

Sebastian Rössert und Thomas Knoke

Multifunktionalität in der Landnutzungsplanung

Potenzial von Kurzumtriebsplantagen für bayerische Ackerbaubetriebe

Neben dem Anspruch der Wirtschaftlichkeit stehen landwirtschaftliche Betriebe vor vielseitigen Herausforderungen, die die Produktion und Bewirtschaftung betreffen. Zusätzlich zu den jährlichen Wetterschwankungen und der langfristigen Klimaänderung sind unterschiedlichste Regelungen, Grenzwerte und Vorschriften zu beachten. Zusammen mit den Zielen von Interessensvertretern und auch zunehmend der allgemeinen Bevölkerung sehen sich Landnutzer bei der Auswahl von Landnutzungsoptionen mit multifunktionalen Anforderungen konfrontiert. Für diesen Beitrag haben wir daher anhand von vier normierten Zielkriterien (Deckungsbeitrag; Kohlenstoff-Input in den Boden; Höhe der Stickstoffdüngung; Pflanzenschutzmittel-Behandlungsindex) optimierte Landnutzungsverteilungen für einen durchschnittlichen bayerischen Ackerbaubetrieb berechnet. Zusätzlich zu den üblichen einjährigen Ackerkulturen (Winterweizen; Wintergerste; Silomais; Körnermais; Winterraps; Zuckerrüben; Kartoffeln) analysieren wir auch das Potenzial von Kurzumtriebsplantagen (KUP) mit Pappelhybriden im Vergleich gewinnorientierter und multifunktionaler Szenarien. Mit Hilfe der Methode der robusten Optimierung haben wir unterschiedliche Risikoeinstellungen von Landnutzern modelliert.

Während KUP unter gewinnorientierter Zielsetzung 10–34 % der Betriebsfläche einnehmen, ist ihr vorteilhafter Anteil für die multifunktionale Betrachtung mit 27–33 % auch bei unterschiedlich hoher Risikoabneigung konstanter. Für das multifunktionale Szenario mit KUP konnten wir die höchste Einsparung an Stickstoffdünger bei gleichzeitig höchstem Kohlenstoff-Input in den Boden gegenüber einem gewinnorientierten Szenario ohne KUP ermitteln. Das hohe Potenzial von KUP für bayerische Ackerbaubetriebe wird dadurch unterstrichen, dass durch ihren Anbau auch bei gewinnorientierter Planung Stickstoffdüngung und Pflanzenschutzmittel-Behandlungsindex gesenkt werden. KUP können daher besonders unter multifunktionalen und ökologischen Gesichtspunkten eine Bereicherung für bayerische Ackerbaubetriebe darstellen.

Schlagwörter: **Klimawandel, Landnutzung, Robuste Optimierung, Agroforst, Kurzumtriebsplantage (KUP), Multifunktionalität, Ökosystemleistungen**

1 Einleitung

1.1 Herausforderungen in der heutigen Landwirtschaft

Insbesondere die Landwirtschaft steht als flächenmäßig umfangreichste Landnutzungsform in Deutschland vor unterschiedlichsten Herausforderungen. Eine Vielzahl an Regelungen, Vorschriften und Interessensvertretern aus verschiedensten Bereichen beeinflusst die Entscheidungen der Landnutzer. Prominente Beispiele aktueller Themen sind die Diskussionen um ein Verbot des Pflanzenschutzmittels Glyphosat, die Nitratbelastung des Grundwassers durch Düngemittel, sowie die Speicherung von Kohlenstoff im Boden als CO₂-Senke. Darüber hinaus muss jedoch auch die wirtschaftliche Anforderung eines Betriebs erfüllt werden, um beispielsweise Lebenshaltungskosten, Reparaturen und Investitionen sicherzustellen. Unter all diesen Rahmenbedingungen stellt die Wahl, welche Anteile der zur Verfügung stehenden

Kulturpflanzenarten angebaut werden sollen, eine der wesentlichsten Überlegungen dar.

Die unterschiedlichen Eigenschaften von Landnutzungsoptionen, im Fall der Landwirtschaft also Pflanzenarten, resultieren in einem unterschiedlichen Beitrag zu ökonomischen und ökologischen Zielkriterien. In Anlehnung an die genannten Anforderungen betrachten wir in diesem Artikel den Deckungsbeitrag als ökonomisches Zielkriterium, sowie die drei ökologischen Zielkriterien Kohlenstoff-Input in den Boden, Höhe der Stickstoffdüngung und einen Pflanzenschutzmittel-Behandlungsindex (genaue Beschreibung siehe Kapitel 2.2).

Das Teilprojekt 4 des Forschungsprojekts Blick in die Zukunft (BLIZ) im bayerischen Klimaforschungsnetzwerk beschäftigt sich also mit der Modellierung der Landnutzung in Bayern. Ziel des Projektes ist es, Entscheidungshilfen für Landnutzer zu erarbeiten. Dabei sollen auch die beschriebenen multifunktionalen Anforderungen anhand verschiedener Zielkriterien bei der Entscheidung über die optimalen Anteile der Landnutzungsoptionen berücksichtigt werden.

1.2 Landnutzungsplanung unter Risiko

Zusätzlich zum Bereich der Multifunktionalität müssen Landnutzer auch das Risiko in ihre Überlegungen miteinbeziehen. Extremereignisse wie der heiße und trockene Sommer 2018 stellen große Probleme für Landnutzer in Bayern dar und verdeutlichen damit die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Risiko in der Landnutzungsplanung. Ertragseinbußen bei den Ackerkulturen zwischen 3 und 9 Prozent gegenüber dem langjährigen Mittelwert wurden bayernweit für das Erntejahr 2018 verzeichnet, in besonders betroffenen Regionen wie dem Regierungsbezirk Unterfranken sogar 7 bis 24 Prozent (vgl. *LfStat* 2020). Somit bildet die Berücksichtigung der Unsicherheiten der betrachteten ökonomischen und ökologischen Zielkriterien die zweite wichtige Komponente unserer Landnutzungsmodellierung.

1.3 Betrachtung alternativer Landnutzungsoptionen

Eine Möglichkeit für landwirtschaftliche Betriebe auf vielseitige Anforderungen und unsichere Bedingungen zu reagieren, ist die Erweiterung des eigenen Produktionsportfolios. Für diesen Artikel haben wir daher ein

Agroforstsystem als mögliche Landnutzungsoption integriert, zusätzlich zum Standard-Portfolio eines durchschnittlichen bayerischen Ackerbaubetriebes (Winterweizen, Wintergerste, Silomais, Körnermais, Winterraps, Kartoffeln, Zuckerrüben). Dabei handelt es sich um den Anbau von Pappelhybriden im Kurzumtrieb, häufig auch als Kurzumtriebsplantage oder KUP bezeichnet (Abbildung 1). Nach der Neuanpflanzung werden die schnellwachsenden Bäume meist alle fünf bis sieben Jahre geerntet. Das in Form von Hackschnitzeln gewonnene Holz wird überwiegend zur Energieerzeugung in Heiz(kraft)werken genutzt, aber auch Papier, Zellstoff und Holzwerkstoffe können daraus erzeugt werden. Der Wiederaustrieb erfolgt als sogenannter Stockausschlag aus dem verbliebenen Baumstumpf. Nach drei- bis viermaliger Ernte werden die nun langsamer nachwachsenden Baumstümpfe meist gerodet und durch frische, triebkräftige Pflanzen ersetzt.

1.4 Forschungsfragen

In diesem Beitrag betrachten wir einen durchschnittlichen bayerischen Ackerbaubetrieb und modellieren dessen Entscheidungen zur Aufteilung der Anbaufläche auf verschiedene Landnutzungstypen unter



Abb. 1: Kurzumtriebsplantage (KUP) mit Pappelhybriden

verschiedenen Gegebenheiten. Im Fokus steht dabei zum einen der Vergleich einer rein gewinnorientierten mit einer multifunktionalen Zielsetzung, bei der neben dem ökonomischen Gewinn auch weitere, ökologische Zielkriterien berücksichtigt werden. Wie zuvor angedeutet, haben wir hierzu die Höhe des Kohlenstoffinputs in den Boden, die ausgebrachte Menge an Stickstoffdünger und die Intensität des Pflanzenschutzmitteleinsatzes ausgewählt. Dabei gehen wir der Frage nach, inwieweit sich die optimalen Anteile der Landnutzungsoptionen verändern, wenn zusätzlich ökologische Zielkriterien berücksichtigt werden.

Zum anderen legen wir unser Augenmerk auf das Potenzial der KUP, um den möglichen Beitrag dieser Landnutzungsoption zum Erreichen der vorgegebenen Ziele abzuschätzen. Es soll also die Frage geklärt werden, ob KUP eine interessante Erweiterung des Landnutzungsportfolios darstellen, wenn auf die festgelegten Zielkriterien hin optimiert wird. Alle Berechnungen stellen wir für unterschiedliche Level von Risikoabneigung an, um verschiedene Risikoeinstellungen von Landnutzern abzubilden.

2 Methodik

2.1 Verfahren zur Optimierung der Landnutzungsverteilung

An erster Stelle vieler Entscheidungen steht für einen landwirtschaftlichen Betrieb die Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit. Die Grundlage jeder Form der wirtschaftlichen Planung stellt daher, in den allermeisten Fällen, das Erzielen eines möglichst hohen und sicheren Gewinns dar. Einen wichtigen Grundstein zur rechnerischen Optimierung von Entscheidungen zur optimalen Mischung von Vermögenswerten legte der Nobelpreisträger Harry Markowitz bereits 1952. Die sogenannte Portfoliotheorie ermöglicht es, die optimalen Anteile unterschiedlicher Optionen z.B. bei der Geldanlage in Aktienportfolios zu ermitteln. Berücksichtigung findet darin der unterschiedliche ökonomische Ertrag, das Risiko der einzelnen Alternativen und insbesondere das Prinzip der Risikominderung durch Streuung der Investition auf mehrere Optionen. Diese ursprünglich für Kapitalmärkte entwickelte Theorie lässt sich auch in der Landnutzungsplanung anwenden. Zur Berechnung der optimalen Anteile von Landnutzungsoptionen innerhalb des Portfolios, verwenden wir die Methode der robusten Optimierung (vgl. BEN-TAL/EL GHAOUL/NEMIROVSKIĬ 2009). Die robuste Optimierung stellt sicher, dass möglichst hohe Zielbeiträge auch bei ungünstigen Kombinationen der Eingangswerte der Zielkriterien erreicht werden.

2.2 Normierte Zielkriterien zur Berücksichtigung multifunktionaler Zielsetzungen

Im Fall der hier betrachteten Ackerbaubetriebe stehen dem Bewirtschafter anstatt Aktien verschiedene Kulturpflanzen zur Verfügung (vgl. Kapitel 1.3), deren optimale Anteile an der bewirtschafteten Fläche bestimmt werden sollen. Als ökonomisches Zielkriterium verwenden wir den Deckungsbeitrag (DB), also denjenigen Betrag, der dem Bewirtschafter nach Abzug der unmittelbaren Produktionskosten (= variable Kosten) pro Hektar und Jahr zur Verfügung steht. Damit bildet der mittlere DB als ökonomisches Zielkriterium das Basisszenario unseres Landnutzungsmodells.

Die Quantifizierung des Risikos der verschiedenen Kulturen erfolgt anhand der Standardabweichung des Zielkriteriums. Diese statistische Kennzahl berechnet sich aus der jährlichen Schwankung der Deckungsbeiträge, welche sich wiederum aus den Schwankungen der Preise, Erträge und Produktionskosten ergeben. Für die hier vorgestellten Berechnungen haben wir Mittelwerte und Standardabweichungen der Erträge, Preise und Erntekosten für sieben Ackerkulturen (vgl. Kapitel 1.3) in Bayern aus Aufzeichnungen der letzten 20 Jahre berechnet (*LfStat* 2020; *Destatis* 2020; *LfL (a)* 2020). Im Fall der KUP verwenden wir Annuitäten, also im Durchschnitt über die Produktionszeit jährlich erzielbare Erlöse und deren Standardabweichungen (aus *HAUK* 2016) anstatt von Deckungsbeiträgen als ökonomisches Zielkriterium.

Wie beschrieben möchten wir, neben einer rein gewinnorientierten Optimierung, auch den Einfluss der Landnutzungsoptionen auf Ökosystemleistungen betrachten. Hierzu werden weitere Eigenschaften der Landnutzungsoptionen berücksichtigt. Für diesen Beitrag haben wir drei ökologische Zielkriterien gewählt: die Höhe des Kohlenstoffeintrags (C-Input) in den Boden [$t/(ha \cdot a)$], die Höhe der mineralischen Stickstoffdüngung (N-Düngung) [$kg/(ha \cdot a)$] und den Pflanzenschutzmittel-Behandlungsindex (PSM-Index) [dimensionslos]. Damit möchten wir die eingangs beschriebenen aktuell diskutierten Themen Kohlenstoffspeicherung, Stickstoffdüngung/Nitrateintrag und Pflanzenschutzmitteleinsatz (vgl. Kapitel 1.1) aufgreifen.

Berechnet haben wir den C-Input (nach WIESMEIER et al. 2014 und für KUP nach BERHONGARAY et al. 2016) und die N-Düngung (nach aktueller Düngeverordnung, *LfL (b;c)* 2020) jeweils auf der Basis der Erträge für jede Landnutzungsoption. Die Pflanzenschutzmittel-Behandlungsindices haben wir aus Erhebungen des Julius-Kühn-Instituts entnommen (vgl. ROSSBERG 2016; ROSSBERG/AECKERLE/STOCKFISCH 2017). Tabelle 1 gibt eine tabellarische Übersicht über die zur Berechnung und Modellierung verwendeten Werte der vier Zielkriterien.

Tab. 1: Zur Optimierung verwendete Werte der Zielkriterien je Landnutzungsoption

Landnutzungsoption	Deckungsbeitrag [€/(ha*a)]		C-Input [t/(ha*a)]		N-Düngung [kg/(ha*a)]		PSM-Index [dimensionslos]	
	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung	Mittelwert	Standard-abweichung
Winterweizen	128	297	5,33	0,81	144	74	5,35	1,74
Wintergerste	-85	232	3,71	0,58	113	54	4,13	0,98
Silomais	12	328	4,32	0,70	139	69	1,89	0,54
Körnermais	49	382	6,71	0,94	138	69	1,89	0,63
Winterraps	187	273	9,46	2,24	140	45	6,73	2,23
Kartoffeln	3365	4542	1,48	0,20	119	46	12,06	4,54
Zuckerrüben	595	452	3,56	0,50	107	72	3,91	1,58
KUP	422	550	3,30	1,61	0	0	0	0

Deckungsbeitrag (mehr ist besser) nach *LfStat* (Stand2020), *Destatis* (Stand2020) und *LfL* (a) (Stand2020). Im Fall von KUP wurde die Annuität als Deckungsbeitragsäquivalent verwendet; Höhe des Kohlenstoffeintrags (C-Input, mehr ist besser) in den Boden nach WIESMEIER et al. (2014) und BERHONGARAY et al. (2016); Höhe der mineralischen Stickstoffdüngung (N-Düngung, weniger ist besser) nach *LfL* (b) und (c) (Stand2020); Pflanzenschutzmittel-Behandlungsindex (PSM-Index, weniger ist besser) nach ROSSBERG (2016) und ROSSBERG/AECKERLE/STOCKFISCH (2017).

Der Grundgedanke unserer multifunktionalen Optimierung baut auf Referenzpunkten auf (vgl. ESTRELLA/CATRYSSSE/ORSHOVEN 2014). Wir beschreiben das Referenzpunktverfahren in enger Anlehnung an KNOKE und KIENLEIN (2020). Ein Referenzpunkt ist der günstigste für ein Zielkriterium erreichbare Wert, den wir im Folgenden als „idealen“ Wert bezeichnen wollen. In unserem Beispiel haben wir wie beschrieben die Zielkriterien Deckungsbeitrag, C-Input, N-Düngung und PSM-Index verwendet. Für jedes dieser Zielkriterien gibt es einen idealen Wert, aber es ist unmittelbar klar, dass dieser Idealwert nicht gleichzeitig für alle Zielkriterien erreicht werden kann. Wollen wir beispielsweise hohe Deckungsbeiträge erzielen, wofür intensiv bewirtschaftete Landnutzungsoptionen benötigt werden, lässt sich nicht parallel der PSM-Index minimieren. Geringe N-Düngung und gleichzeitig maximale Kohlenstoffspeicherung, für die wir ja hohe Erträge benötigen, schließen sich ebenso gegenseitig aus. Diese Kette an Konflikten ließe sich noch erweitern. Solche Zielkonflikte entstehen, weil unterschiedliche Landnutzungsoptionen in unterschiedlicher Weise zu den Zielkriterien beitragen (siehe Tabelle 1).

Wie lässt sich nun ein guter Kompromiss finden? Dazu müssen die Zielkriterien, die alle in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden, vergleichbar gemacht werden. Um dies zu erreichen, setzen wir den idealen Wert jedes Zielkriteriums gleich 100% und den ungünstigsten (antiidealen) Wert gleich

Null. Alle anderen Niveaus eines Zielkriteriums werden dann zwischen Null und 100% skaliert, so dass standardisierte Zielkriterien entstehen.

Den verschiedenen Landnutzungsoptionen kann nun im Rahmen einer Optimierung ein bestimmter Flächenanteil zugeordnet werden, wobei sich alle Flächenanteile am Ende zu 100% (gesamte Anbaufläche) summieren müssen. Dies geschieht mit dem Ziel, dass die flächengewichteten Zielkriterien einen möglichst kleinen Abstand zum Referenzpunkt (dem idealen Wert, = 100%) erreichen. Abbildung 2 veranschaulicht dies graphisch. Wir konzentrieren uns bei der Optimierung auf den maximalen Abstand zwischen erreichtem Zielkriterium und Referenzpunkt. Man könnte natürlich auch darauf aus sein, den Mittelwert der Abstände zu den Referenzpunkten zu minimieren. Dies würde aber unterstellen, dass wir die Zielkriterien untereinander gegenseitig ersetzen können. Ein mögliches Weniger eines Zielkriteriums wäre im Rahmen der Mittelwertbildung durch das Mehr eines anderen Kriteriums ausgleichbar. Viel Kohlenstoffspeicherung würde dann beispielsweise einen geringen Deckungsbeitrag kompensieren. Solche Substitutionen sind aber nicht immer sinnvoll, denn wir wollen ja möglicherweise alle Zielkriterien als gleichwertig betrachten. Daher ist es vernünftig, den größten Abstand zu minimieren, weil dies Substitutionen ausschließt. Der größte Abstand wird immer vom am erfüllten schlechtesten Kriterium gebildet. Dieser Abstand lässt sich nur durch Verbesserung genau dieses Kriteriums verringern. Das beschriebene Vorgehen hat eine vielfältige Bewirtschaftung zur Folge, da nur so die zahlreichen Zielkriterien auf möglichst hohem Niveau erfüllt werden können.

2.3 Lösungswerkzeug robuste Optimierung

Um nun die optimalen Anteile der hier betrachteten acht möglichen Landnutzungsformen zu ermitteln, ist ein spezielles rechnerisches Verfahren notwendig. Diese robuste Optimierung (vgl. BEN-TAL/EL

GHAOUL/NEMIROVSKĪ 2009; KNOKE et al. 2015), soll im Ergebnis zu einer Landnutzung führen, welche die Ansprüche auch bei geänderten Bedingungen noch möglichst gut erfüllt. Zu diesem Zweck werden viele Kombinationen aus Zielkriterien gebildet, welche die Oberfläche eines betrachteten Unsicherheitsbereiches abbilden (vergleiche auch die Beschreibung weiter unten). Solche Kombinationen, z.B. aus verschiedenen Deckungsbeiträgen der Anbaualternativen, werden als Bedingungen in die Optimierung eingeführt, die nicht verletzt werden dürfen. Diese Bedingungen stellen sicher, dass der zu minimierende größte Abstand zu den Idealpunkten bei keiner Kombination der durch die Bedingungen repräsentierten Zielkriterien überschritten wird. Die erreichte Zuweisung von Land zu den Anbaualternativen überschreitet bei dieser Formulierung dann aber nicht nur für keines der direkt formulierten Unsicherheitszenarien, sondern auch für keine Kombination von Zielkriterien innerhalb des gesamten Unsicherheitsbereiches den maximal tolerierten

Abstand zum Idealpunkt. Eine in solcher Art robuste Planung ist sinnvoll, denn die Bedingungen, unter denen Landwirtschaft stattfindet, ändern sich fortwährend. Solche möglichen Änderungen werden durch den Unsicherheitsraum abgebildet und von vorneherein in die Optimierung einbezogen. Zum Beispiel variieren die Erträge der Kulturpflanzen, besonders in Zeiten des fortschreitenden Klimawandels (vgl. *LfStat* 2020). Zudem sind die Erzeugerpreise sehr variabel; derzeit verzeichnen die internationalen Märkte für Agrarprodukte durch die Corona-Pandemie starke Schwankungen. Man sollte also im Rahmen der Landnutzungsplanung nicht davon ausgehen, dass alle Zielkriterien immer wie erwartet erreicht werden. Es kann durchaus Abweichungen nach unten geben. Abweichungen nach oben, also z.B. höhere Erträge oder niedrigere Kosten, vernachlässigen wir in unseren Berechnungen, um eine vorsichtigere Schätzung zu erhalten. Wir wollen mit unserer robusten Optimierung erreichen, dass die Ansprüche an die Kulturlandschaft für einen großen

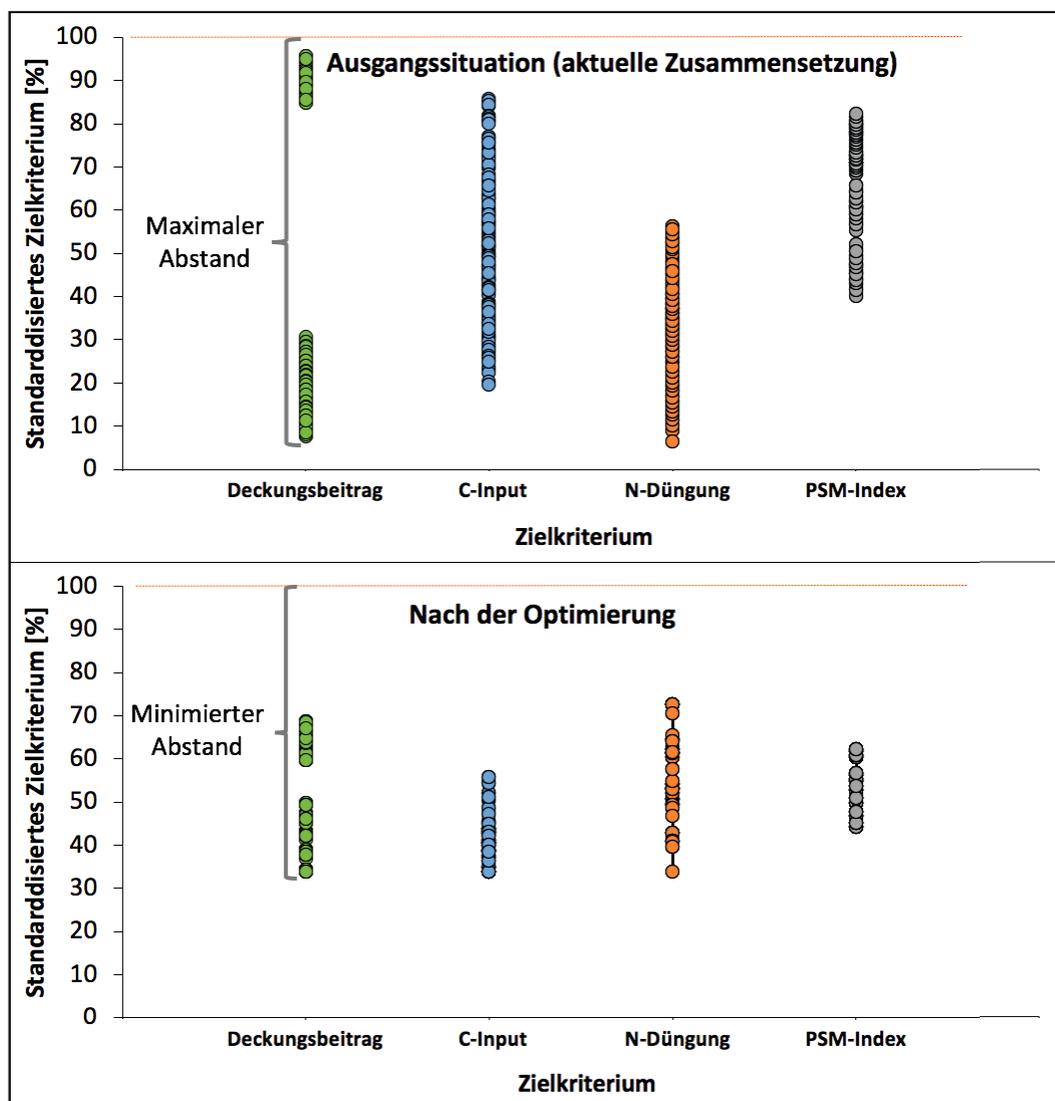


Abb. 2: Multifunktionale Optimierung der Landnutzung eines bayerischen Ackerbaubetriebs unter Berücksichtigung der vier Zielkriterien durch Minimierung der maximalen Abstände zum Referenzpunkt 100% (orange gestrichelte Linie).

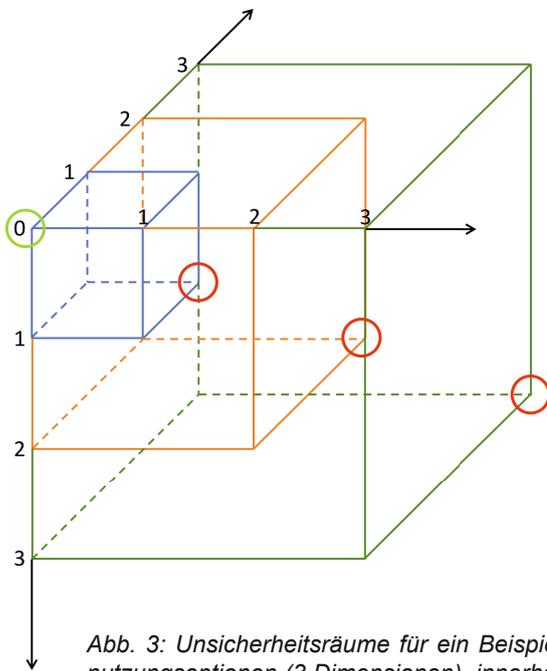


Abb. 3: Unsicherheitsräume für ein Beispiel mit drei Landnutzungsoptionen (3 Dimensionen), innerhalb denen der jeweilige Erwartungswert liegt. Auf den Achsen ist das Vielfache der Standardabweichung abgebildet. Hellgrüner Kreis: Best Case Szenario aller drei Landnutzungsoptionen gleichzeitig (jede Landnutzungsoption erreicht den Mittelwert); Rote Kreise: Worst Case Szenarien je Unsicherheitsraum für alle drei Landnutzungsoptionen gleichzeitig (jede Landnutzungsoption erreicht nur Mittelwert minus Standardabweichung). Die weiteren Eckpunkte ergeben sich aus den entsprechenden Kombinationen der Best und Worst Case Szenarien und bilden zusammen den Unsicherheitsraum, in dem der Erwartungswert liegt.

Rahmen an möglicherweise eintretenden Werten für die Zielkriterien immer gut erfüllt werden. Eine solche Lösung unseres Optimierungsproblems sehen wir als robust an.

Die Berücksichtigung des Risikos erfolgt technisch in Form von sogenannten Unsicherheitsräumen. Hierzu werden verschiedene diskrete Szenarien als Eckpunkte mehrdimensionaler Räume und somit als deren Oberfläche definiert. Als solche Eckpunkte dienen jeweils extreme Ausprägungen der Zielkriterien, die basierend auf den zugehörigen Standardabweichungen abgeleitet werden (vgl. Tabelle 1). Nach der hier verwendeten Definition wird im Best Case Szenario der Mittelwert eines Zielkriteriums einer Kultur erreicht. Als Worst Case Szenario kann nur der Mittelwert dieses Zielkriteriums minus (Zielkriterien bei denen mehr besser ist: DB und C-Input) bzw. plus (Zielkriterien bei denen weniger besser ist: N-Düngung und PSM-Index) eines Vielfachen der zugehörigen Standardabweichung erzielt werden. Weitere Eckpunkte bilden die möglichen Kombinationen aus Best Case und Worst Case Szenarien aller

Landnutzungsoptionen, z.B. Best Case für Option 1, Worst Case für Option 2 und 3 usw. Abbildung 3 veranschaulicht dies an einem Beispiel mit drei Landnutzungsoptionen, woraus sich ein dreidimensionaler Raum mit acht Eckpunkten ergibt (der gesamte verwendete Datensatz mit seinen acht Landnutzungsoptionen entspricht folglich einem achtdimensionalen Unsicherheitsraum mit $2^8 = 256$ Kombinationsmöglichkeiten also Eckpunkten).

Wir gehen in der Planung dann davon aus, dass die zukünftigen Eingangswerte der Zielkriterien irgendwo innerhalb dieses Unsicherheitsraums liegen werden und stellen sicher, dass die resultierende Zuweisung von Land zu den Anbaualternativen für alle in diesem Raum eingeschlossenen Eingangswerte der Zielkriterien gute Lösungen erbringt. Um zusätzlich einen größeren Bereich unterschiedlich hoher Risikoabneigung, z.B. verschiedene Typen von Landnutzern, abzubilden, werden weitere Unsicherheitsräume für Vielfache der Standardabweichung berechnet, die schalenartig vom globalen Best Case Szenario ausgehend den durch Worst Case Szenarien eingeschlossenen Raum vergrößern (vgl. Abbildung 3).

Für eine definierte Risikoabneigung errechnet der Lösungsalgorithmus der robusten Optimierung nun, unter simultaner Berücksichtigung aller Kombinationen von Best Case und Worst Case Szenarien sowie aller Zielkriterien, die optimalen Prozentanteile der acht verfügbaren Landnutzungsoptionen. Dies wird für jedes Level der Risikoabneigung (Vielfache der Standardabweichung) durchgeführt.

2.4 Praxisbezogene pflanzenbauliche Restriktionen

In der praktischen Bewirtschaftung der in diesem Artikel berücksichtigten Ackerkulturen, sind je nach Kulturpflanzenart unterschiedliche Anbaupausen

Tab. 2: Maximale Flächenanteile der Landnutzungsoptionen nach AIGNER (2014). Kurzumtriebsplantagen mit Pappeln (KUP) unterliegen als mehrjährige Kultur keiner Begrenzung des maximalen Flächenanteils.

Landnutzungsoption	maximaler Flächenanteil [%]
Winterweizen	33
Wintergerste	67
Silomais	50
Körnermais	66
Winterraps	25
Kartoffeln	33
Zuckerrüben	33
KUP	100

üblich. Diese ergeben sich meist aus Gründen der Reduktion von Krankheitserregern oder Schädlingen. Bei zu häufigem Anbau hintereinander auf derselben Fläche steigt deren Vermehrung überproportional an oder bringt eine (wirtschaftlich) zu hohe Schädwirkung mit sich. Auf der Basis von in der bayerischen Landwirtschaft üblichen Werten, wie sie bei AIGNER (2014) zu finden sind (siehe Tabelle 2), haben wir diese maximalen Flächenanteile als Restriktionen in die robuste Optimierung integriert. Lediglich Kurzumtriebsplantagen können als mehrjährige Kultur (theoretisch) bis zu 100 Prozent der Anbaufläche einnehmen.

3 Ergebnisse

3.1 Landnutzungsverteilung bei gewinnorientierter Optimierung

Wie beschrieben dient als Ausgangssituation ein Szenario, bei dem der Deckungsbeitrag das alleinige Zielkriterium darstellt. Abbildung 4 stellt hierfür die Ergebnisse der Optimierung mit und ohne der Landnutzungsoption KUP gegenüber, um die (mögliche)

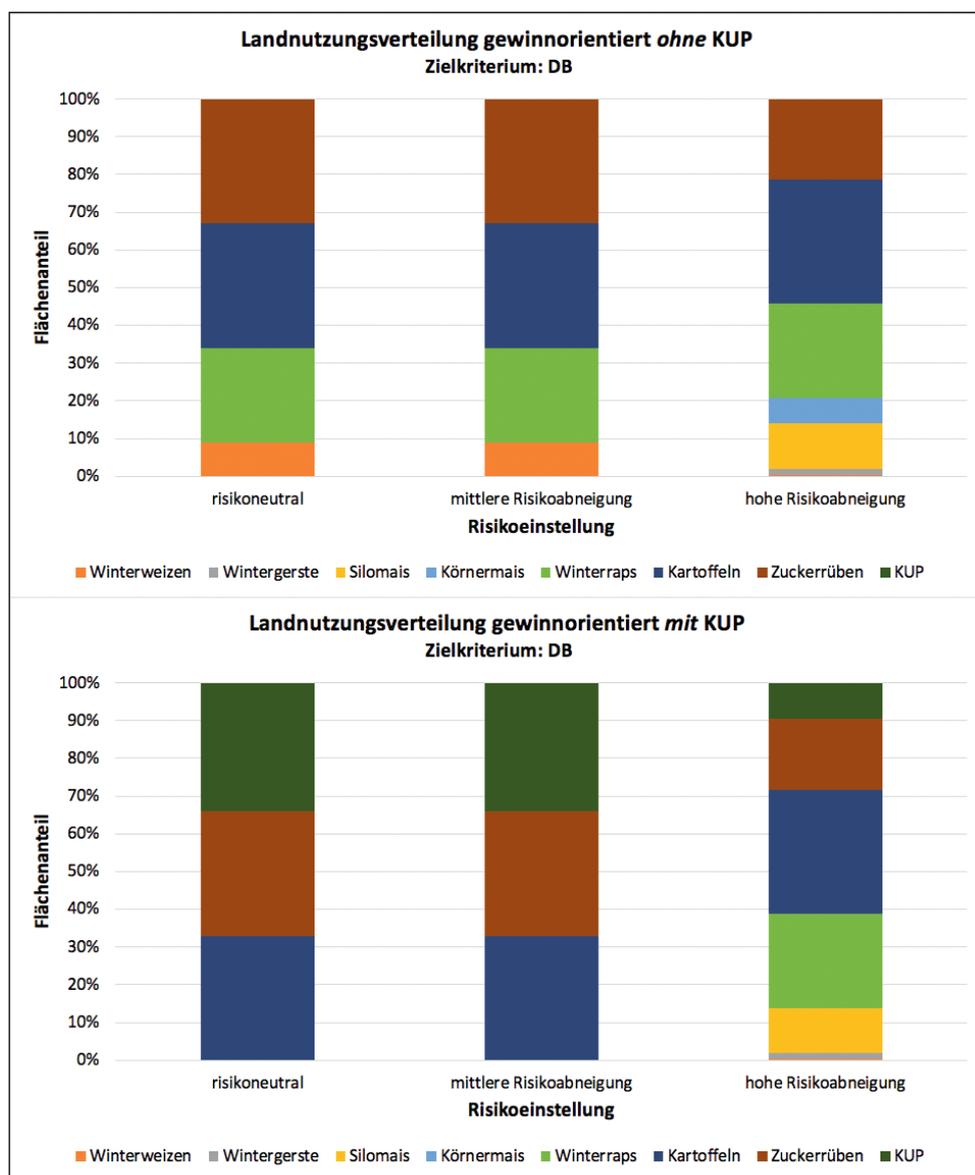


Abb. 4: Ergebnisse der gewinnorientierten Optimierung OHNE (oben) und MIT (unten) der Landnutzungsoption Kurzumtriebsplantage mit Pappeln (KUP). X-Achse: Risikoeinstellung basierend auf Vielfachen der Standardabweichung (StAbw) (risikoneutral: ohne Risiko; mittlere Risikoabneigung: 1,5-fache StAbw; hohe Risikoabneigung: 3-fache StAbw)

Rolle dieses Agroforstsystems zu verdeutlichen. Die Landnutzungsverteilung *ohne* KUP (Abbildung 4, oben) ist von hohen Anteilen an Kartoffeln, Zuckerrüben und Wintertraps geprägt. Kartoffeln und Wintertraps erhalten über alle Risikoeinstellungen den als maximal festgelegten Anteil von 33% bzw. 25% (vgl. Tabelle 2). Bei risikoneutraler Einstellung sowie mittlerer Risikoabneigung sind zudem 9% Winterweizen enthalten. Bei hoher Risikoabneigung verringert sich dessen Anteil auf 0,3%, der Anteil von Zuckerrüben sinkt auf ca. 21%. Zusätzlich sind Silomais (ca. 12%) sowie Körnermais (ca. 7%) und ein geringer Anteil an Wintergerste (1,6%) in der Landnutzung enthalten.

Bei Betrachtung der gewinnorientierten Landnutzungsverteilung *mit* KUP (Abbildung 4, unten)

sticht ins Auge, dass diese Landnutzungsform über alle Risikoeinstellungen hinweg in das Portfolio integriert wird. Die Anteile belaufen sich auf je 34% für „risikoneutral“ und „mittlere Risikoabneigung“, sowie ca. 10% bei hoher Risikoabneigung. Kartoffeln (stets 33%) und Zuckerrüben (33%; 33%; ca. 19%) nehmen nahezu identische Anteile wie im Szenario *ohne* KUP ein. Bei risikoneutraler Einstellung und mittlerer Risikoabneigung ersetzt die Option KUP gegenüber der Landnutzungsverteilung *ohne* KUP die Kulturen Winterweizen und Wintertraps vollständig. Bei hoher Risikoabneigung ist zu Gunsten von KUP kein Körnermais im Portfolio enthalten, die geringen Anteile an Winterweizen (0,3%) und Wintergerste (1,5%) sind fast identisch mit denen der Landnutzungsverteilung *ohne* KUP.

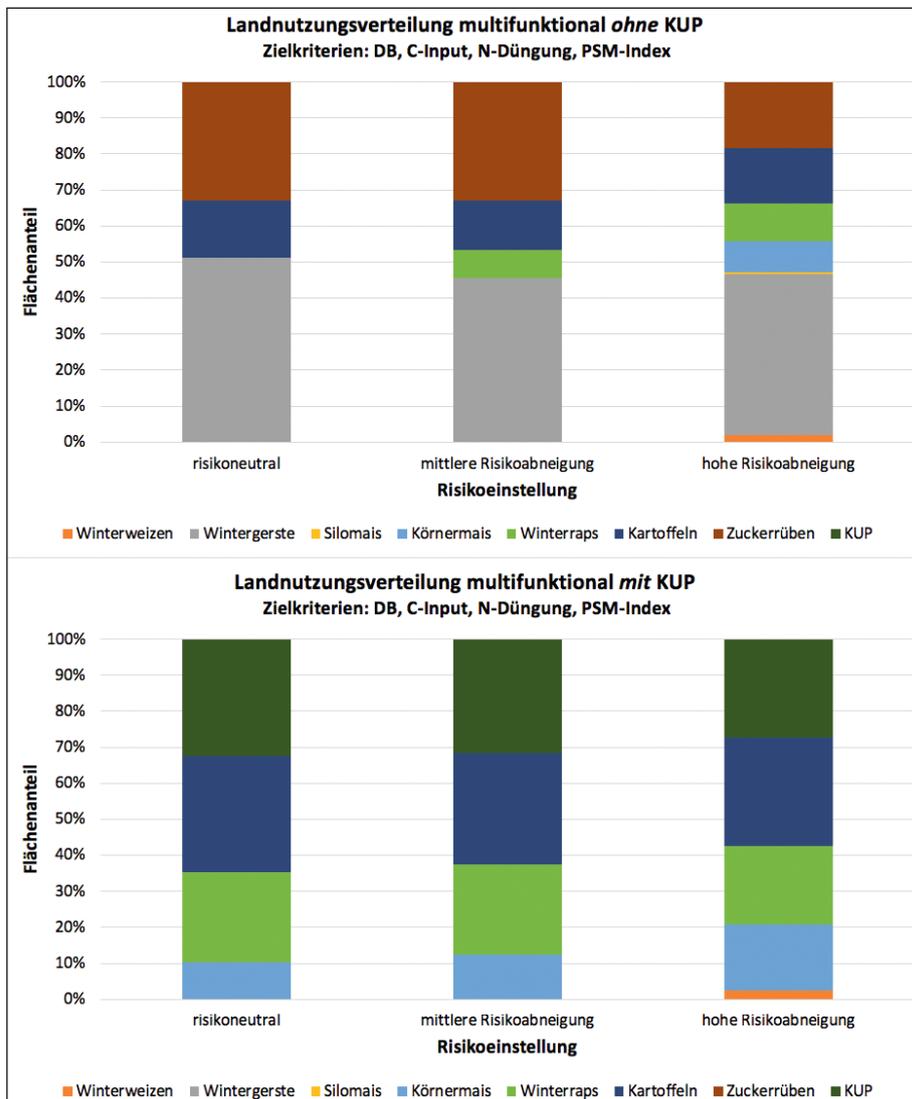


Abb. 5: Ergebnisse der multifunktionalen Optimierung OHNE (oben) und MIT (unten) der Landnutzungsoption Kurzumtriebsplantage mit Pappeln (KUP). X-Achse: Risikoeinstellung basierend auf Vielfachen der Standardabweichung (StAbw) (risikoneutral: ohne Risiko; mittlere Risikoabneigung: 1,5-fache StAbw; hohe Risikoabneigung: 3-fache StAbw)

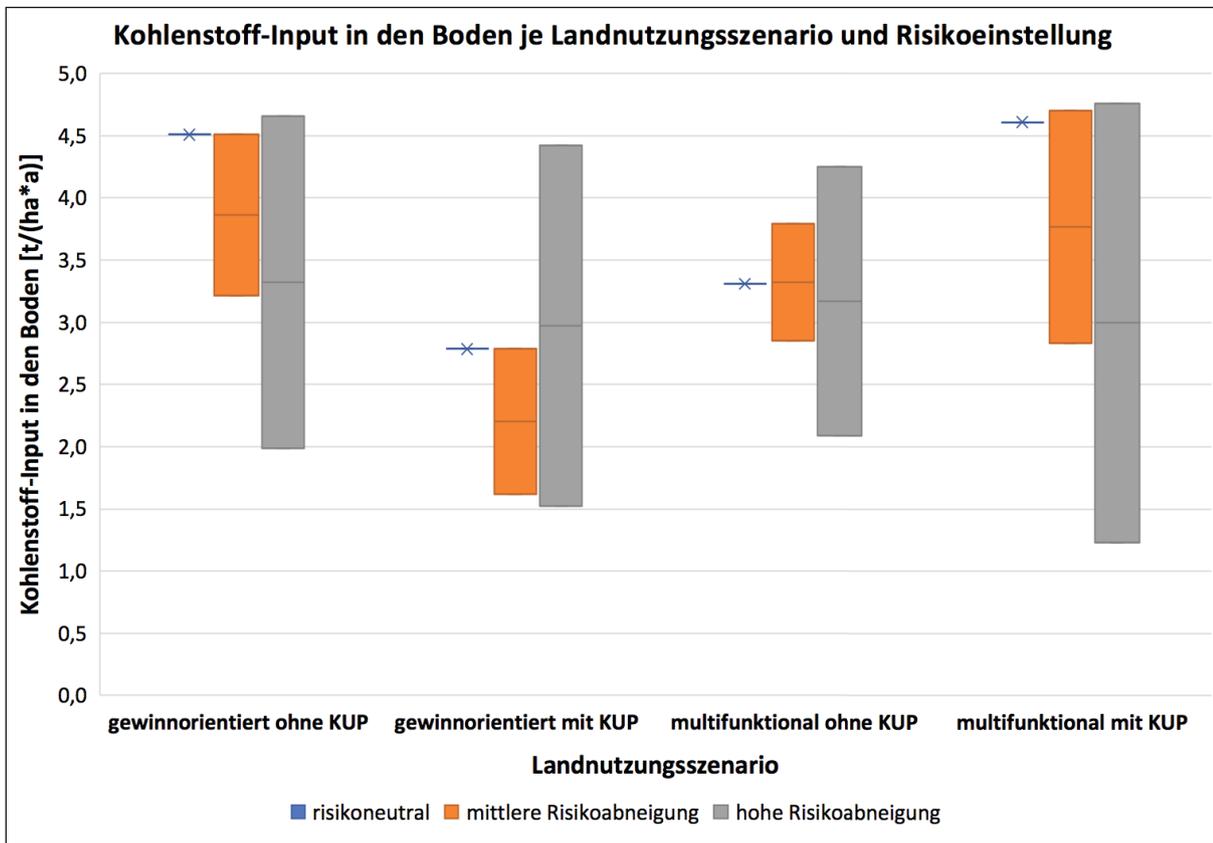


Abb. 6: Höhe des Kohlenstoff-Inputs in den Boden (mehr ist besser) unterschiedlicher Landnutzungsszenarien bei optimierter Landnutzung unter verschiedenen Risikoeinstellungen. Risikoneutral: Mittelwerte der Zielkriterien ohne Standardabweichung; Mittlere Risikoabneigung: Mittelwerte der Zielkriterien minus 1,5-fache Standardabweichung; Hohe Risikoabneigung: Mittelwerte der Zielkriterien minus 3-fache Standardabweichung.

3.2 Landnutzungsverteilung bei multifunktionaler Optimierung

Bei der multifunktionalen Optimierung haben wir gegenüber den rein gewinnorientierten Szenarien zusätzlich die beschriebenen ökologischen Zielkriterien C-Input, N-Düngung und PSM-Index berücksichtigt (vgl. 2.2). Auffallend an der optimierten Landnutzungsverteilung *ohne* KUP (Abbildung 5, oben) ist der hohe Anteil von 45% (mittlere und hohe Risikoabneigung) bis 51% (risikoneutral) Wintergerste. Diese Kulturpflanze ist in beiden rein gewinnorientierten Modellen nur im niedrigen einstelligen Prozentbereich und bei hoher Risikoabneigung vertreten, weil sie negative Deckungsbeiträge zeigt. Als weitere Kultur werden Zuckerrüben mit einem Flächenanteil von 33% berücksichtigt, für das Level der hohen Risikoabneigung sinkt der Zuckerrübenanteil auf ca. 18%. Kartoffeln als im Mittel zwar deckungsbeitragsstarke, jedoch in Bezug auf C-Input und PSM-Index unvorteilhafteste Kultur (vgl. Tabelle 1), erhalten relativ konstant ca. 15% (13,8 bis 15,7%). Mit steigender Risikoabneigung werden Winterraps

(7,6% bzw. 10,6%) und bei hoher Risikoabneigung auch Körnermais (8,8%), sowie geringe Anteile an Winterweizen (1,9%) und Silomais (0,4%) in die Landnutzungsverteilung aufgenommen.

Ein über die Risikolevel relativ konstantes Bild der Landnutzungsverteilung zeigt Abbildung 5 (unten), wenn KUP als Landnutzungsoption verfügbar ist. Kartoffeln und Winterraps erhalten durchgehend nahezu die maximal möglichen Flächenanteile und werden von ca. 10 bis 18% Körnermais ergänzt. Der Rest der Ackerfläche wird den KUP zugeordnet (ca. 27 bis 33%). Lediglich bei hoher Risikoabneigung kommt Winterweizen mit einem Anteil von ca. 2% hinzu.

3.3 Auswirkung der optimierten Landnutzungsverteilung auf ökologische Zielkriterien

Höhe des Kohlenstoff-Inputs in den Boden

Im Vergleich der vier betrachteten Landnutzungsszenarien, fallen die Unterschiede bezüglich des C-Inputs in den Boden etwas größer aus als bei der

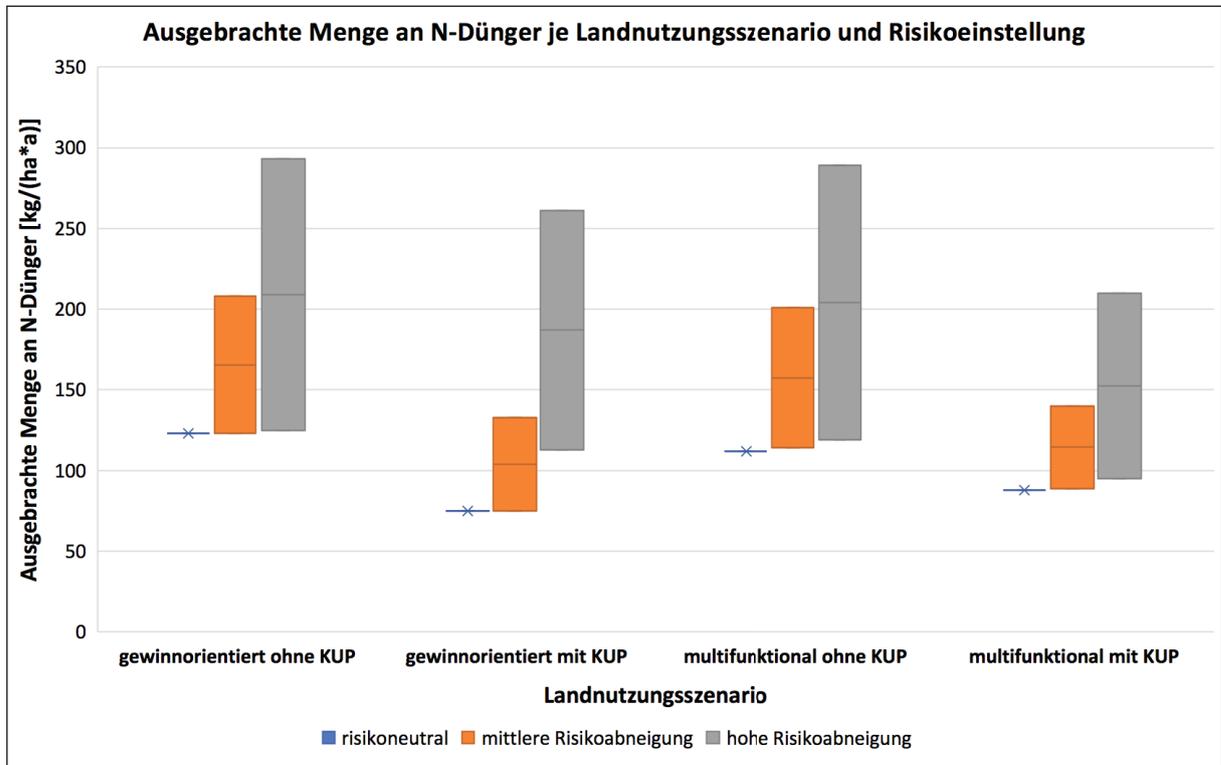


Abb. 7: Ausgebrachte Menge an N-Dünger (weniger ist besser) unterschiedlicher Landnutzungsszenarien bei optimierten Landnutzungsanteilen unter verschiedenen Risikoeinstellungen. Risikoneutral: Mittelwerte der Zielkriterien ohne Standardabweichung; Mittlere Risikoabneigung: Mittelwerte der Zielkriterien minus 1,5-fache Standardabweichung; Hohe Risikoabneigung: Mittelwerte der Zielkriterien minus 3-fache Standardabweichung.

N-Düngung. Der im besten Fall höchste C-Input in den Boden von bis zu 4,76 t pro ha und Jahr für das Gesamtportfolio, wird im multifunktionalen Szenario *mit* KUP bei hoher Risikoabneigung erreicht (vgl. Abbildung 6), jedoch auch der niedrigste Wert im Worst Case. Da insbesondere Winterraps große Mengen an Kohlenstoff bereitstellt (vgl. Tabelle 1), ergeben sich in der gewinnorientierten Landnutzung *ohne* KUP die im Best Case zweithöchsten Mengen an C-Input in den Boden von 4,66 t / (ha*a) bei im Worst Case 1,99 t / (ha*a) im Fall von hoher Risikoabneigung.

Ausgebrachte Mengen an N-Dünger

Deutlich wird, dass bereits in der rein gewinnorientierten Optimierung allein durch die Integration von KUP eine Einsparung von N-Dünger erreicht werden kann (vgl. Abbildung 7). Je nach Risikoeinstellung fällt die ausgebrachte Menge an N-Dünger im gewinnorientierten Szenario *mit* KUP um 12 bis 75 kg pro ha und Jahr geringer aus als im Szenario *ohne* KUP. Im Vergleich der beiden Szenarien *ohne* KUP (gewinnorientiert und multifunktional) werden lediglich 4 bis 11 kg pro ha und Jahr weniger unter multifunktionaler Optimierung ausgebracht.

Die geringste Menge an ausgebrachtem N-Dünger wird bei multifunktionaler Zielsetzung *mit* KUP erreicht. Gegenüber dem gewinnorientierten Basisszenario *ohne* KUP werden zwischen 30 und 83 kg pro ha und Jahr weniger Stickstoffdünger berechnet. Vergleicht man gewinnorientierte und multifunktionale Optimierung *mit* KUP, so wird im Worst Case um bis zu 15 kg mehr N-Dünger pro ha und Jahr bei multifunktionaler Zielsetzung ausgebracht, im Best Case ist die Menge jedoch um bis zu 51 kg / (ha*a) geringer.

Intensität der Pflanzenschutzmaßnahmen

(Höhe des Pflanzenschutzmittel-Behandlungsindex)

Im Vergleich der beiden gewinnorientierten Szenarien zeigt sich derselbe Effekt wie bei der Menge ausgebrachten N-Düngers. Ist KUP als Landnutzungsoption verfügbar, so sinkt der PSM-Index um 0,2 bis 3,2 Einheiten (vgl. Abbildung 8). Das multifunktionale Szenario *mit* KUP weist gegenüber dem *ohne* KUP ebenfalls geringere Werte auf (Differenz 1,5 bis 3,8 Einheiten). Demgegenüber liegt der PSM-Index des multifunktionalen Szenarios *mit* KUP um 0,2 bis 1,0 Einheiten über dem Szenario *ohne* KUP. Die Gegenüberstellung der

beiden Landnutzungsszenarien *mit* KUP zeigt je nach betrachteter Risikoeinstellung unterschiedliche Ergebnisse. Nur bei hoher Risikoabneigung wird ein um 1,1 bis 2,4 Einheiten geringerer PSM-Index erreicht, für mittlere Risikoabneigung und risikoneutrale Einstellung liegen die Werte der multifunktionalen über denen der gewinnorientierten Optimierung (0,4 bis 0,5 Einheiten).

4 Diskussion und kritische Betrachtung der Ergebnisse

4.1 Datengrundlage und Methoden

Hinsichtlich der Datengrundlage muss angemerkt werden, dass in den Berechnungen der Deckungsbeiträge und Annuitäten z.B. weder Förderprogramme noch Tierhaltung oder andere interne Verwendungswege berücksichtigt wurden, die in der Realität die Entscheidungen der Bewirtschafter mit beeinflussen. Eine Modellierung tierhaltender Betriebe oder auch gemischter Betriebe mit landwirtschaftlichen Flächen und Wald stellt eine der nächsten geplanten Herausforderungen im Forschungsprojekt BLIZ dar.

Insbesondere für die KUP ist hinsichtlich der verwendeten Eingangsdaten zu beachten, dass die berechneten Annuitäten auf lediglich vier Landkreisen basieren. Daraus ergibt sich möglicherweise eine zu optimistische Einschätzung der ökonomischen Leistungsfähigkeit, worauf Berechnungen anderer Autoren hindeuten (vgl. *LfL (a)* 2020; KROEBER 2019). Im Rahmen der Verfügbarkeit von prognostizierten Erträgen für ganz Bayern arbeiten wir derzeit an Berechnungen und Modellierungen, um die gesamte Landesfläche besser abbilden zu können. Eine weitere Einschränkung hinsichtlich des ökonomischen Zielkriteriums bei KUP stellt die Tatsache dar, dass die geringere Flexibilität der mehrjährigen Kultur, sowie der fehlende jährliche Ertrag nicht berücksichtigt wurden. Die Unsicherheit der zukünftigen Einnahmen, verbunden mit hohen Investitionskosten für KUP führt in der Praxis daher oft zum Zögern von Landwirten (vgl. FEIL/MUSSHOFF 2018). Denkbar wäre es beispielsweise ein zusätzliches Zielkriterium für finanzielle Stabilität (vgl. GOSLING et al. 2020) in die Optimierung zu integrieren.

Um zudem die Vergleichbarkeit des ökonomischen Zielkriteriums von KUP und einjährigen Ackerfrüchten zu verbessern, wären zwei Lösungsansätze denkbar. KROEBER (2019) verwendet Fruchtfolgen,

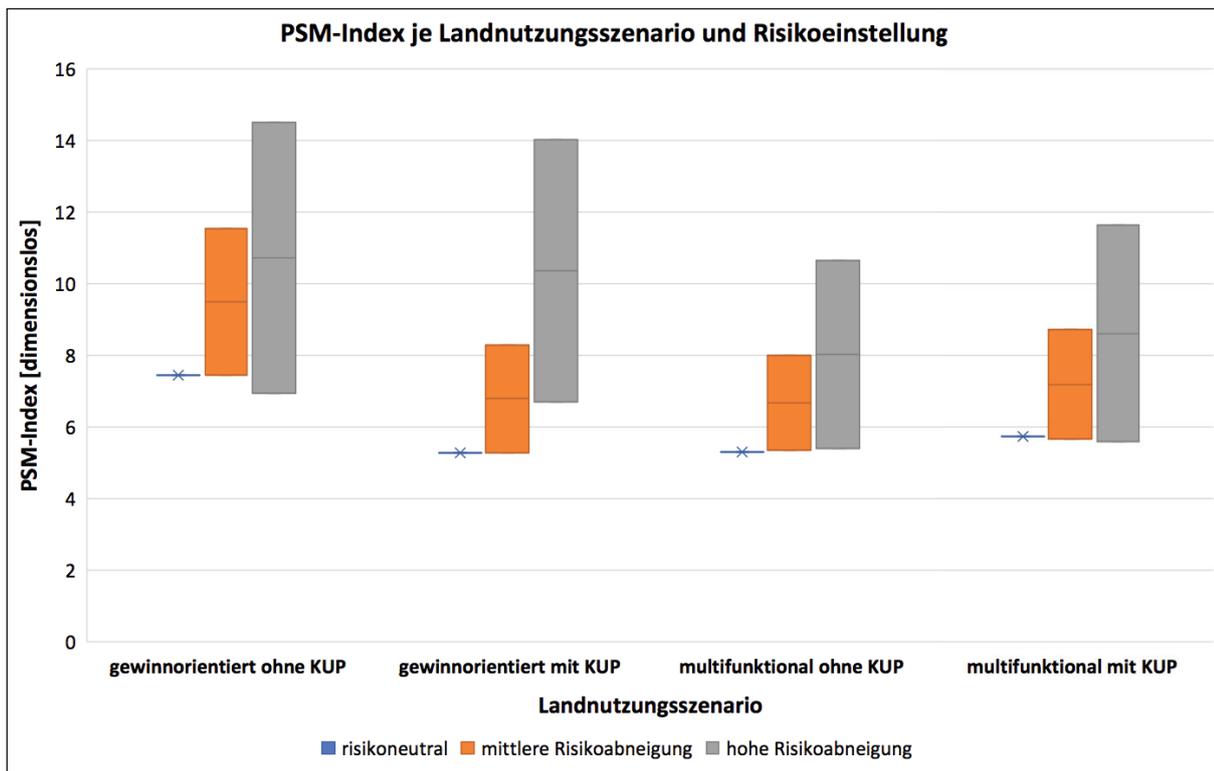


Abb. 8: Pflanzenschutzmittel-Behandlungsindex (geringer ist besser) unterschiedlicher Landnutzungsszenarien bei optimierten Landnutzungsanteilen unter verschiedenen Risikoeinstellungen. Risikoneutral: Mittelwerte der Zielkriterien ohne Standardabweichung; Mittlere Risikoabneigung: Mittelwerte der Zielkriterien minus 1,5-fache Standardabweichung; Hohe Risikoabneigung: Mittelwerte der Zielkriterien minus 3-fache Standardabweichung.

also eine definierte Abfolge einjähriger Ackerfrüchte über mehrere Jahre, wie sie in der landwirtschaftlichen Praxis üblich sind. Mittels eines so aufgestellten Plans über die Planungsdauer einer KUP könnte für verschiedene Zusammensetzungen der Fruchtfolgen jeweils Berechnungen über denselben Betrachtungszeitraum angestellt werden. Zudem käme man dadurch der praktischen Umsetzbarkeit der berechneten Landnutzungsverteilung einen Schritt näher.

Alternativ wäre es denkbar, beispielsweise über Monte-Carlo-Simulationen, Annuitäten aus den bestehenden Daten der einzelnen Landnutzungsoptionen zu berechnen. Dabei würde ebenfalls die Lebensdauer einer KUP als Betrachtungszeitraum verwendet, in dem die jährlichen Deckungsbeiträge der Ackerfrüchte jährliche Zahlungsströme darstellen. Diesen Lösungsansatz planen wir als nächsten Schritt im Projekt BLIZ.

Ein allgemeiner Vorteil der hier verwendeten Optimierungsmethode mit normierten Zielkriterien liegt darin, dass beliebige (weitere) Zielkriterien integriert werden können. Voraussetzung hierfür ist die Verfügbarkeit einer entsprechenden Datengrundlage, um die benötigten Mittelwerte und Standardabweichungen berechnen zu können. Neben den hier enthaltenen ökonomischen und ökologischen Zielkriterien ist es beispielsweise auch möglich Management-Komplexität, Arbeitskraftbedarf oder Präferenzen aus Befragungen (vgl. GOSLING et al. 2020), sowie Artenreichtum oder andere Kennzahlen für Biodiversität (vgl. KNOKE et al. 2020) zu berücksichtigen. So kann das Modell an bestimmte Fragestellungen angepasst werden. Auch eine Gewichtung oder Rangfolge der Zielkriterien wäre möglich.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Generell können wir anhand der Ergebnisse zeigen, dass die Verfügbarkeit von KUP, die Risikoeinstellung von Landnutzern und die Berücksichtigung verschiedener Zielkriterien die Anteile der gewählten Landnutzungsoptionen beeinflusst. Betrachtet man die errechneten Landnutzungsanteile allgemein, können zwei grundsätzliche Effekte beobachtet werden. Zum einen handelt es sich innerhalb eines Szenarios stets bei hoher Risikoabneigung um das diverseste Portfolio mit der größten Anzahl unterschiedlicher Landnutzungsoptionen. Hervorgerufen wird dies durch das Prinzip der Risikominimierung durch Streuung, eine Grundannahme der Portfoliotheorie (vgl. MARKOWITZ 1952). Weiter ist zu beobachten, dass die Landnutzungsanteile der einzelnen Optionen über die Risikoeinstellungen hinweg bei multifunktionaler Optimierung etwas weniger schwanken als bei rein ökonomischer

Optimierung. Dieser Effekt wird durch die vielseitigen Anforderungen der multifunktionalen Optimierung hervorgerufen (vgl. KNOKE et al. 2016). Wie die Werte der Zielkriterien in Tabelle 1 zeigen, erfüllt keine der Kulturen allein alle Anforderungen bestmöglich. Durch diese unterschiedliche Performance tritt der Einfluss der verschiedenen Risikoeinstellungen bei der Berücksichtigung mehrerer Zielkriterien in den Hintergrund.

Die Rolle der KUP kann dahingehend beschrieben werden, dass die Landnutzungsverteilung *ohne* KUP jeweils weniger vielseitig ist als im entsprechenden Szenario *mit* KUP (vgl. Abbildungen 4 und 5). Zudem ist KUP in den Szenarien *mit* KUP über alle Risikoeinstellungen hinweg vertreten. Bei hoher Risikoabneigung sind die Anteile von KUP bei gewinnorientierter Optimierung (9,5%) deutlich geringer als bei multifunktionaler Optimierung (27,2%), was insbesondere die ökologische Vorteilhaftigkeit von KUP unterstreicht (vgl. auch HAUKE et al. 2017; FEIL / MUSSHOF 2020).

Hinsichtlich der ökologischen Zielkriterien unterscheidet sich der Einfluss der KUP bei gewinnorientierter oder multifunktionaler Optimierung je nach betrachtetem Zielkriterium und entsprechend der Risikoeinstellung. Für die ausgebrachte Menge an N-Dünger und den PSM-Index lässt sich ein ökologisch positiver Mitnahmeeffekt für die gewinnorientierten Szenarien beobachten, da durch den Anteil an KUP (keine N-Düngung und keine Pflanzenschutzbehandlung, vgl. Tabelle 1) jeweils eine geringere Menge an N-Dünger ausgebracht wird. Für den C-Input ist jedoch eine gegenteilige Wirkung zu beobachten: die Werte im Szenario *mit* KUP fallen um 5% bis 50% geringer aus als *ohne* KUP. Da sich bereits die zur Berechnung verwendeten Werte des C-Inputs (vgl. Tabelle 1) deutlicher zwischen den Landnutzungsoptionen unterscheiden, wirken sich Änderungen der Landnutzungsanteile stärker auf das Gesamtergebnis aus.

Die getroffenen Annahmen zu den ökologischen Zielkriterien N-Düngung und PSM-Index der KUP können jedoch hinterfragt werden. In Praxisberichten und Anbauempfehlungen finden sich beispielsweise Hinweise zur chemischen Unkrautbekämpfung vor / kurz nach der Pflanzung (vgl. GEHRING / FESTNER / THYSSEN 2014; *LfL(d) / Institut für Pflanzenschutz, Herbolgie 2012*). Für die Höhe des C-Inputs habe wir, im Gegensatz zu den einjährigen Ackerkulturen, gemessene Werte verwendet (vgl. BERTHONGARAY et al. 2016) und keine ertragsbasierte Berechnung vorgenommen. Insbesondere um Aussagen über regionale Unterschiede abbilden zu können oder den Einfluss des Standorts einbeziehen zu können, wäre eine variable Ermittlung über Formeln, sobald verfügbar, vorteilhaft.

5 Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich zunächst festhalten, dass die Berechnungen für unterschiedliche Level von Risiko zu mitunter deutlich verschiedenen Landnutzungsverteilungen führen. Dadurch wird deutlich, dass die Risikoeinstellung eines Bewirtschafters eine wichtige Komponente bei der Entscheidungsfindung darstellt. Die Gegenüberstellung der verschiedenen Szenarien ermöglicht es dabei, die Auswirkungen der Entscheidungen abzuschätzen.

Die in diesem Artikel berechneten Ergebnisse können insbesondere als Tendenzen gewertet werden. Wir können jedoch zeigen, dass die verwendete Methode geeignet ist, um zusätzliche Informationen für Landnutzer bereitzustellen. Werden regionale oder betriebsspezifische Eingangsdaten verwendet, kann das Modell eine wichtige Unterstützung als Entscheidungshilfe leisten.

Sowohl bei rein gewinnorientierter Zielsetzung als auch unter Beachtung von mehreren Zielkriterien, errechnet die Optimierung nennenswerte Landnutzungsanteile für Kurzumtriebsplantagen mit Pappelhybriden, wenn diese als Bewirtschaftungsoption zur Verfügung stehen. Unter den gegebenen Modellbedingungen lässt sich daher ein hohes Potenzial für KUP in bayerischen Ackerbaubetrieben ableiten. Wenn, wie nach unserer Annahme, kein Stickstoffdünger und keine Pflanzenschutzmittel aufgewendet werden müssen, punkten KUP besonders hinsichtlich dieser ökologischen Zielkriterien. Zusätzlich liegen die Deckungsbeiträge auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Dadurch entstehen auch ohne multifunktionale Zielsetzung, also bei rein gewinnorientierter Optimierung, durch die Landnutzungsoption KUP ökologische Vorteile im Hinblick auf das gesamte Landnutzungsportfolio. Dass die Landnutzungsanteile von KUP bei multifunktionaler Optimierung höher liegen, unterstreicht die ökologische Vorteilhaftigkeit zusätzlich.

Danksagung

Gedankt sei zunächst dem Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst für die Förderung des Forschungsprojekts *Blick in die Zukunft (BLIZ)* im Bayerischen Klimaforschungsnetzwerk bayklif. Link zum Projekt BLIZ: <https://www.bayklif.de/verbundprojekte/bliz>

Weiter gilt unser Dank unseren Kollegen der Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung für den intensiven Austausch und viele Ideen und Hinweise im Laufe der Arbeiten an diesem Projekt. Abschließend

bedanken wir uns herzlich bei unseren Kollegen aus dem Projekt BLIZ, insbesondere bei Prof. Dr. Perdita Pohle und ihrem Team für die Organisation der FGG-Vortragsreihe, sowie Prof. Dr. Anja Rammig und Mona Reiss für die Koordination des Projekts.

Literatur

- AIGNER, Alois. 2014: Fruchtfolgestaltung. In: Landwirtschaftlicher Pflanzenbau. BLV Buchverlag, München.
- BEN-TAL, A.; EL GHAOUL, L.; NEMIROVSKIĬ, A. S. 2009: Robust optimization. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- BERHONGARAY, G. et al. 2016: Soil carbon and belowground carbon balance of a short-rotation coppice: assessments from three different approaches. In: *GCB Bioenergy* 9: 299–313; doi: 10.1111 / gcbb.12369.
- Destatis – Statistisches Bundesamt (Destatis). Stand 2020: Erzeugerpreisindizes landwirtschaftlicher Produkte pro Jahr in Deutschland (04.03.2020).
- ESTRELLA, R., CATTRYSSÉ, D., VAN ORSHOVEN, J. 2014: Comparison of Three Ideal Point-Based Multi-Criteria Decision Methods for Afforestation Planning. In: *Forests* 5/12: 3222–3240. DOI: 10.3390/f5123222.
- FEIL, J.-H.; MUSSHOFF, O. 2018: Modelling investments in short rotation coppice under uncertainty: A value chain perspective. In: *Biomass and Bioenergy* 108: 224–235.
- GEHRING, K., FESTNER, T., THYSSEN, S. 2014: Chemische Unkrautkontrolle bei der Anpflanzung von Kurzumtriebsplantagen mit Pappeln (*Populus*) und Weiden (*Salix*). Tagungsband 26. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung. Julius-Kühn-Archiv, Braunschweig (443): 635–644.
- GOSLING, E. et al. 2020: A goal programming approach to evaluate agroforestry systems in Eastern Panama. In: *Journal of Environmental Management* 261/110248.
- HAUK, S. 2016: Analyse und ökonomische Optimierung von Kurzumtriebsplantagen (Dissertation), Technische Universität München.
- HAUK, S. et al. 2017: Ecological diversification is risk reducing and economically profitable – The case of biomass production with short rotation woody crops in south German land-use portfolios. In: *Biomass and Bioenergy* 98: 142–152.
- KNOKE, T. et al. 2015: Optimizing agricultural land-use portfolios with scarce data – A non-stochastic model. In: *Ecological Economics* 120: 250–259.
- KNOKE, T. et al. 2016: Compositional diversity of rehabilitated tropical lands supports multiple ecosystem services and buffers uncertainties. In: *Nature Communications* 7:11877 doi: 10.1038/ncomms11877 (2016).
- KNOKE, T.; KIENLEIN, S. 2020: Multifunktionale und robuste forstliche Optimierung. In: *AFZ-Der Wald* 14: 12–15.
- KNOKE, T. et al. 2020: Accounting for multiple ecosystem services in a simulation of land-use decisions: Does it reduce tropical deforestation? In: *Global Change Biology* 18/26: 2403–2420.
- KROEBER, M. 2019: Kurzumtriebsplantagen auf Ackerland – ökonomische Bewertung einer Anbauoption mit ökologischen Vorteilen am Beispiel des Freistaats Sachsen (Dissertation), Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- LfL(a) – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)*: Variable Kosten aus dem Deckungsbeitragsrechner. Online: <https://www.stmelf.bayern.de/idb/default.html>, (04.03.2020).

- LfL(b) – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Agrarökologie*. 2019: Düngebedarfsermittlung für Acker und Grünland gültig 2020 nach DüV (Excel-Programm), (12.03.2020).
- LfL(c) – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL): Nmin-Gehalte Ackerkulturen 2020* Online: <https://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/027122/index.php>, (12.03.2020)
- LfL(d) – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Pflanzenschutz, Herbolgie*. 2012: Versuchsergebnisse aus Bayern 2012 – Unkrautbekämpfung in Ackerbau und Grünland, Unkrautkontrolle in Energieholzanlagen, S. 190-197. Online: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ips/dateien/zentralbericht_lfl_ips3b_12.pdf (29.10.2020).
- LfStat – Bayerisches Landesamt für Statistik (LfStat)*. 2020: Durchschnittliche Hektarerträge pro Jahr und Kultur, Fürth. (04.03.2020).
- MARKOWITZ, H. 1952: Portfolio selection. In: *Journal of Finance* 7: 77–91.
- ROSSBERG, D. 2016: Erhebungen zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln im Ackerbau. In: *Journal für Kulturpflanzen* 68/2: 25–37, ISSN 1867-0911, DOI: 10.5073/JFK.2016.02.01 Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart.
- ROSSBERG, D.; AECKERLE, N.; STOCKFISCH, N. 2017: Erhebungen zur Anwendung von chemischen Pflanzenschutzmitteln in Zuckerrüben. *Gesunde Pflanzen* DOI 10.1007/s10343-017-0389-5.
- WIESMEIER, M. et al. 2014: Estimation of past and recent carbon input by crops into agricultural soils of southeast Germany. In: *European Journal of Agronomy* 61: 10–23.

Abstract: Multifunctionality in land-use planning. Potential of short rotation coppices for Bavarian cropping farms

Beside the goal of economic efficiency, agricultural businesses are facing various challenges concerning production and management. Several regulations, thresholds and requirements must be accounted for, in addition to inter-year variations in weather conditions and long-term climate change. Land users are confronted with multiple objectives when choosing land-use options if they also consider the demands of stakeholders and the broad population. For this article, we computed optimal land-use portfolios for an average agricultural farm in Bavaria, using four normalized criteria (contribution margin; carbon input into the soil; amount of nitrogen fertilizer; plant protection product index). In addition to the common annual crops (winter wheat, winter barley, silage maize, grain maize, winter canola, sugar beet, potatoes), we analysed the potential of short rotation coppices (SRC) with poplar hybrids when comparing profit-oriented and multifunctional scenarios. We considered different preferences of land users, applying the robust optimization method for three levels of risk aversion.

Whereas a profit-orientated objective leads to 10–34 % share of SRC in the optimal portfolio, the share under multifunctional conditions is more constant, comprising 27–33 % over the different levels of risk aversion. We found that the multi-functional scenario with SRC had the highest potential to reduce nitrogen fertilizer and increase carbon input into the soil compared to the profit-orientated scenario without SRC. The high potential of SRC for agricultural farms in Bavaria is emphasised by our finding that including this land-use option could lower the amount of N-fertilizer and plant protection products even under profit-orientated conditions only. Especially when considering ecological and multifunctional aspects, SRC be an enrichment for agricultural farms in Bavaria.

Keywords: climate change, land use, robust optimization, agroforestry, short rotation coppice (SRC), multifunctionality, ecosystem services

Autoren: Sebastian Rössert, sebastian.roessert@tum.de, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München; Prof. Dr. Thomas Knoke, knoke@tum.de, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München.