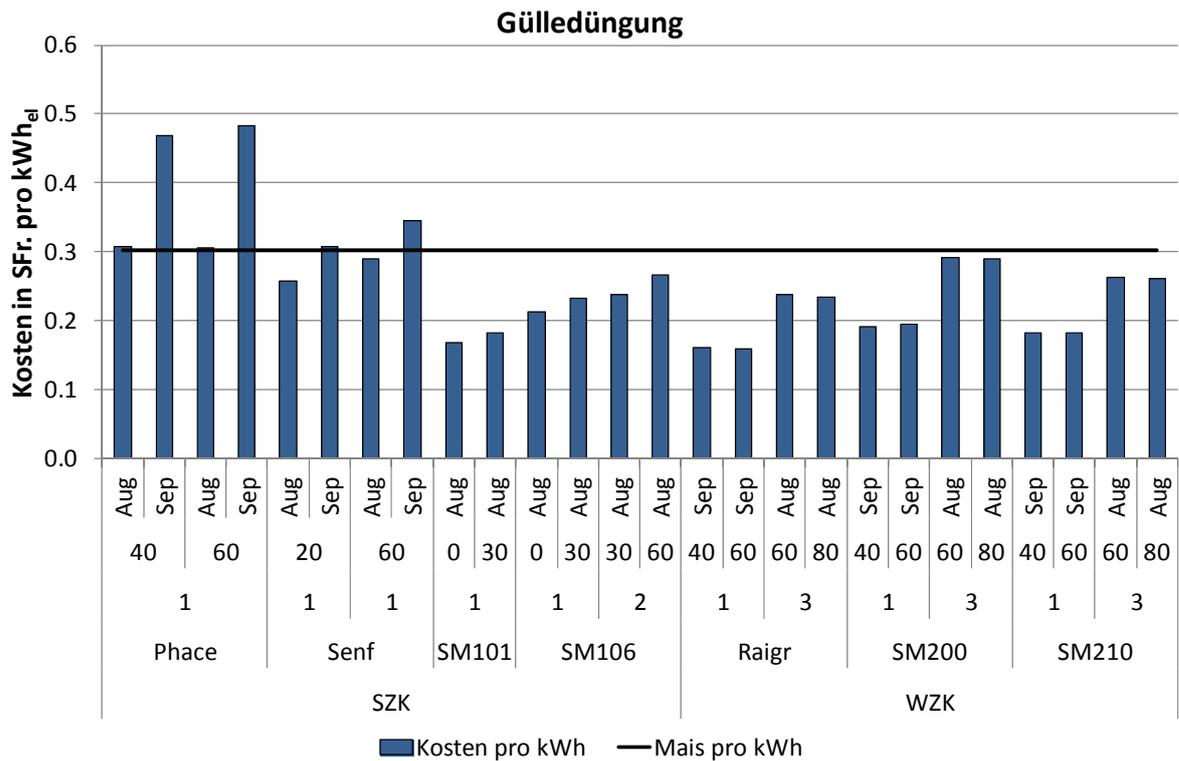


Abbildung 30: Bereitstellungskosten von verschiedenen Sommer- und Winterzwischenkulturen mit Gülldüngung in SFr. pro kWh Strom.

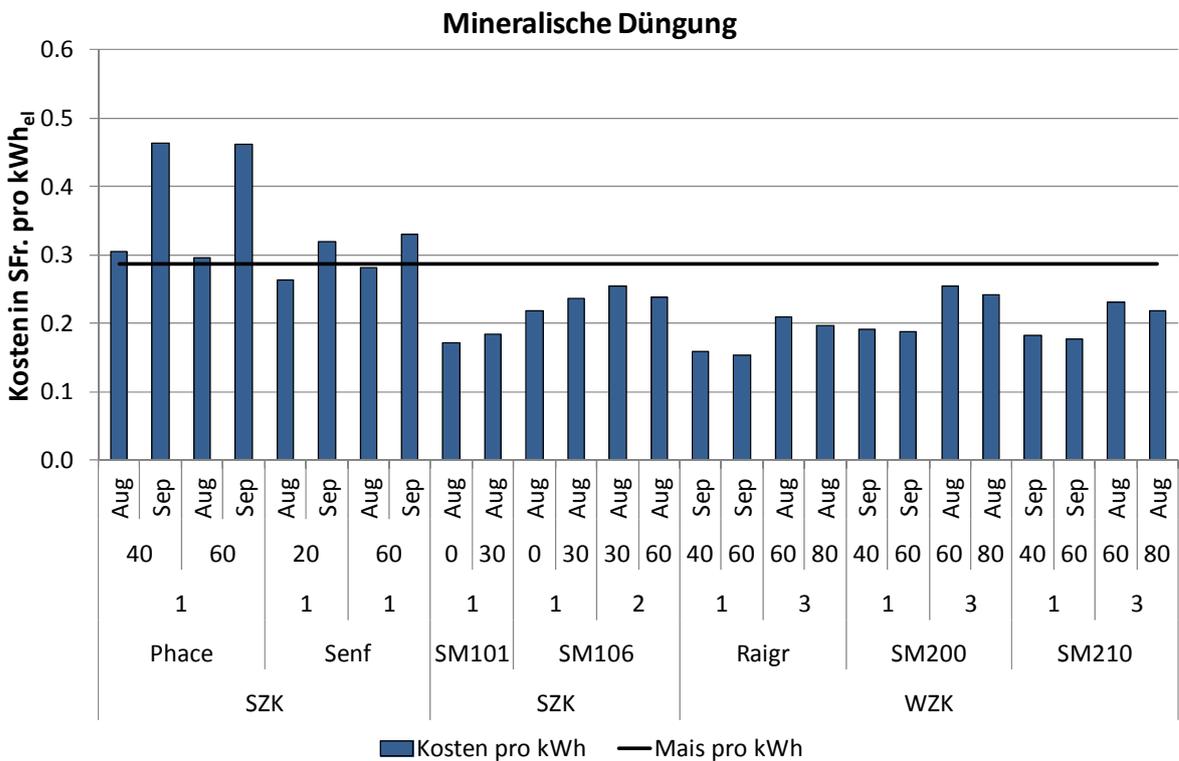


Abbildung 31: Bereitstellungskosten von verschiedenen Sommer- und Winterzwischenkulturen mit mineralischer Düngung in SFr. pro kWh Strom.

3.3.5. Zusammenfassung

Im Folgenden werden die Ergebnisse des vorangehenden Kapitels kurz zusammengefasst, um einen Überblick über die Nutzung der Zwischenkulturbiomasse als Biogassubstrat zu geben.

Der Strom aus allen Zwischenkulturen liegt, im Bedarf an nicht-erneuerbaren Energien, unterhalb des Schweizer Strommixes. Dabei ist der Energiebedarf pro kWh vor allem in den intensiveren Varianten der WZK deutlich niedriger als in den SZK. Lediglich die SM101 und die 2 Schnitt Varianten der SM 106 erreichen einen Energiebedarf, der nur unwesentlich höher ist als der der WZK. Die folgenden Punkte sind darüber hinaus zu erkennen:

- Eine gesteigerte Düngung führt in fast allen Fällen zu einem gleichbleibendem oder höheren Energiebedarf pro kWh
- In der Regel führt eine gesteigerte Schnitzzahl bei gleichbleibendem Düngerniveau zu einem höheren Energiebedarf pro kWh.

Betrachtet man die Treibhausgasemissionen, die als Ausschlusskriterium behandelt wurden, ergibt sich ein anderes Bild.

- Der Strom aus allen Zwischenkulturvarianten verursacht, unter der hier getroffenen Annahmen, dass jeweils 50 % der Anlagen ohne bzw. mit gasdichtem Nachgärer ausgestattet sind, höher Treibhausgasemissionen pro kWh als der aktuelle Schweizer Strommix. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass der Schweizerische Strommix sehr stark auf Wasser- und Atomkraft basiert und dass die in ecoinvent abgebildete landwirtschaftliche Biogaserzeugung insgesamt pro kWh erzeugten Strom bereits höhere Emissionen aufweist als der Schweizer Strommix.
- Findet die Vergärung in 2-stufigen Anlagen, mit gasdichtem Fermenter und Nachgärer, statt, so verursacht die Stromerzeugung aus 6 Varianten, einen geringeren Treibhauseffekt als der Schweizer Strommix (Tabelle 4).
- Im Vergleich zum Produktionsmix UCTE erreichen nahezu alle Zwischenkulturen in kg CO₂-Äq. pro kWh_{el} gemessen einen niedrigeren Treibhauseffekt.

Die Zusammenfassung für die weiteren Umweltkategorien bezieht die zehn Varianten ein, mit den niedrigsten Treibhausgasemissionen pro kWh ein. Im Vergleich zum Schweizer Strommix verursachen diese

- einen höheren Ausstoss von versauernden Substanzen
- in den meisten Fällen eine deutlich höhere Eutrophierung. Lediglich für die Sonnenblumenvarianten ist das Potential negativ, wodurch diese Varianten als günstiger einzustufen sind.
- in neun von zehn Fällen eine im Vergleich mit dem Schweizer Strommix niedrigere aquatische Toxizität, wohingegen im Bezug auf die terrestrische Toxizität und die Humantoxizität der aktuelle Strommix als vorteilhaft einzustufen ist.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht betrachtet ergeben sich folgende Punkte.

- Vor allem das Raigras und die Standardmischungen sind von den Bereitstellungskosten als interessant einzustufen, wohingegen Senf und Phacelia sehr hohe Kosten verursachen.

- Die WZK Varianten und die SM101 mit jeweils einer Nutzung erreichen die geringsten Kosten pro kWh
- Eine gesteigerte Düngung bei gleichbleibender Schnitzzahl führt überwiegend zu geringeren Kosten pro kWh

3.3.6. Schlussfolgerung und Diskussion

Aufgrund des aktuellen Schweizerischen Strommixes, ist es nur schwerlich möglich aus Zwischenkulturbiomasse Strom mit geringeren Umwelteffekten zu generieren. Es ergeben sich, unter der hier getroffenen Annahmen, dass jeweils 50 % der Anlagen ohne bzw. mit gasdichtem Nachgärer ausgestattet sind, lediglich im Bereich des Verbrauchs an nicht-erneuerbaren Energien und in der aquatischen Toxizität Vorteile, wohingegen die Produktion im Vergleich zum Strommix nicht nur höhere Umwelteffekte in den Kategorien Versauerung, Ozonbildung und Humantoxizität und in der überwiegenden Zahl der Fälle auch im Bereich der Nährstoffanreicherung und der terrestrischen Toxizität verursacht, sondern ausserdem auch vom Treibhausgasausstoss als schlechter einzustufen ist. Allerdings sind die Grenzen der Studie, beschrieben im Kapitel 2.6, zu berücksichtigen, um die Ergebnisse einzuordnen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nicht der Einsatz von Zwischenkulturbiomasse in einer praxisorientierten Substratmischung oder bestehenden Biogasanlage untersucht. In einer solchen Fragestellung, in der die gesamte Biogasanlage betrachtet wird, könnten die Zwischenkulturen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Substratzusammensetzung, den Biogasertrag und die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage bewertet werden. In der vorliegenden Studie wurde vielmehr eine Abschätzung durchgeführt, welche Zwischenkulturen unter aktuellen Bedingungen zum Klimaschutz beitragen können. Im Folgenden sollen einige Punkte besonders hervorgehoben werden.

Die Schlussfolgerung ist einerseits auf die geringen Umwelteffekte des Schweizerischen Strommixes, gegenüber dem Strommix anderer Länder und andererseits auf den im Vergleich zum Schweizerischen Strommix hohen Treibhausgasemissionen der Biogasproduktion zurückzuführen. Aufgrund dieser Emissionen ist es nicht möglich, dass Strom aus Biogas ohne Gutschrift niedrigere Treibhausgasemissionen pro kWh aufweist als der Schweizer Strommix. Wäre die Vergleichsbasis z.B. der Produktionsmix UCTE (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity), so ergäbe sich ein vollkommen anderes Bild. Selbst ohne Gutschrift würde ein Grossteil der Varianten pro kWh niedrigere Treibhausgasemissionen verursachen. Auch in weiteren Kategorien würde sich der Vergleich zugunsten der Zwischenkulturen verschieben. So verbliebe lediglich für die Versauerung, Humantoxizität und Eutrophierung ein höherer Effekt des Stroms aus Zwischenkulturen. Nach den Ereignissen im Atomkraftwerk Fukushima Dai-ichi im Frühjahr 2011 und den anschliessenden Entscheiden des Bundesrates, des Nationalrates und der Energiekommission des Ständerats (Urek), die Atomkraftwerke in der Schweiz nach Ablauf ihrer Betriebsdauer nicht durch Neubauten zu ersetzen, stellt sich allerdings die Frage, wie sich der Strommix der Schweiz in Zukunft verändert und welche Konsequenzen dies vor allen Dingen in Bezug auf die Treibhausgasemissionen hätte. Es wurden zwei Szenarien erstellt, um die möglichen Konsequenzen einschätzen zu können. In Szenario 1 sind 50 % und in Szenario 2 100 % des in der Schweiz hergestellten Atomstroms durch den aktuell in ecoinvent abgebildeten Produktionsmix UCTE ersetzt. Für Szenario 1 ergäbe sich ein Treibhausgasausstoss des Schweizerischen Strommixes der mit 0.223 kg CO₂-Äq.pro kWh um das 2.5-fache höher ist als im heutigen Mix (Abbildung 34). Würde der gesamte in der Schweiz produzierte Atomstrom durch den jetzigen UCTE-Mix ersetzt, ergäbe sich pro kWh Treibhausgasemissionen von 0.351 CO₂-Äq. Im ersten Szenario wäre lediglich mit einzelnen

güllegedüngten Varianten Strom herzustellen, der niedrigere Treibhausgasemissionen verursacht als der theoretische Strommix. Würde hingegen der gesamte in der Schweiz produzierte Atomstrom durch den jetzigen UCTE-Mix ersetzt, lägen nahezu alle Varianten im Treibhausgasausstoss pro kWh Strom unterhalb des theoretischen Strommixes (Abbildung 34). Auch beim Vergleich der beiden Alternativen Import von Strom aus dem aktuellen Produktionsmix UCTE mit der Produktion von Strom aus Zwischenkulturbiomasse zeigt sich der Strom aus Zwischenkulturbiomasse als vorteilhaft.

Ein weiterer Punkt, der Betrachtung verdient, ist die Gutschrift. Nach den ÖLN-Richtlinien ist in dem betrachteten System der Anbau einer Gründüngung verpflichtend, aus diesem Grund ist die durchgeführte Gutschrift sinnvoll. Allerdings beeinflusst sie die Ergebnisse erheblich. Daher scheint es gerechtfertigt einige Punkte näher zu beleuchten. Die Reduktion der Umweltwirkung durch die Gutschrift ist umso grösser, je geringer die Intensität der betrachteten Variante ist. Dies erklärt sich durch das Verhältnis zwischen Gründüngungs- und Zwischenkulturvarianten, das mit steigender Intensität in den Zwischenkulturen abnimmt. Folglich erreichen die extensiven Kulturen unter Berücksichtigung der Gutschrift pro ha und pro kWh sehr geringe Umweltwirkungen. Besonders deutlich wird dies an der Variante Senf im September gesät mit einer Düngung von 20 kg Stickstoff. Aufgrund des späten Saattermins und der geringen Düngung sind der Ertrag und die Umweltwirkungen pro ha in dieser Variante gering. Betrachtet man jedoch die THG-Emissionen pro kWh ohne Berücksichtigung der Gutschrift, so erreicht diese Variante den höchsten Umwelteffekt. Eine Variante zu empfehlen, die einerseits ohne Gutschrift sehr hohe Umweltwirkungen und Kosten verursacht und andererseits inklusive Gutschrift nur annähernd das Treibhausgaspotential des Schweizer Stromes erreicht, erscheint wenig zielführend. Vor allem wenn die in Tabelle 4 aufgeführten Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden. Für diese Variante steigt der Treibhausgasausstoss bei einem höheren Ertrag pro ha durch den verminderten Effekt der Gutschrift pro kWh an bzw. verringert sich bei einem geringeren Ertrag und liegt damit sogar niedriger als der Effekt des Schweizer Strommixes. Dies trifft auch zu, wenn in 2-stufigen Anlagen vergoren wird. Allerdings ist in beiden Fällen die Reduktion in kg CO₂-gemessen, bei sehr hohen Kosten pro kg CO₂, sehr gering (Tabelle 6).

Tabelle 6: Berechnung der Kosten pro kg CO₂-Reduktion für die Septembersaat des Senfs mit 20 kg Stickstoffdüngung unter der Annahme, dass der Ertrag 20 % geringer ausfällt als angenommen bzw. 100 % der Biogasanlagen mit einem zweiten Fermenter ausgestattet sind.

		Senf 20 kg N Ertrag -20 %	100 % 2-stufig
THG-Emissionen Strommix CH	kg CO ₂ -Äq.*kWh ⁻¹	0.125	
THG-Emissionen Strom aus Senf	kg CO ₂ -Äq.*kWh ⁻¹	0.113	0.047
Differenz	-	0.012	0.078
Ertrag	kWh _{el} *ha ⁻¹	1'068	1'335
Einsparung	kg CO ₂ -Äq.*ha ⁻¹	13.3	104
Differenz Kosten zur Gründüngung	SFr.	544	
Kosten pro kg CO ₂ -Reduktion	SFr.* kg CO ₂ -Äq. ⁻¹	40.8	5.2

Ein wichtiger Aspekt, der bei der Auswahl von Varianten berücksichtigt werden sollte, ist daher die Frage, ob geringe Umwelteffekte pro kWh Strom im Vordergrund stehen oder das Reduktionspotential pro Fläche. Auch dieser Punkt soll hier an einer Beispielrechnung gezeigt werden (Tabelle 7). Als Referenz dient der Produktionsmix UCTE, da dieser im Vergleich zu den betrachteten Varianten einen höheren Treibhausgasausstoss verursacht. Die Berechnung zeigt, dass eine kWh aus der Variante Senf mit 20 kg Stickstoffdüngung

zwar nur knapp die Hälfte des Treibhausgasausstosses verursacht, der bei der Verstromung von Biomasse der SM210 entsteht, aufgrund des deutlich höheren Ertrages ist das Reduktionspotential der SM210 pro ha jedoch annähernd dreimal so gross, bei allerdings höheren Produktionskosten pro kWh_{el} und Reduktionskosten pro kg CO₂. Die folgende Betrachtung ist theoretischer Natur - ausgehend von der Annahme, dass entweder Strom aus Zwischenkulturen erzeugt oder Strom des Produktionsmixes UCTE importiert werden könnte. Sollte unter dieser Annahme die Reduktion des THG-Ausstosses pro kWh angestrebt werden, sind wenig intensive Varianten zu bevorzugen. Vorteile wären die im Vergleich zur GD nur geringfügig höheren Umwelteffekte pro ha und die niedrigen Effekte pro kWh. Ein Nachteil ist der geringe Ertrag, der zu einem niedrigen Reduktionspotential in kg CO₂ pro ha bei hohen Kosten führt. Wäre das Ziel ein möglichst grosses Reduktionspotential auszuschöpfen, müssten die intensiven Varianten empfohlen werden. Neben dem höheren CO₂-Reduktionspotenzial das pro ha erreicht werden könnte hätte diese Variante den Vorteil, dass die Bereitstellungskosten der Biomasse pro kWh und die Kosten pro kg CO₂-Reduktion deutlich tiefer sind. Allerdings führt die Intensivierung zu erhöhten Umwelteffekten in einigen anderen Umweltkategorien, allen voran der Versauerung.

Tabelle 7: Berechnung der des Reduktionspotentials pro ha und der Kosten pro kg CO₂-Reduktion für die Septembersaat des Senfs mit 20 kg Stickstoffdüngung aus Gülle im Vergleich zur Standardmischung 210 mit 80 kg Stickstoff.

		Senf 20 kg N	SM210 80 kg N
THG-Emissionen Produktionsmix UCTE	kg CO ₂ -Äq. * kWh ⁻¹	0.516	
THG-Emissionen Strom aus ZK	kg CO ₂ -Äq. * kWh ⁻¹	0.150	0.357
Differenz	-	0.365	0.159
Ertrag	kWh _{el} *ha ⁻¹	1'335	7'400
Reduktion = Differenz * Ertrag	kg CO ₂ -Äq. * ha ⁻¹	487	1'177
Kosten (Anbau und Ernte)	SFr.	553	2600
Kosten pro kg CO ₂ -Reduktion	SFr. * kg CO ₂ -Äq. ⁻¹	1.13	2.21
Produktionskosten pro kWh	SFr. * kWh _{el} ⁻¹	0.41	0.45

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht können bereits heute einige Sommer- und Winterzwischenkulturen zu konkurrenzfähigen Kosten gegenüber Energiepflanzen wie Grassilage oder Silomais bereitgestellt werden. Das Interesse der schweizerischen Landwirte an der Energieerzeugung ist wie in den benachbarten europäischen Ländern gross. Die Energieerzeugung wird von vielen Betriebsleitern bei zunehmend volatilen Agrarmärkten, dem Abbau des Aussenschutzes und einem allgemein schwierigeren Marktumfeld als Chance für eine betriebliche Diversifizierung und als Möglichkeit der Einkommensergänzung verstanden. Allerdings existieren in der Praxis vielfach Hemmnisse, die den Betrieben einen Einstieg in die Energieerzeugung erschweren oder ganz verhindern. Diese reichen von der Deckelung der KEV, über die Raumplanung bis zur gesetzlich geförderten Substratzusammensetzung in den Biogasanlagen.

Beispielsweise ist der Einsatz von Energiepflanzen und anderen, nach KEV als nicht landwirtschaftlich bezeichneten Substraten im Substratmix von Biogasanlagen, auf maximal 20% beschränkt. Die Begrenzung kann jedoch wirtschaftlich sehr problematisch sein, da reine Hofdüngeranlagen bei dem derzeitigen Vergütungsniveau für die produzierte Energie nicht wirtschaftlich arbeiten können. Daher sind Landwirte auf den Einsatz von energiereichen Einsatzstoffen angewiesen. Bisher wurden dafür vielfach Reststoffe aus der Landwirtschaft, der Verarbeitung, der Lebensmittelindustrie und Abfälle herangezogen. Diese sind in der Schweiz jedoch kaum mehr verfügbar, so dass in Zukunft andere energiereiche Substrate erschlossen werden müssen. Diese können nur in Form von

Energiepflanzen bereitgestellt werden. Da der Einsatz von Energiepflanzen wie Grassilage oder Silomais auf maximal 20% vom Substratmix begrenzt ist, könnten energiereiche Sommer- und Winterzwischenkulturen ein gewisses Potential in der Praxis haben, da diese nicht auf den maximalen Anteil von 20% angerechnet werden. Die Energieproduktion und damit auch die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen könnte durch den Einsatz von Sommer- und Winterzwischenkulturen nachhaltig gesteigert werden. Vor allem dann, wenn der Anbau von Zwischenkulturen stärker als bisher auf die Funktion der Substratbereitstellung als Biogassubstrat ausgerichtet wird und besser in die bestehenden Fruchtfolgen integriert werden kann. Zur optimalen Integration von Zwischenkulturen in nachhaltige Nahrungsmittel- und Energiepflanzenfruchtfolgen und zur stärkeren Implementierung geeigneter landwirtschaftlicher Hofbiogasanlagen in die Schweizer Landwirtschaft gibt es jedoch noch grossen Forschungsbedarf.

Eine eindeutige Empfehlung einzelner Varianten kann unter den jetzigen Umständen nicht abgeleitet werden, obwohl 8 Varianten bei einer Vergärung in zweistufigen Anlagen, einen Treibhauseffekt verursachen, der unterhalb des aktuellen Schweizer Strommixes liegt, da diese von den Bereitstellungskosten und dem Ertrag als ungünstig einzustufen sind. Allerdings können aus der Auswertung einige allgemeine Punkte abgeleitet werden.

- Wenn ein möglichst geringer THG-Ausstoss pro kWh das Ziel ist, sind die wenig intensive Varianten zu bevorzugen. Vorteile dieser Option sind die im Vergleich zur GD nur geringfügig höheren Umwelteffekte pro ha und die niedrigen Auswirkungen pro kWh. Ein Nachteil ist der geringe Ertrag und das dadurch niedrige Reduktionspotential in kg CO₂ Äq. pro ha bei hohen Kosten.
- Wäre das Ziel, ein im Vergleich zum Import von Strom möglichst grosses Reduktionspotential pro ha auszuschöpfen, müssten die intensiven Varianten empfohlen werden. Dies hätte erhöhten Umwelteffekten in einigen anderen Umweltkategorien, allen voran der Versauerung, zur Konsequenz.

Die hier präsentierte Auswertung gibt eine erste Einschätzung der Umwelteffekte der Biogaserzeugung aus Zwischenkulturbiomasse. Allerdings sind die Ergebnisse, wie bereits in Kapitel 2.6 erwähnt, unter Berücksichtigung der Grenzen der Studie zu interpretieren. Hier ist vor allem die stark vereinfachte Betrachtung der Biogaserzeugung zu nennen, die nicht die gesamte Komplexität der Biogaserzeugung berücksichtigt. Eine weitere Analyse der Erzeugung von Strom aus Zwischenkulturbiomasse sollte daher die folgenden Fragen beinhalten:

- Inwiefern ändert sich die Ökobilanz der Biogaserzeugung, wenn andere Substrate durch Zwischenkulturbiomasse ersetzt werden?
- Inwiefern ändert sich die Ökobilanz der Biogaserzeugung, wenn energiereiche Zwischenkulturbiomasse zur Ergänzung von Hofdünger im Substratmix eingesetzt wird?
- Mit Hilfe welcher innovativen Zwischenkulturanbausysteme kann die Bilanz verbessert werden? Hier sind vor allem das Zweikulturnutzungssystem und Zwischenkulturmischung (z.B. Rübse, Senf, Alexandrinerklee, Perserklee) zu nennen.
- Wie ändert sich die Wirtschaftlichkeit des Zwischenkulturanbaus bei unterschiedlichen Anbausystemen?
- Wie ändern sich Ökobilanzen und Wirtschaftlichkeit von modernen Biogasanlagen mit unterschiedlichen Fütterungsstrategien?

Literatur

- AGRIDEA (2007) Landwirtschaftliches Handbuch Pflanzen und Tiere. Wirz Kalender, 2007 edn. AGRIDEA, Lindau
- AGRIDEA (2010) Deckungsbeiträge. Ausgabe 2010. Agridea, Lindau
- Aigner A, Sticksel E (2010) Einschätzung von Zwischenfrüchten als Substrat zur Biogasgewinnung. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft; <http://www.lfl.bayern.de/ipz/pflanzenbau_biogas/30222/zwischenfrucht_substrat.pdf>, (Accessed 09.03.2011).
- Albisser Vögeli G, Burose F, Wolf D, Lips M (2011) Wirtschaftlichkeit gentechnisch-veränderter Ackerkulturen in der Schweiz: Mit detaillierter Berücksichtigung möglicher Koexistenz-Kosten. Schlussbericht. Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen,
- Schweizerische Futtermitteldatenbank (2011) <http://www.feed-alp.admin.ch/start.php>. Accessed 10.08.2010
- Amon T (2006) Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem. Universität für Bodenkultur, Wien
- BFE (2011) Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien Ausgabe 2010. Bundesamt für Energie BFE <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_721331960.pdf>, (Accessed 10.11.2011). Bern
- BMU (2011) Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2010. Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_zahlen_2010_bf.pdf>, (Accessed 15.11.2011).
- Boessinger M, Buchmann M, Künzler R, Keller L, Schüpbach H, Sutter F, Todt W, Wagner M (2004) Deckungsbeiträge. Ausgabe 2004. Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau (LBL), Lindau
- Bühle L, Stülpnagel R, Wachendorf M (2011) Comparative life cycle assessment of the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB) and whole crop digestion (WCD) in Germany. Biomass Bioenergy 35 (1):363-373
- Burkard R, Felder D, Guggisberg B, Hartmann D (2009) Biomassestrategie Schweiz. Strategie für die Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz. . Bundesamt für Energie BFE, Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bundesamt für Umwelt BAFU,
- Dauriat A, Gaillard G, Alig M, Scharfy D, Membrez Y, Bachmann N, Steiner R, Charles R, Maltas A, Sinaj S (2011) Analyse de cycle de vie de la production centralisée et décentralisée de biogaz en exploitations agricoles. Sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, Suisse.,
- Dux D, Schmid D (2010) Grundlagenbericht 2009. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen
- ecoinvent Centre (2007) ecoinvent Data - The Life Cycle Inventory Data. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf
- Flisch R, Sinaj S, Charles R, Richner W (2009) GRUDAF 2009. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. Agrarforschung 16 (2):1-100
- FNR FNReV (2008) Biogas Basisdaten Deutschland. Gülzow
- Freiermuth R (2006) Modell zur Berechnung der Schwermetallflüsse in der Landwirtschaftlichen Ökobilanz. Agroscope FAL Reckenholz,
- Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H-J, Doka G, Dones G, Heck T, Hellweg S, Hirschler R, Nemecek T, Rebitzer G, Spielmann M, Wernet G (2007) Overview and Methodology. ecoinvent report, vol 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf

- Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H-J, Doka G, Hellweg S, Hirsch R, Nemecek T, Margni M, Spielmann M (2004) Implementation of life cycle assessment methods - ecoinvent data v1.1. ecoinvent report, vol 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (ecoinvent), Dübendorf
- Gazzarin C, Albisser Vögeli G (2010) Maschinenkosten 2010. Mit Kostensätzen für Gebäudeteile und mechanische Einrichtungen. ART-Bericht, vol Nr. 733. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen
- Hanegraaf MC, Biewinga EE, van der Bijl G (1998) Assessing the ecological and economic sustainability of energy crops. *Biomass Bioenergy* 15 (4-5):345-355
- Hartmann S, Sticksele E (2009) Welsches Weidelgras im Winterzwischenfruchtanbau für die Biogasanlage.
- Hauschild MZ, Potting J (2005) Spatial differentiation in life cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology. *Environmental News*, vol No. 80. The Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency, Copenhagen
- Heggenstaller AH, Anex RP, Liebman M, Sundberg DN, Gibson LR (2008) Productivity and nutrient dynamics in bioenergy double-cropping systems. *Agron J* 100 (6):1740-1748
- Huijbregts MAJ, Guinée JB, Reijnders L (2001) Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. III: Export of potential impact over time and space. *Chemosphere* 44 (1):59-65
- IPCC (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. IGES, Kanagawa, Japan
- Jungbluth N, Chudacoff M, Dauriat A, Dinkel F, Doka G, Faist Emmenegger M, Gnansounou E, Kljun N, Spielmann M, Stettler C, Sutter J (2007) Life Cycle Inventories of Bioenergy. ecoinvent v2.0 report No. 17. Swiss Centre for Life Cycle Inventories Dübendorf, CH
- Kägi T (2008) Dokumentation SALCA-Datenbank Version 081, interner Report. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich
- Katz PE (1996) Ammoniakemissionen nach der Gülleanwendung auf Grünland. ETH, Zürich
- Kemp L (2011) Second harvest: bioenergy from cover crop biomass. Natural Resources Defense Council, New York
- LBL, srva, FiBL (2003) Deckungsbeiträge. Ausgabe 2003. LBL, Lindau
- Lehmann J, Briner HU, Rosenberg E (1991) Zwischenkulturen - was können sie und was können sie nicht? *Landwirtschaft Schweiz* 4 (4):151-158
- Lips M, Ammann H (2006) Vollkostenkalkulationen für Ackerkulturen. *AGRARForschung* 13 (5):210-214
- Menzi H, Frick R, Kaufmann R (1997) Ammoniak-Emissionen in der Schweiz: Ausmass und technische Beurteilung des Reduktionspotentials. Schriftenreihe der FAL, vol 26. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz
- Moriz C, Mink A (2009) Betriebsführungsarbeiten im Ackerbau. ART-Bericht. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ettenhausen
- Nemecek T, A. Heil, O. Huguenin, S. Meier, S. Erzinger, S. Blaser, and DD, Zimmermann A (2004) Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. Final report ecoinvent 2000 No 15. Agroscope FAL Reckenholz and FAT Taenikon, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- Nemecek T, Erzinger S (2005) Modelling Representative Life Cycle Inventories for Swiss Arable Crops. *Int J LCA* 10 (1):68-76
- Nemecek T, Huguenin O, Dubois D, Gaillard G (2011a) Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. *Agric Syst* 104:217-232

- Nemecek T, Huguenin O, Dubois D, Gaillard G, Schaller B, Chervet A (2011b) Life cycle assessment of Swiss farming systems: II. Extensive and intensive production. *Agric Syst* 104:233-245
- Nemecek T, Kägi T (2007) Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production Systems. Final report ecoinvent V2.0 No.15a. ecoinvent report, vol No. 15a. Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich and Dübendorf, Switzerland
- Oechsner H, Lemmer A, Neuberger C (2003) Feldfrüchte als Gärsubstrat in Biogasanlagen. *Landtechnik* 3:146-147
- Pimentel D (2003) Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. *Natural Resources Research* 12 (2):127-134
- Reinhardt GA, Zemanek G (1999) Ökobilanz Bioenergieträger: Basisdaten, Ergebnisse, Bewertungen. Initiativen zum Umweltschutz. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Berlin
- Richner W, Oberholzer H-R, Freiermuth Knuchel R, Huguenin O, Ott S, Walther U (2011) Modell zur Beurteilung des Nitratauswaschungspotenzials in Ökobilanzen - SALCA-NO₃. Unter Berücksichtigung der Bewirtschaftung (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, N-Düngung), der mikrobiellen Nitratbildung im Boden, der Stickstoffaufnahme durch die Pflanzen und verschiedener Bodeneigenschaften. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART,
- Schick M, Stark R (2003) Arbeitswirtschaftliche Kennzahlen zum Getreideanbau, Von der Bodenbearbeitung bis zum Management. FAT Bericht. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik Tänikon FAT,
- Stülpnagel R (2007) Standortvergleiche zum Zweikulturen-Nutzungssystem. Paper presented at the Symposium Energiepflanzen 2007, Berlin,
- Suter D, Rosenberg E, Frick R, Mosimann E (2008) Standardmischungen für den Futterbau. Revision 2009-2012. *Agrarforschung* 15 (10):1-11
- Tilman D, Socolow R, Foley JA, Hill J, Larson E, Lynd L, Pacala S, Reilly J, Searchinger T, Somerville C, Williams R (2009) Beneficial Biofuels - The Food, Energy, and Environment Trilemma. *Science* 325 (5938):270-271
- Zah R, Böni H, Gauch M, Hirschler R, Lehmann M, Wäger P (2007) Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. EMPA, St. Gallen

Verdankung

Für die finanzielle Unterstützung danken wir dem Bundesamt für Energie.

Für die fachliche Begleitung und Diskussion möchten wir uns bedanken bei Hanspeter Hug und Daniel Suter von der Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Futterbaues, bei Reto Steiner von Ernst Basler + Partner AG, Alexandra Cropt vom Schweizerischen Bauernverband, Anita Gassner vom Bundesamt für Umwelt sowie bei Arnaud de Loriol vom Bundesamt für Landwirtschaft.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Für die Analyse verwendete Systemgrenzen. Systemgrenze I (weiss hinterlegter Bereich) gilt für die Gründungskulturen, Systemgrenze II (hellgrau hinterlegt) ist gültig für den Vergleich der Futtererzeugung und Systemgrenze III (Dunkelgrau hinterlegt) für die Energieerzeugung aus Zwischenkulturen..... 12
- Abbildung 2: Reduktion des aquatischen Eutrophierungspotential durch Anbau der Gründungskulturen Senf und Phacelia mit der Nachfolgekultur Silomais in den Anbauvarianten Gülledüngung (G), Mineraldüngung (M) oder ungedüngt (O), mit 0 und 20 kg N, sowie Saatzeitpunkt August oder September. Die ersten vier Varianten ohne Düngung befinden sich in einer Fruchtfolge mit organischer Düngung und somit erhöhtem Mineralisierungspotential. 20
- Abbildung 3: Nicht-erneuerbarer Energiebedarf der Gründungskulturen Senf und Phacelia in den Anbauvarianten Gülledüngung (G), Mineraldüngung (M) oder ungedüngt (O), mit 0 und 20 kg N, sowie Saatzeitpunkt August oder September. Die funktionelle Einheit ha wird für den möglichen Anbauzeitraum von 290 Tagen betrachtet. 21
- Abbildung 4: Kosten des Anbaus der Gründungskulturen Phacelia und Senf in den Anbauvarianten Gülledüngung (G), Mineraldüngung (M) oder ungedüngt (O), mit 0 und 20 kg N, sowie Saatzeitpunkt August oder September. 23
- Abbildung 5: Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie (NEE-Bedarf) der güllegedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt den Bedarf der für die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais nötig ist..... 26
- Abbildung 6: Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie (NEE-Bedarf) der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt den Bedarf der für die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais nötig ist..... 26
- Abbildung 7: Treibhausgasemissionen der güllegedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt die Emissionen, in g CO₂-Äq, die bei der Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais entstehen. 28
- Abbildung 8: Treibhausgasemissionen der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt die Emissionen, in g CO₂-Äq, die bei der Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais entstehen 28
- Abbildung 9: Aquatische Eutrophierung der güllegedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum. 30
- Abbildung 10: Aquatische Eutrophierung der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum. 30
- Abbildung 11: Versauerungspotential der güllegedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie

zeigt das Potential, in cm^2 , das durch Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais entsteht.	32
Abbildung 12: Versauerungspotential der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro $\text{ha} \cdot \text{Anbauzeitraum}$ und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, in cm^2 , das durch Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais entsteht.	32
Abbildung 13: Terrestrische Ökotoxizität der güllegedüngten Zwischenkulturen in $\text{kg} \cdot 1,4\text{-DCB-}\ddot{\text{A}}\text{q.}$ nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro $\text{ha} \cdot \text{Anbauzeitraum}$	33
Abbildung 14: Terrestrische Ökotoxizität der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen in $\text{kg} \cdot 1,4\text{-DCB-}\ddot{\text{A}}\text{q.}$ nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro $\text{ha} \cdot \text{Anbauzeitraum}$	34
Abbildung 15: Aquatische Ökotoxizität der güllegedüngten Zwischenkulturen in kg bzw. $\text{g} \cdot 1,4\text{-DCB-}\ddot{\text{A}}\text{q.}$ nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro $\text{ha} \cdot \text{Anbauzeitraum}$ und pro MJ umsetzbare Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, das durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.	35
Abbildung 16: Aquatische Ökotoxizität der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen in kg bzw. $\text{g} \cdot 1,4\text{-DCB-}\ddot{\text{A}}\text{q.}$ nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro $\text{ha} \cdot \text{Anbauzeitraum}$ und pro MJ umsetzbare Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, das durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.	35
Abbildung 17: Humantoxizität der güllegedüngten Zwischenkulturen in kg bzw. $\text{g} \cdot 1,4\text{-DCB-}\ddot{\text{A}}\text{q.}$ nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro $\text{ha} \cdot \text{Anbauzeitraum}$ und pro MJ umsetzbare Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, das durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.	36
Abbildung 18: Humantoxizität der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen in kg bzw. $\text{g} \cdot 1,4\text{-DCB-}\ddot{\text{A}}\text{q.}$ nach der Methode CML01. Aufgeführt sind die Werte pro $\text{ha} \cdot \text{Anbauzeitraum}$ und pro MJ umsetzbare Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, das durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.	37
Abbildung 19: Kosten des Anbaus von verschiedenen Sommer- und Winterzwischenkulturen mit Gölledüngung.	38
Abbildung 20: Kosten des Anbaus von verschiedenen Sommer- und Winterzwischenkulturen mit mineralischer Düngung.	38
Abbildung 21: Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie (NEE-Bedarf) einer kWh_{el} aus güllegedüngten Zwischenfrüchten nach Abzug der für eine Gründüngung durchschnittlich benötigten NEE (blaue Säulen). Der gestrichelte Säulenabschnitte entspricht der Gutschrift für den Ersatz der Gründüngung. Im Vergleich dazu ist der NEE-Bedarf des Schweizerischen Strommixes (grüne Linie) gezeigt. Die Fehlerbalken geben die Spannweite des NEE an wenn der Ertrag, unter Anpassung der ertragsabhängigen Prozesse (z. B. Ballen pressen) und Betriebsstoffe (z. B. Silofolie), um 20 % schwankt.	41
Abbildung 22: Bedarf an nicht-erneuerbarer Energie (NEE-Bedarf) einer kWh_{el} aus mineralgedüngten Zwischenfrüchten nach Abzug der für eine Gründüngung durchschnittlich benötigten NEE (blaue Säulen). Der gestrichelte Säulenabschnitte entspricht der Gutschrift	

für den Ersatz der Gründüngung. Im Vergleich dazu ist der NEE-Bedarf des Schweizerischen Strommixes (grüne Linie) gezeigt. Die Fehlerbalken geben die Spannweite an des NEE an wenn der Ertrag, unter Anpassung der ertragsabhängigen Prozesse (z. B. Ballen pressen) und Betriebsstoffe (z. B. Silofolie), um 20 % schwankt. 41

Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Stromertrag in $\text{kWh}_{\text{el}} \cdot \text{ha}^{-1}$ und Bedarf an NEE pro erzeugter kWh. 42

Abbildung 24: Treibhausgasemissionen die bei der Biogasstromproduktion aus güllegedüngten Sommer- und Winterzwischenkulturen (SZK und WZK) zusätzlich entstehen, wenn diese statt einer Gründüngung angebaut werden. Die Fehlerbalken geben die mögliche Schwankungsbreite der Emissionen bei $\pm 20\%$ des Biomasseertrags an. Zusätzlich angegeben sind die Treibhausgasemissionen pro kWh Schweizer Strommix (grüne Linie) und pro kWh Strommix UCTE (violette Linie). 43

Abbildung 25: Treibhausgasemissionen die bei der Biogasstromproduktion aus mineralgedüngten Sommer- und Winterzwischenkulturen (SZK und WZK) zusätzlich entstehen, wenn diese statt einer Gründüngung angebaut werden. Die roten Fehlerbalken geben die mögliche Schwankungsbreite der Emissionen bei $\pm 20\%$ des Biomasseertrags. Zusätzlich angegeben sind die Treibhausgasemissionen pro kWh Schweizer Strommix (grüne Linie) und pro kWh UCTE (violette Linie). 44

Abbildung 26: Einfluss des Biogasproduktionsinventares auf die Treibhausgasemissionen der Biogasstromproduktion aus gülle- (a) bzw. mineralisch (b) gedüngten Sommer- und Winterzwischenkulturen (SZK und WZK). Der positive Fehlerbalken zeigt das Resultat unter Annahme 100 % einstufige Anlagen, der untere das Resultat bei 100 % zweistufigen Anlagen. Zusätzlich angegeben sind die Treibhausgasemissionen pro kWh Schweizer Strommix (grüne Linie) und pro kWh UCTE (violette Linie). 45

Abbildung 27: Relatives Versauerungspotential von einer kWh Biogasstrom aus den Zwischenkulturen mit den geringsten Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Versauerungspotential des Schweizer Strommixes (100 %). In den dargestellten Werten ist die Gründüngungsgutschrift inbegriffen. SZK = Sommerzwischenkultur; 0, 20, 30, 40 = Stickstoffdüngung in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; M = Mineraldünger; G = Gülle 47

Abbildung 28: Relatives Eutrophierungspotential von einer kWh Biogasstrom aus den Zwischenkulturen mit den geringsten Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Eutrophierungspotential des Schweizer Strommixes (100 %). In den dargestellten Werten ist die Gründüngungsgutschrift inbegriffen. SZK = Sommerzwischenkultur; 0, 20, 30, 40 = Stickstoffdüngung in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; M = Mineraldünger; G = Gülle 47

Abbildung 29: Relatives Toxizitätspotential von einer kWh Biogasstrom aus den Zwischenkulturen mit den geringsten Treibhausgasemissionen, im Vergleich zum Toxizitätspotential des Schweizer Strommixes (100 %). In den dargestellten Werten ist die Gründüngungsgutschrift inbegriffen. SZK = Sommerzwischenkultur; 0, 20, 30, 40 = Stickstoffdüngung in $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; M = Mineraldünger; G = Gülle 49

Abbildung 30: Bereitstellungskosten von verschiedenen Sommer- und Winterzwischenkulturen mit Gülledüngung in SFr. pro kWh Strom. 51

Abbildung 31: Bereitstellungskosten von verschiedenen Sommer- und Winterzwischenkulturen mit mineralischer Düngung in SFr. pro kWh Strom.	51
Abbildung 32: Ozonbildung (Sommersmog) der güllegedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, dass durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.	75
Abbildung 33: Ozonbildung (Sommersmog) der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, dass durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.	75
Abbildung 34: Szenarien für den Ersatz des in der Schweiz produzierten Atomstroms durch den Strommix UCTE. Aufgeführt ist der Treibhausgasausstoss pro kWh aus Zwischenkulturen jeweils unter der Annahme das 50 % bzw. 100 % der Anlagen zweistufig aufgebaut im Vergleich zum in ecoinvent abgebildeten Strommix Schweiz und des Strommixes Schweiz unter der Annahme das 50 bzw. 100 % des in der Schweiz produzierten Atomstromes durch den aktuelle UCTE Strommix ersetzt werden.....	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Varianten der bilanzierte Zwischenkulturen.....	11
Tabelle 2: Umweltwirkungen und Kosten von einer Hektare Gründüngung in den Anbauvarianten ungedüngt sowie gedüngt mit 20 kg verfügbarem N aus Gülle- oder Mineraldüngung. Saatzeitpunkt ist August oder September. Die Werte sind Netto-Angaben, unter Berücksichtigung der Umweltwirkungen von Brache.	24
Tabelle 3: Umweltwirkung der Gründüngungsvarianten auf Basis der Reduktion des Eutrophierungspotentials um 1 kg N-Äq.....	24
Tabelle 4: Die zehn Zwischenkulturen mit den niedrigsten THG-Emissionen pro kWh Strom. Aufgeführt sind die berechneten Ergebnisse mit Gutschrift sowie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen.	46
Tabelle 5: Biogas- und Stromerträge von Silomais und Grassilage je Hektar.....	49
Tabelle 6: Berechnung der Kosten pro kg CO ₂ -Reduktion für die Septembersaat des Senfs mit 20 kg Stickstoffdüngung unter der Annahme, dass der Ertrag 20 % geringer ausfällt als angenommen bzw. 100 % der Biogasanlagen mit einem zweiten Fermenter ausgestattet sind.	54
Tabelle 7: Berechnung der des Reduktionspotentials pro ha und der Kosten pro kg CO ₂ -Reduktion für die Septembersaat des Senfs mit 20 kg Stickstoffdüngung aus Gülle im Vergleich zur Standardmischung 210 mit 80 kg Stickstoff.....	55
Tabelle 8: Produktionsinventar der Gründüngungsvarianten. Alle Angaben pro ha.....	66
Tabelle 9: Produktionsinventar von Senf und Phacelia als Sommerzwischenkulturen. Alle Angaben pro ha.	67
Tabelle 10: Produktionsinventar der Sommerzwischenkulturen SM106, SM101 und Sonnenblume. Alle Angaben pro ha.....	68
Tabelle 11: Produktionsinventar der Winterzwischenkulturen SM200 und SM210. Alle Angaben pro ha.	69
Tabelle 12: Produktionsinventar der Winterzwischenkulturen Raigras. Alle Angaben pro ha.	70
Tabelle 13: Für die Berechnung der Zwischenkulturökobilanzen verwendete Ökoinventare aus den Datenbanken ecoinvent v2.2 und SALCA 081.....	71
Tabelle 14: Zusammensetzung des in die Analyse einbezogenen Schweizer Elektrizitäts-Versorgungsmixes, unter Einbezug von Produktion und Import aus der ecoinvent-Datenbank v2.2.....	72
Tabelle 15: Zusammensetzung des in die Analyse einbezogenen UCTE Produktionsmixes, aufgeschlüsselt auf die Länder und Herstellungsverfahren. Quelle: ecoinvent-Datenbank ..	73
Tabelle 16: Umweltwirkungen der Sommerzwischenkulturen pro ha.	77

Tabelle 17: Umweltwirkungen der Winterzwischenkulturen und von Mais mit verschiedenen Vorkulturen pro ha.	78
Tabelle 18: Umweltwirkungen der Sommerzwischenkulturen pro MJ UE	79
Tabelle 19: Umweltwirkungen der Winterzwischenkulturen und von Mais mit verschiedenen Vorkulturen pro MJ UE.	80
Tabelle 20: Umweltwirkungen des aus Sommerzwischenkulturen hergestellten Stromes pro kWh unter Berücksichtigung der Gutschrift für den Ersatz der Gründüngung.....	81
Tabelle 21: Umweltwirkungen des aus Winterzwischenkulturen hergestellten Stromes pro kWh unter Berücksichtigung der Gutschrift für den Ersatz der Gründüngung.....	82
Tabelle 22 Umweltwirkungen des aus Sommerzwischenkulturen hergestellten Stromes pro kWh ohne Berücksichtigung der Gutschrift für den Ersatz der Gründüngung.	83
Tabelle 23: Umweltwirkungen des aus Winterzwischenkulturen bzw. Mais hergestellten Stromes pro kWh unter Berücksichtigung der Gutschrift für den Ersatz der Gründüngung. .	84
Tabelle 24: Erträge und Inhaltsstoffe sowie Biogas- und potentieller Stromertrag von Mais und den Zwischenkulturen.....	85

Anhang

Produktionsinventare der Zwischenkulturen

Tabelle 8: Produktionsinventar der Gründungsvarianten. Alle Angaben pro ha.

		Gründung							
Düngung	Art	Senf				Phacelia			
		O	M/G	O	M/G	O	M/G	O	M/G
Ernte	N-	GD	GD	GD	GD	GD	GD	GD	GD
Düngung	Aussaart	0	20	0	20	0	20	0	20
Kultur		Aug	Aug	Sep	Sep	Aug	Aug	Sep	Sep
		Senf	Senf	Senf	Senf	Phace	Phace	Phace	Phace
Saat	Datum	01.08	01.08	01.09	01.09	01.08	01.08	01.09	01.09
Ernte	Datum	30.11	30.11	30.11	30.11	30.11	30.11	30.11	30.11
Anbau Zeitraum	Tage	121	121	90	90	121	121	90	90
Saatgut	kg/ha	20	20	20	20	8	8	8	8
Brutto-Ertrag	dt/ha TS	33	37	20	22	31	34	14	1
Düngung									
N Düngung Total	kg N/ha		20		20		20		20
N-Düngung Aug	kg/ha		20		0		20		
N-Düngung Sep	kg/ha				20				20
Arbeitsprozesse									
Grubbern	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Kreiselegge	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Walzen	ha					1	1	1	1
Schleuderstreuer	ha		1		1		1		1
Mulchen	ha	1	1			1	1	1	1
Säen	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Kosten									
Mineraldüngung	SFr.	753	840	586	673	817	904	817	904
Gülledüngung	SFr.	753	854	586	687	817	918	817	918

M = Mineralisch

O = ohne Düngung

GD = Gründüngung

G = Gülle

SZK = Sommerzwischenkultur

M/G = Variante mineralisch und Gülle

WZK = Winterzwischenkultur

Tabelle 9: Produktionsinventar von Senf und Phacelia als Sommerzwischenkulturen. Alle Angaben pro ha.

		Sommerzwischenkulturen							
Düngung	Art	Senf				Phacelia			
		M/G	M/G	M/G	M/G	M/G	M/G	M/G	M/G
Ernte	N-Düngung	SZK	SZK	SZK	SZK	SZK	SZK	SZK	SZK
Aussaart	Kultur	1	1	1	1	1	1	1	1
		20	60	20	60	40	60	40	60
		Aug	Aug	Sep	Sep	Aug	Aug	Sep	Sep
		Senf	Senf	Senf	Senf	Phace	Phace	Phace	Phace
Saat	Datum	01.08	01.08	01.09	01.09	01.08	01.08	01.09	01.09
Ernte	Datum	15.10	15.10	15.10	15.10	15.10	15.10	15.10	15.10
Anbau Zeitraum	Tage	75	75	44	44	75	75	44	44
Saatgut	kg/ha	20	20	20	20	8	8	8	8
Brutto-Ertrag	dt/ha TS	37	44	22	27	34	38	16	17
Netto-Ertrag	dt/ha TS	33	40	20	24	31	34	14	15
Schnitthäufigkeit	Anzahl	1	1	1	1	1	1	1	1
Düngung									
N Düngung Total	kg N/ha	20	60	20	60	40	60	40	60
N-Düngung Aug	kg/ha	20	60			40	60		
N-Düngung Sep	kg/ha			20	60			40	60
Arbeitsprozesse									
Grubbern	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Kreiselegge	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Walzen	ha					1	1	1	1
Schleuderstreuer	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Zetten	ha	2	2	2	2	2	2	2	2
Pressen/laden	Ballen	19	23	11	14	18	19	8	9
Kreiselschwader	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Säen	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Transport	tkm	3	4	2	2	3	3	1	2
Kosten									
Mineraldüngung	SFr.	1'616	1'836	1'405	1'542	1'684	1'739	1'418	1'474
Gülldüngung	SFr.	1'611	1'881	1'398	1'587	1'703	1'784	1'437	1'518

M = Mineralisch

O = ohne Düngung

GD = Gründüngung

G = Gülle

SZK = Sommerzwischenkultur

M/G = Variante mineralisch und Gülle

WZK = Winterzwischenkultur

Tabelle 10: Produktionsinventar der Sommerzwischenkulturen SM106, SM101 und Sonnenblume. Alle Angaben pro ha.

		Sommerzwischenkulturen							
		SM106		SM106		SM101		Sonnenblume	
Düngung		O	M/G	M/G	M/G	O	M/G	M/G	M/G
Art		SZK	SZK	SZK	SZK	SZK	SZK	SZK	SZK
Ernte		1	1	2	2	1	1	1	1
N-Düngung		0	30	30	60	0	30	20	30
Aussaart		Aug	Aug	Aug	Aug	Aug	Aug	Aug	Aug
Kultur		SM106	SM106	SM106	SM106	SM101	SM101	Soblu	Soblu
Saat	Datum	15.08	15.08	01.08	01.08	15.08	15.08	15.08	15.08
Ernte	Datum	15.10	15.10	15.10	15.10	15.10	15.10	15.10	15.10
Anbau Zeitraum	Tage	61	61	75	75	61	61	61	61
Saatgut	kg/ha	36	36	36	36	175	175	35	35
Brutto-Ertrag	dt/ha TS	18.445	21.7	37	42.55	27.285	32.1	37.4	39.27
Netto-Ertrag	dt/ha TS	9	11	18	21	14	16	34	35
Schnitthäufigkeit	Anzahl	1	1	2	2	1	1	1	1
Düngung									
N Düngung Total	kg N/ha		30	30	60		30	20	30
N-Düngung Aug	kg/ha		30	15	30		30	20	30
N-Düngung Sep	kg/ha			15	30				
Arbeitsprozesse									
Grubbern	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Kreiselegge	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Walzen	ha	1	1	1	1	1	1		
Schleuderstreuer	ha		1	2	2		1	1	1
Zetten	ha	2	2	4	4	2	2	2	2
Pressen/laden	Ballen	7	8	14	16	10	12	19	20
Kreiselschwader	ha	1	1	2	2	1	1	1	1
Säen	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Transport	tkm	2	2	3	4	2	3	3	4
Kosten									
Mineraldüngung	SFr.	1'374	1'522	2'105	2'202	1'498	1'673	1'648	1'698
Gülldüngung	SFr.	1'374	1'528	2'033	2'378	1'498	1'679	1'641	1'695

M = Mineralisch

O = ohne Düngung

GD = Gründüngung

G = Gülle

SZK = Sommerzwischenkultur

M/G = Variante mineralisch und Gülle

WZK = Winterzwischenkultur

Tabelle 11: Produktionsinventar der Winterzwischenkulturen SM200 und SM210. Alle Angaben pro ha.

		Winterzwischenkulturen							
		SM200				SM210			
Düngung		M/G	M/G	M/G	M/G	M/G	M/G	M/G	M/G
Art		WZK	WZK	WZK	WZK	WZK	WZK	WZK	WZK
Ernte		1	1	3	3	1	1	3	3
N-Düngung		40	60	60	80	40	60	60	80
Aussaart		Sep	Sep	Aug	Aug	Sep	Sep	Aug	Aug
Kultur		SM200	SM200	SM200	SM200	SM210	SM210	SM210	SM210
Saat	Datum	01.09	01.09	01.08	01.08	01.09	01.09	01.08	01.08
Ernte	Datum	18.04	18.04	18.04	18.04	18.04	18.04	18.04	18.04
Anbau Zeitraum	Tage	229	229	260	260	229	229	260	260
Saatgut	kg/ha	35	35	35	35	30	30	30	30
Brutto-Ertrag	dt/ha TS	35	37	60	66	33	36	67	74
Netto-Ertrag	dt/ha TS	18	19	31	34	16	18	33	36
Schnitthäufigkeit	Anzahl	1	1	3	3	1	1	3	3
Düngung									
N Düngung Total	kg N/ha	40	60	60	80	40	60	60	80
N-Düngung Aug	kg/ha			20	20			20	20
N-Düngung Sep	kg/ha	40	60	20	30	40	60	20	30
N-Düngung Mrz	kg/ha			20	30			20	30
Arbeitsprozesse									
Grubbern	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Kreiselegge	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Walzen	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Schleuderstreuer	ha	1	1	3	3	1	1	3	3
Zetten	ha	2	2	6	6	2	2	6	6
Pressen/laden	Ballen	13	13	22	24	12	13	25	27
Kreiselschwader	ha	1	1	3	3	1	1	3	3
Säen	ha	1	1	1	1	1	1	1	1
Transport	tkm	3	3	5	6	3	3	6	7
Kosten									
Mineraldüngung	SFr.	1'730	1'759	2'901	2'982	1'644	1'700	2'920	3'002
Gülledüngung	SFr.	1'749	1'804	3'209	3'425	1'663	1'744	3'228	3'445

M = Mineralisch

O = ohne Düngung

GD = Gründüngung

G = Gülle

SZK = Sommerzwischenkultur

M/G = Variante mineralisch und Gülle

WZK = Winterzwischenkultur

Tabelle 12: Produktionsinventar der Winterzwischenkulturen Raigras. Alle Angaben pro ha.

		Winterzwischenkulturen			
		Raigras			
Düngung		M/G	M/G	M/G	M/G
Art		WZK	WZK	WZK	WZK
Ernte		1	1	3	3
N-Düngung		40	60	60	80
Aussaart		Sep	Sep	Aug	Aug
Kultur		Raigras	Raigras	Raigras	Raigras
Saat	Datum	01.09	01.09	01.08	01.08
Ernte	Datum	18.04	18.04	18.04	18.04
Anbau Zeitraum	Tage	229	229	260	260
Saatgut	kg/ha	40	40	40	40
Brutto-Ertrag	dt/ha TS	40	44	72	80
Netto-Ertrag	dt/ha TS	36	40	65	72
Schnitthäufigkeit	Anzahl	1	1	3	3
Düngung					
N Düngung Total	kg N/ha	40	60	60	80
N-Düngung Aug	kg/ha			20	20
N-Düngung Sep	kg/ha	40	60	20	30
N-Düngung Mrz	kg/ha			20	30
Arbeitsprozesse					
Grubbern	ha	1	1	1	1
Kreiselegge	ha	1	1	1	1
Walzen	ha	1	1	1	1
Schleuderstreuer	ha	1	1	3	3
Zetten	ha	2	2	6	6
Pressen/laden	Ballen	15	16	26	29
Kreiselschwader	ha	1	1	3	3
Säen	ha	1	1	1	1
Transport	tkm	4	4	6	7
Kosten					
Mineraldüngung	SFr.	1'736	1'792	2'958	3'066
Gülldüngung	SFr.	1'755	1'836	3'267	3'510

M = Mineralisch

G = Gülle

M/G = Variante mineralisch und Gülle

O = ohne Düngung

SZK = Sommerzwischenkultur

WZK = Winterzwischenkultur

GD = Gründüngung

Tabelle 13: Für die Berechnung der Zwischenkulturökobilanzen verwendete Ökoinventare aus den Datenbanken ecoinvent v2.2 und SALCA 081.

Transportprozesse	Transport, barge/RER S Transport, freight, rail/CH S Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER S Transport, tractor and trailer /CH S Transport, van <3.5t/CH S
Bodenbearbeitung	Tillage, cultivating, chiselling/CH S Tillage, harrowing, by rotary harrow /CH S Tillage, rolling /CH S
Saatgut und Saat	Clover seed IP, at regional storehouse/CH S Grass seed IP, at regional storehouse/CH S Pea seed IP, at regional storehouse/CH S Rape seed processing, in seed centre/kg/CH U sugar beet seed IP, at regional storehouse/CH S Sunflower IP, at farm/CH S Wheat seed IP, at regional storehouse/CH S Sowing/CH S
Mineral-N-Dünger	Ammonium nitrate, as N, at regional storehouse/RER S Ammonium sulphate, as N, at regional storehouse/RER S Calcium ammonium nitrate, as N, at regional store- Diammonium phosphate, as N, at regional storehouse/RER Urea, as N, at regional storehouse/RER S
Gülle	Slurry store and processing, operation/CH S
Düngerausbringung	Diesel combustion, in tractor /kg/CH U Fertilising, by broadcaster /CH S Fibre cement roof slate, at plant/CH U Garage, wood, non-insulated, fire-protected, at farm/m2/CH/I Shed, large, wood, non-insulated, fire-unprotected, at Slurry application with spreader with trailed hoses, per Slurry spreading, by vacuum tanker/CH S
Pflanzenschutz (Saatgutbeize)	Acetamide-anilide-compunds, at regional storehouse/CH S
Ernteprozesse	Baling/CH S Fodder loading, by self-loading trailer/CH S Haying, by rotary tedder/CH S Loading bales/CH S Mowing, by rotary mower/CH S Swath, by rotary windrower/CH S

Tabelle 14: Zusammensetzung des in die Analyse einbezogenen Schweizer Elektrizitäts-Versorgungsmixes, unter Einbezug von Produktion und Import aus der ecoinvent-Datenbank v2.2

Electricity mix/CH U		1kWh	
Electricity, nuclear, at power plant/CH U	0.3168	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007.
Electricity, hydropower, at power plant/CH U	0.2665	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007. Without pumped storage (1893 GWh)
Electricity, production mix UCTE/UCTE U	0.2008	kWh	(2,1,2,2,3,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007. Assumption for electricity of unspecified origin.
Electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor/FR U	0.1267	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007. Assumption: all imported nuclear power from France.
Electricity, hydropower, at power plant/FR U	0.0269	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007. Assumption: all imported hydropower from France.
Electricity, hydropower, at pumped storage power plant/CH U	0.0183	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007
Electricity, natural gas, at power plant/DE U	0.0097	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007. Assumption: electricity imported from Germany.
Electricity, oil, at power plant/IT U	0.0032	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007. Assumption: electricity imported from Italy.
Electricity, at cogen 500kWe lean burn, allocation exergy/CH U	0.0032	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007.
Electricity, at cogen 200kWe diesel SCR, allocation exergy/CH U	0.0022	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007.
Electricity, at cogen with biogas engine, allocation exergy/CH U	0.0017	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007. Shares wood/biogas calculated from SFOE statistics on renewable energy.
Electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation exergy/CH U	0.0014	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007. Shares wood/biogas calculated from SFOE statistics on renewable energy.
Electricity, hard coal, at power plant/DE U	0.0011	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and AEE statistics 2007. Assumption: electricity imported from Germany.
Electricity, production mix photovoltaic, at plant/CH U	0.0002	kWh	(1,1,2,1,1,3); According to SFOE statistics 2007 and ecoinvent report

Tabelle 15: Zusammensetzung des in die Analyse einbezogenen UCTE Produktionsmixes, aufgeschlüsselt auf die Länder und Herstellungsverfahren. Quelle: ecoinvent-Datenbank

	Anteil des Ländermixes am Produktionsmix UCTE	electricity, at cogen 200kWe diesel SCR, allocation exergy	electricity, at cogen 500kWe lean burn, allocation exergy	electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation exergy	electricity, at cogen with biogas engine, allocation exergy	electricity, at wind power plant	electricity, hard coal, at power plant	electricity, hydropower, at power plant	electricity, hydropower, at pumped storage power plant	electricity, industrial gas, at power plant	electricity, lignite, at power plant	electricity, natural gas, at power plant	electricity, nuclear, at power plant	electricity, nuclear, at power plant pressure wa-	electricity, oil, at power plant	electricity, production mix photovoltaic, at plant
AT	2.48%			1.0%	0.2%	1.5%	10.4%	58.7%	3.4%	1.7%	1.5%	16.4%			2.7%	0.0207%
BA	0.48%							48.4%			50.5%	1.1%				
BE	3.23%			0.6%	0.3%	0.2%	10.7%	0.4%	1.6%	2.7%		25.2%	55.0%		2.0%	
BG	1.54%						9.3%	8.5%		0.5%	35.7%	3.5%	40.5%		2.0%	
CH	2.52%	0.3%	1.5%	0.0%	0.0%	0.0%		53.7%	1.4%				39.9%			0.0261%
CS	1.44%							31.5%	0.9%		65.5%	1.5%			0.7%	
CZ	3.05%			0.7%	0.2%		7.0%	2.6%	0.7%	0.1%	51.7%	4.5%	32.1%		0.4%	
DE	22.81%			0.6%	0.5%	4.4%	22.5%	3.6%	1.2%	1.3%	25.1%	10.2%	27.4%		1.6%	0.0964%
ES	10.62%			1.5%	0.6%	5.8%	24.3%	11.6%	1.1%	0.4%	3.7%	19.5%	22.8%		8.4%	0.0372%
FR	21.64%			0.2%	0.1%	0.1%	4.4%	10.9%	0.9%	0.5%		3.2%		78.1%	1.0%	
GR	2.17%				0.2%	2.0%		8.5%	0.9%		59.1%	15.0%			14.0%	

At = Österreich, BA = Bosnien-Herzegowina, BE= Belgien, BG = Bulgarien, CH = Schweiz, CS = Serbien und Montenegro, CZ = Tschechien, DE = Deutschland, ES = Spanien, FR = Frankreich, GR = Griechenland

	Anteil des Ländermixes am Produktionsmix UCTE	electricity, at cogen 200kWe diesel SCR, allocation exergy	electricity, at cogen 500kWe lean burn, allocation exergy	electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation exergy	electricity, at cogen with biogas engine, allocation exergy	electricity, at wind power plant	electricity, hard coal, at power plant	electricity, hydropower, at power plant	electricity, hydropower, at pumped storage power plant	electricity, industrial gas, at power plant	electricity, lignite, at power plant	electricity, natural gas, at power plant	electricity, nuclear, at power plant	electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor	electricity, oil, at power plant	electricity, production mix photovoltaic, at plant
HR	0.60%						12.8%	46.3%	0.9%			13.7%	17.2%		9.1%	
HU	1.23%			2.0%	0.1%		1.0%	0.7%		0.5%	23.3%	34.8%	35.2%		2.3%	0.0320%
IT	11.43%			0.1%	0.4%	0.6%	14.3%	15.3%	3.5%	1.8%		43.3%			15.2%	0.0014%
LU	0.16%				0.5%	1.3%		2.5%	20.1%			73.9%				
MK	0.25%							23.8%			76.1%				0.1%	
NL	3.80%			1.8%	0.3%	2.0%	23.4%	0.1%		2.7%		60.7%	3.7%		2.8%	
PL	5.55%			0.5%	0.1%	0.1%	55.4%	1.5%	1.1%	1.2%	36.3%	2.0%			1.6%	
PT	1.72%			2.8%	0.0%	1.9%	32.7%	22.6%	0.6%			25.7%			12.5%	0.0011%
RO	1.72%						1.3%	30.5%		0.5%	36.0%	18.1%	9.7%		3.8%	
SI	0.46%			0.7%	0.2%		4.0%	34.3%			35.4%	2.7%	22.2%		0.3%	
SK	1.12%			0.0%	0.0%		10.8%	14.3%	0.4%	1.4%	7.6%	7.8%	55.2%		2.4%	
Total	100%	0.0%	0.0%	0.6%	0.3%	1.9%	16.1%	11.7%	1.3%	1.0%	14.1%	15.7%	14.6%	16.9%	4.3%	0.0277%

HR =Kroatien, HU = Ungarn, IT = Italien, LU = Luxemburg, MK =Mazedonien, NL = Niederlande, PL = Polen, PT = Portugal, RO = Rumänien, SI = Slowenien, SK = Slowakei

Abbildungen Produktion Grundfutter

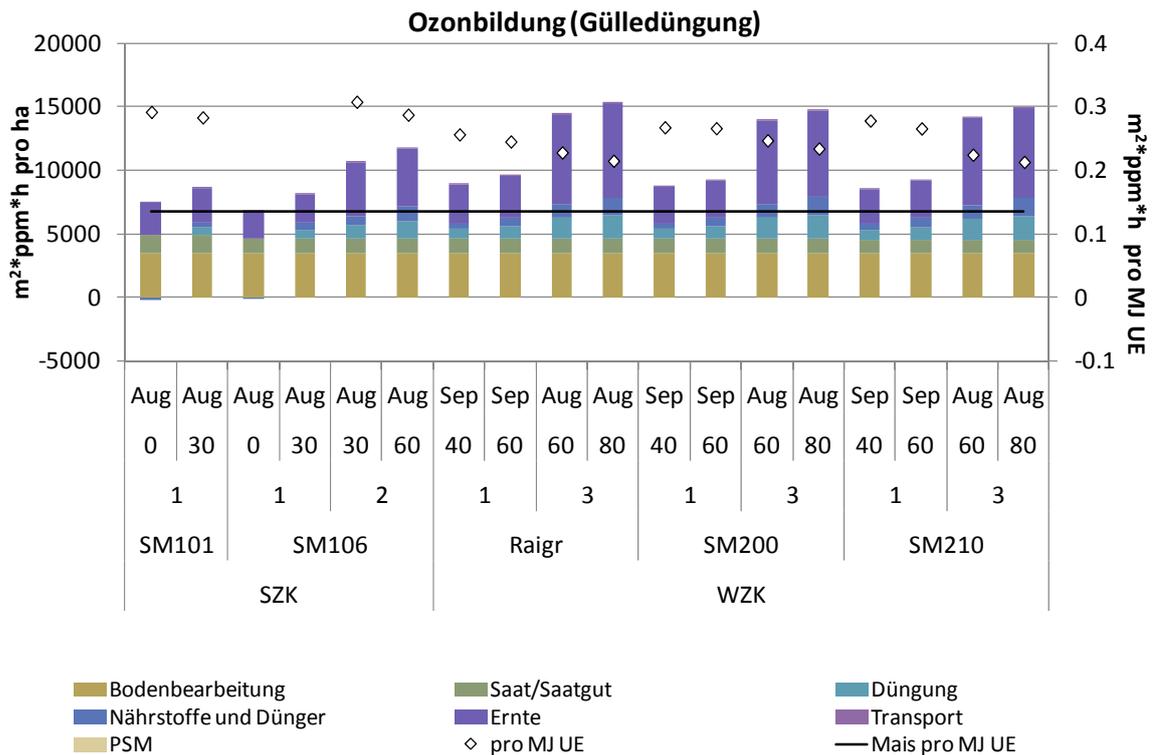


Abbildung 32: Ozonbildung (Sommersmog) der güllegedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, dass durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.

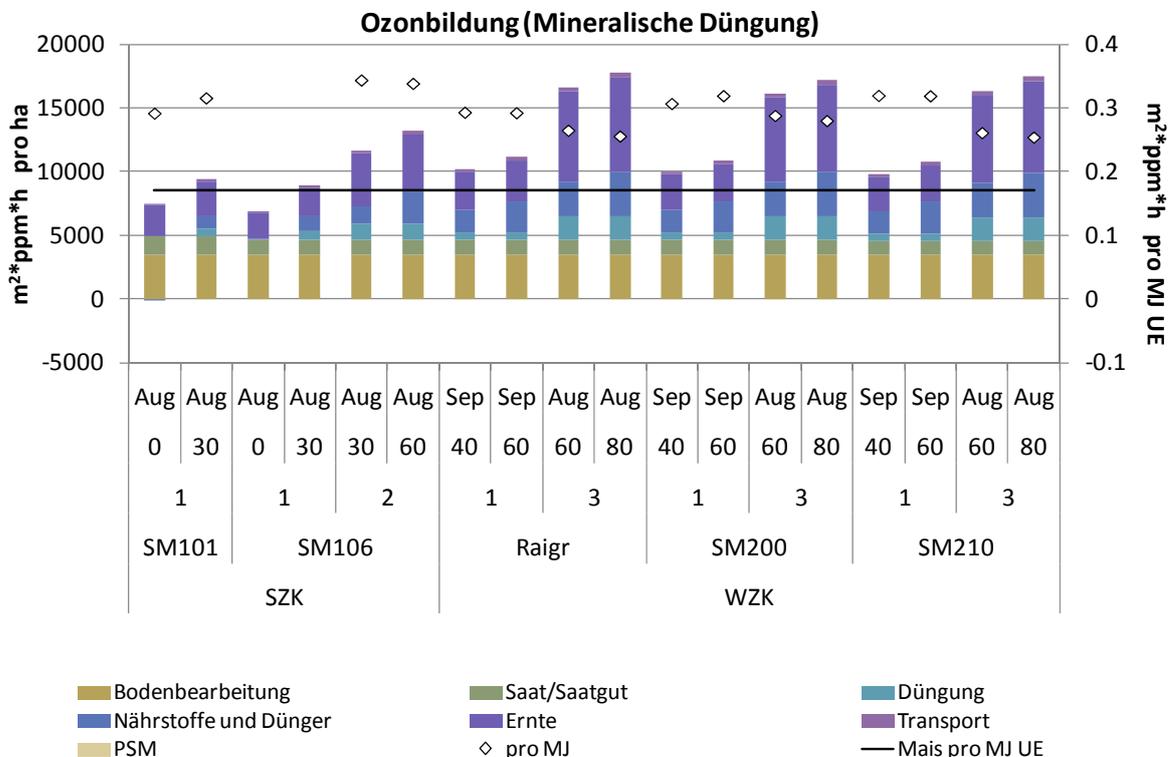


Abbildung 33: Ozonbildung (Sommersmog) der mineralisch gedüngten Zwischenkulturen. Aufgeführt sind die Werte pro ha * Anbauzeitraum und pro MJ umsetzbarer Energie. Die schwarze Linie zeigt das Potential, dass durch die Erzeugung eines MJ umsetzbarer Energie aus Silomais verursacht wird.

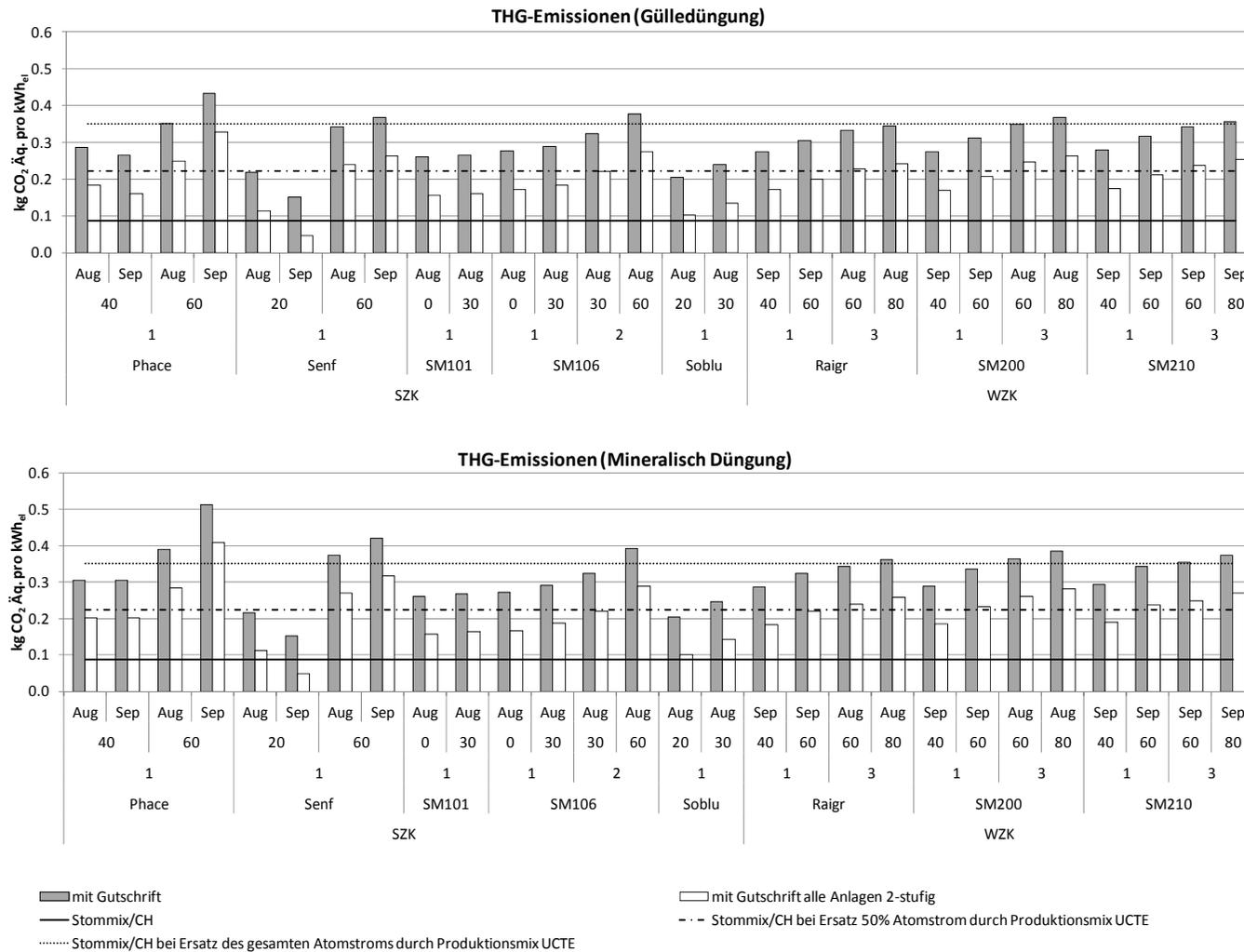


Abbildung 34: Szenarien für den Ersatz des in der Schweiz produzierten Atomstroms durch den Strommix UCTE. Aufgeführt ist der Treibhausgasausstoss pro kWh aus Zwischenkulturen jeweils unter der Annahme das 50 % bzw. 100 % der Anlagen zweistufig aufgebaut im Vergleich zum in ecoinvent abgebildeten Strommix Schweiz und des Strommixes Schweiz unter der Annahme das 50 bzw. 100 % des in der Schweiz produzierten Atomstromes durch den aktuelle UCTE Strommix ersetzt werden.

Tabelle 16: Umweltwirkungen der Sommerzwischenkulturen pro ha.

		S	N	M	D	NEE	THG	Ozonbildung	Versauerung	Eutrophierung	Htox	terr. Ökotoxizität	aq. Ökotoxizität
						MJ Äq.	kg CO2 Äq.	m2.ppm.h	m2	kg N	kg 1,4-DB Äq.	kg 1,4-DB Äq.	kg 1,4-DB Äq.
SZK	Phacelia	1	40	Aug	G	9'532	994	9'893	98	13.0	409	-0.03	3.86
				Sep	M	7'355	896	8'980	417	14.7	345	3.19	10.84
				Aug	M	8'049	930	8'761	95	17.8	374	-0.02	3.78
		60	Aug	G	5'872	834	7'852	357	21.8	310	3.77	11.37	
			Sep	M	11'035	1'261	10'941	134	15.6	455	-0.01	4.60	
			Aug	M	7'831	1'104	9'687	544	17.5	363	5.40	13.13	
	Senf	1	20	Aug	G	9'403	1'225	9'751	130	27.6	415	0.00	4.58
				Sep	M	6'199	1'069	8'497	466	31.7	324	6.07	13.76
				Aug	M	8'363	736	8'932	65	10.5	358	-0.21	3.14
		60	Aug	G	7'213	695	8'360	292	12.1	322	0.79	8.12	
			Sep	M	7'211	675	8'037	62	9.4	330	-0.20	3.02	
			Aug	M	6'061	630	7'458	251	11.1	294	1.19	8.47	
	SM101	1	0	Aug	G	11'404	1'270	11'057	137	15.7	449	-0.19	4.65
				Sep	M	8'201	1'113	9'802	547	17.6	357	5.05	12.95
				Aug	M	10'022	1'212	10'006	134	17.4	416	-0.17	4.64
		30	Aug	G	6'818	1'056	8'753	469	21.5	324	5.61	13.49	
			Sep	M	6'302	484	7'539	30	1.6	317	0.38	17.12	
			Aug	M	6'302	484	7'539	30	1.6	317	0.38	17.12	
	SM106	1	0	Aug	G	8'819	891	9'598	86	3.0	400	0.38	18.27
				Sep	M	7'155	839	8'882	359	8.2	350	0.49	23.50
				Aug	M	5'645	519	7'037	24	0.2	290	-0.11	2.91
		30	Aug	G	5'645	519	7'037	24	0.2	290	-0.11	2.91	
			Sep	M	8'073	956	9'080	80	8.5	371	-0.12	4.34	
			Aug	M	6'409	904	8'365	352	13.7	321	1.12	10.40	
Soblu	2	60	Aug	G	10'305	1'181	11'840	88	0.4	463	-0.26	4.76	
			Sep	M	8'517	1'131	10'870	463	5.0	404	-0.36	10.14	
			Aug	M	12'465	1'618	13'407	142	13.0	528	-0.31	5.70	
	30	Aug	G	9'137	1'485	11'929	641	18.7	428	2.33	13.45		
		Sep	M	8'280	695	8'851	62	3.7	339	0.05	3.33		
		Aug	M	7'194	654	8'309	289	4.5	308	1.04	8.26		
30	30	Aug	G	9'043	823	9'375	80	3.7	362	0.06	3.74		
		Sep	M	7'444	753	8'662	353	4.7	317	2.05	9.60		

NEE = Bedarf an nicht erneuerbarer Energie, THG = Treibhausgasausstoss, Htox. = Humantoxizität, terr. = Terrestrische, aq. = aquatische, S = Anzahl Nutzungen, N = Stickstoffdüngung in kg pro ha, M = Aussaat, D = Düngerart

Tabelle 17: Umweltwirkungen der Winterzwischenkulturen und von Mais mit verschiedenen Vorkulturen pro ha.

								NEE	THG	Ozonbildung	Versauerung	Eutrophierung	Htox	terr. Ökotoxizität	aq. Ökotoxizität														
								MJ Äq.	kg CO2 Äq.	m2.ppm.h	m2	kg N	kg 1,4-DB	kg 1,4-DB Äq.	kg 1,4-DB Äq.														
WZK	Raigras	1	S	N	M	D	Sep	9'799	1'076	10'186	101	15.5	419	-0.60	4.68														
							Sep	7'621	976	9'271	363	18.6	354	0.42	10.74														
							Sep	11'255	1'325	11'177	136	15.0	463	-0.66	5.25														
			3	Aug	Aug	M	G	M	G	M	8'052	1'165	9'916	472	18.3	370	2.22	12.88											
											15'573	1'762	16'573	153	21.3	642	-1.18	5.85											
											12'121	1'608	14'805	750	21.9	533	-0.68	12.32											
		SM200	1	40	Sep	Sep	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	9'408	1'057	9'958	99	15.8	408	-0.25	4.61			
																			7'231	958	9'043	361	18.9	343	0.88	11.02			
																			10'733	1'303	10'851	134	15.8	449	-0.26	5.25			
			3	60	Aug	Aug	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	7'529	1'142	9'590	470	19.0	356	2.95	13.29	
																					14'795	1'751	16'088	151	23.0	622	-0.49	5.97	
																					11'343	1'610	14'339	747	26.1	513	0.52	12.96	
	80	Aug	Aug	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	16'365	2'032	17'206	187	27.9	668	-0.56	6.43			
																			11'887	1'829	15'112	854	31.2	531	2.16	14.88			
																			11'887	1'829	15'112	854	31.2	531	2.16	14.88			
	SM210	1	40	Sep	Sep	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	9'195	1'079	9'840	98	15.9	401	-0.18	4.46		
																				7'017	979	8'925	360	19.0	337	1.05	10.97		
																				10'612	1'328	10'803	134	15.8	445	-0.20	5.10		
			3	60	Aug	Aug	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	7'409	1'168	9'542	469	19.0	352	2.96	13.17
																						15'078	1'757	16'290	151	22.0	627	-0.46	5.75
																						11'626	1'615	14'542	747	25.1	518	-0.22	12.48
		80	Aug	Aug	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	16'687	2'039	17'437	187	26.9	675	-0.53	6.18	
																					12'209	1'836	15'343	855	30.1	538	1.33	14.34	
																					12'209	1'836	15'343	855	30.1	538	1.33	14.34	
HK		Mais	WZK	SZK	GD	BR	110	Mai	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	33'100	3'177	30'632	315	64.5	1428	4.01	93.74	
																					21'977	2'740	25'457	941	111.9	1043	12.17	66.13	
																					33'100	3'023	30'394	314	33.4	1428	4.01	93.74	
	WZK		SZK	GD	BR	110	Mai	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	21'977	2'561	25'179	940	75.5	1043	12.17	66.13
																						33'100	3'051	30'438	314	39.1	1428	4.01	93.74
																						21'977	2'593	25'230	940	82.2	1043	12.17	66.13
	WZK	SZK	GD	BR	110	Mai	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	33'100	2'983	30'332	314	25.2	1428	4.01	93.74	
																					21'977	2'515	25'109	940	66.3	1043	12.17	66.13	
																					21'977	2'515	25'109	940	66.3	1043	12.17	66.13	

NEE = Bedarf an nicht erneuerbarer Energie, THG = Treibhausgasausstoss, Htox = Humantoxizität, terr. = terrestrische, aq. = aquatische, S = Anzahl Nutzungen, N = Stickstoffdüngung in kg pro ha, M = Aussaat, D = Düngerart, GD = Gründüngung, BR = Brache, W(S)ZK = Winter- (Sommer-) Zwischenkultur

Tabelle 18: Umweltwirkungen der Sommerzwischenkulturen pro MJ UE

		S	N	M	D	NEE	THG	Ozonbildung	Versauerung	Eutrophierung	Htox	terr. Ökotoxizität	aq. Ökotoxizität
						MJ Äq.	kg CO2 Äq.	m2.ppm.h	m2	kg N	kg 1,4-DB Äq.	kg 1,4-DB Äq.	kg 1,4-DB Äq.
SZK	Phacelia	1	40	Aug	G	0.321	0.033	0.333	0.0033	0.00044	0.0138	-9.0E-07	1.3E-04
				Aug	M	0.247	0.030	0.302	0.0140	0.00050	0.0116	1.1E-04	3.6E-04
				Aug	G	0.597	0.069	0.650	0.0070	0.00132	0.0277	-1.3E-06	2.8E-04
		60	Aug	G	0.436	0.062	0.583	0.0265	0.00162	0.0230	2.8E-04	8.4E-04	
			Sep	G	0.338	0.039	0.335	0.0041	0.00048	0.0139	-4.1E-07	1.4E-04	
			Sep	M	0.240	0.034	0.296	0.0166	0.00053	0.0111	1.7E-04	4.0E-04	
	Senf	1	20	Aug	G	0.634	0.083	0.658	0.0088	0.00186	0.0280	2.9E-07	3.1E-04
				Aug	M	0.418	0.072	0.573	0.0314	0.00214	0.0218	4.1E-04	9.3E-04
				Aug	G	0.264	0.023	0.282	0.0021	0.00033	0.0113	-6.5E-06	9.9E-05
		60	Aug	G	0.227	0.022	0.264	0.0092	0.00038	0.0101	2.5E-05	2.6E-04	
			Sep	G	0.378	0.035	0.421	0.0033	0.00049	0.0173	-1.1E-05	1.6E-04	
			Sep	M	0.317	0.033	0.391	0.0132	0.00058	0.0154	6.2E-05	4.4E-04	
	SM101	1	0	Aug	G	0.300	0.033	0.291	0.0036	0.00041	0.0118	-4.9E-06	1.2E-04
				Aug	M	0.216	0.029	0.258	0.0144	0.00046	0.0094	1.3E-04	3.4E-04
				Aug	G	0.437	0.053	0.437	0.0058	0.00076	0.0182	-7.3E-06	2.0E-04
		30	Aug	G	0.298	0.046	0.382	0.0205	0.00094	0.0141	2.4E-04	5.9E-04	
			Aug	M	0.244	0.019	0.292	0.0012	0.00006	0.0123	1.5E-05	6.6E-04	
			Aug	G	0.244	0.019	0.292	0.0012	0.00006	0.0123	1.5E-05	6.6E-04	
	SM106	1	0	Aug	G	0.290	0.029	0.316	0.0028	0.00010	0.0132	1.2E-05	6.0E-04
				Aug	M	0.235	0.028	0.292	0.0118	0.00027	0.0115	1.6E-05	7.7E-04
				Aug	G	0.329	0.030	0.410	0.0014	0.00001	0.0169	-6.2E-06	1.7E-04
		2	30	Aug	G	0.329	0.030	0.410	0.0014	0.00001	0.0169	-6.2E-06	1.7E-04
				Aug	M	0.400	0.047	0.450	0.0039	0.00042	0.0184	-5.7E-06	2.1E-04
				Aug	G	0.317	0.045	0.414	0.0175	0.00068	0.0159	5.5E-05	5.1E-04
2	60	Aug	G	0.299	0.034	0.344	0.0026	0.00001	0.0134	-7.6E-06	1.4E-04		
		Aug	M	0.247	0.033	0.316	0.0135	0.00015	0.0117	-1.1E-05	2.9E-04		
		Aug	G	0.315	0.041	0.339	0.0036	0.00033	0.0133	-7.8E-06	1.4E-04		
Soblu	1	20	Aug	G	0.231	0.037	0.301	0.0162	0.00047	0.0108	5.9E-05	3.4E-04	
			Aug	M	0.256	0.022	0.274	0.0019	0.00011	0.0105	1.6E-06	1.0E-04	
			Aug	G	0.223	0.020	0.257	0.0090	0.00014	0.0095	3.2E-05	2.6E-04	
30	60	Aug	G	0.267	0.024	0.276	0.0024	0.00011	0.0107	1.6E-06	1.1E-04		
		Aug	M	0.219	0.022	0.255	0.0104	0.00014	0.0093	6.0E-05	2.8E-04		
		Aug	G										

NEE = Bedarf an nicht erneuerbarer Energie, THG = Treibhausgasausstoss, Htox = Humantoxizität, terr. = terrestrische, aq. = aquatische, S = Anzahl Nutzungen, N = Stickstoffdüngung in kg pro ha, M = Aussaat, D = Düngerart

Tabelle 20: Umweltwirkungen des aus Sommerzwischenkulturen hergestellten Stromes pro kWh unter Berücksichtigung der Gutschrift für den Ersatz der Gründung.

		S	N	M	D	NEE	THG	Ozonbildung	Versauerung	Eutrophierung	Htox	terr. Ökotoxizität	aq. Ökotoxizität
						MJ Äq.	kg CO2 Äq.	m2.ppm.h	m2	kg N	kg 1,4-DB Äq.	kg 1,4-DB Äq.	kg 1,4-DB Äq.
SZK	Phacelia	1	40	Aug	G	2.31	0.31	5.22	0.073	0.0032	0.075	4.5E-05	8.2E-04
				Aug	M	1.95	0.29	5.09	0.112	0.0033	0.065	4.9E-04	1.1E-03
				Aug	G	3.18	0.31	5.86	0.088	0.0107	0.112	9.4E-05	1.3E-03
		60	Aug	G	2.37	0.26	5.59	0.131	0.0127	0.089	1.5E-03	2.4E-03	
			Sep	G	2.65	0.39	5.44	0.083	0.0038	0.085	4.7E-05	1.0E-03	
			Sep	M	1.98	0.35	5.22	0.149	0.0039	0.067	1.2E-03	1.8E-03	
	Senf	1	20	Aug	G	3.92	0.51	6.39	0.111	0.0168	0.133	1.0E-04	1.8E-03
				Aug	M	2.44	0.43	5.91	0.203	0.0187	0.093	3.0E-03	4.0E-03
				Aug	G	1.81	0.22	4.81	0.061	0.0022	0.055	-1.7E-05	5.5E-04
		60	Aug	G	1.81	0.22	4.81	0.067	0.0022	0.055	-3.5E-04	1.4E-04	
			Sep	G	1.96	0.15	4.89	0.061	0.0030	0.061	-3.3E-05	6.1E-04	
			Sep	M	1.96	0.15	4.89	0.051	0.0031	0.061	-3.7E-04	2.0E-04	
	SM101	1	0	Aug	G	2.47	0.37	5.26	0.080	0.0033	0.075	-6.7E-06	9.4E-04
				Aug	M	1.89	0.34	5.07	0.137	0.0034	0.059	9.0E-04	1.5E-03
				Aug	G	3.04	0.42	5.65	0.094	0.0062	0.094	-9.9E-06	1.3E-03
		30	Aug	G	2.09	0.37	5.33	0.153	0.0074	0.068	1.7E-03	2.6E-03	
			Aug	M	1.43	0.26	4.66	0.061	-0.0002	0.051	1.5E-04	4.4E-03	
			Aug	G	1.70	0.26	4.91	0.062	0.0000	0.062	1.9E-04	5.8E-03	
	SM106	1	0	Aug	G	1.50	0.27	4.66	0.064	-0.0002	0.053	1.2E-04	3.8E-03
				Aug	M	1.39	0.26	4.63	0.078	0.0006	0.049	-2.9E-04	3.6E-03
				Aug	G	1.61	0.27	4.86	0.060	-0.0009	0.057	2.8E-05	1.0E-03
		30	Aug	G	1.95	0.28	5.19	0.061	-0.0008	0.069	3.4E-05	1.2E-03	
			Aug	M	1.74	0.29	4.88	0.066	0.0015	0.060	1.3E-05	9.6E-04	
			Aug	G	1.56	0.29	4.83	0.088	0.0028	0.055	-2.4E-04	9.1E-04	
2	30	Aug	G	1.72	0.32	5.04	0.064	-0.0007	0.063	-1.7E-05	7.9E-04		
		Aug	M	1.60	0.32	4.96	0.097	-0.0001	0.058	-4.3E-04	6.3E-04		
		Aug	G	1.96	0.39	5.17	0.072	0.0016	0.069	-2.1E-05	9.0E-04		
Soblu	1	20	Aug	G	1.58	0.38	5.02	0.123	0.0024	0.057	9.2E-05	1.2E-03	
			Aug	M	1.77	0.20	4.77	0.060	-0.0001	0.048	6.9E-05	6.1E-04	
			Aug	G	1.79	0.20	4.78	0.066	-0.0003	0.050	-2.6E-04	1.9E-04	
30	Aug	G	1.95	0.25	4.90	0.065	-0.0001	0.054	6.7E-05	7.2E-04			
	Aug	M	1.81	0.24	4.85	0.085	-0.0003	0.051	6.8E-05	6.2E-04			
	Aug	G											

NEE = Bedarf an nicht erneuerbarer Energie, THG = Treibhausgasausstoss, Htox = Humantoxizität, terr. = terrestrische, aq. = aquatische, S = Anzahl Nutzungen, N = Stickstoffdüngung in kg pro ha, M = Aussaat, D = Düngerart

Tabelle 22 Umweltwirkungen des aus Sommerzwischenkulturen hergestellten Stromes pro kWh ohne Berücksichtigung der Gutschrift für den Ersatz der Gründung.

				S	N	M	D	NEE	THG	Ozonbildung	Versauerung	Eutrophierung	Htox	terr. Ökotoxizität	aq. Ökotoxizität
								MJ Äq.	kg CO2 Äq.	m2.ppm.h	m2	kg N	kg 1,4-DB Äq.	kg 1,4-DB Äq.	kg 1,4-DB Äq.
SZK	Phacelia	1	40	Aug	G	M		4.04	0.62	7.48	0.092	0.0048	0.168	2.0E-06	1.7E-03
				Sep	G	M		3.26	0.58	7.16	0.206	0.0054	0.188	1.5E-03	5.6E-03
				Aug	G	M		6.98	1.00	10.86	0.132	0.0142	0.317	-1.8E-06	3.3E-03
		60	Aug	G	M		5.26	0.92	10.14	0.339	0.0173	0.351	4.0E-03	1.2E-02	
			Sep	G	M		4.21	0.67	7.50	0.101	0.0052	0.170	7.2E-06	1.8E-03	
			Aug	G	M		3.17	0.62	7.09	0.234	0.0058	0.181	2.4E-03	6.1E-03	
	Senf	1	20	Aug	G	M		7.37	1.14	10.94	0.151	0.0199	0.320	1.5E-05	3.6E-03
				Sep	G	M		5.07	1.03	10.04	0.391	0.0228	0.334	5.9E-03	1.4E-02
				Aug	G	M		3.43	0.51	6.94	0.079	0.0036	0.142	-5.8E-05	1.4E-03
		60	Aug	G	M		3.04	0.50	6.75	0.155	0.0042	0.167	3.7E-04	4.0E-03	
			Sep	G	M		4.64	0.64	8.42	0.092	0.0054	0.206	-1.0E-04	2.0E-03	
			Aug	G	M		4.00	0.61	8.10	0.197	0.0063	0.242	9.0E-04	6.7E-03	
	SM101	1	0	Aug	G	M		3.81	0.62	7.03	0.096	0.0045	0.148	-4.1E-05	1.6E-03
				Sep	G	M		2.92	0.57	6.68	0.210	0.0050	0.156	1.9E-03	5.2E-03
				Aug	G	M		5.28	0.83	8.59	0.119	0.0082	0.215	-6.6E-05	2.5E-03
		30	Aug	G	M		3.79	0.75	8.01	0.275	0.0101	0.224	3.5E-03	8.8E-03	
			Sep	G	M		2.25	0.39	5.88	0.065	0.0005	0.104	1.1E-04	4.8E-03	
			Aug	G	M		2.25	0.39	5.88	0.065	0.0005	0.132	1.4E-04	6.3E-03	
	SM106	1	0	Aug	G	M		2.55	0.46	6.04	0.076	0.0008	0.110	9.4E-05	4.3E-03
				Sep	G	M		2.19	0.45	5.89	0.136	0.0019	0.125	1.6E-04	7.3E-03
				Aug	G	M		2.89	0.47	6.77	0.067	0.0002	0.138	-3.1E-05	1.5E-03
		30	Aug	G	M		2.89	0.47	6.77	0.067	0.0002	0.179	-4.6E-05	1.9E-03	
			Sep	G	M		3.38	0.59	7.04	0.084	0.0030	0.149	-2.8E-05	1.8E-03	
			Aug	G	M		2.81	0.57	6.80	0.177	0.0048	0.169	5.2E-04	5.1E-03	
2	30	Aug	G	M		2.69	0.50	6.31	0.075	0.0002	0.115	-4.1E-05	1.3E-03		
		Sep	G	M		2.33	0.49	6.12	0.150	0.0011	0.131	-8.6E-05	3.1E-03		
		Aug	G	M		2.79	0.55	6.27	0.082	0.0024	0.114	-4.2E-05	1.3E-03		
Soblu	1	20	Aug	G	M		2.21	0.52	6.02	0.169	0.0034	0.122	5.6E-04	3.5E-03	
			Sep	G	M		3.35	0.49	6.86	0.078	0.0013	0.134	2.9E-05	1.4E-03	
			Aug	G	M		3.00	0.48	6.68	0.153	0.0016	0.159	4.7E-04	4.0E-03	
30	30	Aug	G	M		3.46	0.52	6.89	0.082	0.0013	0.136	2.9E-05	1.5E-03		
		Sep	G	M		2.96	0.50	6.66	0.168	0.0016	0.156	8.8E-04	4.4E-03		

NEE = Bedarf an nicht erneuerbarer Energie, THG = Treibhausgasausstoss, Htox = Humantoxizität, terr. = terrestrische, aq. = aquatische, S = Anzahl Nutzungen, N = Stickstoffdüngung in kg pro ha, M = Aussaat, D = Düngerart

Tabelle 23: Umweltwirkungen des aus Winterzwischenkulturen bzw. Mais hergestellten Stromes pro kWh unter Berücksichtigung der Gutschrift für den Ersatz der Gründüngung.

								NEE	THG	Ozonbildung	Versauerung	Eutrophierung	Htox	terr. Ökotoxizität	aq. Ökotoxizität			
								MJ Äq.	kg CO2 Äq.	m2.ppm.h	m2	kg N	kg 1,4-DB	kg 1,4-DB Äq.	kg 1,4-DB Äq.			
WZK	Raigras	1	S	N	M	D		2.35	0.45	5.74	0.075	0.0028	0.096	-9.4E-05	1.2E-03			
								1.97	0.44	5.58	0.121	0.0034	0.106	1.1E-04	2.9E-03			
			3	40	Sep					2.43	0.48	5.74	0.079	0.0025	0.096	-9.5E-05	1.2E-03	
										1.92	0.45	5.53	0.133	0.0030	0.102	4.9E-04	3.1E-03	
				60	Aug	Sep					2.15	0.44	5.57	0.072	0.0022	0.085	-1.0E-04	9.2E-04
											1.81	0.42	5.39	0.131	0.0023	0.092	-7.8E-05	2.0E-03
		80			Aug						2.15	0.44	5.51	0.074	0.0024	0.083	-1.1E-04	9.0E-04
											1.75	0.43	5.32	0.133	0.0024	0.088	9.7E-05	2.0E-03
		SM200	1	40	Sep				2.62	0.49	6.06	0.078	0.0035	0.109	-4.2E-05	1.3E-03		
									2.16	0.47	5.86	0.134	0.0041	0.120	2.6E-04	3.5E-03		
				60	Aug	Sep					2.80	0.53	6.14	0.084	0.0033	0.113	-4.1E-05	1.4E-03
											2.15	0.50	5.89	0.152	0.0040	0.119	8.2E-04	4.0E-03
	80				Aug						2.45	0.48	5.93	0.076	0.0030	0.099	-4.9E-05	1.1E-03
											2.02	0.46	5.71	0.149	0.0033	0.107	9.8E-05	2.5E-03
	3		60	Aug	Aug				2.46	0.49	5.87	0.078	0.0032	0.097	-5.1E-05	1.1E-03		
									1.96	0.47	5.64	0.153	0.0036	0.102	3.4E-04	2.6E-03		
			80	Aug						2.68	0.51	6.14	0.079	0.0037	0.112	-2.9E-05	1.3E-03	
										2.19	0.48	5.94	0.138	0.0044	0.123	3.3E-04	3.7E-03	
				60	Sep						2.78	0.53	6.14	0.084	0.0033	0.112	-2.9E-05	1.4E-03
											2.13	0.50	5.88	0.153	0.0040	0.118	8.2E-04	4.0E-03
	3	60	Aug	Aug				2.29	0.46	5.74	0.074	0.0025	0.091	-4.0E-05	9.8E-04			
								1.91	0.44	5.55	0.140	0.0029	0.099	-2.1E-05	2.2E-03			
		80	Aug						2.30	0.47	5.69	0.076	0.0028	0.090	-4.2E-05	9.7E-04		
									1.85	0.45	5.48	0.143	0.0031	0.095	1.9E-04	2.3E-03		
60			Aug						2.02	0.40	5.23	0.070	0.0028	1.209	3.4E-03	7.9E-02		
									1.55	0.38	5.01	0.097	0.0048	0.871	4.2E-03	4.8E-02		
HK	Mais	WZ	SZK	GD	BR	110	Mai	2.02	0.39	5.22	0.070	0.0015	1.209	3.4E-03	7.9E-02			
								1.55	0.37	5.00	0.097	0.0033	0.854	4.2E-03	4.8E-02			
								2.02	0.39	5.22	0.070	0.0018	1.209	3.4E-03	7.9E-02			
		K	G	M	G	M	G	M	G	1.55	0.37	5.00	0.097	0.0036	0.854	4.2E-03	4.8E-02	
										2.02	0.39	5.22	0.070	0.0012	1.209	3.4E-03	7.9E-02	
										1.55	0.37	5.00	0.097	0.0029	0.854	4.2E-03	4.8E-02	

NEE = Bedarf an nicht erneuerbarer Energie, THG = Treibhausgasausstoss, Htox = Humantoxizität, terr. = terrestrische, aq. = aquatische, S = Anzahl Nutzungen, N = Stickstoffdüngung in kg pro ha, M = Aussaat, D = Düngerart, GD = Gründüngung, BR = Brache, W(S)ZK = Winter- (Sommer-) Zwischenkultur

Tabelle 24: Erträge und Inhaltsstoffe sowie Biogas- und potentieller Stromertrag von Mais und den Zwischenkulturen.

		S	N	M	Ertrag	Verluste	Nettoertrag	Ant. Leg.	MJ UE		Rohprotein		Biogasertrag		Stromertrag
					kg TS pro ha		kg TS pro ha		pro kg TS	pro ha	g pro kg TS	kg pro ha	l pro kg TS	m3 pro ha	kWh pro ha
SZK	Phace	1	40	Aug	3'440	10%	3'096		9.6	29'722	165	511	336	1'039	2'078
				Sep	1'560	10%	1'404		9.6	13'478	165	232	336	471	942
		60	Aug	3'784	10%	3'406		9.6	32'698	165	562	336	1'143	2'286	
			Sep	1'716	10%	1'544		9.6	14'822	165	255	336	518	1'036	
	Senf	1	20	Aug	3'670	10%	3'303		9.6	31'709	165	545	336	1'108	2'216
				Sep	2'210	10%	1'989		9.6	19'094	165	328	336	667	1'334
		1	40	Aug	4'404	10%	3'964		9.6	38'054	165	654	336	1'330	2'660
				Sep	2'652	10%	2'387		9.6	22'915	165	394	336	801	1'602
	SM101	1	0	Aug	2'729	10%	2'456	43%	10.52	25'837	260	639	588	1'444	2'888
				30 Aug	3'210	10%	2'889	43%	10.52	30'392	260	751	588	1'699	3'398
	SM106	1	0	Aug	1'844	10%	1'660	45%	10.34	17'165	156	259	588	976	1'952
				30 Aug	2'170	10%	1'953	45%	10.34	20'194	156	305	588	1'148	2'296
2		30	Aug	3'700	10%	3'330	45%	10.34	34'432	156	519	588	1'958	3'916	
			60 Aug	4'255	10%	3'830	45%	10.34	39'602	156	597	588	2'252	4'504	
Soblu	1	20	Aug	3'740	10%	3'366		9.6	32'314	165	555	335	1'128	2'256	
			30 Aug	3'927	10%	3'534		9.6	33'926	165	583	335	1'184	2'368	
			40 Sep	4'000	10%	3'600		9.65	34'740	115	414	585	2'106	4'212	
WZK	Raigras	1	60	Sep	4'000	10%	3'600		9.65	38'214	115	455	585	2'317	4'634
				Aug	4'400	10%	3'960		9.65	38'214	115	455	585	2'317	4'634
		3	60	Aug	7'200	10%	6'480		9.65	62'532	115	745	585	3'791	7'582
				80 Aug	8'000	10%	7'200		9.65	69'480	115	828	585	4'212	8'424
	SM200	1	40	Sep	3'486	10%	3'137	43%	10.34	32'437	156	489	558	1'750	3'500
				60 Sep	3'652	10%	3'287	43%	10.34	33'988	156	513	558	1'834	3'668
		3	60	Aug	6'000	10%	5'400	43%	10.34	55'836	156	842	558	3'013	6'026
				80 Aug	6'600	10%	5'940	43%	10.34	61'420	156	927	558	3'315	6'630
	SM210	1	40	Sep	3'308	10%	2'977	46%	10.34	30'782	156	464	558	1'661	3'322
				60 Sep	3'638	10%	3'274	46%	10.34	33'853	156	511	558	1'827	3'654
		3	60	Aug	7'370	10%	6'633	46%	10.34	68'585	156	1035	558	3'701	7'402
				80 Aug	6'700	10%	6'030	46%	10.34	62'350	156	941	558	3'365	6'730
HK	Mais	1	110	Mai	17'986	10%	16'187		11.08	179'352	73	1182	575	8'842	17'685

S = Anzahl Nutzungen, N = Stickstoffdüngung in kg pro ha, M = Aussaat, Ant. Leg. = Anteil Leguminosen