

59

Berichte aus dem TFZ

Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapserzeugung in Bayern



Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapserzeugung in Bayern



Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapserzeugung in Bayern

Dr.-Ing. Daniela Dressler
Rita Haas
Dr. Edgar Remmele

Berichte aus dem TFZ 59

Straubing, Oktober 2018

Titel: Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Raps-erzeugung in Bayern
Autoren: Dr.-Ing. Daniela Dressler, Rita Haas, Dr. Edgar Remmele
Projektleiter: Dr. Edgar Remmele

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen KS/16/11 gefördert. Projektlaufzeit: 01.01.2017 bis 31.03.2018. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2018
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil < 1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Dr.-Ing. Daniela Dressler, Dr. Edgar Remmele, Ulrich Eidenschink, Ulrike Ammer
Verlag: Eigenverlag, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2018
Gestaltung: Dr.-Ing. Daniela Dressler

Fotonachweis: Technologie- und Förderzentrum (Ulrich Eidenschink)

Vorwort

Unser Dank gilt dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung des Projektes „Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapserzeugung in Bayern“. Insbesondere möchten wir uns bei Herrn Dr.-Ing. Werner Ortinger und Herrn Dr. Wolfram Schaecke für das entgegengebrachte Vertrauen und die sehr gute Zusammenarbeit bedanken.

Weiterhin danken wir dem Bayerischen Bauernverband, dem Landeskuratorium für pflanzliche Erzeugung, den Erzeugergemeinschaften Qualitätsraps und pflanzliche Produkte sowie dem Erzeugerring für Pflanzenbau Niederbayern für ihre Mithilfe bei der Suche nach interessierten Landwirten und für die Diskussion der Ergebnisse. Unser besonderer Dank gilt hierbei Herrn Florian Botzler und Herrn Hans Lohr. Den teilnehmenden Landwirten und Ölmühlenbetreibern danken wir für ihre Bereitschaft und Unterstützung bei der Erhebung der spezifischen Aktivitätsdaten. Der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen danken wir für die hilfreichen Anregungen sowie für die Unterstützung bei der Verbreitung der Forschungsergebnisse.

Bei dem Vorhaben „Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapserzeugung in Bayern“ handelt es sich um eine vertiefende Fortführung der Untersuchungen zum Thema „Rapserzeugung und dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion“ aus dem Forschungsvorhaben „Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie in Bayern (ExpRess-Bio)“. Die Ergebnisse dieses Vorgängerprojektes sind unter anderem als TFZ-Berichte 45 und 50 sowie als TFZ Wissen Nr. 4 veröffentlicht.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis.....	13
Formelzeichen und Abkürzungen	17
1 Einleitung.....	19
1.1 Ausgangssituation.....	19
1.2 Problemstellung.....	19
1.3 Zielstellung.....	20
2 Stand des Wissens.....	21
2.1 Rapserzeugung und Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern.....	21
2.2 Ökologische Bewertung der Rapserzeugung.....	22
2.3 ExpResBio-Methoden	25
2.4 Nährstoffmanagement im Rapsanbau.....	31
2.4.1 Düngempfehlungen für Bayern nach Düngeverordnung (2007)	31
2.4.2 Änderungen der Vorgaben zum Nährstoffmanagement nach DüV (2017)	35
3 Material und methodische Vorgehensweise	39
3.1 Identifikation von Hotspot-Regionen	39
3.2 Standortparameter Klima und Boden.....	43
3.3 Durchführung von Betriebsumfragen zur Rapserzeugung	45
3.4 Durchführung von Betriebsumfragen zur dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion	45
3.5 Ökologische Bewertung nach den ExpResBio-Methoden.....	46
3.5.1 Zieldefinition.....	46
3.5.2 Systemdarstellung und Systemgrenzen.....	46
3.5.3 Bezugsgrößen/funktionelle Einheiten.....	48
3.5.4 Beschreibung des Produktsystems.....	48
3.5.5 Datenqualität und Datenherkunft	51
3.5.6 Umgang mit Koppelprodukten.....	53
3.5.7 Indikatorenberechnung	54
4 Ergebnisse der spezifische Datenerhebung und Stoffstromanalyse	55
4.1 Spezifische Datenerhebung und Stoffstromanalyse der Rapserzeugung.....	55
4.1.1 Natürliche Standortbedingungen, Betriebsstruktur und Rapsertrag	55
4.1.2 N ₂ O-Feldemissionen	57
4.1.3 Arbeitsverfahren.....	58
4.1.4 Pflanzenschutz und Unkrautregulierung	60

4.1.5	Nährstoffmanagement.....	61
4.2	Spezifische Datenerhebung und Stoffstromanalyse der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion	68
4.3	Bilanzierungs- und Bewertungsmodell	70
5	Ergebnisse der ökologischen Bewertung	77
5.1	Ökologische Bewertung der Rapserzeugung	77
5.1.1	Einzelbetriebliche und regionalspezifische Treibhausgasemissionen.....	77
5.1.2	Einzelbetriebliche und regionalspezifische Stickstoffbilanzen	84
5.1.3	Sensitivitätsanalyse: Optimierung der N-Salden und THG-Emissionen im Rapsanbau durch Umsetzung der Düngeverordnung 2017.....	89
5.2	Ökologische Bewertung der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion	97
6	Diskussion	101
6.1	Beurteilung der Ergebnisse in Bezug auf die Datenqualität	101
6.2	Weitere Einordnung der Ergebnisse in den wissenschaftlichen Kontext.....	105
7	Handlungsempfehlungen	107
	Zusammenfassung	109
	Abstract	115
	Quellenverzeichnis	117
	Anhang I: Klimadaten der untersuchten Boden-Klima-Räume.....	123
	Anhang II: Fragebogen zur Erfassung des Nährstoffmanagements.....	129
	Anhang III: Gewichtungsfaktoren zur regionalspezifischen Auswertung der THG-Emissionen	133

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen.....	28
Abbildung 2:	Grafische Ergebnisdarstellung (beispielhaft) für ein Produktsystem aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen am Beispiel der Wirkungskategorie „Globale Erwärmung“ mit dem Wirkungsindikator CO ₂ -Äquivalente in g MJ ⁻¹	29
Abbildung 3:	Ableitung des Stickstoffbedarfs bei eigener Untersuchung der im Boden verfügbaren Stickstoffmenge N _{min} [13]	33
Abbildung 4:	Rapsanbaufläche in Bayern auf Landkreisebene, eigene Darstellung in CADENZA [®] [19] auf Basis von InVeKoS-Daten [8].....	39
Abbildung 5:	Anteil des Rapsanbaus an der ackerbaulichen Fläche in Bayern auf Landkreisebene, eigene Darstellung in CADENZA [®] [19] auf Basis von InVeKoS-Daten [8].....	40
Abbildung 6:	Boden-Klima-Räume in Bayern [45]	42
Abbildung 7:	Mittlere Bodenwertzahlen der Landkreise in Bayern, eigene Darstellung in CADENZA [®] [19] auf Basis von Daten des Julius-Kühn-Institutes	44
Abbildung 8:	Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung.....	47
Abbildung 9:	Verteilung der Raps-Praxisbetriebe in Bayern.....	52
Abbildung 10:	Relative Anteile der verwendeten N-Mineraldünger bezogen auf die eingesetzte N-Menge in Summe aller untersuchten Betriebe und Erntejahre.....	66
Abbildung 11:	GaBi-Bilanzierungsmodell für die Rapserzeugung (Basis-Modell)	72
Abbildung 12:	GaBi-Bilanzierungsmodell für die Arbeitsprozesse der Rapserzeugung am Beispiel einer pfluglosen, konservierenden Bearbeitung auf leichtem Boden	73
Abbildung 13:	GaBi-Bilanzierungsmodell für die Rapserzeugung für den Betrieb F9 im Boden-Klima-Raum „Nordwestbayern-Franken“ für das Erntejahr 2016.....	74
Abbildung 14:	GaBi-Bilanzierungsmodell für den Transport der Rapssaat zur Ölmühle mit Traktor und Doppelzug (Basis-Modell)	75
Abbildung 15:	GaBi-Bilanzierungsmodell für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion am Beispiel der Ölmühle im Boden-Klima-Raum „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“	76

Abbildung 16: Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO ₂ -Äquivalente, Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016, gegliedert nach Boden-Klima-Raum	77
Abbildung 17: Regionalspezifische THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO ₂ -Äquivalente, Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016, aufgegliedert nach Boden-Klima-Raum sowie als gewichtetes Mittel für Bayern.....	81
Abbildung 18: Einzelbetriebliche Stickstoffsalden als Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016 und als MIN- und MAX-Werte im Vergleich zu den Kontrollwerten für den maximal zulässigen N-Überschuss	86
Abbildung 19: Einzelbetriebliche Darstellung der im Herbst 2015 ausgebrachten Mengen an Gesamtstickstoff, unterteilt in organischen und mineralischen Anteil (Erntejahr 2016)	88
Abbildung 20: Einzelbetriebliche Darstellung der im Herbst 2015 ausgebrachten Menge an Ammoniumstickstoff (Erntejahr 2016)	88
Abbildung 21: Optimierte Stickstoffdüngung bei der Rapserzeugung in ausgewählten Betrieben nach den Vorgaben der DüV (2017) [12] im Vergleich zum Status quo des Erntejahres 2016	92
Abbildung 22: Optimierte Stickstoffbilanzen bei der Rapserzeugung in ausgesuchten Betrieben nach den Vorgaben der DüV (2017) [12] im Vergleich zum Status quo der Erntejahre 2013–2016	92
Abbildung 23: Optimierte THG-Bilanzen der Rapserzeugung ausgewählter Betriebe nach den Vorgaben der DüV (2017) [12] im Vergleich zum Status quo (gewichtete Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016).....	93
Abbildung 24: Optimierte THG-Bilanzen der Rapserzeugung in Bayern (Modellbetriebe der unterschiedlichen Boden-Klima-Räume im Vergleich zum Status quo der Erntejahre 2013–2016)	97
Abbildung 25: Regionalspezifische THG-Emissionen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung als CO ₂ -Äquivalente im Vergleich zum fossilen Referenzwert, Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016, aufgegliedert nach Boden-Klima-Raum sowie als gewichtetes Mittel für Bayern.....	98
Abbildung 26: THG-Emissionen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung in Bayern als CO ₂ -Äquivalente im Vergleich zum fossilen Referenzwert und den RED-Standardwerten (EU-RED I und Entwurf der EU-RED II) für reines Rapsöl aus industrieller Ölgewinnung.....	99
Abbildung 27: Einfluss des Emissionsfaktors zur Berechnung der N ₂ O-Feldemissionen auf die THG-Emissionen der Rapserzeugung in Bayern	104
Abbildung 28: Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO ₂ -Äquivalente, Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016, gegliedert nach Boden-Klima-Raum	111
Abbildung 29: THG-Emissionen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung in Bayern als CO ₂ -Äquivalente im Vergleich zum fossilen	

Referenzwert und den RED-Standardwerten (EU-RED I und Entwurf der EU-RED II) für reines Rapsöl aus industrieller Ölgewinnung	113
--	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Disaggregierte Ergebnisdarstellung entsprechend dem Schema der Systemdarstellung.....	30
Tabelle 2:	N _{min} -Gehalte für den Anbau von Winterraps als Mittelwerte der Regierungsbezirke Bayerns und für Gesamtbayern ohne Unterscheidung nach Vorfrüchten, Bodenart oder Viehhaltung	32
Tabelle 3:	Durchschnittliche Düngeempfehlungen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft LfL unter Berücksichtigung des jahresspezifischen N _{min}	32
Tabelle 4:	N-Düngebedarfsermittlung für Acker ohne eigene N _{min} -Untersuchung, nach der Düngeempfehlung der LfL, Stand 2012 [53]	34
Tabelle 5:	Beispiel einer Düngebedarfsermittlung am Beispiel der Rapsrerzeugung nach Düngeempfehlung LfL 2018 [54][12].....	36
Tabelle 6:	Erntemengen Winterraps sortiert nach Landkreisen mit einem Anteil von mehr als 2 Gew.-% an der bayerischen Gesamternte von 428.558 t im Erntejahr 2014	41
Tabelle 7:	Hotspot-Landkreise in neu zu erhebenden Boden-Klima-Räumen.....	43
Tabelle 8:	Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“	43
Tabelle 9:	Natürliche Standortbedingungen und Betriebsstruktur der teilnehmenden landwirtschaftlichen Praxisbetriebe	56
Tabelle 10:	Emissionsfaktoren (EF) in kg N ₂ O-N und relative Anteile der N-Verluste durch Oberflächenabfluss/Auswaschung bzw. Ausgasung (Frac) in % nach IPCC [33].....	57
Tabelle 11:	Dieselbedarf sowie Maschinen- und Geräteeinsatz der Arbeitsverfahren, wendend mit Pflug, Boden schwer, ohne Einsatz von Wirtschaftsdüngern.....	58
Tabelle 12:	Dieselbedarf sowie Maschinen- und Geräteeinsatz der Arbeitsverfahren, konservierende pfluglose Bearbeitung, Boden leicht mit Einsatz von Wirtschaftsdüngern	59
Tabelle 13:	Durchschnittliche Pflanzenschutzmaßnahmen bei der Rapsrerzeugung, Anwendung, Wirkstoffgruppe und Wirkstoffgehalte auf Basis von [21][6].....	60
Tabelle 14:	Zuordnung der eingesetzten Pflanzenschutzmittel [V7] zu Datenbankprozessen von ecoinvent 3.3 auf Basis von [21][6]	61
Tabelle 15:	Regionalspezifische Auswertung der mineralischen und organischen Stickstoffdüngung sowie des Rapsrertrages aufgeteilt nach Boden-Klima-Raum	62

Tabelle 16:	Betriebsspezifische Auswertung der mineralischen und organischen Stickstoffdüngung bezogen auf das Erntejahr 2016 mit ihren Anteilen an der Gesamt-Stickstoffdüngung.....	63
Tabelle 17:	Zusammensetzung einer Auswahl von N-Düngern nach Stickstoffform.....	65
Tabelle 18:	Relative Anteile der verwendeten N-Mineraldünger für alle untersuchten Betriebe, aufgeteilt nach Erntejahr	67
Tabelle 19:	Relative Anteile der verwendeten N-Mineraldünger in Summe aller Erntejahre aufgeteilt nach Boden-Klima-Raum.....	68
Tabelle 20:	Eingangsdaten der Rapsölkraftstoffproduktion für die drei untersuchten dezentralen Ölmühlen, Verarbeitungsjahre 2013–2017	68
Tabelle 21:	Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO ₂ -Äquivalente sowie relativer Anteile der bilanzierten Prozesse (Minimum-, Maximum- und Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016).....	79
Tabelle 22:	Regionalspezifische THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO ₂ -Äquivalente sowie relativer Anteil der bilanzierten Prozesse aufgegliedert nach Boden-Klima-Raum sowie als gewichtetes Mittel für Bayern.....	82
Tabelle 23:	Regionalspezifische Auswertung des Stickstoffbedarfs und des Stickstoffeinsatzes für die Rapserzeugung, aufgegliedert nach Boden-Klima-Raum	85
Tabelle 24:	Optimierung der Stickstoffdüngung nach den Vorgaben der DüV (2017)	90
Tabelle 25:	Anpassung der N-Mineraldüngung aufgrund der optimierten bedarfsgerechten organischen Düngung nach den Vorgaben der DüV (2017) [12]	94
Tabelle 26:	Düngebedarfsermittlung für die Rapserzeugung der Modellbetriebe in den untersuchten Boden-Klima-Räumen nach Düngeempfehlung der LfL [54]	96
Tabelle 27:	THG- Emissionsfaktoren der Mineraldüngerproduktion, bezogen auf 1 kg Stickstoff [49][27]	102
Tabelle 28:	Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum A „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“	123
Tabelle 29:	Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum B „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“	123
Tabelle 30:	Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum C „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“	124
Tabelle 31:	Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum D „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“	125
Tabelle 32:	Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum E „Gäu, Donau- und Inntal“	126

Tabelle 33:	Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum F „Nordwestbayern-Franken“	126
Tabelle 34:	Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum A „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“	133
Tabelle 35:	Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum B „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“	134
Tabelle 36:	Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum C „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“	135
Tabelle 37:	Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum D „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“	136
Tabelle 38:	Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum E „Gäu, Donau- und Inntal“	137
Tabelle 39:	Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum F „Nordwestbayern -Franken“	138
Tabelle 40:	Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau der untersuchten Boden-Klima-Räume in Bayern.....	139

Formelzeichen und Abkürzungen

AE	Arbeitseinheit
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BKR	Boden-Klima-Raum
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
dt	Dezitonne
DüV	Düngeverordnung
EF	Emissionsfaktor
EF	Emissionsfaktor Mineraldünger
EF	Emissionsfaktor organischer Dünger
ENZO ₂	Emissionsberechnung zur Nachhaltigkeits-Zertifizierung für CO ₂ -Äquivalente – Treibhausgasrechenhilfe zur Umsetzung der Biokraft-NachV/BioSt-NachV des IFEU
EU	Europäische Union
EU-RED I	Renewable Energy Directive (Richtlinie 2009/258/EG)
EU-RED II	Entwurf zur Neufassung der Renewable Energy Directive
ExpRessBio	Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie in Bayern
EWR	Ernte- und Wurzelrückstände
FE	Funktionelle Einheit
Frac	Fraction (Anteile der N-Verluste durch Oberflächenabfluss/Auswaschung bzw. Ausgasung)
Gew.-%	Gewichtsprozent
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
GV-Einheiten	Großvieheinheit
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LKP	Landeskuratorium für pflanzliche Erzeugung in Bayern e. V.
MAX	Maximum
MIN	Minimum

MD	Mineraldünger
MW	Mittelwert
n	Anzahl
N	Stickstoff
N _{min}	Gehalt an mineralischem Stickstoff im Boden
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
N ₂ O-N	Stickstoffanteil des Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NPK	Pflanzendünger (Volldünger), die Stickstoff (N), Phosphat (P) und Kalium (K) enthalten
NUTS	Nomenclature des unités territoriales statistiques
OD	Organischer Dünger
RME	Rapsölmethylester
t	Tonne
THG	Treibhausgas
TI	Thünen-Institut
TM	Trockenmasse
UFOP	Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Klima- und Ressourcenschutz gehören zu den wichtigsten politischen und gesellschaftlichen Aufgaben, um den fortschreitenden Klimawandel aufzuhalten. Mit der Ratifizierung des Klimaabkommens von Paris (COP 21) und dessen Inkrafttreten am 4. November 2016 haben die Mitgliedstaaten spezifische Ziele zur Minderung von Treibhausgasen (THG) festgelegt [16]. Hierdurch soll die globale Klimaerwärmung auf maximal 2 °C begrenzt werden. Industriestaaten wie Deutschland müssen ihren Ausstoß an Treibhausgasen um 80 % im Vergleich zum Referenzjahr 1990 reduzieren. Daraufhin hat Deutschland im November 2016 seinen Klimaschutzplan 2050 „Klimapolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung“ festgelegt [15]. Für den Sektor Landwirtschaft gibt der Klimaschutzplan 2050 eine THG-Minderung von 31–34 % bis zum Jahr 2030 vor. Als eine wesentliche Maßnahme für die Erreichung dieses Zieles werden die Senkung der Stickstoffüberschüsse und der damit verbundenen N₂O-Feldemissionen (Lachgasemissionen) genannt. Mit der Novellierung der Düngeverordnung im Jahr 2017 (DüV (2017)) [12] wurden bereits erste Grundlagen geschaffen, um die Stickstoffflüsse in der pflanzenbaulichen Produktion zu reduzieren. Vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten wurde im Jahr 2012 die „Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie in Bayern – ExpRessBio“ ins Leben gerufen. Im Rahmen des Projektes ExpRessBio wurden bereits umfangreiche Analysen und Bewertungen zu den THG-Emissionen der Raps-erzeugung in drei Boden-Klima-Räumen Bayerns durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen zeigen, dass die Ableitung praktisch umsetzbarer THG-Minderungsstrategien sowie eine regionale und einzelbetriebliche Beratung nur auf Basis regionalspezifischer Daten und konkreter Produktionsbedingungen erfolgen können [21].

1.2 Problemstellung

Die im Projekt ExpRessBio abgeleiteten Handlungsempfehlungen basieren auf den betriebsspezifischen Daten, die für die Erntejahre 2013–2015 in den Boden-Klima-Räumen „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“, „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“ sowie „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ erhoben wurden. Die auf dieser Datengrundlage berechneten THG-Emissionen der Raps-erzeugung variieren zwischen 0,640 kg kg⁻¹ und 1,114 kg kg⁻¹ und zeigen deutliche einzelbetriebliche und regionalspezifische Unterschiede auf [21]. Für eine bayernweite Beurteilung des derzeitigen Standes (Status quo) der Raps-erzeugung und der Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Reduzierung von Stickstoffflüssen und THG-Emissionen fehlt eine ausreichende Datenbasis. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Projekt ExpRessBio auf die anderen Boden-Klima-Räume in Bayern kann auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse der vorangegangenen Untersuchungen nicht empfohlen werden.

1.3 Zielstellung

Zielstellung der vorliegenden Untersuchung ist es daher, regionalspezifische Kenntnisse für einen in Bayern flächendeckenden THG-optimierten Rapsanbau zu erarbeiten und konkrete Handlungsempfehlungen zur Minderung von Stickstoffflüssen und THG-Emissionen abzuleiten. Aus dieser Zielstellung ergeben sich innerhalb dieses Forschungsvorhabens die folgenden Aufgabenstellungen:

- regionale und betriebsspezifische Ist-Zustands-Analyse des Düngemanagements in verschiedenen Boden-Klima-Räumen Bayerns für die Erntejahre 2013–2016,
- Aktualisierung der Datenbasis zur Rapssaatverarbeitung in Bayern,
- Ableitung regionalspezifischer Modellbetriebe auf Basis von Hochrechnungen der Analyseergebnisse sowie anhand von Agrarstatistiken und Optimierung anhand der Vorgaben der novellierten Düngeverordnung (2017),
- Berechnung regionalspezifischer und einzelbetrieblicher THG-Bilanzen,
- Ableitung regionalspezifischer Handlungsempfehlungen zur flächendeckenden Optimierung der THG-Bilanz der Rapserzeugung.

2 Stand des Wissens

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick zum Stand des Wissens zur Rapserzeugung und Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern und deren ökologischer Bewertung. Mit den ExpResBio-Methoden wird der wissenschaftliche Standard für die Durchführung der Analyse und die Bewertung der THG-Emissionen der vorliegenden Arbeit dargelegt. Außerdem werden mit der Düngeverordnung die politischen Anforderungen zum Nährstoffmanagement im Rapsanbau erläutert.

2.1 Rapserzeugung und Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern

In Ackerbauregionen mit einem hohen Getreideanteil in der Fruchtfolge stellt der Winterraps eine wichtige Blattfrucht dar. Gründe hierfür sind, dass durch den Anbau von Winterraps Infektionsketten mit Pilzkrankheiten im Getreideanbau unterbrochen werden können und der Winterraps eine gute Vorfurchtwirkung auf das nachfolgende Getreide hat [4][38]. Allerdings ist Raps nicht selbstverträglich, sondern sollte nur mit einem Höchstanteil von 25 % in der Fruchtfolge angebaut werden [38]. Im Jahr 2017 wurde in Deutschland auf ca. 1.340.000 ha Winterraps angebaut und davon mit ca. 110.000 ha etwa 8 % in Bayern. Bezogen auf die Herbstaussaatfläche für das Erntejahr 2017 lag der Anteil von Rapssaat in Bayern bei etwa 11 % [47]. Ein genauer Blick auf die bayerische Ertragsstatistik zeigt, dass der Anbau von Winterraps in den letzten zehn Jahren mit einem Rückgang von etwa 35 % stark rückläufig ist. Während im Jahr 2007 noch auf etwa 172.000 ha Winterraps angebaut wurde, lag die durchschnittliche Anbaufläche der Jahre 2011 bis 2014 nur noch bei durchschnittlich 125.000 ha. Der Tiefpunkt lag im Jahr 2015 bei 104.000 ha. In den Jahren 2016 und 2017 konnte mit etwa 111.000 bzw. 112.000 ha wieder ein leichter Anstieg in der Rapsanbaufläche beobachtet werden [4][3][2].

Rapssaat kann sowohl in industriellen Ölmühlen (zentrale Ölmühlen, Großanlagen) mit Verarbeitungskapazitäten bis zu 4.000 t Rapssaat pro Tag als auch in dezentralen Kleinanlagen (dezentrale Ölmühlen) mit typischen Verarbeitungskapazitäten zwischen 0,5 t und 25 t Rapssaat pro Tag zu Rapsöl verarbeitet werden. Bei Rapsöl aus industriellen Ölmühlen wird die Rapssaat in der Regel heißgepresst, mit Lösungsmittel extrahiert und anschließend (voll)raffiniert. In dezentralen Ölmühlen wird durch schonende Rapssaatverarbeitung sogenanntes kaltgepresstes Rapsöl hergestellt, das keine Raffinationschritte durchläuft. Die Rapssaatqualität, der Abpressvorgang und die Öltreinigung (Festflüssig-Trennung) nehmen deshalb bei der dezentralen Rapssaatverarbeitung einen erheblichen Einfluss auf die Ölqualität.

Da Rapsöl neben der Verwendung als Nahrungsmittel oder Futteröl auch in der Umesterung zu Biodiesel oder als Reinkraftstoff Verwendung findet, ist als wesentlicher Grund für den starken Rückgang der Rapserzeugung in Deutschland und damit auch in Bayern die auslaufende Förderung von reinem Biodiesel und reinem Rapsölkraftstoff durch vollständige Besteuerung nach dem Energiesteuergesetz (EnergieStG) zum 1. Januar 2013 [9] zu nennen. Diese Entwicklungen zeigen auch die bundesweiten Umfrageergebnisse

zum Betrieb dezentraler Ölmühlen von UHL, HAAS und REMMELE aus dem Jahr 2006 [51] sowie von HAAS und REMMELE aus den Jahren 2010 [29] und 2012 [30]. So ging die Anzahl der dezentralen Ölmühlen in Deutschland von 585 im Jahr 2007 auf 241 in Betrieb befindliche Ölmühlen im Jahr 2013 zurück. Im Jahr 2012 produzierten nur noch 28 % der dezentralen Ölmühlen in Deutschland schwerpunktmäßig Rapsölkraftstoff. Vor der vollständigen Besteuerung der Biokraftstoffe zum 1. Januar 2013 lag der Anteil der Rapsölkraftstoff produzierenden dezentralen Ölmühlen noch bei 72 % im Jahr 2006 bzw. 56 % im Jahr 2010. Dabei war und ist die Bereitstellung von Rapsölkraftstoff für land- und forstwirtschaftliche Maschinen für dezentrale Ölmühlen von besonderer Bedeutung.

In KALTSCHMITT et al. (2016) ist eine umfassende Beschreibung der Pflanzenölgewinnung, der Weiterverarbeitung von Pflanzenölen sowie der Produkte und deren energetischer Nutzung zu finden [36].

2.2 Ökologische Bewertung der Rapserzeugung

Aufgrund der zunehmenden kontroversen Diskussion zum vermehrten Biomasseanbau (z. B. „Teller-oder-Tank-Diskussion“) legte die EU mit der Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen („Renewable Energy Directive – RED“) [22] im Jahr 2009 erstmals bindende Mindestwerte für die THG-Einsparungen von Biokraftstoffen fest. Grundlage für den Nachweis und die Bestimmung des festgeschriebenen Mindestmaßes sind einerseits die vorgegebene Berechnungsmethode bei eigenen Analysen sowie festgelegte Standardwerte. Die Standardwerte werden für den jeweiligen Biokraftstoff sowohl als Gesamtwert als auch als Teilstandardwerte für Biomasseanbau, Transport und Verarbeitung angegeben. Für reines Rapsöl aus industrieller Ölgewinnung liegt der Standardwert bei 36 g MJ^{-1} und setzt sich zusammen aus 30 g MJ^{-1} für den Rapsanbau, 1 g MJ^{-1} für den Transport und 5 g MJ^{-1} für die Verarbeitung. Dies entspricht einer THG-Einsparung von 57 % im Vergleich zum Referenzwert für fossilen Diesel ($83,8 \text{ g MJ}^{-1}$). Allerdings werden in der Richtlinie 2009/28/EG (RED) [42] keine Informationen zu den Emissionsfaktoren und Eingangsdaten, die für die Herleitung dieser Standardwerte erforderlich sind, offengelegt. Diese Informationen sind im Excel-Rechentool BioGrace [31] zu finden. BioGrace ermöglicht nicht nur, die Standardwerte nachzuvollziehen, sondern auch eigene Berechnungen anhand individueller Eingangsdaten durchzuführen. Ein weiteres Excel-Rechentool, mit dem eigene THG-Bilanzen für Biokraftstoffe und flüssige Bioenergieträger berechnet werden können, ist der ENZO₂-Rechner [32]. Beide Rechner sind von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) anerkannt und sollen die Umsetzung der Richtlinie 2009/28/EG in deutsches Recht (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV 2009) [14]) unterstützen.

Die im BioGrace-Tool dargelegten Eingangsdaten verdeutlichen, dass beim Biomasseanbau keine standort- und betriebsspezifischen Gegebenheiten berücksichtigt werden, sondern ein europäisches Mittel dargestellt ist. Bei der Rapserzeugung wurde beispiels-

weise ein Hektarertrag von 31 Dezitonnen (dt) zugrunde gelegt, der deutlich unter dem bayerischen Mittel von 38 dt ha⁻¹ liegt.

Seit 2013 können neben dem Teilstandardwert die sogenannten NUTS-2-Werte für die Berechnung der THG-Emissionen verwendet werden [41]. Anders als die Teilstandardwerte werden hier die regional unterschiedlichen Biomasseerträge berücksichtigt. Die THG-Emissionen der NUTS-2-Gebiete werden in g CO₂-Äquivalente je kg Biomasse (Trockenmasse) angegeben. Für die NUTS-2-Gebiete in Bayern liegt der Wert für die Raps-erzeugung zwischen 554,5 und 543,7 g kg⁻¹ [40], woraus sich eine durchschnittliche THG-Emission in Höhe von 21,5 g MJ⁻¹ für eine dezentrale Produktion von Rapsöl errechnet [20]. Damit sind die NUTS-2-Werte deutlich geringer als der Teilstandardwert der Richtlinie 2009/28/EG. Gründe hierfür sind die für Bayern höheren Hektarerträge bei geringerem Stickstoffeinsatz. Der Stickstoffeinsatz ist bei der Berechnung der NUTS-2-Werte auf Basis des kulturspezifischen Entzuges kalkuliert [26] und liegt für die bayerischen NUTS-2-Gebiete bei durchschnittlich 126 kg N ha⁻¹. Bei der Berechnung des Teilstandardwertes der Richtlinie 2009/28/EG wurde ein N-Bedarf von 137,4 kg N ha⁻¹ berücksichtigt [31].

Weder die kalkulierten Stickstoffmengen der NUTS-2-Werte bzw. des Teilstandardwertes noch die daraus resultierenden THG-Emissionen können durch betriebsspezifische Untersuchungen für Bayern bestätigt werden. Die betriebsspezifischen THG-Emissionen der Raps-erzeugung in Bayern [21], angegeben als CO₂-Äquivalente, liegen im Dreijahresmittel (2013–2015) zwischen 765 und 1.114 g kg⁻¹ Rapssa- at und sind damit bezogen auf den Maximalwert doppelt so hoch wie die NUTS-2-Werte dieser Regionen und liegen mit 31,8–38,8 g MJ⁻¹ auch deutlich über dem Standardwert der Richtlinie 2009/28/EG. Der maßgebliche Grund hierfür sind die Unterschiede zwischen dem realen betriebsspezifischen Düngemanagement und den kalkulatorischen Annahmen bei der Berechnung der Standardwerte. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse der betriebsspezifischen Bilanzierung auch deutliche Potenziale zur Reduzierung des betriebsspezifischen Nährstoffmanagements und der damit verbundenen N₂O-Feldemissionen auf. Die Ergebnisse der einzelbetrieblichen Bewertung der THG-Emissionen zeigen, dass mehr als 90 % der Emissionen auf die Bereitstellung der verwendeten Mineraldünger sowie auf die stickstoffinduzierten N₂O-Feldemissionen zurückzuführen sind [21]. Die Untersuchungen von WEIRAUCH (2016) [52] zur Erarbeitung regionalspezifischer Klimagas- und Energiebilanzen für die wichtigsten Produktionsverfahren in der Pflanzenproduktion in Mecklenburg-Vorpommern untermauern die betriebsspezifischen Ergebnisse aus Bayern. WEIRAUCH (2016) hat unter anderem Schlagkarteien von durchschnittlich 278 Schlägen in der Zeit von 2011 bis 2015 zum Anbau von Winterraps für die Produktion von Biodiesel in Mecklenburg-Vorpommern ausgewertet. Im fünfjährigen Mittel konnte über alle Betriebe ein Stickstoffeinsatz von 198 kg N-mineralisch plus durchschnittlich 28 kg N-organisch ermittelt werden. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche THG-Emission von 41 kg MJ⁻¹ Rapsölmethylester (RME). Der Standardwert für RME aus Rapssa- at entsprechend der Richtlinie 2009/28/EG liegt bei 29 g MJ⁻¹ und damit auch deutlich unter den Ergebnissen der betriebsspezifischen Bewertung. WEIRAUCH weist in ihren Arbeiten das Nährstoffma-

nagement ebenfalls als eine wesentliche Stellschraube zur Optimierung der THG-Emissionen aus [52].

Unter Koordination des Thünen-Instituts (TI) hat sich ein Verbund aus acht Partnern mit der Fragestellung befasst, Treibhausgasemissionen im Rapsanbau realistisch zu bewerten und zu mindern [27][28]. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag hierbei auf dem Nährstoffmanagement und den spezifischen N_2O -Feldemissionen, die durch Messungen standortspezifisch bestimmt wurden. Die Autoren zeigten ebenfalls auf, dass die Standardwerte aus der Richtlinie 2009/28/EG für den Rapsanbau in Deutschland als unrealistisch zu bewerten sind. Sie ermittelten einen praxisüblichen Stickstoffbedarf von 50 bis 56 kg N t^{-1} Rapssaat anstatt der beim NUTS-2-Wert veranschlagten 34 kg N t^{-1} . Allerdings stellten sie auch fest, dass der Faktor zur Berechnung der N_2O -Feldemissionen nach IPCC (2006) mit 1 % für die Anbauverhältnisse in Deutschland zu hoch sei und stattdessen bei 0,6 % liegen müsse. Aus diesem Grund solle zukünftig die Methodik nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) [48] mit realistischen Werten zur Berechnung der N_2O -Feldemissionen verwendet werden. Weiterhin wurden Handlungsempfehlungen zur Optimierung der THG-Bilanz herausgearbeitet. Insbesondere das Nährstoffmanagement sei eine wesentliche Stellschraube. Die Forschungsgruppe empfiehlt, bei Minimierung der Ammoniakemissionen organische Dünger als Substitut für Mineraldünger einzusetzen [28]. Dies würde jedoch zwangsläufig zu erhöhten Stickstoffüberschüssen innerhalb der Rapsfruchtfolge führen und könnte insbesondere im Hinblick auf die Vorgaben der DüV (2017) [12] problematisch werden.

Mit der Bewertung von Rapsfruchtfolgen unter Berücksichtigung der Düngeverordnung 2017 befasst sich eine Studie der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP) [35] [39]. In dieser Studie werden Fruchtfolgen mit und ohne Raps in Bezug auf ihre Wirtschaftlichkeit und THG-Emissionen bewertet. Deutschlandweit wurden regionaltypische Standorte mit ihren dort vorliegenden repräsentativen Fruchtfolgen mit und ohne Verwendung von Wirtschaftsdüngern betrachtet. Bei der Kalkulation des Nährstoffmanagements waren die Vorgaben der DüV (2017) [12] insbesondere zur N-Bedarfsermittlung maßgebend. Unter strikter Einhaltung dieser Vorgaben liegen die berechneten THG-Emissionswerte in allen Regionen unter dem Standardwert der Richtlinie 2009/28/EG, jedoch deutlich oberhalb des NUTS-2-Wertes.

Im Zuge der Novellierung der Richtlinie 2009/28/EG sollen die in den letzten Jahren viel diskutierten und auf den Prüfstand gestellten aggregierten und disaggregierten (Teil-)Standardwerte angepasst [25] werden. So soll für die Erzeugung reinen Rapsöls der Standardwert von 36 auf 40 g MJ^{-1} angehoben werden. Für den Teilstandardwert der Rapsrerzeugung ist eine Erhöhung von 30 auf $33,4 \text{ g MJ}^{-1}$ geplant. Davon sollen mit $17,6 \text{ g MJ}^{-1}$ 48 % den N_2O -Feldemissionen zugeschrieben werden. Eine weitere Differenzierung des Teilstandardwertes soll auch bei der Verarbeitung vorgenommen werden. Insgesamt soll der Teilstandardwert für die Ölgewinnung von $5,0$ auf $5,3 \text{ g MJ}^{-1}$ erhöht werden. Bei den $5,3 \text{ g MJ}^{-1}$ wären mit $4,4 \text{ g MJ}^{-1}$ 85 % der THG-Emissionen dem Extraktionsprozess zuzuordnen. Somit würden die THG-Emissionen für die ausschließliche Pressung bei $0,9 \text{ g MJ}^{-1}$ und damit in der gleichen Größenordnung wie die THG-Emissionen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion aus dem Projekt ExpResBio

liegen. Dort liegt die THG-Emission der dezentralen Verarbeitung (Kaltpressung) ohne Berücksichtigung der Bauvorleistungen zwischen 0,9 und 1,0 g MJ⁻¹. Ob der differenzierte Wert ohne Extraktion aus der Novellierung der Richtlinie 2009/28/EG zukünftig als Teilstandardwert für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion verwendet werden kann, geht aus dem Entwurf des Novellierungstextes jedoch nicht hervor. Mit der Überarbeitung der Kraftstoffqualitätsrichtlinie der EU (Richtlinie 2015 (652)) [23] und deren Teilumsetzung in der 38. BImSchV [10] wird auch der fossile Referenzwert differenzierter betrachtet. Hier wird nun zwischen Diesel und Benzin unterschieden, wobei der THG-Emissionswert für Diesel von 83,8 auf 95,1 g MJ⁻¹ angehoben wurde. Dadurch bliebe die THG-Einsparung für reines Rapsöl trotz des höheren Standardwertes konstant bei 57 %.

2.3 ExpRessBio-Methoden

Mit dem Ziel, nachvollziehbare und vergleichbare Bilanzergebnisse sicherzustellen, wurde mit den „ExpRessBio – Methoden“ eine harmonisierte Bilanzierungsmethode festgelegt [55]. In Anlehnung an die ISO-Normen 14040 und 14044 umfassen die ExpRessBio-Methoden Festlegungen zu folgenden Aspekten:

- Zieldefinition,
- Untersuchungsrahmen und Systemdarstellung mit Festlegungen zu
 - Systemgrenzen,
 - funktionellen Einheiten,
 - Umgang mit Koppelprodukten,
 - Datenqualität und Datenherkunft,
 - wichtigen Kenngrößen,
- produktspezifische Sachbilanzierung,
- Bewertungskategorien und Charakterisierungsmodelle,
- Referenzsysteme,
- Ergebnisdarstellung.

Nachfolgend werden die Systemdarstellung sowie die harmonisierte Art der Ergebnisdarstellung beschrieben. Beides sind wesentliche Bausteine der ExpRessBio-Methoden. Alle weiteren Festlegungen zu den oben aufgeführten Aspekten sind den Berichten aus dem TFZ „ExpRessBio – Methoden“ [55] und „Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern“ [21] zu entnehmen, in denen die ExpRessBio-Methoden ausführlich dargelegt sind.

Systemdarstellung

Die innerhalb der ExpRessBio-Methoden entwickelte Systemdarstellung basiert auf einem Schema nach DIN EN 15804 [18] und soll die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Bilanzergebnisse gewährleisten. Der strukturierte Ansatz dieser Systemdarstellung ermöglicht auch einem unerfahrenen Anwender, Produktsysteme aus

land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen über den gesamten Lebenszyklus einheitlich zu beschreiben, zu analysieren und zu bewerten (siehe Abbildung 1).

Die Lebenszyklusabschnitte (z. B. Rohstoffgewinnung) sind in Prozessgruppen unterteilt (z. B. [A]), die wiederum aus mehreren Prozess-Untergruppen bestehen (z. B. [A1] bis [A5]). Für eine detaillierte Analyse von Produktsystemen kann es sinnvoll sein, bestimmte Prozess-Untergruppen nochmals in einzelne Prozesse aufzuteilen (z. B. [A1.1] bis [A1.3]). In der Bilanzierung berücksichtigte betriebliche Logistik- und Vorleistungsprozesse können gesondert ausgewiesen werden. Um die unmittelbar mit der Produktion zusammenhängenden Emissionen von den indirekten abtrennen zu können, werden Effekte außerhalb der Systemgrenze in einer eigenen Prozessgruppe berücksichtigt.

Folgende Prozessgruppen wurden definiert:

- **[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse** – umfasst die Prozesse der Rohstoffgewinnungsphase. Außerdem werden die Prozesse zur Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen (z. B. Wirtschaftsdünger oder Industrierestholz aus der Holzwerkstoffindustrie) in dieser Prozessgruppe erfasst.
- **[B] Transformation** – umfasst die Prozesse der Lagerung und Vorbehandlung von Biomasse sowie deren Umwandlung zu Halbwaren und Produkten für die energetische und stoffliche Nutzung (z. B. Hackschnitzel, Rapsöl).
- **[C] Konversion** – umfasst die Prozesse der Umwandlung des Biokraftstoffes bzw. Biobrennstoffs (Sekundärenergie) zu Endenergie. Diese Prozessgruppe entfällt für Produktsysteme aus dem Bereich der stofflichen Nutzung.
- **[D] Nutzung** – hier werden Prozesse zusammengefasst, die Umweltwirkungen bzw. betriebs- und volkswirtschaftliche Effekte der Biomassenutzung während der Nutzungsphase charakterisieren. Dazu zählt insbesondere der Kohlenstoffspeicher (C-Speicher) der Produkte. Für die energetische Nutzung kann hier die Energiespeicherung betrachtet werden.
- **[E] Abfallbewirtschaftung** – für sämtliche Prozesse, die am Ende des Lebensweges der Produktion von Biomasseprodukten (z. B. Altholzentsorgung) oder Bioenergie (z. B. Ascheentsorgung) stehen.
- **[L] Betriebliche Logistik** – untergliedert nach [L1] außerbetrieblichem Transport (z. B. Transport Pflanzmaterial/Saatgut von Baumschule/Landhandel zum Hof) und [L2] innerbetrieblichem Transport (z. B. Transport Pflanzmaterial/Saatgut vom Hof zur Produktionsfläche).
- **[T] Transporte** – untergliedert nach Transportprozessen zwischen den einzelnen Lebenszyklusabschnitten [T1] Transport Biomasse, [T2] Transport Zwischenprodukte, [T3] Transport Endprodukte sowie [T4] Transport Koppelprodukte und Abfälle.
- **[V] Vorleistungen** – für die gesonderte Ausweisung von Prozessen, die vor dem untersuchten Produktsystem stattfinden. Dazu zählen [V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen, Geräten und Aggregaten, [V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden

und Infrastruktur, [V3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut, [V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen, [V5] Bereitstellung von Prozess- und Hilfsenergien (z. B. Strom oder Wärme), [V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern, [V7] Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln sowie [V8] Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien.

- **[F] Effekte außerhalb der Systemgrenze** – umfassen sämtliche Effekte, die außerhalb der Systemgrenzen liegen. Dazu zählen beispielsweise vermiedene Lasten und Gutschriften durch die Nutzung von Rohstoffen aus vorgelagerten Systemen, direkte und indirekte Landnutzungsänderungen sowie Gutschriften für ein vermiedenes Referenzsystem durch die Nutzung eines Koppelprodukts. Dabei sind [F1] bis [F3] Effekte innerhalb und [F4] bis [F5] Informationen außerhalb des zu untersuchenden Produktsystems.
- **[G] Substitution von Produkten eines Referenzsystems** – ermöglicht die Darstellung von Effekten, die durch die Substitution von Produkten oder Dienstleistungen eines Referenzsystems mit dem Hauptprodukt des untersuchten Produktsystems auftreten (z. B. die Substitution von Strom aus Steinkohle durch Strom aus Biogas sowie die Gutschrift des Substitutionseffektes). Diese Effekte sollten sowohl bei der Darstellung des Systems als auch bei der Ausweisung von Ergebnissen separat dargestellt werden.

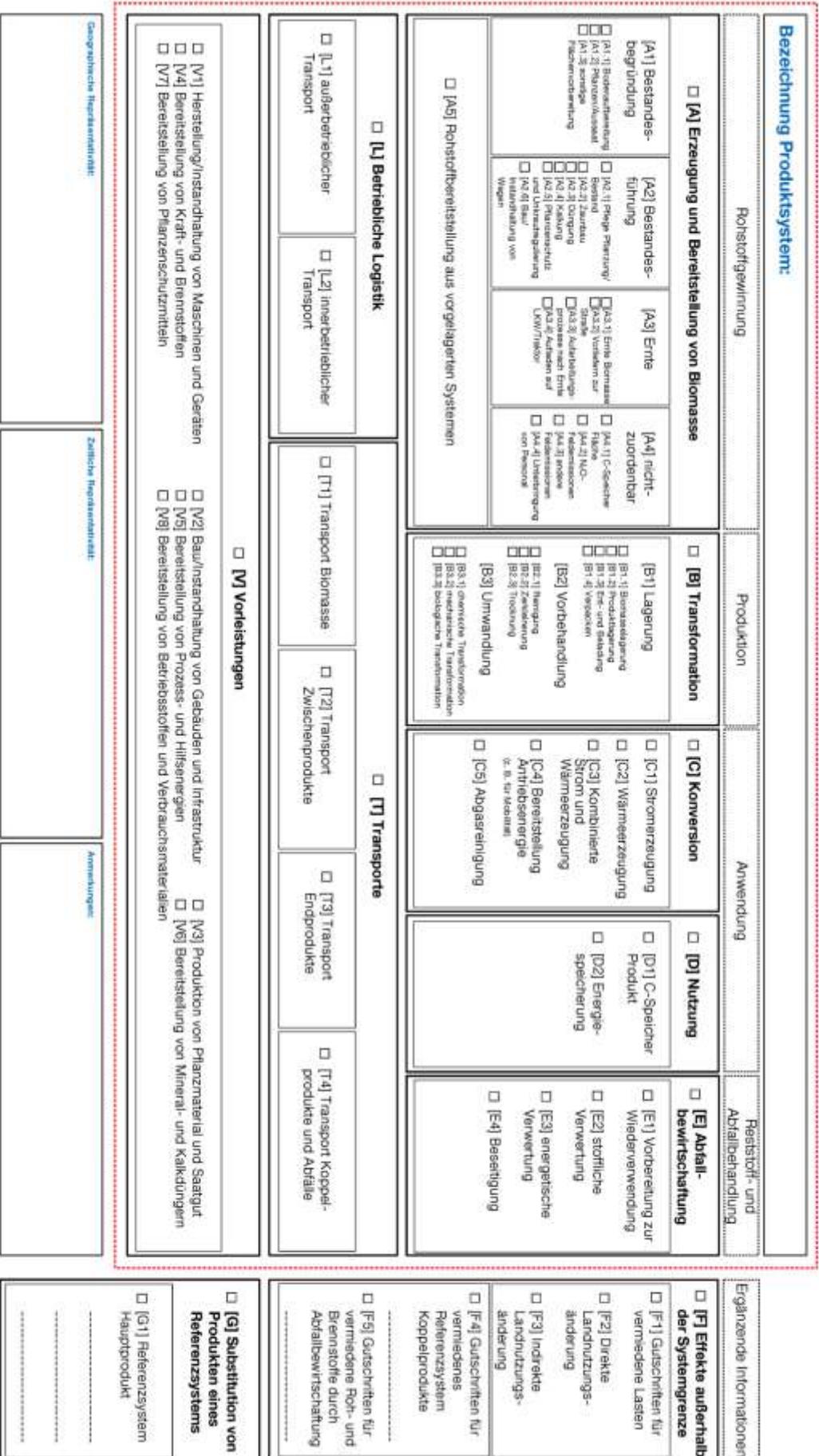


Abbildung 1: Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierungsmethode zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen

Ergebnisdarstellung

Um auch für die dargestellten Ergebnisse Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit sicherzustellen, sollten diese transparent und konsistent analog zur Systemdarstellung abgebildet werden. Eine mögliche grafische Darstellung der Ergebnisse zeigt Abbildung 2. Hier wird deutlich, dass die grafische Ergebnisdarstellung sowohl das Gesamtergebnis als auch die Teilergebnisse der einzelnen Prozessgruppen innerhalb der Systemgrenze ([A], [B], [C], [D], [E], [T]) umfasst. Falls Effekte außerhalb der Systemgrenze (Prozessgruppe [F]) berücksichtigt werden, werden diese als gesondertes Teilergebnis ausgewiesen.

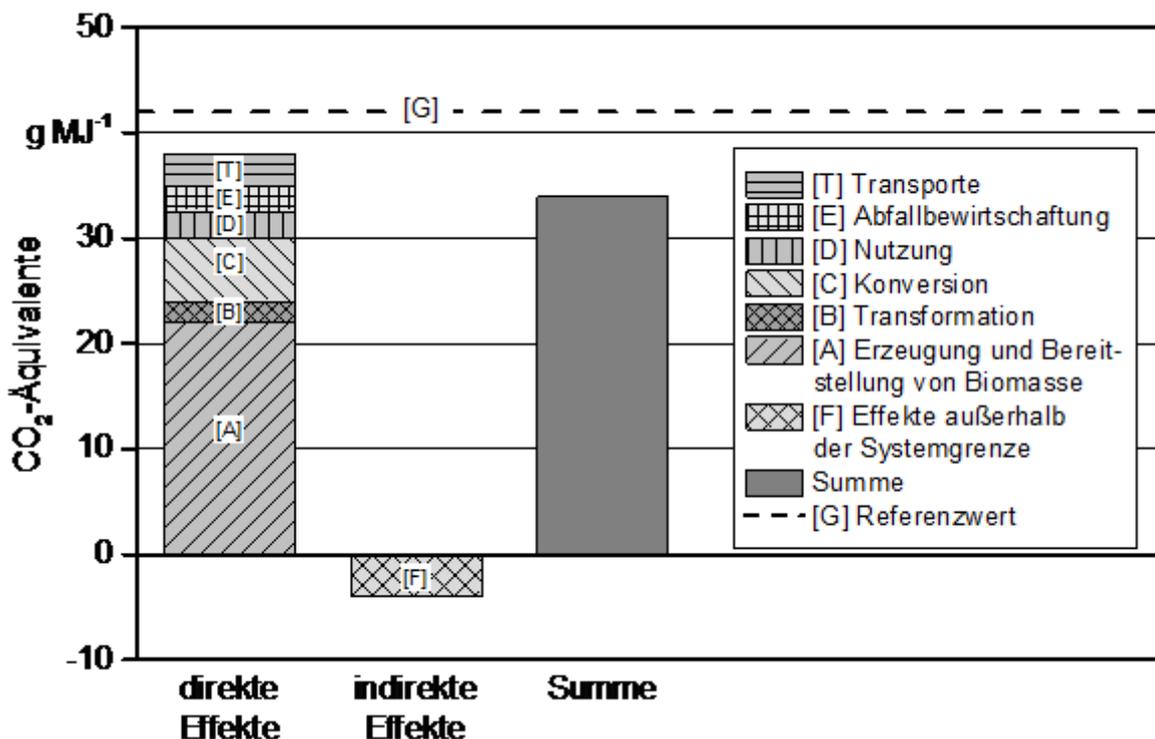


Abbildung 2: Grafische Ergebnisdarstellung (beispielhaft) für ein Produktsystem aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen am Beispiel der Wirkungskategorie „Globale Erwärmung“ mit dem Wirkungsindikator CO₂-Äquivalente in g MJ⁻¹

Im Vergleich zur einheitlichen grafischen Darstellung (vgl. Abbildung 2), führt die beispielhafte disaggregierte Auflistung der Ergebnisse in tabellarischer Form zur Erhöhung der Transparenz. Tabelle 1 zeigt, dass Teilergebnisse ebenfalls analog zur Nomenklatur der Systemdarstellung geordnet nach Prozessgruppe bzw. Prozess-Untergruppe auf Prozessebene aufgeführt werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht den einfachen, transparenten Vergleich von Ergebnissen aus unterschiedlichen Studien.

Tabelle 1: *Disaggregierte Ergebnisdarstellung entsprechend dem Schema der Systemdarstellung*

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g FE ⁻¹	in %
[A]	Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse	
[A1]	Bestandesbegründung	
[A1.1]	Bodenaufbereitung	
[A1.2]	Pflanzen/Aussaat	
[A1.3]	Sonstige Flächenvorbereitung	
[A2]	Bestandesführung	
[A2.1]	Pflege Pflanzung/Bestand	
[A2.2]	Zaunbau	
[A2.3]	Düngung	
[A2.4]	Kalkung	
[A2.5]	Pflanzenschutz und Unkrautregulierung	
[A3]	Ernte	
[A3.1]	Ernte Biomasse	
[A3.2]	Vorliefern zur Straße	
[A3.3]	Aufbereitungsprozesse nach Ernte	
[A3.4]	Aufladen auf Lkw/Traktor	
[A4.1]	C-Speicher Fläche	
[A4.2]	N ₂ O-Feldemissionen	
[A4.3]	andere Feldemissionen	
[A4.4]	Unterbringung von Personal	
[A5]	Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen	
[B]	Transformation	
[B1]	Lagerung	
[B1.1]	Biomasselagerung	
[B1.2]	Produktlagerung	
[B1.3]	Ent- und Beladung	
[B1.4]	Verpacken	
[B2]	Vorbehandlung	
[B2.1]	Reinigung	
[B2.2]	Zerkleinerung	
[B2.3]	Trocknung	

Prozess	CO ₂ -Äquivalente	
	in g FE ⁻¹	in %
[B3]	Umwandlung	
[B3.1]	Chemische Transformation	
[B3.2]	Mechanische Transformation	
[B3.3]	Biologische Transformation	
[C]	Konversion	
[D]	Nutzung	
[E]	Abfallbewirtschaftung	
[T]	Transporte	
[F]	Effekte außerhalb der Systemgrenze	

2.4 Nährstoffmanagement im Rapsanbau

In diesem Abschnitt werden die Grundsätze zum Nährstoffmanagement bezogen auf den Rapsanbau vorgestellt. Dabei werden zunächst die Empfehlungen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft entsprechend der alten Düngeverordnung (Gültigkeitszeitraum vom 26. Januar 1996 bis März 2017) dargelegt. Diese Empfehlungen beziehen sich auf den Untersuchungsjahre 2013 bis 2016. Darauf aufbauend werden die Änderungen durch die Düngeverordnung 2017 erläutert.

2.4.1 Düngeempfehlungen für Bayern nach Düngeverordnung (2007)

Mit der „Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung DüV)“ in der Fassung vom 27. Februar 2007 [13] sollen die stofflichen Risiken, die durch die Anwendung von Düngemitteln entstehen könnten, vermindert werden. Aus diesem Grund ist nach § 3 DüV (2007) [13] vor der Ausbringung wesentlicher Nährstoffmengen (mehr als 50 kg Stickstoff (N) oder 30 kg P₂O₅ pro Hektar und Jahr) der Düngebedarf einer Kultur für jeden Schlag oder jede Bewirtschaftungseinheit zu bestimmen. Bei Ackerland ist die Anwendung von wesentlichen Stickstoffmengen auf den voraussichtlichen Nährstoffbedarf der Pflanzen und auf die Nährstoffversorgung aus dem Boden (N_{min}) auszurichten. Weiterhin sollten die Nährstofflieferung aus der Vorkultur, aus dem Anbau von Zwischenfrüchten sowie die Herbst- und/oder Stoppeldüngung (Düngung nach der Hauptfrucht des Vorjahres) bei der Ermittlung des Düngebedarfs berücksichtigt werden. Eine organische Düngung ist ebenfalls anzurechnen.

Die Nährstoffversorgung N_{min} aus dem Boden ist auf Ackerflächen für den Zeitpunkt der Düngung, mindestens aber jährlich, durch eine repräsentative Bodenuntersuchung zu ermitteln. Alternativ können auch die Empfehlungen der nach Landesrecht für die landwirtschaftliche Beratung zuständigen Stellen verwendet werden. In Bayern sind dies die

Empfehlungen der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), die jährlich im Bayerischen Landwirtschaftlichen Wochenblatt als N_{\min} -Artikelserie veröffentlicht werden. In dieser Artikelserie werden kulturspezifische N_{\min} -Werte für die einzelnen Regierungsbezirke Bayerns sowie für Gesamtbayern aufgeführt und daraus eine kulturspezifische Düngeempfehlung für Durchschnittserträge abgeleitet. Zu beachten ist dabei, dass es sich bei den von der LfL veröffentlichten N_{\min} -Werten um Mittelwerte handelt, die nicht nach Vorfrüchten, Bodenart oder langjähriger organischer Düngung unterschieden sind. In Tabelle 2 sind die N_{\min} -Gehalte für Winterraps als Mittelwerte für die bayerischen Regierungsbezirke sowie für Gesamtbayern bezogen auf den Untersuchungszeitraum 2013 bis 2016 aufgelistet. Eine durchschnittliche Düngeempfehlung für den Anbau von Winterraps unter Berücksichtigung der jährlichen N_{\min} -Werte zeigt Tabelle 3.

Tabelle 2: N_{\min} -Gehalte für den Anbau von Winterraps als Mittelwerte der Regierungsbezirke Bayerns und für Gesamtbayern ohne Unterscheidung nach Vorfrüchten, Bodenart oder Viehhaltung

	2013	2014	2015	2016
Bayern	43	37	32	39
Oberbayern	37	40	31	37
Niederbayern	43	43	29	41
Oberpfalz	32	36	24	27
Oberfranken	63	n. v.*	33	62
Mittelfranken	32	41	28	38
Unterfranken	47	33	34	40
Schwaben	44	n. v.*	n. v.*	n. v.*

* nicht vorhanden

Tabelle 3: Durchschnittliche Düngeempfehlungen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft LfL unter Berücksichtigung des jahresspezifischen N_{\min}

Jahr	N-Sollwert*	N_{\min}	Höhe der N-Düngung	Aufteilung der Gaben	
				1. Gabe	2. Gabe
Bayern					
2013	210	36	174	95	80
2014	210	43	167	85	80
2015	210	37	173	95	80
2016	210	32	178	100	80

* Sollwert bezieht sich auf einen Zielertrag von 40 bis 49 dt ha⁻¹

Die aufgeführte durchschnittliche Düngeempfehlung basiert auf den Berechnungsansätzen zur Düngebedarfsermittlung, die durch die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft in ihrem „Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland“ [53] beschrieben sind. Hierbei wird zwischen einer Düngebedarfsermittlung für Ackerschläge mit und einer Düngebedarfsermittlung ohne Untersuchung der im Boden verfügbaren Stickstoffmenge N_{min} unterschieden. Diese Unterscheidung ist erforderlich, da bei gemessenen N_{min} -Werten eines Einzelschlages die nach § 3 DüV (2012) [13] vorgegebene Berücksichtigung der N-Nachlieferung von Vorfrüchten, Zwischenfrüchten und einer langjährigen organischen Düngung bereits enthalten ist. Dadurch wird der Düngebedarf maßgeblich vom ertragsspezifischen N-Sollwert, dem gemessenen N_{min} -Wert und schlagspezifischen Zu- und Abschlägen bestimmt. Diese Vorgehensweise ist für Getreide und Raps exemplarisch in Abbildung 3 dargestellt.

Getreide und Raps

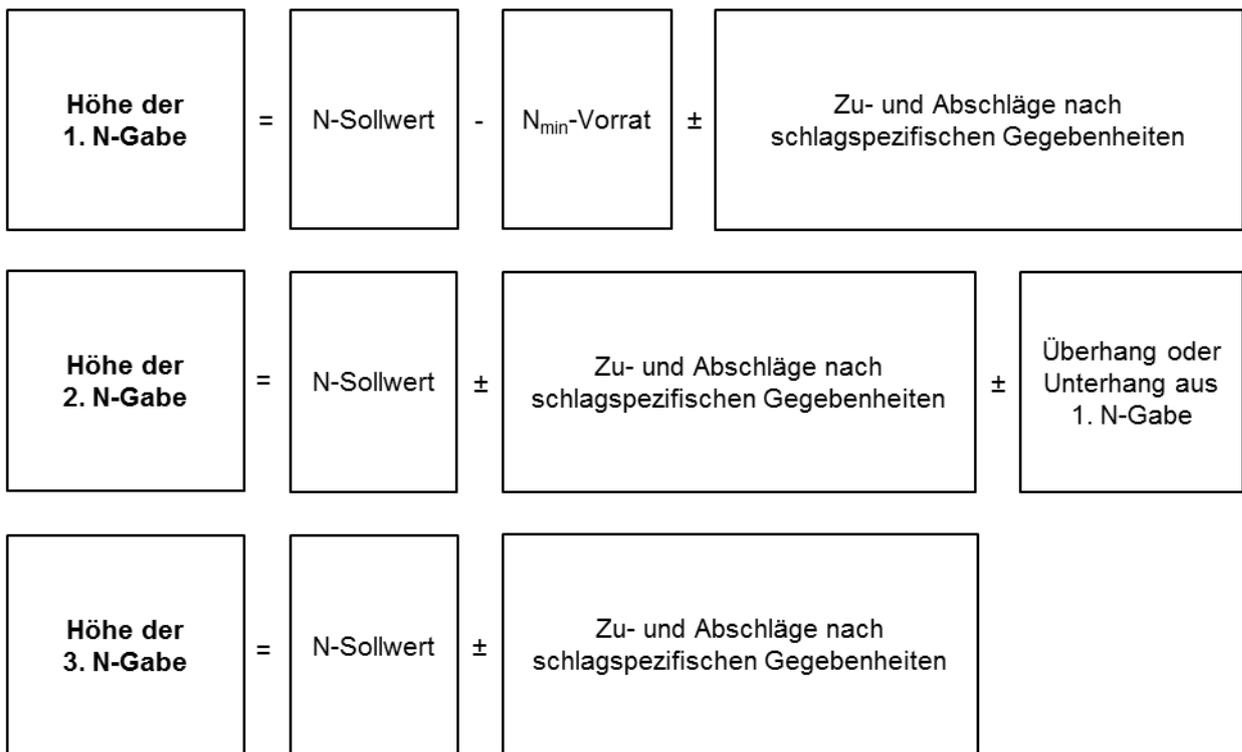


Abbildung 3: Ableitung des Stickstoffbedarfs bei eigener Untersuchung der im Boden verfügbaren Stickstoffmenge N_{min} [13]

Die Düngebedarfsermittlung ohne eigene N_{min} -Untersuchung ist etwas komplexer, da bei der Verwendung eines N_{min} -Mittelwertes (z. B. aus Veröffentlichungen der LfL) die schlagspezifischen Einflussgrößen (N-Nachlieferung aus Vorfrüchten, Zwischenfrüchten oder aus der organischen Düngung) gesondert berücksichtigt werden müssen. Diese Art der Düngebedarfsermittlung ist in den Empfehlungen der LfL in Form eines tabellarischen Berechnungsmodells einfach und transparent umgesetzt und in Tabelle 4 für den Anbau von Winterraps exemplarisch für die Erntejahre 2014 und 2015 aufgeführt.

Tabelle 4: N-Düngebedarfsermittlung für Acker ohne eigene N_{\min} -Untersuchung, nach der Düngeempfehlung der LfL, Stand 2012 [53]

	Winterraps kg N ha ⁻¹	[...]
1. Sollwert	210	
2. N_{\min}-Gehalt nach LfL	-35	
3. Bestandsentwicklung (bei Winterungen)	0	
schwach +10	normal 0	gut -10
4. Bodenart	+10	
leicht +10	mittel/schwer 0	humos -10
		anmoorig -20
5. N-Nachlieferung aus org. Düngung	-10	
GV ha ⁻¹		
< 0,3 0	0,4–0,9 -10	1,0–1,5 -20
		1,6–2,1 -30
		> 2,1 -40
6. Vorfrucht – Gruppe	0	
A 0	B -10	C -20
		D -30
		E -40
7. Vorfrucht – Ernterückstände	+10	
Strohbergung	Blattbergung	
ja 0	nein +10	ja 0
		nein -10
8. Zwischenfrucht (vor Hauptfrucht)	0	
Nichtleguminosen abgefahren	Leguminosen abgefahren	ohne Zwischenfrucht
ja 0	nein 0	ja -20
		nein -30
		0
9. Anrechnung einer Herbsdüngung (nach Vorfruchternte bis Winter)	-20	
mineralisch -20	Gülle, Fruchtwasser -20	Stallmist, Kompost -10
		ohne Düngung 0
10. Notwendige Düngung mineralisch + organisch	165	
11. Organische Düngung		
12. Notwendige mineralische Düngung		

2.4.2 Änderungen der Vorgaben zum Nährstoffmanagement nach DüV (2017)

Die Novellierung des Düngegesetzes und der Düngeverordnung im Jahr 2017 ist die Umsetzung der Nitratrichtlinie der EU. Damit wurde auf den regional vermehrten Anfall und Einsatz organischer Düngemittel und die damit verbundene Nährstoffanreicherung an Stickstoff und Phosphor im Boden, in Oberflächengewässern und im Grundwasser reagiert. Ursache für den intensivierten Anfall und Einsatz organischer Dünger ist einerseits die Konzentrierung der Viehbestände in bestimmten Regionen und andererseits die Ausdehnung der Biogaserzeugung. Nach WENDLAND et al. (2018) soll durch die Novellierung „die Effizienz der Düngung erhöht, die Risiken für die Belastung des Grund- und Oberflächenwassers vermindert und die Belastung der Luft mit Ammoniak- und Stickstoffemissionen reduziert werden“ [54]. Wesentliche Aspekte der Düngeverordnung 2017 [12] sind:

- eine schlagbezogene bzw. auf eine Bewirtschaftungseinheit¹ bezogene schriftliche Nährstoffbedarfsermittlung nach § 4 Absatz 1 DüV (2017),
- neue Regelung zur Berechnung der Obergrenzen von organischen Düngern (diese Obergrenze liegt bei 170 kg ha⁻¹ Stickstoff; allerdings sind anders als bei der „alten“ Düngeverordnung bei der Berechnung der 170-kg-Grenze nach DüV (2017) alle organischen Düngemittel, das heißt auch Biogasgärreste, Kompost, Klärschlamm usw., zu berücksichtigen),
- Einschränkung der Ausbringungszeiten und Mengen von organischen und mineralischen Düngern (Sperrfristen – die neuen Sperrfristen beginnen mit der Ernte der Hauptfrucht und enden am 31. Januar. In dieser Zeit dürfen keine N-haltigen Düngemittel ausgebracht werden als einzige Ausnahmen dürfen zu Winterraps, Zwischenfrüchten und Feldfutter bei einer Aussaat bis zum 15.09. sowie zu Wintergerste nach Getreide bei einer Aussaat bis zum 01.10. maximal 60 kg Gesamtstickstoff bzw. 30 kg Ammoniumstickstoff ausgebracht werden).

Diese und weitere Aspekte sind für Bayern in der vollständig überarbeiteten Fassung des Gelben Heftes „Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland“ der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft [54] erläutert. Dies gilt insbesondere für die Düngebedarfsermittlung, deren Berechnungsschema an die neuen Vorgaben der DüV (2017) angepasst wurde und nachfolgend am Beispiel einer schlagbezogenen schriftlichen Düngebedarfsermittlung für die Rapserzeugung dargelegt wird (siehe Tabelle 5).

¹ Zwei oder mehr Schläge, die vergleichbare Standortverhältnisse aufweisen, einheitlich bewirtschaftet werden und mit der gleichen Pflanzenart oder mit Pflanzenarten mit vergleichbaren Nährstoffansprüchen bewachsen oder zur Bestellung vorgesehen sind.

Tabelle 5: Beispiel einer Düngebedarfsermittlung am Beispiel der Raps-erzeugung nach Düngeempfehlung LfL 2018 [54][12]

Faktoren für die Düngebedarfsermittlung		Wert	Einheit
1	Kultur: Raps		
2	Ertragsniveau im Durchschnitt der letzten drei Jahre	33	dt ha ⁻¹
3	N-Bedarfswert	200	kg N ha ⁻¹
4	Zu-/Abschlag Ertragsdifferenz	-15	kg N ha ⁻¹
5	im Boden verfügbare N-Menge (N _{min})	-49	kg N ha ⁻¹
6	Stickstoffnachlieferung aus Bodenvorrat (Humus > 4 % → -20 kg)	0	kg N ha ⁻¹
7	Stickstoffnachlieferung aus der organischen Düngung des Vorjahres (10 % des ausgebrachten N _{ges})	-17	kg N ha ⁻¹
8	Vorfrucht	0	kg N ha ⁻¹
9	Zwischenfrucht	0	kg N ha ⁻¹
10	Stickstoffdüngbedarf während der Vegetation	119	kg N ha⁻¹
11	Organische Düngung zur Kultur		
	Ausgebracht	129	kg N ha ⁻¹
	Angerechnet	81	kg N ha⁻¹
12	Mineralische Düngung zur Kultur	38	kg N ha⁻¹
13	Zuschläge aufgrund nachträglich eintretender Umstände, insbesondere Bestandsentwicklung oder Witterungsereignisse		

Nachfolgend werden einzelne Punkte der Düngebedarfsanalyse in Anlehnung an WENDLAND et al. (2018) [54] näher erläutert:

2. Ertragsniveau

Das Ertragsniveau gibt den durchschnittlichen einzelbetrieblichen Ertrag der letzten drei Jahre an. Zeigt der tatsächliche Ertrag aufgrund besonderer Witterungsverhältnisse Abweichungen von mehr als 20 %, kann der jeweilige Vorjahresertrag zur Durchschnittsbildung herangezogen werden. Sollte der einzelbetriebliche Ertrag unbekannt sein, können die durchschnittlichen Erträge des Statistischen Landesamts für den jeweiligen Landkreis mit einem Zuschlag von 15 % verwendet werden.

4. Zu-/Abschlag Ertragsdifferenz

Der angegebene N-Bedarfswert gilt für ein definiertes Ertragsniveau, das im Fall von Winterraps bei 40 dt ha⁻¹ liegt. Bei Abweichungen zu diesem Ertragsniveau um 5 dt ha⁻¹ müssen Zuschläge von +10 kg N ha⁻¹ im Falle einer positiven Abweichung und Abzüge von -15 kg N ha⁻¹ im Falle negativer Abweichungen erteilt werden. Am Beispiel der Düngebedarfsanalyse in Tabelle 5 liegt der durchschnittliche Ertrag von Winterraps bei 33 dt ha⁻¹ und damit um 7 dt ha⁻¹ unter dem Ertragsniveau. Folglich ist ein Abschlag von 15 kg N ha⁻¹ vorzunehmen.

7. Stickstoffnachlieferung aus der organischen Düngung des Vorjahres

Bei einer organischen Düngung im Vorjahr wird ein Teil des ausgebrachten Stickstoffs durch Mineralisierung der organischen Substanz in den Folgejahren nachgeliefert und steht somit auch den nachfolgend angebauten Kulturen zur Verfügung. Diese Nachlieferung ist bei der Düngedarfsermittlung mit 10 % des im Vorjahr ausgebrachten Düngers anzurechnen. Hierbei ist es unerheblich, ob der organische Dünger zur Vorfrucht, zur Zwischenfrucht oder im Herbst zur Hauptfrucht ausgebracht wurde. In dem in Tabelle 5 aufgeführten Beispiel zur Düngedarfsermittlung von Winterraps wurden im Vorjahr inklusive der Herbstdüngung 170 kg Stickstoff ausgebracht. Folglich muss diese Stickstoffmenge in der Düngedarfsermittlung mit einem Abzug von 17 kg N ha⁻¹ berücksichtigt werden.

11. Organische Düngung zur Kultur (geplant)

Bei der Gabe organischer Düngerarten wird nur die im Frühjahr ausgebrachte Menge berücksichtigt. Eine organische Herbstdüngung fließt in den Abschlag in Zeile 7 ein. Weiterhin wird bei der organischen Frühjahrsdüngung zwischen der ausgebrachten und der auf den Düngedarf angerechneten Menge an Stickstoff unterschieden. Auf den Düngedarf angerechnet wird die Menge an Gesamtstickstoff abzüglich der Ausbringungsverluste sowie der Stickstoffwirksamkeit. Die Höhe der Ausbringungsverluste und der Stickstoffwirksamkeit des jeweiligen organischen Düngers sind den Empfehlungen der LfL zu entnehmen [54]. Sollte der Ammoniumgehalt des Düngers bei eigenen Untersuchungen (z. B. bei Biogasgärresten) über dem angegebenen Wert liegen, ist der spezifische Ammoniumgehalt in % vom Gesamt-N für die Berechnung der Mindestwirksamkeit zu verwenden.

In der in Tabelle 5 aufgeführten Bedarfsanalyse wurden 24 m³ Gärrest pro Hektar mit einem N-Gehalt von 5,4 kg N_{ges} m⁻³ sowie einem Ammoniumgehalt von 70 % ausgebracht. Die Ausbringungsverluste liegen bei 10,5 %. Folglich werden von den ausgebrachten 129 kg N_{ges} nur 81 kg N auf die Bedarfsanalyse angerechnet.

13. Zuschläge aufgrund nachträglich eintretender Umstände

Grundsätzlich darf der ermittelte Düngedarfswert nicht überschritten werden. Ausnahmen sind im Falle einer schlechten Bestandsentwicklung oder bei besonderen Witterungsereignissen gestattet. Im Fall einer schlechten Bestandsentwicklung darf der Landwirt einen Zuschlag von max. 10 kg N ha⁻¹ vornehmen. Zuschläge aufgrund besonderer Witterungsereignisse werden von der LfL festgelegt. Generell sind alle Zuschläge dokumentationspflichtig.

3 Material und methodische Vorgehensweise

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Materialien und die methodische Vorgehensweise zur Identifikation der Hotspot-Regionen, zur Erhebung wesentlicher Standortparameter und zur Analyse und Bewertung der THG-Emissionen der Rapssaaterzeugung sowie der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern ausführlich dargelegt.

3.1 Identifikation von Hotspot-Regionen

Zur Identifizierung wichtiger Rapsanbauregionen (Hotspot-Regionen) in Bayern wurden die Daten der Datenbank InVeKoS (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem) [8] mithilfe des Geofachdatendienstes CADENZA® [19] ausgewertet. Als Unterteilung wurde die Verwaltungsebene Landkreis/Kreisfreie Stadt betrachtet, die Bayern in 96 Gebiete gliedert. In Abbildung 4 ist der Anbau von Winterraps im Erntejahr 2016 bezogen auf die jeweilige Verwaltungsebene dargestellt.

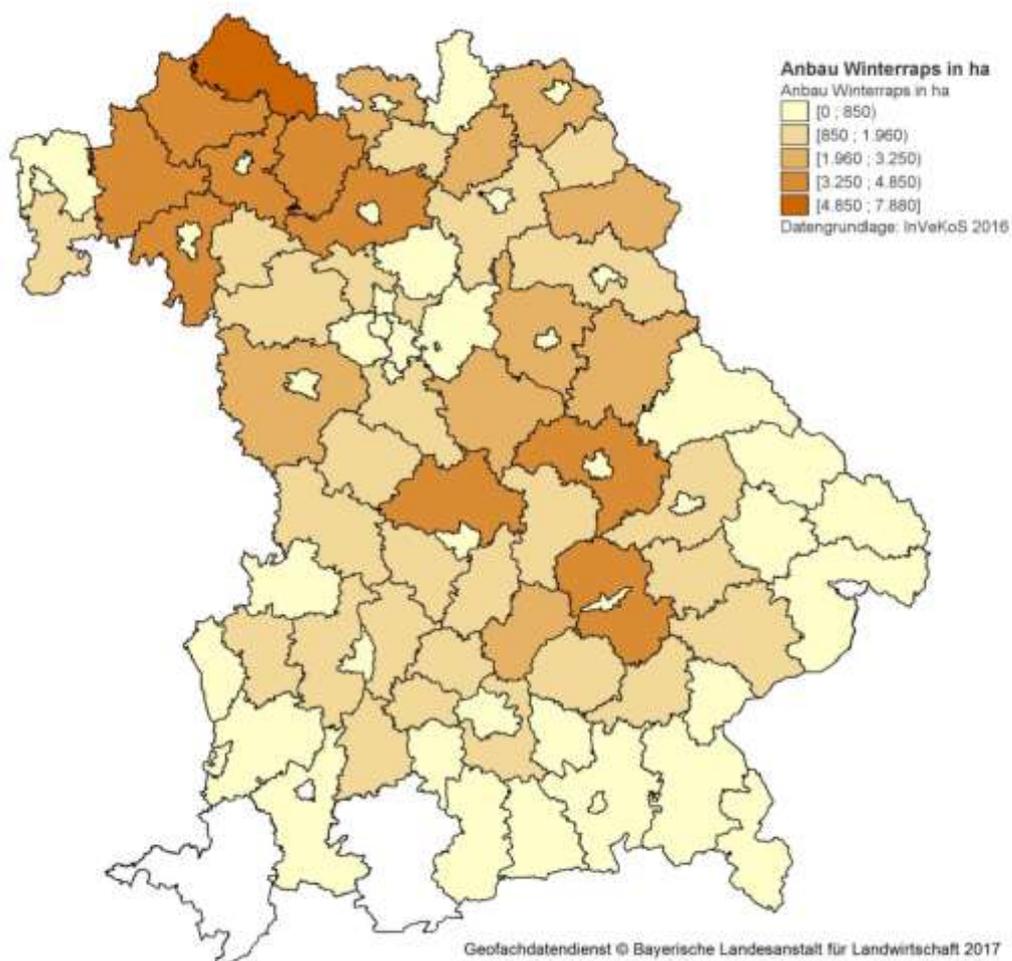


Abbildung 4: Rapsanbaufläche in Bayern auf Landkreisebene, eigene Darstellung in CADENZA® [19] auf Basis von InVeKoS-Daten [8]

In der Darstellung der Rapsanbaufläche auf Landkreisebene (siehe Abbildung 4) wird deutlich, dass große Anbauflächen vor allem in den Landkreisen des Regierungsbezirkes Unterfrankens zu finden sind. Außerhalb von Unterfranken gehören im Jahr 2016 die Landkreise Regensburg, Eichstätt und Landshut zu wichtigen Anbauregionen in Bayern. Diese Verteilung zeigt sich auch für die vorangegangenen Anbaujahre.

Eine größere Aussagekraft als die absolute Anbaufläche pro Verwaltungseinheit liefert der Anteil der Rapsanbaufläche an der gesamten ackerbaulichen Fläche des jeweiligen Landkreises. In diesem Zusammenhang wird die Bedeutung des Regierungsbezirkes Unterfranken durch den höchsten Anteil Raps in der Fruchtfolge untermauert. Die dunkelsten Einfärbungen markieren vorwiegend den Regierungsbezirk Unterfranken (siehe Abbildung 5) und weisen im Mittel der Jahre 2011 bis 2016 auf einen Anteil von 14–17 % Rapsanbau an der ackerbaulich genutzten Fläche hin.

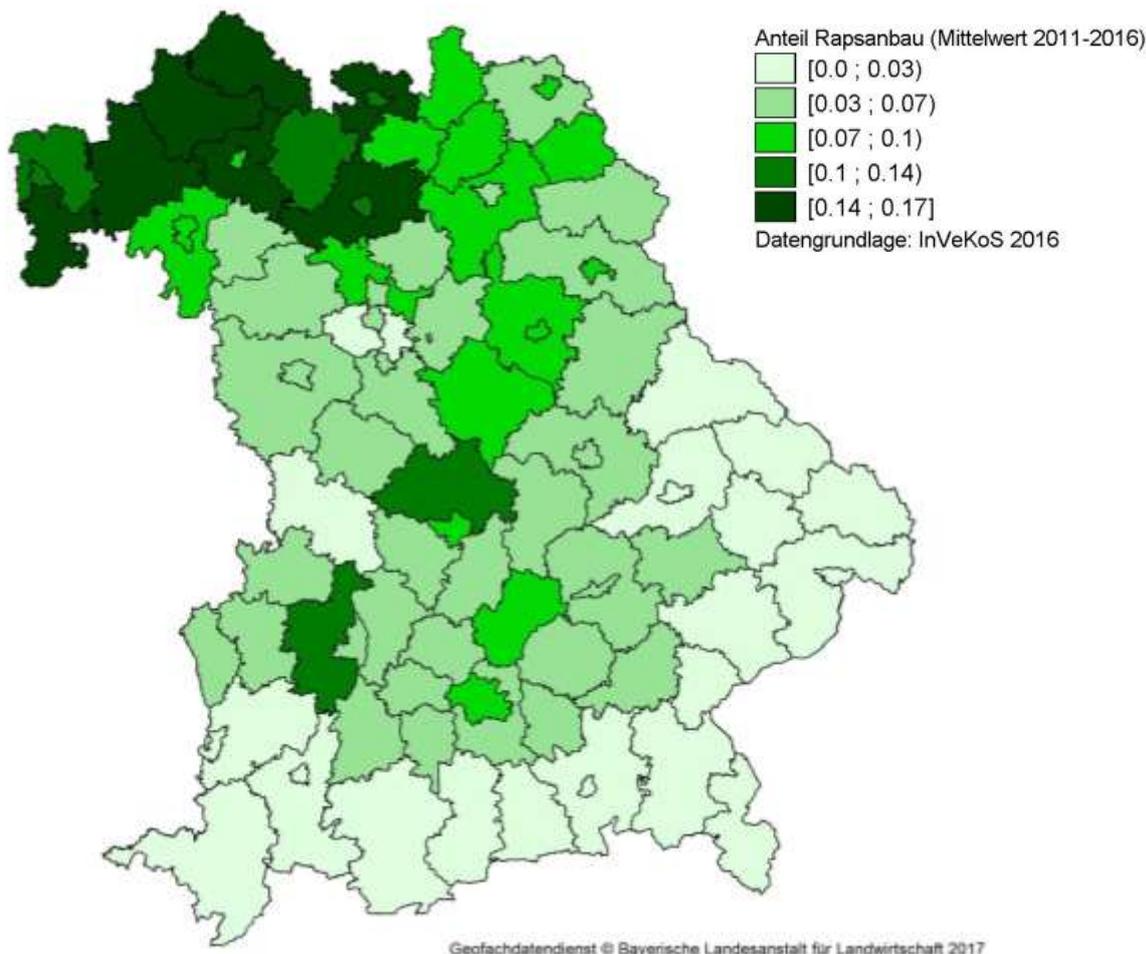


Abbildung 5: Anteil des Rapsanbaus an der ackerbaulichen Fläche in Bayern auf Landkreisebene, eigene Darstellung in CADENZA® [19] auf Basis von InVeKoS-Daten [8]

Als quantitatives Kriterium zur Definition der Hotspot-Regionen dient jedoch das Verhältnis von der Erntemenge der Rapssaat der jeweiligen Verwaltungseinheit zur Menge an geernteter Rapssaat in Bayern. Die Berechnungsgrundlage hierfür liefert die jährlich von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur, veröffentlichte Statistik „Hektarerträge Bayerns“ [42]. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde ein Schwellenwert von 2 Gew.-% an der gesamten Rapsproduktion in Bayern festgelegt. Tabelle 6 zeigt die 16 auf diese Weise ausgewählten Landkreise von insgesamt 96 bayerischen Landkreisen und Kreisfreien Städten. Die Auswahl zeigt, dass ein Sechstel aller Landkreise in Bayern in etwa 50 % der Rapssaatproduktion abdecken.

Tabelle 6: Erntemengen Winterraps sortiert nach Landkreisen mit einem Anteil von mehr als 2 Gew.-% an der bayerischen Gesamternte von 428.558 t im Erntejahr 2014

Regierungsbezirk	Landkreis	Erntemenge 2014 in t	Anteil an bayerischer Rapsernte in Gew.-%
Oberpfalz	Amberg-Weilburg	8.672	2,0 %
Mittelfranken	Ansbach	10.034	2,3 %
Unterfranken	Bad Kissingen	12.124	2,8 %
Oberfranken	Bamberg	12.973	3,0 %
Oberfranken	Coburg	10.666	2,5 %
Oberbayern	Eichstätt	18.991	4,4 %
Oberbayern	Freising	12.819	3,0 %
Unterfranken	Haßberge	12.974	3,0 %
Oberfranken	Hof	10.978	2,6 %
Niederbayern	Landshut	18.448	4,3 %
Unterfranken	Main-Spessart	15.381	3,6 %
Oberpfalz	Neumarkt Opf.	11.128	2,6 %
Oberpfalz	Regensburg	14.553	3,4 %
Unterfranken	Rhön-Grabfeld	18.596	4,3 %
Unterfranken	Schweinfurt	12.865	3,0 %
Unterfranken	Würzburg	12.182	2,8 %
Summe		213.384	49,8 %

Da eine Gliederung nach Verwaltungsebenen keinen Rückschluss auf die Bodenverhältnisse zulässt, wurde zusätzlich die Gebietsgliederung „Boden-Klima-Räume der Bundesrepublik Deutschland“ des Julius Kühn-Institutes [45] herangezogen. Sie stellt einen Konsens zwischen den Anstalten/Ämtern für Landwirtschaft bzw. den Landwirtschaftskammern der Bundesländer und der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft

schaft dar und soll aufgrund homogener Standortbedingungen Vereinheitlichung in Hinblick auf Sortenversuche, Düngung, Pflanzenschutzmittel, Beratung usw. schaffen [45]. In Abbildung 6 sind die Boden-Klima-Räume für Bayern dargestellt. Im Projekt ExpResBio wurden bereits 15 Praxisbetriebe in den drei Boden-Klima-Räumen Tertiär-Hügelland Donau-Süd, Albflächen und Ostbayerisches Hügelland sowie Verwitterungsböden in den Übergangslagen untersucht.

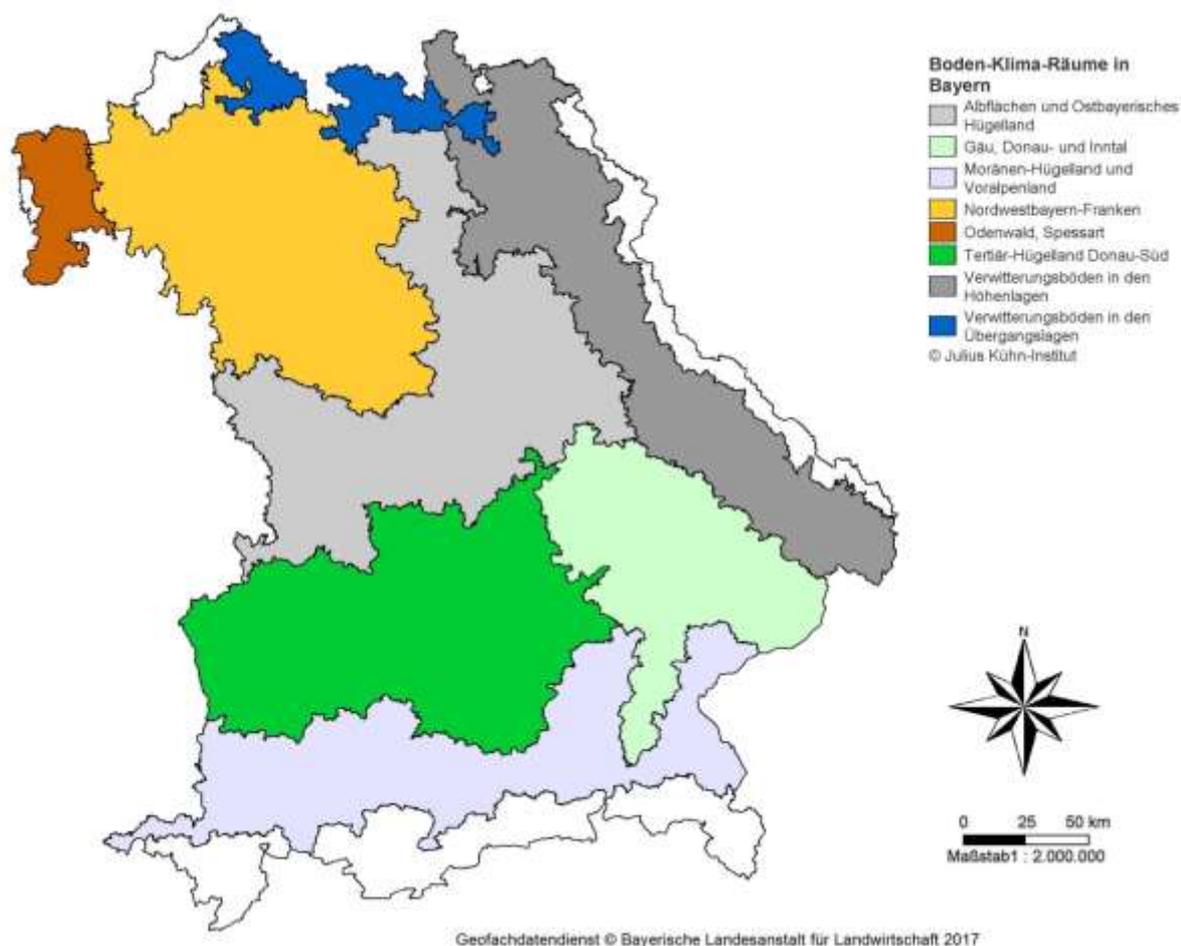


Abbildung 6: Boden-Klima-Räume in Bayern [45]

Die in Tabelle 6 identifizierten Hotspot-Landkreise sind den Boden-Klima-Räumen Nordwestbayern-Franken, Verwitterungsböden in den Höhenlagen sowie Gäu, Donau- und Inntal zuzuordnen (siehe Tabelle 7). Im Boden-Klima-Raum (BKR) Moränen-Hügelland und Voralpenland ist der Rapsanbau ohne Bedeutung. In Ergänzung zu den bereits untersuchten Boden-Klima-Räumen aus dem Projekt ExpResBio umfassen die Untersuchungen zum Stickstoffmanagement sowie die Analyse und Bewertung der THG-Emissionen aus der Rapssaaterzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion somit alle Boden-Klima-Räume Bayerns, in denen Rapssaat in bedeutenden Mengen angebaut und geerntet wird.

Tabelle 7: Hotspot-Landkreise in neu zu erhebenden Boden-Klima-Räumen

Boden-Klima-Raum	Hotspot-Landkreise
Nordwestbayern-Franken	Main-Spessart, Schweinfurt, Bad Kissingen, Haßberge, Würzburg, Ansbach, Neustadt a. d. Aisch, Bamberg
Verwitterungsböden in den Höhenlagen	Hof, Kulmbach
Gäu, Donau- und Inntal	Landshut, Dingolfing-Landau

3.2 Standortparameter Klima und Boden

Um die Standortparameter innerhalb der Boden-Klima-Räume differenzierter betrachten zu können, wurden detaillierte Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern [1] erhoben. Hierzu wurden die untersuchten Betriebe den verfügbaren Klimastationen zugeordnet und die Kennzahlen für die Parameter Durchschnittstemperatur in °C, Niederschlags-summe in mm und Anzahl Vegetationstage abgerufen. Da manche Wetterstationen in der Grenzregion von zwei Boden-Klima-Räumen liegen, kommt es vor, dass manche Wetterstationen Betrieben in unterschiedlichen Boden-Klima-Räumen zugeordnet wurden. In Tabelle 8 sind die erhobenen Klimadaten der Wetterstationen Osterseeon und Freising für den BKR „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“ exemplarisch aufgeführt. Die Klimadaten für die weiteren Boden-Klima-Räume sind in Anhang I (Tabelle 28 bis Tabelle 33) zu finden.

Tabelle 8: Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“

Wetterstation (Betrieb)	Höhenlage in m	Jahr	Durchschnittstemperatur in °C	Niederschlags-summe in mm	Anzahl Vegetationstage
Osterseeon (A1, A2, A3, A4)	560	2013	7,9	976,7	220
		2014	9,3	848,8	253
		2015	9,3	786,2	238
		2016	8,7	1174,7	227
		MW	8,8	946,5	235
Freising (A5)	470	2013	8,3	842,8	222
		2014	9,7	848,5	260
		2015	9,6	702,3	247
		2016	9,1	775,5	239
		MW	9,2	792,3	242
BKR A		MW	8,9	915,7	236

In Ergänzung zu den Klimadaten wurde die durchschnittliche Ertragsfähigkeit der in Bayern vorliegenden Böden in Form der mittleren Bodenwertzahlen erhoben. Die Bodenwertzahlen dienen der Einteilung der Böden im Rahmen der Bodenschätzung [7]. Hierbei wurde dem Boden mit der höchsten Ertragsfähigkeit in Deutschland die Wertzahl 100 zugewiesen. Die mittleren Bodenwertzahlen geben somit das prozentuale Ertragsverhältnis zum besten Boden an. [7] In Abbildung 7 sind die mittleren Bodenwertzahlen für die Landkreise in Bayern dargestellt. Diese grafische Darstellung verdeutlicht, dass vor allem im Bayerischen Gäuboden (BKR „Gäu, Donau- und Inntal“) sowie im südlichen Unterfranken (BKR „Nordwestbayern-Franken“) die ertragreichsten Böden in Bayern zu finden sind.

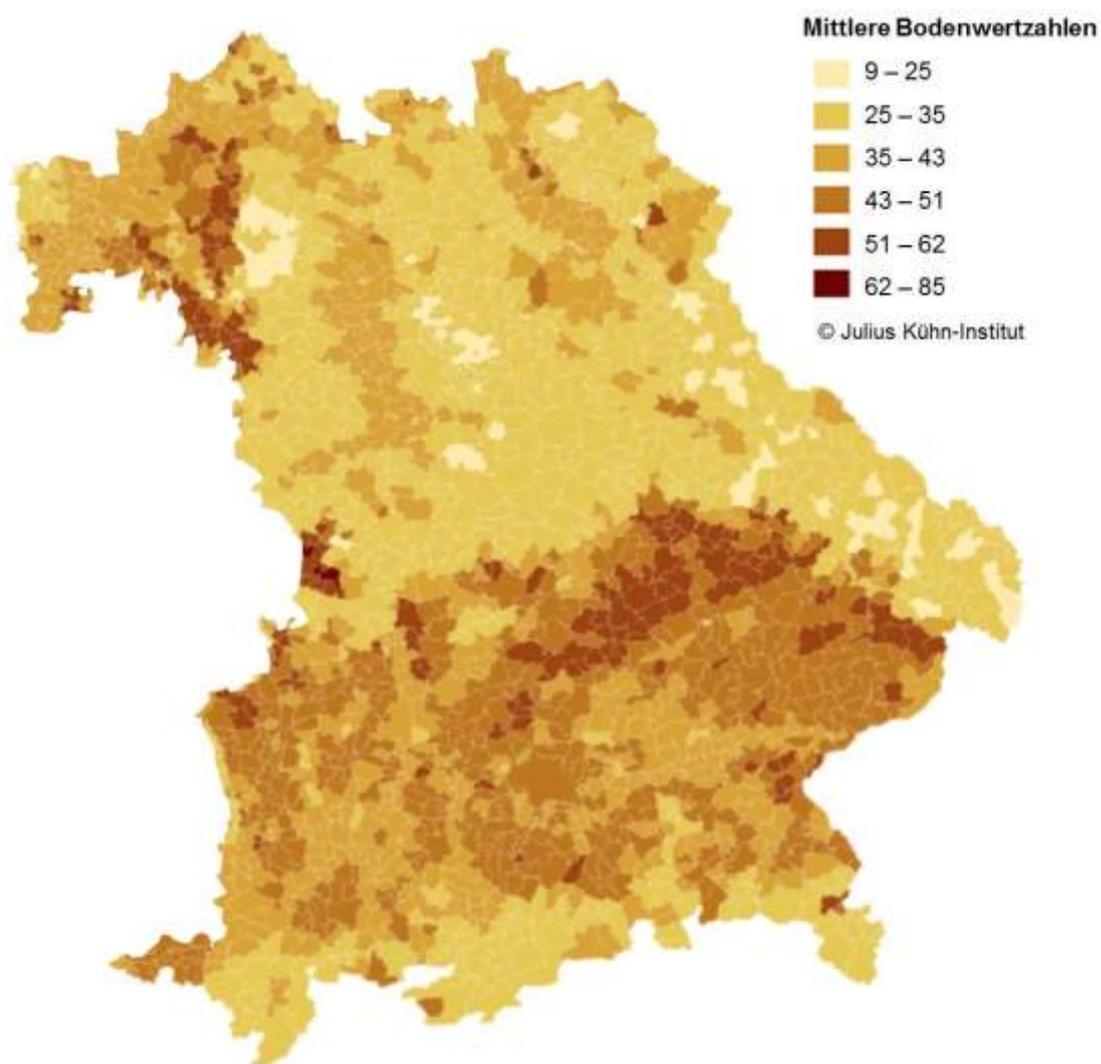


Abbildung 7: Mittlere Bodenwertzahlen der Landkreise in Bayern, eigene Darstellung in CADENZA® [19] auf Basis von Daten des Julius-Kühn-Institutes

3.3 Durchführung von Betriebsumfragen zur Raps-erzeugung

Die Erhebung der Daten bezüglich Betriebsstruktur, Bodenbearbeitung, Düngemanagement und Ertrag erfolgt durch eine schriftliche Befragung bei insgesamt 36 bayerischen Rapsproduzenten. Hierfür wurde der im Anhang (S. 129 ff.) aufgeführte Fragebogen mithilfe der Erzeugergemeinschaft Qualitätsraps und pflanzliche Produkte sowie des Landeskuratoriums für pflanzliche Erzeugung in Bayern e. V. (LKP) an potenziell interessierte Landwirte versendet. Der Schwerpunkt für diese Betriebsumfragen lag auf den identifizierten Hotspot-Regionen (siehe Abschnitt 3.1 und Tabelle 7). Darüber hinaus wurden die Anbaudaten der Praxisbetriebe aus dem Projekt ExpResBio für das Erntejahr 2016 fortgeschrieben.

Der den Raps-erzeugern zugesandte Fragebogen (siehe Anhang, S. 129 ff.) gliedert sich wie folgt.

Allgemeiner Teil:

- Kontaktdaten und Betriebsstruktur (Ackerbaubetrieb, Viehbetrieb)
- vorherrschende Bodenarten und Ackerzahl
- übliche Fruchtfolgen
- technische Daten zur Bodenbearbeitung und Applikationstechnik

Spezifischer Teil zu Düngemittelmanagement und Raps-ertrag

- Rapsanbaufläche, Sorte, Ertrag und Ölgehalt
- Düngerform (organisch/mineralisch) und Menge mit Angabe der Inhaltsstoffe und soweit vorhanden Analysewerte zur Nährstoffzusammensetzung des Wirtschaftsdüngers
- Düngezeitpunkt

3.4 Durchführung von Betriebsumfragen zur dezentralen Rapsöl-kraftstoffproduktion

Die Datenerhebung für die Analyse und Bewertung der dezentralen Rapsöl-kraftstoffproduktion erfolgte anhand von Betriebsumfragen bei den drei dezentralen Ölmühlen, die bereits Bestandteil im Projekt ExpResBio waren [21]. Hierfür wurden die Betriebsleiter per E-Mail zu folgenden Aktivitätsdaten für die Verarbeitungsjahre 2015/2016 und 2016/2017 befragt:

- **Rapssaat:** Wassergehalt, Besatz, durchschnittlicher Ölgehalt,
- **Verarbeitung:** verarbeitete Saatmenge, Stromverbrauch je Tonne Saat, Anzahl Presstage, Auslastung, Abpressgrad, produzierte Menge an Öl, produzierte Menge an Presskuchen, Wasserdampfverlust,
- **Presskuchen:** Ölgehalt, Wassergehalt, Analyse (Rohprotein),
- **Verwendung Rapsöl:** Menge Kraftstoff, Menge BHKW, Menge technische Öle, Menge Futter- und Speiseöle.

3.5 Ökologische Bewertung nach den ExpResBio-Methoden

Im folgenden Abschnitt wird die methodische Vorgehensweise für die Analyse und Bewertung der THG-Emissionen der Raps-erzeugung und dezentralen Rapsöl-kraftstoffproduktion nach den ExpResBio-Methoden dargelegt.

3.5.1 Zieldefinition

Ziel der Untersuchungen zur Analyse und Bewertung der regionalspezifischen Treibhausgasemissionen der Raps-erzeugung in Bayern ist es, die ersten Erkenntnisse aus dem Projekt ExpResBio zu erweitern und auf eine deutlich umfangreichere Datenbasis zu stellen. Hierfür werden die regionaltypischen und betriebsspezifischen Ökobilanzdaten der bereits untersuchten drei Boden-Klima-Räume „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“, „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“ sowie „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ für das Erntejahr 2016 fortgeschrieben. Außerdem werden spezifische Ökobilanzdaten mit Schwerpunkt auf dem Nährstoff- und Düngemanagement im Rapsanbau für die verbleibenden Boden-Klima-Räume in Bayern erarbeitet. Auf Basis dieser Datengrundlage sollen regionalspezifische Erkenntnisse für einen flächendeckend THG-optimierten Rapsanbau in Bayern erarbeitet und konkrete Handlungsempfehlungen für eine regionale und einzelbetriebliche Beratung abgeleitet werden.

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen ist die Einordnung der Ergebnisse in Bezug auf die strikten Vorgaben der Düngeverordnung 2017. Der Untersuchungszeitraum (Erntejahre 2013–2016) liegt noch im Geltungsbereich der alten Düngeverordnung. Durch Optimierung des Düngemanagements nach den Vorgaben der DüV (2017) [12] werden die Auswirkungen eines nach guter fachlicher Praxis abgestimmten Düngemanagements auf die Klimaschutzleistung der Raps-erzeugung und dezentralen Rapsöl-kraftstoffproduktion in Bayern aufgezeigt.

3.5.2 Systemdarstellung und Systemgrenzen

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, sind die Systemgrenzen des untersuchten Produktsystems der Raps-erzeugung und dezentralen Rapsöl-kraftstoffproduktion der vorliegenden Untersuchung für alle Betriebe identisch. Sie umfassen das Produktsystem „von der Wiege bis zum Tank“. Das bedeutet, dass alle Prozess- und Energieströme sowie Prozessmittel, die in das Produktsystem einfließen, bis hin zur Entnahme der erforderlichen Rohstoffe aus der Umwelt betrachtet werden. Die Bilanzierung endet jedoch mit der Bereitstellung des Kraftstoffes in der Ölmühle. Dies ist in der Systemdarstellung (siehe Abbildung 15) veranschaulicht, indem alle bilanzierten Prozesse und Vorleistungen des untersuchten Produktsystems der Raps-erzeugung und dezentralen Rapsöl-kraftstoffproduktion mit einem Häkchen gekennzeichnet sind.

Bezeichnung Produktsystem: Rapsverarbeitung und dezentrale Rapskrafstoffproduktion			
Reststoffgewinnung	Produktion	Anwendung	Reststoff- und Abfallbehandlung
<p><input checked="" type="checkbox"/> [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse</p> <p>[A1] Bestandesbegründung <input checked="" type="checkbox"/> [A1.1] Bodenaufbereitung <input checked="" type="checkbox"/> [A1.2] Pflanzen/Aussaat <input checked="" type="checkbox"/> [A1.3] sonstige Flächenvorbereitung</p> <p>[A2] Bestandesführung <input checked="" type="checkbox"/> [A2.1] Pflege/Pfanzung/Bestand <input checked="" type="checkbox"/> [A2.2] Zurecht <input checked="" type="checkbox"/> [A2.3] Düngung <input checked="" type="checkbox"/> [A2.4] Kalbung <input checked="" type="checkbox"/> [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung <input checked="" type="checkbox"/> [A2.6] Bau/Instandhaltung von Mägen</p> <p>[A3] Ernte <input checked="" type="checkbox"/> [A3.1] Ernte Biomasse <input checked="" type="checkbox"/> [A3.2] Vorfahren zur Strohe <input checked="" type="checkbox"/> [A3.3] Aufbereitungsprozesse nach Ernte <input checked="" type="checkbox"/> [A3.4] Aufladen auf LKW/Traktor <input checked="" type="checkbox"/> [A3.5] Unterbringung von Pappeln</p> <p>[A4] nicht-zuordenbar <input checked="" type="checkbox"/> [A4.1] C-Speicher <input checked="" type="checkbox"/> [A4.2] N-C <input checked="" type="checkbox"/> [A4.3] andere <input checked="" type="checkbox"/> [A4.4] Aufladen auf LKW/Traktor <input checked="" type="checkbox"/> [A4.5] Unterbringung von Pappeln</p> <p>[A5] Rohstoffbereitstellung aus vorgelagerten Systemen</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> [B] Transformation</p> <p>[B1] Lagerung <input checked="" type="checkbox"/> [B1.1] Biomasselagerung <input checked="" type="checkbox"/> [B1.2] Produktlagerung <input checked="" type="checkbox"/> [B1.3] Ent- und Beladung <input checked="" type="checkbox"/> [B1.4] Verpacken</p> <p>[B2] Vorbehandlung <input checked="" type="checkbox"/> [B2.1] Heilung <input checked="" type="checkbox"/> [B2.2] Zerkleinerung <input checked="" type="checkbox"/> [B2.3] Trocknung</p> <p>[B3] Umwandlung <input checked="" type="checkbox"/> [B3.1] chemische Transformation <input checked="" type="checkbox"/> [B3.2] mechanische Transformation <input checked="" type="checkbox"/> [B3.3] biologische Transformation</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> [C] Konversion</p> <p>[C1] Stromerzeugung <input checked="" type="checkbox"/> [C2] Wärmeerzeugung <input checked="" type="checkbox"/> [C3] Kombinierte Strom und Wärmeerzeugung <input checked="" type="checkbox"/> [C4] Bereitstellung Antriebsenergie (z. B. für Mobilität) <input checked="" type="checkbox"/> [C5] Abgasreinigung</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> [D] Nutzung</p> <p>[D1] C-Speicher Produkt <input checked="" type="checkbox"/> [D2] Energiespeicherung</p>
<p><input type="checkbox"/> [L] Betriebliche Logistik</p> <p>[L1] außerbetrieblicher Transport <input type="checkbox"/> [L2] innerbetrieblicher Transport</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> [T] Transporte</p> <p>[T1] Transport Biomasse <input type="checkbox"/> [T2] Transport Zwischenprodukte <input type="checkbox"/> [T3] Transport Endprodukte <input type="checkbox"/> [T4] Transport Koppelprodukte und Abfälle</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> [V] Vorleistungen</p> <p>[V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten <input checked="" type="checkbox"/> [V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur <input checked="" type="checkbox"/> [V3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut <input checked="" type="checkbox"/> [V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen <input checked="" type="checkbox"/> [V5] Bereitstellung von Prozess- und Hilfsenergien <input checked="" type="checkbox"/> [V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern <input checked="" type="checkbox"/> [V7] Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln <input checked="" type="checkbox"/> [V8] Bereitstellung von Betriebsstoffen und Verbrauchsmaterialien</p>	<p><input type="checkbox"/> [E] Abfallbewirtschaftung</p> <p>[E1] Vorbereitung zur Wiederverwendung <input type="checkbox"/> [E2] stoffliche Verwertung <input type="checkbox"/> [E3] energetische Verwertung <input type="checkbox"/> [E4] Beseitigung</p>
<p>Ergänzende Informationen:</p> <p><input type="checkbox"/> [F] Effekte außerhalb der Systemgrenze</p> <p>[F1] Gutschriften für vermiedene Lasten <input type="checkbox"/> [F2] Direkte Landnutzungsänderung <input type="checkbox"/> [F3] Indirekte Landnutzungsänderung <input type="checkbox"/> [F4] Gutschriften für vermiedenes Referenzsystem Koppelprodukte <input type="checkbox"/> [F5] Gutschriften für vermiedene Roh- und Brennstoffe durch Abfallbewirtschaftung</p> <p><input type="checkbox"/> [G] Substitution von Produktsystemen Referenzsystems</p> <p>[G1] Referenzsystem Hauptprodukt ----- ----- -----</p>			
<p>Geographische Repräsentativität: Rapsverarbeitung Boden-Klima-Räume (BRK) nach Rotberg et al. (2007). (A) Teilar-Hügelland Donau-Süd, (B) Aufziehen und Oxybarymisches Hügelland (C) Verwitterungsböden in den Übergangslagen (D) Verwitterungsböden in den Höhenlagen, (E) Glau, Donau- und Inntal, (F) Nordwestbayern - Franken</p>		<p>Zeitliche Repräsentativität: Primärdaten: Erntedaten Rapsaer: 2013 - 2016 Verarbeitungsjahre Rapsaer: 2013/2014 - 2016/2017 Sekundärdaten: Datenbanken der GABi-Software und ecoinvent Stand 2017</p>	
<p>Anmerkungen: Umgang mit Koppelprodukt (Rapspresskuchen): Allokation nach Heizwert -> Heizwert von Rapskrafstoff = 37,5 MJ/kg -> Heizwert von Rapspresskuchen = 20,7 MJ/kg</p>			

Abbildung 8: Systemdarstellung für die harmonisierte Bilanzierung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Rapskrafstoff aus dezentraler Ölgewinnung

Darüber hinaus sind alle wesentlichen Annahmen zur geografischen und zeitlichen Repräsentativität aufgeführt. So wird die Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse für unterschiedliche Boden-Klima-Räume bezogen auf jeweils ein Erntejahr (2012–2016) analysiert. Fruchtfolgeeffekte werden somit nicht betrachtet. Die durch die rot gestrichelte Linie dargestellte Systemgrenze verdeutlicht weiterhin, dass die Prozessgruppe [F] Effekte außerhalb der Systemgrenze nicht betrachtet wird. Das heißt, für die anfallenden Koppelprodukte (z. B. Rapspresskuchen) werden keine Gutschriften vergeben, sondern es erfolgt eine Bewertung der Koppelprodukte durch Allokation nach Heizwert (siehe auch Abschnitt 3.5.6).

3.5.3 Bezugsgrößen/funktionelle Einheiten

Rapserzeugung: 1 kg Rapssaat (TM-Gehalt 91 %), ab Feld

Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung: 1 MJ Rapsölkraftstoff, ab Ölmühle

3.5.4 Beschreibung des Produktsystems

Das Produktsystem der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion der vorliegenden Untersuchung gleicht dem Produktsystem der Untersuchungen von DRESSLER, ENGELMANN et al. (2016) [21] und umfasst die Prozessgruppen [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse, [T1] Biomasetransport und [B] Transformation. Aus diesem Grund ist die folgende Beschreibung des Produktsystems wörtlich aus DRESSLER, ENGELMANN et al. (2016), S. 48–51 [21], entnommen: „[...]“

[A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse

Die Prozessgruppe [A] Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse beschreibt den Abschnitt der Rapserzeugung. Sie umfasst die Prozesse [A1.1] Bodenaufbereitung (Stoppel- und Grundbodenbearbeitung), [A1.2] Pflanzen/Aussaat (Rapsaussaat und Anwalzen der Rapssaat), [A2.3] Düngung (Ausbringung von Mineral- und Wirtschaftsdünger einschließlich der Einarbeitung im Boden), [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung (Ausbringung chemischer Pflanzenschutzmittel) sowie [A3.1] Ernte Biomasse (Rapsdrusch). Neben den Emissionen aus der Nutzung des verwendeten Kraftstoffs werden den entsprechenden Prozessen auch die Emissionen aus Vorleistungsprozessen [V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten, [V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur, [V3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut, [V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern sowie [V7] Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln zugeordnet. Darüber hinaus werden die aus der N-Düngung und den Ernte- und Wurzelrückständen entstehenden N₂O-Feldemissionen innerhalb der Prozessgruppe [A] erfasst und im Prozess [A4.2] gesondert dargestellt. [...]

[V] Vorleistungen**[V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten**

Eingesetzte Maschinen und Geräte in kg Maschine bzw. Gerät je Arbeitseinheit. Eine Arbeitseinheit (AE) ist in der Regel die Fläche in ha. Nur im Fall der Wirtschaftsdüngung ist es das Volumen in m³.

[V2] Bau/Instandhaltung von Gebäuden und Infrastruktur

Benötigter Flächenbedarf in m² für die eingesetzten Maschinen und Geräte zur Unterbringung in einer Maschinenhalle je Arbeitseinheit (siehe [V1]).

[V3] Produktion von Pflanzmaterial und Saatgut

Eingesetzte Saatgutmenge in kg ha⁻¹.

[V4] Bereitstellung von Kraftstoffen

Verwendete Dieseldieselmotormenge in kg je Arbeitseinheit (siehe [V1]). Die Dieseldieselmotormenge ist dabei identisch mit der Summe aus den Einzelprozessen [A1.1] Bodenaufbereitung, [A1.2] Aussaat, [A2.3] Düngung, [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung sowie [A3.1] Ernte Biomasse.

[V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern

Eingesetzte Mineräldüngermenge in kg (N, P₂O₅, K₂O bzw. CaO) ha⁻¹.

[V7] Bereitstellung chemischer Pflanzenschutzmittel

Wirkstoffmenge in kg ha⁻¹ der eingesetzten Herbizide, Fungizide, Insektizide (inklusive Schneckenkorn), Wachstumsregulatoren und Saatgut-Beizmittel.

[T1] Transport Biomasse

Der Transport der Rapssaat erfolgt ab Feld mit einem Traktor oder Lastkraftwagen zur dezentralen Ölmühle bzw. einem Regionallager bei Weiterverarbeitung zu Rapsölmethylester.

[B] Transformation

Die Prozessgruppe [B] Transformation beschreibt den verfahrenstechnischen Ablauf der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion nach Anlieferung der Rapssaat in der dezentralen Ölmühle. Sie umfasst die Prozesse [B1] Lagerung, [B2] Vorbehandlung und [B3] Umwandlung. Wie im Folgenden beschrieben erfolgt die Lagerung der Rapssaat ([B1]) allerdings erst nach der Vorbehandlung ([B2]) der angelieferten Rapssaat. Zum Teil wird die Rapssaat nach der Lagerung und vor der Pressung einer weiteren Vorbehandlung unterzogen.

[B2] Vorbehandlung

Um die Rapssaat ohne Qualitätsverlust lagern und weiterverarbeiten zu können, wird diese zunächst gereinigt ([B2.1]) und falls erforderlich getrocknet ([B2.3]).

[B2.1] Reinigung

Die angelieferte Rapssaat wird in allen drei untersuchten Ölmühlen einem Reinigungsprozess unterzogen, der aus einer Trommelsiebung zur Abtrennung von Verunreinigungen und Störstoffen besteht. Der dabei anfallende Abputz wird entweder an den Landwirt

zurückgegeben oder der Kompostierung zugeführt. In einer Ölmühle ist der Reinigung mittels Trommelsieb ein Magnetabscheider zur Abtrennung metallischer Fremdkörper vorgeschaltet. Weiterhin wird in zwei der drei untersuchten Mühlen (Ölmühle Y und Ölmühle Z) eine Feinreinigung der Ölsaats nach der Lagerung bzw. vor der Pressung durchgeführt. Die Feinreinigung erfolgt ebenfalls mittels Trommelsieb. Sowohl die Trommelsiebe als auch der Magnetabscheider werden elektrisch betrieben.

[B2.3] Trocknung

Für eine optimale Lagerung der Rapssaats und eine optimale Ölgewinnung ist ein Wassergehalt von ≤ 7 Masse-% anzustreben [43], sodass bei höheren Wassergehalten eine Trocknung erforderlich ist. In allen drei untersuchten Ölmühlen wird hierzu eine heizölbeheizte Getreidetrocknungsanlage eingesetzt. Allerdings wird der Wassergehalt der Rapssaats über den Erntezeitpunkt gesteuert und damit angestrebt, den Anteil der Rapssaats zur Nachtrocknung möglichst gering zu halten.

[B1.1] Biomasselagerung

Die Biomasselagerung umfasst die Langzeit-, Vorrats- und Tageszwischenlagerung der gereinigten und getrockneten Rapssaats. Die Langzeitlagerung erfolgt in Flachlagern und Hochsiloanlagen, wobei in Letzteren zum Teil elektrisch betriebene Belüftungssysteme integriert sind. Die Vorrats- und Tageszwischenlagerung, die einen kontinuierlichen Pressvorgang sicherstellen soll, ist in allen drei Ölmühlen durch einen Tagesvorratsbehälter gelöst, welcher in zwei Mühlen durch jeweils einen vorgeschalteten Vorratsbehälter bzw. durch ein Zwischenlager ergänzt wird. Im Tagesvorratsbehälter wird die Ölsaats für den nachfolgenden Pressvorgang über die Abwärme der Ölpreesse erwärmt.

[B1.2] Produktlagerung

Die Lagerung des Rapsöls (Truböl und Reinöl) sowie des Rapspresskuchens wird der Prozessuntergruppe [B1.2] Zwischenproduktlagerung zugeordnet. Die Lagerung des Rapsöls findet vorwiegend in Edelstahl- oder Kunststoffbehältern statt. Der Presskuchen wird in den drei untersuchten Ölmühlen entweder in Gitterboxen oder direkt auf der Betonplatte in einer Halle gelagert.

[B3] Umwandlung

Die Prozessgruppe [B3] Umwandlung beinhaltet die mechanische Transformation, die bei der dezentralen Rapsölkraftstoffherzeugung aus den Teilschritten Pressung und Filtration besteht.

[B3.2] Mechanische Transformation

Die Pressung der Rapssaats erfolgt in allen drei Ölmühlen mittels einer elektrisch betriebenen Schneckenpresse. Es entstehen Presskuchen und Truböl, wobei die spezifischen Ölausbeuten der jeweiligen Ölmühle berücksichtigt wurden. Mit dem Presskuchen entsteht ein Koppelprodukt, das einer weiteren Verwertung als Eiweißfutter in der Tierhaltung zugeführt wird. Die anschließende Filtration des Truböls erfolgt durch zwei Filtrationsstufen, einer Hauptfiltration mittels Vertikaldruckplattenfilter sowie einer nachgeschalteten Sicherheitsfiltration mit Beutel- und Kerzenfilter. Der bei der Hauptfiltration entstehende Filterkuchen kann entweder einer erneuten Pressung oder als Koppelpro-

dukt einer weiteren Verwertung, z. B. als Eiweißfutter in der Tierhaltung oder als Biogas-substrat, zugeführt werden.“

3.5.5 Datenqualität und Datenherkunft

Für die Berechnung der einzelbetrieblichen THG-Emissionen des Rapsanbaus und der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion sind unterschiedliche Eingangsdaten erforderlich. Als wichtigste Quellen sind hier die Umfragen bei den landwirtschaftlichen Praxisbetrieben zur Rapserzeugung (siehe Fragebogen in Anhang II) und die Befragung der Ölmühlenbetreiber zur dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion (siehe Abschnitt 5.1.1) zu nennen. Im vorangegangenen Projekt ExpRessBio sind bereits umfangreiche Daten zur Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion für die drei Boden-Klima-Räume „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“, „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“ sowie „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ für die Erntejahre 2013 bis 2015 erhoben worden [21]. Insgesamt wurden hier 16 landwirtschaftliche Praxisbetriebe und drei dezentrale Ölmühlen untersucht, von denen im Rahmen der vorliegenden Untersuchung 14 Betriebe für das Erntejahr 2016 erneut befragt werden konnten. Neben den detaillierten Informationen zur Betriebsstruktur, dem Nährstoffmanagement und dem Rapsertrag wurden auch umfangreiche Daten zum Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und zur Bewirtschaftungstechnik erfasst. Somit konnten Daten von insgesamt 36 Betrieben erhoben werden, wobei 14 Betriebe aus dem Projekt ExpRessBio fortgeschrieben sowie 22 Betriebe neu erfasst wurden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Daten der landwirtschaftlichen Praxisbetriebe aus dem Projekt ExpRessBio durch Vor-Ort-Befragungen erfasst wurden. Die Datenbasis der neu untersuchten Betriebe insbesondere aus den Boden-Klima-Räumen „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“, „Gäu, Donau- und Inn-tal“ sowie „Nordwestbayern-Franken“ basiert auf einer postalischen schriftlichen Umfrage. Diese Unterschiede können einen Einfluss auf die Datenqualität haben. Die zeitliche Repräsentativität der Umfragen umfasst für alle landwirtschaftlichen Betriebe die Erntejahre 2013–2016 und für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion die Verarbeitungsjahre 2014/2015–2016/2017. Mit der Betrachtung von durchschnittlich vier Ernte- und Verarbeitungsjahren wird der Einfluss von Extremwetterereignissen (z. B. Hagelschäden) oder schlechten Witterungsverhältnissen abgeschwächt. Die geografische Lage aller untersuchten Betriebe sowie deren Zuordnung zu den Boden-Klima-Räumen veranschaulicht Abbildung 9.

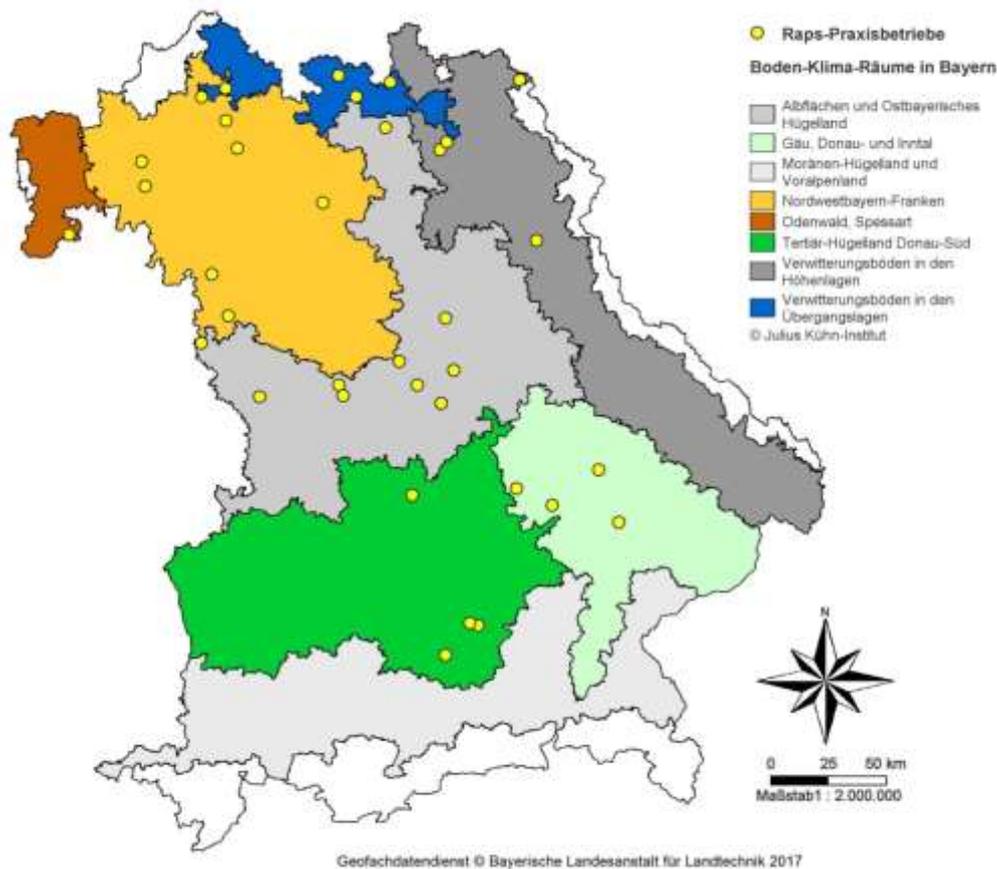


Abbildung 9: Verteilung der Raps-Praxisbetriebe in Bayern

Den sechs betrachteten Boden-Klima-Räumen wurde folgende Codierung von A bis F zugewiesen:

- Boden-Klima-Raum A: Tertiär-Hügelland Donau-Süd
- Boden-Klima-Raum B: Albflächen und Ostbayerisches Hügelland
- Boden-Klima-Raum C: Verwitterungsböden in den Übergangslagen
- Boden-Klima-Raum D: Verwitterungsböden in den Höhenlagen
- Boden-Klima-Raum E: Gäu, Donau- und Inntal
- Boden-Klima-Raum F: Nordwestbayern-Franken

Weiterhin ist zu beachten, dass der einzige Betrieb aus dem BKR Odenwald, Spessart dem BKR F zugeordnet wird, da sich dieser Betrieb direkt an der Grenze des Boden-Klima-Raumes Nordwestbayern-Franken (Baden-Württemberg) befindet und damit auch vergleichsweise ähnliche Eigenschaften zu Boden und Klima aufweist wie die anderen Betriebe in BKR F (siehe Tabelle 33 in Anhang I).

Um das Produktsystem allerdings vollständig „von der Wiege bis zum Tank“ bilanzieren und bewerten zu können, sind neben den spezifischen Eingangsdaten sogenannte Vor-kettenemissionen der eingesetzten Energieträger (z. B. Diesel), Prozessenergien (z. B.

Strom), Maschinen und Geräte (z. B. Traktor) sowie Prozessmittel (z. B. Mineraldünger) erforderlich. Mit diesen Hintergrunddaten lassen sich die in den Praxisbetrieben bzw. in den dezentralen Ölmühlen erhobenen Eingangsdaten zu THG-Emissionen verrechnen. Diese Vorkettenemissionen basieren auf den Datenbanken der Ökobilanzsoftware GaBits Professional (Stand Oktober 2017) [50] und ecoinvent v3.3 (Stand Oktober 2017) [49].

3.5.6 Umgang mit Koppelprodukten

Wie in den ExpResBio-Methoden [55] ausführlich dargelegt existieren unterschiedliche Methoden, entstehende Umweltbelastungen sowohl auf das Haupt- als auch auf das Koppelprodukt zu beziehen. Das im Produktsystem Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung anfallende Koppelprodukt ist der Rapspresskuchen. In der vorliegenden Untersuchung erfolgt die Bewertung des Koppelproduktes (Rapspresskuchen) durch Energie-Allokation (vgl. auch Abschnitt 3.5.2), da der Fokus der Untersuchungen auf der Analyse und Bewertung des Rapsanbaus liegt. Eine umfassende Analyse und Bewertung zum Einfluss der Methode zur Bewertung der Koppelprodukte ist in DRESSLER, ENGELMANN et al. [21] erfolgt. Bei der Energie-Allokation werden die Umweltbelastungen des Produktsystems zwischen dem produzierten Rapsöl und den Rapspresskuchen gemäß der Richtlinie 2009/28/EG (RED) [22] nach dem Energiegehalt der Produkte im Verhältnis zum Gesamtenergiegehalt aufgeteilt. Für die Allokation zwischen Trüböl und Rapspresskuchen wurde für das Trüböl ein Heizwert von $37,5 \text{ MJ kg}^{-1}$ und für den Rapspresskuchen ein Heizwert von $20,7 \text{ MJ kg}^{-1}$ auf Basis von REMMELE (2009) [43] angenommen. In Gleichung (3.1) ist die Berechnung der Allokationsfaktoren exemplarisch aufgeführt.

Durch Multiplikation aller Input- und Outputflüsse mit $AF_{Rapsöl}$ werden in diesem Fall 54,1 % aller Umweltwirkungen und Energieaufwendungen der Bereitstellung von Rapsölkraftstoff zugeordnet.

$$AF_{Rapsöl} = \frac{m_{Rapsöl} * Heizwert_{Rapsöl}}{(m_{Rapsöl} * Heizwert_{Rapsöl}) + (m_{Presskuchen} * Heizwert_{Presskuchen})} \quad (3.1)$$

$$AF_{Rapsöl} = \frac{0,365 \frac{kg \text{ Öl}}{kg \text{ Saat}} * 37,5 \frac{MJ}{kg \text{ Öl}}}{\left(0,365 \frac{kg \text{ Öl}}{kg \text{ Saat}} * 37,5 \frac{MJ}{kg \text{ Öl}}\right) + \left(0,625 \frac{kg \text{ Kuchen}}{kg \text{ Saat}} * 20,7 \frac{MJ}{kg \text{ Kuchen}}\right)}$$

$$AF_{Rapsöl} = 0,541$$

Wobei:

AF = Allokationsfaktor

3.5.7 Indikatorenberechnung

Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf der Auswertung der Treibhausgasemissionen, die durch die Wirkungskategorie „Globale Erwärmung ohne biogenes CO₂“ beschrieben werden. Die Bewertungsgröße (Wirkungsindikator) wird als CO₂-Äquivalente in kg FE⁻¹ angegeben und nach Empfehlung des ILCD [24] anhand des Charakterisierungsmodells des IPCC (2007) [34] berechnet. Neben den Treibhausgasemissionen erfolgt auch eine Bewertung der eingesetzten Mengen an organischem und mineralischem Stickstoff in Form von N-Bilanzen.

Die Auswertung weiterer in den ExpResBio-Methoden [55] aufgeführten und beschriebenen Umweltwirkungskategorien sowie eine Analyse und Auswertung der dort dargelegten ökonomischen Kennzahlen sind für das nachfolgend beschriebene Bilanzierungs- und Bewertungsmodell ebenfalls möglich, jedoch nicht Ziel dieser Untersuchung.

4 Ergebnisse der spezifische Datenerhebung und Stoffstromanalyse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der spezifischen Datenerhebung und Stoffstromanalyse für die Rapszerzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion dargelegt. Diese Ergebnisse sind Grundlage für das in Unterkapitel 4.3 dargelegte Bilanzierungs- und Bewertungsmodell.

4.1 Spezifische Datenerhebung und Stoffstromanalyse der Rapszerzeugung

Aus den betriebsspezifischen Angaben des Fragebogens, der Auswertung statistischer Daten zu den vorliegenden Bodenwertzahlen und den klimatischen Gegebenheiten (siehe Unterkapitel 3.2) und den Erhebungen aus dem Projekt ExpResBio lassen sich die natürlichen Standortbedingungen, die Struktur der landwirtschaftlichen Betriebe sowie die Eingangsdaten der Arbeitsverfahren, des Pflanzenschutzmitteleinsatzes und des Nährstoffmanagements skizzieren.

4.1.1 Natürliche Standortbedingungen, Betriebsstruktur und Rapsertag

Tabelle 9 zeigt die natürlichen Standortbedingungen, die Betriebsstruktur sowie die Anzahl der teilnehmenden Betriebe je BKR. Die aufgeführten klimatischen Gegebenheiten beziehen sich dabei auf den Untersuchungszeitraum 2013–2016. Mit der Gegenüberstellung der natürlichen Standortbedingungen wird deutlich, dass die spezifische Höhenlage zwischen durchschnittlich 303 m im BKR C „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ und 542 m im BKR A „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“ variiert. Dabei zeichnen sich die Standorte in den höheren Lagen durch höhere Niederschläge bei einer geringeren Durchschnittstemperatur aus. In BKR A beträgt der durchschnittliche Niederschlag 916 mm pro Jahr, wobei die Durchschnittstemperatur bei 8,9 °C liegt. Der geringste durchschnittliche Niederschlag ist im BKR C „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ mit 657 mm bei einer Durchschnittstemperatur von 9,6 °C zu finden. Rückschlüsse auf die Art der Bodentextur sowie die regional vorliegenden Ackerzahlen² lassen sich aus der Höhenlage jedoch nicht ableiten. Die besten Böden mit einer durchschnittlichen betriebsspezifischen Ackerzahl von 42,4 bis 64,0 Punkten sind im BKR E „Gäu, Donau- und Inntal“ zu finden. Über die ertragsschwächsten Böden mit durchschnittlichen Ackerzahlen von 22 bis 33 Punkten verfügt der BKR D „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“. Sowohl der BKR E als auch der BKR D zeichnen sich durch eine durchschnittliche Höhenlage von etwa 450 m aus. Die dargelegten Unterschiede in den Standortbedingungen und insbesondere in der Höhe der Ackerzahl spiegeln sich auch in der regional-typischen Betriebsstruktur der untersuchten Betriebe wider. In den Boden-Klima-Räumen

² Die Ackerzahl wird ausgehend von der Bodenwertzahl (siehe Unterkapitel 3.2) um die Faktoren Klima und Landschaftsmerkmale (z. B. Hanglage) durch Zu- und Abschläge ermittelt. Da diese Werte sogar innerhalb eines Schläges differieren können, stellen durchschnittliche Ackerzahlen eines Betriebes bzw. des Boden-Klima-Raumes lediglich eine Grundtendenz für die Ertragsfähigkeit dar.

mit guten Ackerzahlen wie BKR E sind vorwiegend Ackerbaubetriebe zu finden, wie die Anzahl der Großvieheinheiten in Tabelle 9 verdeutlicht.

Tabelle 9: *Natürliche Standortbedingungen und Betriebsstruktur der teilnehmenden landwirtschaftlichen Praxisbetriebe*

Boden-Klima-Raum	A	B	C	D	E	F
Anzahl Betriebe	n = 5	n = 9	n = 5	n = 4	n = 4	n = 9
Standortbedingungen						
Ø Höhenlage in m	542	458	303	449	447	358
Ø jährl. Niederschlag in mm	916	675	657	716	690	658
Ø jährl. Temperatur in °C	8,9	9,3	9,6	8,6	9,3	9,7
Bodentextur*	IS bis sL	L bis tL	S bis T	IS bis sL	sL bis uL	S bis uL
Ackerzahl	30–50	40–50	30–60	22–33	42,5–64	30–55
Betriebsstruktur						
Betriebstyp	Ackerbau	gemischt	Viehbetrieb	Viehbetrieb	Ackerbau	gemischt
Vieh haltende Betriebe	1	7	5	4	0	4
Viehbesatz in GV-Einheiten	0–1,7	0–2,1	0,2–2,3	0,9–1,4	0	0,5–3,1
Gärrest/Gülle aufnehmende Betriebe	1	2	2	–	3	2
Betriebsgröße in ha	156	124	107	140	71	244**
Ø Rapsanbaufläche 2016 in ha	21	24	16	32	10	42
Ø Anteil Rapsanbau 2016 in %	13	19	15	23	14	17
Ø Rapserttrag 2016 in dt ha ⁻¹	43,9	43,8	40,6	39,0	41,2	43,1
erzeugte Rapsmenge 2016 in t	287	682	337	506	169	1.645
Bewirtschaftungstechnik						
mit Pflug	3	3	2	3	3	2
pfluglos	2	6	3	1	1	7

* Kennzeichnung der Bodentextur: S: Sand; IS: lehmiger Sand; L: Lehm, sL: sandiger Lehm, uL: schluffiger Lehm, T: Ton

** inkl. eines Betriebes mit einer eher untypischen Betriebsgröße von 800 ha, ohne diesen Betrieb beträgt die durchschnittlich bewirtschaftete Ackerfläche 175 ha

In den Boden-Klima-Räumen C und D dagegen haben alle Betriebe eine Viehhaltung angegeben. Der durchschnittliche Viehbesatz liegt hier bei 0,2–2,3 GV bzw. 0,9–1,4 GV. Den höchsten Viehbesatz hat allerdings ein Betrieb im BKR F. Neben dem Viehbesatz und der damit anfallenden Gülle geht aus Tabelle 9 auch hervor, ob ein Betrieb Gülle oder Biogasgärrest aus einem anderen Betrieb aufnimmt.

4.1.2 N₂O-Feldemissionen

Die Berechnung der N₂O-Feldemissionen erfolgt analog zu den Vorgaben der ExpRes-Bio-Methoden [55] und ist in DRESSLER, ENGELMANN et al. (2016), S. 49 [21], wie folgt beschrieben:

Als N-Quellen für die direkten und indirekten N₂O-Feldemissionen werden die N-Mengen aus Mineral- und Wirtschaftsdünger bzw. anderem organischen Dünger sowie aus Ernte- und Wurzelrückständen berücksichtigt. Für die Berechnung der N-Mengen aus Ernte- und Wurzelrückständen (EWR) werden die Methoden und Daten des Thünen-Institutes [44] verwendet. Die Bewertung der N-Mengen aus Mineral- und Wirtschaftsdünger bzw. anderem organischen Dünger sowie der Ernte- und Wurzelrückstände erfolgt auf Basis der IPCC-Methodik [33]. In Tabelle 10 sind die verwendeten Emissionsfaktoren (EF) und die relativen Anteile der N-Verluste durch Oberflächenabfluss/Auswaschung bzw. Ausgasung (Frac) aufgeführt. Die Emissionsfaktoren werden in kg N₂O-N angegeben. Die Umrechnung in kg N₂O erfolgt durch die Multiplikation mit dem Molgewichtsverhältnis von N₂O zu N (44/28).

Tabelle 10: Emissionsfaktoren (EF) in kg N₂O-N und relative Anteile der N-Verluste durch Oberflächenabfluss/Auswaschung bzw. Ausgasung (Frac) in % nach IPCC [33]

	Mineraldünger		Organischer Dünger		Ernte- und Wurzelrückstände	
	EFMD in kg N ₂ O-N kg N ⁻¹	FracMD in %	EFOD in kg N ₂ O-N kg N ⁻¹	FracOD in %	EFEWR in kg N ₂ O-N kg N ⁻¹	FracEWR in %
direkte N ₂ O-Feldemissionen	0,01		0,01		0,01	
indirekte N ₂ O-Feldemissionen (Auswaschung)	0,0075	30*	0,0075	30*	0,0075	30*
indirekte N ₂ O-Feldemissionen (Ausgasung)	0,01	10	0,01	20		

* Anwendung nur wenn Σ (Niederschlag in Regenzeit) – Σ (potenzielle Evaporation in Regenzeit) > Wasserspeicherkapazität des Bodens oder bei Bewässerung (Ausnahme Tröpfchenbewässerung)

Folglich variieren die N₂O-Feldemissionen sowohl mit der Höhe des ausgebrachten mineralischen und organischen Gesamtstickstoffs als auch mit der Höhe der ertragsbeding-

ten Ernte- und Wurzelrückstände. Weiterhin geht aus Tabelle 4 hervor, dass die indirekten N_2O -Feldemissionen des organischen Stickstoffs höher sind als die des mineralischen.

4.1.3 Arbeitsverfahren

Die Eingangsdaten für die Bilanzierung der Arbeitsverfahren der Prozessgruppe [A] basieren auf den Erhebungen des ExpRessBio-Projekts [21] in Ergänzung des KTBL-Feldarbeitsrechners [37]. Anders als im Projekt ExpRessBio werden die Arbeitsverfahren in der vorliegenden Arbeit nicht für jeden Betrieb einzeln analysiert. Grundlage für die Bewertung der Arbeitsverfahren sind die Parameter, durch die sich die Bewirtschaftungstechnik des KTBL-Feldarbeitsrechners unterscheidet. Während die mittlere Schlaggröße bei allen landwirtschaftlichen Praxisbetrieben vereinfachend mit 5 ha und die mittlere Entfernung Feld–Hof mit 5 km festgelegt wird, wird die Art der Bodenbearbeitung differenzierter betrachtet. Hierbei wird sowohl zwischen einer pfluglosen Bearbeitung und einer wendenden Bearbeitung mit Pflug als auch zwischen leichten, mittleren und schweren Böden unterschieden. Weiterhin wird zwischen einer reinen mineralischen Düngung und einer Düngung mit zusätzlichem Einsatz von Wirtschaftsdüngern differenziert. Insgesamt werden somit zwölf verschiedene Arten der Bewirtschaftung bilanziert. Der zu bewirtschaftende Bodentyp (leicht, mittel, schwer) wird auf Basis der natürlichen Standorteigenschaften zugewiesen. Die Art der Bodenbearbeitung geht aus den einzelbetrieblichen Betriebsumfragen hervor. Auf diese Weise lässt sich jedem betrachteten Betrieb eines der zwölf Arbeitsverfahren zuweisen und gleichzeitig regional- und betriebsspezifische Gegebenheiten berücksichtigen. In Tabelle 11 sind der Dieselbedarf sowie der Maschinen- und Geräteeinsatz für die Arbeitsverfahren der Raps-erzeugung am Beispiel einer wendenden Bodenbearbeitung eines schweren Bodens mit Pflug ohne den Einsatz von Wirtschaftsdüngern aufgeführt. Das Beispiel für eine konservierende pfluglose Bearbeitung eines leichten Bodens mit der zusätzlichen Verwendung von Wirtschaftsdüngern zeigt Tabelle 12.

Tabelle 11: Dieselbedarf sowie Maschinen- und Geräteeinsatz der Arbeitsverfahren, wendend mit Pflug, Boden schwer, ohne Einsatz von Wirtschaftsdüngern

Arbeitsverfahren nach KTBL und ExpRessBio	Dieselbedarf in $l\ ha^{-1}$ [37]	Maschineneinsatz* in $kg\ ha^{-1}$	Geräteeinsatz** in $kg\ ha^{-1}$
[A1.1] Pflügen mit Drehpflug	42,19	0,917	0,2667
[A1.2] Säen von Raps mit Kreiselegge und Sämaschine	19,02	0,579	0,2500 0,2222
[A2.5] Pflanzenschutzmaßnahme	1,29	0,107	0,1250
[A2.5] Schneckenkorn ausbringen, ab Hof, loser Dünger	0,60	0,029	0,0004
[A2.5] Pflanzenschutzmaßnahme	1,29	0,102	0,1250

Arbeitsverfahren nach KTBL und ExpResBio	Dieselbedarf in l ha ⁻¹ [37]	Maschineneinsatz* in kg ha ⁻¹	Geräteinsatz** in kg ha ⁻¹
[A2.3] Mineraldünger ausbringen, ab Hof, loser Dünger (1. Frühjahrsgabe)	0,95	0,059	0,0307
[A2.5] Mineraldünger ausbringen, ab Hof, loser Dünger (2. Frühjahrsgabe)	0,86	0,050	0,0307
[A2.5] Pflanzenschutzmaßnahme	1,29	0,102	0,1250
[A2.5] Pflanzenschutzmaßnahme	1,29	0,102	0,1250
[A3.1] Mähdrusch von Raps; Standwagen am Feldrand; Stroh gehäckselt	24,92	2,833	–
Gesamt	93,70		

* Maschine: technisches Gebilde mit Antriebseinheit (z. B. Traktor, Mährescher)

** Gerät: technisches Gebilde ohne Antriebseinheit (z. B. Pflug, Anhänger)

Tabelle 12: Dieselbedarf sowie Maschinen- und Geräteinsatz der Arbeitsverfahren, konservierende pfluglose Bearbeitung, Boden leicht mit Einsatz von Wirtschaftsdüngern

Arbeitsverfahren nach KTBL und ExpResBio	Dieselbedarf in l ha ⁻¹ [37]	Maschineneinsatz* in kg ha ⁻¹	Geräteinsatz** in kg ha ⁻¹
[A2.3] Wirtschaftsdünger ausbringen, ab Hof mit Pumptankwagen	12,37	0,383	0,0430
[A1.1] Stoppelgrubbern flach, schräg (30°)	5,13	0,248	0,3470
[A1.1] Tiefgrubbern	11	0,467	0,3470
[A1.2] Säen von Raps mit Kreiselegge und Sämaschine	10,08	0,445	0,2500 0,2222
[A2.5] Pflanzenschutzmaßnahme	1,29	0,107	0,1250
[A2.5] Schneckenkorn ausbringen, ab Hof, loser Dünger	0,60	0,029	0,0004
[A2.5] Pflanzenschutzmaßnahme	1,29	0,107	0,1250
[A2.3] Mineraldünger ausbringen, ab Hof, loser Dünger (1. Frühjahrsgabe)	0,95	0,059	0,0307
[A2.5] Mineraldünger ausbringen, ab Hof, loser Dünger (2. Frühjahrsgabe)	0,86	0,050	0,0307
[A2.5] Pflanzenschutzmaßnahme	1,29	0,107	0,1250
[A2.5] Pflanzenschutzmaßnahme	1,29	0,107	0,1250
[A3.1] Mähdrusch von Raps; Standwagen am Feldrand; Stroh gehäckselt	24,92	2,833	–
Gesamt	71,07		

* Maschine: technisches Gebilde mit Antriebseinheit (z. B. Traktor, Mährescher)

** Gerät: technisches Gebilde ohne Antriebseinheit (z. B. Pflug, Anhänger)

Die Gegenüberstellung der beiden exemplarisch aufgezeigten Arbeitsverfahren verdeutlicht, dass sowohl die verwendete Bewirtschaftungstechnik als auch die vorliegende Bodenart einen großen Einfluss auf den Dieseleinsatz sowie auf den Maschinen- und Geräteeinsatz bei der Feldarbeit haben. So führt eine Bodenbearbeitung mit Pflug zu einem deutlich höheren Dieselbedarf als die Bearbeitung eines leichten Bodens ohne Pflug. Zudem ist der Einsatz von Wirtschaftsdüngern mit einem weiteren Dieselbedarf und Maschinen- und Geräteeinsatz verbunden. Die anteilige Anrechnung der Vorleistungen im Herstellungsprozess der eingesetzten Maschinen, Geräte und Aggregate (siehe Maschinen und Geräteeinsatz in Tabelle 11 und Tabelle 12) erfolgt nach den Vorgaben der ExpResBio-Methoden [55] und ist in DRESSLER, ENGELMANN et al. [21] beschrieben.

4.1.4 Pflanzenschutz und Unkrautregulierung

Die Ergebnisse aus dem Projekt ExpResBio zeigen, dass die Bereitstellung und Ausbringung der erforderlichen Pflanzenschutzmittel und Wachstumsregulatoren nur einen sehr geringen Einfluss auf die Höhe der THG-Emissionen haben [21]. Deshalb wird die Verwendung der Pflanzenschutzmittel nicht für jeden Betrieb einzeln erfasst und bewertet. Vielmehr werden die Eingangsdaten aus dem Projekt ExpResBio [21], durch Empfehlungen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft [6] ergänzt, zu einem Datensatz für durchschnittliche Pflanzenschutzmaßnahmen bei der Rapserzeugung verarbeitet. Regionale und betriebsspezifische Gegebenheiten finden hierbei keine Berücksichtigung. Dieser durchschnittliche Pflanzenschutzmitteleinsatz wird allen betriebsspezifischen THG-Bilanzen zugrunde gelegt und ist mit dem jeweiligen Zeitpunkt, der Wirkstoffgruppe und dem Wirkstoffgehalt in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Durchschnittliche Pflanzenschutzmaßnahmen bei der Rapserzeugung, Anwendung, Wirkstoffgruppe und Wirkstoffgehalte auf Basis von [21][6]

Zeitpunkt der Maßnahme	Produktname	Anwendung	Wirkstoffgruppe	Wirkstoffgehalt
Beize	DMM	Fungizid	Zimtsäureamide	500 g kg ⁻¹
	TMD	Fungizid	Dithiocarbamate	980 g kg ⁻¹
Vorlauf (August)	Butisan Gold	Herbizid	Chloracetamide/ Chloracetanilide	400 g l ⁻¹
			Chinolincarbonsäuren	100 g l ⁻¹
Herbst	Carax	Fungizid	Triazole	30 g l ⁻¹
		Wachstumsregulator		210 g l ⁻¹
Frühjahr 1. Gabe	Trebon	Insektizid	Pyrethroid	288 g l ⁻¹
	Cantus Gold	Fungizid	Pyridin-Carbonsäureamide	200 g l ⁻¹
			Oximino-acetamide	200 g l ⁻¹
Frühjahr 2. Gabe	Biscaya	Insektizid	Neonicotinoide	240 g l ⁻¹

Über die Wirkstoffgruppe werden die entsprechenden Ökobilanzdatensätze aus der Datenbank ecoinvent v.3.3 und ihre Einsatzmenge zugewiesen (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Zuordnung der eingesetzten Pflanzenschutzmittel [V7] zu Datenbankprozessen von ecoinvent 3.3 auf Basis von [21][6]

Produktname	Wirkstoffgruppe	Ecoinvent-Prozessname	Aufwandsmenge
DMM	Zimtsäureamide	zyklische N-Verbindungen	0,01 kg kg ⁻¹ Saat
TMD	Dithiocarbamate	Dithiocarbamat-Verbindung	0,004 kg kg ⁻¹ Saat
Butisan Gold	Chloracetamide / Chloracetanilide	Acetamide-Anilid-Verbindungen	3 l ha ⁻¹
	Chinolincarbonsäure	Phenoxy-Verbindungen	
Carax	Triazole	zyklische N-Verbindungen	0,5 l ha ⁻¹
	Wachstumsregulator	Wachstumsregulator	
Trebon	Pyrethroid	Pyrethroid-Verbindungen	0,2 l ha ⁻¹
Cantus Gold	Pyridin-Carbonsäureamide	Pyridine-compound	0,5 l ha ⁻¹
	Oximino-Acetamide	Acetamide-Anilid-Verbindungen	
Biscaya	Neonicotinoide	Insektizid	0,3 l ha ⁻¹

4.1.5 Nährstoffmanagement

Zur Bewertung des Nährstoffmanagements beim Rapsanbau in Bayern wurden sowohl die ausgebrachten mineralischen und organischen Düngermengen als auch der spezifische Jahresertrag erfasst. Tabelle 15 zeigt die ausgebrachten Stickstoffmengen je Hektar Anbaufläche als regionalspezifische Mittelwerte über die Anbaujahre 2013–2016 sowie als jahresspezifische Minimal- (MIN) und Maximalwerte (MAX). Weiterhin sind in Tabelle 15 die gemittelten und spezifischen Rapssaaterträge aufgeführt. Ein Vergleich der Rapsenerträge verdeutlicht, dass sowohl der gemittelte Ertrag über alle Erntejahre und untersuchten Betriebe mit 45,5 dt ha⁻¹ als auch der Maximalertrag mit 53,9 dt ha⁻¹ im BKR E „Gäu, Donau-, Inntal“ am höchsten ist. Dagegen sind in den Boden-Klima-Räumen C („Verwitterungsböden in den Übergangslagen“) und D („Verwitterungsböden in den Höhenlagen“) mit durchschnittlich 39,4 bzw. 41,3 dt ha⁻¹ die geringsten Erträge zu finden. Dieses Ergebnis korreliert mit den Auswertungen zu den natürlichen Standortbedingungen, da im BKR E deutlich bessere Ackerzahlen vorliegen als in den Boden-Klima-Räumen D und E (vgl. Tabelle 9). Die gemittelte Gesamt-Stickstoffdüngung liegt in den beiden letztgenannten Boden-Klima-Räumen mit 257 bzw. 235 kg N_{ges} ha⁻¹ allerdings über der durchschnittlichen Stickstoffgabe in BKR E (235 kg N_{ges} ha⁻¹), sodass die Gesamt-Stickstoffdüngung nicht mit der Höhe des Rapsenertrages korreliert.

Weiterhin geht aus Tabelle 15 hervor, dass in allen Boden-Klima-Räumen organische Düngemittel eingesetzt werden. Die maximal ausgebrachte Menge an organischem Stickstoff variiert zwischen 205 kg ha^{-1} in BKR A und 245 bzw. 247 kg ha^{-1} in BKR E bzw. BKR C. Somit kann aus dem Viehbesatz in einer Region nicht immer ein Rückschluss auf die Höhe der eingesetzten Wirtschaftsdünger getroffen werden. Im BKR C liegt der Viehbesatz bei 0,2–2,3 GVE je Hektar bewirtschafteter Ackerfläche, wohingegen die Auswertung der Betriebsstruktur für den BKR E eine reine Ackerbau-/Marktfruchtregion ohne Viehbesatz ergibt. Hier wird organischer Dünger in Form von Biogasgärrest zugekauft.

Tabelle 15: Regionalspezifische Auswertung der mineralischen und organischen Stickstoffdüngung sowie des Rapsenertrages aufgeteilt nach Boden-Klima-Raum

	Boden-Klima-Raum					
	A	B	C	D	E	F
Ertrag						
Mittelwert	42,4	43,9	39,4	41,3	45,5	41,4
MIN	36,9	31,0	26,4	35,2	33,0	28
MAX	52,0	52,2	50,0	48,0	53,9	52,8
N-Düngung mineralisch in $\text{kg N}_{\text{ges}} \text{ ha}^{-1}$						
Mittelwert	191	170	172	186	174	180
MIN	104	80	102	155	90	120
MAX	247	240	249	205	245	240
N-Düngung organisch in $\text{kg N}_{\text{ges}} \text{ ha}^{-1}$						
Mittelwert	49	63	85	69	61	45
MIN	0	0	0	0	0	0
MAX	226	130	215	105	201	165
N-Düngung gesamt in $\text{kg N}_{\text{ges}} \text{ ha}^{-1}$						
Mittelwert	240	232	257	255	235	225
MIN	198	164	190	202	90	132
MAX	330	300	336	296	348	378

Der zum Teil sehr große Anteil an organischen Düngern ist ein Grund für die hohen maximalen Gesamt-Stickstoffwerte, die zwischen $296 \text{ kg N}_{\text{ges}} \text{ ha}^{-1}$ in BKR D und $378 \text{ kg N}_{\text{ges}} \text{ ha}^{-1}$ in BKR F („Nordwestbayern-Franken“) liegen. Dies verdeutlicht vor allem Tabelle 16, in der die einzelbetrieblichen Gesamt-Stickstoffgaben mit ihren Anteilen an organischer und mineralischer Düngung exemplarisch für das Erntejahr 2016 aufgeführt sind. In den Betrieben A4 und C3 beispielsweise liegt der Anteil organischer Düngemittel bei jeweils knapp 70 %, wodurch die Gesamt-Stickstoffmenge mit 330 bzw.

317 kg N_{ges} ha⁻¹ vergleichsweise sehr hoch ist. Grund hierfür ist, dass bei einer organischen Düngung nicht der gesamte Stickstoff für die Pflanze im Anbaujahr zur Verfügung steht und nach DüV [12][13] auch nur anteilig (zwischen 50 und 70 %) bei der Düngeplanung angerechnet werden muss (vgl. Unterkapitel 2.4). Die hohen Gesamtstickstoffmengen der Betriebe D3 und F9 in Höhe von 294 bzw. 328 kg N_{ges} ha⁻¹ sind nicht vorwiegend auf den Anteil an organischer Düngung (33,1 bzw. 41,2 %) zurückzuführen. Hier werden auch große Mengen an mineralischen Stickstoffdüngern ausgebracht.

Tabelle 16: Betriebsspezifische Auswertung der mineralischen und organischen Stickstoffdüngung bezogen auf das Erntejahr 2016 mit ihren Anteilen an der Gesamt-Stickstoffdüngung

Betriebs-ID	N-Menge gesamt in kg N _{ges} ha ⁻¹	N-Menge org. in %		N-Menge mineral. in %	
		Herbst	Frühjahr	Herbst	Frühjahr
A1	229	0,0	0,0	17,1	82,9
A2*	233	0,0	0,0	22,3	77,7
A3	239	36,9	0,0	0,0	63,1
A4	330	25,6	42,8	0,0	31,5
A5	198	0,0	0,0	0,0	100,0
B1	228	19,5	0,0	0,0	80,5
B2	230	20,0	0,0	0,0	80,0
B3	255	28,9	0,0	0,0	71,1
B4*	250	28,0	0,0	0,0	72,0
B5	280	32,1	0,0	0,0	67,9
B6	265	31,7	0,0	0,0	68,3
B7	269	29,0	0,0	0,0	71,0
B8	191	53,3	0,0	0,0	46,7
B9	210	39,6	22,0	0,0	38,4
C1	218	34,9	0,0	0,0	65,1
C2	262	38,9	0,0	0,0	61,1
C3	317	67,8	0,0	0,0	32,2
C4	294	29,8	0,0	0,0	70,2
C5	206	0,0	0,0	12,6	87,4
D1	264	28,4	0,0	6,8	64,8
D2	230	30,5	0,0	0,0	69,5
D3	294	33,1	0,0	0,0	66,9
D4	269	23,8	0,0	11,3	64,9

Betriebs-ID	N-Menge gesamt in kg N _{ges} ha ⁻¹	N-Menge org. in %		N-Menge mineral. in %	
		Herbst	Frühjahr	Herbst	Frühjahr
E1	259	38,2	0,0	0,0	61,8
E2	90	0,0	0,0	0,0	100,0
E3	227	30,9	0,0	0,0	69,1
E4	273	41,7	0,0	0,0	58,3
F1	204	0,0	0,0	0,0	100,0
F2	238	32,0	0,0	0,0	68,0
F3	171	0,0	0,0	0,0	100,0
F4	197	0,0	0,0	21,4	78,6
F5	229	47,6	0,0	0,0	52,4
F6	177	0,0	0,0	16,9	83,1
F7	224	24,1	0,0	0,0	75,9
F8	233	29,3	0,0	0,0	70,7
F9	328	41,2	0,0	10,4	48,5

* Daten beziehen sich auf das Erntejahr 2015, da für 2016 keine Daten erhoben werden konnten.

Weiterhin geht aus Tabelle 16 der Düngezeitpunkt hervor, zu dem die unterschiedlichen Düngerarten angewendet werden. Hier fällt auf, dass die Ausbringung der organischen Düngemittel vorwiegend im Herbst erfolgt. Nur in den Betrieben A4 und B9 findet zusätzlich zur Herbstdüngung auch im Frühjahr eine organische Düngung statt. Insgesamt werden in 77 % aller Betriebe organische Düngemittel in Form von Schweinegülle, Rindergülle oder Biogasgärresten eingesetzt. In den Betrieben ohne organische Düngung erfolgt die Herbstdüngung zum Teil mineralisch, wobei die Betriebe D1, D4 und F9 im Herbst sowohl organischen als auch mineralischen Stickstoff im Rapsanbau einsetzen. Die Betriebe A5, E2, F1 und F3 kommen dagegen ganz ohne eine Düngung im Herbst aus. In diesen Betrieben liegt die Gesamt-Stickstoffmenge zwischen 90 und 204 kg N_{ges} ha⁻¹. Die ausgebrachte Stickstoffmenge je Hektar ist in diesen Betrieben insbesondere im Vergleich zu den Betrieben mit einer organischen Herbstdüngung somit deutlich geringer. Auffällig ist auch die sehr geringe Gesamt-Stickstoffdüngung im Betrieb E2 von 90 kg N_{ges} ha⁻¹. Darüber hinaus ist die Gesamt-Stickstoffmenge von 191 kg N_{ges} ha⁻¹ bei einem Anteil von über 50 % organischer Düngung ebenfalls geringer als der für den Rapsanbau empfohlene Stickstoffbedarfswert nach DüV (2007) [13]. Die aufgefallenen Unstimmigkeiten in der Gesamtstickstoffmenge dieser beiden Betriebe konnten innerhalb des Projektverlaufs nicht aufgeklärt werden.

Neben der Differenzierung zwischen mineralischer und organischer Düngung wurden auch die unterschiedlichen Mineraldüngerarten spezifisch erfasst, da die Art des Mineraldüngers und hier insbesondere die Form des mineralischen Stickstoffdüngers einen großen Einfluss auf das Ergebnis der THG-Bilanz haben [21]. Denn während die Bereitstellung organischer Dünger in der THG-Bilanz generell mit null bewertet wird, spielt das

Herstellungsverfahren der verschiedenen Mineraldünger eine wesentliche Rolle bei der Bewertung der THG-Emissionen. So ist beispielsweise die Ammoniaksynthese (Haber-Bosch-Verfahren), die zur Bereitstellung mineralischer Nitrat- und Ammoniumdünger dient, sehr energieintensiv und dadurch mit hohen THG-Emissionen verbunden. Unter anderem in [21] wurde bereits aufgezeigt, dass die THG-Emissionen der Herstellung von Nitratstickstoff am höchsten und von Carbamid-Stickstoff bzw. Harnstoff am niedrigsten sind. Allerdings werden die meisten mineralischen Stickstoffdünger jedoch aus mehreren Stickstoffformen zusammengesetzt (siehe Tabelle 17). Auf Basis der aufgeführten Zusammensetzungen wurden die erhobenen Mineraldüngerarten den Datenbankprozessen von ecoinvent v3.3 [49] zugeordnet.

Tabelle 17: Zusammensetzung einer Auswahl von N-Düngern nach Stickstoffform

Bezeichnung	Nährstoffgehalt in % bzw. in kg dt ⁻¹			
	Gesamt-N	Nitrat-N	Ammonium-N	Carbamid-N
Alzon 46	46	–	–	46
Alzon flüssig	28	7	7	14
AHL 30	30	7	8	15
ASS 26	26	7	19	–
Harnstoff 46	46	–	–	46
KAS 27	27	13,5	13,5	–
Piamon 33 S	33		10,4	22,6
Sulfan	24	12,0	12,0	–
NPK-N	15	9	6	–

Aus ackerbaulicher Sicht sind allerdings auch die unterschiedliche N-Effizienz und Wirkgeschwindigkeit der unterschiedlichen Düngerarten zu beachten, die sich nicht nur zwischen organischen Düngern und Mineraldüngern unterscheiden. Insbesondere in der Wirkgeschwindigkeit unterscheiden sich auch die in den N-Mineraldüngern enthaltenen mineralischen Stickstoffformen. Nitrat-N wird in hohen Mengen direkt von den Pflanzen aufgenommen, während Ammonium-N nur in geringen Mengen direkt von den Pflanzen aufgenommen wird. Der größte Teil von Ammonium-N wird durch Bodenmikroben in Nitrat-N umgewandelt. Ein weiterer Teil von Ammonium-N wird durch Bodenmikroben in der organischen Bodensubstanz immobilisiert. Carbamid-N (Harnstoff) muss durch Bodenenzyme zu Ammonium-N hydrolysiert werden, was je nach Temperatur einen Tag bis eine Woche dauern kann [21][5]. Folglich kann die Wahl der unterschiedlichen Mineraldünger auch von regionalen und betriebsspezifischen Faktoren abhängen.

Die relativen Anteile der erhobenen betriebs- und jahresspezifisch eingesetzten Mineraldünger bezogen auf die eingesetzte N-Menge in allen untersuchten Betrieben und Ernte-

jahren zeigt Abbildung 10. Es wird deutlich, dass mit 45 % knapp die Hälfte aller Betriebe einen schwefelhaltigen Stickstoffdünger (ASS und Sulfan) verwendet. Der Schwefelgehalt variiert hierbei zwischen 13 % beim ASS und mindestens 6 % beim Sulfan. Grund für die Wahl eines schwefelhaltigen Stickstoffdüngers ist der hohe Schwefelbedarf der Rapspflanze, der bei einem durchschnittlichen Ertrag von 40 dt ha^{-1} bei $55\text{--}60 \text{ kg ha}^{-1}$ liegt. Insbesondere auf leichten und flachgründigen Standorten sowie in Jahren mit hohen Herbst- und Winterniederschlägen ist auf eine ausreichende Schwefelversorgung zu achten, da andernfalls mit einem Schwefelmangel und somit mit erheblichen Ertragseinbußen zu rechnen ist. Da die Schwefelaufnahme parallel zur Stickstoffaufnahme erfolgt, ist eine gemeinsame Ausbringung beider Nährstoffe im Frühjahr zu empfehlen [5]. Deshalb werden die weiteren Stickstoffdünger wie beispielsweise Kalkammonsalpeter oder NPK-Dünger oftmals durch eine Schwefelkomponente ergänzt. Die Anwendung reiner Mikronährstofflösungen mit einem hohen Schwefelgehalt wie Bittersalz oder Mircotop[®] ist eher die Ausnahme.

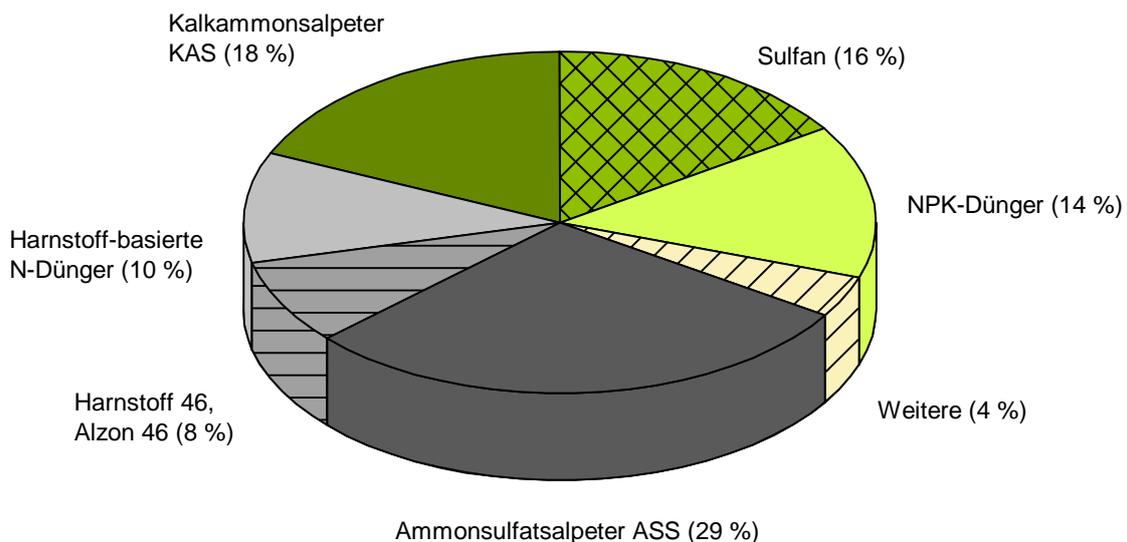


Abbildung 10: Relative Anteile der verwendeten N-Mineraldünger bezogen auf die eingesetzte N-Menge in Summe aller untersuchten Betriebe und Erntejahre

In Bezug auf die Höhe der THG-Emissionen eines N-Mineraldüngers ist jedoch vielmehr die in dem jeweiligen Dünger enthaltene Stickstoffform entscheidend (siehe oben). So wirkt sich die Zusammensetzung eines Harnstoff-basierten N-Düngers wie beispielsweise Piamon 33 S sehr positiv auf die THG-Bilanz aus (vgl. Tabelle 17). Weiterhin ist die Verwendung von ASS mit einem geringen Nitrat-N-Gehalt von 7 % bei einem Gesamtstickstoffgehalt von 26 % mit einer vergleichsweise geringen THG-Emission verbunden. Die Stickstoffzusammensetzung der Mineraldünger Sulfan, Kalkammonsalpeter (KAS) und NPK dagegen zeichnet sich durch einen Nitratgehalt von zum Teil mehr als 50 % am jeweiligen Gesamtstickstoffgehalt aus und wirkt sich somit eher ungünstig auf die Höhe

der THG-Emissionen aus. Diese Mineraldünger werden in den untersuchten Betrieben zu ca. 50 % eingesetzt (vgl. Abbildung 10).

Ein bedeutender Jahreseffekt ist bei der Wahl der verwendeten N-Mineraldünger nicht nachzuweisen. Wie Tabelle 18 zeigt, ist jedoch ein leichter Anstieg bei der Verwendung von Harnstoff-basierten N-Düngern zu beobachten, während die Anwendung von Kalkammonsalpeter kontinuierlich abgenommen hat. Der Anteil von ASS 26 bleibt mit 26,7–29,9 % nahezu konstant.

Tabelle 18: Relative Anteile der verwendeten N-Mineraldünger für alle untersuchten Betriebe, aufgeteilt nach Erntejahr

	Anteile der verwendeten N-Mineraldünger in %			
	2013	2014	2015	2016
ASS 26	29,9	29,4	29,8	26,7
Harnstoff 46/Alzon 46	6,4	9,1	6,9	10,0
Harnstoff-basierte N-Dünger (Alzon flüssig, AHL, Piamon)	8,0	9,5	11,6	12,8
KAS 27	20,8	19,0	18,0	15,4
Sulfan	16,0	14,4	12,8	20,4
NPK	15,9	15,5	15,2	11,1
Rest	3,0	3,2	5,8	3,6

Die regionalspezifische Auswertung der verwendeten N-Mineraldünger zeigt dagegen deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Boden-Klima-Räumen (siehe Tabelle 19). Im BKR A „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“ wird mit 71,2 % der Schwefeldünger ASS eingesetzt, gefolgt von Harnstoff-basierten N-Düngern mit 10,1 %. Insgesamt liegt der Anteil von Mineraldüngern mit einem geringen THG-Rucksack (geringer Anteil an Nitrat-N im Dünger) bei über 85 %. Im BKR D „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“ werden mit knapp 65 % Mineraldünger ohne bzw. mit einem geringen Anteil an Nitrat-N eingesetzt. Davon fallen etwas mehr als 20 % auf Harnstoff bzw. Alzon sowie Harnstoff-basierte N-Dünger und 41 % auf ASS. Der Anteil von N-Mineraldüngern mit einem hohen THG-Rucksack (hoher Anteil an Nitrat-N) ist im BKR E „Gäu, Donau- und Inntal“ mit über 70 % am höchsten, gefolgt von BKR F „Nordwestbayern-Franken“ mit einem Anteil von 56 %. Auffällig ist auch der hohe Anteil an KAS von 18,5 bis 27,2 % in allen Boden-Klima-Räumen mit Ausnahme des BKR A. Dort spielt die Anwendung von KAS mit etwa 2 % nur eine untergeordnete Rolle. Ein Grund für den vermehrten Einsatz von Kalkammonsalpeter ist der bereits im Dünger enthaltene Kalkanteil von 4 %, wodurch die Kalkzehrung im Boden deutlich vermindert und je nach pH-Wert des Bodens eine zusätzliche Kalkung vermieden werden kann. Folglich ist bei Böden mit geringen pH-

Werten auch die vermehrte Anwendung von versauernden Düngern zu vermeiden oder eine zusätzliche Kalkung zum Ausgleich des pH-Wertes zu berücksichtigen.

Tabelle 19: Relative Anteile der verwendeten N-Mineraldünger in Summe aller Erntejahre aufgeteilt nach Boden-Klima-Raum

	Boden-Klima-Räume					
	A	B	C	D	E	F
Anzahl Betriebe	5	9	5	4	4	9
	Anteile der verwendeten N-Mineraldünger in %					
ASS 26	71,2	18,6	31,3	40,9	0,0	21,4
Harnstoff 46/Alzon 46	4,3	5,8	0,3	15,7	0,0	11,9
Harnstoff-basierte N-Dünger (Alzon flüssig, AHL, Piamon)	10,1	18,7	8,2	6,9	23,2	0,5
KAS 27	2,3	19,2	18,5	20,0	27,2	21,6
Sulfan	2,8	22,2	6,4	11,8	44,4	11,1
NPK	8,2	15,6	27,0	0,4	0,0	23,1
Rest	1,0	0,0	0,0	4,2	5,1	10,4

4.2 Spezifische Datenerhebung und Stoffstromanalyse der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion

Die betriebsspezifischen Eingangsdaten der Rapsölkraftstoffproduktion sind für die drei untersuchten dezentralen Ölmühlen und die Verarbeitungsjahre 2013–2017 in Tabelle 20 aufgeführt. Hierbei handelt es sich um eine Fortschreibung der Analyse und Bewertung von DRESSLER, ENGELMANN et al. (2016) [21].

Tabelle 20: Eingangsdaten der Rapsölkraftstoffproduktion für die drei untersuchten dezentralen Ölmühlen, Verarbeitungsjahre 2013–2017

	Verarbeitungsjahre			
	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017
	Ölmühle X in Boden-Klima-Raum A			
Auslastung in %	23	27	18	16
Strombedarf in MJ kg ⁻¹ Rapssaar	0,184	0,184	0,184	0,184
Feuchte der Rapssaar vor Trocknung in %	12	7,5	10,7	7,2

	Verarbeitungsjahre			
	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017
Feuchte der Rapssaat nach Trocknung in %	8	7	7	7
Menge der Rapssaat zur Trocknung in %	3	25	10	25
Fremdbesatz vor Reinigung in %	0,3	1,62	036	0,49
Fremdbesatz nach Reinigung in %	0	0	0	0
Fremdbesatz nach Feinreinigung in %		keine Feinreinigung		
Ölgehalt der Rapssaat in %	0,43	0,4275	0,4387	0,4327
Ölausbeute in kg Trüböl kg ⁻¹ Rapssaat	0,362	0,351	0,34	0,35
Rapspresskuchen in kg kg ⁻¹ Rapssaat	0,618	0,634	0,645	0,635
Allokationsfaktor Rapsöl	51,49	50,12	48,85	49,96
	<i>Ölmühle Y in Boden-Klima-Raum B</i>			
Auslastung in %	30	41	26	24
Strombedarf in MJ kg ⁻¹ Rapssaat	0,252	0,258	0,307	0,309
Feuchte der Rapssaat vor Trocknung in %	7	7	7	7,5
Feuchte der Rapssaat nach Trocknung in %	7	7	7	7
Menge der Rapssaat zur Trocknung in %	0	0	0	100
Fremdbesatz vor Reinigung in %	1,5	1,5	1,5	1,5
Fremdbesatz nach Reinigung in %	0,5	0,65	0,4	0,6
Fremdbesatz nach Feinreinigung in %	0	0	0	0
Ölgehalt der Rapssaat in %	0,44	0,425	0,435	0,425
Ölausbeute in kg Trüböl kg ⁻¹ Rapssaat	0,365	0,354	0,361	0,349
Rapspresskuchen in kg kg ⁻¹ Rapssaat	0,625	0,636	0,619	0,631
Allokationsfaktor Rapsöl	51,41	50,26	51,33	50,09

	Verarbeitungsjahre			
	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017
<i>Ölmühle Z in Boden-Klima-Raum C</i>				
Auslastung in %	25	29	25	30
Strombedarf in MJ kg ⁻¹ Rapssaat	0,210	0,210	0,187	0,204
Feuchte der Rapssaat vor Trocknung in %	7,3	6,9	6,83	7,026
Feuchte der Rapssaat nach Trock- nung in %	7	6,9	6,83	7
Menge der Rapssaat zur Trocknung in %	100	0	0	100
Fremdbesatz vor Reinigung in %	3	3	3	3
Fremdbesatz nach Reinigung in %	0,5	0,78	0,62	0,57
Fremdbesatz nach Feinreinigung in %	0	0	0	0
Ölgehalt der Rapssaat in %	0,4302	0,4342	0,4433	0,441
Ölausbeute in kg Trüböl kg ⁻¹ Rapssaat	0,374	0,3677	0,3881	0,3743
Rapspresskuchen in kg kg ⁻¹ Rapssaat	0,616	0,6223	0,6019	0,6157
Allokationsfaktor Rapsöl	52,38	51,70	53,88	52,41

4.3 Bilanzierungs- und Bewertungsmodell

Das Bilanzierungs- und Bewertungsmodell für die Rapserzeugung und dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion basiert auf den getroffenen Annahmen und der Festlegung zur ökologischen Bewertung in Unterkapitel 3.5 sowie auf den spezifischen Datenerhebungen der Stoffstromanalyse in den Unterkapiteln 4.1 und 4.2. Das Modell wurde mit der Ökobilanzsoftware GaBi ts[®] und den Ökobilanzdatenbanken GaBi-Professional 2012, GaBi-Zusatzdatenbank Nachwachsende Rohstoffe 2012 (jeweils Stand Oktober 2017) sowie ecoinvent v3.3 (Stand Oktober 2017) erstellt. Die modulare Struktur der Ökobilanzsoftware erlaubt es, jeden Prozessabschnitt (z. B. Arbeitsverfahren) bis hin zur Bereitstellung der jeweiligen Vorleistungen (z. B. Pflanzenschutzmittel- bzw. Mineräldüngerproduktion) einzeln abzubilden. Die Abschnitte lassen sich dann zum vollständigen Produktsystem der Rapserzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion zusammensetzen. Auf diese Weise wurden 36 verschiedene Modelle für jeweils bis zu vier Erntejahre für die einzelbetriebliche Rapserzeugung neu erstellt. Grund für die einzelbetriebliche Modellierung ist die Berücksichtigung der spezifischen einzelbetrieblichen Gege-

benheiten zum Ertrag, dem Nährstoffmanagement, den daraus resultierenden N₂O-Feldemissionen und den spezifischen Arbeitsverfahren. Die bereits bestehenden Ökobilanzmodelle für den Transport der Rapssaat und für die dezentrale Rapserzeugung in den Ölmühlen wurden für die Wirtschaftsjahre 2015/2016 und 2016/2017 auf Basis von [21] fortgeschrieben.

Modellierung der Rapserzeugung

Wie beschrieben unterscheiden sich die Ökobilanzmodelle der Rapserzeugung durch den spezifischen Nährstoffbedarf, die daraus resultierenden N₂O-Feldemissionen, den Ertrag und die Arbeitsverfahren. Für eine transparente und vereinfachte Darstellung wurde in einem ersten Schritt ein Basismodell erstellt, in dem der Ertrag und die Berechnung der spezifischen N₂O-Feldemissionen parametrisiert sind (siehe Abbildung 11). Der zentrale Prozess „Cultivation Rapeseed“ ist auf einen Hektar Anbaufläche fixiert, sodass alle Inputgrößen, die in diesen Prozess hineingehen, ebenfalls auf einen Hektar bezogen werden. Dies geht aus der Berechnung der spezifischen N₂O-Feldemissionen hervor, die „von oben“ mit 10.000 m² in den zentralen Prozess geht. „Von der linken Seite“ fließen alle erforderlichen Pflanzenschutzmittel und Wachstumsregulatoren in den Prozess. „Von der rechten Seite“ geht das spezifische Arbeitsverfahren in den Prozess. Hier in diesem Beispiel bezieht sich das Arbeitsverfahren auf eine pfluglose Bearbeitung eines leichten Bodens. Dieses Arbeitsverfahren ist in Abbildung 12 detailliert dargestellt. Es umfasst die Prozesse [A1.1] Bodenaufbereitung, [A1.2] Pflanzen/Aussaat, [A2.4] Düngung, [A2.5] Pflanzenschutz und Unkrautregulierung sowie [A3.1] Ernte Biomasse. Die verschiedenen Pläne der Arbeitsverfahren unterscheiden sich insbesondere in der Art der Bodenaufbereitung sowie in der von der Bodenart abhängigen Auswahl der verwendeten Maschinen (siehe Abschnitt 4.1.3).

Weiterhin gehen „von der rechten Seite“ alle erforderlichen Mineraldünger in den zentralen Prozess des Basisplans. Der Mineraldüngereinsatz ist jedoch von Betrieb zu Betrieb und zum überwiegenden Teil sogar von Jahr zu Jahr unterschiedlich. Eine Parametrisierung kann somit nicht durchgeführt werden. Deshalb wurden auf Grundlage des in Abbildung 11 dargestellten Basisplans für alle 36 Betriebe und jeweils bis zu vier Erntejahren insgesamt 135 betriebspezifische Pläne modelliert. In Abbildung 13 ist der spezifische GaBi-Plan der Rapserzeugung im Betrieb F9 bezogen auf das Erntejahr 2016 dargestellt. Hier ist der zentrale Prozess auf die Produktion von 1 kg Rapssaat fixiert. Die Prozesse zur Berechnung der spezifischen N₂O-Feldemissionen sowie der Arbeitsverfahren zeigen, dass in diesem Betrieb im Erntejahr 2016 für den Anbau von 1 kg Saat eine Fläche von 1,97 m² erforderlich war.

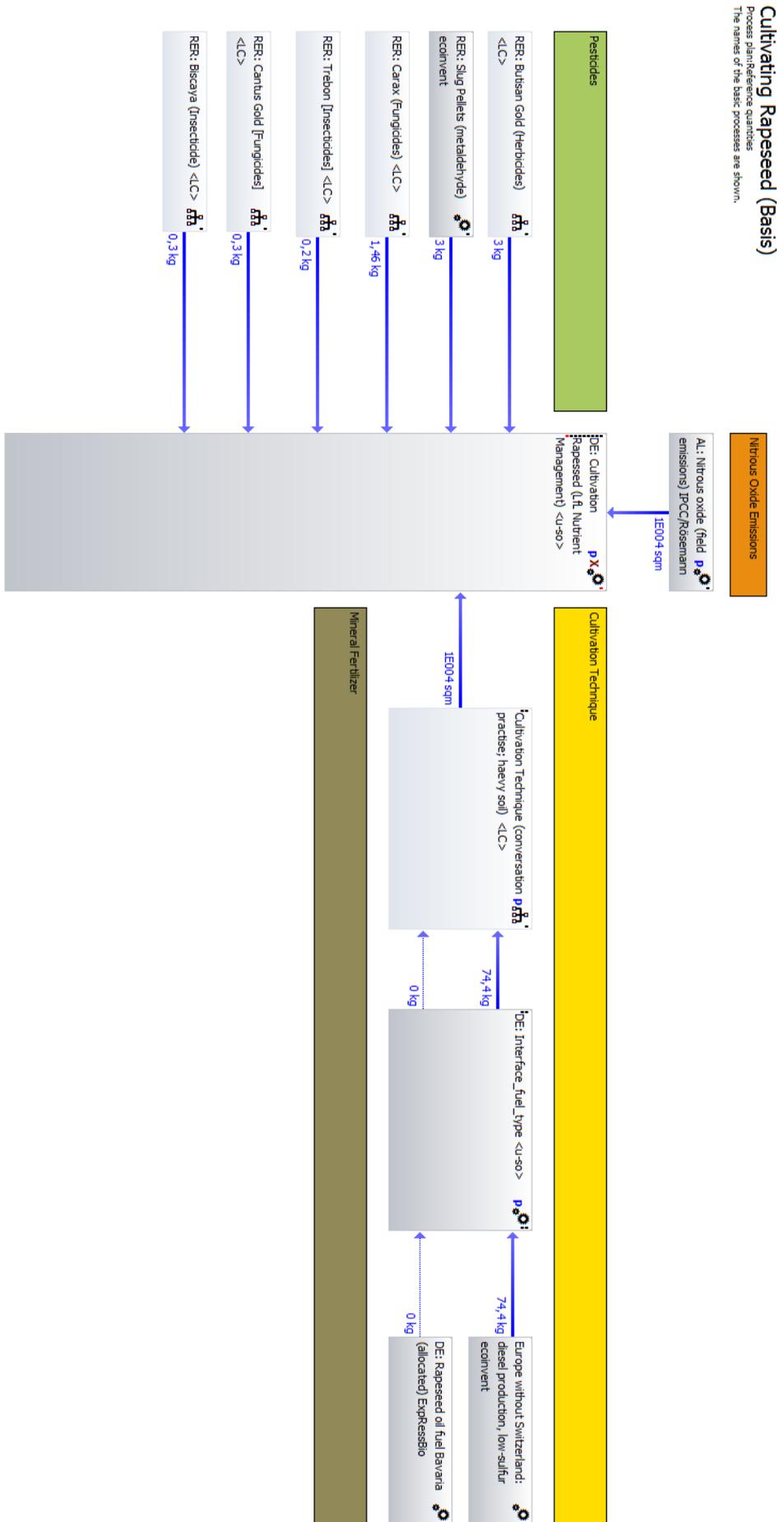


Abbildung 11: Gabi-Bilanzierungsmodell für die Rapserzeugung (Basis-Modell)

Cultivation Technique (conservation practise; light soil)

The names of the basic processes are shown.

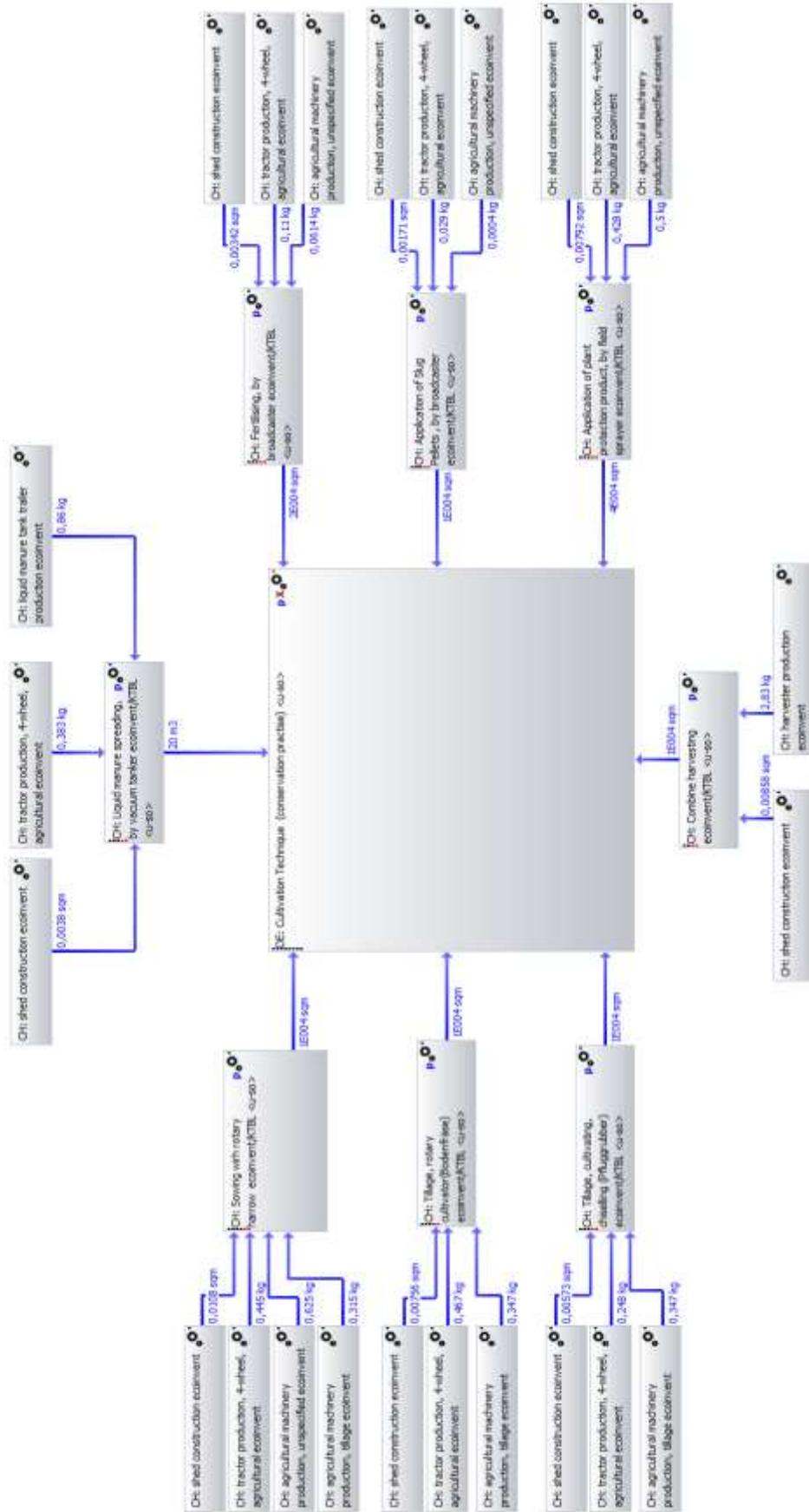


Abbildung 12: GaBi-Bilanzierungsmodell für die Arbeitsprozesse der Rapserzeugung am Beispiel einer pfluglosen, konservierenden Bearbeitung auf leichtem Boden

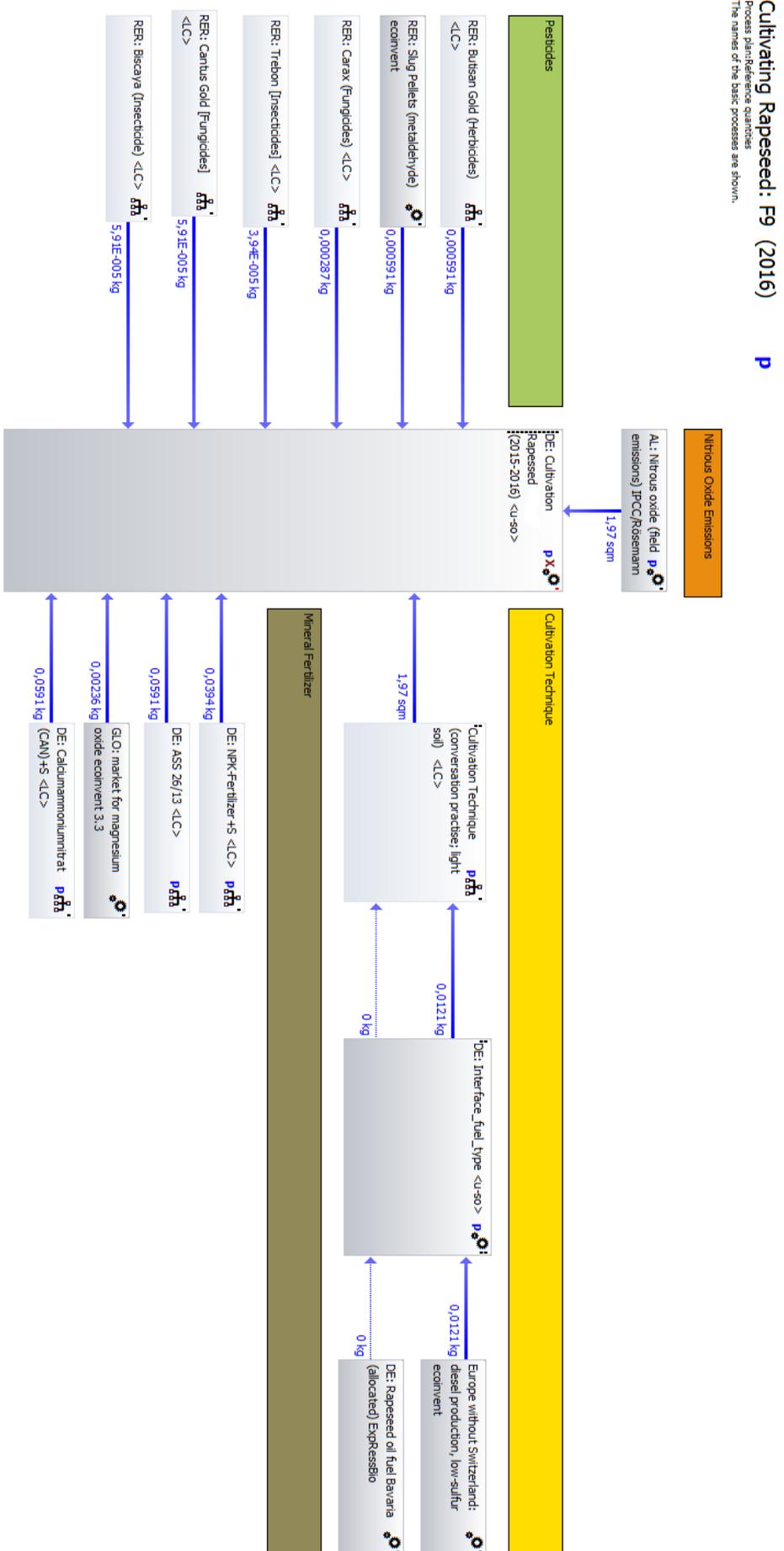


Abbildung 13: Gabi-Bilanzierungsmodell für die Rapserzeugung für den Betrieb F9 im Boden-Klima-Raum „Nordwestbayern-Franken“ für das Erntejahr 2016

Modellierung der Transportprozesse

Anders als im Projekt ExpResBio wird in den vorliegenden Untersuchungen der Transport der Rapssaat zur Ölmühle nicht entsprechend der Entfernung zur Ölmühle betriebs-spezifisch vorgenommen. Der Transportprozess (vgl. GaBi-Plan in Abbildung 14) ist in Anlehnung an DRESSLER, ENGELMANN et al. (2016) [21] mit einer Entfernung von durchschnittlich 28 km modelliert. Alle weiteren Annahmen zur Modellierung der Transportprozesse sind in [21] beschrieben.

New: Transport Rapeseed with tractor

Process plan: Reference quantities

The names of the basic processes are shown.

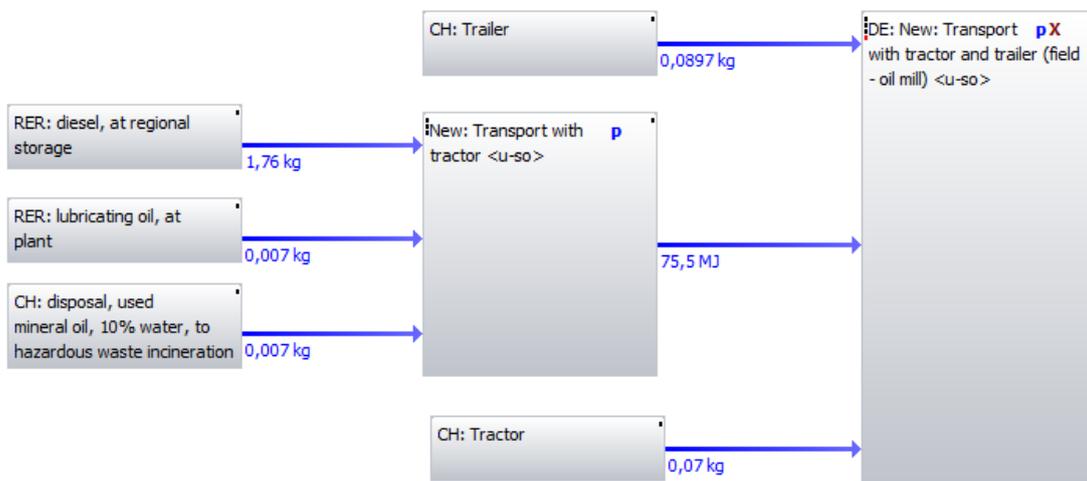


Abbildung 14: GaBi-Bilanzierungsmodell für den Transport der Rapssaat zur Ölmühle mit Traktor und Doppelzug (Basis-Modell)

Modellierung der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion

Das Modell der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion ist im Vergleich zum Projekt ExpResBio unverändert geblieben. Es fand lediglich eine Fortschreibung der Eingangsdaten für die Wirtschaftsjahre 2015/2016 und 2016/2017 statt. Das Modell ist am Beispiel der Ölmühle im Tertiär-Hügelland Donau-Süd in Abbildung 15 dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung ist den Arbeiten von DRESSLER, ENGELMANN et al. [21] zu entnehmen.

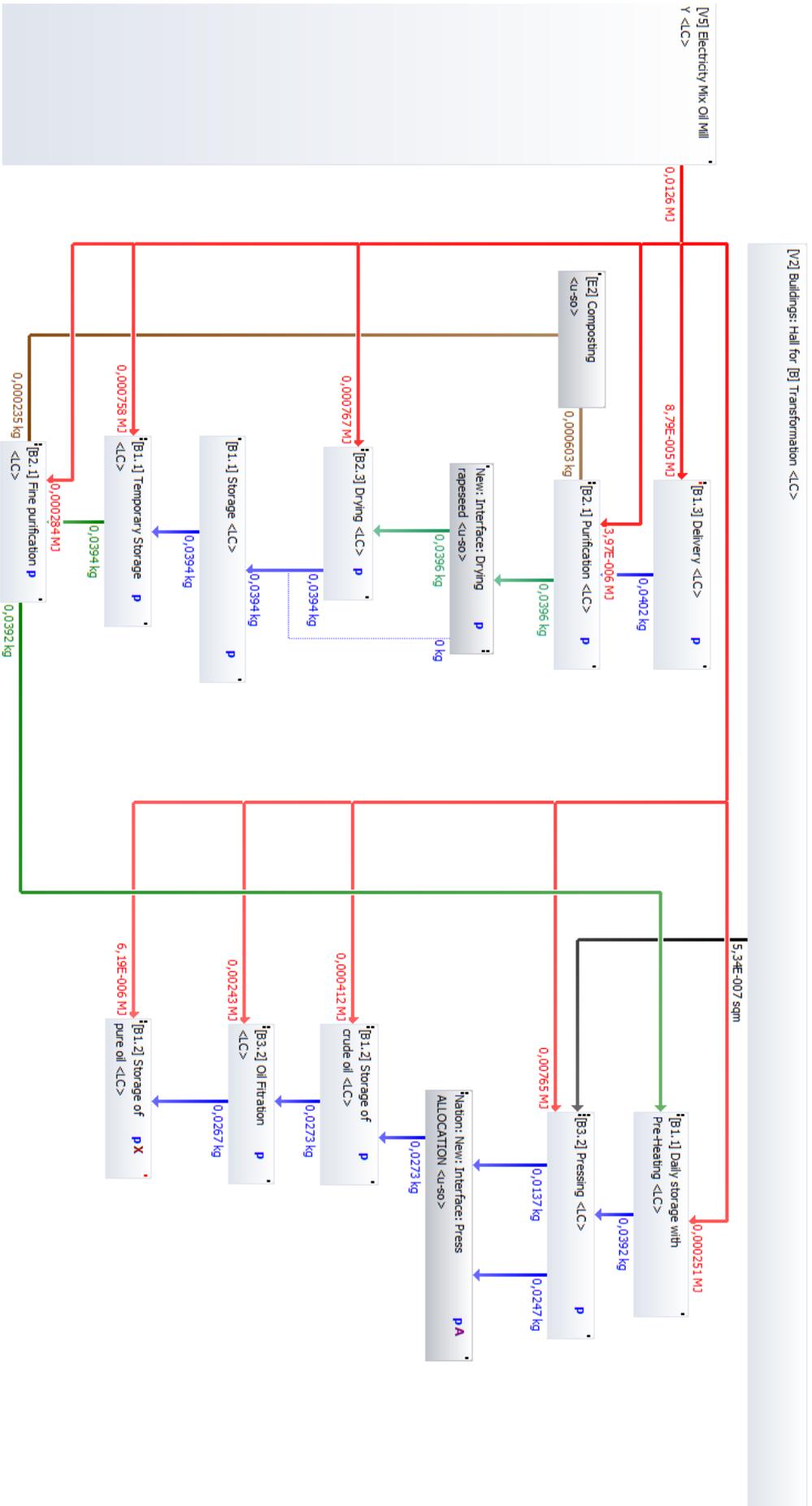


Abbildung 15: GaBi-Bilanzierungsmodell für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion am Beispiel der Ölmühle im Boden-Klima-Raum „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“

5 Ergebnisse der ökologischen Bewertung

5.1 Ökologische Bewertung der Rapserzeugung

Der Schwerpunkt der ökologischen Bewertung liegt auf der Auswertung der einzelbetrieblichen und regionalspezifischen THG-Emissionen und Stickstoffbilanzen. Darauf aufbauend wird mit einer Sensitivitätsanalyse aufgezeigt, welches Potenzial die Vorgaben der Düngeverordnung zur Reduzierung der Stickstoffsalden und der damit verbundenen THG-Emissionen mit sich bringen.

5.1.1 Einzelbetriebliche und regionalspezifische Treibhausgasemissionen

Die einzelbetrieblichen THG-Emissionen in Kilogramm CO₂-Äquivalente sind für den Anbau und die Bereitstellung von Rapssaat bezogen auf ein Kilogramm Rapssaat in Abbildung 16 dargestellt. Die Abbildung zeigt die THG-Emissionen aller untersuchten Betriebe gruppiert nach Boden-Klima-Räumen, um sowohl einzelbetriebliche als auch regionalspezifische Unterschiede darzustellen. Die Auftragung der Emissionen gibt dabei den Mittelwert der untersuchten Erntejahre 2013–2016 sowie die jahresspezifische Bandbreite an.

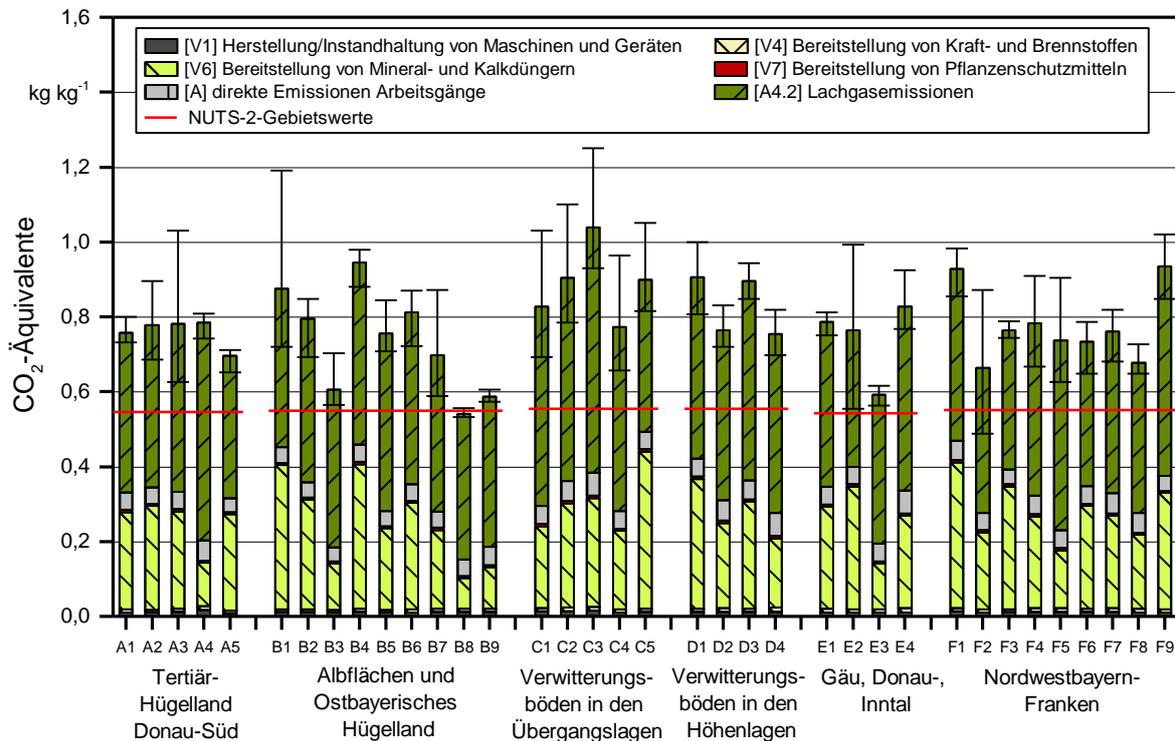


Abbildung 16: Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO₂-Äquivalente, Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016, gegliedert nach Boden-Klima-Raum

Die Ergebnisse zeigen zum Teil erhebliche jahresspezifische Bandbreiten. In Betrieb B1 variieren die THG-Emissionen zwischen $0,744 \text{ kg kg}^{-1}$ im Jahr 2016 und $1,188 \text{ kg kg}^{-1}$ im Jahr 2013. Dies entspricht einer absoluten Abweichung von $0,444 \text{ kg kg}^{-1}$. Grund für diese hohe Abweichung ist ein Ertragsausfall von 40 % aufgrund von Hagelschäden. Während die Durchschnittserträge dieses Betriebes in den Jahren 2014–2016 bei 47 dt ha^{-1} liegen, konnte im Jahr 2013 durch den Hagelschaden nur ein Ertrag von 31 dt ha^{-1} erreicht werden. In Betrieb C3 führte Trockenstress auf sandigem Boden zu Ertragsausfällen, weshalb hier die THG-Emissionen zwischen $0,928$ und $1,246 \text{ kg kg}^{-1}$ variieren. Im Betrieb E2 ist die Bandbreite auf unterschiedliche Faktoren zurückzuführen. Während im Jahr 2016 die THG-Emission mit $0,555 \text{ kg kg}^{-1}$ sehr gering ausfällt, ist sie im Jahr 2016 mit $0,993 \text{ kg kg}^{-1}$ sehr hoch. Für das Jahr 2016 wurde nur eine N-Gesamtdüngung von $90 \text{ kg N}_{\text{ges}}$ bei einem Ertrag von 33 dt angegeben. Diesbezüglich wurde bereits in Abschnitt 4.1.5 auf mögliche Defizite in der Datenqualität hingewiesen. Darüber hinaus konnte im Jahr 2015 nur ein Ertrag von 38 dt erzielt werden, während in den Jahren 2014 und 2013 die Erträge bei 49 dt lagen. Ein Ertragsausfall ohne Angabe von Gründen ist auch die Ursache der hohen Ergebnisbandbreite in Betrieb F2.

Weiterhin geht aus Abbildung 16 hervor, dass die THG-Emissionen auch zwischen den einzelnen Betrieben große Spannbreiten aufweisen. Die höchsten THG-Emissionen je Kilogramm Rapssaat werden mit durchschnittlich $1,039 \text{ kg kg}^{-1}$ in Betrieb C3 erreicht. In Betrieb B8 sind die THG-Emissionen mit $0,541 \text{ kg kg}^{-1}$ am niedrigsten (vgl. auch Tabelle 21). Die Spannbreite liegt bei $0,498 \text{ kg}$ und ist damit fast so hoch wie die mit den roten Linien gekennzeichneten NUTS-2-Werte, die als Standardwerte zur Berechnung der THG-Minderung von Biokraftstoffen dienen (siehe Unterkapitel 2.2).

Ursache für die hohen THG-Werte in Betrieb C3 sind vor allem die konstant geringen Erträge ($\bar{\text{Ø}} 32,9 \text{ dt ha}^{-1}$, max. 35 dt ha^{-1}) bei einer nicht auf das Ertragsniveau angepassten Stickstoffdüngung (Bodenwertzahl 31, trockener Standort). Im Durchschnitt über vier Jahre wurden in diesem Betrieb mineralische und organische Stickstoffmengen in Höhe von 279 kg ha^{-1} ausgebracht. Davon wurden 134 kg mineralisch in Form von Kalkammonsalpeter und/oder eines NPK-Düngers sowie 145 kg ha^{-1} durch Biogasgärreste ausgebracht. Der Anteil der organischen Düngung dieses Betriebs liegt bei durchschnittlich 50 %, im Jahr 2016 sogar bei 67 %. Der hohe Anteil organischer Düngemittel führt aufgrund von Ausbringungsverlusten und ihrer geringeren Wirksamkeit im Anbaujahr zu einer geringeren Stickstoffeffizienz. Dies hat höhere N_2O -Feldemissionen zur Folge, wie die in Abbildung 16 dargestellten einzelnen Prozesse zeigen. Dass ein geringes Ertragspotenzial nicht zwangsläufig der Grund für hohe THG-Emissionen ist, verdeutlichen die hohen THG-Emissionen des Betriebes F9 im Boden-Klima-Raum „Nordwestbayern-Franken“ mit durchschnittlich $0,935 \text{ kg kg}^{-1}$. Im Vergleich zu Betrieb C3 zeichnet sich dieser Betrieb mit durchschnittlich $47,7 \text{ dt ha}^{-1}$ durch sehr hohe Erträge aus. Allerdings liegt die Menge an ausgebrachtem organischen und mineralischen Stickstoff in diesem Betrieb bei durchschnittlich 342 kg ha^{-1} . Der Anteil der organischen Düngung liegt bei 40 %, was zu sehr hohen N_2O -Feldemissionen führt (knapp 60 % an den Gesamtemissionen (siehe Tabelle 21)). Bezogen auf alle Betriebe zeigt Tabelle 21, dass die aus der N-Düngung resultierenden N_2O -Feldemissionen [A4.2] einen Anteil von mehr als 50 % an

den Gesamtemissionen haben. Der zweite das Bilanzergebnis dominierende Faktor ist der Prozess [A-V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdünger. In Summe werden durch diese beiden Prozesse mehr als 90 % der THG-Emissionen erzeugt. Die anderen Prozesse [A-V1] Herstellung/Instandhaltung von Maschinen und Geräten, [A-V4] Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen, [A-V7] Bereitstellung von Pflanzenschutzmitteln und [A] direkte Verbrennungsemissionen der Feldarbeitsprozesse haben mit einem Anteil von etwa 10 % nur einen geringen Einfluss auf die Höhe der THG-Emissionen. Folglich ist, wie in [21] bereits herausgearbeitet, ein auf den Standort, das vorliegende Ertragspotenzial und den Betriebstyp angepasstes Nährstoffmanagement die wesentliche Stell- schraube für die Minderung der THG-Emissionen in der Rapserzeugung.

Tabelle 21: *Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO₂-Äquivalente sowie relativer Anteile der bilanzierten Prozesse (Minimum-, Maximum- und Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016)*

	CO ₂ -Äquivalente in kg kg ⁻¹			Anteil der bilanzierten Prozesse in %					
	MIN	MAX	MW	[A-V1]	[A-V4]	[A-V6]	[A-V7]	[A]	[A4.2]
Boden-Klima-Raum A									
Betrieb 1	0,731	0,800	0,757	1,4	1,1	34,2	0,8	6,2	56,3
Betrieb 2	0,685	0,895	0,778	1,2	1,0	35,7	0,7	5,6	55,8
Betrieb 3	0,625	1,033	0,781	1,5	1,1	33,3	0,7	6,0	57,4
Betrieb 4	0,742	0,809	0,784	2,2	1,3	14,7	0,8	6,9	74,1
Betrieb 5	0,651	0,711	0,696	1,3	1,0	37,0	0,8	5,2	54,7
Boden-Klima-Raum B									
Betrieb 1	0,719	1,188	0,875	1,3	0,9	43,9	0,7	4,8	48,4
Betrieb 2	0,693	0,848	0,794	1,4	1,0	36,9	0,7	5,1	54,9
Betrieb 3	0,565	0,702	0,605	1,7	1,2	20,4	0,8	6,4	69,5
Betrieb 4	0,880	0,979	0,944	1,3	1,0	40,8	0,6	4,9	51,4
Betrieb 5	0,708	0,845	0,756	1,3	1,0	28,8	0,7	5,3	62,9
Betrieb 6	0,721	0,871	0,813	1,3	1,0	35,1	0,7	5,4	56,5
Betrieb 7	0,589	0,870	0,698	1,7	1,2	30,2	0,8	6,2	59,9
Betrieb 8	0,533	0,556	0,541	2,2	1,5	15,2	1,0	8,2	71,9
Betrieb 9	0,572	0,605	0,587	2,0	1,6	18,7	1,0	8,3	68,4
Boden-Klima-Raum C									
Betrieb 1	0,693	1,03	0,827	1,6	1,1	26,5	0,7	5,8	64,3
Betrieb 2	0,785	1,1	0,904	1,6	1,1	30,8	0,7	5,8	60,0
Betrieb 3	0,929	1,25	1,039	1,4	1,1	27,9	0,7	5,8	63,1
Betrieb 4	0,657	0,964	0,773	1,4	1,1	26,9	0,7	6,2	63,7
Betrieb 5	0,815	1,05	0,898	1,3	1,0	46,8	0,6	5,1	45,2

	CO ₂ -Äquivalente in kg kg ⁻¹			Anteil der bilanzierten Prozesse in %					
	MIN	MAX	MW	[A-V1]	[A-V4]	[A-V6]	[A-V7]	[A]	[A4.2]
Boden-Klima-Raum D									
Betrieb 1	0,808	1,003	0,905	1,3	1,0	38,2	0,7	5,4	53,4
Betrieb 2	0,720	0,830	0,764	1,6	1,3	29,7	0,8	7,2	59,4
Betrieb 3	0,847	0,943	0,895	1,3	1,1	32,0	0,6	5,7	59,3
Betrieb 4	0,698	0,818	0,755	1,7	1,5	24,4	0,7	8,3	63,4
Boden-Klima-Raum E									
Betrieb 1	0,750	0,812	0,787	1,3	1,2	34,7	22	6,2	55,9
Betrieb 2	0,556	0,993	0,764	1,4	1,1	43,0	0,8	6,0	47,7
Betrieb 3	0,563	0,615	0,591	1,6	1,5	21,0	0,8	8,1	67,0
Betrieb 4	0,768	0,925	0,828	1,3	1,4	29,9	0,7	7,4	59,3
Boden-Klima-Raum F									
Betrieb 1	0,855	0,9820	0,928	1,4	1,1	41,9	0,7	5,5	49,4
Betrieb 2	0,488	0,872	0,663	1,6	1,3	30,9	1,0	6,8	58,4
Betrieb 3	0,743	0,788	0,763	1,5	1,0	42,9	0,8	5,2	48,6
Betrieb 4	0,667	0,910	0,783	1,6	1,2	31,3	0,8	6,2	58,9
Betrieb 5	0,626	0,904	0,738	1,7	1,2	21,0	0,8	6,5	68,8
Betrieb 6	0,786	0,645	0,733	1,6	1,2	37,4	0,9	6,5	52,4
Betrieb 7	0,819	0,681	0,761	1,5	1,3	32,5	0,8	7,1	56,8
Betrieb 8	0,648	0,726	0,677	1,5	1,5	29,3	0,7	7,9	59,1
Betrieb 9	0,848	1,024	0,935	1,2	0,8	33,3	0,6	4,3	59,8

Ein gut auf Standort und Betriebstyp angepasstes Nährstoffmanagement zeigt Betrieb B3. Hier liegen die THG-Emissionen im vierjährigen Mittel bei 0,605 kg kg⁻¹ und damit sehr nah am NUTS-2-Wert für diese Region (siehe Abbildung 16). Dieser Betrieb zeichnet sich durch einen konstant hohen Ertrag von durchschnittlich 47,5 dt ha⁻¹ aus, obwohl hier nur eine Bodenwertzahl von 28 Punkten angegeben wurde. Allerdings ist die Wasserversorgung mit einem durchschnittlichen Niederschlag von 808,6 mm als gut anzusehen, wodurch die Gefahr von Ertragsverlusten aufgrund von Trockenstress sinkt. Neben den stabil guten Erträgen liegt der Anteil der organischen Düngung nur bei 29 % und ist deutlich geringer als bei Betrieb C3. Folglich sind die mit der organischen Düngung verbundenen Ausbringungsverluste sowie die Stickstoffverlagerung auf nachfolgende Kulturen und damit auch die N₂O-Feldemissionen wesentlich kleiner. Weiterhin wird hier mit „Piamon 33 S“ ein Mineraldünger mit einem geringen THG-Rucksack angewendet, da Piamon nur aus Ammonium-N und Carbamid-N besteht, die beide eine geringere THG-Emission mit sich bringen als Nitrat-N. Somit ist auch der Anteil des Prozesses [A-V6] „Bereitstellung von Mineraldüngern“ an den Gesamtemissionen mit ca. 20 % vergleichsweise gering. Die verzögerte Wirksamkeit des Piamons wird im Betrieb B3 durch den

optimalen Ausbringungszeitpunkt unter Berücksichtigung der vorliegenden Boden- und Klimaeigenschaften berücksichtigt, wobei vor allem der Ausbringungszeitpunkt sehr stark von der Witterung im Frühjahr abhängt.

Wie aus den Ergebnissen von DRESSLER, ENGELMANN et al. (2016) [21] bereits hervorgeht, zeigen auch die vorliegenden Analysen und Bewertungen, dass insbesondere durch einen gezielten Einsatz organischer Dünger und eine angepasste Mineraldünger- auswahl die THG-Emissionen in der Rapserzeugung reduziert werden können. In diesem Zusammenhang verdeutlicht die Analyse des regionalspezifischen Nährstoffmanagements, dass in BKR C das Optimierungspotenzial am höchsten ist. Dort wird im Mittel sowohl am meisten organischer Stickstoff als auch am meisten Gesamtstickstoff je Hektar Anbaufläche eingesetzt, obwohl die Erträge in dieser Region mit durchschnittlich $39,4 \text{ dt ha}^{-1}$ am geringsten sind (vgl. Tabelle 15 in Abschnitt 4.1.5). Diese Erkenntnisse spiegeln sich auch in den regionalspezifischen THG-Emissionen wider, die in Abbildung 17 aufgegliedert nach Boden-Klima-Räumen als gewichtetes Mittel (vgl. Anhang III Tabelle 34 bis Tabelle 40) der einzelbetrieblichen THG-Emissionen dargestellt und für BKR C mit $0,869 \text{ kg kg}^{-1}$ am höchsten sind.

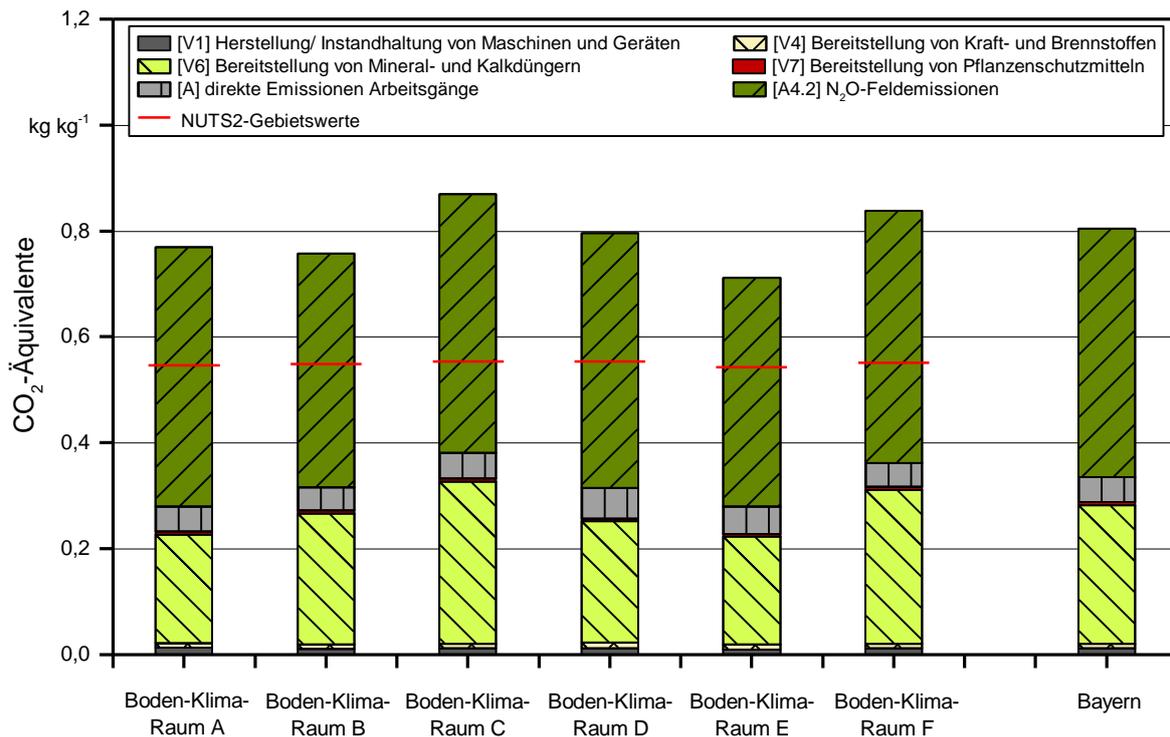


Abbildung 17: Regionalspezifische THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO₂-Äquivalente, Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016, aufgegliedert nach Boden-Klima-Raum sowie als gewichtetes Mittel für Bayern

Der hohe Anteil an organischer Düngung im BKR C ist der Grund für die hohen N₂O-Feldemissionen, die im Mittel der vier Untersuchungsjahre einen Anteil von 60 % an den THG-Emissionen haben (vgl. Tabelle 22). Weiterhin werden im BKR C mit ca. 50 % vor-

wiegend nitrathaltige Mineraldünger wie Kalkammonsalpeter, Sulfan oder NPK-Dünger eingesetzt, deren Herstellung einen hohen THG-Rucksack mit sich bringt (siehe Tabelle 19 in Abschnitt 4.1.5). Ausschlaggebend für die Wahl der nitrathaltigen Dünger in dieser Region können die vorliegende Bodentextur und der pH-Wert des Bodens sein, der beispielsweise auf einen Kalkdünger angewiesen ist. Zusätzlich ist in dieser Region zu beachten, dass durch den vergleichsweise hohen Anteil an organischer Düngung bereits sehr viel organisch gebundener Stickstoff mit Langzeitwirkung vorliegt. Eine weitere Gabe eines Düngers mit verzögerter Wirkung wie Harnstoff kann zu Ertragseinbußen führen, wenn die Umsetzung des Stickstoffs in Abhängigkeit von Boden und Witterung nicht bedarfsgerecht erfolgt. Bei der Verwendung eines nitrathaltigen Düngers besteht diese Gefahr nicht, da dieser Dünger für die Pflanze sehr schnell verfügbar ist. Die Verwendung eines NPK-Düngers sollte jedoch überprüft werden, da mit den organischen Düngern in Form von Gülle und Biogasgärresten bereits große Anteile an Phosphat und Kalium ausgebracht werden.

Tabelle 22: Regionalspezifische THG-Emissionen der Rapserzeugung als CO₂-Äquivalente sowie relativer Anteil der bilanzierten Prozesse aufgegliedert nach Boden-Klima-Raum sowie als gewichtetes Mittel für Bayern

Erntejahr	Anzahl Betriebe	CO ₂ -Äquivalente in kg kg ⁻¹	Anteil der bilanzierten Prozesse in %					
			[A1.1]	[A1.2]	[A2.3]	[A2.5]	[A3.1]	[A4.2]
Boden-Klima-Raum A								
2016	n = 4	0,721	1,8	1,2	18,4	0,8	6,4	71,4
2015	n = 5	0,814	1,6	1,1	28,9	0,7	6,1	61,6
2014	n = 5	0,811	1,6	1,1	32,0	0,7	6,0	58,6
2013	n = 4	0,731	1,7	1,2	26,2	0,8	6,2	63,9
MW		0,769	1,6	1,2	26,4	0,7	6,2	63,9
Boden-Klima-Raum B								
2016	n = 8	0,714	1,6	1,1	27,2	0,8	6,1	63,2
2015	n = 9	0,772	1,4	1,1	33,6	0,7	5,6	57,6
2014	n = 9	0,706	1,5	1,1	33,9	0,7	5,6	57,2
2013	n = 7	0,836	1,4	1,0	35,7	0,7	5,4	55,8
MW		0,757	1,4	1,1	32,6	0,7	5,7	58,5
Boden-Klima-Raum C								
2016	n = 5	0,808	1,4	1,1	32,1	0,7	5,8	58,9
2015	n = 5	0,900	1,4	1,0	36,0	0,7	5,5	55,4
2014	n = 4	0,788	1,4	1,1	37,0	0,7	5,9	53,9
2013	n = 5	0,981	1,3	1,0	35,5	0,6	5,3	56,3
MW		0,869	1,4	1,1	35,1	0,7	5,6	56,1

Erntejahr	Anzahl Betriebe	CO ₂ -Äquivalente in kg kg ⁻¹	Anteil der bilanzierten Prozesse in %					
			[A1.1]	[A1.2]	[A2.3]	[A2.5]	[A3.1]	[A4.2]
Boden-Klima-Raum D								
2016	n = 4	0,856	1,5	1,3	28,5	0,7	7,2	60,8
2015	n = 4	0,790	1,6	1,4	26,7	0,7	7,3	62,3
2014	n = 4	0,755	1,5	1,3	29,7	0,7	7,0	59,8
2013	n = 3	0,781	1,5	1,4	30,3	0,7	7,5	58,6
MW		0,796	1,5	1,4	28,8	0,7	7,2	60,4
Boden-Klima-Raum E								
2016	n = 4	0,726	1,5	1,4	26,8	0,8	7,7	61,8
2015	n = 4	0,718	1,3	1,3	32,8	0,7	7,0	56,9
2014	n = 4	0,684	1,4	1,3	24,8	0,7	6,9	64,9
2013	n = 4	0,719	1,4	1,4	29,8	0,7	7,5	59,2
MW		0,712	1,4	1,4	28,5	0,7	7,3	60,7
Boden-Klima-Raum F								
2016	n = 9	0,789	1,4	1,0	34,8	0,7	5,5	56,6
2015	n = 9	0,792	1,4	1,0	34,0	0,7	5,6	57,3
2014	n = 9	0,883	1,3	1,0	34,7	0,6	5,1	57,3
2013	n = 8	0,888	1,4	1,0	35,4	0,7	5,3	56,2
MW		0,838	1,4	1,0	34,7	0,7	5,4	56,8
Bayern								
2016	n = 34	0,777	1,5	1,2	30,7	0,7	6,0	59,9
2015	n = 36	0,794	1,5	1,1	32,6	0,7	5,9	58,2
2014	n = 35	0,797	1,4	1,1	33,3	0,7	5,7	57,8
2013	n = 31	0,847	1,4	1,1	33,7	0,7	5,8	57,3
MW		0,804	1,4	1,1	32,6	0,7	5,9	58,3

Die zweithöchsten THG-Emissionen werden mit durchschnittlich 0,804 kg kg⁻¹ in BKR F erzeugt. Diese hohen THG-Emissionen sind vorwiegend auf die schlechten einzelbetrieblichen THG-Bilanzen der Betriebe F1 und F9 zurückzuführen, da diese beiden Betriebe einen Anteil von mehr als 50 % am gewichteten Mittel dieser Region (vgl. Anhang III) haben. Die Rapserzeugung der anderen Betriebe in diesem BKR führt zu deutlich geringeren THG-Emissionen, die im Mittel der vier Erntejahre bei 0,733 kg kg⁻¹ liegen. Im Allgemeinen zeichnet sich diese Region mit 41,4 dt ha⁻¹ durch mittlere Erträge aus. Der Anteil an organischer Düngung ist in dieser Region am geringsten, zeigt jedoch einzelbetrieblich große Unterschiede (vgl. Tabelle 16 in Abschnitt 4.1.5). Allerdings ist der Anteil an nitrathaltigen Düngern in BKR F mit 50 % vergleichsweise hoch. Hier sollte insbesondere der Bedarf an NPK-Düngern in Kombination mit einer organischen Düngung überprüft werden.

Im BKR E sind die THG-Emissionen der Rapszerzeugung mit $0,712 \text{ kg kg}^{-1}$ am geringsten. Dies ist vor allem auf die hohen Erträge von durchschnittlich $45,5 \text{ dt ha}^{-1}$ bei einer durchschnittlichen Stickstoffgabe von 235 kg ha^{-1} zurückzuführen. Gleichzeitig hat die organische Düngung bei drei von vier Betrieben nur einen Anteil von durchschnittlich 30 %. Bei der Auswahl der Mineraldünger liegt der Anteil an nitrathaltigen Düngern wie Kalkammonsalpeter und Sulfan bei etwa 70 %. Hier sollte überprüft werden, ob insbesondere Sulfan nicht beispielsweise durch ein ASS mit einem geringen Nitratanteil ersetzt werden kann. Die ebenfalls sehr geringen THG-Emissionen im BKR A in Höhe von $0,769 \text{ kg kg}^{-1}$ sind vor allem durch den geringen Anteil an organischer Düngung zu begründen. Von den untersuchten Betrieben in dieser Region wird nur bei einem Betrieb organisch gedüngt. Alle anderen Betriebe setzen zu 100 % Mineraldünger ein, die zudem über einen geringen THG-Rucksack verfügen (71 % ASS und 10 % Harnstoffbasierte Dünger).

Im gewichteten Mittel aller untersuchten Betriebe und Erntejahre liegen die THG-Emissionen der Rapszerzeugung in Bayern bei $0,804 \text{ g kg}^{-1}$ und damit deutlich über den NUTS-2-Werten dieser Region (vgl. Abbildung 17). Bei den NUTS-2-Werten geht der Stickstoffbedarf zu 100 % mineralisch und in Höhe des ertragspezifischen Nährstoffentzuges in die Bilanzierung der THG-Emissionen ein, sodass diese Werte das absolute Optimum darstellen und nicht den Praxisbetrieb widerspiegeln. In Bezug auf ein optimales Nährstoffmanagement können die NUTS-2-Werte allerdings als Vergleichsgröße dienen. Denn bei der Analyse der einzelbetrieblichen und der regionalspezifischen THG-Emissionen konnten insbesondere die Menge an organisch und mineralisch ausgebrachtem Gesamtstickstoff sowie die daraus resultierenden N_2O -Feldemissionen als wesentliche Kenngrößen zur Optimierung der THG-Bilanz identifiziert werden. Aus diesem Grund werden die einzelbetrieblichen und regionalspezifischen Stickstoffbilanzen im nachfolgenden Abschnitt detaillierter betrachtet.

5.1.2 Einzelbetriebliche und regionalspezifische Stickstoffbilanzen

Die Berechnung der einzelbetrieblichen Stickstoffbilanzen (*N-Saldo*) erfolgt anhand der ausgebrachten Stickstoffmengen ($N_{\text{mineralisch}} + N_{\text{organisch}}$) abzüglich der durch den Kornertrag abgefahrenen Stickstoffmengen (N_{Output}) (siehe Formel (5.1)).

$$N - \text{Saldo} = N_{\text{mineralisch}} + N_{\text{organisch}} - N_{\text{Output}} \quad (5.1)$$

Die abgefahrenen Stickstoffmengen ergeben sich aus dem Rapsrertrag in Dezitonnen je Hektar und dem Stickstoffgehalt des Rapskorns nach DüV (2017) [12] in Höhe von $3,35 \text{ kg dt}^{-1}$. Die minimale Stickstoffversorgung ohne Berücksichtigung von Verlusten berechnet sich allerdings aus dem Stickstoffgehalt von Korn und Stroh, der bei Winterraps bei $4,54 \text{ kg dt}^{-1}$ liegt. In Tabelle 23 sind der ertragspezifische Stickstoffentzug, der minimale Stickstoffbedarf sowie der Stickstoffeinsatz zur Berechnung des regionalspezifischen Stickstoffsaldos aufgliedert nach Boden-Klima-Räumen aufgeführt.

Tabelle 23: Regionalspezifische Auswertung des Stickstoffbedarfs und des Stickstoff-einsatzes für die Rapserzeugung, aufgliedert nach Boden-Klima-Raum

Boden-Klima-Raum	A	B	C	D	E	F
Ø Ertrag (9 % Feuchte) in dt ha⁻¹						
Mittelwert \bar{x}	42,4	43,9	39,4	41,3	45,5	41,4
Minimalwert MIN	36,9	31,0	26,4	35,2	33,0	28
Maximalwert MAX	52,0	52,2	50,0	48,0	53,9	52,8
Ø N-Output in kg N_{abgefahren} ha⁻¹						
Mittelwert \bar{x}	142	147	132	138	152	139
Minimalwert MIN	124	104	88	118	111	94
Maximalwert MAX	174	175	168	161	181	177
Ø N-Bedarf in kg N_{ges} ha⁻¹						
Mittelwert \bar{x}	192	199	179	188	207	188
Minimalwert MIN	168	141	120	160	150	127
Maximalwert MAX	236	237	227	218	245	240
Ø N-Düngung mineralisch in kg N_{ges} ha⁻¹						
Mittelwert \bar{x}	191	170	172	186	174	180
Minimalwert MIN	104	80	102	155	90	120
Maximalwert MAX	247	240	249	205	245	240
Ø N-Düngung organisch in kg N_{ges} ha⁻¹						
Mittelwert \bar{x}	49	63	85	69	61	45
Minimalwert MIN	0	0	0	0	0	0
Maximalwert MAX	226	130	215	105	201	165
Ø N-Düngung gesamt in kg N_{ges} ha⁻¹						
Mittelwert \bar{x}	240	232	257	255	235	225
Minimalwert MIN	198	164	190	202	90	132
Maximalwert MAX	330	300	336	296	348	378
Ø N-Saldo in kg N_{ges} ha⁻¹						
Mittelwert \bar{x}	98	85	125	117	83	86

Wie aus Tabelle 23 hervorgeht, decken sich die N-Salden mit den Ergebnissen der regionalspezifischen Stoffstromanalyse und den THG-Emissionen. Die Betriebe in den Boden-Klima-Räumen C „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ und D „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“ haben mit 125 bzw. 117 kg ha⁻¹ die höchsten N-Überschüsse. Dies erschließt sich aus den geringen Erträgen in diesen Regionen und daraus, dass dort durchschnittlich mehr organischer Stickstoff verwendet wird als in den anderen Boden-Klima-Räumen. Letzteres spiegelt sich auch in dem höheren Viehbesatz

dieser Regionen wider, der in BKR C zwischen 0,2 und 2,3 GV-Einheiten und in BKR D zwischen 0,9 und 1,4 liegt (siehe auch Tabelle 9 in Abschnitt 4.1.1). Somit lassen sich in diesen Regionen, insbesondere durch eine bedarfsorientierte und verlustarme Anwendung organischer Dünger die N-Salden und damit auch die THG-Emissionen reduzieren. Spezifischere Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der N-Salden und THG-Emissionen können aus den einzelbetrieblichen N-Bilanzen abgeleitet werden, die in Abbildung 18 dargestellt sind.

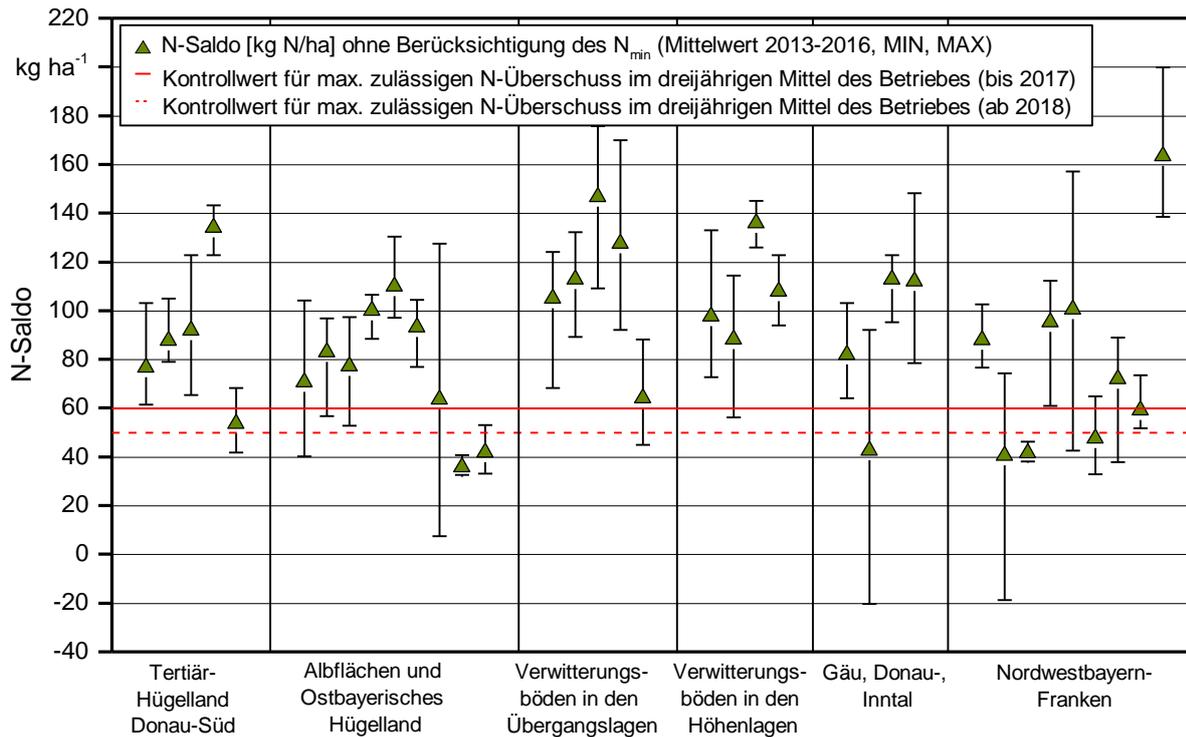


Abbildung 18: Einzelbetriebliche Stickstoffsalden als Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016 und als MIN- und MAX-Werte im Vergleich zu den Kontrollwerten für den maximal zulässigen N-Überschuss

Hier wird deutlich, dass sich die N-Salden einzelbetrieblich deutlich unterscheiden und auch zum Teil noch größere Jahreseffekte aufzeigen als die einzelbetrieblichen THG-Emissionen. Die größten Jahreseffekte sind in den Betrieben B7, C3, E2, F2 und F5 zu finden. Maßgeblicher Grund für die Jahreseffekte sind Mindererträge einerseits und Spitzenerträge andererseits. In Betrieb B7 ist darüber hinaus ein zunehmender Einsatz von organischen Düngemitteln zu beobachten. Eine Umstellung von Rindergülle auf Biogasgärrest erfolgte in Betrieb C3, ohne die hierbei höheren Stickstoffgehalte des Biogasgärrestes zu berücksichtigen. Stattdessen wurde die Gärrestgabe im Herbst von 30 m^3 im Jahr 2015 auf $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ im Jahr 2016 nochmals gesteigert. Die hohe Stickstoffgabe im Herbst in Form von Biogasgärrest und die geringen Erträge dieses Betriebs sind auch die Ursachen für die insgesamt sehr hohen N-Salden, die im Mittel bei 146 kg N ha^{-1} liegen. Der maximale N-Überschuss dieses Betriebs liegt bei 175 kg N ha^{-1} . Der höchste durchschnittliche N-Saldo ist mit 163 kg N ha^{-1} in Betrieb F9 zu finden. Der maximale

Stickstoffüberschuss liegt sogar bei knapp 200 kg N ha^{-1} . Auch in diesem Betrieb werden im Herbst große Stickstoffmengen in Form von Biogasgärresten ausgebracht, die durch hohe mineralische Stickstoffgaben ergänzt werden. Denn die Erträge dieses Betriebs sind mit knapp 48 dt ha^{-1} vergleichsweise hoch.

Die rote und die rot gestrichelte Linie in Abbildung 18 geben die Kontrollwerte für die maximal zulässigen N-Überschüsse eines Betriebs im dreijährigen Mittel nach DüV (2017) [12] an. Die rote Linie zeigt den bis Ende 2016 und damit auch für den Untersuchungszeitraum 2013–2016 gültigen Kontrollwert in Höhe von 60 kg an. Mit der DüV (2017) [12] wurde der maximal zulässige N-Überschuss auf 50 kg (rot gestrichelte Linie) herabgesetzt. Abbildung 18 zeigt deutlich, dass nur die wenigsten Betriebe den Kontrollwert von 60 kg beim Rapsanbau einhalten können. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die dargestellten Kontrollwerte auf ein dreijähriges Mittel des gesamten Betriebes beziehen. Weiterhin ist der Winterraps eine Kultur mit einer großen Nachfruchtwirkung auf das im Folgejahr angebaute Getreide (z. B. Winterweizen). Ein Vergleich zwischen der mit dem Korn vom Feld abgefahrenen Stickstoffmenge und dem Stickstoffbedarf für Korn und Stroh zeigt außerdem, dass selbst bei einer verlustfreien bedarfsgerechten Düngung bereits knapp 50 kg Stickstoff auf dem Feld verbleiben (vgl. Tabelle 23). Aus diesem Grund sollten sowohl die N-Salden als auch die THG-Emissionen der Rapserezeugung immer im Kontext der gesamten Fruchtfolge betrachtet werden. Allerdings zeigen die N-Salden der Betriebe C3 und F9 deutlich, dass die Empfehlungen der LfL zur Düngung von Acker- und Grünland [53] (vgl. auch Abschnitt 2.4.1) in der betriebsspezifischen Düngeplanung kaum berücksichtigt sein konnten.

Um den steigenden N-Salden entgegenzuwirken, macht die DüV (2017) [12] Vorgaben, durch die die N-Salden in Zukunft stark reglementiert sind. Dies betrifft im Ackerbau vor allem die Düngung im Sommer und Herbst nach der Ernte der Hauptfrucht, die generell nur noch beim Anbau von Winterraps und anderen wenigen Kulturen möglich und auf 60 kg Gesamtstickstoff bzw. 30 kg Ammoniumstickstoff begrenzt ist [54] (vgl. auch Abschnitt 2.4.2). Die Analysen zum Nährstoffmanagement in Abschnitt 2.4.2 verdeutlichen, dass die organische Düngung in fast allen untersuchten Betrieben ausschließlich im Herbst erfolgt und zum Teil durch eine mineralische Düngung ergänzt wird. In Abbildung 19 sind die im Herbst 2015 (Erntejahr 2016) ausgebrachten Stickstoffmengen als N_{ges} , differenziert nach organischer und mineralischer Düngung, exemplarisch aufgetragen. Hier wird deutlich, dass nur knapp 40% aller Betriebe den vorgegebenen Grenzwert in Höhe von $60 \text{ kg } N_{\text{ges}}$ einhalten könnten. Insbesondere die Betriebe in den Boden-Klimaräumen C und D zeichnen sich durch eine hohe Stickstoffgabe im Herbst aus. Dies ist auf die vergleichsweise hohe Viehdichte und den damit verbundenen höheren Anfall an organischen Düngern in diesen Regionen zurückzuführen. Bei der Bewertung organischer Dünger ist der Grenzwert von 30 kg Ammoniumstickstoff jedoch von größerer Bedeutung als der Gesamtstickstoffgehalt. Unter Berücksichtigung dieses Grenzwertes bringen mehr als 90% aller Betriebe mit einer organischen Düngung mehr Stickstoff aus als nach DüV (2017) zulässig wäre, wie Abbildung 20 zeigt. Es ist daher davon auszugehen, dass es zu einer Verschiebung der organischen Düngung ins Frühjahr zu Vegetationsbeginn kommt.

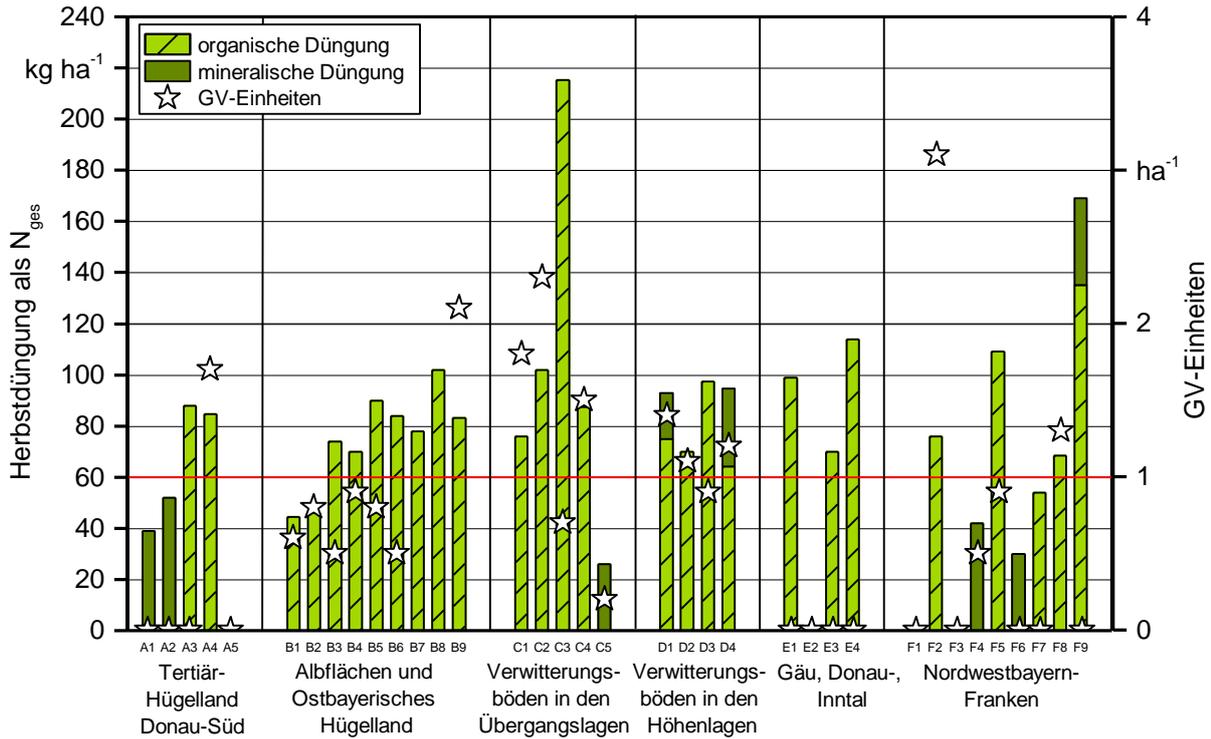


Abbildung 19: Einzelbetriebliche Darstellung der im Herbst 2015 ausgebrachten Mengen an Gesamtstickstoff, unterteilt in organischen und mineralischen Anteil (Erntejahr 2016)

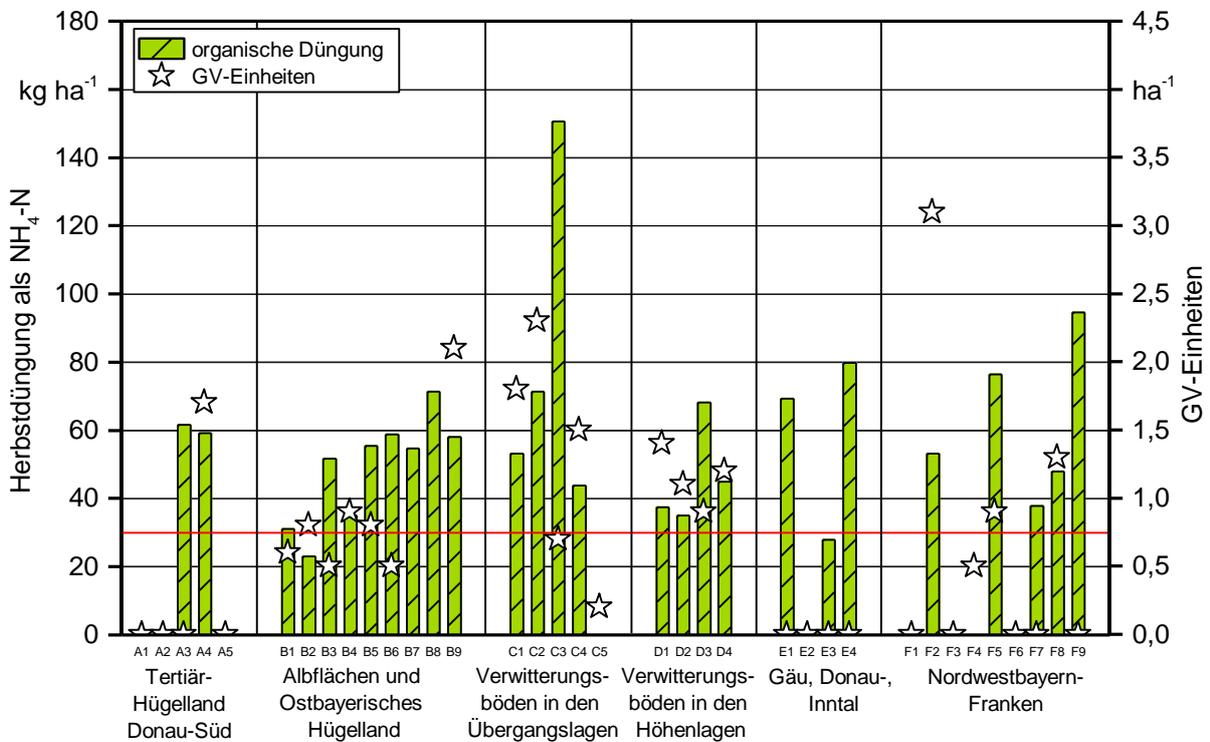


Abbildung 20: Einzelbetriebliche Darstellung der im Herbst 2015 ausgebrachten Menge an Ammoniumstickstoff (Erntejahr 2016)

Die Betriebe mit einer rein mineralischen Düngung liegen alle unter dem Grenzwert von 60 kg N_{ges} (vgl. Abbildung 19). Die Differenzierung zwischen organischer Düngung und mineralischer Düngung in Abbildung 19 veranschaulicht, dass die Betriebe D1, D4 und F9 zusätzlich zur organischen Düngung noch Mineraldünger ausbringen, obwohl die organische Düngung bereits oberhalb des Grenzwertes liegt und im Fall von Betrieb F9 diesen sogar um ein Vielfaches überschreitet.

5.1.3 Sensitivitätsanalyse: Optimierung der N-Salden und THG-Emissionen im Rapsanbau durch Umsetzung der Düngeverordnung 2017

Die einzelbetrieblichen Analysen der Rapserzeugung in Bayern zeigen, dass die größtmögliche Reduzierung der Stickstoffflüsse und THG-Emissionen durch einen bedarfsgerechten Einsatz organischer und mineralischer Düngemittel erzielt werden kann. Weiterhin wird deutlich, dass die Vorgaben der DüV (2017) [12] zu den N-Salden und zur eingeschränkten Herbsdüngung in den wenigsten Betrieben eingehalten werden. Deshalb wird mit der nachfolgenden Sensitivitätsanalyse aufgezeigt, in welcher Größenordnung das Minderungspotenzial der Stickstoffflüsse und THG-Emissionen nur durch Einhaltung der Vorgaben der DüV (2017) liegt. Hierfür werden die Betriebe betrachtet, deren mittlere Stickstoffsalden über 110 kg ha⁻¹ liegen. Dies trifft auf die Betriebe A4, B5, C2, C3, C4, D3, E4 und F9 zu, die sich auch alle durch einen vergleichsweise hohen Anteil an organischer Düngung (über 30 %) auszeichnen. Die Anpassung der Stickstoffdüngung auf die Vorgaben der DüV (2017) [12] wird wie folgt durchgeführt:

1. Einschränkung der Herbsdüngung auf 60 kg N_{ges} bzw. 30 kg NH₄-N,
2. Verlagerung der überschüssigen organischen Düngemittel auf das Frühjahr unter Berücksichtigung der Höchstgrenze von max. 170 kg ha⁻¹a⁻¹ organischer Dünger,
3. Durchführung einer betriebsspezifischen N-Bedarfsanalyse nach DüV (2017) und der empfohlenen Berechnungsmatrix der LfL (vgl. Tabelle 5 in Abschnitt 2.4.2).

Die Einschränkung der Herbsdüngung und die damit verbundene Verlagerung der überschüssigen organischen Düngemittel auf das Frühjahr ist in Tabelle 24 aufgeführt. Hier wird deutlich, dass in den Betrieben A4 und C3 im Erntejahr 2016 nicht nur die für die Herbsdüngung zulässigen 60 kg N_{ges} bzw. 30 kg NH₄-N überschritten werden, sondern auch die für organische Düngemittel zulässige Höchstgrenze von 170 kg ha⁻¹a⁻¹. Folglich werden in der Düngeoptimierung die Mengen an organischem Stickstoff auf 170 kg ha⁻¹ a⁻¹ reduziert. Die Höchstgrenze von 170 kg ha⁻¹a⁻¹ bezieht sich zwar auf das betriebsspezifische Mittel, es ist jedoch davon auszugehen, dass diese Betriebe auch im Mittel den Grenzwert überschreiten, da hier insgesamt sehr hohe Mengen organischen Stickstoffs ausgebracht werden. Es ist somit anzunehmen, dass diese Betriebe mit der DüV (2017) die im Betrieb anfallenden organischen Düngemittel reduzieren und ggf. an andere Betriebe abgeben müssen, um die vorgeschriebenen Grenzwerte einzuhalten.

Tabelle 24: Optimierung der Stickstoffdüngung nach den Vorgaben der DüV (2017)

Jahr	Düngezeitpunkt	Art	Menge		N-Gehalt		ausgebrachte N-Menge	
			m ³ ha ⁻¹	kg N m ⁻³	kg NH ₄ -N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	kg NH ₄ -N ha ⁻¹	
Betrieb A4								
2016	Herbst	Gärrest	28,0	3,0	2,1	84,6	59,2	
	Frühjahr	Gärrest	28,0	3,0	2,1	84,6	59,2	
	Frühjahr	Schweinegülle	28,0	2,0	1,4	56,6	39,4	
		Summe				225,8		
2018	Herbst	Gärrest	14,0	3,0	2,1	42,3	29,6	
DüV	Frühjahr	Gärrest	14,0	3,0	2,1	42,3	29,6	
	Frühjahr	Gärrest	28,0	3,0	2,1	84,6	59,2	
		Summe				168,2		
Betrieb C2								
2016	Herbst	Gärrest	20,0	5,1	3,6	102,0	72,0	
2018	Herbst	Gärrest	8,0	5,1	3,6	40,8	28,8	
DüV	Frühjahr	Gärrest	12,0	5,1	3,6	61,2	43,6	
		Summe				102,0		
Betrieb C3								
2016	Herbst	Gärrest	40,0	5,4	3,8	215,2	150,8	
2018	Herbst	Gärrest	8,0	5,4	3,8	43,2	30,4	
DüV	Frühjahr	Gärrest	24,0	5,4	3,8	129,6	91,2	
		Summe				172,8		
Betrieb C4								
2016	Herbst	Milchviehgülle	25,0	3,5	1,75	87,5	43,8	
2018	Herbst	Milchviehgülle	17,0	3,5	1,75	59,5	29,8	
DüV	Frühjahr	Milchviehgülle	8,0	3,5	1,75	28,0	14,0	
		Summe				87,5		
Betrieb D3								
2016	Herbst	Schweinegülle	25,0	3,9	2,73	97,5	68,3	
2018	Herbst	Schweinegülle	11,0	3,9	2,73	42,9	30,0	
DüV	Frühjahr	Schweinegülle	14,0	3,9	2,73	54,6	38,3	
		Summe				97,5		

Jahr	Düngezeitpunkt	Art	Menge		N-Gehalt	ausgebrachte N-Menge	
			m ³ ha ⁻¹	kg N m ⁻³	kg NH ₄ -N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	kg NH ₄ -N ha ⁻¹
Betrieb E4							
2016	Herbst	Schweinegülle	30,0	3,8	2,66	114,0	79,8
2018	Herbst	Schweinegülle	11,0	3,8	2,66	41,8	29,3
DüV	Frühjahr	Schweinegülle	19,0	3,8	2,66	72,2	50,5
		Summe				97,5	
Betrieb F9							
2016	Herbst	Gärrest	25,0	5,4	3,8	135	94,5
	Herbst	NPK 17/17/8	200,0	17,0	–	34	–
		Summe				169	
2018	Herbst	Gärrest	8,0	5,4	3,8	43,2	30,4
DüV	Frühjahr	Gärrest	17,0	5,4	3,8	91,8	64,6
		Summe				135,0	

Betrieb F9 überschreitet zwar seine Höchstmenge an ausgebrachten organischen Düngemitteln nicht. Allerdings wird hier nach der Ernte der Vorfrucht zunächst Gärrest als Stoppeldüngung mit einem Gülleinjektor ausgebracht. Der Gärrest wird nicht untergepflügt. Zusätzlich wird hier nach dem Aufruf des Winterrapses ein NPK-Mineraldünger gegeben. Die zusätzliche mineralische Düngung ist an dieser Stelle infrage zu stellen und wird bei der Optimierung der Stickstoffdüngung nicht mehr berücksichtigt, da die für eine Grunddüngung erforderlichen Mengen an Phosphat und Kalium bereits in ausreichender Menge im Gärrest enthalten sind.

Die Anpassung der Herbstdüngung an die Vorgaben der DüV (2017) [12] wird durch die Stickstoffbedarfsanalyse nach [54] ergänzt und führt zu der in Abbildung 21 dargestellten optimierten Stickstoffdüngung sowie zu den in Abbildung 22 reduzierten Stickstoffsalden. Es wird deutlich, dass durch die betriebsspezifische Anpassung des Düngeverhaltens an die Vorgaben der DüV (2017) die ausgebrachten Stickstoffmengen um bis zu 33 % reduziert werden können. Insbesondere die Betriebe A4 und C3, in denen im Jahr 2016 die zulässige Höchstmenge von 170 kg N_{org} ha⁻¹ a⁻¹ überschritten wurde, zeigen deutliche Minderungseffekte durch eine angepasste und bedarfsgerechte Ausbringung organischer Dünger auf. Eine Reduzierung der Mineraldüngermengen und der damit verbundenen N-Mengen zeigen die Betriebe D3 und F9, wobei in Betrieb F9 insbesondere die mineralische Herbstdüngung eingespart werden kann. Insgesamt führt die herabgesetzte N-Düngung zu einer sehr deutlichen Reduktion der N-Salden im Vergleich zum Status quo der untersuchten Erntejahre. Der maximale N-Überschuss könnte so bei ca. 85 kg N ha⁻¹ a⁻¹ liegen, wie Abbildung 22 verdeutlicht.

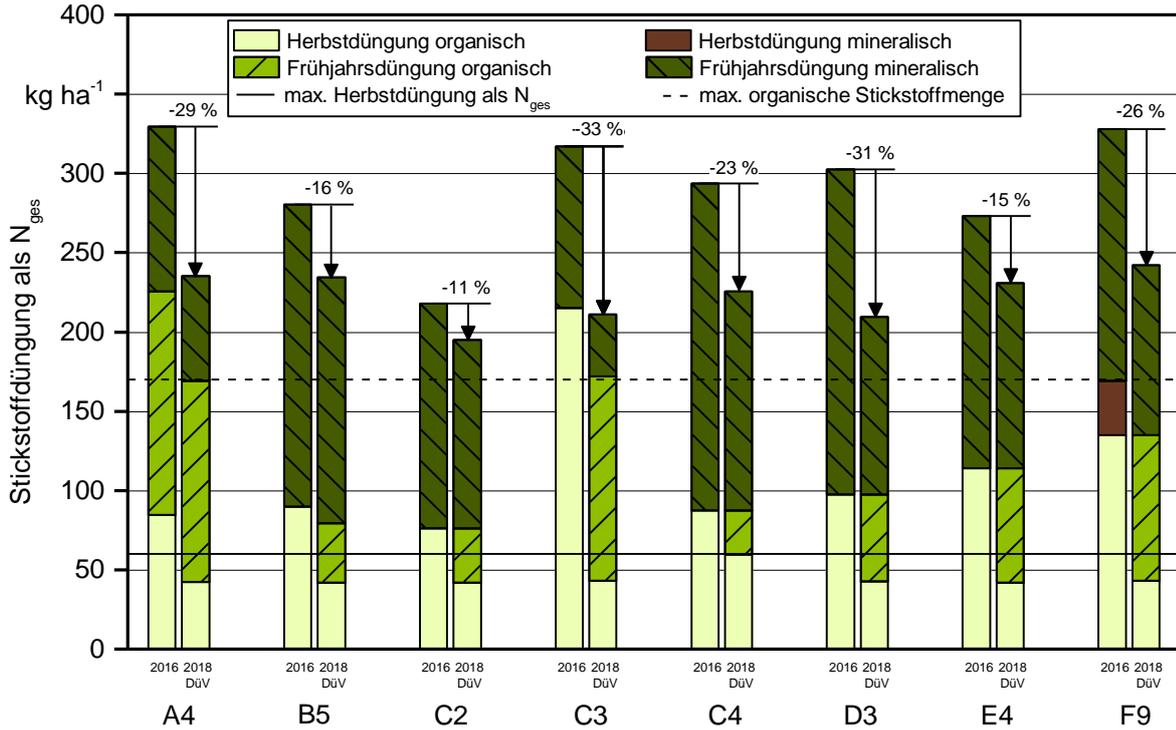


Abbildung 21: Optimierte Stickstoffdüngung bei der Rapserzeugung in ausgewählten Betrieben nach den Vorgaben der DüV (2017) [12] im Vergleich zum Status quo des Erntejahres 2016

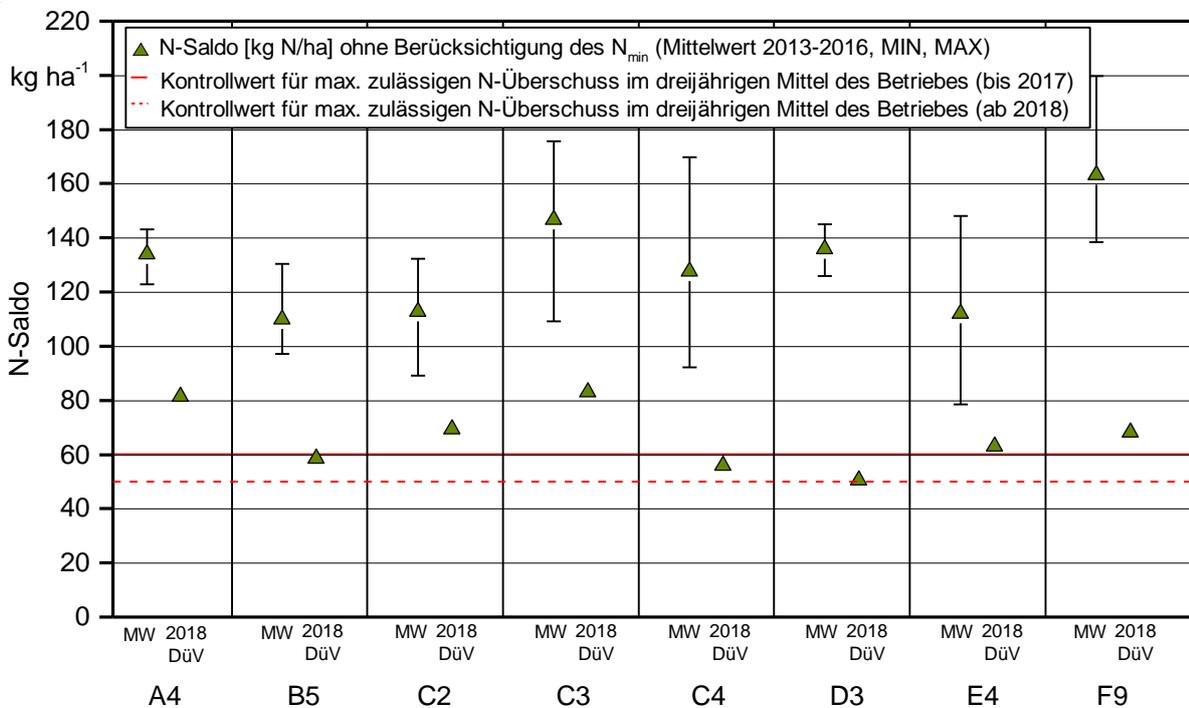


Abbildung 22: Optimierte Stickstoffbilanzen bei der Rapserzeugung in ausgesuchten Betrieben nach den Vorgaben der DüV (2017) [12] im Vergleich zum Status quo der Erntejahre 2013–2016

Das größte Minderungspotenzial zeigt hier Betrieb F9, in dem sich die N-Salden um bis zu 59 % reduzieren lassen. Der Kontrollwert für den maximalen N-Überschuss im dreijährigen Mittel in Höhe von 50 kg ha^{-1} lässt sich bei einem optimalen Düngeverhalten durch Betrieb D3 erreichen und wird von den Betrieben B5 und C4 nur knapp überschritten. Diese modellhafte Kalkulation berücksichtigt allerdings keine witterungsbedingten Besonderheiten, die zu einer geringeren Bestandsentwicklung im Frühjahr führen und dadurch einen höheren Stickstoffbedarf erfordern könnten. Weiterhin kann hier nicht überprüft werden, ob die zugrunde gelegten betriebspezifischen Erträge mit der reduzierten Stickstoffmenge auch tatsächlich erreicht werden können.

Mit der Optimierung der Stickstoffdüngung nach den Vorgaben der DüV (2017) lassen sich auch die mit der Rapserzeugung verbundenen THG-Emissionen ebenfalls deutlich reduzieren, wie in Abbildung 23 dargestellt ist.

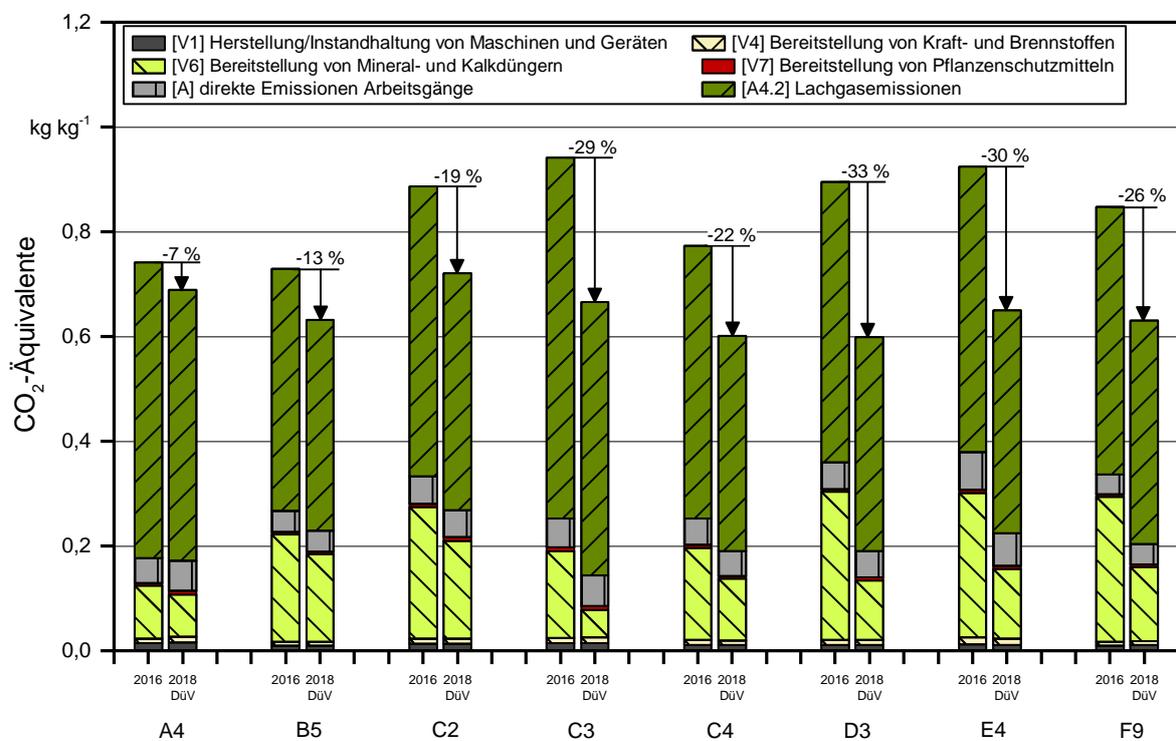


Abbildung 23: Optimierte THG-Bilanzen der Rapserzeugung ausgewählter Betriebe nach den Vorgaben der DüV (2017) [12] im Vergleich zum Status quo (gewichtete Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016)

Die größte THG-Minderung kann in Betrieb D3 erreicht werden. Dort führt das Rechenresultat zu 33 % geringeren THG-Emissionen ($0,598 \text{ kg kg}^{-1}$) im Vergleich zum Status quo des Erntejahres 2016. Die Reduzierung der THG-Emissionen lässt sich einerseits auf die geminderte Stickstoffmenge und die damit verbundenen N₂O-Feldemissionen zurückführen. Andererseits führt die bedarfsgerechte Anwendung der Wirtschaftsdünger zu einer deutlichen Reduzierung an Mineraldüngern von 197 kg ha^{-1} auf 112 kg ha^{-1} . Wie aus Tabelle 25 hervorgeht, konnte auf diese Weise die Verwendung von Kalkammonsal-

peter, ein Mineraldünger mit einem hohen THG-Emissionsfaktor, vollständig eingespart werden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass durch die Substitution von Kalkamonsalpeter ein zusätzlicher Kalkbedarf entsteht. Da die Kalkung jedoch zu deutlich geringeren THG-Emissionen führt ($0,0403 \text{ kg kg}^{-1}$ Kalk) als die Verwendung von Kalkamonsalpeter ($2,4 \text{ kg kg}^{-1}$ KAS), würde eine zusätzliche Kalkung das errechnete THG-Minderungspotenzial nur geringfügig beeinflussen. In Betrieb C3 können die THG-Emissionen um 29 % gemindert werden. Grund hierfür ist, dass durch eine ertragsangepasste Stickstoffbedarfsanalyse und eine bedarfsgerechte Gärrestdüngung im Frühjahr der Mineraldüngereinsatz von 102 kg ha^{-1} auf 39 kg ha^{-1} gesenkt werden kann. Dabei konnte der mit einem hohen THG-Emissionsfaktor verbundene NPK-Mineraldünger vollständig durch die Gärrestgabe im Frühjahr ersetzt werden (vgl. Tabelle 25).

Tabelle 25: Anpassung der N-Mineraldüngung aufgrund der optimierten bedarfsgerechten organischen Düngung nach den Vorgaben der DüV (2017) [12]

Betrieb	Erntejahr	Ertrag in dt ha ⁻¹	Mineraldünger	Düngermenge in kg ha ⁻¹	N-Menge in kg ha ⁻¹
Betrieb A4	2016	46,0	ASS	400	104
	2018 DüV	40,6	ASS	260	68
Betrieb B5	2016	49,0	Hydrosulfan	666	160
			AHL	85	31
	2018 DüV	48,9	Hydrosulfan	515	124
			AHL	85	31
Betrieb C2	2016	36,7	KAS	300	81
			Piamon	240	79
	2018 DüV	37,0	KAS	250	68
			Piamon	100	33
Betrieb C3	2016	35,0	ASS	300	78
			NPK	150	24
	2018 DüV	32,9	ASS	150	39
Betrieb C4	2016	44,0	ASS	350	91
			Harnstoff 46	250	115
	2018 DüV	46,0	ASS	300	78
			Harnstoff 46	130	60
Betrieb D3	2016	42,8	ASS	380	95
			KAS	300	81
			Harnstoff 46	45	21
	2018 DüV	43,3	ASS	380	95
			Harnstoff 46	45	21

Betrieb	Erntejahr	Ertrag in dt ha ⁻¹	Mineraldünger	Düngermenge in kg ha ⁻¹	N-Menge in kg ha ⁻¹
Betrieb E4	2016	39,2	Hydrosulfan	330	90
			KAS	300	70
	2018 DüV	45,3	Hydrosulfan	250	84
			KAS	125	34
Betrieb F9	2016	50,8	NPK	200	34
			ASS	300	78
			KAS	300	81
	2018 DüV	47,7	ASS	250	65
			KAS	155	42

THG-Optimierung regionaltypischer Modellbetriebe

Mit der exemplarischen Optimierung der ausgewählten Betriebe wird das betriebsspezifische THG-Minderungspotenzial im Rapsanbau aufgezeigt. Nachfolgend wird dieses THG-Minderungspotenzial auf regionaltypische Modellbetriebe der sechs verschiedenen Boden-Klima-Räume übertragen. Für die Modellierung dieser Betriebe werden die erhobenen und regionalspezifisch ausgewerteten Daten zum Rapserttrag und Nährstoffmanagement verwendet. Der ertragsspezifische Stickstoffbedarf wird anhand der Düngempfehlung nach LfL kalkuliert. Weiterhin werden alle Vorgaben der DüV (2017) (z. B. Begrenzung der Herbsdüngung) eingehalten. Die Ergebnisse der Düngedarfsanalyse sind in Tabelle 26 aufgeführt. Hier fällt auf, dass für den BKR A eine 100%ige mineralische Düngung veranschlagt wird. Grund hierfür ist, dass von allen untersuchten Betrieben dieses Boden-Klima-Raumes nur in Betrieb A4 organisch (Gärrest und Schweinegülle) gedüngt wird. Dieser Betrieb ist als Versuchsstation der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft jedoch nicht charakteristisch für diesen Boden-Klima-Raum. Alle anderen Betriebe in dieser Region düngen zu 100 % mineralisch (Ausnahme Betrieb B3 im Erntejahr 2016) und haben einen Viehbesatz von 0 GV. Bei allen anderen Modellbetrieben werden Art und Menge an ausgebrachten organischen Düngern gemittelt, sodass sich die in Tabelle 26 aufgeführte Stickstoffmenge ergibt. Hierbei ist unter Punkt 7 die im Herbst und Frühjahr ausgebrachte Gesamtmenge berücksichtigt, wohingegen unter Punkt 11a nur die im Frühjahr ausgebrachte Stickstoffmenge aufgeführt ist. Die Bilanzierung der erforderlichen Mineraldünger erfolgt anhand der anteiligen Verwendung je Boden-Klima-Raum nach Tabelle 19 in Abschnitt 4.1.5.

Tabelle 26: *Düngebedarfsermittlung für die Rapserzeugung der Modellbetriebe in den untersuchten Boden-Klima-Räumen nach Düngeempfehlung der LfL [54]*

Faktoren für die Düngebedarfs- ermittlung	Boden-Klima-Raum						Einheit
	A	B	C	D	E	F	
1 Kultur: Raps							
2 Ertragsniveau im Durchschnitt der letzten drei Jahre	42,4	43,7	39,4	41,4	45,5	41,4	dt ha ⁻¹
3 N-Bedarfswert	200	200	200	200	200	200	kg N ha ⁻¹
4 Zu-/Abschlag Ertragsdifferenz	0	0	0	0	+10	0	kg N ha ⁻¹
5 Im Boden verfügbare N-Menge (N _{min})	36	32	47	48	39	39	kg N ha ⁻¹
6 Nachlieferung Bodenvorrat (Humus > 4 % → -20 kg)	0	0	0	0	0	0	kg N ha ⁻¹
7 Nachlieferung aus organischer Düngung Vorjahr (10 % N _{ges})	0	8	10	8	6	5	kg N ha ⁻¹
8 Vorfrucht	0	0	0	0	0	0	kg N ha ⁻¹
9 Zwischenfrucht	0	0	0	0	0	0	kg N ha ⁻¹
10 Düngebedarf	164	160	143	144	165	156	kg N ha ⁻¹
11 Organische Düngung zur Kultur							
a ausgebracht	0	35	50	27	14	6	kg N ha ⁻¹
b angerechnet	0	23	32	17	9	3	kg N ha ⁻¹
12 Mineralische Düngung zur Kultur	164	137	113	128	156	152	kg N ha ⁻¹

Die auf dieser Basis berechneten THG-Emissionen der Rapserzeugung in Bayern sind in Abbildung 24 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die THG-Emissionen durch ein optimiertes Nährstoffmanagement entsprechend den Vorgaben nach DüV (2017) [12] um bis zu 23 % reduziert werden können. Die geringsten THG-Emissionen werden mit 0,59 kg kg⁻¹ in BKR A erzeugt, in dem auch die mögliche THG-Minderung mit 23 % am höchsten ist. Dem Modellbetrieb dieses Boden-Klima-Raumes wird allerdings eine 100%ige mineralische Düngung zugrunde gelegt. Die zweit- und drittgrößte THG-Minderung kann in den Boden-Klima-Räumen C und D erzielt werden. Diese beiden Regionen zeichnen sich insbesondere durch ihren hohen Anteil an organischer Düngung aufgrund eines hohen Viehbesatzes sowie durch geringe Erträge aus. Durch die Optimierung des Düngemanagements und die damit verbundene THG-Minderung von 0,87 auf 0,71 kg kg⁻¹ in BKR C und von 0,79 auf 0,65 kg kg⁻¹ in BKR D wird die Bedeutung der bedarfsgerechten Verwendung organischer Düngemittel einerseits und einer auf den standortspezifischen Ertrag angepassten Stickstoffbedarfsanalyse andererseits besonders deutlich. Das geringste THG-Minderungspotenzial zeigt BKR E. Diese Region zeichnet sich allerdings bereits im Status quo durch hohe Erträge und vergleichsweise geringe THG-Emissionen aus (0,71 kg kg⁻¹). Nach Optimierung liegen die THG-Emissionen dieser Region mit

0,66 kg kg⁻¹ allerdings geringfügig über den THG-Emissionen in den Boden-Klima-Räumen A (0,59 kg kg⁻¹) und D (0,65 kg kg⁻¹).

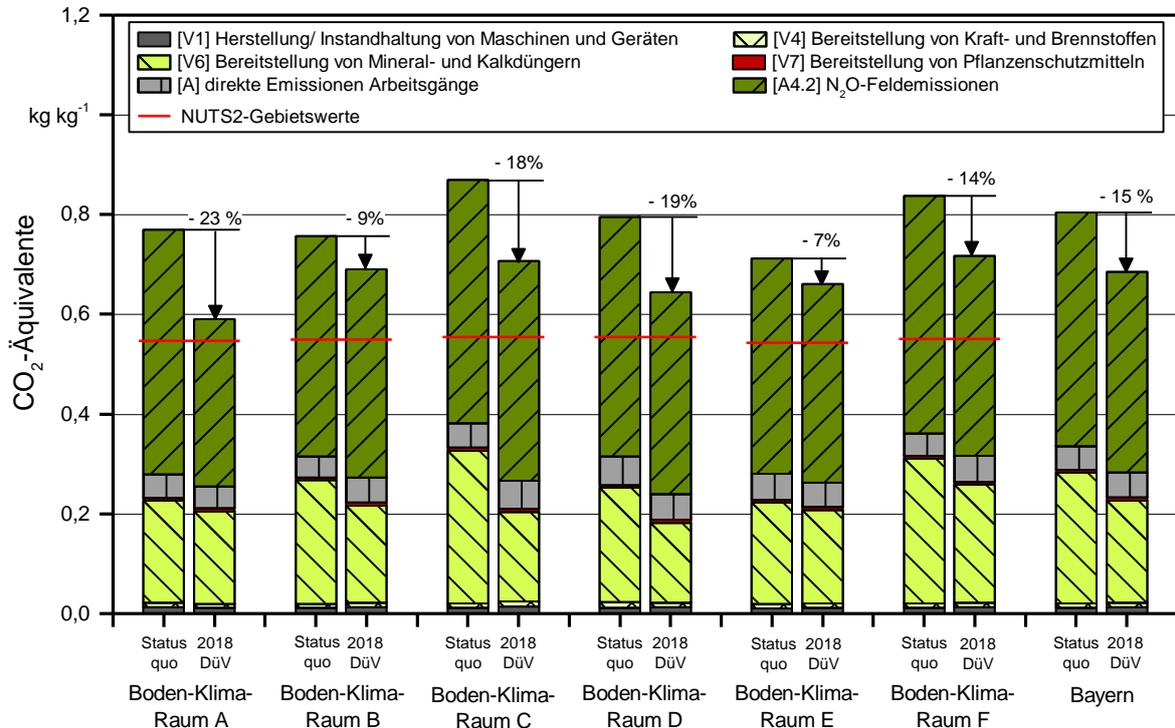


Abbildung 24: Optimierte THG-Bilanzen der Rapsproduktion in Bayern (Modellbetriebe der unterschiedlichen Boden-Klima-Räume im Vergleich zum Status quo der Erntejahre 2013–2016)

5.2 Ökologische Bewertung der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion

Der Schwerpunkt der ökologischen Bewertung liegt auf den regionalspezifischen THG-Emissionen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in den untersuchten Boden-Klima-Räumen. Darüber hinaus werden die THG-Emissionen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern mit den Standardwerten der Richtlinie 2009/28/EG (EU-RED I) [22] und des Entwurfes zur Erneuerung dieser Richtlinie (EU-RED II) [25] verglichen. In Anlehnung an die Ergebnisdarstellung der ExpResBio-Methoden und an die Richtlinie 2009/28/EG sind die THG-Emissionen aufgegliedert in die Prozessgruppen [A] Rapsproduktion, [T] Transport Rapsaat und [B] (dezentrale) Ölgewinnung.

Abbildung 25 zeigt die regionalspezifischen Mittelwerte für die Boden-Klima-Räume A–F und als gewichtetes Mittel für Bayern (vgl. Anhang III). Die dezentrale Ölgewinnung entspricht für die Boden-Klima-Räume A–C den Mittelwerten der Verarbeitungsjahre 2013/2014–2016/2017 der Ölmühlen X, Y und Z. Den Boden-Klima-Räumen D–F konnte keine dezentrale Ölmühle zugewiesen werden. Deshalb wird hier der Mittelwert aus den drei betrachteten Ölmühlen zugrunde gelegt. Die regionalspezifischen THG-Emissionen für die dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion liegen im Mittel der vier Erntejahre zwi-

schen $29,7 \text{ g MJ}^{-1}$ in BKR E und $35,1 \text{ g MJ}^{-1}$ in BKR C. Für in Bayern produzierten Rapsölkraftstoff ergeben sich über alle untersuchten Betriebe und Erntejahre (Status quo) THG-Emissionen in Höhe von $33,3 \text{ g MJ}^{-1}$. Mit einer optimierten Rapserzeugung durch Umsetzung der Vorgaben nach DüV (2017) [12] können die THG-Emissionen auf $28,6 \text{ g MJ}^{-1}$ reduziert werden. Die Auftragung der einzelnen Prozessgruppen verdeutlicht, dass mehr als 90 % aller Emissionen der Prozessgruppe [A] Rapsanbau zugeordnet werden können. Hier variieren die Ergebnisse zwischen $27,9$ und $33,7 \text{ g MJ}^{-1}$ bei Betrachtung des Status quo. Der dezentrale Transport zur Ölmühle trägt in allen Regionen mit $0,28 \text{ g MJ}^{-1}$ zur Gesamtemission bei. Die THG-Emissionen aus der dezentralen Ölgewinnung in den Ölmühlen X, Y und Z (Boden-Klima-Räume A bis C) liegen zwischen $1,14$ und $1,80 \text{ g MJ}^{-1}$ und betragen im Mittel $1,44 \text{ g MJ}^{-1}$.

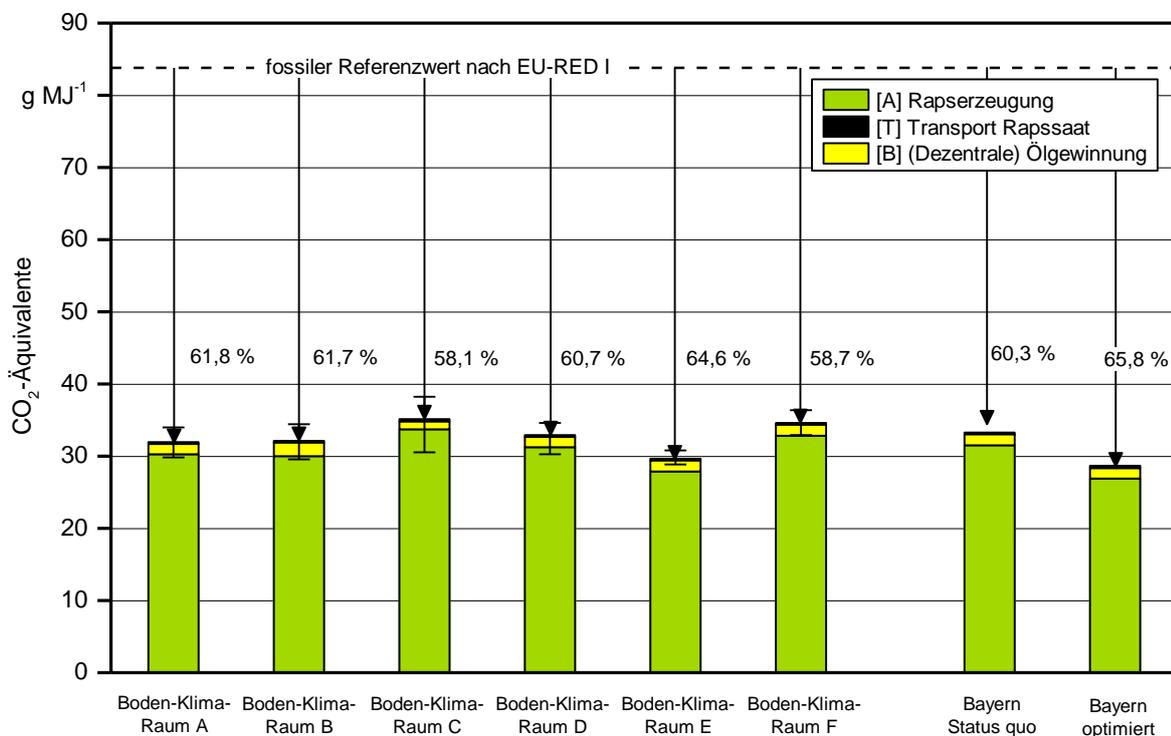


Abbildung 25: Regionalspezifische THG-Emissionen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung als CO_2 -Äquivalente im Vergleich zum fossilen Referenzwert, Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016, aufgliedert nach Boden-Klima-Raum sowie als gewichtetes Mittel für Bayern

Einen Vergleich der THG-Emissionen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern ($34,9 \text{ g MJ}^{-1}$ ExpRessBio [21], $33,3 \text{ g MJ}^{-1}$ RegioTHGRaps) mit den Standardwerten für reines Rapsöl nach EU-RED I (36 g MJ^{-1}) und nach dem Entwurf der EU-RED II (40 g MJ^{-1}) zeigt Abbildung 26. Die Gegenüberstellung veranschaulicht, dass die Prozessgruppen [T] Transport Rapssaat und [B] Ölgewinnung bei der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern mit $1,44 \text{ g MJ}^{-1}$ bzw. $0,288 \text{ g MJ}^{-1}$ deutlich geringere THG-Emissionen aufweisen als die entsprechenden Teilstandardwerte der EU-RED I ($1,00$ und $5,00 \text{ g MJ}^{-1}$) und des Entwurfes der EU-RED II ($5,3$ und $1,2 \text{ g MJ}^{-1}$). Grund

hierfür ist die dezentrale Verarbeitungsstruktur, die deutlich geringere Transportdistanzen mit sich bringt. Weiterhin ist die dezentrale Ölgewinnung mit einem geringeren verfahrenstechnischen und damit auch mit einem geringeren energetischen Aufwand verbunden als eine industrielle Ölgewinnung, bei der auf den Pressvorgang noch Extraktions- und Raffinationsschritte folgen. Dies wird auch in der Differenzierung des Teilstandardwertes im Entwurf zur Novellierung der Richtlinie 2009/28/EG deutlich. Dort werden mit $4,4 \text{ g MJ}^{-1}$ 85 % der THG-Emissionen aus dem Verarbeitungsschritt der Extraktion des Presskuchens und der Raffination des Öles zugeschrieben.

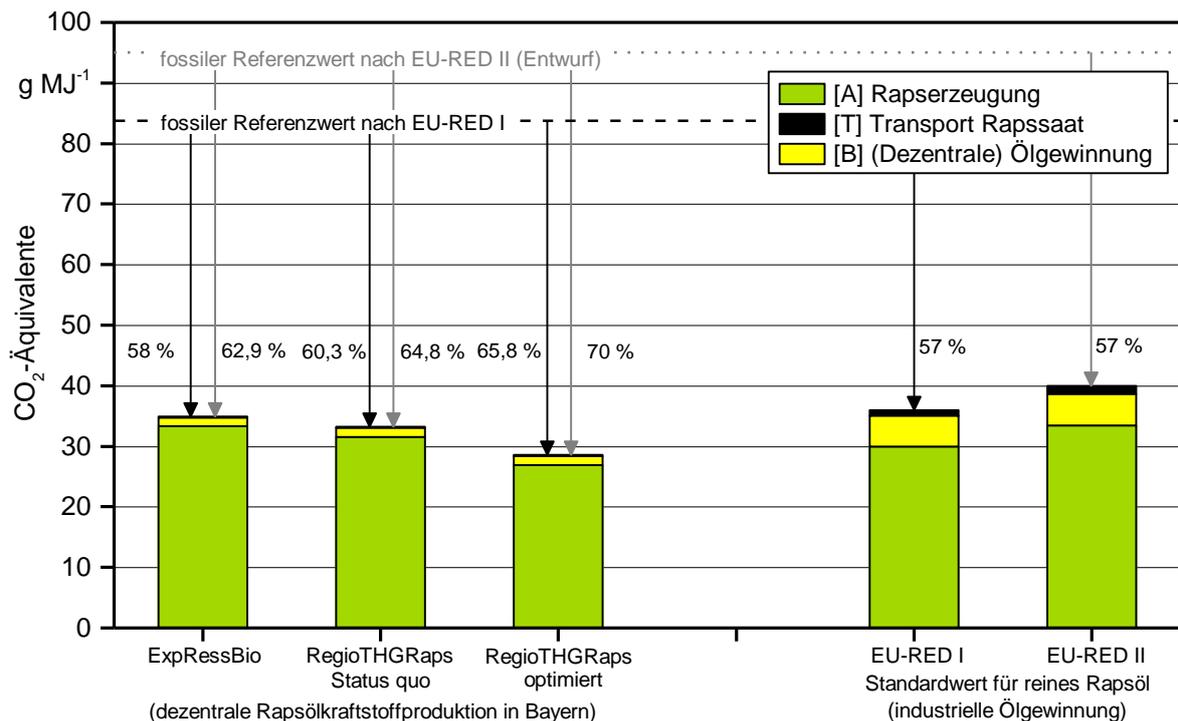


Abbildung 26: THG-Emissionen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung in Bayern als CO_2 -Äquivalente im Vergleich zum fossilen Referenzwert und den RED-Standardwerten (EU-RED I und Entwurf der EU-RED II) für reines Rapsöl aus industrieller Ölgewinnung

Die mit der Prozessgruppe [A] Rapserzeugung verbundenen THG-Emissionen liegen bei den spezifischen Analysen im Projekt ExpResBio bei $33,4 \text{ g MJ}^{-1}$. In den vorliegenden Untersuchungen reduziert sich das Rechenergebnis für den Rapsanbau auf $31,5 \text{ g MJ}^{-1}$. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass den Ergebnissen der beiden Projekte unterschiedliche Versionen in der Datenbank ecoinvent zugrunde liegen, deren Einfluss im nachfolgenden Diskussionskapitel dargelegt wird. Im Vergleich zum Teilstandardwert der Richtlinie 2009/28/EG sind die THG-Emissionen der spezifischen Analysen höher. Der im Entwurf der Novellierung (RED II) angepasste Teilstandardwert für den Rapsanbau liegt dagegen in der gleichen Größenordnung wie die Ergebnisse aus dem Projekt ExpResBio und wird von den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen sogar unterschritten. Der nach den Vorgaben der DüV (2017) optimierte Rapsanbau in Bayern

unterschreitet mit $26,9 \text{ g MJ}^{-1}$ die Teilstandardwerte für reines Rapsöl deutlich. Aus Abbildung 26 geht zudem ein Vergleich der THG-Emissionen von Rapsöl(kraftstoff) mit dem Standardwert für fossilen Diesel hervor. Dieser beträgt gemäß EU-RED $83,8 \text{ g MJ}^{-1}$ und gemäß der 38. BImSchV sowie dem Entwurf der EU-RED II. Während die THG-Minderung der Standardwerte konstant bei 57 % bleibt, erhöhen sich die THG-Minderungswerte der spezifischen Analysen für Bayern auf bis zu 64,8 % bezogen auf den Status quo. Durch eine Optimierung der Rapserzeugung entsprechend den Vorgaben nach DüV (2017) kann mit Rapsölkraftstoff eine THG-Minderung gegenüber Dieselmotorkraftstoff von durchschnittlich 70 % erreicht werden.

6 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der spezifischen Datenerhebung und Stoffstromanalyse sowie die Ergebnisse der spezifischen Bewertung zunächst in Bezug auf die zugrunde gelegte Datenqualität und getroffenen Annahmen beurteilt. Weiterhin erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse in den in Unterkapitel 2.2 dargelegten wissenschaftlichen Kontext.

6.1 Beurteilung der Ergebnisse in Bezug auf die Datenqualität

Den in Kapitel 5 dargelegten THG-Emissionen liegen verschiedene Stoffströme unterschiedlichster Datenqualität und -herkunft sowie unterschiedliche Annahmen zugrunde. Die Prozesse [A-V6] Bereitstellung von Mineral- und Kalkdüngern sowie [A4.2] N₂O-Feldemissionen konnten als signifikante Parameter identifiziert werden. Sie haben in Summe einen Anteil von mehr als 90 % an den Gesamtemissionen. Aus diesem Grund wird die Datengrundlage dieser beiden Prozesse näher betrachtet. Weiterhin wird die Repräsentativität der Umfrageergebnisse diskutiert.

Bereitstellung von Mineraldüngern

Die mit der Bereitstellung der verwendeten Mineraldünger verbundenen THG-Emissionen sind für die vorgestellten Ergebnisse aus Kapitel 5 der Ökobilanzdatenbank ecoinvent v.3.3 entnommen. Im Vorgängerprojekt ExpResBio wurde die Datenbankversion ecoinvent v.2.4 verwendet. Wie aus Tabelle 27 hervorgeht, unterscheiden sich die THG-Emissionsfaktoren zwischen den verschiedenen Versionen der ecoinvent-Datenbank insbesondere bei der Herstellung von Ammoniumsulfat. Hier ist eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen von 34 % zwischen den Datenbankversionen ecoinvent v.2.4 und ecoinvent v.3.3 festzustellen. Die anderen verwendeten und in Tabelle 27 aufgeführten Stickstoffmineraldünger zeigen nur geringe Veränderungen in der Höhe des THG-Emissionsfaktors. Der genaue Grund für die THG-Minderung bei der Erzeugung von 1 kg Ammoniumsulfat-Stickstoff konnte bis zur Berichtslegung nicht eruiert werden. Ebenfalls ist unklar, warum nur bei Ammoniumsulfat eine wesentliche Änderung des THG-Emissionsfaktors im Rahmen des Datenbankwechsels vorliegt. Da Ammoniumsulfat als eine wesentliche Stickstoffform in nahezu allen verwendeten Stickstoffmineraldüngern enthalten ist, sind die Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt ExpResBio (Verwendung von ecoinvent v.2.4) nur bedingt mit den in diesem Bericht dargelegten THG-Emissionen der Rapserzeugung in Bayern vergleichbar. Die in Unterkapitel 5.2 erläuterten geringeren THG-Emissionen der Rapserzeugung in den vorliegenden Untersuchungen im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem Projekt ExpResBio sind somit vorwiegend auf die Verwendung der anderen THG-Emissionsfaktoren zurückzuführen. Dies verdeutlicht, dass die Höhe der verwendeten THG-Emissionsfaktoren das Ergebnis der THG-Bilanzen der Rapserzeugung maßgeblich beeinflusst.

Wie bereits in Abschnitt 4.1.5 angeführt hängt die Höhe des THG-Emissionsfaktors von der Art des Produktionsprozesses und dessen Energieeffizienz und Emissionsintensität ab. Besonders energieintensiv ist hierbei die Ammoniaksynthese (Haber-Bosch-Verfahren), die zur Herstellung von Harnstoff, Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat dient. Die Produktion von Ammoniumnitrat erfolgt über die Zwischenstufe der Salpetersäure und ist mit sehr hohen N_2O -Feldemissionen verbunden. Diese N_2O -Feldemissionen konnten durch Technologiefortschritte in den letzten Jahren deutlich reduziert werden, wie die THG-Emissionen nach CHRISTENSEN et al. (2014) [17] zeigen (siehe Tabelle 27) [27]. Diese THG-Emissionsfaktoren sind mit $3,5 \text{ kg kg}^{-1}$ beim Ammoniumnitrat und mit $3,7 \text{ kg kg}^{-1}$ beim Kalkammonsalpeter weniger als halb so hoch wie der in der Datenbank ecoinvent dargestellte Technologiemit. Die von CHRISTENSEN et al. (2014) [17] veröffentlichten THG-Emissionsfaktoren beziehen sich auf die bestverfügbare Technik, während die THG-Emissionsfaktoren von ecoinvent den durchschnittlichen Technologiemit in Europa widerspiegeln. Dies verdeutlichen auch die Untersuchungen von SKOWRONSKA und FILIPEK (2014) [46] in ihrem Review über die Treibhausgasemissionen aus der Mineraldüngerproduktion.

Tabelle 27: THG- Emissionsfaktoren der Mineraldüngerproduktion, bezogen auf 1 kg Stickstoff [49][27]

Stickstoffdünger	THG-Emissionsfaktor in $\text{kg kg}^{-1} \text{ N}$			
	ecoinvent v.2.4	ecoinvent v.3.3	Christensen et al. (2014)	BioGrace/ EU RED I
Ammoniumsulfat	2,69	1,78	2,7	–
Ammoniumnitrat	8,55	8,74	3,5	–
Kalkammonsalpeter	8,65	8,83	3,7	–
Harnstoff	3,30	3,29	2,0	–
AHL	5,84	5,95	–	–
N-Dünger, generisch	–	–	–	5,9

Durch den Vergleich der THG-Emissionsfaktoren wird deutlich, dass auch bei der Produktion von Mineraldüngern ein großes THG-Minderungspotenzial liegt. Zur Reduzierung der THG-Emissionen bei der Rapserzeugung sollte auf die Verwendung von Mineraldüngern mit einem geringen THG-Emissionsfaktor geachtet werden.

N_2O -Feldemissionen

Die Bilanzierung der direkten und indirekten N_2O -Feldemissionen basiert, wie in Abschnitt 4.1.2 dargelegt, auf den globalen Emissionsfaktoren des IPCC (2006) [33], die ebenfalls in der Bilanzierungsmethodik der Richtlinie 2009/28/EG (EU-RED) Anwendung finden. Eine Unterscheidung hinsichtlich regionalspezifischer Aspekte wie vorliegende Bodenart, Klima oder angebaute Kultur wird in diesem Bewertungsansatz nicht getroffen.

In den Untersuchungen von DRESSLER, ENGELMANN et al. (2016) wurde bereits auf die Defizite dieser globalen Annahmen im IPCC-Ansatz hingewiesen und ein Methodenvergleich mit dem Berechnungsmodell nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) [48] durchgeführt. In dem Berechnungsmodell nach STEHFEST und BOUWMAN (2006) [48] sind standortspezifische Parameter wie Klimazone, Bodentextur, Kohlenstoffgehalt und pH-Wert im Boden berücksichtigt. Weiterhin können in diesem Modell die Bewirtschaftungsparameter N-Applikationsrate und Art der Feldfrucht zugrunde gelegt werden. DRESSLER, ENGELMANN et al. (2016) konnten in ihrem Methodenvergleich darlegen, dass sich die Berücksichtigung der genannten regional- und produktionsspezifischen Parameter maßgeblich auf die Höhe der N₂O-Feldemissionen auswirkt.

In den Untersuchungen von FLESSA et al. [27] wurde insbesondere der globale Emissionsfaktor des IPCC (Default-Ansatz) zur Berechnung der direkten N₂O-Feldemissionen kritisch hinterfragt, der 1 % der ausgebrachten organischen und mineralischen Stickstoffmengen sowie 1 % des in den Ernte- und Wurzelrückständen enthaltenden Stickstoffs entspricht [33]. Auf der Basis von Messdaten aus Feldversuchen zum Rapsanbau von fünf verschiedenen Standorten in Deutschland, die in ein im Projekt entwickeltes Berechnungsmodell integriert wurden, konnte ein rapsspezifischer Emissionsfaktor erarbeitet werden. Das entwickelte Berechnungsmodell ist an die Methodik von STEHFEST und BOUWMAN (2006) angelehnt und kann im Ergebnis durch Formel (6.1) beschrieben werden, die einen rapsspezifischen nicht linearen Zusammenhang zwischen der Intensität der Mineraldüngung und den direkten N₂O-Feldemissionen beschreibt:

$$N_2O - Emissionen = 0,678 * 10^{\frac{Dünger-N}{450,5}} \quad (6.1)$$

Bezogen auf das nach DüV (2017) für den Rapsanbau empfohlene Düngenniveau von 200 kg N ha⁻¹ liegt der rapsspezifische Emissionsfaktor bei 0,6 % und damit deutlich unter dem IPCC-Default-Wert von 1 %. Nach Angabe der Autoren konnte durch die Messungen eine erhebliche Variabilität zwischen den Standorten und Messjahren nachgewiesen werden.

Welchen Einfluss eine Veränderung des Emissionsfaktors zur Berechnung der direkten N₂O-Feldemissionen auf die THG-Emissionen der Rapserzeugung in Bayern hat, zeigt Abbildung 27. Hierfür wurden sowohl die direkten N₂O-Feldemissionen als gewichtete Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016 (Status quo) sowie der nach den Vorgaben der DüV (2017) optimierten Modellbetriebe mit dem rapsspezifischen Emissionsfaktor nach FLESSA et al. (2017) [27] neu berechnet. Die Berechnung der indirekten N₂O-Feldemissionen blieb unverändert entsprechend dem IPCC-Standard [33]. Unter Anwendung des rapsspezifischen Emissionsfaktors sinken die THG-Emissionen in der Rapserzeugung (Status quo) um bis zu 20 % in BKR A. In diesem Boden-Klima-Raum sinken die THG-Emissionen des optimierten Modellbetriebes unterhalb des NUTS-2-Wertes dieser Region auf 0,508 kg kg⁻¹. Die im Rechenergebnis um bis zu 20 % geringeren THG-Emissionen verdeutlichen, wie wichtig eine möglichst spezifische Bewertung

der N_2O -Feldemissionen ist. Insbesondere im Kontext der immer wieder kontrovers geführten politischen und gesellschaftlichen Debatte um die Nachhaltigkeit und das tatsächliche THG-Minderungspotenzial von Biokraftstoffen sollte der Anbau von Raps als eine der wichtigsten Rohstoffpflanzen zur Erzeugung von Biokraftstoffen nach aktuellem wissenschaftlichen Kenntnisstand bewertet werden.

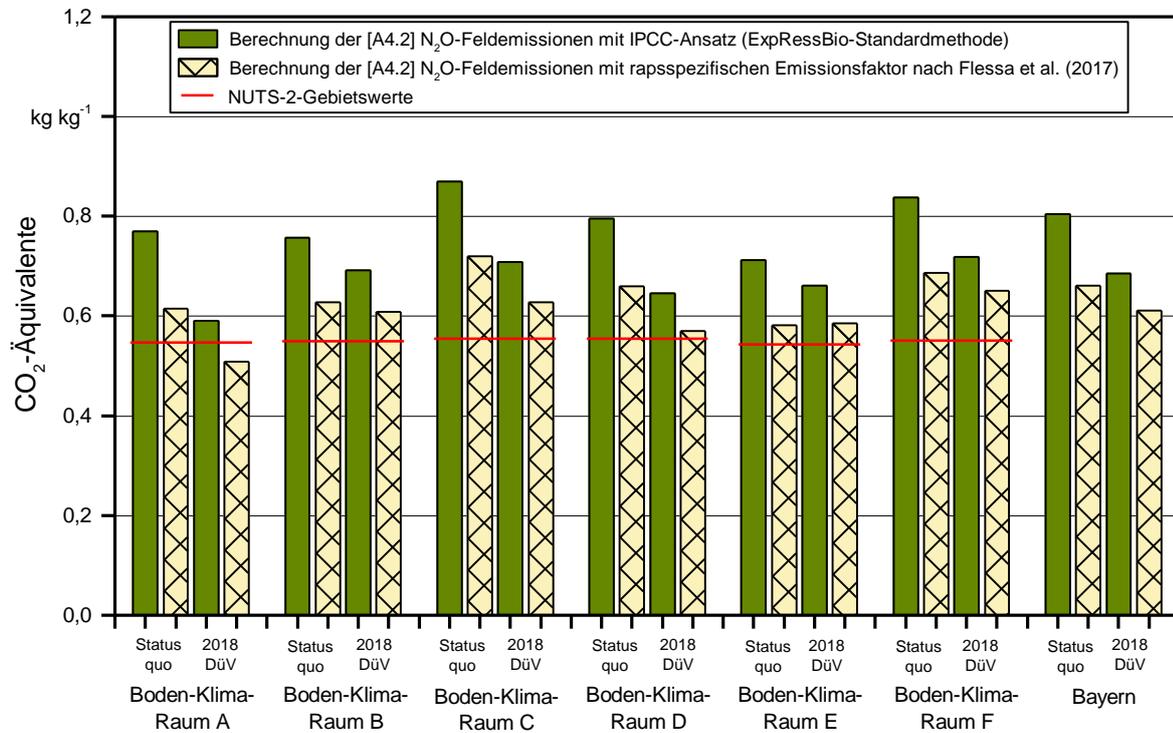


Abbildung 27: Einfluss des Emissionsfaktors zur Berechnung der N_2O -Feldemissionen auf die THG-Emissionen der Rapsproduktion in Bayern

Umfrageergebnisse zur eingesetzten Stickstoffmenge

Neben den verwendeten THG-Emissionsfaktoren der Mineraldüngerbereitstellung und zur Berechnung der N_2O -Feldemissionen hat die Datenqualität der erhobenen Stickstoffmengen und Rapsertträge von den Praxisbetrieben ebenfalls einen großen Einfluss auf die dargelegten Ergebnisse. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die Betriebe A1–A4, B1–B5, C1–C4 sowie D1 bereits im Vorgängerprojekt ExpResBio beteiligt waren. Hier wurden die Daten jährlich durch Vor-Ort-Befragungen erfasst und ausgewertet und für die vorliegende Untersuchung für das Erntejahr 2016 fortgeschrieben. Insbesondere durch die Vor-Ort-Befragung auf dem Betrieb kann hier von einer guten Datenqualität ausgegangen werden. Die jährliche Datenaufnahme verringert ebenfalls die Gefahr, dass die angegebenen Daten nur einer allgemeinen Schätzung des jeweiligen Betriebsleiters entsprechen.

Die Betriebsdaten zum Rapsanbau in den Boden-Klima-Räumen D–F wurden durch eine Befragung per Fragebogen erhoben, der von den Betriebsleitern auszufüllen war. Weiterhin erfolgte die Befragung hier nicht jährlich, sondern rückwirkend bis zum Erntejahr

2013. 85 % aller Betriebe gaben an, eine Schlagkartei zu führen, in der die Düngermenge und der Ertrag schlagspezifisch dokumentiert und archiviert werden. Lediglich die Betriebe D2, F7 und F9 gaben an, keine Schlagkartei zu führen. Weiterhin konnten aufgetretene Unstimmigkeiten in den ausgefüllten Fragebögen durch telefonische Rückfragen ausgeräumt werden, sodass insgesamt von einer guten Datenqualität ausgegangen werden kann. Einzig die geringe Stickstoffgabe in Betrieb E1 im Erntejahr 2016 in Höhe von insgesamt 90 kg bei einem angegebenen Ertrag von 33 dt ha⁻¹ ist kritisch zu hinterfragen, was in der Ergebnisinterpretation auch erfolgt ist (vgl. Abschnitte 4.1.5 und 5.1.1).

6.2 Weitere Einordnung der Ergebnisse in den wissenschaftlichen Kontext

Nachfolgend werden die in den vorangegangenen Kapiteln dargelegten Ergebnisse zu den THG-Emissionen und Stickstoffbilanzen der Raps-erzeugung und dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern, sofern noch nicht geschehen, in den in Unterkapitel 2.2 dargelegten Stand der Wissenschaft eingeordnet.

Die eigenen Untersuchungen zu den THG-Emissionen der Raps-erzeugung in Bayern zeigen sowohl einzelbetriebliche (1,039 bis 0,541 kg kg⁻¹) als auch regionalspezifische (0,869 bis 0,712 kg kg⁻¹) Unterschiede auf. Die einzelbetrieblichen Stickstoffsalden variieren zwischen 35,8 und 163,3 kg N ha⁻¹ bei einem Kornertrag von 32,8 bis 50,2 dt ha⁻¹. Der über alle Betriebe und Erntejahre gemittelte Stickstoffeinsatz liegt bei 267,6 kg N ha⁻¹. Dieser Wert liegt über dem mittleren Stickstoffinput in Höhe von 226 kg N ha⁻¹ aus den Analysen von WEIRAUCH (2016) [52], die 278 Rapsschläge über vier Erntejahre in Mecklenburg-Vorpommern untersucht und bilanziert hat. Der durchschnittliche Kornertrag in Mecklenburg-Vorpommern ist mit 38 dt ha⁻¹ geringer als der in den untersuchten Boden-Klima-Räumen Bayerns (42,3 dt ha⁻¹). Bezogen auf eine Dezi-tonne Kornertrag werden in Bayern mit 6,3 kg dt⁻¹ größere Stickstoffmengen ausgebracht als in Mecklenburg-Vorpommern (5,9 kg dt⁻¹).

Ein Vergleich der THG-Emissionen für die nach DüV (2017) optimierten Modellbetriebe mit den Untersuchungen von MOHR und JERCHEL (2017) zur Bewertung von Rapsfruchtfolgen unter Berücksichtigung der Düngeverordnung 2017 zeigt für die vorliegende Untersuchung geringfügig höhere THG-Emissionen. In den Untersuchungen von MOHR und JERCHEL (2017) konnten für die Region „Gute Standorte Süddeutschland“ THG-Emissionen in Höhe von 0,548 kg kg⁻¹ bei einer rein mineralischen Düngung und in Höhe von 0,553 kg kg⁻¹ bei einer mineralischen und organischen Düngung ermittelt werden. Die THG-Emissionen der Raps-erzeugung in den optimierten Modellbetrieben variieren zwischen 0,590 kg kg⁻¹ bei einer rein mineralischen Düngung und 0,710 kg kg⁻¹ bei einer organischen Düngung in Höhe von 95 kg N ha⁻¹. Somit liegt den Analysen der Raps-erzeugung in Bayern im Mittel ein höherer Anteil organischer Dünger mit einer geringeren Stickstoffeffizienz zugrunde. Weiterhin werden bei der THG-Bilanzierung von MOHR und JERCHEL (2017) mit dem ENZO₂-Tool (Version 1.4) andere THG-Emissionsfaktoren für die Bereitstellung der Mineraldünger verwendet.

7 Handlungsempfehlungen

Mit der betriebs- und regionalspezifischen Analyse und Bewertung der Rapserzeugung in Bayern konnten Handlungsfelder zur Reduzierung der Stickstoffsalden und THG-Emissionen aufgezeigt werden. Diese unterscheiden sich zwischen Empfehlungen zur Reduzierung der Stickstoffsalden und THG-Emissionen sowie Empfehlungen zur Anpassung der Bilanzierungsmethodik.

Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der Stickstoffsalden und THG-Emissionen der Rapserzeugung in Bayern

Die Analyse des Nährstoffmanagements der Rapserzeugung zeigt ein erhebliches einzelbetriebliches und regionalspezifisches Optimierungspotenzial auf. Insbesondere die Betriebe in den Boden-Klima-Räumen „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ und „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“ haben aufgrund ihres höheren Viehbesatzes vermehrt auf eine bedarfsgerechte Anwendung der organischen Düngemittel zu achten. Weiterhin leiten sich folgende Empfehlungen für eine optimierte und bedarfsgerechte Anwendung organischer und mineralischer Düngemittel ab:

- Begrenzung der Herbstdüngung auf 60 kg N_{ges} bzw. 30 kg NH₄-N entsprechend den Vorgaben der DüV (2017). Die Rapspflanze nimmt im Herbst zwischen 45 und 75 kg N ha⁻¹ auf. Eine höhere Stickstoffgabe führt zu hohen Auswaschungsraten und damit verbundenen N₂O-Feldemissionen.
- Verlustarme Ausbringung der organischen Düngemittel mit Einarbeitung in die oberen Bodenschichten. Eine Einarbeitung mittels Pflügen ist zu vermeiden, da der Stickstoff sonst in die unteren Bodenschichten verschoben wird und dem Raps in der Auflaufphase nicht zur Verfügung steht.
- Verzicht von NPK-Mineraldüngern bei vorheriger organischer Düngung mit Rinder- oder Schweinegülle bzw. Biogasgärresten. Organische Dünger sind Mehrnährstoffdünger und enthalten neben Stickstoff in den meisten Fällen bereits die ausreichenden Mengen an Phosphat und Kalium. NPK-Mineraldünger sind mit hohen THG-Emissionen in der Herstellung verbunden, die auf diese Weise vermeidbar sind.
- Durchführung einer N-Bedarfsanalyse auf Basis betriebsspezifischer Zielderträge. Die Verwendung von Durchschnittswerten der zuständigen Landesämter inkl. 15 % Aufschlag kann zu deutlichen Stickstoffüberschüssen führen.
- Verlagerung der organischen Düngung mit Schweinegülle oder flüssigen Gärresten vom Herbst auf die zweite Frühjahrsdüngung. Zur Vermeidung von Ertragsverlusten einerseits und deutlichen N-Überschüssen andererseits sollten maximal zwei Drittel des erforderlichen Stickstoffs in organischer Form ausgebracht werden.
- Angepasste Wahl des Stickstoffmineraldüngers unter Beachtung einer ausreichenden Schwefelversorgung. Eine Unterversorgung mit Schwefel kann zu erheblichen Ertragsausfällen und damit zu deutlichen N-Überschüssen führen.

- Anwendung von N-Mineraldüngern mit geringen THG-Emissionsfaktoren aus der Herstellung. Je nach Herstellungsverfahren ist eine zusätzliche Kalkung einem Stickstoffdünger mit einem hohen Ammoniumnitratgehalt (z. B. KAS) vorzuziehen. Weiterhin sollte auf eine mögliche Kennzeichnung der Mineraldünger geachtet werden, da die Ammoniumnitratherstellung unter effizienten Produktionsbedingungen zu deutlich geringeren THG-Emissionen führt.

Handlungsempfehlungen zur Anpassung der Bilanzierungsmethodik

Die vorliegende Analyse und Bewertung der Raps-erzeugung in Bayern zeigt für die THG-Emissionen und Stickstoffsalden deutliche einzelbetriebliche und regionalspezifische Unterschiede. Der Einfluss regionalspezifischer Gegebenheiten wie Klima, Boden und Bewirtschaftungsart konnte somit klar nachgewiesen werden. Weiterhin konnte herausgearbeitet werden, dass der Emissionsfaktor zur Berechnung der direkten N_2O -Feldemissionen einen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung der Raps-erzeugung hat. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich folgende Empfehlungen zur Anpassung der Bilanzierungsmethodik ableiten:

- Analysen und Bewertungen von Produktsystemen, aus denen Handlungsempfehlungen zur Minderung von THG-Emissionen in der landwirtschaftlichen Produktion abgeleitet werden, sollten zwingend regionalspezifische Gegebenheiten berücksichtigen. Standortsspezifische Gegebenheiten (z. B. Klima und Boden) sowie Bewirtschaftungscharakteristika haben einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse.
- Ein raps-spezifischer Emissionsfaktor zur Berechnung der stickstoffinduzierten N_2O -Feldemissionen führt zu deutlich geringeren Emissionen als der IPCC-Ansatz, wie Untersuchungen des Thünen-Institutes belegen. Für den Rapsanbau in Bayern führt die Anwendung dieses spezifischen Emissionsfaktors zu bis zu 20 % geringeren THG-Emissionen. Die methodischen Berechnungsvorgaben der EU-RED schreiben jedoch den IPCC-Ansatz vor und überschätzen die mit der Raps-erzeugung verbundenen N_2O -Feldemissionen und damit die THG-Emissionen deutlich. Aus diesem Grund wird empfohlen, die Berechnungsgrundlage zur Bestimmung der direkten N_2O -Feldemissionen in den Vorgaben der EU-RED anzupassen.

Weitere Handlungsempfehlungen zur Anpassung der Bilanzierungsmethodik wie die Bewertung der Koppelprodukte (Eiweißfuttermittel) mittels Substitution oder die Berücksichtigung eines Teilstandardwertes für die dezentrale Rapsölproduktion in dem Novellierungsentwurf der EU-RED II sind in DRESSLER, ENGELMANN et al. [21] dargelegt.

Zusammenfassung

Nicht erst seit dem Klimaschutzabkommen von Paris aus dem Jahr 2015 (COP 21) sowie dem daraus resultierenden Klimaschutzplan 2050 der deutschen Bundesregierung gehören der Klima- und Ressourcenschutz zu den wichtigsten gesellschaftlichen Aufgaben unserer Zeit. Mit dem Klimaschutzplan 2050 wurde festgelegt, dass im Bereich der deutschen Landwirtschaft bis zum Jahr 2030 31–34 % an Treibhausgasen eingespart werden sollten. Als Ergebnis des UN-Klimagipfels 2017 (COP23) haben sich die Mitgliedstaaten verpflichtet, bis zum 31.03.2018 speziell für den Agrarsektor ihre Vorschläge zum Klimaschutz einzureichen. Eine Maßnahme, die auch bereits aus dem Klimaschutzplan 2050 der deutschen Bundesregierung hervorgeht, ist, die Stickstoffüberschüsse und die damit verbundenen N₂O-Feldemissionen (Lachgasemissionen) deutlich zu reduzieren. Mit der neuen Düngeverordnung (DüV (2017)) werden bereits klare Vorgaben zur Reduzierung dieser N-Überschüsse gegeben. Weiterhin zeigen die Ergebnisse aus dem vom bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderten Projekt „Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie in Bayern (ExpRESSBio)“, dass die Ableitung praktisch umsetzbarer Handlungsempfehlungen nur auf Basis regionalspezifischer Daten und konkreter Produktionsbedingungen erfolgen kann (DRESSLER, ENGELMANN et al. (2016) [21]). Um die Raps-erzeugung in Bayern flächendeckend in Bezug auf die Stickstoffflüsse und THG-Emissionen bewerten und Optimierungsvorschläge ableiten zu können, müssen die im Projekt ExpRESSBio durchgeführten Analysen zum Rapsanbau in Bayern um weitere Boden-Klima-Räume ergänzt werden. Daraus ergibt sich innerhalb dieses Forschungsvorhabens die folgende Aufgabenstellung:

- Regionale und betriebsspezifische Analyse des Düngemanagements in den Boden-Klima-Räumen Bayerns für die Erntejahre 2013 bis 2016 (Status quo),
- Berechnung regionalspezifischer und einzelbetrieblicher Stickstoff- und THG-Bilanzen,
- Ableitung regionalspezifischer Modellbetriebe durch Hochrechnungen der Analyseergebnisse und Optimierung anhand der Vorgaben der DüV (2017),
- Vergleich der realen und modellhaften THG-Emissionen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern mit dem RED-Standardwert für fossilen Diesel,
- Ableitung regionalspezifischer Handlungsempfehlungen zur flächendeckenden Optimierung der THG-Bilanz der Raps-erzeugung.

Der Analyse und Bewertung der THG-Emissionen der Raps-erzeugung in Bayern werden die ExpRESSBio-Methoden nach WOLF, DRESSLER et al. (2016) [55] zugrunde gelegt. Die Bewertung des Düngemanagements und die sich daraus ergebende Bestimmung der Stickstoffsalden erfolgen nach den Vorgaben der Düngeverordnung sowohl zum Stand der Datenerhebung (DüV (2007)) als auch in der novellierten Fassung (DüV (2017)). Die Vorgaben der DüV sind in dem Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland der

Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft praxisgerecht beschrieben [53][54]. In WOLF, DRESSLER et al. (2016) [55] sind die harmonisierten ExpResBio-Methoden ausführlich beschrieben. Hauptelement der Harmonisierung ist die Systemdarstellung. Mit ihrer Hilfe kann der Anwender das zu untersuchende Produktsystem in einzelne Prozesse strukturieren. Dabei werden die Prozesse einer Nomenklatur zugeordnet, nach der die Ergebnisse entsprechend dargestellt werden können. Weiterhin lassen sich in der Systemdarstellung wesentliche Informationen zu den Systemgrenzen, der funktionellen Einheit oder der Methodik zum Umgang mit Koppelprodukten festlegen. Die Bewertung der Koppelprodukte erfolgt in der Basisvariante mittels Exergie-Allokation bzw. bei der Bewertung von Biokraftstoffen mittels Allokation nach dem Heizwert. Eine ergänzende Bewertung mit der Substitutionsmethode wird allerdings empfohlen [55].

Betriebs- und regionalspezifische Datenerhebung

Grundlage der betriebs- und regionalspezifischen Datenerhebung bilden die wichtigen Rapsanbauregionen in Bayern (Hotspot-Regionen). Hierzu wurden im Projekt ExpResBio bereits 15 Praxisbetriebe in den drei Boden-Klima-Räumen „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“ (A), „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“ (B) sowie „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ (C) untersucht. Die dabei erhobenen Daten fließen in die vorliegende Untersuchung ein und werden für das Erntejahr 2016 fortgeschrieben. Zur Identifikation weiterer Hotspot-Regionen wurden Daten der Agrarstatistik mithilfe des Geofachdatendienstes CADENZA® [19] ausgewertet. Dabei wurde deutlich, dass die größten Rapsanbauflächen in Bayern vor allem im Regierungsbezirk Unterfranken zu finden sind. Bezogen auf die Gebietsgliederung nach ROßBERG et al. (2007) [45] ist dieser Regierungsbezirk dem Boden-Klima-Raum „Nordwestbayern-Franken“ (F) zuzuordnen. Die weiteren im Projekt ExpResBio noch nicht untersuchten Hotspots konnten den Boden-Klima-Räumen „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“ (D) sowie „Gäu, Donau- und Inntal“ (E) zugeordnet werden. Im Boden-Klima-Raum „Moränen-Hügelland und Voralpenland“ ist der Rapsanbau nicht von Bedeutung. Folglich konnte für alle wesentlichen Boden-Klima-Räume Bayerns in insgesamt 36 Betrieben eine Analyse und Bewertung zum Nährstoffmanagement durchgeführt werden. Diese Analyse basiert auf einer schriftlichen Befragung zur Betriebsstruktur (Ackerbau oder Viehbetrieb), den natürlichen Standortbedingungen (Bodenart) zur Bodenbearbeitung, zum Nährstoffmanagement und zum spezifischen Rapsenertrag, wobei das Nährstoffmanagement und der Rapssaatertrag für insgesamt vier Erntejahre (2013–2016) erfasst wurden. Darüber hinaus wurden die teilnehmenden Betriebe den verfügbaren Klimastationen der Agrarmeteorologie Bayern zugeordnet und die jeweiligen Durchschnittstemperaturwerte, Niederschlagssummen und Anzahl an Vegetationstagen abgerufen. Die Auswertung der erhobenen Daten zeigt, dass die Betriebe mit Tierhaltung in den Boden-Klima-Räumen C und D im Mittel des Erntejahres 2016 die geringsten Erträge erzielten. Die detaillierte Auswertung zum Nährstoffmanagement zeigte jedoch, dass die ausgebrachten Stickstoffmengen in diesen Boden-Klima-Räumen durchschnittlich am höchsten waren, wobei dort auch die ausgebrachte Menge an organischem Stickstoff höher war als in den anderen Regionen. Zur Berechnung der THG-Emissionen wurden die regional- und betriebspezifischen Aktivitätsdaten in der Ökobilanzsoftware GaBi ts mit entsprechenden Datensätzen und Emissionsfaktoren aus der Datenbank ecoinvent v.3.3 [49] verknüpft.

THG-Emissionen der Rapszerzeugung

Die einzelbetrieblichen THG-Emissionen der Rapszerzeugung in den drei untersuchten Boden-Klima-Räumen in Bayern zeigen deutliche einzelbetriebliche und jahresspezifische Unterschiede auf (siehe Abbildung 28). Die jahresspezifischen Unterschiede sind insbesondere auf Ernteaufträge durch Trockenstress oder Hagelschäden zurückzuführen. Weiterhin zeigen die Ergebnisse auch deutliche einzelbetriebliche Unterschiede auf, die zwischen 1,039 kg kg⁻¹ in Betrieb C3 und 0,541 kg kg⁻¹ in Betrieb B8 variieren. Als Gründe für diese hohe Ergebnisbandbreite konnten betriebs- und regionalspezifische Unterschiede im Nährstoffmanagement identifiziert werden. Hierbei sind die regionalspezifischen Ertragspotenziale der jeweiligen Betriebe ausschlaggebend, die im Boden-Klima-Raum C „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“ mit 39,4 dt ha⁻¹ und im Boden-Klima-Raum D „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“ mit 41,3 dt ha⁻¹ am niedrigsten sind. Gleichzeitig ist die ausgebrachte Stickstoffmenge mit 257 bzw. 255 kg N_{ges} ha⁻¹ in diesen Regionen am höchsten, da dort auch die größte Menge organischer Düngemittel ausgebracht wird.

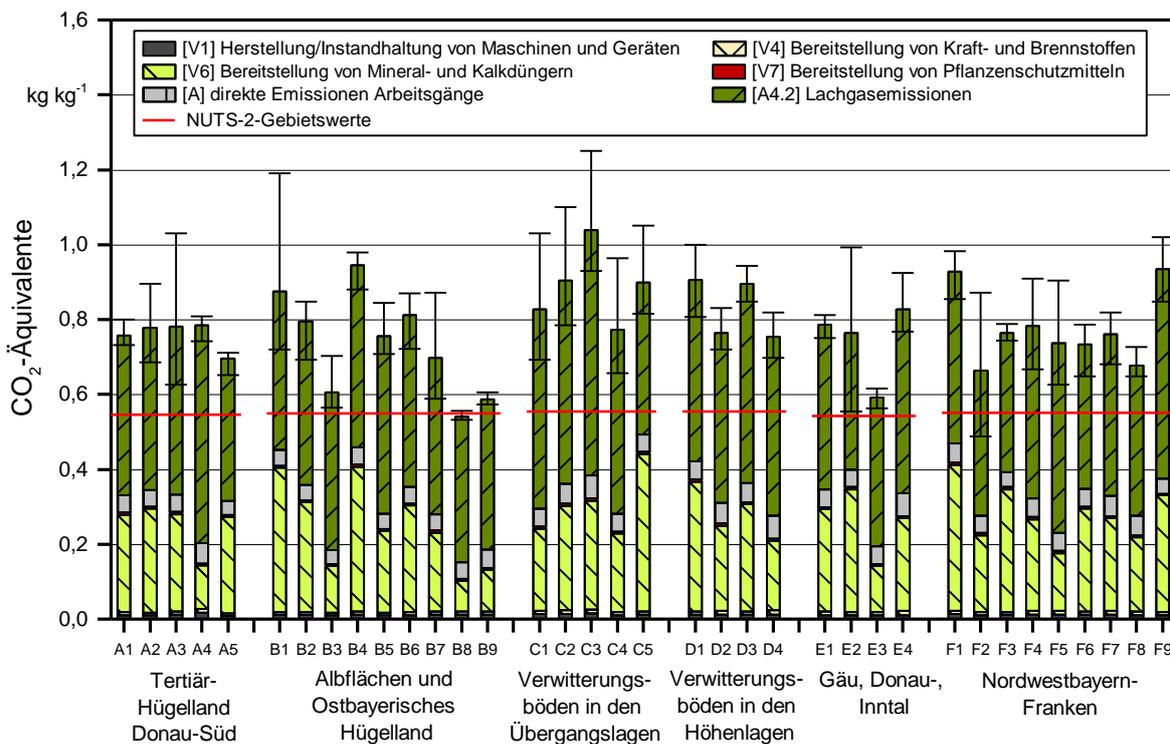


Abbildung 28: Einzelbetriebliche THG-Emissionen der Rapszerzeugung als CO₂-Äquivalente, Mittelwerte der Erntejahre 2013–2016, gegliedert nach Boden-Klima-Raum

Organische Düngemittel, wie Schweine- oder Rindergülle sowie Biogasgärrest haben eine geringere N-Effizienz, da nur der im organischen Düngemittel gebundene Ammoniumanteil der Raps pflanze im Anbaujahr zur Verfügung steht. Dieser liegt je nach Düngerform zwischen 50 und 70 % des Gesamtstickstoffs. Außerdem sind organische Düngemittel deutlich stärker von Ausbringungsverlusten (z. B. in Form von Ammoniakemis-

sionen) oder Auswaschung betroffen als Stickstoffmineraldünger. Dies führt somit zwangsläufig zu höheren Stickstoffüberschüssen als bei einer rein mineralischen Stickstoffdüngung. Durch einen nicht bedarfsgerechten Einsatz organischer Dünger wird dieser Effekt noch deutlich verstärkt.

Die höchsten einzelbetrieblichen Stickstoffüberschüsse werden in den Betrieben C3 und F9 erreicht. Der hohe Stickstoffeinsatz spiegelt sich auch in den einzelbetrieblichen THG-Emissionen wider, der in den Betrieben C3 und F9 im Mittel der drei Erntejahre bei 1,039 bzw. 0,848 kg kg⁻¹ liegt (siehe Abbildung 28). In beiden Betrieben konnte eine nicht bedarfsgerechte Gärrestdüngung im Herbst identifiziert werden. Die Herbstdüngung im Speziellen wie das Nährstoffmanagement im Allgemeinen stellen eine signifikante Stellschraube zur Reduzierung der THG-Emissionen im Rapsanbau dar. Insbesondere die Herbstdüngung ist mit der DÜV (2017) [12] stark eingeschränkt worden, so dass hier ein großes Potenzial besteht, organische Düngemittel zukünftig bedarfsgerechter anzuwenden.

Optimierung des Nährstoffmanagements und der THG-Emissionen regionalspezifischer Modellbetriebe

Dieses Potenzial konnte mit einer Optimierung des Nährstoffmanagements entsprechend den Vorgaben nach DÜV (2017) [12] aufgezeigt werden. Hierbei wurden Modellbetriebe auf Basis der erhobenen und regionalspezifisch ausgewerteten Daten zum Rapsenertrag und zum Nährstoffmanagement kalkuliert, wobei die Stickstoffbedarfsermittlung nach den Empfehlungen von WENDLAND et al. (2017) durchgeführt wurde. Alle Vorgaben der DÜV (2017) [12] (z. B. Begrenzung der Herbstdüngung) wurden eingehalten. Die Ergebnisse dieser Optimierung zeigen, dass sich die THG-Emissionen der Rapsproduktion in Bayern durch ein bedarfsgerechtes Nährstoffmanagement entsprechend den Vorgaben nach DÜV (2017) im Durchschnitt um 15 % im Vergleich zum Status quo (regionalspezifischer Mittelwert der Erntejahre 2013–2016) reduzieren lassen. Die Bedeutung der bedarfsgerechten Verwendung organischer Düngemittel einerseits und einer auf den standortspezifischen Ertrag angepassten Stickstoffbedarfsanalyse andererseits wird in den Boden-Klima-Räumen C und D besonders deutlich. Dort lassen sich die THG-Emissionen von 0,87 auf 0,71 kg kg⁻¹ in Boden-Klima-Raum C und von 0,79 auf 0,65 kg kg⁻¹ in Boden-Klima-Raum D um 18 bzw. 19 % reduzieren.

Dezentrale Rapsölkraftstoffproduktion

Bezogen auf das vollständige Produktsystem der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern liegen die THG-Emissionen im bayerischen Mittel (RegioTHGRaps Status quo) bei 33,3 g MJ⁻¹. Im Vergleich dazu liegen die Standardwerte nach Richtlinie 2009/28EG (EU-RED) [22] und dem Entwurf der EU-RED II [25] mit 36 g MJ⁻¹ bzw. 40 g MJ⁻¹ deutlich höher. Grund für die höheren Emissionen ist, dass bei einer industriellen Ölgewinnung nach dem Pressvorgang noch die energieintensiven Extraktions- und Raffinationschritte folgen. Die geringeren THG-Emissionen der dezentralen Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern sind daher auf den kürzeren Transport zur Ölmühle sowie den geringeren verfahrenstechnischen Aufwand der dezentralen Ölgewinnung zurückzuführen. Der kürzere Transportweg zur Ölmühle führt zu THG-Emissionen in Höhe von 0,28 g MJ⁻¹ und die THG-Emissionen aus der dezentralen Ölgewinnung betragen im Mittel 1,44 g MJ⁻¹.

Die mit der Prozessgruppe [A] Rapserzeugung verbundenen THG-Emissionen liegen bei den spezifischen Analysen im Projekt ExpResBio bei $33,4 \text{ g MJ}^{-1}$ (vgl. Abbildung 29). In den vorliegenden Untersuchungen (RegioTHGRaps) reduziert sich das Rechenergebnis für den Rapsanbau auf $31,5 \text{ g MJ}^{-1}$. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass den Ergebnissen der beiden Projekte unterschiedliche Versionen in der Datenbank ecoinvent zugrunde liegen. Die geringere THG-Emission ist somit nicht auf die umfangreichere spezifische Datenbasis zurückzuführen. Im Vergleich zu den Teilstandardwerten der EU-RED I (30 g MJ^{-1}) und dem Entwurf der EU-RED II ($33,4 \text{ g MJ}^{-1}$) sind die THG-Emissionen bei einem optimierten Rapsanbau in Bayern mit $26,9 \text{ g MJ}^{-1}$ deutlich geringer. Somit kann durch den Einsatz von dezentral erzeugtem Rapsölkraftstoff eine THG-Minderung von bis zu 70 % im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff ($95,1 \text{ g MJ}^{-1}$) erreicht werden.

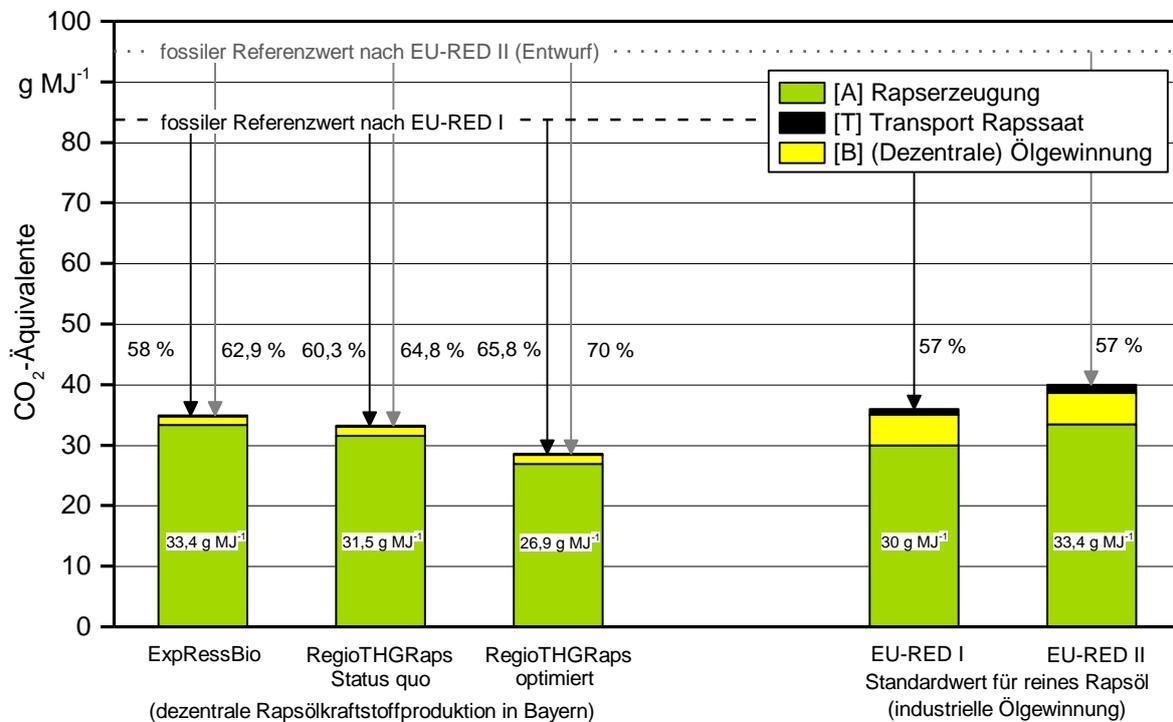


Abbildung 29: THG-Emissionen von Rapsölkraftstoff aus dezentraler Ölgewinnung in Bayern als CO₂-Äquivalente im Vergleich zum fossilen Referenzwert und den RED-Standardwerten (EU-RED I und Entwurf der EU-RED II) für reines Rapsöl aus industrieller Ölgewinnung

Fazit und Handlungsempfehlungen

Mit der betriebs- und regionalspezifischen Analyse und Bewertung der Rapserzeugung in Bayern konnte der Einfluss regionalspezifischer Gegebenheiten wie Klima, Boden und Bewirtschaftungsart klar nachgewiesen werden. Anhand der spezifischen Analysen konnten Handlungsfelder zur Reduzierung der Stickstoffsalden und THG-Emissionen insbesondere in Bezug auf einen bedarfsgerechten Umgang mit organischen Düngemitteln und eine darauf abgestimmte Mineraldüngergabe aufgezeigt werden. So sollte bei-

spielsweise der vor der Saat ausgebrachte organische Dünger nicht untergepflügt, sondern nur in die oberen Bodenschichten eingearbeitet werden. Zudem wird bei Düngung mit Gülle oder Biogasgärresten empfohlen, auf die zusätzliche Gabe eines NPK-Mineraldüngers zu verzichten. Bei der Wahl der Mineraldünger sollte auf Produkte mit geringen THG-Emissionen bei der Produktion geachtet werden. Hier zeigen die unterschiedlichen Stickstoffvarianten deutliche Unterschiede in der Höhe ihres Emissionsfaktors. Allerdings hat es in den letzten Jahren auch deutliche Verbesserungen bei der Produktion von Ammoniumnitrat gegeben, der Stickstoffform mit dem höchsten THG-Emissionsfaktor. Für die Berechnung der direkten N_2O -Feldemissionen sollte der raps-spezifische Emissionsfaktor nach FLESSA et al. (2017) [27] verwendet werden. Die von FLESSA et al. (2017) [27] durchgeführten Emissionsmessungen im Rapsanbau zeigten, dass die Höhe der direkten N_2O -Feldemissionen durch den IPCC-Ansatz überschätzt wird. Eine Anpassung der Bilanzierungsmethoden im Rahmen der Novellierung der EU-RED nach den neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen wird empfohlen.

Abstract

Achieving the international goals for climate and resource protection is a more and more important task in the 21st century. To assess GHG reduction potential of bio-based products and bioenergy specific data and a profound knowledge about how to calculate are necessary. The evaluation of rapeseed production in Bavaria pointed out that GHG emissions and nitrogen balances show significant farm-specific and site-specific differences. For example, farm-specific GHG-emissions range from 0.541 to 1.039 kg kg⁻¹ and site-specific GHG-emissions from 0.712 to 0.859 kg kg⁻¹ rapeseed. Influencing key factors are the site-specific biomass yield and the nutrient management that is taken as basis. In this context using organic fertilizers is one important determining factor. The optimization of nutrient management in the direction of demand-oriented organic and mineral fertilization, considering the legal requirements of the Fertilizer Ordinance 2017, reduces GHG emissions by up to 23 %. With optimized rapeseed cultivation, the use of rapeseed oil fuel can reduce GHG emissions (allocated) by an average of 70 % compared to the fossil reference level for diesel (95.1 g MJ⁻¹).

Quellenverzeichnis

- [1] AGRARMETEOROLOGIE BAYERN (2017): Wetterdaten Bayern. URL: <http://www.wetter-by.de/Internet/AM/inetcptrBY.nsf/cuhome.xsp?src=L941ES4AB8&p1=K1M7X321X6&p3=SRA5CMEY17&p4=4D078O1691> (Stand: 21.08.2017)
- [2] AIGNER, A.; STICKSEL, E.; SCHMIDT, M. (2015): Versuchsergebnisse aus Bayern – Jahr 2015 – Winterraps. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (IPZ) (Hrsg.). URL: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/winterraps_2015.pdf URL: <http://www.hortigate.de/Apps/WebObjects/ISIP.woa/vb/bericht?nr=70710> (Stand: 22.01.2018)
- [3] AIGNER, A.; STICKSEL, E.; SCHMIDT, M. (2016): Versuchsergebnisse aus Bayern – Jahr 2016 – Winterraps. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (IPZ) (Hrsg.). URL: <http://www.hortigate.de/Apps/WebObjects/ISIP.woa/vb/bericht?nr=70710> (Stand: 22.01.2018)
- [4] AIGNER, A.; STICKSEL, E.; SCHMIDT, M. (2017): Versuchsergebnisse aus Bayern – Jahr 2017 – Winterraps. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (IPZ) (Hrsg.). URL: <http://www.hortigate.de/Apps/WebObjects/ISIP.woa/vb/bericht?nr=74395> (Stand: 22.01.2018)
- [5] ALBERT, E. (2011): Düngung. In: CHRISTEN, O.; FRIEDT, W.: Winterraps. Das Handbuch für Profis. 2., überarb. Ausg. Frankfurt: DLG-Verlags-GmbH, S. 121–142
- [6] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL)(2017): Unkrautmanagement in Winterraps. Freising: Bayerisches Landesamt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz. URL: <https://www.lfl.bayern.de/ips/pflanzenschutz/027325/index.php> (Stand 14.07.2017)
- [7] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STEUERN (BAYLFSt) (2009): Merkblatt über den Aufbau der Bodenschätzung. URL: https://www.finanzamt.bayern.de/Informationen/Steuerinfos/Weitere_Themen/Bodenschaetzung/Merkblatt-ueber-den-Aufbau-der-Bodenschaetzung.pdf (Stand 26.02.2018)
- [8] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (STMELF) (2017): InVeKoS-Datenbank (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem). München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Stand: 04.07.2017)
- [9] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (BMJV) (2011): Gesetz zur Änderung des Energiesteuer- und des Stromsteuergesetzes vom 1. März 2011 – Artikel 1 Änderung des Energiesteuergesetzes. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 8, S. 282–285
- [10] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (BMJV) (2017): 38. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasminderung bei Kraftstoffen – 38. BImSchV) vom 8. Dezember 2017. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 77, S. 3892–3901
- [11] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMELF) (2017): Erntebericht 2016, Ernte 2016: Menge und Preise, vom 26. August 2016. Anlage 3: Winterrapsernte 2016 nach Ländern. Berlin: Bundesministerium für Ernährung- und Landwirtschaft (BMELF), S. 7

- [12] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMELF) (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV). Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 32, S. 1305–1348
- [13] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMELV) (2007): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV). Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 7, S. 221–239
- [14] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2009): Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von flüssiger Biomasse zur Stromerzeugung (Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung – BioStNachV) vom 23. Juli 2009, die zuletzt durch Artikel 2 Abs. 70 der Verordnung vom 22.12.2011 geändert worden ist. Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 46, S. 2174–2202
- [15] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2016A): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Kabinettsbeschluss vom 14. November 2016. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU), 91 Seiten
- [16] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (2016B): Pariser Klimaschutzabkommen tritt in Kraft. Pressemitteilung Nr. 238 vom 05.10.2016, Berlin, 1 Seite
- [17] CHRISTENSEN, B.; BRENTROP, F.; SIX, L.; PALLIÈRE, C.; HOXHA, A. (2014): Assessing the carbon footprint of fertilizers, at Production and Full LCA. Proceeding, Nr. 751. London: International Fertiliser Society, 19 Seiten, ISBN 978-0-85310-388-2
- [18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2012): DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. April 2012. Berlin: Beuth-Verlag, 52 Seiten
- [19] DISY INFORMATIONSSYSTEME GMBH (2017): Cadenza-Software. Karlsruhe: Disy Informationssysteme GmbH (Stand: 04.07.2017)
- [20] DRESSLER, D.; ENGELMANN, C.; REMMELE, E. (2015): Opportunities for decentralized production of rapeseed oil fuel considering the rate of greenhouse gas reduction. In: BUNDESVERBAND BIOENERGIE E. V. (BBE); UNION ZUR FÖRDERUNG VON OEL- UND PROTEINPFLANZEN E. V. (UFOP); BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN BIOETHANOLWIRTSCHAFT E. V. (BDBE); FACHVERBAND BIOGAS E. V. (Hrsg.): Kraftstoffe der Zukunft 2015. 12. Internationaler Fachkongress für Biokraftstoffe. CityCube, Berlin, 19.-20.01. Bonn: Bundesverband BioEnergie e. V. (BBE), S. 1–24
- [21] DRESSLER, D.; ENGELMANN, K.; SERDJUK, M.; REMMELE, E. (2016): Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern. Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode. Berichte aus dem TFZ, Nr. 50. Straubing: Technologie- und Förderzentrum, 168 Seiten, ISSN 1614-1008

- [22] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2009): Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, Jg. 52, L140, S. 16–62
- [23] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2015): Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates vom 20. April 2015 zur Festlegung von Berechnungsverfahren und Berichtserstattungspflichten gemäß der Richtlinie 98/70/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Otto- und von Dieselmotoren. Amtsblatt der Europäischen Union, L107/26 vom 25.04.2015
- [24] EUROPEAN COMMISSION (2011): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context – based on existing environmental impact assessment models and factors First edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 143 Seiten. JRC 61049, EUR 24571 EN, ISBN 978-92-79-17451-3, ISSN 1018-5593, DOI: 10.278/33030
- [25] COUNCIL OF THE EUROPEAN COMMUNITY (2016): ANNEXES to the Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). From: Mr. Jordi AYET PUIGARNAU TO: Mr. Jeppe Tranholm-Mikkelsen. No. Cion doc: COM (2016) 767 final, Annexes 1–12, Interinstitutional File 2016/0382 (COD). Brussels: European Commission, 113 Seiten
- [26] FEHRENBACH, H. (2010): Ermittlung von disaggregierten Standardwerten für den Anbau auf der Ebene der NUTS-2-Regionen für die Berichterstattungspflicht nach Artikel 19 Absatz 2 der Erneuerbare-Energien-Richtlinie. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU) im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 13 Seiten
- [27] FLESSA, H.; FUß, R.; MOFFAT, A.; WEISER, C.; STICHPOTE, H.; MALLAST, J.; ÖHLSCHLÄGER, G.; AUGUSTIN, J.; ANDRES, M.; HUTH, V.; CHRISTEN, O.; HEGEWALD, H.; DITPERT, K.; KÖBKE, S.; HEILMANN, H.; KAGE, H.; KNIEß, A.; PAHLMANN, I.; RÄBIGER, T.; MÜHLING, K. H.; RUSER, R.; LEWANDOWSKI, I.; KESENHEIMER, K.; PROCHNOW, A.; KERN, J.; SUÁREZ-QUIÑONES, T. (2017): Minderung von Treibhausgasemissionen im Rapsanbau unter besonderer Berücksichtigung der Stickstoffdüngung. Abschlussbericht. Braunschweig: Thünen-Institut für Agrarklimaschutz, 119 Seiten
- [28] PAUL, N. (2018): Treibhausgasemissionen im Rapsanbau realistisch bewerten und vermindern. Globale Standardwerte überschätzen Lachgas-Emissionen im Rapsanbau Presseerklärung der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. vom 01.02.2018, PM 2018-04. Kontaktperson: Paul, N. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2 Seiten
- [29] HAAS, R.; REMMELE, E. (2011): Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung. Im Auftrag der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (UFOP). Berichte aus dem TFZ, Nr. 26. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 74 Seiten, ISSN 1614-1008

- [30] HAAS, R.; REMMELE, E. (2013): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung. Im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF). Berichte aus dem TFZ, Nr. 34. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für nachwachsende Rohstoffe, 51 Seiten, ISSN 1614-1008
- [31] INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH (IFEU) (2015): Biograce. Harmonised calculations of biofuel greenhouse gas emissions in Europe. URL: www.biograce.net (Stand: 24.02.2016)
- [32] INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH (IFEU) (2015): Treibhausgasberechnungs-Tools für RED und BioSt-/Biokraft-NachV. URL: <http://www.ifeu.de/index.php?bereich=nac&seite=ENZO2> (Stand: 16.02.2016)
- [33] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 11 N₂O Emissions from Managed Soils and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 54 Seiten
- [34] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2007): The Physical Science Basis. Cambridge, England: Cambridge University Press (Climate change 2007: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, 1), 996 Seiten
- [35] JERCHEL, K.; MOHR, R. (2017): Rapsfruchtfolgen mit der neuen Düngeverordnung. UFOP-Praxisinformation. Berlin: Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP), 28 Seiten
- [36] NEULING, U.; KALTSCHMITT, M.; MÜLLER-LANGER, F. (2016): Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen. In: KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 1380–1408, ISBN 978-3-662-47437-2
- [37] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (2017): KTBL-Feldarbeitsrechner. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), URL: <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/home.html> (Stand: 14.07.2017)
- [38] LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LfL) (Hrsg.) (2011): Anbauempfehlungen für Winterraps. LfL-Information. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (IPZ). URL: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/p_37308.pdf (Stand: 22.01.2018)
- [39] MOHR, R.; JERCHEL, K. (2017): Evaluierung von Fruchtfolgen mit und ohne Raps hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und Treibhausgasbilanz unter Berücksichtigung der neuen Düngeverordnung. Schlußbericht zu Projekt Nr. 529/1. Aktualisierte Fassung 09.11.2017. Berlin: Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP) (Hrsg.), 213 Seiten.
- [40] VERBAND DER ÖLSAATENVERARBEITENDEN INDUSTRIE IN DEUTSCHLAND E. V. (OVID) (2014): Merkblatt über die Angabe regionaler CO₂-Werte beim Handel von Rapsaaten zur Biodieselherstellung. Berlin: Verband der Ölsaatenverarbeitenden Industrie in Deutschland e. V. (OVID), 18 Seiten

- [41] REDcert Gesellschaft zur Zertifizierung nachhaltig erzeugter Biomasse mbH (2013): Information zur Verwendung der NUTS-2-Werte zur Berechnung der THG-Emissionen im Anbau. URL: <https://www.redcert.org/de/nuts-tool.html> (Stand: 15.01.2018)
- [42] REISENWEBER, J.; SCHÄGGER, M. (2016): Hektarerträge Bayerns 1958–2015. Land – Regierungsbezirke – Landkreise. Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur (IBA) ab der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Excel-Arbeitsblätter Anbauflächen – Erträge – Erntemengen (LfL-IBA-5a) (Stand: 19.01.2017), 9 Arbeitsblätter
- [43] REMMELE, E. (2009): Handbuch Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen. 2. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 88 Seiten, ISBN 978-3-9803927-9-2
- [44] RÖSEMANN, C.; HAENEL, H.-D.; DÄMMGEN, U.; FREIBAUER, A.; WULF, S.; EURICH-MENDEN, B.; DÖHLER, H.; SCHREINER, C.; BAUER, B.; OSTERBURG, B. (2015): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990–2013 – Report on methods and data (RMD). Submission 2015. Thünen-Report, Nr. 27. Braunschweig: Johann-Heinrich-von-Thünen-Institut, 372 Seiten
- [45] ROßBERG, D.; MICHEL, V.; GRAF, R.; NEUKAMPF, R. (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, Jg. 59, Nr. 7, S. 155–161
- [46] SKOWRONSKA, M.; FILIPEK, T. (2014): Life Cycle Assessment of fertilizers: a review. International Agrophysics, Jg. 28, Nr. 1, S. 101–110. DOI: 10.2478/intag-2013-0032
- [47] STATISTISCHES BUNDESAMT (2017): Wachstum und Ernte – Feldfrüchte – 2016. Fachserie 3 Reihe 3.2.1. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis), Abteilung Land- und Forstwirtschaft, 156 Seiten. URL: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/ErnteFeldfruechte/FeldfruechteJahr2030321167164.pdf?__blob=publicationFile (Stand 22.1.2018)
- [48] STEHFEST, E.; BOUWMAN, L. (2006): N₂O and NO emissions from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. Nutrient Cycling in Agroecosystems, Jg. 74, Nr. 3, S. 207–228. DOI:10.1007/s10705-006-9000-7
- [49] SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES (2011): Ecoinvent Database v.3.3 (Oktober 2017)
- [50] THINKSTEP AG (2017): GABI Software and database contents for Life Cycle Assessment. Leinfelden-Echterdingen: Thinkstep AG (Stand: Oktober 2017)
- [51] UHL, A.; HAAS, R.; REMMELE, E. (2007): Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen. Im Auftrag der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. Berichte aus dem TFZ, Nr. 15. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 68 Seiten, ISSN 1614-1008
- [52] WEIRAUCH, M. (2016): Erarbeitung regionalspezifischer Klimagas- und Energiebilanzen für die wichtigsten Produktionsverfahren in der Pflanzenproduktion und Ableitung von Optimierungspotenzialen. Unveröffentlichter Forschungsbericht. Gülzow: Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Institut für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft, 47 Seiten

- [53] WENDLAND, M.; DIEPOLDER, M.; CAPRIEL, P. (2012): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. Gelbes Heft – 10., unveränd. Aufl. 2012 (mit aktualisiertem Anhang). Freising: Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Institut für ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz, 98 Seiten
- [54] WENDLAND, M.; DIEPOLDER, M.; OFFENBERGER, K.; RASCHBACHER, S. (2018): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. Gelbes Heft – Stand: 2018. Freising: Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Institut für ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz, 98 Seiten
- [55] WOLF, C.; DRESSLER, D.; ENGELMANN, K.; KLEIN, D.; WEBER-BLASCHKE, G.; BÖSWIRTH, T.; BRYZINSKI, T.; EFFENBERGER, M.; HIJAZI, O.; HÜLSBERGEN, K.-J.; MAZE, M.; REMMELE, E.; RÖDER, H.; SCHULZ, C.; SERDJUK, M.; THUNEKE, K.; TIEMANN, A.; ZERLE, P. (2016): ExpRessBio – Methoden. Methoden zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen. Berichte aus dem TFZ, Nr. 45. Straubing: Technologie- und Förderzentrum, 166 Seiten, ISSN 1614-1008

Anhang I: Klimadaten der untersuchten Boden-Klima-Räume

Tabelle 28: Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum A „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“

Wetterstation (Betrieb)	Höhenlage in m	Jahr	Durchschnittstemperatur in °C	Niederschlags-summe in mm	Anzahl Vegetationstage
Osterseeon (A1, A2, A3, A4)	560	2013	7,9	976,7	220
		2014	9,3	848,8	253
		2015	9,3	786,2	238
		2016	8,7	1174,7	227
		MW	8,8	946,5	235
Freising (A5)	470	2013	8,3	842,8	222
		2014	9,7	848,5	260
		2015	9,6	702,3	247
		2016	9,1	775,5	239
		MW	9,2	792,3	242
BKR A		MW	8,9	915,7	236

Tabelle 29: Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum B „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“

Wetterstation (Betrieb)	Höhenlage in m	Jahr	Durchschnittstemperatur in °C	Niederschlags-summe in mm	Anzahl Vegetationstage
Federhof (B1, B2, B5, B9)	410	2013	8,7	730,8	229
		2014	10,2	572,5	269
		2015	10,1	563,2	256
		2016	9,3	652,6	236
		MW	9,6	629,8	248
See (B3, B4)	542	2013	7,8	939,8	218
		2014	9,4	718,8	254
		2015	9,4	719,0	247
		2016	8,5	856,6	224
		MW	8,8	808,6	236

Wetterstation (Betrieb)	Höhen- lage in m	Jahr	Durchschnitts- temperatur in °C	Niederschlags- summe in mm	Anzahl Vegeta- tionstage
Langensallach (B6)	538	2013	8,2	734,0	221
		2014	9,8	632,2	257
		2015	9,7	609,7	252
		2016	k. A.	k. A.	k. A.
		MW	9,2	658,6	243
Wallenstein (B7)	420	2013	8,5	721,5	223
		2014	10,0	662,7	264
		2015	9,9	506,3	252
		2016	9,3	683,1	242
		MW	9,4	643,4	245
Triesdorf (B8)	440	2013	8,2	706,1	223
		2014	9,7	661,0	262
		2015	9,5	561,6	250
		2016	8,9	608,0	231
		MW	9,1	634,2	242
BKR B		MW	9,3	674,7	244

Tabelle 30: Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum C „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“

Wetterstation (Betrieb)	Höhen- lage in m	Jahr	Durchschnitts- temperatur in °C	Niederschlags- summe in mm	Anzahl Vegeta- tionstage
Birkenmoor (C1, C2, C4)	320	2013	8,8	793,1	233
		2014	10,2	736,4	267
		2015	9,9	669,3	260
		2016	9,4	612,1	244
		MW	9,6	702,7	251
Bad Staffelstein (C3)	258	2013	9,0	738,1	239
		2014	10,5	487,4	275
		2015	10,4	510,0	262
		2016	9,7	561,4	247
		MW	9,9	574,2	256

Wetterstation (Betrieb)	Höhen- lage in m	Jahr	Durchschnitts- temperatur in °C	Niederschlags- summe in mm	Anzahl Vegeta- tionstage
Hohenroth (C5)	300	2013	8,6	656,3	227
		2014	10,1	588,3	265
		2015	10,0	529,7	256
		2016	9,2	634,9	240
		MW	9,5	602,3	247
BKR C		MW	9,6	656,9	251

Tabelle 31: Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum D „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“

Wetterstation (Betrieb)	Höhen- lage in m	Jahr	Durchschnitts- temperatur in °C	Niederschlags- summe in mm	Anzahl Vegeta- tionstage
Almesbach (C1)	420	2013	8,0	786,4	224
		2014	9,5	609,6	258
		2015	9,4	616,9	243
		2016	8,6	725,6	226
		MW	8,9	684,6	238
Markersreuth (C2)	556	2013	7,1	806,4	211
		2014	8,7	682,8	252
		2015	8,5	621,5	235
		2016	7,8	746,5	213
		MW	8,0	714,3	228
Mistelbach (C3, C4)	410	2013	8,1	811,1	226
		2014	9,7	727,8	263
		2015	9,5	651,4	250
		2016	8,7	735,9	229
		MW	9,0	731,6	242
BKR D		MW	8,7	715,5	237

Tabelle 32: Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum E „Gäu, Donau- und Inntal“

Wetterstation (Betrieb)	Höhen- lage in m	Jahr	Durchschnitts- temperatur in °C	Niederschlags- summe in mm	Anzahl Vegeta- tionstage
Feistenach (E1, E3, E4)	469	2013	8,5	761,8	222
		2014	10,0	612,3	263
		2015	10,0	576,3	253
		2016	9,3	752,3	239
		MW	9,5	675,7	244
Steinbeißer (E2)	380	2013	8,8	830,5	227
		2014	9,9	721,5	258
		2015	9,9	587,0	246
		2016	9,3	813,1	240
		MW	9,4	738,0	243
BKR E		MW	9,5	691,3	244

Tabelle 33: Klimadaten der Agrarmeteorologie Bayern für den Boden-Klima-Raum F „Nordwestbayern-Franken“

Wetterstation (Betrieb)	Höhen- lage in m	Jahr	Durchschnitts- temperatur in °C	Niederschlags- summe in mm	Anzahl Vegeta- tionstage
Hohenroth	300	2013	8,6	656,3	227
		2014	10,1	588,3	265
		2015	10,0	529,7	256
		2016	9,2	634,9	240
		MW	9,5	602,3	247
Triesdorf	440	2013	8,2	706,1	223
		2014	9,7	661,0	262
		2015	9,5	561,6	250
		2016	8,9	608,0	231
		MW	9,1	634,2	242
Köslau	400	2013	8,3	810,1	225
		2014	10,1	644,2	267
		2015	10,0	534,1	261
		2016	9,2	671,0	237
		MW	9,4	664,9	248

Wetterstation (Betrieb)	Höhen- lage in m	Jahr	Durchschnitts- temperatur in °C	Niederschlags- summe in mm	Anzahl Vegeta- tionstage
Steinfeld	300	2013	9,1	651,0	235
		2014	10,7	546,2	279
		2015	10,6	581,5	269
		2016	9,8	720,1	252
		MW	10,0	624,7	259
Dietzhof	363	2013	9,5	914,7	240
		2014	11,1	708,0	288
		2015	11,0	555,7	273
		2016	10,0	786,7	253
		MW	10,4	741,3	264
Neuherberg	380	2013	8,9	810,8	234
		2014	10,8	658,8	280
		2015	10,6	494,6	270
		2016	9,5	582,5	248
		MW	10,0	636,7	258
Heppdiel	335	2013	9,1	766,9	236
		2014	10,7	656,3	283
		2015	10,5	646,1	272
		2016	9,8	821,2	256
		MW	10,0	722,6	262
BKR E		MW	9,7	657,4	254

Anhang II: Fragebogen zur Erfassung des Nährstoffmanagements

Fragebogen zur Berechnung der regionalspezifischen Treibhausgasemissionen des Rapsanbaus in Bayern

1. Bitte überprüfen Sie die Angaben und bearbeiten Sie Fehler bzw. Fehlendes!
 Name: «Vorname» «Nachname»
 Adresse: «Straße», «PLZ» «Ort»«Ortsteil»
 Telefon, Fax: «Telefon»
 Email: «Email»

 2. **Betriebsstruktur:**
 Ackerbaubetrieb
 Viehbetrieb
 Welche Tiere, jeweils wieviel?
 Bewirtschaftete Fläche ha Ackerland (Eigentum und Pacht)
 Führen Sie Schlagkarteien? manuell elektronisch keine

 3. Welche **Bodenarten** bewirtschaften sie vorwiegend und um wieviel Prozent der Ackerfläche handelt es sich?
 Sand%
 lehmiger Sand / sandiger Schluff%
 stark sandiger Lehm / lehmiger Schluff%
 sandiger Lehm / schluffiger Lehm / Lehm%
 schluffig toniger Lehm / toniger Lehm / Lehm%
- Welche **durchschnittliche Ackerzahl** hat ihr Betrieb?

4. **Hauptfruchtfolge mit Raps**

1. 2. 3. (4.) (5.)

5. **Bodenvorbereitung Rapsaussaat**

überwiegend mit Pflug ohne Pflug

6. Aktuelle **Applikationstechnik Dünger (mehrfach ankreuzen möglich):**

Mineraldünger

Scheibenstreuer

Exaktdüngestreuer

Flüssigdünger (evtl. mit Pflanzenschutzmitteln)

Sonstiges (z. B. Injektion, Unterfuß-/Unterflurdüngung, Dünger-Coating, ...)

.....

Wirtschaftsdünger

breitwürfige Ausbringung

Schleppschlauch-/Schleppschuhverteiler

gleichzeitige Einarbeitung der Gülle

Sonstiges (z. B. Güllegrubber zur Vorbereitung, Ansäuerung, Verdünnung, ...)

.....

Auf den folgenden Seiten werden **jahresspezifische Fragen zum Rapsanbau** gestellt.
Wenn möglich, bitten wir Sie, die vergangenen vier Erntejahre 2013 bis 2016 zu skizzieren.

Erntejahr 2016

Rapsanbaufläche ha Saatgutmenge: kg/ha Saattermin (größter Schlag): 2015

Saatgut-Sorte: Ertrag 2016: dt/ha

Ölgehalt: %

N_{min}-Bestimmung

Analyse N kg/ha (Summe 0-90 cm Bodentiefe) (Datum Bestimmung 20 ..)

Biomasse-Methode Blattzahl, Wurzeldurchmesser Sonstiges (z. B. optisch mit Foto-App, ...)

Empfehlung nach Düngesystem Stickstoff der LfL (veröffentlicht im Bayerischen Landw. Wochenblatt)

Mineraldünger (inkl. Kalkung und Mikronährstoffdüngung z. B. Bor)

Produktname oder Düngerform	Angabe der Inhaltsstoffe	Menge kg/ha	Zeitpunkt (Stoppel, Herbst, März, April)	Nitrifikations- hemmer (z. B. Pladin®)
.....	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
.....	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
.....	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
.....	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
.....	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein

Wirtschaftsdünger (inkl. Bodenvorbereitung):

Art (Rind, Schwein, HTK, Gärrest, ...)	Analysewerte N-P-K (falls vorhanden)	Menge m ³ /ha	Zeitpunkt (Stoppel, Herbst, März, April)	Nitrifikations- hemmer (z. B. Pladin®)
.....	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
.....	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
.....	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein

Anhang III: Gewichtungsfaktoren zur regionalspezifischen Auswertung der THG-Emissionen

Tabelle 34: *Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum A „Tertiär-Hügelland Donau-Süd“*

Betriebs-ID	Ernte- jahr	Anbaufläche in ha	Ertrag in dt ha ⁻¹	Erzeugte Rapsmenge in dt a ⁻¹	Gewichtungsfaktor in %
A1	2013	7,00	42,00	294,00	6,79
A2	2013	39,00	46,00	1.794,00	41,43
A3	2013	21,00	45,00	945,00	21,82
A4	2013	33,00	39,30	1.296,90	29,95
A5	2013	0,00	0,00	0	0,00
A1	2014	6,00	39,00	234,00	5,21
A2	2014	44,00	46,00	2.024,00	45,05
A3	2014	20,00	37,10	742,00	16,52
A4	2014	34,49	36,90	1.272,68	28,33
A5	2014	4,23	52,00	219,96	4,90
A1	2015	7,00	42,00	294,00	7,51
A2	2015	37,30	38,20	1.424,86	36,38
A3	2015	13,00	43,00	559,00	14,27
A4	2015	35,75	40,10	1.433,58	36,60
A5	2015	5,00	41,00	205,00	5,23
A1	2016	6,50	37,50	243,75	8,49
A2	2016	40,10	0,00	0,00	0,00
A3	2016	9,00	48,00	432,00	15,05
A4	2016	41,19	46,04	1.896,39	66,05
A5	2016	6,80	44,00	299,20	10,42

Tabelle 35: Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum B „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“

Betriebs-ID	Ernte-jahr	Anbaufläche in ha	Ertrag in dt ha ⁻¹	Erzeugte Rapsmenge in dt a ⁻¹	Gewichtungsfaktor in %
B1	2013	29,70	31,00	920,70	12,95
B2	2013	11,80	41,44	488,99	6,88
B3	2013	19,70	44,20	870,74	12,24
B4	2013	35,00	39,50	1.382,50	19,44
B5	2013	36,50	49,10	1.792,15	25,20
B6	2013	22,60	40,00	904,00	12,71
B7	2013	–	–	–	–
B8	2013	–	–	–	–
B9	2013	17,50	43,00	752,47	10,58
B1	2014	27,30	51,00	1.392,30	13,81
B2	2014	12,50	46,45	580,63	5,76
B3	2014	16,00	49,58	793,28	7,87
B4	2014	39,01	44,26	1.726,58	17,12
B5	2014	35,74	52,20	1.865,63	18,50
B6	2014	17,22	49,00	843,78	8,37
B7	2014	36,26	46,60	1.689,72	16,76
B8	2014	15,00	42,00	630,00	6,25
B9	2014	14,67	38,20	560,43	5,56
B1	2015	29,27	45,00	1.317,15	17,01
B2	2015	9,59	45,97	440,85	5,69
B3	2015	17,30	47,20	816,56	10,55
B4	2015	31,32	39,12	1.225,24	15,83
B5	2015	35,31	45,50	1.606,61	20,75
B6	2015	12,50	43,00	537,50	6,94
B7	2015	11,18	46,00	514,28	6,64
B8	2015	15,00	44,00	660,00	8,52
B9	2015	16,82	37,10	624,17	8,06

Betriebs-ID	Ernte-jahr	Anbaufläche in ha	Ertrag in dt ha ⁻¹	Erzeugte Rapsmenge in dt a ⁻¹	Gewichtungsfaktor in %
B1	2016	31,00	45,00	1.395,00	19,72
B2	2016	11,92	39,12	466,31	6,59
B3	2016	21,00	49,00	1.029,00	14,55
B4	2016	–	–	–	–
B5	2016	32,64	49,00	1.599,36	22,61
B6	2016	5,60	45,00	252,00	3,56
B7	2016	27,50	38,80	1.067,00	15,09
B8	2016	10,00	43,00	430,00	6,08
B9	2016	20,21	41,28	834,10	11,79

Tabelle 36: Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum C „Verwitterungsböden in den Übergangslagen“

Betriebs-ID	Ernte-jahr	Anbaufläche in ha	Ertrag in dt ha ⁻¹	Erzeugte Rapsmenge in dt a ⁻¹	Gewichtungsfaktor in %
C1	2013	22,50	35,20	792,00	20,50
C2	2013	10,00	29,50	295,00	7,64
C3	2013	11,50	35,00	402,50	10,42
C4	2013	–	–	–	–
C5	2013	23,96	38,98	933,96	24,17
C1	2014	0,00	0,00	0,00	0,00
C2	2014	9,60	37,00	355,20	13,24
C3	2014	9,82	35,00	343,58	12,80
C4	2014	17,00	50,00	850,00	31,67
C5	2014	26,24	43,25	1.134,88	42,29
C1	2015	8,27	43,70	361,40	12,75
C2	2015	11,06	44,80	495,49	17,47
C3	2015	7,95	26,40	209,88	7,40
C4	2015	14,50	45,00	652,50	23,01
C5	2015	30,74	36,31	1.116,17	39,36

Betriebs-ID	Ernte- jahr	Anbaufläche in ha	Ertrag in dt ha ⁻¹	Erzeugte Rapsmenge in dt a ⁻¹	Gewichtungsfaktor in %
C1	2016	11,97	41,43	495,92	14,69
C2	2016	10,60	36,73	389,34	11,53
C3	2016	10,00	35,00	350,00	10,37
C4	2016	19,75	44,00	869,00	25,74
C5	2016	27,82	45,73	1.272,21	37,68

Tabelle 37: Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum D „Verwitterungsböden in den Höhenlagen“

Betriebs-ID	Ernte- jahr	Anbaufläche in ha	Ertrag in dt ha ⁻¹	Erzeugte Rapsmenge in dt a ⁻¹	Gewichtungsfaktor in %
D1	2013	15,74	38,67	608,67	14,03
D2	2013	22,79	38,00	866,02	19,96
D3	2013	–	–	–	–
D4	2013	66,61	43,00	2.864,23	66,01
D1	2014	16,06	43,00	690,58	11,90
D2	2014	23,84	43,00	1.025,12	17,66
D3	2014	23,80	46,00	1.094,80	18,86
D4	2014	62,38	48,00	2.994,24	51,58
D1	2015	10,80	40,80	440,64	9,80
D2	2015	10,12	38,00	384,56	8,55
D3	2015	23,50	41,00	963,50	21,42
D4	2015	60,20	45,00	2.709,00	60,23
D1	2016	16,00	35,20	563,20	11,13
D2	2016	24,12	37,00	892,44	17,64
D3	2016	24,00	42,80	1.027,20	20,30
D4	2016	62,84	41,00	2.576,44	50,93

Tabelle 38: Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum E „Gäu, Donau- und Inntal“

Betriebs-ID	Ernte-jahr	Anbaufläche in ha	Ertrag in dt ha ⁻¹	Erzeugte Rapsmenge in dt a ⁻¹	Gewichtungsfaktor in %
E1	2013	10,50	43,00	451,50	22,57
E2	2013	2,47	47,00	116,09	5,80
E3	2013	18,25	47,49	866,69	43,33
E4	2013	12,85	44,05	566,04	28,30
E1	2014	6,80	45,00	306,00	15,14
E2	2014	2,96	52,00	153,92	7,61
E3	2014	17,80	53,89	959,24	47,45
E4	2014	11,81	51,00	602,31	29,80
E1	2015	9,50	46,00	437,00	19,14
E2	2015	1,53	38,00	58,14	2,55
E3	2015	17,30	49,20	851,16	37,28
E4	2015	20,01	46,83	937,07	41,04
E1	2016	7,90	45,00	355,50	21,00
E2	2016	1,77	33,00	58,41	3,45
E3	2016	17,00	47,80	812,60	48,01
E4	2016	11,90	39,16	466,00	27,53

Tabelle 39: Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau am Beispiel von Boden-Klima-Raum F „Nordwestbayern -Franken“

Betriebs-ID	Ernte-jahr	Anbaufläche in ha	Ertrag in dt ha ⁻¹	Erzeugte Rapsmenge in dt a ⁻¹	Gewichtungsfaktor in %
F1	2013	93,80	36,00	3.376,80	22,67
F2	2013	–	–	–	–
F3	2013	43,41	39,00	1.692,99	11,37
F4	2013	7,00	41,00	287,00	1,93
F5	2013	48,83	34,80	1.699,28	11,41
F6	2013	40,00	33,00	1.320,00	8,86
F7	2013	14,55	42,00	611,10	4,10
F8	2013	7,67	50,60	388,10	2,61
F9	2013	120,00	46,00	5.520,00	37,06
F1	2014	78,60	38,00	2.986,80	18,75
F2	2014	11,00	28,00	308,00	1,93
F3	2014	36,63	40,00	1.465,20	9,20
F4	2014	14,00	38,00	532,00	3,34
F5	2014	53,16	41,20	2.190,19	13,75
F6	2014	55,00	41,50	2.282,50	14,33
F7	2014	10,16	41,00	416,56	2,61
F8	2014	11,34	52,80	598,75	3,76
F9	2014	112,00	46,00	5.152,00	32,34
F1	2015	44,70	32,00	1.430,40	9,24
F2	2015	14,00	45,00	630,00	4,07
F3	2015	39,98	42,00	1.679,16	10,85
F4	2015	14,00	35,00	490,00	3,17
F5	2015	46,08	41,90	1.930,75	12,47
F6	2015	50,00	42,00	2.100,00	13,57
F7	2015	11,27	40,10	451,93	2,92
F8	2015	11,39	46,30	527,36	3,41
F9	2015	130,00	48,00	6.240,00	40,31

Betriebs-ID	Ernte-jahr	Anbaufläche in ha	Ertrag in dt ha ⁻¹	Erzeugte Rapsmenge in dt a ⁻¹	Gewichtungsfaktor in %
F1	2016	64,80	38,00	2.462,40	14,96
F2	2016	7,00	48,00	336,00	2,04
F3	2016	41,84	38,50	1.610,84	9,79
F4	2016	15,00	40,50	607,50	3,69
F5	2016	45,45	43,80	1.990,71	12,10
F6	2016	60,00	39,00	2.340,00	14,22
F7	2016	14,13	38,00	536,94	3,26
F8	2016	9,38	51,00	478,38	2,91
F9	2016	120,00	50,80	6.096,00	37,04

Tabelle 40: Regionalspezifische Auswertung zur bewirtschafteten Ackerfläche und zum Rapsanbau der untersuchten Boden-Klima-Räume in Bayern

Boden-Klima-Raum	Erntejahr	Erzeugte Rapsmenge in dt a ⁻¹	Gewichtungsfaktor in %
Tertiär-Hügelland Donau-Süd	2013	4.329,90	12
Albflächen und Ostbayerisches Hügelland	2013	7.111,55	19
Verwitterungsböden in den Übergangslagen	2013	3.863,46	11
Verwitterungsböden in den Höhenlagen	2013	4.338,92	12
Gäu, Donau- und Inntal	2013	2.000,33	5
Nordwestbayern-Franken	2013	14.895,28	41
Tertiär-Hügelland Donau-Süd	2014	4.492,64	11
Albflächen und Ostbayerisches Hügelland	2014	10.082,34	25
Verwitterungsböden in den Übergangslagen	2014	2.683,66	7
Verwitterungsböden in den Höhenlagen	2014	5.804,74	14
Gäu, Donau- und Inntal	2014	2.021,47	5
Nordwestbayern-Franken	2014	15.932,00	39
Tertiär-Hügelland Donau-Süd	2015	3.916,44	11
Albflächen und Ostbayerisches Hügelland	2015	7.742,36	21
Verwitterungsböden in den Übergangslagen	2015	2.835,44	8
Verwitterungsböden in den Höhenlagen	2015	4.497,70	12
Gäu, Donau- und Inntal	2015	2.283,37	6
Nordwestbayern-Franken	2015	15.479,60	42

Boden-Klima-Raum	Erntejahr	Erzeugte Raps- menge in dt a ⁻¹	Gewichtungs- faktor in %
Tertiär-Hügelland Donau-Süd	2016	2.871,34	8
Albflächen und Ostbayerisches Hügelland	2016	7.072,77	19
Verwitterungsböden in den Übergangslagen	2016	3.376,46	9
Verwitterungsböden in den Höhenlagen	2016	5.059,28	14
Gäu, Donau- und Inntal	2016	1.692,51	5
Nordwestbayern-Franken	2016	16.458,77	45

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzcentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmkraftstoff betriebenen Traktors
15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell

18	Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbau szenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
32	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantensorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat

38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
45	ExpRessBio – Methoden
46	Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
47	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
48	Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für baye- rische Anbaubedingungen
49	Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
50	Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpRessBio-Methode
51	Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor
52	Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln
53	Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
54	Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
55	Lagerung von Holzhackschnitzeln
56	Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
57	Optimierungspotentiale bei Kaminöfen - Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
58	Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife
59	Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapserzeugung in Bayern

