
INPLAMINT Deliverable 8:

Integrierte Nachhaltigkeitsbewertung neuer Managementoptionen zur Erhöhung der N-Effizienz

Gefördert vom BMBF im Rahmen der Fördermaßnahme BonaRes

Jutta Will (HfWU)

Prof. Dr. Maria Müller-Lindenlauf (HfWU)

Nils Rettenmaier (IFEU)

Sven Gärtner (IFEU)

Nürtingen / Heidelberg, April 2021

Projekt: BonaRes Modul A: INPLAMINT – Increasing agricultural nutrient-use efficiency by optimizing plant-soil-microorganism interactions, subprojects D & E (Förderkennzeichen 031B0508D & 031B0508E)

Projektlaufzeit: 01.04.2018-31.05.2021 (HfWU) bzw. 01.05.2018-30.04.2021 (IFEU)

Gefördert durch: Bundesministerium für Bildung und Forschung

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Nürtingen / Heidelberg, 30. April 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Szenarien und Standorte	5
3	Material und Methoden	8
3.1	Basisdaten	8
3.2	Bestimmung der C-Sequestrierung	9
3.3	Sozioökonomische Bewertung	10
3.3.1	Betriebswirtschaftliche Bewertung	10
3.3.2	Bewertung der Umweltkosten	10
3.4	Ökologische Bewertung	11
3.4.1	Übersichtsökobilanzen	11
3.4.2	Analyse lokaler Umweltwirkungen	11
3.5	Integrierte Nachhaltigkeitsbewertung	12
4	Ergebnisse	13
4.1	C-Sequestrierung	13
4.2	Betriebswirtschaftliche Bewertung	14
4.3	Bewertung der Umweltkosten	16
4.4	Übersichtsökobilanzen	18
4.5	Analyse lokaler Umweltwirkungen	19
4.6	Zusammenführung der Ergebnisse zur integrierten Nachhaltigkeitsbewertung	21
5	Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick	25
6	Literaturverzeichnis	28

1 Einleitung

Jüngste agrarpolitische Diskussionen zeigen nach wie vor die Relevanz und die Notwendigkeit einer Reduzierung der Nitrat- und Phosphatbelastung des Grundwassers sowie der Oberflächen- und Küstengewässer auf. Neben den Austrägen in Gewässer und der daraus resultierenden Eutrophierung bestehen auch Probleme für die Umwelt durch gasförmige Stickstoffverluste aus Düngemitteln in Form des klimarelevanten Lachgases (Distickstoffmonoxid) sowie in Form von anderen Stickoxiden und Ammoniak. Ein Ansatz zur Minderung der Nährstoffausträge besteht in der Verbesserung der Nährstoffnutzungseffizienz. Das übergeordnete Ziel des INPLAMINT-Projekts ist zunächst ein tiefgreifendes Verständnis der Interaktionen von Pflanzen und Bodenmikroorganismen im Nährstoffkreislauf zu erlangen und dann darauf aufbauend Maßnahmen zu entwickeln, die dazu beizutragen die Nährstoffnutzungseffizienz in der Landwirtschaft zu erhöhen. Die Aufgabe der HfWU Nürtingen und des ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (IFEU) bestand in der ökologischen und sozioökonomischen Bewertung von Managementszenarien, welche abgeleitet aus den Forschungsergebnissen der Projektpartner definiert wurden.

Ein Ansatz zur Erreichung einer besseren Nährstoffausnutzung ist die Ausbringung von Substraten mit einem weiten C/N-Verhältnis (z.B. Stroh, Sägemehl). Diesem Ansatz liegt die Annahme zugrunde, dass entsprechende Substrate aufgrund des spezifischen C/N-Verhältnisses der am Abbau beteiligten Mikroorganismen durch mikrobielle Festlegung zu einer temporären Immobilisierung von auswaschunggefährdeten Nährstoffen führen können. Eine differenzierte Beschreibung der identifizierten Managementoptionen zur Verbesserung der Nährstoffausnutzung findet sich in Kapitel 2 dieses Berichts.

Die Managementoptionen basieren auf Varianten des im Rahmen des Projekts in Kiel angelegten Feldversuchs, wurden aber für die Fragestellungen dieses Arbeitspaketes angepasst. Dabei wurden auch weitere Szenarien ergänzt (Untersaat, innerbetriebliche Verlagerung von Ernterückständen, energetische Nutzung der Ernterückstände, Rückführung von Gärresten), da solche Maßnahmen in der landwirtschaftlichen Praxis bereits durchgeführt werden und daher gut als Referenzszenarien geeignet sind.

Der hier vorliegende Bericht (Deliverable 8) führt die Ergebnisse der ökologischen und sozioökonomischen Bewertung der in der zweiten Projektphase (2018 – 2021) definierten Managementoptionen zusammen. Als Grundlage für die ökologische und sozioökonomische Bewertung der Szenarien wurde das C-Sequestrierungspotential der Szenarien anhand von Modellrechnungen nach dem Rothamsted-Modell bestimmt (vgl. Abschnitt 3.2 und 4.1). Weitere Basisdaten sind in Abschnitt 3.1 dokumentiert.

Für die Implementierung der entwickelten Managementoptionen in die landwirtschaftliche Praxis sind die betrieblichen Kosten entscheidend. Daher erfolgten mehrstufige Kostenleistungsrechnungen, um alle direkt mit der Umsetzung der Maßnahmen verbundenen Kosten für die Betriebe abzubilden (vgl. (Will et al. 2020) und Abschnitt 3.3 und 4.2).

Neben den betriebswirtschaftlichen Aspekten wurden auch die ökologischen Auswirkungen der betrachteten Managementoptionen ermittelt (vgl. Abschnitte 3.4, 3.4.2 und 4.4 sowie (Gärtner et al. 2020). Für die Abschätzung der gesellschaftlichen Akzeptanz ist die Betrachtung der durch die Managementoptionen vermiedenen Umweltkosten ein geeignetes Werkzeug. Sie wurde anhand von Kostensätzen und den Ergebnissen der ökologischen Bewertung durch das IFEU berechnet (vgl. Abschnitt 3.3.2 und 4.3).

Im Rahmen des vorliegenden Berichts wurden die genannten Einzelergebnisse zu einer integrierten Nachhaltigkeitsbewertung zusammengeführt (vgl. Abschnitt 3.5 und 4.6), auf deren Basis dann Schlussfolgerungen und Empfehlungen abgeleitet wurden (Kapitel 5).

2 Szenarien und Standorte

Grundlage der erarbeiteten Szenarien stellt die Hypothese dar, dass die Ausbringung von Substraten mit einem weiten C/N-Verhältnis zu einer mikrobiologischen Festlegung von Nährstoffen im Boden führt und so negative Umweltauswirkungen wie beispielsweise die N-Auswaschung und daraus resultierende Eutrophierung des Grundwassers verringert werden können.

Für die Aufrechterhaltung ihres Metabolismus benötigen Bodenmikroorganismen Materialien mit einem Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis von nahe 24:1 (USDA NRCS 2011). Werden dem Boden Substrate mit einem weiteren C/N-Verhältnis zugeführt, wie beispielsweise Weizenstroh (C/N-Verhältnis von etwa 80:1), sind die Mikroorganismen aufgrund des für sie ungünstigen Verhältnisses der beiden Nährstoffe zueinander gezwungen, auf im Boden befindlichen Stickstoff zurückzugreifen. Während des Substratabbaus binden Mikroorganismen den überschüssigen Stickstoff im Boden und geben ihn am Ende ihres Lebenszyklus wieder frei (Mineralisierung) (USDA NRCS 2011).

Die Zugabe von Substrat mit einem weiten C/N-Verhältnis (Stroh bzw. Sägemehl) soll zunächst eine Nährstofffestlegung erreichen, später sollen die Nährstoffe dann durch Mineralisierung aus der mikrobiellen Biomasse den Pflanzen der Folgekulturen wieder zur Verfügung stehen. Auf diese Weise sollen Nitratausträge verringert und gleichzeitig Düngemittel eingespart werden können.

Die im vorliegenden Bericht betrachteten Szenarien wurden an einen Feldversuch angelehnt, der im Rahmen des INPLAMINT-Projektes von der Universität Kiel durchgeführt wird. Dort werden Managementoptionen in zwei Fruchtfolgen untersucht.

- Fruchtfolge I: Winterraps (WR) – Winterweizen (WW) – Wintergerste (WG)
- Fruchtfolge II: Ackerbohne (AB) – Winterweizen (WW) – Wintergerste (WG)

Der Schwerpunkt in Phase II liegt bei einer tiefergehenden Betrachtung der bereits in Phase I analysierten Szenarien. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die betrachteten Szenarien.

Gegenüber Phase I neu aufgenommen werden Szenarien mit energetischer Verwendung des stickstoffreichen Winterraps- bzw. Ackerbohlenstrohs (Szenarien 1 b – 1 d). Die übrigen Erntereste bleiben in diesen Szenarien auf dem Feld. Das bereits in der ersten Phase betrachtete Szenario „interne Strohverlagerung“ (hier: Szenario 2) wird vertieft in drei Unterszenarien betrachtet. In diesen Szenarien wird das betriebseigene Weizenstroh nach der Ernte auf die Flächen ausgebracht, auf denen zuvor Winterraps bzw. Ackerbohlen standen. Die interne Strohverlagerung erwies sich in der ersten Projektphase als das vielversprechendste Szenario. In der zweiten Phase werden nun verschiedene Unterszenarien untersucht, und zwar ohne energetische Verwendung des Winterraps- bzw. Ackerbohlenstrohs (2 a), mit einer Nutzung dieses Strohs in einem Heizkraftwerk (2 b), mit Nutzung dieses Strohs in einer Biogasanlage mit Rückführung der Gärreste (2 c) und mit Nutzung des Strohs in einer Biogasanlage ohne Rückführung der Gärreste in den eigenen Betrieb (2 d). Außerdem wird ein weiteres Verlagerungsszenario eingefügt, bei dem nicht nur das Weizenstroh intern verlagert wird, sondern auch das Ackerbohlen- und Rapsstroh, und zwar auf das abgeerntete Weizenfeld (Szenario 3).

Als externes Substrat wird Sägemehl betrachtet, hier ebenfalls mit insgesamt vier Unterszenarien für den Umgang mit den Ernteresten nach der Ernte von Winterraps bzw. Ackerbohne (Szenarien 4 a-d). Außerdem wird das Szenario „Untersaat“ aus Phase I weitergeführt (Szenario 5).

Tabelle 2-1: Übersicht der in Phase II betrachteten Szenarien. (HKW: Heizkraftwerk, BGA: Biogasanlage)

Nr.	Titel	Substrat	Verwendung der Ernterückstände
1a	Basisszenario	Keines	WR/AB: belassen WW: belassen WG: belassen
1b	Energetische Nutzung von Ernterückständen	Keines	WR/AB: in HKW WW: belassen WG: belassen
1c	Energetische Nutzung von Ernterückständen	Keines	WR/AB: in BGA, mit Rückführung der Gärreste WW: belassen WG: belassen
1d	Energetische Nutzung von Ernterückständen	Keines	WR/AB: in BGA, ohne Rückführung der Gärreste WW: belassen WG: belassen
2a	Interne Strohverlagerung I	Weizenstroh	WR/AB belassen WW: verlagert nach WR/AB WG: belassen
2b	Interne Strohverlagerung II	Weizenstroh	WR/AB in HKW WW: verlagert nach WR/AB WG: belassen
2c	Interne Strohverlagerung III	Weizenstroh	WR/AB: in BGA, mit Rückführung der Gärreste WW: verlagert nach WR/AB WG: belassen
2d	Interne Strohverlagerung IV	Weizenstroh	WR/AB: in BGA, ohne Rückführung der Gärreste WW: verlagert nach WR/AB WG: belassen
3	Interne Strohverlagerung „Cross-over“	Weizenstroh nach WR/AB, WR-/AB-Stroh nach WW	WR/AB: verlagert nach WW WW: verlagert nach WR/AB WG: belassen
4a	Externe Substratgewinnung	Sägemehl 10 t	WR/AB: belassen WW: belassen WG: belassen
4b	Externe Substratgewinnung	Sägemehl 10 t	WR/AB: in HKW WW: belassen WG: belassen
4c	Externe Substratgewinnung	Sägemehl 10 t	WR/AB: in BGA, mit Rückführung der Gärreste WW: belassen WG: belassen
4d	Externe Substratgewinnung	Sägemehl 10 t	WR/AB: in BGA, ohne Rückführung der Gärreste WW: belassen WG: belassen
5	Untersaat	keines	WR/AB: belassen Etablierung einer Untersaat in WR/AB WW: belassen WG: belassen

Um verschiedene klimatische und pedologische Gegebenheiten abzubilden, wurden 8 Standorte definiert, welche sich in den Parametern Bodenart, Niederschlagsmenge und Durchschnittstemperatur unterscheiden (siehe Tabelle 2-2). Diese sind:

- Leichter und schwerer Boden (10 % und 70 % Tongehalt)
- Kühler und warmer Standort (8,4° C und 11° C Durchschnittstemperatur)
- Feuchter und trockener Standort (531 mm und 914 mm durchschnittlicher Niederschlag)

Tabelle 2-2: Standortparameter der 8 generischen Standorte

		1	2	3	4	5	6	7	8
Bodenart		Leicht	Schwer	Leicht	Schwer	Leicht	Schwer	Leicht	Schwer
Temperatur		Kühl	Kühl	Warm	Warm	Kühl	Kühl	Warm	Warm
Niederschlag		feucht	feucht	Feucht	feucht	trocken	trocken	trocken	trocken
Tongehalt	%	10	70	10	70	10	70	10	70
Jahresmitteltemp.	°C	8,4	8,4	11	11	8,4	8,4	11	11
Niederschlag	mm	914	914	914	914	531	531	531	531

In die ökonomische Bewertung fließen diese Parameter nicht ein, da keine wesentlichen Unterschiede in den Kosten und Leistungen durch die unterschiedlichen pedoklimatischen Bedingungen abgebildet werden können. Für die Ergebnisdarstellung der Umweltkosten und der ökologischen Bewertung werden die Extremstandorte 3 (leichter Boden, warm und feucht) und 6 (schwerer Boden, kühl und trocken) gewählt.

Eine weitere Differenzierung der Szenarien erfolgt in der Stickstoff-Immobilisierungsleistung. Hierzu werden für die sozioökonomischen Berechnungen Stickstoff-Immobilisierungsleistungen von 0, 20, 60 und 100 kg N pro Fruchtfolge angesetzt.

3 Material und Methoden

Ziel der zweiten Projektphase war es, eine integrierte Nachhaltigkeitsbewertung der im Rahmen des INP-LAMINT-Projekts erarbeiteten neuen Managementoptionen zur Verbesserung der Nährstoffnutzungseffizienz in der Landwirtschaft zu erstellen. Um die Auswirkungen der in Kapitel 2 dargestellten Szenarien abzuschätzen, wurden über Modellrechnungen die C-Sequestrierung der Managementoptionen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen bildeten die Grundlage für die ökologische Bewertung der Verfahren (siehe (Gärtner et al. 2020)). Diese Ergebnisse dienten wiederum der Berechnung der Umweltkosten, welche zusammen mit den betriebswirtschaftlichen Ergebnissen die Grundlage der sozioökonomischen Bewertung der Verfahren bildet (siehe (Will et al. 2020)). Die integrierte Nachhaltigkeitsbewertung stützt sich auf die Zusammenführung der Ergebnisse der ökologischen und der sozioökonomischen Bewertung.

3.1 Basisdaten

Die in Tabelle 3-1 dargestellten Annahmen dienen der weiteren Quantifizierung der Szenarien.

Tabelle 3-1: Datensätze der untersuchten Szenarien

	Kultur				Substrat		Quelle
	Winter- raps	Acker- bohne	Winter- weizen	Winter- gerste	Sägemehl	Untersaat	
Kornertrag in t ha ⁻¹	3,4	3,9	7,9	6,9			1
Strohertrag in t ha ⁻¹	5,8	3,9	6,3	4,8		3,4	2, 3
TM-Gehalt Korn in %	91	86	86	86			2
TM-Gehalt Stroh in %	86	86	86	86			2, 4
TM-Gehalt Substrat in %					80	20	2, 4
N-Gehalt Korn in %	3,35	4,10	1,81	1,65			2
N-Gehalt Stroh in %	0,7	1,5	0,5	0,5	0,38		2, 5
P-Gehalt Korn in % FM	0,79	0,52	0,35	0,35			6
P-Gehalt Stroh in % FM	0,48	0,13	0,13	0,13	0,06		6, 7
K-Gehalt Korn in % FM	0,83	1,16	0,50	0,50			6
K-Gehalt Stroh in % FM	2,49	1,68	1,16	0,25	0,03		6, 7
C-Gehalt Stroh in %	41	43	41	41	39	8,2	4, 8
N _{min} -Basiswert Frühj. [kg N ha ⁻¹]	25,15	25,15	34,1	36,01			9
Basis N-Düngung min. [kg N ha ⁻¹]	188		219	179			9

¹ KTBL 2020b.

² Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2017.

³ Untersaat: Schätzwert nach Wellmann 2016.

⁴ Schuchardt und Vorlop 2010.

⁵ Sägemehl: Eigene Daten (Uni Kiel)

⁶ Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 2015.

⁷ Sägemehl: FNR 2017.

⁸ Zwischenfrucht: Schätzwert

⁹ Berechnet nach DüV 2017

3.2 Bestimmung der C-Sequestrierung

Um den Einfluss von Ernterückständen und Substraten auf den Kohlenstoffgehalt des Bodens zu bestimmen, wurde das Rothamsted-Modell angewendet (Coleman und Jenkinson 2014). Das Modell wurde entwickelt, um den Umsatz von organischem Kohlenstoff in nicht wassergesättigten Oberböden unter Berücksichtigung von Bodenart, Temperatur, Feuchtigkeit und Pflanzendecke zu beschreiben. In das Modell fließen die in Tabelle 3-2 dargestellten Größen ein.

Tabelle 3-2: Einflussfaktoren für die Berechnung der C-Flüsse anhand des Rothamsted-Modells. Quelle: Eigene Darstellung nach (Coleman und Jenkinson 2014)

Nr.	Parameter	Einheit
1	Monatliche Niederschlagsmenge	mm
2	Monatliche offene Verdunstung	mm
3	Durchschnittliche monatliche mittlere Lufttemperatur	Grad Celsius
4	Tongehalt des Bodens	%
5	Eine Schätzung der Zersetzbarkeit des eingehenden Pflanzenmaterials - das DPM/RPM-Verhältnis	%
6	Bodenbedeckung – liegt der Boden in einem Monat bspw. brach?	%
7	Monatlicher Eintrag von Pflanzenresten	t C ha ⁻¹
8	Monatlicher Eintrag von Wirtschaftsdünger (FYM)	t C ha ⁻¹
9	Tiefe der Bodenschicht	cm

Das Modell wurde für die 8 in Abschnitt 2 beschriebenen Standortszenarien durchgerechnet und beinhaltet insgesamt vier verschiedenartige organische Kohlenstoffkompartimente, denen charakteristische Zerfallsraten zugeordnet werden. Neben den vier aktiven Kompartimenten kommt im Boden zudem eine geringe Menge an inerte organischer Substanz (IOM) vor, die in die hier vorliegende Modellrechnung nicht übernommen wurde, da sie inaktiv ist. Zu den vier aktiven Kompartimenten gehören (Coleman und Jenkinson 2014):

- Zerlegbares Pflanzenmaterial (DPM)
- Resistentes Pflanzenmaterial (RPM)
- Mikrobielle Biomasse (BIO)
- Humifizierte organische Substanz (HUM).

Die beiden Pflanzenmaterialien (DPM und RPM) werden zu CO₂, BIO + HUM abgebaut. Welche Anteile zu welchen Kompartimenten (auch Pools genannt) zerfallen, wird durch den Tongehalt des Bodens bestimmt. Die Anteile von BIO + HUM werden anschließend weiter zu CO₂, BIO + HUM abgebaut (vgl. Abbildung 3-1) (Coleman und Jenkinson 2014). In der Praxis zeigt sich, dass der Abbau vom jeweiligen Substrat abhängt und großen Schwankungsbreiten unterliegt. So erfolgt der Abbau bei einem engen C/N-Verhältnis des Ausgangsrohstoffs beispielsweise schneller, und bei Substraten mit hohem Ligninanteil langsamer. Dies kann durch unterschiedliche Anteile von DPM und RPM im Modell ausgedrückt werden.

Eine detaillierte Beschreibung des Modells und der verwendeten Rechenschritte findet sich in (Will et al. 2020).

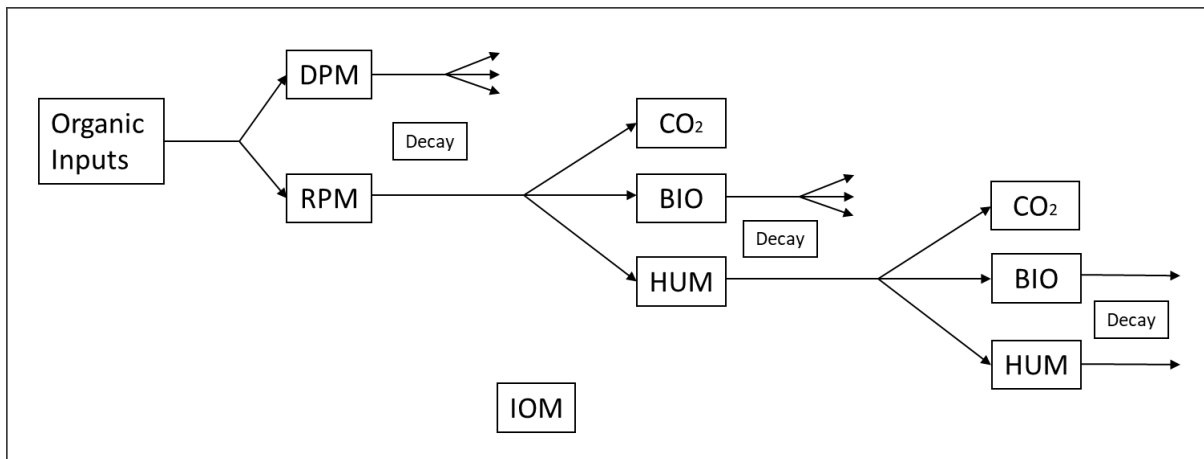


Abbildung 3-1: Kohlenstoffflüsse nach dem Rothamsted-Modell, nach (Coleman und Jenkinson 2014)

3.3 Sozioökonomische Bewertung

Eine Betrachtung von betriebswirtschaftlichen Kosten und Umweltkosten ermöglicht den Vergleich der Maßnahmen im Sinne ihrer sozioökonomischen Vorteile. Maßnahmen, welche höhere betriebswirtschaftliche Kosten verursachen aber noch höhere Reduktionen von Umweltkosten, sind aus gesamtgesellschaftlicher Sicht vorteilhaft. Die betriebswirtschaftlichen Nachteile für die Landwirte könnten durch Fördergelder ausgeglichen werden. Damit würde der Tatsache Rechnung getragen, dass die betrieblichen Kosten alleine von den Landwirten getragen werden müssen, während Vorteile bei den Umweltkosten der gesamten Gesellschaft zu Gute kommen.

3.3.1 Betriebswirtschaftliche Bewertung

Die betriebswirtschaftliche Analyse der im Kapitel 2 aufgeführten Szenarien erfolgte anhand einer Leistungs-Kostenrechnung in mehreren Stufen, bei der die Erfolgsgrößen „direktkostenfreie Leistung“, „Arbeits erledigungskosten“ und „direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung“ berechnet wurden.

Die erarbeitete Leistungs-Kostenrechnung ermöglicht es, die Managementoptionen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit für die Betriebe zu bewerten. Die kalkulierten betriebswirtschaftlichen Erfolgsgrößen berechnen sich aus der monetären Leistung des jeweiligen Produktionsverfahrens, abzüglich diverser Teilkosten. Die Differenz dient der Deckung der restlichen, bis dahin nicht subtrahierten, meist fixen Kosten (KTBL 2016a). Detaillierte Erläuterungen hierzu finden sich in (Will et al. 2020).

3.3.2 Bewertung der Umweltkosten

Die Landwirtschaft – wie auch die Sektoren Energie, Industrie und Abfallwirtschaft – trägt durch Emissionen von Treibhausgasen, Luftschadstoffen und Austräge ins Grundwasser maßgeblich zu Umweltkosten bei, welche von der gesamten Gesellschaft getragen werden müssen und nicht dem Verursacher angerechnet werden. Diese externen Kosten entstehen durch Biodiversitätsverluste, Gesundheitseinschränkungen und Schäden an Materialien und landwirtschaftlichen Kulturen. Die Berechnung und Bewertung dieser externen Kosten der Landwirtschaft kann die umweltpolitische Entscheidungsfindung unterstützen und die Akzeptanz umweltpolitischer Maßnahmen in der Bevölkerung erhöhen, da sie Zielkonflikte durch Benennung von Kosten und Nutzen einzelner Handlungsoptionen aufzeigen kann.

Mit Hilfe von Beurteilung und Vergleich der durch die Managementoptionen entstandenen Umweltkosten sollen die gesellschaftlichen Vorteile der Nährstoffnutzungseffizienzsteigerung dargestellt werden. Denn auch wenn Maßnahmen ökonomisch betrachtet für den einzelnen Landwirt keine Vorteile bringen, können sie durch Minderung der Umweltkosten für die gesamte Gesellschaft vorteilhaft sein.

Grundlage der Ermittlung der Schadkosten bilden die Ergebnisse der ökologischen Bewertung (Gärtner et al. 2020). Durch die Verrechnung mit Kostensätzen (vgl. Tabelle 3-3) werden die durch die Emissionen entstehenden Schäden monetisiert.

Detaillierte Erläuterungen zur Bewertung der Umweltkosten finden sich in (Will et al. 2020).

Tabelle 3-3: Übersicht und Zusammenfassung der verwendeten Kostensätze

		Gesamtkosten in €/kg	Quelle
Klimakosten	CO ₂ -e	0,195	(Mattey und Bünger 2018)
	NO ₃ -N	24,4	(Brink und van Grinsven 2011)
Einträge ins Wasser	P	15	(Shakhramanyan et al. 2012)
	NH ₃ -N	38,9	(Mattey und Bünger 2018)
Luftschadstoffe	NO _x -N	48,7	(Mattey und Bünger 2018)
	N ₂ O-N*	3	(Brink und van Grinsven 2011)
	SO ₂	15,04	(Mattey und Bünger 2018)

3.4 Ökologische Bewertung

Zur Ermittlung der ökologischen Auswirkungen neuer Managementoptionen wurden in INPLAMINT so genannte Übersichtsökobilanzen durchgeführt (Abschnitt 3.4.1), die um eine Analyse lokaler Umweltwirkungen ergänzt wurden (Abschnitt 3.4.2. Die in Phase 1 angewandte Methodik (siehe (Gärtner et al. 2020)) wurde auch in Phase 2 zugrunde gelegt.

3.4.1 Übersichtsökobilanzen

Zur Ermittlung der ökologischen Auswirkungen neuer Managementoptionen wurden so genannte Übersichtsökobilanzen durchgeführt. Die Berechnung derselben orientierte sich an den internationalen Normen für Produkt-Ökobilanzen ISO 14040 & 14044 (ISO 2006a, 2006b). Dabei wurden die Umweltauswirkungen aller Input- und Outputflüsse des untersuchten Produkts entlang seines gesamten Lebensweges („von der Wiege bis zur Bahre“) betrachtet. Es liegt jedoch keine ISO-konforme Ökobilanz vor. Hierzu wäre u. a. ein externer Review erforderlich. Details zur Methodik finden sich in (Gärtner et al. 2020).

3.4.2 Analyse lokaler Umweltwirkungen

Als Ergänzung zu den Übersichtsökobilanzen (siehe Abschnitt 3.4) wurden weitere Umweltwirkungen untersucht, die sich insbesondere auf lokaler Ebene auf die Schutzgüter Boden, Wasser und Biodiversität auswirken. Dazu wurden Elemente aus anderen Bewertungsinstrumenten herangezogen, u. a. aus der Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU), die i. d. R. im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung

(UVP) durchgeführt wird. Ziel war es, vor dem Hintergrund einer standortunabhängigen, qualitativen Analyse der von der Bereitstellung von Substraten ausgehenden Wirkfaktoren eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Managementoptionen zu erreichen. Details zur Methodik finden sich in (Gärtner et al. 2020).

Für den vorliegenden Bericht (Deliverable 8) wurden die verschiedenen Risiken, die in (Gärtner et al. 2020) für die einzelnen Szenarien bewertet wurden (siehe dort in Tabelle 4), in drei Übersichtsindikatoren zusammengeführt: Boden, Wasser und Biodiversität. Somit wurde eine ausgewogenere Anzahl von quantifizierbaren und nicht-quantifizierbaren Indikatoren sowohl im Bereich Umwelt als auch im Bereich Ökonomie gewährleistet. Dabei wurden Erosion, Schadverdichtung, Humusverlust und Änderung der Bodenchemie zum Indikator Boden gerechnet, Eutrophierung von Oberflächengewässern, Belastung des Grundwassers und Grundwasserzehrung zum Indikator Wasser und schließlich Belastung mit PSM, Verlust von Landschaftselementen, Verlust von Lebensräumen und Verlust von Arten zum Indikator Biodiversität. Aus der jeweiligen Gruppe der Risiken wurde der Wert für den Übersichtsindikator durch Mittelwertbildung berechnet. Dabei wurde die Zuordnung A = ++ bis E = -- gewählt; zwischen zwei Buchstaben liegende Werte wie „A/B“ oder die Extrema „AA“ und „EE“ wurden in halben Schritten dazwischen bzw. jenseits von A und E eingeordnet.

3.5 Integrierte Nachhaltigkeitsbewertung

Für den vorliegenden Bericht (Deliverable 8) wurden die Ergebnisse der Umweltkosten sowie der betriebswirtschaftlichen und der ökologischen Bewertung (Abschnitt 4.1, 4.3 und 4.4) in Form von Nachhaltigkeitsindikatoren in einer Tabelle zusammengeführt und verbal-argumentativ diskutiert. Die ausgewählten Indikatoren sind sowohl qualitativ als auch quantitativ. Die Indikatorenwerte sind zur besseren optischen Wahrnehmung farblich gekennzeichnet und folgen einem „Ampelsystem“:

- Farbgebung der qualitativen Indikatoren: Da die Bedeutung der ++, +, 0, – und – – immer zwischen „sehr vorteilhaft“ und „sehr nachteilig“ in dieser Reihenfolge liegt, wurden diesen Werten immer die Farben von dunkelgrün bis rot zugeordnet.
- Farbgebung der quantitativen Indikatoren: Um eine möglichst gute Einschätzung der Werte zu ermöglichen und dabei auch eine grobe Tendenz aller Szenarien in Richtung Vorteile oder Nachteile zu erkennen, wurde zunächst die Bandbreite aller Szenarien pro Fruchtfolge und Indikator berechnet und in fünf gleiche Abschnitte eingeteilt. Die Bandbreite wurde dann so verschoben, dass der Median der Szenarien mittig in ihr zu liegen kommt. Werte, die im günstigsten Abschnitt liegen oder sogar noch besser sind, bekamen die dunkelgrüne Farbe, Werte im zweigünstigsten Abschnitt die hellgrüne, im mittleren Abschnitt die hellgelbe Farbe, während Werte im darauffolgenden Abschnitt orange und schließlich noch ungünstigere Werte rot hinterlegt wurden.

Um die Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien einerseits und zwischen den Indikatoren andererseits zu steigern, wurden alle Szenarien auf das Basisszenario in der jeweiligen Fruchtfolge bezogen, d. h. für jeden Indikator wurden die Unterschiede zwischen dem eigentlichen Szenarienergebnis und dem Basisszenario dargestellt. Das geschah für die quantifizierbaren Indikatoren über Differenzbildung zwischen Szenario und Basisszenario. Für die qualitativen Indikatoren wurden Unterschiede von einem Schritt (z.B. von ++ im Basisszenario zu + im betrachteten Szenario) mit einem einfachen Symbol (in diesem Fall –), von zwei Schritten (z. B. von – zu +) mit einem doppelten Symbol (hier ++) dargestellt. Für Indikatoren, die im betrachteten und im Basisszenario gleich sind, wurde ein 0 vermerkt.

4 Ergebnisse

4.1 C-Sequestrierung

In Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 sind die Ergebnisse Berechnungen der C-Sequestrierung für die beiden Fruchtfolgen dargestellt.

Tabelle 4-1: C-Sequestrierung in der Rapsfruchtfolge nach dem Rothamsted-Modell berechnet für die verschiedenen Managementszenarien für die acht Standorte.

Winterraps	C-Sequestrierung in t C/ha*a an Standort							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Szenario								
1a	-125	-41	-258	-171	-27	54	-128	-44
1b	-204	-144	-334	-271	-107	-50	-207	-147
1c	-187	-125	-317	-252	-90	-31	-190	-128
1d	-204	-144	-334	-271	-107	-50	-207	-147
2a	-125	-40	-258	-171	-27	55	-128	-43
2b	-203	-143	-334	-271	-106	-49	-206	-146
2c	-186	-124	-317	-252	-89	-31	-189	-127
2d	-203	-143	-334	-271	-106	-49	-206	-146
3	-125	-41	-258	-171	-27	54	-128	-44
4a	55	177	-83	41	155	272	52	174
4b	-23	74	-159	-59	76	168	-26	71
4c	-6	93	-142	-40	93	187	-9	90
4d	-23	74	-159	-59	76	168	-26	71
5	-116	-29	-249	-160	-18	66	-119	-32

Tabelle 4-2: C-Sequestrierung in der Ackerbohnenfruchtfolge nach dem Rothamsted-Modell berechnet für die verschiedenen Managementoptionen für die acht Standorte.

Ackerbohne	C-Sequestrierung in t C/ha*a an Standort							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Szenario								
1a	-150	-72	-282	-202	-52	22	-153	-75
1b	-204	-144	-334	-271	-107	-50	-207	-147
1c	-179	-116	-310	-244	-82	-23	-182	-119
1d	-204	-144	-334	-271	-107	-50	-207	-147
2a	-150	-72	-282	-202	-52	23	-153	-75
2b	-203	-143	-334	-271	-106	-49	-206	-146
2c	-179	-116	-310	-244	-82	-22	-182	-119
2d	-203	-143	-334	-271	-106	-49	-206	-146
3	-150	-72	-282	-202	-52	23	-153	-75
4a	31	145	-107	10	130	241	27	142
4b	-23	74	-159	-59	76	168	-26	71
4c	2	101	-135	-32	100	195	-2	98
4d	-23	74	-159	-59	76	168	-26	71
5	-141	-60	-274	-191	-43	35	-144	-63

4.2 Betriebswirtschaftliche Bewertung

In Abbildung 4-1 sind die direkt- und arbeits erledigungskostenfreie Leistungen (DAL) als Differenzen zum Basisszenario für die gesamte Fruchtfolge Winterraps – Winterweizen – Wintergerste dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf 0 kg N-Immobilisierung

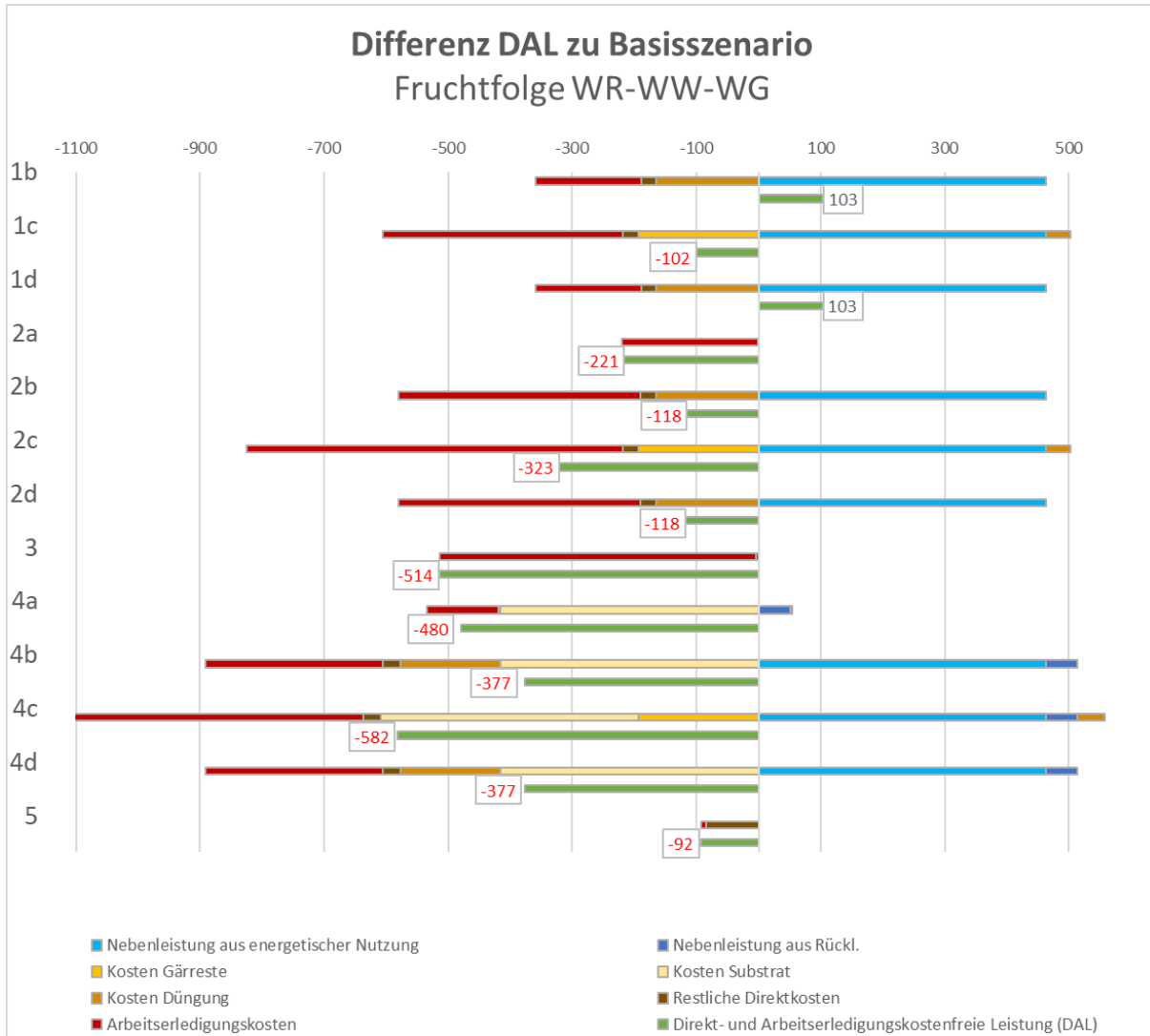


Abbildung 4-1: Direkt- und arbeits erledigungskostenfreie Leistung der Szenarien für die gesamte Winterrapsfruchtfolge pro Hektar. Dargestellt als Differenz zum Basisszenario. 0 kg N-Immobilisierung

In den Szenarien 1b und d kompensieren die Nebenleistungen aus der energetischen Nutzung die zusätzlichen Arbeiterledigungskosten (Abfuhr der Erntereste und Transport zur BGA oder zum HKW) und die zusätzlichen Kosten für die mineralische Düngung. Diese beiden Szenarien sind damit wirtschaftlicher als das Basisszenario. Langfristige Effekte auf die Bodenfruchtbarkeit sind hierbei allerdings nicht berücksichtigt. In Szenario 1c (mit Rückführung von Gärresten) entstehen zusätzliche Kosten durch den Kauf, den Transport und die Ausbringung der Gärreste, die nicht durch zusätzliche Leistungen kompensiert werden.

Die Szenarien mit interner Strohverlagerung (Szenarien 2 a-d und 3) fallen gegenüber dem Basisszenario aufgrund ihrer hohen zusätzlichen Arbeitserledigungskosten deutlich negativ aus. Die Verlagerungsszenarien 2 b-d erzielen durch die energetische Nutzung des Rapsstrohs zwar zusätzliche Leistungen, diese gleichen den deutlich höheren Aufwand allerdings nicht aus. Im Szenario 3 (Cross-over) sind die Kosten gegenüber der Szenariengruppe 2 noch mal deutlich erhöht und die DAL fällt entsprechend deutlich niedriger aus.

Beim Einsatz von Sägemehl als Substrat fällt die DAL ebenfalls deutlich geringer aus als im Basisszenario. Durch den Verkauf des Rapsstrohs in den Szenarien 4 b-d werden zwar zusätzliche Leistungen erzielt und das eingebrachte Sägemehl bringt zusätzlich Nährstoffe ein, dies gleicht allerdings nicht die hohen Kosten für das Sägemehl und die zusätzlichen Arbeitserledigungskosten aus.

Das Untersaatszenario fällt im Vergleich zum Basisszenario durch die zusätzlichen Kosten für das Saatgut der Untersaat auch leicht negativ aus, ist ökonomisch abgesehen von den Szenarien mit Strohexport die ökonomisch günstigste Variante. Es ist jedoch zu bedenken, dass eine Untersaat in Raps, die nach der Ernte weiterwächst, an vielen Standorten nicht erfolgreich etabliert werden kann

Innerhalb aller Hauptszenarien fallen die Unterszenarien mit Gärresteausbringung (c-Szenarien) am schlechtesten aus. Dies liegt an den zusätzlichen Kosten für den Kauf der Gärreste, den Transport und den Ausbringungskosten. Allerdings ist hier zu beachten, dass im Hinblick auf Kosten der Gärreste und deren Ausbringung eine hohe Unsicherheit besteht (siehe dazu auch (Will et al. 2020)).

Die Ergebnisse für die Ackerbohnen-Fruchtfolge sind in Abbildung 4-2 dargestellt und fallen sehr ähnlich aus wie die der Raps-Fruchtfolge.

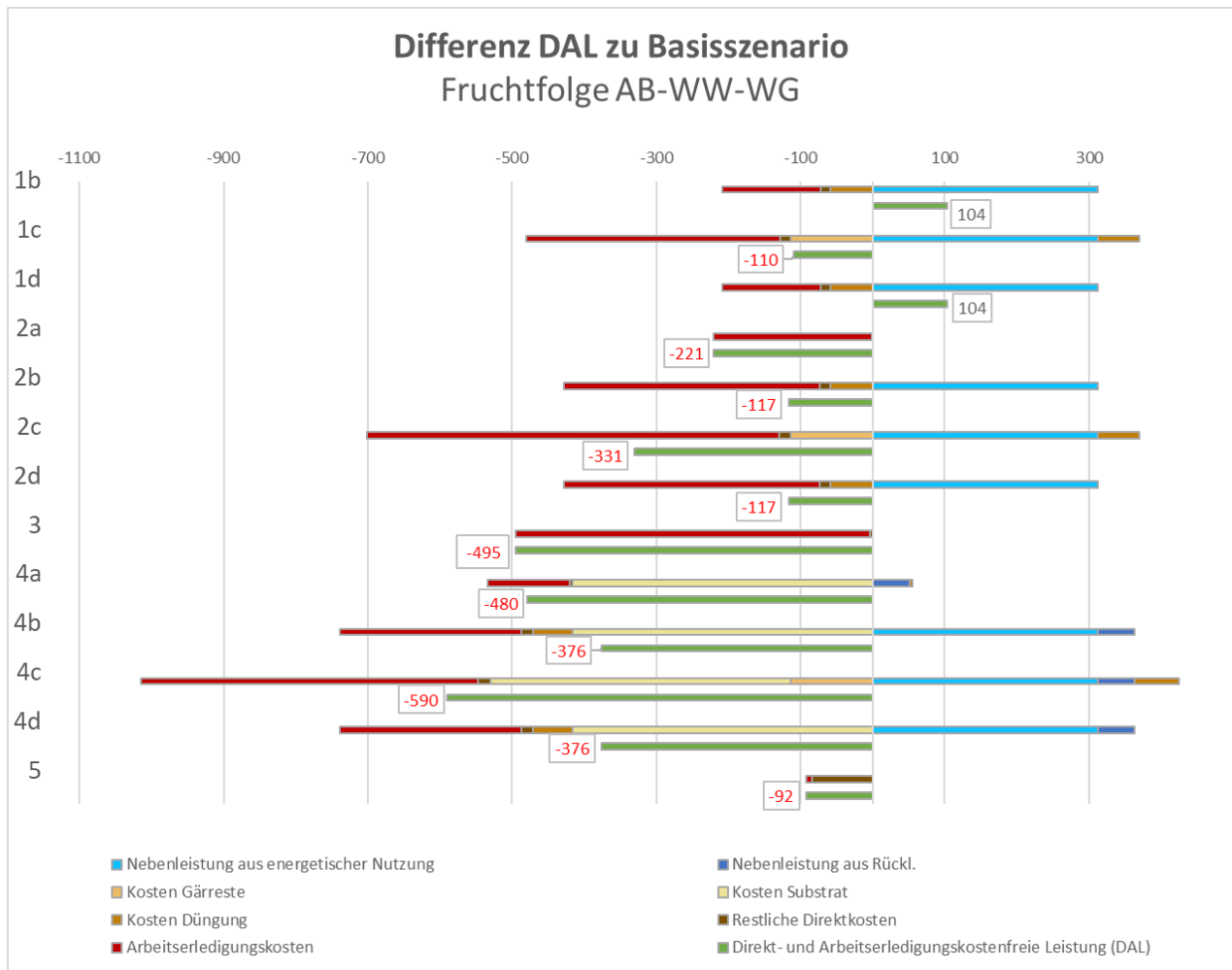


Abbildung 4-2: Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung der Szenarien für die gesamte Ackerbohnenfruchtfolge pro Hektar. Dargestellt als Differenz zum Basisszenario. 0 kg N-Immobilisierung.

4.3 Bewertung der Umweltkosten

In Abbildung 4-3 sind die Unterschiede der Umweltkosten zwischen den Managementoptionen für die Rapsfruchtfolge als Differenz zum Basisszenario dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich auf Standort 6 und 0 kg N-Immobilisierung.

Bei Nutzung des Rapsstrohs in einem Heizkraftwerk (b-Szenarien) fallen die Umweltkosten deutlich geringer aus als im Basisszenario. Auch die energetische Nutzung des Rapsstrohs in einer Biogasanlage (c- und d-Szenarien) reduziert die Umweltkosten gegenüber den jeweiligen a-Szenarien (=Stroh verbleibt auf der Fläche), jedoch bei weitem nicht so stark wie die Nutzung in einem Heizkraftwerk, das liegt vor allem an der Reduktion der CO₂e-Emissionen. Bei allen Szenarien mit energetischer Nutzung von Ernterückständen ist jedoch zu beachten, dass mögliche langfristige Effekte auf die Bodenfruchtbarkeit nicht berücksichtigt wurden.

Das Strohverlagerungsszenario ohne energetische Verwertung der Erntereste (Szenario 2a) – ein Schlüsselzenario für das INPLAMINT-Projekt – verursacht ohne Berücksichtigung der mikrobiellen Immobilisierung leicht höhere Umweltkosten als das Basisszenario. Beim Cross-over-Szenario (3) fallen ebenfalls etwas höherer Umweltkosten als beim Basisszenario an. Diese sind auf die höheren Energieaufwendungen und die damit zusammenhängenden Emissionen zurückzuführen.

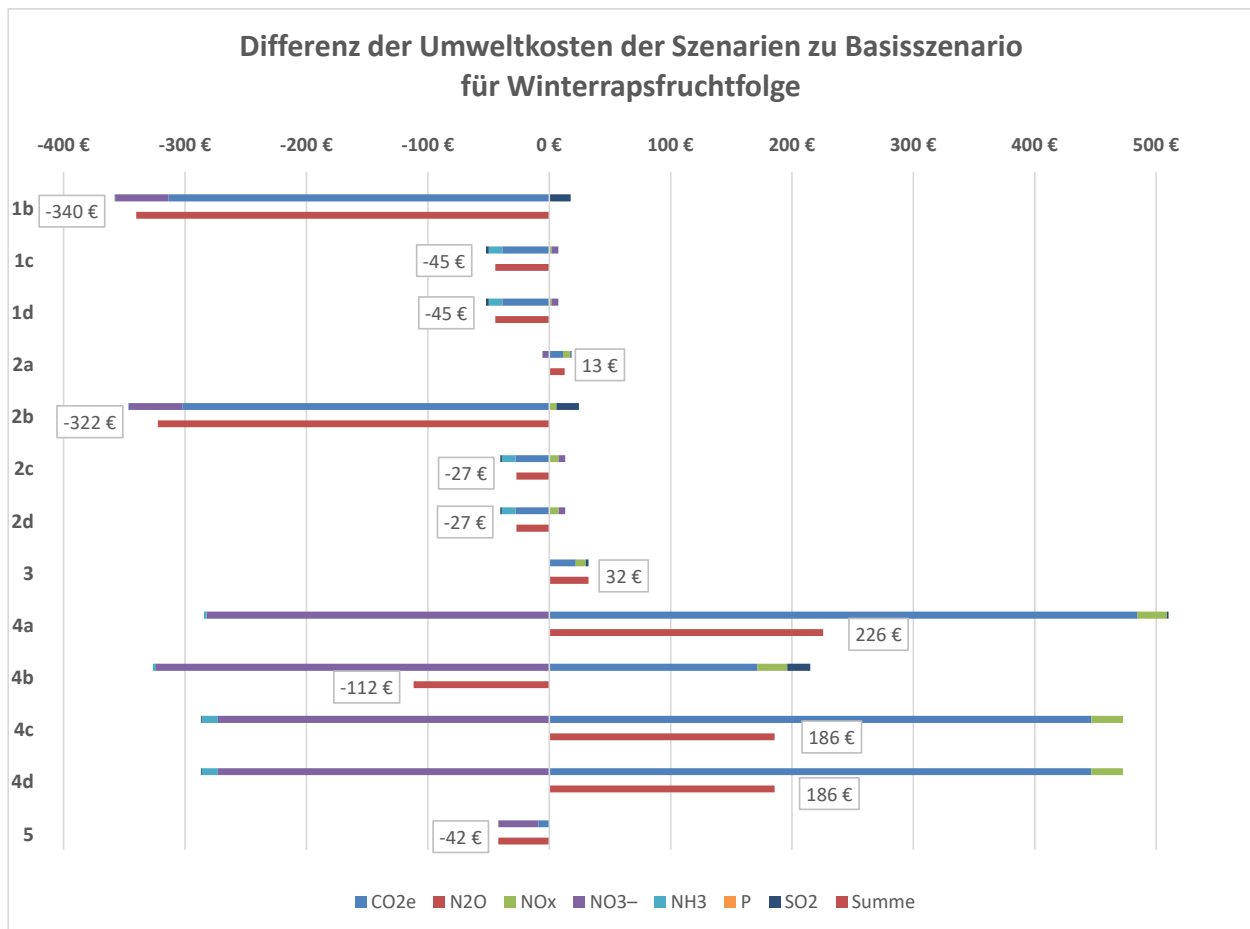


Abbildung 4-3: Umweltkosten der Szenarien pro Jahr und Hektar dargestellt als Differenz zum Basisszenario 1a für die Winterrapsfruchtfolge. Dargestellt sind die Umweltkosten bezogen auf Standort 6 ohne Berücksichtigung mikrobieller Stickstoff-Immobilisierungsleistung.

Die Szenarien mit externem Substrat (Szenarien 4 a-d) verursachen bis auf das Szenario mit Nutzung des Rapsstrohs im Heizkraftwerk höhere Umweltkosten als das Basisszenario. Die Unterschiede liegen zum größten Teil an Unterschieden in den Treibhausgasemissionen. Die Einsparung an Umweltkosten durch verringerten Nitrataustrag bedingt durch die C-Sequestrierung und der dadurch verursachten Festlegung von Stickstoff können die hohen Kosten für Treibhausgasemissionen in den Szenarien 4a, c und d nicht ausgleichen. Das Untersaatszenario (Szenario 5) führt zu geringfügig reduzierten Umweltkosten

Weitere Ergebnisse der gesamtgesellschaftlichen Bewertung, wie standortspezifische Umweltkosten, absolute Kosten, Effekte der N-Immobilisierung und Umweltkosten der Ackerbohnenfruchtfolge finden sich in (Will et al. 2020) .

4.4 Übersichtsökobilanzen

In Abbildung 4-4 sind die Ergebnisse für die 14 untersuchten Managementoptionen / Szenarien für alle Umweltwirkungen dargestellt, und zwar beispielhaft für die Raps-Fruchtfolge auf Standort 6 und zunächst noch **ohne N-Immobilisierung** (siehe Kapitel 2). Sie bilden die Grundlage für Tabelle 4-4 (S. 22).

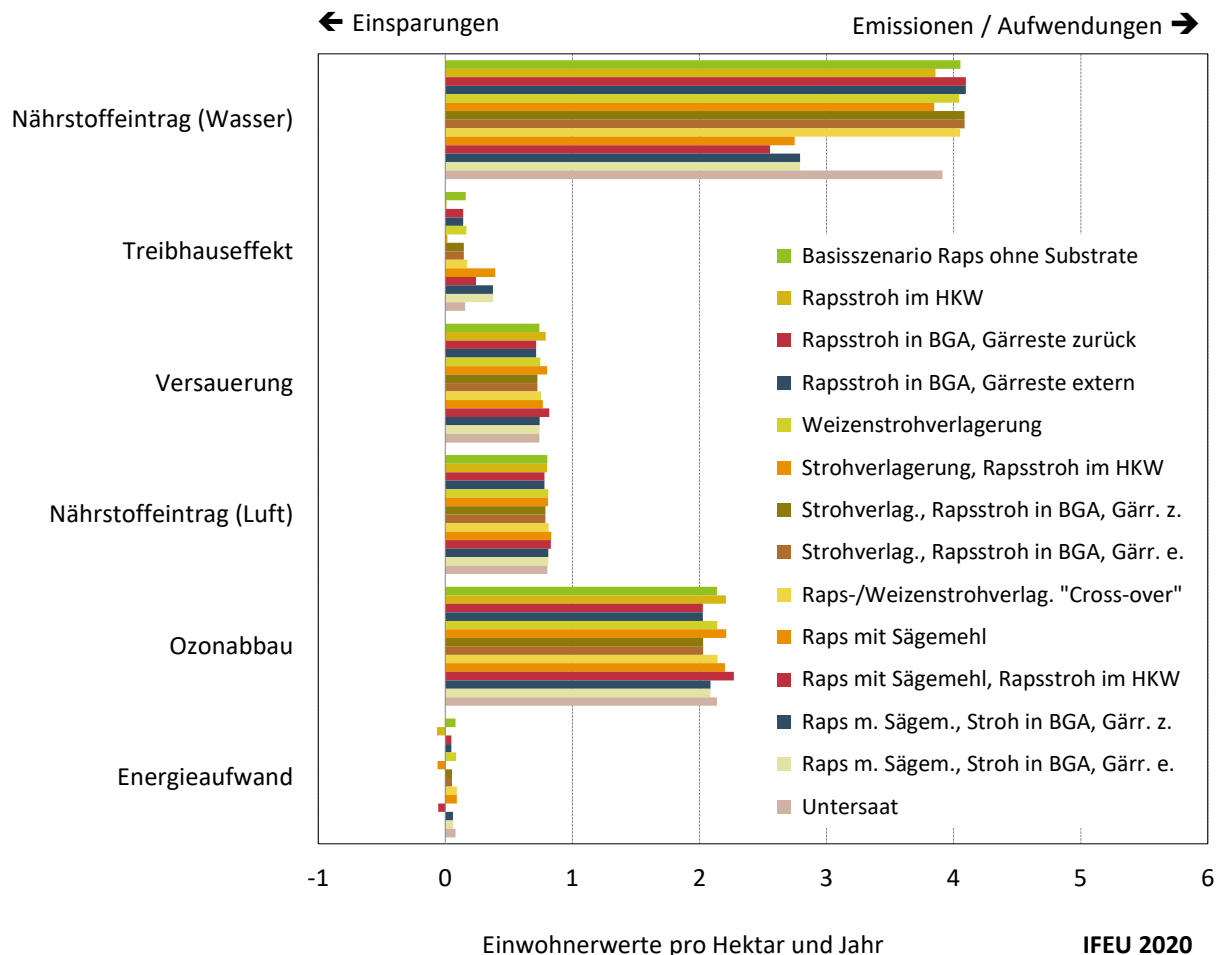


Abbildung 4-4: Umweltwirkungen der Raps-Fruchtfolge für verschiedene Managementoptionen bei 0 kg N-Immobilisierung. **Lesebeispiel:** sechster Balken, Nährstoffeintrag (Wasser): Der Anbau einer Fruchtfolge Raps-Weizen-Gerste mit betriebsinterner Verlagerung des Weizenstrohs als Substrat und Nutzung von Rapsstroh im Heizkraftwerk (Sz. 2b) verursacht pro Hektar und Jahr Nitrat- und Phosphatmissionen, deren Menge fast dem Vierfachen der Durchschnittsemissionen eines Bundesbürgers in einem Jahr entspricht. Bei 60 kg N-Immobilisierung läge man bei ca. 1,5 Einwohnerwerten.

Im Ergebnis unterscheiden sich einige Szenarien in einigen Umweltwirkungen recht deutlich voneinander, während andere sehr ähnliche oder identische Umweltwirkungen aufweisen. Die größten Unterschiede finden sich beim Nährstoffeintrag (Wasser) und beim Treibhauseffekt, bzgl. derer die Sägemehl-Szenarien im einen Fall besser und im anderen schlechter abschneiden. Bezüglich Versauerung und Ozonabbau weisen die HKW-Szenarien höhere Werte auf als das Basisszenario. Bei den Szenarien mit Biogaserzeugung macht es quasi keinen Unterschied, wo der Gärrest ausgebracht wird. Diese Ergebnisse sind richtungssicher: die hier ausgewiesenen Ergebnisunterschiede ändern sich relativ zueinander nicht, wenn andere Randbedingungen z. B. bzgl. der Immobilisierung oder Standortwahl betrachtet werden. Hierbei würden sich nur die quantitativen Werte ändern, die für jeden betrachteten Fall im Einzelnen abgeleitet werden können.

Anschließend wurden die **Effekte der N-Immobilisierung** für vier verschiedene N-Immobilisierungsstufen (0, 20, 60 und 100 kg N) der Substratzugabe quantifiziert. Diese Ergebnisse sind in (Gärtner et al. 2020) dargestellt (siehe dort in den Abschnitten 4.1.4 und 7.2) und bilden die Grundlage für Tabelle 4-5 (S. 23) und Tabelle 4-6 (S. 24). Darüber hinaus sind viele weitere Ökobilanzergebnisse in (Gärtner et al. 2020) dokumentiert. Diese lassen sich im Folgenden kurz zusammenfassen:

- Nährstoffeintrag (Wasser): Durch die Zugabe von Substraten mit weitem C/N-Verhältnis lässt sich die N-Auswaschung und damit der Nährstoffeintrag (Wasser) gegenüber dem Basisszenario (ohne Substratzugabe und ohne Abfuhr und energetische Nutzung der Residuen) wie folgt verringern:
- N-Immobilisierung: Sofern durch die Managementoptionen eine N-Immobilisierung erzielt wird, führen diese in der Regel (gegenüber dem Basisszenario) zu Verbesserungen hinsichtlich der Umweltwirkungen Treibhauseffekt, Versauerung, „Nährstoffeintrag (Luft)“ und stratosphärischer Ozonabbau, welche durch Änderungen der C-, N- und P-Dynamik beeinflusst werden (zu den Auswirkungen auf „Nährstoffeintrag (Wasser)“ siehe oben). Eine Ausnahme hiervon bildet allerdings die Zugabe von Sägemehl als Substrat, die gegenüber dem Basisszenario zu zusätzlichen Treibhausgasemissionen führt. Dies liegt daran, dass die typischerweise feucht anfallenden Sägereste vor der Ausbringung 3-6 Monate gelagert werden und in dieser Zeit erhebliche CO₂- und Methanemissionen verursachen.
- Residuennutzung: Ambivalente Ergebnisse liefert die energetische Nutzung der Residuen zur Strom- und Wärmeerzeugung in Heizkraftwerken: sie schneidet einerseits bzgl. Nährstoffeintrag (Wasser), Energieaufwand und Treibhauseffekt besonders gut ab, erhöht aber andererseits den Ozonabbau.

Die meisten der aufgeführten Ergebnisse sind richtungssicher, d. h. sie ändern sich im Vergleich zu anderen Parametersetzungen wie andere Standorte, andere N-Immobilisierungsstufen usw. relativ zueinander nicht. Lediglich die quantitativen Ergebniswerte ändern sich in Abhängigkeit der jeweils betrachteten Randbedingungen. Diese sind mit den Mitteln der Ökobilanz gut zu bestimmen.

4.5 Analyse lokaler Umweltwirkungen

Tabelle 4-3 vergleicht die Managementoptionen / Szenarien hinsichtlich ihres Risikos von Wirkungen auf Natur und Landschaft für die Standorte 6 und 3 (siehe Kapitel 2).

Der Vergleich der **Managementoptionen / Szenarien** zeigt, dass es bzgl. einer Reihe von Risiken von Wirkungen auf Natur und Landschaft (Erosion, Grundwasserzehrung, Belastung mit PSM, sowie Verlust von Landschaftselementen, Lebensräumen und Arten) keine bzw. nur marginale Unterschiede gibt. Im Hinblick auf die anderen Risiken unterscheiden sich die Managementoptionen / Szenarien wie folgt:

- Im Vergleich zum Basisszenario 1a (Raps ohne Substratzufuhr) geht von den Szenarien 1b-d, bei denen die Ernterückstände (ER) energetisch genutzt werden, ein geringeres Risiko in Bezug auf Eutrophierung und Grundwasserbelastung aus. Gleichzeitig erhöht die Rapsstroh-Entnahme aber das Risiko von Humusverlust und Schadverdichtungen, letzteres bedingt durch zusätzliche Überfahrten für die ER-Bergrung sowie – bei den Biogas-Szenarien 1c&d – durch die Gärrest-Ausbringung.
- Die Zufuhr von betriebsintern verlagertem Weizenstroh zu Raps (Szenario 2a) führt gegenüber dem Basisszenario 1a zu einem leicht geringeren Risiko von Wirkungen auf Natur und Landschaft, mit Ausnahme des Risikos von Schadverdichtungen. Wird jedoch das Rapsstroh entnommen und energetisch genutzt (Szenarien 2b-d), greift wiederum das o. g. Muster mit Vor- und Nachteilen.
- Die Zufuhr von extern gewonnenem Sägemehl zu Raps (Szenario 3a) führt gegenüber dem Basis-szenario 1a tendenziell zu geringeren Risiken von Wirkungen auf Natur und Landschaft, beispielsweise gehen

von Szenario 3a in Bezug auf Erosion und Humusverlust geringere (bis maximal gleiche) Risiken aus als vom Basisszenario 1a. Letzteres gilt selbst bei Rapsstroh-Nutzung. Lediglich die Risiken von Schadverdichtungen und Änderung der Bodenchemie (pH-Wert-Verringerung) in Folge der Ausbringung von Sägemehl [Kang et al. 2016] fallen leicht höher aus.

- Die Szenarien 3 (Cross-over) und 5 (Gras-Untersaat) schneiden ähnlich gut ab wie das Basisszenario 1a bzw. das Szenario 2a (mit Weizenstroh-Zufuhr zu Raps), mit leichten Vorteilen in Bezug auf das Risiko von Eutrophierung.

Tabelle 4-3: Vergleich der Managementoptionen / Maßnahmenszenarien hinsichtlich der Änderung des Risikos von Wirkungen auf Natur und Landschaft beim Anbau der beiden Fruchtfolgen im Vergleich zum Bewirtschaftungs-Referenzsystem Rotationsbrache (Ranking von A = geringes Risiko bis E = hohes Risiko)

Szenario	Standort 6														Standort 3																				
	Fruchtfolge I										Fruchtfolge II				Fruchtfolge I										Fruchtfolge II										
	1a	1b	1c	1d	2a	2b	2c	2d	3	4a	4b	4c	4d	5	1a	1c	2a	1a	1b	1c	1d	2a	2b	2c	2d	3	4a	4b	4c	4d	5	1a	1c	2a	
Art des Risikos	Basisszenario: Raps o. Substrat Raps o. Substrat; ER → HKW Raps o. Substrat; ER → BGA; GR zurück Raps o. Substrat; ER → BGA; GR extern Raps m. WW-Stroh Raps m. WW-Stroh; ER → HKW Raps m. WW-Stroh; ER → BGA; GR zurück Raps m. WW-Stroh; ER → BGA; GR extern ER-Crossover Raps m. Sägemehl Raps m. Sägemehl; ER → HKW Raps m. Sägemehl; ER → BGA; GR zurück Raps m. Sägemehl; ER → BGA; GR extern Raps mit Gras-Untersaat														Basisszenario: Raps o. Substrat Ackerb. o. Substr.; ER → BGA; GR zurück Ackerbohne m. WW-Stroh																				
Erosion	B	B	B	B	A	B	B	B	B	A	B	B	B	A	B	B	B	A	D	D	D	D	C	D	D	D	D	C	D	D	D	C	D	D	C
Schadverdichtung	C	D	E	E	D	D	E	E	D	D	D	E	E	C	C	C	E	D	A	B	C	C	B	B	C	C	B	B	B	C	C	A	A	C	B
Humusverlust	B	C	C	C	B	C	C	C	B	AA	A	A	A	B	B/C	C	B	D/E	E	E	E	D/E	E	E	E	D/E	C	D	D	D	D/E	D/E	E	D/E	
Änderung der Bodenchemie	B	B	C	C	A	B	B	B	B	C	C	D	D	A	B	C	A	B	B	C	C	A	A	B	B	B	C	C	D	D	A	B	C	A	
Eutrophierung v. Oberfl.gew.	C	B/C	B/C	B/C	B	B	B	B	B	A	A	A	A	B	C	B/C	B	E	D	D	D	C/D	C/D	C/D	C/D	C/D	C	C	C	C	C/D	E	D	C/D	
Belastung des Grundwassers	C	B/C	B/C	B/C	B	B	B	B	B	A	A	A	A	B	C	B/C	B	E	D	D	D	C/D	C/D	C/D	C/D	C/D	C	C	C	C	C/D	E	D	C/D	
Grundwasserzehrung	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Belastung mit PSM	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
Verlust v. Landschaftselementen	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
Verlust von Lebensräumen	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B/C	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	
Verlust von Arten	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden **Fruchtfolgen**, so zeigt sich, dass die Risiken für Fruchtfolge II sehr ähnlich ausfallen.

Zwischen den **Standorten** können Unterschiede festgestellt werden. Auf Standort 6 (schwerer Boden, kühl, trocken) sind die Risiken für Schadverdichtung und Grundwasserzehrung erhöht. Dagegen besteht auf Standort 3 (leichter Boden, warm, feucht) ein höheres Risiko für Erosion, Humusverlust und Eutrophierung.

Weitere Analyseergebnisse finden sich in (Gärtner et al. 2020).

4.6 Zusammenführung der Ergebnisse zur integrierten Nachhaltigkeitsbewertung

Die folgenden Tabellen stellen eine Zusammenführung der ökologischen und ökonomischen Bewertung dar. Negative Beträge bei den Betriebskosten bedeuten geringere Leistungen im Vergleich zum Basisszenario und sind für den Betrieb negativ zu bewerten. Ein negatives Vorzeichen bei den Umweltkosten wirkt sich hingegen positiv aus, da dann im Vergleich zum Basisszenario Umweltkosten eingespart werden. Die Höhe der N-Immobilisierung (0, 20, 60, 100 kg N) beziehen sich auf einen Hektar und auf die gesamte Fruchtfolge, also 3 Jahre.

In Tabelle 4-4 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Szenarien für jeden Indikator als Differenz zum Basisszenario (quantitativ oder qualitativ) für die Rapsfruchtfolge auf Standort 6 und Standort 3 vor/ohne Berücksichtigung einer N-Immobilisierung dargestellt.

Mit Hilfe der Farbgebung ist für Standort 6 beispielsweise deutlich erkennbar, dass sich die Verlagerungsszenarien (2a-2d) auf die Umweltindikatoren zumeist neutral oder positiv auswirken (beige und grüne Einfärbungen). Ausnahmen bildet hier der negativ bewertete standortspezifische Indikator Boden in den Szenarien 2c und 2d sowie die ebenfalls negativ bewerteten Indikatoren Versauerung und Ozonabbau in Szenario 2b. (orange Einfärbung). Die ökonomischen Indikatoren der Verlagerungsszenarien sind häufig neutral oder positiv. Ausnahmen bilden hier die Arbeitserledigungskosten und die DAL, diese fallen negativ aus (rote und orange Einfärbung).

Der Einsatz von Sägemehl wirkt sich in allen Unterszenarien auf den Nährstoffeintrag (Wasser) und auf den standortspezifischen Indikator Wasser positiv aus. Auf den Treibhauseffekt dagegen deutlich negativ. Die Maßnahme wirkt sich in einigen Unterszenarien negativ auf die Indikatoren Versauerung, Nährstoffeintrag (Luft), Ozonabbau und der standortspezifische Indikator Boden aus. Auf die betriebswirtschaftlichen Indikatoren wirken sich alle Unterszenarien negativ aus. Die Maßnahmen bewirken bei den Umweltkosten in Summe keinen oder nur einen geringen Effekt.

In allen Szenarien mit Nutzung des Rapsstrohs im Heizkraftwerk ist der Energieaufwand deutlich verringert, bei Nutzung in der Biogasanlage ist er ebenfalls verringert und ohne energetische Nutzung ist der Energieaufwand höher als im Basisszenario.

Auf Standort 3, einem warmen und feuchten Standort mit leichtem Boden fallen die Ergebnisse insgesamt schlechter aus. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-4 im unteren Teil dargestellt.

In einem weiteren Schritt wurden N-Immobilisierungsbedingter Unterschiede ausgearbeitet. Dazu wurden Bewertungen für Standort 6 und 3 mit unterschiedlichen Immobilisierungsstufen für verschiedene Maßnahmenzenarien durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 dargestellt.

Deutlich zu erkennen ist in diesen Tabellen der positive Effekt der N-Immobilisierung auf die Ökobilanz- und Umweltkosten-Indikatoren: Mit zunehmender N-Immobilisierung nehmen die nachteiligen Wirkungen der Maßnahmen ab. Beispielsweise gehen an Standort 3 die bei 0 kg N-Immobilisierung resultierenden negativen Effekte der unterschiedlichen Managementmaßnahmen auf den Nährstoffeintrag (Wasser) über zu neutralen und – im Falle von Sägemehleinsatz – positiven Effekten. Auch die betriebswirtschaftlichen Indikatoren verbessern sich mit zunehmender N-Immobilisierung, allerdings in geringerem Ausmaß (Tabelle 4-6).

Für Standort 6 zeichnet sich ein ähnliches Bild ab (Tabelle 4-5). Hier weisen die Indikatoren allerdings insgesamt weniger negative Effekte auf.

Tabelle 4-4: Indikatoren zur Beurteilung der Unterschiede zwischen den Szenarien auf Standort 6 und Standort 3 in der Raps-Fruchtfolge ohne N-Immobilisierung. Dargestellt sind die Differenzen zum Basisszenario 1a auf Standort 6.

Angaben pro Hektar und Jahr (ha·a)		Umwelt									Ökonomie							
		Quantifizierbare Indikatoren						Standortbez. Indikatoren			Betriebskosten			Umweltkosten				
Indikator	Einheit	Nährstoffeintrag (Wasser)	Treibhauseffekt	Versauerung	Nährstoffeintrag (Luft)	Ozonabbau	Energieaufwand	Boden	Wasser	Biodiversität	Direktkostenfreie Leistung	Arbeitsaufwandskosten	Direkt- und arbeitsaufwandskostenfreie Leistung	CO ₂ e	NO ₃ ⁻	NH ₃	SO ₂	Summe Umweltkosten
		kg PO ₄ -Äq.	t CO ₂ -Äq.	kg SO ₂ -Äq.	kg PO ₄ -Äq.	g R11-Äq.	GJ	-	-	-	€	€	€	€	€	€	€	€
Unterschiede zwischen den Substraten, Standort 6		Szenario									(Referenzszenario)							
Basisszenario Raps ohne Substrate	1a	(Referenzszenario)									(Referenzszenario)							
Rapsstroh im HKW	1b	- 0,8	- 1,6	1,7	- 0,0	2,2	- 25,5	o	+	o	91 €	57 €	34 €	- 314 €	- 44 €	0 €	18 €	- 340 €
Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	1c	0,1	- 0,2	- 0,7	- 0,1	- 3,4	- 5,5	-	+	o	95 €	129 €	- 34 €	- 38 €	6 €	- 11 €	- 2 €	- 45 €
Rapsstroh in BGA, Gärreste extern	1d	0,1	- 0,2	- 0,7	- 0,1	- 3,4	- 5,5	-	+	o	91 €	57 €	34 €	- 38 €	6 €	- 11 €	- 2 €	- 45 €
Weizenstrohverlagerung	2a	- 0,1	0,1	0,3	0,0	0,2	0,8	o	+	o	- 0 €	73 €	- 74 €	11 €	- 6 €	0 €	1 €	13 €
Strohverlagerung, Rapsstroh im HKW	2b	- 0,8	- 1,6	1,9	0,0	2,4	- 24,7	o	+	o	91 €	130 €	- 39 €	- 302 €	- 44 €	- 0 €	18 €	- 322 €
Strohverlag., Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	2c	0,1	- 0,1	- 0,5	- 0,1	- 3,4	- 4,7	-	+	o	94 €	202 €	- 108 €	- 28 €	6 €	- 11 €	- 1 €	- 27 €
Strohverlag., Rapsstroh in BGA, Gärreste extern	2d	0,1	- 0,1	- 0,5	- 0,1	- 3,4	- 4,7	-	+	o	91 €	130 €	- 39 €	- 28 €	6 €	- 11 €	- 1 €	- 27 €
Raps-/Weizenstrohverlagerung "Cross-over"	3	0,0	0,1	0,5	0,1	0,2	1,6	o	+	o	- 1 €	170 €	- 171 €	22 €	0 €	0 €	2 €	32 €
Raps mit Sägemehl	4a	- 4,9	2,5	0,9	0,2	1,9	1,8	o	++	o	- 122 €	38 €	- 160 €	484 €	- 282 €	- 2 €	1 €	226 €
Raps mit Sägemehl, Rapsstroh im HKW	4b	- 5,6	0,9	2,6	0,1	4,1	- 23,7	o	++	o	- 30 €	95 €	- 126 €	172 €	- 324 €	- 3 €	19 €	- 112 €
Raps m. Sägemehl, Stroh in BGA, Gärreste zurück	4c	- 4,7	2,3	0,2	0,0	- 1,5	- 3,7	-	++	o	- 27 €	167 €	- 194 €	446 €	- 273 €	- 13 €	- 1 €	186 €
Raps m. Sägemehl, Stroh in BGA, Gärreste extern	4d	- 4,7	2,3	0,2	0,0	- 1,5	- 3,7	-	++	o	- 30 €	95 €	- 126 €	446 €	- 273 €	- 13 €	- 1 €	186 €
Untersaat	5	- 0,6	- 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	+	o	- 28 €	3 €	- 31 €	- 9 €	- 33 €	0 €	0 €	- 42 €
Unterschiede zwischen den Substraten, Standort 3		Szenario									(Referenzszenario)							
Basisszenario Raps ohne Substrate	1a	(Referenzszenario)									(Referenzszenario)							
Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	1c	- 1,0	- 0,3	- 0,7	- 0,1	- 3,4	- 5,5	-	+	o	95 €	129 €	- 34 €	- 57 €	- 55 €	- 11 €	- 2 €	- 124 €
Weizenstrohverlagerung	2a	0,0	0,1	0,3	0,0	0,2	0,8	+	++	o	- 0 €	73 €	- 74 €	11 €	0 €	0 €	1 €	18 €
Raps-/Weizenstrohverlagerung "Cross-over"	3	0,0	0,1	0,5	0,1	0,2	1,6	o	++	o	- 1 €	170 €	- 171 €	21 €	0 €	0 €	2 €	31 €
Raps mit Sägemehl	4a	- 3,0	2,6	0,9	0,2	1,9	1,8	+	++	o	- 122 €	38 €	- 160 €	514 €	- 176 €	- 2 €	1 €	361 €
Untersaat	5	- 0,4	- 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	+	++	o	- 28 €	3 €	- 31 €	- 6 €	- 22 €	0 €	0 €	- 28 €

Tabelle 4-5: Indikatoren zur Beurteilung der Unterschiede zwischen den Szenarien in der Raps-Fruchtfolge mit vier verschiedenen N-Immobilisierungsstufen (0, 20, 60 und 100 kg N) auf Standort 6. Dargestellt sind die Differenzen zum Basisszenario (Standort 6) bei 0 kg N-Immobilisierung.

Angaben pro Hektar und Jahr (ha-a)		Umwelt					Ökonomie									
		Quantifizierbare Indikatoren					Betriebskosten			Umweltkosten						
Indikator	Einheit	Nährstoffeintrag (Wasser)	Treibhauseffekt	Versauerung	Nährstoffeintrag (Luft)	Ozonabbau	Energieaufwand	Direktkostenfreie Leistung	Arbeitsleistungskosten	Direkt- und arbeitsleistungskostenfreie Leistung	CO ₂ e	NO ₃ ⁻	NH ₃	SO ₂	Summe Umweltkosten	
		kg PO ₄ -Äq.	t CO ₂ -Äq.	kg SO ₂ -Äq.	kg PO ₄ -Äq.	g R11-Äq.	GJ	€	€	€	€	€	€	€	€	
Unterschiede Immobilisierung, Standort 6		Szenario					(Referenzszenario)									
0 kg N-Immobilisierung	Basisszenario Raps ohne Substrate	1a	(Referenzszenario)					(Referenzszenario)								
	Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	1c	0,1	- 0,2	- 0,7	- 0,1	- 3,4	- 5,5	95 €	129 €	- 34 €	- 38 €	6 €	- 11 €	- 2 €	- 45 €
	Weizenstrohverlagerung	2a	- 0,1	0,1	0,3	0,0	0,2	0,8	- 0 €	73 €	- 74 €	11 €	- 6 €	0 €	1 €	13 €
	Raps-/Weizenstrohverlagerung "Cross-over"	3	0,0	0,1	0,5	0,1	0,2	1,6	- 1 €	170 €	- 171 €	22 €	0 €	0 €	2 €	32 €
	Raps mit Sägemehl	4a	- 4,9	2,5	0,9	0,2	1,9	1,8	- 122 €	38 €	- 160 €	484 €	- 282 €	- 2 €	1 €	226 €
Untersaat	5	- 0,6	- 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	- 28 €	3 €	- 31 €	- 9 €	- 33 €	0 €	0 €	- 42 €	
20 kg N-Immobilisierung	Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	1c	- 2,7	- 0,3	- 1,7	- 0,3	- 6,3	- 5,9	102 €	129 €	- 27 €	- 52 €	- 154 €	- 25 €	- 3 €	- 236 €
	Weizenstrohverlagerung	2a	- 2,9	- 0,0	- 0,7	- 0,1	- 2,7	0,4	6 €	73 €	- 67 €	- 2 €	- 165 €	- 14 €	0 €	- 179 €
	Raps-/Weizenstrohverlagerung "Cross-over"	3	- 2,9	0,0	- 0,5	- 0,1	- 2,7	1,2	6 €	170 €	- 165 €	9 €	- 165 €	- 14 €	2 €	- 165 €
	Raps mit Sägemehl	4a	- 7,7	2,4	- 0,1	- 0,0	- 0,9	1,4	- 115 €	38 €	- 153 €	472 €	- 445 €	- 16 €	1 €	32 €
	Untersaat	5	- 3,3	- 0,1	- 1,0	- 0,2	- 2,9	- 0,4	- 21 €	3 €	- 24 €	- 22 €	- 193 €	- 14 €	- 1 €	- 233 €
60 kg N-Immobilisierung	Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	1c	- 8,3	- 0,4	- 3,8	- 0,6	- 11,9	- 6,7	115 €	129 €	- 14 €	- 78 €	- 482 €	- 54 €	- 4 €	- 626 €
	Weizenstrohverlagerung	2a	- 8,5	- 0,1	- 2,7	- 0,5	- 8,5	- 0,3	20 €	73 €	- 54 €	- 28 €	- 493 €	- 42 €	- 1 €	- 569 €
	Raps-/Weizenstrohverlagerung "Cross-over"	3	- 8,5	- 0,1	- 2,5	- 0,5	- 8,3	0,5	19 €	170 €	- 151 €	- 17 €	- 491 €	- 42 €	0 €	- 553 €
	Raps mit Sägemehl	4a	- 13,3	2,3	- 2,1	- 0,4	- 6,6	0,6	- 102 €	38 €	- 140 €	446 €	- 772 €	- 44 €	- 1 €	- 357 €
	Untersaat	5	- 9,0	- 0,2	- 3,0	- 0,5	- 8,5	- 1,1	- 8 €	3 €	- 11 €	- 48 €	- 521 €	- 42 €	- 2 €	- 624 €
100 kg N-Immobilisierung	Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	1c	nicht definiert*					nicht definiert*								
	Weizenstrohverlagerung	2a	- 14,1	- 0,3	- 4,8	- 0,9	- 14,1	- 1,1	33 €	73 €	- 40 €	- 54 €	- 819 €	- 71 €	- 2 €	- 959 €
	Raps-/Weizenstrohverlagerung "Cross-over"	3	- 14,1	- 0,2	- 4,6	- 0,8	- 14,1	- 0,3	32 €	170 €	- 138 €	- 44 €	- 817 €	- 70 €	- 1 €	- 942 €
	Raps mit Sägemehl	4a	- 18,9	2,2	- 4,1	- 0,7	- 12,2	- 0,1	- 88 €	38 €	- 127 €	420 €	- 1.098 €	- 73 €	- 2 €	- 746 €
	Untersaat	5	- 14,6	- 0,4	- 5,0	- 0,9	- 14,3	- 1,9	5 €	3 €	3 €	- 74 €	- 847 €	- 71 €	- 3 €	- 1.013 €

*Immobilisierung von 100 kg N nicht möglich, da N-Bilanzsaldo dieses Szenarios <100 kg N ist.

Tabelle 4-6: Indikatoren zur Beurteilung der Unterschiede zwischen den Szenarien in der Raps-Fruchtfolge mit vier verschiedenen N-Immobilisierungsstufen (0, 20, 60 und 100 kg N) auf Standort 3. Dargestellt sind die Differenzen zum Basisszenario (Standort 6) bei 0 kg N-Immobilisierung.

Angaben pro Hektar und Jahr (ha-a)		Umwelt					Ökonomie													
		Quantifizierbare Indikatoren					Betriebskosten			Umweltkosten										
Indikator	Einheit	Nährstoffeintrag (Wasser)	Treibhauseffekt	Versauerung	Nährstoffeintrag (Luft)	Ozonabbau	Energieaufwand	Direktkostenfreie Leistung	Arbeitsleistungskosten	Direkt- und arbeitsleistungskostenfreie Leistung	CO ₂ e	NO ₃ ⁻	NH ₃	SO ₂	Summe Umweltkosten					
		kg PO ₄ -Äq.	t CO ₂ -Äq.	kg SO ₂ -Äq.	kg PO ₄ -Äq.	g R11-Äq.	GJ	€	€	€	€	€	€	€	€					
Unterschiede Immobilisierung, Standort 3		Szenario					(Referenzszenario)													
0 kg N-Immobilisierung	Basisszenario Raps ohne Substrate	1a																		
	Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	1c					- 1,0	- 0,3	- 0,7	- 0,1	- 3,4	- 5,5	95 €	129 €	- 34 €	- 57 €	- 55 €	- 11 €	- 2 €	- 124 €
	Weizenstrohverlagerung	2a					0,0	0,1	0,3	0,0	0,2	0,8	- 0 €	73 €	- 74 €	11 €	0 €	0 €	1 €	18 €
	Raps-/Weizenstrohverlagerung "Cross-over"	3					0,0	0,1	0,5	0,1	0,2	1,6	- 1 €	170 €	- 171 €	21 €	0 €	0 €	2 €	31 €
	Raps mit Sägemehl	4a					- 3,0	2,6	0,9	0,2	1,9	1,8	- 122 €	38 €	- 160 €	514 €	- 176 €	- 2 €	1 €	361 €
Untersaat	5					- 0,4	- 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	- 28 €	3 €	- 31 €	- 6 €	- 22 €	0 €	0 €	- 28 €	
20 kg N-Immobilisierung	Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	1c					- 3,8	- 0,4	- 1,7	- 0,3	- 6,3	- 5,9	102 €	129 €	- 27 €	- 70 €	- 220 €	- 25 €	- 3 €	- 320 €
	Weizenstrohverlagerung	2a					- 2,9	- 0,0	- 0,7	- 0,1	- 2,7	0,4	6 €	73 €	- 67 €	- 2 €	- 165 €	- 14 €	0 €	- 180 €
	Raps-/Weizenstrohverlagerung "Cross-over"	3					- 2,9	0,0	- 0,5	- 0,1	- 2,7	1,2	6 €	170 €	- 165 €	8 €	- 165 €	- 14 €	2 €	- 165 €
	Raps mit Sägemehl	4a					- 5,9	2,6	- 0,1	- 0,0	- 0,9	1,4	- 115 €	38 €	- 153 €	502 €	- 342 €	- 16 €	1 €	165 €
	Untersaat	5					- 3,2	- 0,1	- 1,0	- 0,2	- 2,9	- 0,4	- 21 €	3 €	- 24 €	- 21 €	- 187 €	- 14 €	- 1 €	- 226 €
60 kg N-Immobilisierung	Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	1c					- 9,4	- 0,5	- 3,8	- 0,6	- 11,9	- 6,7	115 €	129 €	- 14 €	- 96 €	- 545 €	- 54 €	- 4 €	- 708 €
	Weizenstrohverlagerung	2a					- 8,5	- 0,1	- 2,7	- 0,5	- 8,5	- 0,3	20 €	73 €	- 54 €	- 28 €	- 490 €	- 42 €	- 1 €	- 567 €
	Raps-/Weizenstrohverlagerung "Cross-over"	3					- 8,5	- 0,1	- 2,5	- 0,5	- 8,3	0,5	19 €	170 €	- 151 €	- 18 €	- 490 €	- 42 €	0 €	- 553 €
	Raps mit Sägemehl	4a					- 11,5	2,4	- 2,1	- 0,4	- 6,6	0,6	- 102 €	38 €	- 140 €	476 €	- 667 €	- 44 €	- 1 €	- 222 €
	Untersaat	5					- 8,8	- 0,2	- 3,0	- 0,5	- 8,5	- 1,1	- 8 €	3 €	- 11 €	- 46 €	- 512 €	- 42 €	- 2 €	- 614 €
100 kg N-Immobilisierung	Rapsstroh in BGA, Gärreste zurück	1c					nicht definiert*					nicht definiert*								
	Weizenstrohverlagerung	2a					- 14,1	- 0,3	- 4,8	- 0,9	- 14,1	- 1,1	33 €	73 €	- 40 €	- 54 €	- 815 €	- 71 €	- 2 €	- 955 €
	Raps-/Weizenstrohverlagerung "Cross-over"	3					- 14,1	- 0,2	- 4,6	- 0,8	- 14,1	- 0,3	32 €	170 €	- 138 €	- 44 €	- 815 €	- 70 €	- 1 €	- 941 €
	Raps mit Sägemehl	4a					- 17,1	2,3	- 4,1	- 0,7	- 12,2	- 0,1	- 88 €	38 €	- 127 €	450 €	- 992 €	- 73 €	- 2 €	- 610 €
	Untersaat	5					- 14,4	- 0,4	- 5,0	- 0,9	- 14,3	- 1,9	5 €	3 €	3 €	- 72 €	- 837 €	- 71 €	- 3 €	- 1.002 €

*Immobilisierung von 100 kg N nicht möglich, da N-Bilanzsaldo dieses Szenarios <100 kg N ist.

5 Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Ausblick

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Da die Quantifizierung des Immobilisierungspotentials der Maßnahmenzenarien nicht Gegenstand des Arbeitspakets war, wurde mit Szenarien der N-Immobilisierung gerechnet. Zwischen den verschiedenen Managementszenarien als auch in Abhängigkeit von den pedoklimatischen Bedingungen (Standorte) zeigten sich deutliche Unterschiede im Hinblick auf die Nachhaltigkeit:

- Die **Strohverlagerung** ist unter geeigneten pedoklimatischen Bedingungen in der Lage, die ökologische Nachhaltigkeit zu verbessern, indem durch die Maßnahme die aquatische Eutrophierung reduziert wird. Da die Verlagerung zusätzlichen Arbeitsaufwand und Maschineneinsatz erfordert, kann der Treibhauseffekt mit dieser Maßnahme nicht verringert werden ebenso resultieren betriebswirtschaftliche Nachteile. Die Umweltkosten können durch diese Maßnahme abhängig vom Standort und N-Immobilisierung, verringert werden. Höhere betriebliche Kosten werden bei einer Immobilisierungsleistung von etwa 20 kg (über die gesamte Fruchtfolge) mehr als ausgeglichen.
- Die **Cross-over**-Maßnahme zeigt die gleichen Tendenzen wie die (reine Weizen-) Strohverlagerung. Auch hier kann unter geeigneten pedoklimatischen Bedingungen der N-Austrag in Gewässer verringert werden. Allerdings erhöhen sich der Arbeitsaufwand und der Maschineneinsatz durch Verlagerung von WW- und WR/AB-Stroh zusätzlich, wodurch sich höhere betriebswirtschaftliche Nachteile und teilweise höhere Umweltkosten ergeben.
- Durch die **Zufuhr von Sägemehl** kann der Nährstoffeintrag in Gewässer je nach pedoklimatischen Bedingungen deutlich verringert werden. Allerdings sind die Treibhausgasemissionen bei dieser Maßnahme deutlich erhöht, weil die Lagerung der typischerweise feucht anfallenden Sägereste (3-6 Monate Lagerung vor der Ausbringung) erhebliche CO₂- und Methanemissionen verursacht. Dies führt auch zu im Vergleich zum Basisszenario erhöhten Umweltkosten. Können 20 kg Stickstoff je Jahr eingespart werden (60 kg über die gesamte Fruchtfolge), so übersteigen auch in diesem Szenario die Einsparungen von Umweltkosten die betrieblichen Mehraufwendungen. 20 kg Einsparung über die gesamte Fruchtfolge sind dagegen noch nicht hinreichend.
- Beim **Untersaatszenario** sind sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile zu erwarten. Die aquatische Eutrophierung kann durch diese Maßnahme reduziert werden, während die Emission von Treibhausgasen nahezu gleich bleibt. Da diese Maßnahme kaum zusätzliche Kosten und Arbeitsaufwand erfordert, ist sie auch betriebswirtschaftlich kaum nachteilig. Die Umweltkosten fallen je nach Standort ebenfalls deutlich geringer aus als im Basisszenario. Die eingesparten Umweltkosten im Falle einer Immobilisierung von 20 kg Stickstoff (bezogen auf die gesamte Fruchtfolge) übersteigen die zusätzlichen betrieblichen Kosten um etwa 200 Euro, der gesamtgesellschaftliche Vorteil ist damit größer als im Szenario „Strohverlagerung“. Es ist allerdings zu beachten, dass dieses Szenario an vielen Standorten nicht umsetzbar ist
- Durch eine **energetische Nutzung** der Raps- bzw. Ackerbohnenstrohs kann eine Verbesserung annähernd aller betrachteten Indikatoren erreicht werden. Langfristige Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit durch den Kohlenstoffentzug wurden allerdings nicht umfassend berücksichtigt (nur Humusbilanz wurde berücksichtigt, nicht aber mögliche Auswirkungen auf die Bodenbiologie).

- **Pedoklimatische Bedingungen** haben Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Maßnahmen. Auf Standorten mit eher kühler und eher trockener Witterung sowie schweren Böden erweisen sich die Managementmaßnahmen tendenziell als vorteilhafter.

Somit können folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Aufgrund der hohen Umweltkosten durch Nitratausträge übersteigen die Einsparungen von Umweltkosten in der Mehrzahl der hier untersuchten Szenarien die zusätzlichen betrieblichen Aufwendungen deutlich, wenn dadurch mindestens 20 kg Stickstoffauswaschung vermieden werden können. Mit zunehmender N-Immobilisierung verbessert sich die Nachhaltigkeit aller Maßnahmen. Substratzugabe sollte insbesondere dort eingesetzt werden, hohe N-Überschüsse unvermeidlich sind.
- In der Nachhaltigkeitsuntersuchung erwiesen sich die Effekte der Strohverlagerung und der Untersaat auf die Umwelt- und Ökonomie-Indikatoren als größtenteils positiv. Aus Gesamt-Nachhaltigkeitssicht können daher die Managementoptionen **Strohverlagerung**, **Cross-over** und **Untersaat empfohlen** werden. Bei diesen Managementoptionen übersteigen bereits bei Immobilisierungsleistungen von etwa 20 kg über die gesamte Fruchtfolge die eingesparten Umweltkosten die zusätzlichen betrieblichen Aufwendungen.
- Im Szenario „Zufuhr von Sägemehl“ übersteigen die verringerten Umweltkosten die betriebswirtschaftlichen Defizite erst bei einer Immobilisierungswirkung von etwa 60 kg über die gesamte Fruchtfolge. Dieses Szenario sollte daher nur dann zum Einsatz kommen, wenn mit sehr hohen N-Überschüssen und hohen Immobilisierungsleistungen zu rechnen ist.
- Die Schaffung von finanziellen Anreizen (Subventionen, Prämien o.ä.) für die Durchführung von Maßnahmen zur Stickstoffimmobilisierung würde die Umsetzung dieser Maßnahmen fördern. Mit entsprechenden Ausgleichszahlungen würden dem Landwirt die Defizite in den Leistungen ausgeglichen werden und die gesamte Gesellschaft würde davon profitieren, da mit diesen Maßnahmen die Umweltkosten sinken.

Folgende Risiken und Bedenken sind bei der Wahl der Maßnahmen zu berücksichtigen:

- Eine Strohverlagerung birgt potentielle phytosanitäre Risiken, da vor dem Weizenanbau die Zufuhr von Weizenstroh erfolgt. Siehe hierzu (Bonney und Müller-Lindenlauf 2018).
- Die Nutzung von Sägemehl steht in Konkurrenz zu anderen Einsatzgebieten, wie z.B. der Nutzung als Bauprodukt oder der energetischen Nutzung. Dadurch können die Kosten und die Verfügbarkeit des Sägemehls stark schwanken.
- Eine Untersaat ist bei den typischen Fruchtfolgepaaren Raps / Winterweizen und Ackerbohne / Winterweizen aufgrund zeitlicher Beschränkungen kaum durchführbar.
- Die Abfuhr von Ernterückständen zur energetischen Nutzung ist zwar ökonomisch und ökologisch zunächst positiv, kann aber langfristig die Bodenfruchtbarkeit reduzieren.

Ausblick

Die Vertiefungsanalyse in Phase 2 bestätigt im Wesentlichen die Erkenntnisse aus Phase 1. Weiterer Forschungsbedarf besteht im Projektverlauf für folgende Punkte:

- Nur mit Daten zur tatsächlichen N-Immobilisierungsleistung in den Fruchtfolgen lassen sich präzisere Aussagen zu den tatsächlichen Umweltkosten bzw. zu Differenzen der Umweltkosten verschiedener

Szenarien ableiten, was eine Aussage über den gesamtgesellschaftlichen Nutzen erlauben würde. Daher sind gesicherte Daten für die Immobilisierungsleistung der Managementmaßnahmen notwendig.

- Die Untersuchung weiterer Fruchtfolgen mit dem Ziel, Erkenntnisse über deren ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit zu erhalten, wäre zielführend. Mit der Untersuchung weiterer Fruchtfolgen würde die Möglichkeit geschaffen werden, breitere Einsatzmöglichkeiten für die Maßnahmen zu finden und die Auswirkungen der Managementoptionen mit den Auswirkungen einer veränderten Fruchtfolge zu vergleichen.
- Durch den Klimawandel werden sich die Bedingungen für die Landwirtschaft ändern. Es muss mit häufigeren Trockenperioden und Hitzewellen gerechnet werden. Untersuchungen, wie sich Managementmaßnahmen zur N-Immobilisierung an trockenen und warmen Standorten auswirken, könnten zum Kenntnisgewinn über ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit zukünftiger Landwirtschaft beitragen.

Auch wenn nach Phase 2 weiterhin noch Forschungsbedarf besteht, so sind in Bezug auf die ökologische Bewertung keine fundamental anderen Zusatzerkenntnisse mehr zu erwarten – zumindest nicht für die beiden hier untersuchten Fruchtfolgen (Raps-Weizen-Gerste bzw. Ackerbohne-Weizen-Gerste), für welche die getroffenen Aussagen streng genommen ausschließlich gelten. Daher erachten wir es als nicht zielführend, die ökologische Bewertung über das Ende der Phase 2 hinaus fortzuführen.

6 Literaturverzeichnis

- agrarheute (2020): Heu- und Strohpreise: Heu teuer, Stroh billiger. Online verfügbar unter <https://markt.agrarheute.com/futtermittel-3/stroh-19>.
- Bonney, M.; Müller-Lindenlauf, M. (2018): Sozioökonomische Auswirkungen der neuen Managementoptionen. INPLAMINT Deliverable 5c. Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen.
- Bonney, M.; Will, J.; Müller-Lindenlauf, M.; Reinhardt, G.; Rettenmaier, N.; Gärtner, S. (2019): Vorläufige Beschreibung der neuen Managementoptionen und erste Screening-Analyse der Auswirkungen auf Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft. INPLAMINT (Phase 2) Ergebnisbericht 2. Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen; ifeu.
- Brink, Corjan; van Grinsven, Hans (2011): Costs and benefits of nitrogen in the environment. In: The European Nitrogen Assessment. Sources, effects and policy perspectives, S. 513–540.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Düngeverordnung - DüV.
- Bünger, Björn; Matthey, Astrit (2018): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Methodische Grundlagen. Hg. v. Umweltbundesamt.
- Coleman, Kevin; Jenkinson, D. S. (2014): RothC - A model for the turnover of carbon in soil. Model description and users guide (Windows version). Rothamsted Research Harpenden Herts, zuletzt geprüft am 15.12.2016.
- Dabbert, Stephan; Braun, Jürgen (2009): Landwirtschaftliche Betriebslehre. Grundwissen Bachelor; 52 Tabellen. 2., korrigierte Aufl. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (UTB, 2792).
- FNR (Hg.) (2010): Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe; Deutsches BiomasseForschungsZentrum; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft; Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik. 5. Auflage. Rostock: Druckerei Weidner (Bioenergie).
- FNR (2017): Holzhackschnitzel. Hg. v. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Online verfügbar unter <https://heizen.fnr.de/brennstoffe/holzbrennstoffe/holzhackschnitzel/>, zuletzt geprüft am 21.01.2021.
- Gärtner, S.; Rettenmaier, N.; Reinhardt, G. (2018): Ökologische Auswirkungen neuer Managementoptionen zur Erhöhung der Nährstoffnutzungseffizienz (Deliverable 5b). In: INPLAMINT-Berichte, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme BonaRes. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU).
- Gärtner, S.; Rettenmaier, N.; Reinhardt, G. (2020): Ökologische Auswirkungen neuer Managementoptionen zur Erhöhung der Nährstoffnutzungseffizienz. [Environmental impacts of new management options for increased nutrient-use efficiency]. ifeu. Heidelberg.
- Greer, Frank R.; Shannon, Michael (2005): Infant methemoglobinemia: the role of dietary nitrate in food and water. In: *Pediatrics* 116 (3), S. 784–786. DOI: 10.1542/peds.2005-1497.
- Holland, Mike (2014): Cost-benefit Analysis of Final Policy Scenarios for the EU Clean Air Package. Hg. v. EMRC.

IMF; Eurostat; OECD; World Bank; UNECE: Jährliche Entwicklung des Wechselkurses des US-Dollars gegenüber dem Euro von 1999 bis 2019 (in Euro). Hg. v. statista.

ISO (2006a): ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization.

ISO (2006b): ISO 14044:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organization for Standardization.

Kang, S., Müller-Lindenlauf, M., Reinhardt, G., Rettenmaier, N. (2016): Vorläufige Beschreibung der neuen Managementoptionen und erste Screening-Analyse der Auswirkungen auf Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft (Deliverable 4). Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU) & ifeu - Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU)

KTBL (2016a): Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. 25. Auflage. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.

KTBL (Hg.) (2016b): Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/2017. KTBL-Datensammlung. 25. Aufl. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.

KTBL (2020a): KTBL-Feldarbeitsrechner. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html>.

KTBL (2020b): Leistungs-Kostenrechner Pflanzenbau. Hg. v. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.ktbl.de/webanwendungen/leistungs-kostenrechnung-pflanzenbau>.

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2015): Düngung mit Phosphat, Kali, Magnesium. Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/phosphat-kalium-magnesium-pdf.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2021.

LEL (2018): Kalkulationsdaten Marktfrüchte. Unter Mitarbeit von Abteilung II. Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume Schwäbisch Gmünd (LEL). Online verfügbar unter <http://www.landwirtschaft-bw.info/pb/MLR.LEL-SG,Lde/Startseite/Unsere+Themen/Kalkulationsdaten+Marktfruechte>.

LfL (2012): Düngung mit Biogasgärresten. effektiv - umweltfreundlich - bodenschonend 10. Kulturlandschaftstag. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.

Loeffelholz, Thomas; Hagelstein, Nils: Sägespäne: welche Preise muss man rechnen? Hausjournal. Online verfügbar unter <https://www.hausjournal.net/Saegespaene-preis>, zuletzt geprüft am 21.01.2021.

Mattey, Astrit; Bünger, Björn (2018): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze. Stand 02/2019. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Mills, G.; Buse, A.; Gimeno, B.; Bermejo, V.; Holland, M.; Emberson, L.; Pleijel, H. (2007): A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops. In: *Atmospheric Environment* 41 (12), S. 2630–2643. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.11.016.

Peltre, Clément; Christensen, Bent T.; Dragon, Sophie; Icard, Christian; Kätterer, Thomas; Houot, Sabine (2012): RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. In: *Soil Biology and Biochemistry* 52, S. 49–60. DOI: 10.1016/j.soilbio.2012.03.023.

Schuchardt, Frank; Vorlop, Klaus-Dieter (2010): Abschätzung des Aufkommens an Kohlenstoff in Biomasse-Reststoffen in Deutschland für eine Verwertung über Hydrothermale Carbonisierung (HTC) und

Einbringung von HTC-Kohle in den Boden. In: *Landbauforschung (vTI Agriculture and Forestry Research)* 60 (4), S. 205–212.

Schullehner, Jörg; Hansen, Birgitte; Thygesen, Malene; Pedersen, Carsten B.; Sigsgaard, Torben (2018): Nitrate in drinking water and colorectal cancer risk: A nationwide population-based cohort study. In: *International journal of cancer* 143 (1), S. 73–79. DOI: 10.1002/ijc.31306.

Shakhramanyan, Nikolinka; Schneider, Uwe A.; McCarl, Bruce A.; Lang, Daniel J.; Schmid, Erwin (2012): The impacts of higher mineral phosphorus prices and externality taxation on the use of organic phosphorus sources in US agriculture. In: *Institute of Ethics and Transdisciplinary Sustainability Research, University of Luneburg, Luneburg, Germany*.

topagrar online (2018): Bioenergie Emsland bietet 75 bis 95 € pro Tonne Rapsstroh. Online verfügbar unter <https://www.topagrar.com/management-und-politik/news/bioenergie-emsland-bietet-75-bis-95-euro-pro-tonne-rapsstroh-9571033.html>, zuletzt geprüft am 21.01.2021.

USDA NRCS (2011): Carbon to Nitrogen Ratios in Cropping Systems. Hg. v. USDA NRCS East National Technology Support Center und North Dakota NRCS. USDA Natural Resources Conservation Service, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Ward, Mary H.; Jones, Rena R.; Brender, Jean D.; Kok, Theo M. de; Weyer, Peter J.; Nolan, Bernard T. et al. (2018): Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. In: *International journal of environmental research and public health* 15 (7). DOI: 10.3390/ijerph15071557.

Wellmann, Nadine (2016): Grasuntersaaten in Winterraps. Möglichkeiten der N-Fixierung. Online verfügbar unter <https://www.magazin-innovation.de/export/sites/magazin-innovation.de/extras/dokumente/innovation-2016/1-16-grasuntersaaten-in-winterraps.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2016.

WHO (2013): Health risks of air pollution in Europe - HRAPIE projekt. Recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particular matter, ozone and nitrogen dioxide. Hg. v. World Health Organization, Regional Office for Europe.

Will, J.; Müller-Lindenlauf, M.; Bonney, M. (2020): Sozioökonomische Auswirkungen der neuen Managementoptionen. INPLAMINT (Phase 2) Deliverable 7. Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen.