



Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung

Analyse und ökonomische Optimierung von Kurzumtriebsplantagen

Christoph Sebastian Hauk

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. St. Pauleit

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. Th. F. Knoke
2. Prof. Dr. St. Wittkopf
(Hochschule Weihenstephan-Triesdorf)
3. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. G. Becker
(Albert-Ludwigs-Universität Freiburg)

Die Dissertation wurde am 31.08.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 30.05.2016 angenommen.

Zusammenfassung

Trotz der hohen Nachfrage nach holziger Biomasse und den positiven externen Effekten, die mit der Holzproduktion durch Kurzumtriebsplantagen (KUP) einhergehen, sind KUP in Europa und Deutschland im Speziellen nur in geringem Ausmaß verbreitet. Als Hauptgründe für oder gegen den Anbau von KUP gelten ökonomische Faktoren. Dabei stellen mangelnde oder unklare ökonomische Konkurrenzfähigkeit die Haupthemmnisse für den Anbau von KUP dar. Es fehlen jedoch bislang verlässliche Entscheidungsgrundlagen, da ökonomische Analysen zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Dies liegt einerseits an der geringen Datengrundlage zu KUP und der Variabilität der unterstellten Kalkulationsgrundlage und andererseits an der Wahl der Alternativinvestitionen. Auf landwirtschaftlichen Flächen kommen meist mehrere Alternativinvestitionen in Frage, nämlich verschiedene Kulturarten. Darüber hinaus sind sowohl KUP als auch alternative landwirtschaftliche Kulturen mit Markt- und biophysikalischen Risiken behaftet, was zu Diskontinuität der finanziellen Rückflüsse führt. Trotz ihrer Bedeutsamkeit wurden die ökonomischen Risiken von KUP bisher nur unzureichend untersucht. Im Übrigen basieren ökonomische Analysen von KUP bislang auf dem Vergleich von sich gegenseitig ausschließenden Investitionsalternativen, anstatt KUP – realitätsnäher – als Portfoliobestandteil landwirtschaftlicher Betriebe zu betrachten. Wenngleich bekannt ist, dass sich durch geeignete Kulturartenmischung ökonomische Risiken reduzieren lassen oder die Wirtschaftlichkeit auf der Betriebsebene gesteigert werden kann, fehlen Studien, die die ökonomischen Effekte untersuchen, welche durch Ergänzung landwirtschaftlicher Portfolios durch KUP entstehen.

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit war es daher, die Wirtschaftlichkeit von KUP – unter Berücksichtigung von ökonomischen Risiken – im Vergleich zu alternativen landwirtschaftlichen Kulturen zu analysieren sowie die ökonomischen Effekte zu quantifizieren, welche sich durch Integration von KUP in landwirtschaftliche Portfolios ergeben. Hierzu wurde ein breiter Forschungsansatz gewählt, um zu einer verbesserten und realitätsnäheren ökonomischen Analyse von KUP beizutragen. Gleichzeitig wurde die Datengrundlage zu KUP erhöht, indem selbst Daten zur Bewirtschaftung und erzielbaren Biomasseerträgen in der Untersuchungsregion erhoben und analysiert wurden. Diese Daten und Informationen wurden bei der ökonomischen Analyse berücksichtigt. Als Untersuchungsregion wurde der Freistaat Bayern definiert.

Um zu einer Weiterentwicklung der ökonomischen Analyse von KUP beizutragen, wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt. Hierbei konnten die verwendeten methodischen Ansätze zur ökonomischen Analyse verglichen und sowohl geeignete als auch ungeeignete identifiziert werden. Obwohl der Anbau von KUP mit ökonomischen Risiken

verbunden ist, wurden diese in nur drei der 37 untersuchten Studien berücksichtigt. Die Verwendung von Methoden, welche ökonomische Risiken berücksichtigen, ist allerdings zu empfehlen, da sie ein umfassenderes Bild der Wirtschaftlichkeit von KUP zeichnen. Bislang wurden dabei jedoch ökonomische Effekte, die sich durch geeignete Mischung unterschiedlicher Kulturen – inklusive KUP – ergeben, vernachlässigt; diese Wissenslücke sollte in der vorliegenden Arbeit geschlossen werden. Im Zuge der Literaturrecherche konnten außerdem unterschiedliche Prozessketten mit typischen Systemgrenzen und Arbeitsschritten identifiziert werden. Eine Gruppierung der Studien entsprechend der Prozessketten erhöhte die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, weshalb eine deutliche Beschreibung der betrachteten Prozessschritte auch für zukünftige Studien empfohlen wird. Des Weiteren wurden diejenigen Arbeitsschritte und Kostenträger identifiziert, bei denen die relativ höchsten Kosten anfallen und die deshalb in ökonomischen Analysen besonders sorgfältig betrachtet werden sollten. Dies waren: Pachtkosten, Kosten für Ernte und Hacken sowie Etablierungskosten. Den stärksten Einfluss auf das Ergebnis der ökonomischen Analyse hatten jedoch die Erlöse für holzige Biomasse. Während Erzeugerpreise vergleichsweise einfach aus Statistiken abgeleitet werden können und meist überregionale Gültigkeit haben, sind Biomasseerträge stark von den standörtlichen Gegebenheiten, der verwendeten Baumart und Sorte sowie der Bewirtschaftung abhängig. Dies spiegelte sich auch in der hohen Variabilität der unterstellten Biomasseerträge wider. Die Wahl angemessener Biomasseerträge erwies sich somit für die ökonomische Analyse als besonders bedeutungsvoll und stellt in Anbetracht der vergleichsweise geringen Datengrundlage eine Herausforderung dar.

Die bisher verfügbaren Biomasseertragsdaten stammen weitestgehend von Versuchsflächen. Es ist bislang jedoch nicht ausreichend geklärt, ob Biomasseerträge von Versuchsflächen im praktischen Betrieb tatsächlich erreichbar sind. Daher wurden in dieser Arbeit Biomasseerträge der ersten Rotation von 30 kommerziell betriebenen KUP erhoben. Dazu wurden bestandesspezifische allometrische Biomassefunktionen erstellt. Während dreijährige KUP mittlere Trockenmassezuwächse (absolut trockene Holzmasse) von $3,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ aufwiesen, erreichten fünf- bis zehnjährige Bestände bereits $8,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Insgesamt waren die Erträge sehr variabel. Die Erträge der fünf- bis zehnjährigen Bestände lagen sogar über den Erträgen bayerischer Versuchsflächen vergleichbaren Alters. Die gängige Meinung, wonach in der Praxis nur geringere Erträge als auf Versuchsflächen erzielt werden können, konnte für die untersuchten Bestände nicht durchgehend bestätigt werden. Vor allem wenn die in der Literatur beschriebenen Ertragssteigerungen der Folgerotationen berücksichtigt werden, sind Biomasseerträge wahrscheinlich, welche über den Literaturangaben für Mitteleuropa liegen. Die Ergebnisse verdeutlichten, wie wichtig die Analyse von kommerziell betriebenen KUP ist und wei-

sen aufgrund der hohen Ertragsvariabilität auf die Notwendigkeit hin, die biophysikalische Variabilität der Erträge in ökonomischen Studien zu berücksichtigen.

Um zu gewährleisten, dass die ökonomische Analyse die realen Bewirtschaftungsbedingungen in Bayern widerspiegelt, wurde weiterhin eine schriftliche Befragung von KUP-Betreibern durchgeführt, bei der Informationen zur Bewirtschaftungspraxis gesammelt und übergreifend ausgewertet wurden. So konnte eine typische Prozesskette inklusive relevanter Arbeitsschritte der KUP-Bewirtschaftung für Bayern identifiziert und der ökonomischen Analyse zugrunde gelegt werden. Diese Untersuchung lieferte sowohl für die Wissenschaft als auch für politische Entscheidungsträger in Deutschland neue Informationen über die in der Praxis stattfindende Adoption dieser neuartigen Landnutzung.

Die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitsschritte wurden schließlich in der ökonomischen Analyse von KUP berücksichtigt. Die Analyse der ökonomischen Konkurrenzfähigkeit von KUP erfolgte für vier Modellregionen Bayerns. Dazu wurden die Deckungsbeiträge (DB) der flächenmäßig bedeutendsten alternativen landwirtschaftlichen Kulturen im Zeitraum 2004-2013 berechnet. Um die Vergleichbarkeit mit einjährigen landwirtschaftlichen Kulturen zu gewährleisten, wurden für KUP – unter Berücksichtigung regionaler Ertragsniveaus – Deckungsbeitragsäquivalente¹ kalkuliert. Anhand der DB des Zeitraums 2004-2013 wurden das ökonomische Risiko der KUP und der landwirtschaftlichen Kulturen sowie die Korrelationen der DB von KUP mit denjenigen der landwirtschaftlichen Kulturen abgeleitet. Hierbei konnten positive ökonomische Aspekte von KUP identifiziert werden. KUP war in allen Regionen die Kultur mit dem geringsten ökonomischen Risiko. Gleichzeitig erreichten KUP DB, welche zwar geringer als die der beiden Hackfrüchte Zuckerrübe und Kartoffel, jedoch höher als die der meisten Getreidearten waren. Im Gegensatz zu den landwirtschaftlichen Kulturen blieben mit KUP negative DB aus. In sehr günstigen Jahren wurden mit Getreidearten hohe DB erzielt, welche über denen der KUP lagen. Es traten aber auch Jahre auf, in denen die Wirtschaftlichkeit von allen Getreidearten geringer war als bei KUP. Dieses Ergebnis lieferte erste Hinweise dafür, dass KUP eine stabilisierende Wirkung auf das Betriebsergebnis landwirtschaftlicher Betriebe haben könnte.

Um dies zu prüfen, wurde die Portfolio-Theorie angewandt. Anstelle des bislang üblichen Vergleichs von sich gegenseitig ausschließenden Landnutzungsmöglichkeiten – eine Betrachtung auf Hektar-Ebene – wurden hierbei KUP als mögliche Ergänzung landwirtschaftlicher Portfolios betrachtet und die durch Mischung entstehenden Effekte auf Betriebsebene modelliert, quantifiziert und identifiziert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass

¹ Zur Verbesserung des Textflusses wird folgend der Begriff „Deckungsbeitrag“ beziehungsweise „DB“ für alle Kulturen verwendet. Für KUP bezieht sich dieser auf das Deckungsbeitragsäquivalent.

durch den Anbau von KUP positive ökonomische Effekte – Diversifizierungseffekte – auftreten, wodurch sich auf Betriebsebene gleich hohe Deckungsbeiträge bei geringerem Risiko oder bei gleichem Risiko höhere Deckungsbeiträge erzielen ließen. Der KUP-Anbau, zusätzlich zu konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen, stellt somit für landwirtschaftliche Betriebe eine effektive Risikomanagement-Strategie dar. Die betriebswirtschaftlich optimalen KUP-Flächenanteile sind dabei abhängig vom Grad der Risikoaversion des Entscheidungsträgers.

Anhand der erzielten Ergebnisse wurden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

Aufgrund der hohen Biomasseerträge der untersuchten Praxisflächen können pauschale Aussagen zu Mindererträgen auf KUP-Praxisflächen abgelehnt werden. Vielmehr wird für zukünftige Studien empfohlen, eine Analyse der Biomasseerträge von Praxisflächen und ihre Entwicklung über mehrere Rotationen sowie eine Analyse der Ertragsvariabilität unter Beachtung der Standortseigenschaften vorzunehmen. Die hohen Biomasseerträge der untersuchten Bestände liefern außerdem weitere Hinweise für die Möglichkeit der flächeneffizienten Biomasseproduktion durch KUP, da sie vorwiegend auf landwirtschaftlich ungünstigen Standorten mit jedoch guter Wasserversorgung erzielt wurden. Auch über wachstumskundliche Aspekte hinaus, stellt die Analyse von kommerziell betriebenen KUP eine kostengünstige Art der Informationsgewinnung und eine gute Ergänzung der bisherigen Forschung auf Versuchsflächen dar. Für politische Entscheidungsträger bieten Informationen zur Adoption von KUP und Implementierung des KUP-Anbaus in der Praxis die Möglichkeit, die politischen Rahmenbedingungen für eine Ausweitung des KUP-Anbaus zu schaffen. Durch die betriebswirtschaftliche Analyse von KUP und ausgewählten landwirtschaftlichen Kulturen, unter Berücksichtigung von Ertrags- und Preisvariabilität, konnte gezeigt werden, dass die Wirtschaftlichkeit sowie die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von KUP bisher häufig unterschätzt und die ökonomischen Risiken überschätzt werden. Die Ergebnisse der Portfoliooptimierung lieferten zudem eine neuartige und umfassendere Antwort auf die Frage nach der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit von KUP. Daher sollte die ökonomische Bewertung auf Betriebsebene unter Berücksichtigung des Risikos in zukünftigen Studien weiterverfolgt werden. Außerdem konnte KUP-Interessierten eine Grundlage zur Entscheidung unter Unsicherheit bereitgestellt und Landwirten eine effektive Risikomanagement-Strategie aufgezeigt werden. Somit wurden wichtige Voraussetzungen für die Adoption von KUP geschaffen. Aufgrund der nachgewiesenen positiven ökonomischen Effekte des KUP-Anbaus bei gleichzeitig positiven externen Effekten, ist es politischen Entscheidungsträgern durch Multiplikation der Forschungsergebnisse möglich, die regionale Biomasseproduktion zu fördern und gleichzeitig eine Extensivierung und ökologische Aufwertung von intensiv bewirtschafteten Regionen zu erreichen.

Abstract

Short rotation woody crops (SRWC) – fast-growing tree species cultivated on agricultural land – are not widespread throughout Europe and Germany, despite the high demand for woody biomass and the fact that SRWC cultivation can provide several positive environmental impacts not available from annual energy crops. The main reason behind farmers' reluctance to adopt SRWC is that they perceive it to be highly uncertain economically and, in general, not to be competitive with common alternatives – namely, conventional agricultural crops. In fact, though, economic investigations of SRWC have drawn conflicting conclusions, and thus, do not actually provide clear and reliable decision support for land-use decision makers. The variation among the outcomes of these economic evaluations is mainly due to the relative unavailability of data for SRWC, which has led to the use of very different underlying assumptions with regard to the main factors that influence the economic performance of SRWC. Another reason for the conflicting conclusions with regard to the economic competitiveness of SRWC is that different studies have compared it to different alternative investments, with different economic yields. Additionally, on agricultural land, potential alternatives to SRWC can include a broad range of conventional crops for which the price and yield assumptions can also vary depending on spatial and temporal considerations. The price and yield variability of both SRWC and conventional crops leads to discontinuity in cash flows and thus, in economic risk. However, the economic risk of SRWC compared to that of conventional crops has been insufficiently analyzed and integrated in economic evaluations. Thus, one of the main barriers to adoption has yet to be addressed. Another shortcoming of previous economic evaluations of SRWC is that they are based on mutually exclusive comparisons of land-use options instead of a more realistic approach that treats SRWC as asset in the portfolios of assets of agricultural enterprises. Although it is known that producing a mixture of crops can provide both positive ecological and economic benefits to agricultural enterprises, economic studies that analyze the economic effects of such diversification through SRWC are still lacking. This gap of knowledge was filled in the study at hand.

Hence, the overarching objectives of this study were a) to evaluate the economic competitiveness of SRWC with conventional agricultural crops in a way that considers both price and yield variability (representing risk), and b) to quantify the economic effects on agricultural enterprises of portfolios of conventional agricultural crops that are augmented by SRWC. To achieve these objectives and to contribute to an improved and more realistic economic evaluation, a broad research approach was chosen. At the same time, the economically relevant data already available were enhanced through the collection and analysis of data on the current management practices for SRWC as well as the biomass

yields that have been achieved to date in the chosen study region - Bavaria, southern Germany. These data and information were considered in the economic analysis of this study.

In the first stage of this research effort, an extensive literature research was carried out in which various methods of capital budgeting applied in studies published to date were analyzed and compared. In this way, potential methods for performing economic analyses of SRWC were identified and distinctions were made between those found to be appropriate and inappropriate for this purpose. Only three approaches were identified that are capable of taking economic risk into consideration. These, or other methods which are capable of taking risk into consideration, are particularly valuable, as they can provide a more comprehensive and more realistic economic evaluation of SRWC. No studies were identified in which methods of capital budgeting were applied that are also capable of considering and quantifying the effects of cultivating a mixture of agricultural crops. Thus, the potential diversification effects of mixing woody crops like SRWC and traditional agricultural cash crops have, to date, been neglected. The literature review also identified different process chains of biomass production through the cultivation of SRWC, along with typical system boundaries and working steps. By grouping studies accordingly, comparison of the results of these studies was significantly improved. Therefore it is highly recommended that future economic evaluations of SRWC describe the system boundaries and working steps precisely. Also based on the results of previous studies, the working steps that represent the highest share of the total costs of the production of SRWC and, therefore, those for which realistic assumptions are particularly necessary were identified. These include: costs for land rent, costs for harvesting and chipping, and establishment costs. Although, realistic cost assumptions are important, the economic viability of SRWC, according to the literature, is mainly influenced by the returns, in terms of both biomass prices and biomass yields. Whereas biomass prices can be derived easily using statistics and can be considered representative of a larger spatial area, biomass yields are sensitive to site parameters, management and the tree species used. Thus, choosing truly representative base levels and variation in biomass yields in economic analyses is both important and challenging.

Despite the fact that the biomass yields of SRWC are crucial in influencing its economic viability, biomass data from SRWC are relatively sparse. The data used in economic evaluations originates mainly from research trials. Biomass yields from commercial SRWC are lacking, and it is not yet clear if biomass yields from research trials are representative of the base level and variation in biomass yields that are achievable in commercial SRWC. To address this shortcoming and to base the economic evaluation on biomass yields that are actually achievable on commercial SRWC stands in the study

region, biomass yields from 30 commercial SRWC stands in the first rotation in Bavaria were collected and analyzed. The method used was based on site-specific allometric biomass equations which are considered to be highly accurate. The mean annual increment of three-year-old stands was 3.6 oven-dry tons (odt) per hectare and year, whereas five- to ten-year-old stands showed much higher biomass yields of 8.9 odt per hectare and year. The biomass yields of five- to ten-year-old commercial SRWC stands were even higher than the biomass yields reported for research trials in Bavaria. If yield increases from the first to the second rotation and further rotations are considered – a realistic assumption according to existing literature – biomass yields from commercial stands that are well above the biomass yields assumed in economic studies from central Europe are likely. Hence, our data did not support the common expectation of lower biomass yields from commercial SRWC than that obtained in research trials. On the other hand, the biomass yields found for both groups are highly variable. Thus, our results indicate both the importance of analyzing commercial SRWC stands and the importance of considering yield variability (biophysiological risk) in economic evaluations.

The information needed to describe the management practices and working steps (which determine the level and timing of cash flows in the economic analysis) involved in SRWC management in Bavaria was gathered by means of a written survey. In this way, a typical process chain for SRWC in Bavaria was identified to be used as the basis for the economic evaluation. In addition to their potential for improving the economic evaluation conducted here, these data represent a rare source of information for other scientists and policy makers about the adoption of the SRWC in practice.

Finally, the working steps identified as described above were considered in the economic analysis of SRWC. In order to compare SRWC to the most common agricultural crops in terms of both profitability and economic risk, as well as to analyze the potential economic effects of cultivating a combination of the two, four model regions in Bavaria were chosen. In each of the model regions, the gross margins of conventional crops were calculated for the period from 2004 to 2013. To ensure the comparability of economic target figures, annual equivalent values were calculated for the perennial SRWC, considering the price variation of the period from 2004 to 2013. For both conventional crops and SRWC, region-specific biomass yield levels, as well as variations in yields were taken into consideration.

Based on the gross margins and annual equivalent values during the time period considered, both the economic variability (risk) of each crop and the correlations between the gross margins of the different crops were derived. Positive economic effects of growing SRWC were identified. In all model regions, SRWC was the crop with the lowest eco-

conomic risk – in contrast to the common perception of land-use decision makers. At the same time, the expected returns from SRWC were lower than the high yielding root crops potato and sugar beet, but higher than most of the cereal crops analyzed. In contrast to all of the conventional crops analyzed, no negative gross margins were achieved with SRWC. In some years, economic yields from conventional crops were higher than those for SRWC. However, there were also years in which economic yields from SRWC were higher than those for conventional crops. These results indicated that including SRWC in portfolios with conventional agricultural crops could help stabilize returns from farm enterprises.

In order to test this, the Modern Portfolio-Theory, was applied. Thereby, SRWC was considered as one asset in the portfolios of assets of farms. Thus, the economic risk of crops and the correlations between the financial target figures of different crops were taken into account (i.e. an economic evaluation at the farm level) instead of conducting mutually exclusive comparisons of crops (i.e. the standard economic evaluation at the hectare level which neglects uncertainties and the correlations between returns). Based on this analysis, diversification effects of mixing SRWC into agricultural portfolios were, in fact, detected. Hence, if portfolios of conventional crops, were diversified by including SRWC, agricultural enterprises received the same returns at lower risk; inversely, by accepting a certain degree of economic risk, higher returns were achieved. Hence, growing SRWC in addition to conventional crops provides an effective risk-management-strategy for agricultural enterprises, whereby economically optimal SRWC shares are variable depending on a particular farmer's degree of risk aversion.

Based on the achieved results, the following conclusions were drawn:

The high biomass yields from the existing commercial SRWC stands investigated in Bavaria do not support the generally accepted expectation of lower biomass yields in practice than those found in field trials. Rather, these results support additional analysis of commercial SRWC to gather data and information about the yield level, the development of yields across subsequent rotations, and the variability in yields actually achieved in practice. Thereby, both management and site factors need to be considered. The high biomass yields found in our study also indicate that woody biomass can be produced efficiently with SRWC even under conditions of practice. The fact that high yields were achieved on sites of below average site quality, and thus, below average predicted productivity of conventional crops, is not only favorable from an economic but also from an ethical point of view. Furthermore, this analysis of commercial SRWC and those managing it provides rare information about the adoption of SRWC in practice, and thus, complements the research published from field studies. Understanding the process of

adoption of SRWC, the management techniques used, and knowing the sites that land-use decision makers are using or may be willing to use will result in a better understanding of the implementation of this land use in practice, and form the basis for developing efficient ways to promote biomass production through cultivation of SRWC.

By analyzing the profitability of SRWC under yield and market risk, we were able to show that public opinion underestimates the profitability and overestimates the economic risks of growing SRWC. Furthermore, the consideration of SRWC as one asset in a portfolio of the assets of agricultural enterprises provides a much broader and novel understanding of the economic effects of growing SRWC for farms. The effects of mixing crops (diversification) that were not evident from studies that used other methods were identified here. Mixing SRWC into agricultural portfolios has the potential to either increase returns or decrease economic risk of farm production. Thus, it is recommended that future studies attempting to evaluate the economic effects of SRWC consider both risk and correlations between the economic yields of different crops. The integration of risk and effects of mixing crops in economic analyses can provide a reliable decision support for land-use decision makers and a cost-effective risk-management strategy for farmers. Hence, crucial requirements for promoting the adoption of SRWC can be met. Based on the potential positive economic effects found in this study and ecological effects of growing SRWC found in several studies, policy makers can use these results to help overcome the resistance of farmers towards the adoption of SRWC while at the same time supporting regional biomass productivity, and moving intensive farming systems towards more extensive and ecologically sensitive land-use portfolios.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XVII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Stand des Wissens	6
2.1 Bewirtschaftung von KUP und rechtliche Rahmenbedingungen	6
2.2 Ökologie und Energieeffizienz von KUP	7
3 Material und Methoden	9
3.1 Literaturrecherche zur betriebswirtschaftlichen Analyse von KUP	10
3.2 Bewirtschaftungspraxis von KUP in Bayern	12
3.3 Biomasseerträge von kommerziell betriebenen KUP in Bayern	13
3.3.1 Auswahl der Bestände	14
3.3.2 Biomasseermittlung.....	14
3.3.3 Statistische Auswertung	17
3.4 Betriebswirtschaftliche Analyse von KUP – KUP als Portfoliobestandteil von Marktfruchtbaubetrieben in Bayern	17
3.4.1 Definition der Produktionsverfahren und Datengrundlage der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen und KUP	19
3.4.2 Finanzielle Bewertung.....	23
3.4.3 Variante – erhöhte Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen	27
4 Ergebnisse und Diskussion	28
4.1 Literaturrecherche zur betriebswirtschaftlichen Analyse von KUP	28
4.1.1 Methoden der betriebswirtschaftlichen Analyse von KUP	28
4.1.2 Mögliche Prozessketten und Arbeitsschritte	30
4.1.3 Erlöse.....	32
4.1.4 Weitere Annahmen	35
4.2 Bewirtschaftungspraxis von KUP in Bayern	36

4.3	Biomasseerträge von kommerziell betriebenen KUP in Bayern.....	40
4.4	Betriebswirtschaftliche Analyse von KUP – KUP als Portfoliobestandteil von Marktfruchtbaubetrieben in Bayern	44
4.4.1	Betriebswirtschaftliche Analyse von KUP – Basisszenario.....	44
4.4.2	KUP als Portfoliobestandteil von Marktfruchtbaubetrieben – Basisszenario	51
4.4.3	Betriebswirtschaftliche Analyse von KUP – Variante unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen	56
4.4.4	KUP als Portfoliobestandteil von Marktfruchtbaubetrieben – Variante unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen	59
5	Schlussfolgerungen und Ausblick	62
6	Literaturverzeichnis.....	67
7	Danksagung	83
8	Anhang	85
8.1	Kosten, Preise und Biomasseerträge der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen.....	85
8.2	Holzhackschnitzelpreise	87
8.3	Publikationsliste.....	88
8.4	Veröffentlichung I	89
8.5	Veröffentlichung II	105
8.6	Veröffentlichung III.....	119
8.7	Veröffentlichung IV	133
8.8	Lebenslauf.....	169

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die Entwicklung der Literaturdatenbank. Die umgekehrte Pyramide kennzeichnet die drei Selektionsstufen und „n“ die Anzahl der Studien. Rechts der Grafik wird die Aufnahme oder der Ausschluss von Studien spezifiziert (verändert nach Hauk et al. 2014a)	11
Abbildung 2: Holzhackschnitzelpreise (n=25) der untersuchten Studien (verändert nach Hauk et al. 2014a)	33
Abbildung 3: Holzhackschnitzelpreise (n=25) in Abhängigkeit des Veröffentlichungsdatums der untersuchten Studien (verändert nach Hauk et al. 2014a)	34
Abbildung 4: Durchschnittlicher Gesamtzuwachs [$Mg_{atro} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$] der ersten Rotation (1, n=35) und der folgenden Rotationen (2+, n=35) (verändert nach Hauk et al. 2014a)	35
Abbildung 5: Geplante Umtriebszeiten für KUP in Bayern (n=159) (verändert nach Hauk et al. 2014b)	37
Abbildung 6: Durchschnittlicher Gesamtzuwachs dreijähriger (G 3) (n=8) und fünf- bis zehnjähriger (G 5+) (n=22) KUP der ersten Rotation (verändert nach Hauk et al. 2015b)	42
Abbildung 7: Durchschnittlicher Gesamtzuwachs [$Mg_{atro} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$] in Abhängigkeit der ökologischen Feuchte des Standorts (verändert nach Hauk et al. 2015b)	43
Abbildung 8: Kumulierte Häufigkeiten der Deckungsbeiträge ausgewählter Getreidearten und KUP am Beispiel der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm	46
Abbildung 9: Kumulierte Häufigkeiten der Deckungsbeiträge ausgewählter Hackfrüchte und KUP am Beispiel der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm	47
Abbildung 10: Rangfolge der Wirtschaftlichkeitsparameter einzelner Kulturen am Beispiel der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm. Für die konventionellen Kulturen ist der Deckungsbeitrag [$\text{€ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$] und die Standardabweichung [$\text{€ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$] angegeben	48
Abbildung 11: Übersicht der effizienten Portfolios von Getreidebaubetrieben der vier Modellregionen. Portfolios mit konventionellen Kulturen, ohne KUP, sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet. Portfolios, bei denen zusätzlich KUP zugelassen wurden, sind mit grünen Kreuzen	

	gekennzeichnet. Für diese sind die KUP-Anteile auf der zweiten (rechten) y-Achse angegeben (verändert nach Hauk et al. 2015a)	52
Abbildung 12:	Übersicht der effizienten Portfolios von Hackfruchtbaubetrieben der vier Modellregionen. Portfolios mit konventionellen Kulturen, ohne KUP, sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet. Portfolios, bei denen zusätzlich KUP zugelassen wurden, sind mit grünen Kreuzen gekennzeichnet. Für diese sind die KUP-Anteile auf der zweiten (rechten) y-Achse angegeben (verändert nach Hauk et al. 2015a)	53
Abbildung 13:	Portfolioanteile der jeweiligen Kultur in Abhängigkeit des akzeptierten Risikos am Beispiel des Hackfruchtbaubetriebs der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm	54
Abbildung 14:	Kumulierte Häufigkeiten der Deckungsbeiträge ausgewählter Getreidekulturen und KUP unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen, am Beispiel der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm	58
Abbildung 15:	Kumulierte Häufigkeiten der Deckungsbeiträge ausgewählter Hackfrüchte und KUP unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen, am Beispiel der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm	58
Abbildung 16:	Übersicht der effizienten Portfolios von Getreidebaubetrieben der vier Modellregionen unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen. Portfolios mit konventionellen Kulturen, ohne KUP, sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet. Portfolios bei denen zusätzlich KUP zugelassen wurden, sind mit grünen Kreuzen gekennzeichnet. Für diese sind die KUP-Anteile auf der zweiten (rechten) y-Achse angegeben (verändert nach Hauk et al. 2015a)	59
Abbildung 17:	Übersicht der effizienten Portfolios von Hackfruchtbaubetrieben der vier Modellregionen unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen. Portfolios mit konventionellen Kulturen, ohne KUP, sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet. Portfolios bei denen zusätzlich KUP zugelassen wurden, sind mit grünen Kreuzen gekennzeichnet. Für diese sind die KUP-Anteile auf der zweiten (rechten) y-Achse angegeben (verändert nach Hauk et al. 2015a)	60
Abbildung 18:	Portfolioanteile der jeweiligen Kultur in Abhängigkeit des akzeptierten Risikos, unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen, am Beispiel des Hackfruchtbaubetriebs der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht von den der Dissertation zugrunde liegenden Publikationen	5
Tabelle 2:	Übersicht der Kulturarten, welche in den jeweiligen Modellbetrieben berücksichtigt wurden. Dabei kennzeichnet „AIC“ die Modellregion Aichach-Friedberg, „PAF“ Pfaffenhofen an der Ilm, „R“ Regensburg (Landkreis) und „WUN“ Wunsiedel. Betriebe mit dem Anbauschwerpunkt Getreide sind mit „G“ und diejenigen mit dem Anbauschwerpunkt Hackfrucht mit „H“ gekennzeichnet.....	19
Tabelle 3:	Übersicht der Kosten der KUP-Bewirtschaftung der vier Modellregionen (verändert nach Hauk et al. 2015a)	21
Tabelle 4:	KUP-Biomasseerträge (dGZ [$\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]) der vier Modellregionen (verändert nach Hauk et al. 2015a)	22
Tabelle 5:	Übersicht möglicher Prozessketten der KUP-Bewirtschaftung sowie darin enthaltene Arbeitsschritte. Die in Klammern dargestellten Arbeitsschritte wurden nicht in jeder Studie der jeweiligen Prozesskette berücksichtigt (verändert nach Hauk et al. 2014a)	31
Tabelle 6:	Anteilige Kosten [%] der jeweiligen Arbeitsschritte, inklusive Pachtkosten, an den Gesamtkosten (verändert nach Hauk et al. 2014a)	31
Tabelle 7:	Übersicht der durchschnittlichen Deckungsbeiträge (\emptyset DB) [$\text{€ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] und Standardabweichung (SD) [$\text{€ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] der untersuchten Kulturen in den vier Modellregionen: Aichach-Friedberg, Pfaffenhofen an der Ilm, Regensburg und Wunsiedel (verändert nach Hauk et al. 2015a)	45
Tabelle 8:	Übersicht der durchschnittlichen Deckungsbeiträge (\emptyset DB) [$\text{€ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] und Standardabweichung (SD) [$\text{€ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] der untersuchten Kulturen in den vier Modellregionen: Aichach-Friedberg, Pfaffenhofen an der Ilm, Regensburg (Landkreis) und Wunsiedel für die Variante unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen (verändert nach Hauk et al. 2015a)	57
Tabelle 9:	Übersicht der variablen Kosten (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014), Preise (Reisenweber 2014a; Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) und Biomasseerträge (Reisenweber 2014b; Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014) der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen für den Betrachtungszeitraum 2004 bis 2013 in der Modellregion Aichach-Friedberg. Hierbei kennzeichnet \emptyset	

	den Mittelwert und „SD“ die Standardabweichung (verändert nach Hauk et al. 2015a).....	85
Tabelle 10:	Übersicht der variablen Kosten (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014), Preise (Reisenweber 2014a; Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) und Biomasseerträge (Reisenweber 2014b; Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014) der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen für den Betrachtungszeitraum 2004 bis 2013 in der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm. Hierbei kennzeichnet Ø den Mittelwert und „SD“ die Standardabweichung (verändert nach Hauk et al. 2015a)	86
Tabelle 11:	Übersicht der variablen Kosten (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014), Preise (Reisenweber 2014a; Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) und Biomasseerträge (Reisenweber 2014b; Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014) der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen für den Betrachtungszeitraum 2004 bis 2013 in der Modellregion Regensburg (Landkreis). Hierbei kennzeichnet Ø den Mittelwert und „SD“ die Standardabweichung (verändert nach Hauk et al. 2015a)	86
Tabelle 12:	Übersicht der variablen Kosten (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014), Preise (Reisenweber 2014a; Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) und Biomasseerträge (Reisenweber 2014b; Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014) der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen für den Betrachtungszeitraum 2004 bis 2013 in der Modellregion Wunsiedel. Hierbei kennzeichnet Ø den Mittelwert und „SD“ die Standardabweichung (verändert nach Hauk et al. 2015a)	87
Tabelle 13:	Zugrunde gelegte Holzhackschnitzelpreise [€ Mg _{WG35} ⁻¹] des Betrachtungszeitraums 2004 bis 2013 (C.A.R.M.E.N. e.V. 2015).....	87

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Nachfrage nach Holz steigt aufgrund der Zunahme der Weltbevölkerung und dem steigenden Konsumniveau pro Kopf deutlich an (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2009; Mather und Needle 2000). Die Waldfläche jedoch, als typischer Indikator für das potenzielle Holzangebot, nimmt ab. Dies trifft besonders auf die pro Kopf verfügbare Waldfläche zu (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2010). Diese weltweit sinkende Verfügbarkeit von Waldressourcen stellt einerseits eine Herausforderung dar, holzige Biomasse effizient und in ausreichender Menge bereitzustellen und dies möglichst unter Vermeidung negativer Umweltauswirkungen. Andererseits bietet diese Situation Chancen für Flächeneigentümer, die in der Lage sind, Holz zu produzieren.

Holzplantagen bieten eine interessante Möglichkeit, holzige Biomasse in großen Mengen pro Flächeneinheit bereitzustellen, da sie im Vergleich zu (naturnahen) Wäldern und Forsten eine hohe Produktivität aufweisen (Paquette und Messier 2010). Besonders im Hinblick auf die steigende Weltbevölkerung und der damit verbundenen Verringerung der verfügbaren Fläche pro Kopf, werden Holzplantagen zu einer immer bedeutenderen Holzquelle mit steigenden Anteilen an der Waldfläche (Masiero et al. 2015; Warman 2014; Carle und Holmgren 2008). Bereits zwischen 1995 und 2000 stieg die Fläche der Holzplantagen von 124 Mio. ha (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 1998) auf 187 Mio. ha (Brown 2000) an, was einer Zunahme von 51 % entspricht. Dass bereits im Jahr 2012 über ein Drittel der weltweiten Rundholzproduktion von Holzplantagen stammten, welche lediglich ca. 7 % der Forstfläche einnehmen (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2014), unterstreicht sowohl deren Relevanz als auch deren hohe Produktivität.

Eine Variante der Holzplantage sind Kurzumtriebsplantagen (KUP). KUP sind eine moderne und sehr produktive Form des Niederwaldes, wobei landwirtschaftliche Fläche mit schnellwachsenden Baumarten bestockt wird, um Biomasse für die stoffliche oder energetische Verwertung bereitzustellen. Rechtlich sind KUP kein Wald im Sinne des Bundeswaldgesetzes, sondern stellen eine landwirtschaftliche Dauerkultur dar, sobald sie „mit dem Ziel baldiger Holzentnahme angepflanzt werden und deren Bestände eine Umtriebszeit von nicht länger als 20 Jahren haben“ (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV) 2010a). Die in Mitteleuropa verwendeten Baumarten sind meist hybridisierte Weiden- (*Salix ssp.*) und Pappelsorten (*Populus ssp.*) sowie Robinie (*Robinia pseudoacacia*) und Roterle (*Alnus rubra*) (Don et al. 2012). KUP zeichnen sich durch eine hohe Produktivität, vor allem in der Jugendphase, und die Fähigkeit zum Wiederaustrieb nach der Ernte aus (Mitchell 1992). Die oberirdischen Biomasseerträge

der KUP sind deutlich höher als die des heimischen Waldes, für den andere Hauptbaumarten und längere Umtriebszeiten typisch sind. So errechneten Hauk et al. (2014b), basierend auf Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (2012), beispielsweise einen durchschnittlichen Gesamtzuwachs (dGZ) der KUP-Versuchsflächen in Bayern von $9,4 \text{ Mg}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ absoluter Trockenmasse (atro), was $23,5 \text{ m}^3$ entspricht. Dabei scheint das züchterische Potenzial von KUP-Baumarten bei weitem noch nicht ausgeschöpft zu sein (Larsen et al. 2014b; Larsson 1997). Der dGZ des Waldes in Bayern hingegen war mit $11,9 \text{ m}^3$ nur halb so hoch (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2015). Auch in Bezug auf die zeitliche Perspektive sind KUP den heimischen Wäldern überlegen, da die hohen Zuwächse bereits nach wenigen Jahren abgeschöpft werden können; Umtriebszeiten zwischen drei und zehn Jahren sind in Deutschland üblich (Hauk et al. 2014b; Schweier und Becker 2013; Burger 2010). Die nach der Ernte erneut austreibenden Wurzelstöcke liefern über mehrere Umtriebe hinweg hohe Erträge. So sind von Versuchsflächen in Thüringen (dreijähriger Umtrieb nach 18 Jahren (Biertümpfel et al. 2012)) und Bayern (fünfjähriger Umtrieb nach 15 Jahren (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) 2012)) noch keine Ertragsrückgänge berichtet; vielmehr kam es zu Ertragssteigerungen von Rotation zu Rotation. Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass die Biomasseproduktivität von KUP deutlich höher ist als die des heimischen Waldes. Sie wird nur durch intensiv bewirtschaftete landwirtschaftliche Kulturen, wie zum Beispiel Getreide, Kartoffeln, Zuckerrüben und Mais erreicht oder übertroffen (Don et al. 2012; Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2009).

Während KUP eine hohe Biomasseproduktivität aufweisen, bietet deren extensive Bewirtschaftungsweise zugleich zahlreiche ökologische Vorteile im Vergleich zu intensiv bewirtschafteten annuellen Acker- und Bioenergiekulturen. So führt die düngemittelfreie oder -arme Bewirtschaftung von KUP zu einer deutlichen Reduzierung der Nitratauswaschung (Dimitriou et al. 2012a; Zacios et al. 2011) und verringerten Stoffeinträgen von Calcium, Magnesium, Phosphor und Schwefel (Zacios et al. 2012) in den Grundwasserkörper, was eine verbesserte Trinkwasserqualität zur Folge hat. Außerdem ist die Biodiversität von KUP im Allgemeinen höher als die der landwirtschaftlichen Kulturen (Dauber et al. 2010; Rowe et al. 2009). Der ganzjährige Bewuchs, das weitreichende Wurzelsystem und die seltene Bodenbearbeitung bewirken eine verringerte Wasser- und Winderosion (Kort et al. 1998; Thompson und Luckman 1993) und eine Steigerung des Kohlenstoffgehalts auf Ackerland im Ober- und Unterboden (Dimitriou et al. 2012b). Die Energie- und Klimabilanz von KUP ist besser als die von konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen (Felten et al. 2013; Boehmel et al. 2008) und ähnlich günstig wie die der

mehrfährigen Bioenergiepflanzen Miscanthus und Rutenhirse (Njakou Djomo et al. 2015).

Trotz der genannten Vorteile, sind KUP in Europa mit rund 50.000 ha (Don et al. 2012) bisher nur in geringem Ausmaß verbreitet. Als Hauptursache werden vor allem ökonomische Gründe genannt; allen voran die geringe beziehungsweise unklare wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit (McKenney et al. 2014; Glithero et al. 2013; Neubert et al. 2013; Styles et al. 2008). Die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von KUP nimmt eine besondere Rolle ein. Einerseits ist sie die wichtigste Entscheidungsgrundlage für oder gegen den Anbau von KUP (Glithero et al. 2013; Neubert et al. 2013). Andererseits ist eine Bewertung der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit von KUP nicht trivial, da diese sowohl von der Wirtschaftlichkeit der KUP selbst als auch von der Wirtschaftlichkeit der Alternativinvestition abhängt. Eine Vielzahl an Alternativinvestitionen, Finanz- oder Sachinvestitionen, stehen hierbei prinzipiell zur Auswahl. Für einen landwirtschaftlichen Entscheider, der eine optimierte Verwendung seiner landwirtschaftlichen Fläche anstrebt, kommen wiederum mehrere Kulturarten als alternative Sachinvestition in Frage. Die Wirtschaftlichkeit der Alternativinvestition ist somit von der Art der Alternativinvestition und den der Berechnung zugrunde gelegten sonstigen Annahmen abhängig.

Während bei der wirtschaftlichen Bewertung von landwirtschaftlichen Kulturen auf eine solide Datengrundlage zurückgegriffen werden kann (z.B. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) 2015; Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014), sind für die betriebswirtschaftliche Analyse der KUP bis heute vergleichsweise wenig Daten vorhanden. Eine Wissenslücke herrscht vor allem hinsichtlich der zu erzielenden Biomasseerträge und den in der Praxis vorzufindenden Bewirtschaftungsweisen (Hauk et al. 2014b). Die Angaben über Biomasseerträge, einer der stärksten Einflussfaktoren für die Wirtschaftlichkeit von KUP (Hauk et al. 2014a; Kröber et al. 2010; Londo et al. 2001; Heaton et al. 1999), stammen bisher vorwiegend von Versuchsflächen. Es ist bislang offen, ob das Ertragsniveau der Versuchsflächen jenes der Praxisflächen hinreichend genau widerspiegelt (z.B. Mola-Yudego und Aronsson 2008; Laureysens et al. 2004). Weiterhin existiert für die Bewirtschaftung von KUP, keine einheitliche Prozesskette mit definierten Arbeitsschritten; vielmehr bieten sich mehrere Möglichkeiten an (Hauk et al. 2014a). Für eine ökonomische Bewertung sind die Kenntnis der Prozesskette und der anfallenden Arbeitsschritte jedoch eine wichtige Voraussetzung, da diese die Höhe und den Zeitpunkt der Ein- und Auszahlungen bestimmen.

Die vorangegangenen Ausführungen haben gezeigt, dass KUP eine flächen- sowie energieeffiziente und zugleich ökologische Möglichkeit darstellen, holzige Biomasse zu produzieren. In Anbetracht der gestiegenen Holznachfrage bei gleichzeitig beschränktem

Angebot haben sie das Potenzial, den Nutzungsdruck auf naturnahe Wälder zu verringern. Zudem bieten sie Flächeneigentümern die Chance, ihre Geld- und Sachinvestition, insbesondere in landwirtschaftlichen Betrieben, im Sinne einer erweiterten Produktpalette zu diversifizieren. Doch fehlen bislang verlässliche ökonomische Entscheidungsgrundlagen. Dies liegt einerseits an der geringen Datengrundlage zu KUP. So sind Ertragsdaten über in der Praxis zu erzielende Biomasseerträge ebenso wie Kenntnisse zur tatsächlichen Bewirtschaftungsweise und Prozessketten rar. Letztere sind aus ökonomischer Sicht wichtig, da sie sowohl den Zeitpunkt der Aus- und Einzahlungen als auch die Höhe der Arbeitserledigungskosten determinieren. Andererseits wurde die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von KUP in bisherigen Studien anhand der Vergleiche von sich gegenseitig ausschließenden Investitionsalternativen bewertet (Hauk et al. 2014a; El Kasmioui und Ceulemans 2012). Tatsächlich jedoch stehen zahlreiche Investitionsalternativen zur Verfügung, die kombinierbar sind. Im Falle von landwirtschaftlichen Entscheidungsträgern, die eine optimierte Allokation der knappen Ressource „Boden“ anstreben, sind dies die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten einzelner Kulturarten. Die Rückflüsse der einzelnen Kulturarten sind hierbei nicht unbedingt gleichmäßig. Vielmehr sind diese mit Risiken behaftet, da landwirtschaftliche Kulturen, zusätzlich zu den Marktrisiken (Preisschwankungen), biophysikalischen Risiken (Biomasseertrag) unterliegen (Hardaker 2004). Diese wirtschaftlichen Risiken landwirtschaftlicher Betriebe lassen sich durch geeignete Mischung der Kulturarten reduzieren (Kandulu et al. 2012; Bhende und Venkataram 1994), es können sogenannte Diversifikationseffekte entstehen. KUP stellen dabei eine mögliche Ergänzung eines landwirtschaftlichen Portfolios dar. Jedoch wurden die ökonomischen Risiken von KUP bislang nur unzureichend untersucht und die möglichen Effekte auf das Produktportfolio landwirtschaftlicher Betriebe wurden bisher nicht quantifiziert.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Beantwortung folgender Forschungsfragen:

1. Wie wurde die Wirtschaftlichkeit von KUP in bisherigen Studien analysiert? Welche Methoden der Investitionsrechnung wurden verwendet? Welche Bewirtschaftungsweise und welche weiteren Annahmen wurden der betriebswirtschaftlichen Analyse von KUP zugrunde gelegt?
2. Welche Bewirtschaftungsweisen sind für KUP in Bayern typisch?
3. Wie hoch sind die Biomasseerträge, die auf bayerischen, kommerziell betriebenen KUP erzielt werden?
4. Wie hoch ist der erwartete Deckungsbeitrag von KUP und seine Standardabweichung im Vergleich zu ausgewählten landwirtschaftlichen Kulturen?

5. Sind KUP eine ökonomisch effektive Risikomanagement-Strategie für landwirtschaftliche Betriebe? Oder in anderen Worten: Treten positive ökonomische Effekte auf, wenn Landwirte ihr landwirtschaftliches Portfolio durch mehrjährige KUP diversifizieren?

Um die Ziele dieser Arbeit zu erreichen, wurden vier Teilstudien durchgeführt (Tabelle 1). Diese bilden den Kern der vorliegenden Arbeit und sind im Anhang aufgeführt. Die ersten drei Publikationen wurden bereits veröffentlicht, die letzte wurde zur Begutachtung eingereicht. Der Autor dieser Dissertation ist Erstautor aller vier Publikationen.

Tabelle 1: Übersicht von den der Dissertation zugrunde liegenden Publikationen

Titel	Bibliographische Angaben
Economic evaluation of short rotation coppice for energy from biomass – a review ^a	Renewable and Sustainable Energy Reviews (2014). 29. S. 435-448.
Analysis of commercial short rotation coppices in Bavaria, southern Germany ^b	Biomass and Bioenergy (2014). 67. S. 401–412
Non-destructive estimation of biomass yield for short rotation woody crops is reliable and shows high yields for commercial stands in Bavaria ^c	BioEnergy Research (2015). Online-Vorabpublikation. DOI: 10.1007/s12155-015-9602-5
Ecological diversification is economically profitable - farmers should include short rotation woody crops for bio-energy in their land-use portfolios ^d	Global Change Biology Bioenergy (2015). Zur Publikation eingereichtes Manuskript

^a *Hauk, S.; Knoke, T.; Wittkopf, S.* Beitrag von Sebastian Hauk (90 %): Datenakquise, Datenbearbeitung, statistische Analysen und Interpretation der Ergebnisse sowie Erstellen des Manuskripts. Beitrag von Thomas Knoke und Stefan Wittkopf: konstruktive Kritik an der Datenauswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie Korrektur des Manuskripts; ^b *Hauk, S.; Wittkopf, S.; Knoke, T.* Beitrag von Sebastian Hauk (90 %): Datenakquise, Datenbearbeitung, statistische Analysen und Interpretation der Ergebnisse sowie Erstellen des Manuskripts. Beitrag von Thomas Knoke und Stefan Wittkopf: konstruktive Kritik an der Datenauswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie Korrektur des Manuskripts; ^c *Hauk, S.; Skibbe, K.; Röhle, H.; Schröder, J.; Wittkopf, S.; Knoke, T.* Beitrag von Sebastian Hauk (80 %): Datenakquise, Datenbearbeitung, statistische Analysen und Interpretation der Ergebnisse sowie Erstellen des Manuskripts. Beitrag von Katja Skibbe (10 %): statistische Analyse und Interpretation der Ergebnisse sowie erstellen des Manuskripts. Beitrag von Thomas Knoke, Stefan Wittkopf, Heinz Röhle und Jens Schröder: konstruktive Kritik an der Datenauswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie Korrektur des Manuskripts; ^d *Hauk, S.; Gandorfer, M.; Wittkopf, S.; Müller, U.K.; Knoke, T.* Beitrag von Sebastian Hauk (85 %): Datenakquise, Datenbearbeitung, statistische Analysen und Interpretation der Ergebnisse sowie Erstellen des Manuskripts. Beitrag von Thomas Knoke, Stefan Wittkopf, Markus Gandorfer und Ulrike Müller: konstruktive Kritik an der Datenauswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie Korrektur des Manuskripts.

Im folgenden Kapitel wird der Kenntnisstand dargelegt, während in Kapitel 3 die verwendeten Lösungsansätze vorgestellt werden. In Kapitel 4 werden die Kernergebnisse der vier Publikationen in knapper Form präsentiert und diskutiert. Anschließend werden in Kapitel 5 die Schlussfolgerungen der Ergebnisse sowie der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

2 Stand des Wissens

Im Folgenden wird der Kenntnisstand zu der Bewirtschaftung von KUP, den rechtlichen Rahmenbedingungen und der Ökologie von KUP in knapper Form dargelegt. Um zu einer verbesserten und realitätsnäheren ökonomischen Bewertung von KUP beizutragen, wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, bei der 37 Studien zur ökonomischen Bewertung von KUP analysiert und übergreifend ausgewertet wurden. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.1 dargestellt.

2.1 Bewirtschaftung von KUP und rechtliche Rahmenbedingungen

Kurzumtriebsplantagen enthalten Merkmale sowohl der klassischen Forstwirtschaft als auch der Landwirtschaft, da Bäume in für die Forstwirtschaft kurzen Rotationszyklen auf landwirtschaftlichen Flächen angebaut werden. Demzufolge werden auch bei der Bewirtschaftung forstliche oder landwirtschaftliche Techniken, je nach Arbeitsschritt, eingesetzt: Für die Bodenbearbeitung und maschinelle Pflanzung der rund 20 cm langen Stecklinge kommen landwirtschaftliche Techniken zum Einsatz. Bei geringen Schlaggrößen kann auch die manuelle Pflanzung zweckmäßig sein (Becker et al. 2014). Im Jahr der Pflanzung ist mechanische oder chemische Unkrautbekämpfung für eine rasche Kultursicherung unerlässlich (Larsen et al. 2014a). Der nächste Arbeitsschritt ist die Ernte. Die Ernte der Triebe erfolgt in zuvor definierten zeitlichen Abständen, der Umtriebszeit, die dem Triebalter entspricht. Da der Stammdurchmesser und die Einzelstammmasse sowie das Einzelstammvolumen positiv mit dem Alter korrelieren (Nielsen et al. 2014; Willebrand et al. 1993), beeinflusst die angestrebte Umtriebszeit die Pflanzenzahl, das Produkt (Schreiner 1970), die Erntetechnik und Prozesskette (Schweier und Becker 2012; Spinelli et al. 2009). Dementsprechend wird zwischen: a) kurzen Umtriebszeiten von ungefähr drei bis fünf Jahren, die mit ungefähr 10.000 Pflanzen pro Hektar begründet und vollmechanisiert geerntet werden und b) mittleren (bis circa zehn Jahre) bis langen Umtriebszeiten (bis circa zwanzig Jahre) unterschieden (Schreiner 1970). Werden Umtriebszeiten von ungefähr zehn bis 20 Jahren und höhere Stammvolumen angestrebt, können forstliche Holzernteverfahren wirtschaftlich konkurrenzfähig sein (Burger 2010).

Da KUP mit fortschreitendem Triebalter immer waldähnlicher werden, hat die deutsche Gesetzgebung den rechtlichen Status der KUP an das Triebalter geknüpft. Bei Umtriebszeiten von mehr als 20 Jahren ist KUP rechtlich Wald, wohingegen KUP bei Umtriebszeiten bis 20 Jahre eine landwirtschaftliche Nutzung darstellt (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV) 2010a). Im letzteren Fall besteht Anspruch auf die Betriebsprämienzahlung (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz

(BMJV) 2010b). Während KUP Elemente der Forst- und Landwirtschaft enthalten, sollte für die ökologische Bewertung die landwirtschaftliche Bodennutzung und nicht der Wald die Referenz sein, da auf landwirtschaftlicher Fläche eine rein landwirtschaftliche Bodennutzung ersetzt wird.

2.2 Ökologie und Energieeffizienz von KUP

Im Vergleich zu herkömmlichen, meist annualen Acker- und Bioenergiekulturen zeichnen sich KUP durch eine extensive Bewirtschaftung und nur wenig negativen bis hin zu positiven Umweltauswirkungen aus. So ist die Nitratauswaschung unter KUP um den Faktor zehn geringer als unter landwirtschaftlichen Kulturen (Dimitriou et al. 2012a; Zacios et al. 2011), was zu einer deutlich gesteigerten Trinkwasserqualität führt. Der Wasserverbrauch von KUP ist hingegen höher als der von landwirtschaftlichen Kulturen und vergleichbar mit dem von Wäldern und Grasland (Perry et al. 2001). In Mitteleuropa werden keine negativen Auswirkungen auf die Hydrologie erwartet (Dimitriou et al. 2009). Die Stofffrachten von Calcium, Magnesium, Phosphor und Schwefel sind wegen der fehlenden Düngung unter KUP deutlich reduziert (Zacios et al. 2012). Wegen des ganzjährigen Bewuchses und des weitreichenden Wurzelsystems stellen KUP eine effektive Möglichkeit dar, die Wasser- und Winderosion zu verringern (Kort et al. 1998; Thompson und Luckman 1993), wenngleich diese Wirkung im Jahr der Anlage und Ernte verringert ist (Kort et al. 1998). Da nach der Anlage einer KUP bis zur Rekultivierung keine Bodenbearbeitung mehr stattfindet, steigt der Kohlenstoffgehalt auf Ackerland im Ober- und Unterboden (Dimitriou et al. 2012b). Werden KUP hingegen auf Grünland etabliert, sind keine Steigerungen, teilweise sogar Minderungen des Bodenkohlenstoffs zu verzeichnen (Don et al. 2012).

Die Biodiversität von KUP ist im Allgemeinen höher als die der landwirtschaftlichen Kulturen, jedoch ist dies stark abhängig von der betrachteten Tier- und Pflanzenart, der verwendeten Baumart, Bewirtschaftungsweise, Größe und Alter der KUP (Dauber et al. 2010; Rowe et al. 2009). Während die Anzahl an Vögeln und die Diversität der Vogelarten in KUP deutlich höher als auf intensiv bewirtschaftetem Acker- oder Grünland ist (Sage et al. 2006), ist sie geringer als in natürlichen Habitaten, wie z.B. alten Wäldern und Feuchtgebieten (Rowe et al. 2009). Gleiches wird für Säugetiere berichtet (Rowe et al. 2009). Demnach sind KUP zusammenfassend höherwertiger als intensive landwirtschaftliche Kulturen und minderwertiger als natürliche Hecken, Buschwerk und alte Wälder einzustufen. Da in KUP Insektizide nur in Ausnahmefällen eingesetzt werden, werden in zahlreichen Studien hohe Zahlen wirbelloser Tiere bestätigt (Dauber et al. 2010). Rowe et al. (2009) nennen in ihrer Literaturstudie bis zu 120 beziehungsweise 70 Arten

wirbelloser Tiere in dem Kronendach von Weiden- beziehungsweise Pappel-KUP. Die Regenwurmpopulation, eine der wichtigsten Komponenten des Bodenlebens, ist in KUP deutlich höher als in herkömmlichen landwirtschaftlichen Kulturen (Rajapaksha et al. 2013; Makeshin 1994). Ebenso ist die Artenzahl der Flora in KUP deutlich höher als auf Acker- und intensiv bewirtschaftetem Grünland (Verheyen et al. 2014). Die Artenzusammensetzung ändert sich jedoch von Offenlandarten zu Waldarten mit zunehmendem Alter (Dauber et al. 2010). Somit sind KUP in der Lage, die Biodiversität in Regionen, die durch intensive landwirtschaftliche Bodennutzung geprägt sind, zu erhöhen und stellen gleichzeitig eine energieeffiziente Möglichkeit der Biomasseproduktion dar.

Die Energie- und Klimabilanz von KUP ist besser als diejenige von konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen (Felten et al. 2013; Boehmel et al. 2008) und ähnlich günstig wie die der mehrjährigen Bioenergiepflanzen *Miscanthus* (*Miscanthus*) und Rutenhirse (*Panicum virgatum*) (Njakou Djomo et al. 2015). Der Grund für die vorteilhafte Energiebilanz und die geringen Klimagasemissionen der Biomasseerzeugung mit KUP im Vergleich zu einjährigen landwirtschaftlichen Kulturen ist die extensive Bewirtschaftungsweise, welche sich durch geringe bis fehlende Stickstoffdüngung, fehlende jährliche Bodenbearbeitung (Stickstoffmineralisation) (Don et al. 2012) und den geringen Einsatz von fossilem Treibstoff (Njakou Djomo et al. 2015) auszeichnet. Je nach Bewirtschaftungsintensität und Biomasseertrag ergeben sich Energie-Output-Input-Verhältnisse (Systemgrenze: cradle-farm gate, also von der Begründung bis zum (landwirtschaftlichen) Hoftor) von KUP zwischen 9:1 und 62:1 (Njakou Djomo et al. 2015), wobei Werte ab 30:1 in älteren KUP ab der zweiten Ernte erzielt wurden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen bei Burger (2010), der Energie-Output-Input-Verhältnisse (Systemgrenze: cradle-farm gate) von 29:1 bis 50:1 nennt. Im Vergleich dazu berichteten Biedermann et al. (2010) wesentlich engere Energie-Output-Input-Verhältnisse (Systemgrenze: cradle-farm gate) für Winterweizen von 6,5:1 bis 15:1 und Felten et al. (2013) von Energie-Output-Input-Verhältnissen (Systemgrenze: cradle-market place, also von der Begründung bis zum Ort des Verkaufs) von 4,7:1 für Raps und 5,5:1 für Mais. Somit bieten KUP eine energieeffiziente und klimaschonende Möglichkeit, Biomasse bereit zu stellen, die sowohl energetisch als auch stofflich genutzt werden kann.

3 Material und Methoden

Zur Beantwortung der in Kapitel 1 genannten Forschungsfragen wurde ein breiter Forschungsansatz gewählt. Zunächst wurde eine umfassende Literaturrecherche zur ökonomischen Analyse von KUP durchgeführt. Dabei wurden a) geeignete Methoden der Investitionsrechnung für KUP und b) typische Prozess- und Arbeitsschritte, einhergehend mit Höhe und Zeitpunkt auftretender Aus- und Einzahlungen, identifiziert und c) Annahmen, welche die Wirtschaftlichkeit am stärksten beeinflussen, identifiziert, analysiert und diskutiert. Die dabei identifizierten Wissenslücken sollten in den folgenden Teilstudien geschlossen werden.

Für die Beantwortung der Forschungsfragen 2-5 wurde die Untersuchungsregion Bayern gewählt. *Zu Forschungsfrage 2:* Da die Datengrundlage zu KUP in Bayern, wie auch in Deutschland, gering ist, wurde erstmalig eine empirische Studie zur Bewirtschaftungspraxis von KUP in Bayern durchgeführt. Ziel der Befragung der KUP-Betreiber Bayerns war es, eine praxisrelevante Prozesskette für die Bewirtschaftung von KUP in Bayern zu identifizieren. *Zu Forschungsfrage 3:* Bislang existieren unzureichende Daten zu Biomasseerträgen von KUP, welche überwiegend von Versuchsflächen stammen. Da Biomasseerträge jedoch sehr variabel sind (in Abhängigkeit von Standort und Bewirtschaftungspraxis (Petzold et al. 2010)) und bisher nicht ausreichend geklärt ist, ob Höhe und Variabilität der Erträge von Versuchsflächen die der kommerziell² betriebenen KUP widerspiegeln und somit ohne Weiteres übertragen werden können, wurden Erträge von kommerziellen KUP in Bayern erhoben. *Zu Forschungsfrage 4 und 5:* Aufbauend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen der vorangegangenen Teilstudien wurde sowohl die Wirtschaftlichkeit von KUP und der alternativen Kulturarten als auch deren finanzielles Risiko analysiert. Im Anschluss wurde der Einfluss von KUP auf das betriebswirtschaftliche Ergebnis ausgewählter landwirtschaftlicher Marktfruchtbaubetriebe in Bayern, unter Berücksichtigung von finanziellem Risiko, quantifiziert. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse von KUP als Portfoliobestandteil landwirtschaftlicher Betriebe wurde bislang noch nicht durchgeführt.

² Als „kommerzielle“ KUP sind in dieser Arbeit KUP-Praxisflächen, mit dem primären Zweck der Biomasseproduktion, definiert; der Begriff ist als Antonym zur Versuchsfläche zu verstehen.

3.1 Literaturrecherche zur betriebswirtschaftlichen Analyse von KUP

Als Hauptursache für die geringe Verbreitung von KUP wird vor allem mangelnde oder unklare Wirtschaftlichkeit sowie die daraus resultierende öffentliche Wahrnehmung, dass KUP mit hohen ökonomischen Risiken verbunden sei, angeführt (Glithero et al. 2013; Neubert et al. 2013; Sherrington und Moran 2008; Sherrington et al. 2008). Die Analyse der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit ist jedoch nicht trivial, da auf landwirtschaftlichen Flächen mehrere alternative Kulturen existieren, die es ökonomisch zu bewerten und mit KUP zu vergleichen gilt. Hierbei bedarf es spezieller methodischer Ansätze, die eine Vergleichbarkeit der ökonomischen Zielgrößen einjähriger Kulturen und der mehrjähriger Kulturen ermöglichen. Neben den Anforderungen an die Methode der Investitionsrechnung, bestehen weitere Herausforderungen bei der ökonomischen Bewertung von KUP: Aufgrund der geringen Verbreitung von KUP existieren im Vergleich zu landwirtschaftlichen Kulturen wenig Daten zur tatsächlichen Bewirtschaftungspraxis, erzielbaren Erzeugerpreisen und Biomasseerträgen. Hinzu kommt, dass konstante Preise und Erträge, über den für KUP üblichen Investitionszeitraum von 20 bis 30 Jahren, sehr unwahrscheinlich sind. Dementsprechend stellt die betriebswirtschaftliche Analyse ein stochastisches und kein deterministisches Planungsproblem dar.

Zur Identifikation geeigneter Methoden der Investitionsrechnung für KUP, typischer Prozess- und Arbeitsschritte, einhergehend mit der Höhe und dem Zeitpunkt auftretender Aus- und Einzahlungen, und Annahmen, welche die Wirtschaftlichkeit am stärksten beeinflussen, wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wurden die wissenschaftlichen Datenbanken *ISI Web of Knowledge™* und *ScienceDirect®* genutzt. Die Suchbegriffe bestanden aus je einem englischen Pendant für Kurzumtriebsplantage: „*Short Rotation Coppice (SRC)*“, „*Short Rotation Forestry (SRF)*“, „*Short Rotation Woody Crop (SRWC)*“ und „*Short Rotation Intensive Culture „SRIC)*“ und je einem ökonomischen Suchbegriff: *investment, capital investment, capital asset, economics, profitability, economic evaluation, economic feasibility, economic uncertainty* und *economic risk*.

Die insgesamt 6677 Treffer wurden in die Literaturverwaltungssoftware „Citavi 3.0“ übernommen (Abbildung 1). Nachdem Duplikate (n=109) gelöscht wurden, wurden Titel und Abstracts der verbleibenden Studien analysiert und 6416 Studien ausgeschlossen, die keine ökonomische Analyse von KUP beinhalteten. Von den übrigen 152 Studien wurden nur diejenigen weiterverwendet, deren Hauptziel die betriebswirtschaftliche Analyse war und die der Berechnung zugrunde gelegten Annahmen nannten. Die Auswahl wurde durch zwei deutsche Studien, Gandorfer et al. (2011) und Kröber et al. (2010), die dem

Autor bekannt waren, ergänzt. Die Kosten und Preise der 37 analysierten Studien wurden, sofern nötig, in Euro, entsprechend der Wechselkurse der Europäischen Zentralbank vom 3. März 2012, umgerechnet.

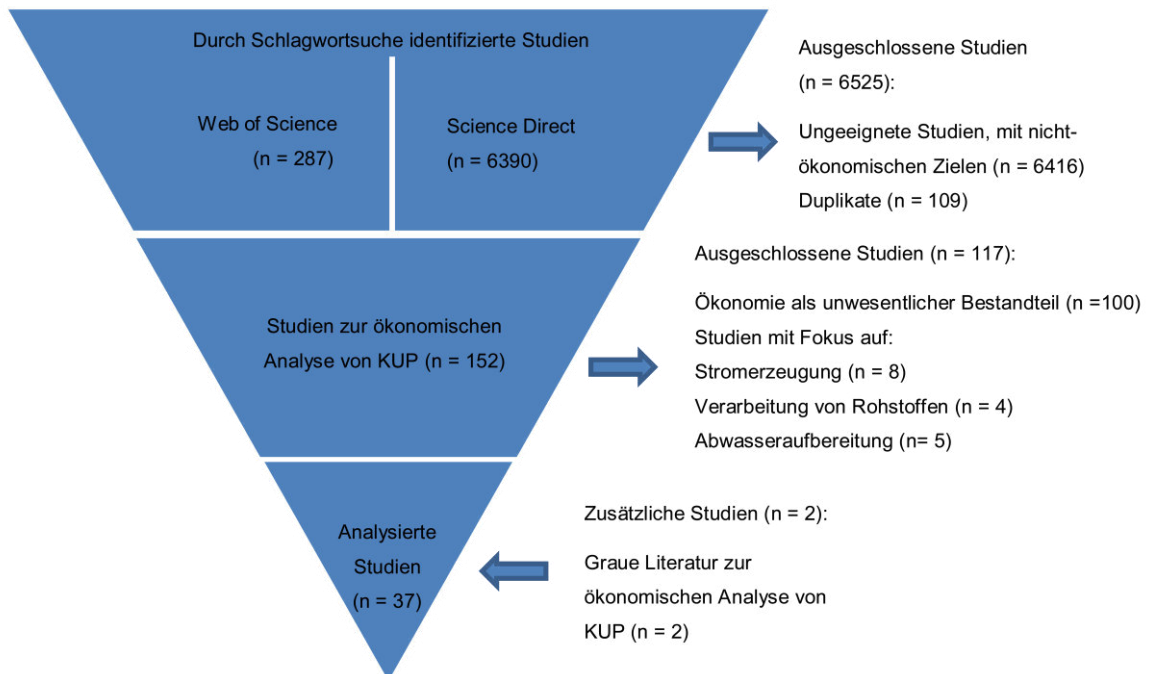


Abbildung 1: Übersicht über die Entwicklung der Literaturdatenbank. Die umgekehrte Pyramide kennzeichnet die drei Selektionsstufen und „n“ die Anzahl der Studien. Rechts der Grafik wird die Aufnahme oder der Ausschluss von Studien spezifiziert (verändert nach Hauk et al. 2014a)

Um geeignete Methoden der Investitionsrechnung für KUP zu identifizieren, wurden die Studien entsprechend der verwendeten Methoden kategorisiert. Die Vor- und Nachteile der verwendeten Methoden in Bezug auf ihre Eignung für die betriebswirtschaftliche Analyse von KUP wurden anhand einschlägiger Fachliteratur (z.B. Kruschwitz 2009; Dayanada 2002) und anhand der Diskussionen der einzelnen Studien bewertet und schließlich geeignete und weniger geeignete Methoden identifiziert.

Die Definition der Prozesskette sowie der enthaltenen Arbeitsschritte, sind wichtige Grundlagen der Beschreibung des ökonomischen Entscheidungsproblems, da sie sowohl das Anbausystem als auch dessen Systemgrenzen charakterisieren. Um typische Prozessketten und Arbeitsschritte für den KUP-Anbau zu identifizieren, wurden die Studien entsprechend der berücksichtigten Arbeitsschritte gruppiert. In Verbindung mit dem beabsichtigten Produkt und der Verkaufsstelle wurden klar abgrenzbare Prozessketten

definiert. Danach wurden die möglichen Arbeitsschritte, deren Zeitpunkt und Kosten erfasst. Die Notwendigkeit der einzelnen Arbeitsschritte wurde durch die Anzahl der Studien, die sie berücksichtigten, indiziert. Die Anzahl der Nennungen kann dabei von Tabelle 6 abweichen, da sich letztere auf die Anzahl der Studien bezieht, die die Kosten der jeweiligen Arbeitsschritte explizit angeben.

Um die zugrunde gelegten Annahmen zu analysieren, wurden Preise, Erträge, Kosten der einzelnen Arbeitsschritte, Investitionszeiträume, Pflanzzahlen, Rotationslängen und Kalkulationszinsfüße der einzelnen Studien exzerpiert. Die Kosten der Arbeitsschritte wurden anteilig der Gesamtkosten je Studie dargestellt, um kostenintensive Arbeitsschritte zu identifizieren, die eine sorgfältige Auswahl für die betriebswirtschaftliche Analyse erfordern. Die Preise wurden auf Unterschiede zwischen dem Produkt Hackschnitzel und Rundholz überprüft (T-Test) und deren zeitlicher Trend analysiert (Lineare Regression). Zudem wurde untersucht, ob Unterschiede zwischen den Erträgen der ersten und der zweiten Rotation auftreten (gepaarter T-Test) und ob es baumartenspezifische Unterschiede hinsichtlich des Ertrags (Kruskal-Wallis-Test), Investitionszeitraums (Kruskal-Wallis-Test), der Pflanzzahlen (Kruskal-Wallis-Test und Nemnyi-Damico-Wolfe-Dunn-Test, als nicht parametrischer Post-hoc-Test (Hollander und Wolfe 1999)) und Rotationslängen (Kruskal-Wallis-Test und Nemnyi-Damico-Wolfe-Dunn-Test) gibt. Die Baumarten Eukalyptus (*Eucalyptus ssp*) und *Daniellia oliveria* wurden wegen der geringen Stichprobe (jeweils $n=1$) für baumartenspezifische Auswertungen ausgeschlossen. Die baumartenspezifischen Auswertungen enthalten somit die Baumarten Pappel (*Populus ssp.*), Weide (*Salix ssp.*) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*). Ob die Voraussetzungen für parametrische Testverfahren erfüllt waren, wurde mittels Shapiro-Wilk- und F-Tests geprüft. Die Signifikanzschwelle aller Tests wurde auf $\alpha=0,05$ festgesetzt.

3.2 Bewirtschaftungspraxis von KUP in Bayern

Die Definition des Anbausystems und der Prozesskette – also dem Produktionsverfahren – einhergehend mit Höhe und Zeitpunkt der auftretenden Aus- und Einzahlungen, ist eine entscheidende Voraussetzung für die betriebswirtschaftliche Analyse von KUP. Da bislang keine Studie zur Bewirtschaftungspraxis von KUP in Bayern vorliegt, wurden in dieser Studie erstmalig empirisch Informationen zu den Anbausystemen, der verwendeten Prozesskette und den Arbeitsschritten bereitgestellt. Dazu wurden standardisierte Fragebögen an alle 372 KUP-Eigentümer in Bayern, die bis zum Winter 2011/2012 KUP etablierten, versandt und ausgewertet.

Um die Adressen der KUP-Eigentümer zu beziehen, wurden auskunftswillige Teilnehmer über Baumschulen und Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie Regio-

nalzeitungen gewonnen. Die Stichprobe wurde nach dem Schneeballsystem (Bruns 2008; Kastin 2008) erweitert. Schließlich konnten Adressen von 372 Eigentümern ausfindig gemacht werden, was der Anzahl der registrierten KUP-Betreiber nach InVeKoS-Datenbank (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) 2015) (Stand 2011) entspricht.

Die für die Wirtschaftlichkeit relevanten Aspekte der Bewirtschaftungspraxis wurden der Literaturstudie (siehe Kapitel 4.1.2 ff.) entnommen und in zehn leitfadengestützten Interviews (Groves et al. 2009) mit KUP-Eigentümern überprüft beziehungsweise ergänzt. Die Auswertung der Interviews erfolgte in Anlehnung an Mayring (2010). Die daraus abgeleiteten standardisierten Fragebögen wurden an zehn zufällig ausgewählten KUP-Eigentümern getestet, wobei die Teilnehmer um Anmerkungen zur Verständlichkeit, des Inhalts (Vollständigkeit) und der Länge gebeten wurden (Raab-Steiner und Benesch 2008; Kromrey 2006). Diese Anmerkungen wurden umgesetzt und der Fragebogen danach an 372 KUP-Eigentümer in Bayern versandt.

Die beantworteten Fragebögen (n=167) enthielten Daten zu den Betreibern (unter anderem Beruf und Wohnort) und zur KUP: Baumart und Sorte, Jahr der Anlage, Pflanzverband, Pflanzzahl und angestrebte Umtriebszeit sowie über die Bewirtschaftungsweise und die Prozesskette. Letztere reichte von der Pflanzung und Pflege über Ernte, Hacken und Lagerung bis zur Nutzung oder dem Verkauf der Biomasse. Zusätzlich wurde abgefragt, ob die einzelnen Arbeitsschritte in Eigenregie oder durch Dienstleister erledigt werden.

Für die Analyse der Bewirtschaftungspraxis der kommerziellen KUP in Bayern wurden Methoden und dementsprechend Parameter der deskriptiven Statistik verwendet, da der IST-Zustand der Bewirtschaftung zusammengefasst dargestellt werden sollte.

3.3 Biomasseerträge von kommerziell betriebenen KUP in Bayern

Der Biomasseertrag wird in verschiedenen Studien als einer der Haupteinflussfaktoren der Wirtschaftlichkeit beschrieben (z.B. Krasuska und Rosenqvist 2012; Kröber et al. 2010; Heaton et al. 1999). Gleichzeitig jedoch sind Biomasseerträge nicht (ohne Weiteres) von Studien anderer Regionen übertragbar, da sie von mehreren Faktoren beeinflusst werden. So beeinflussen die Baumart und Sorte (Serapiglia et al. 2013; Verlinden et al. 2013), die Pflanzdichte, die Bewirtschaftungsintensität und die standörtlichen Gegebenheiten – besonders die Wasserverfügbarkeit und Temperatur (Petzold et al. 2010) – die Biomasseerträge von KUP (Dimitriou et al. 2011; Liebhard 2007; Bullard et al. 2002). Deshalb sind Biomasseerträge, die die standörtlichen Gegebenheiten und die

Bewirtschaftungspraxis der KUP-Betreiber möglichst gut repräsentieren, entscheidend für die betriebswirtschaftliche Analyse von KUP. Da zum Zeitpunkt der Studie jedoch keine Daten von kommerziell betriebenen KUP in Bayern vorlagen und nicht ausreichend geklärt war, inwiefern die Biomasseerträge von bayerischen Versuchsflächen die realen Bedingungen repräsentieren (z.B. Krasuska und Rosenqvist 2012; Larsson und Rosenqvist 1996), wurden im Winter 2011/2012 Biomasseerträge der kommerziell betriebenen KUPs erhoben.

3.3.1 Auswahl der Bestände

Für die Biomasseermittlung wurden 30 Bestände (knapp 10 % der bis Ende 2011 existierenden KUP-Bestände) des vorliegenden KUP-Betreiberdatensatzes ausgewählt. Da für die betriebswirtschaftliche Analyse der Ertrag zum Zeitpunkt der Ernte von Interesse ist, erfolgte die Auswahl anhand des Triebalters, wobei die Stichprobe entsprechend der genannten, für Bayern typischen Umtriebszeiten (Abbildung 5) gezogen wurde. Da das Triebalter mit der Einzelstammmasse korreliert (Nielsen et al. 2014) und auch als Repräsentant für sich unterscheidende Bewirtschaftungsweisen und Prozessketten steht (kurzer und mittlerer Umtrieb) (Schreiner 1970), wird in der Literatur häufig zwischen KUP mit a) kurzen Umtriebszeiten von ungefähr drei Jahren, hohen Pflanzzahlen und vollmechanisierten Ernteverfahren wie dem Gehölzmähhäcksler und b) längeren Umtriebszeiten von fünf Jahren und mehr, mit geringeren Pflanzzahlen und vorwiegend forstlichen Ernteverfahren unterschieden (z.B. Nielsen et al. 2014; Schweier und Becker 2012; Spinelli et al. 2009; Schreiner 1970). Daher wurden die Biomasseerträge in zwei Altersgruppen (stellvertretend für die unterschiedlichen Bewirtschaftungsverfahren) getrennt ausgewertet. Somit ergeben sich zwei Gruppen von dreijährigen (G 3) und fünf bis zehnjährigen Beständen (G 5+), welche acht beziehungsweise 22 Bestände enthalten. Es lagen weder Bestände vor, die älter als zehn Jahre waren, noch wurden längere Umtriebszeiten für Bayern angegeben (siehe Kapitel 4.2).

3.3.2 Biomasseermittlung

Verfahren zur Biomasseermittlung stellen einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand des Schätzverfahrens dar (Verwijst und Telenius 1999). In der vorliegenden Studie war die Genauigkeit des Schätzverfahrens ausschlaggebend, weshalb ein Schätzverfahren basierend auf allometrischen Biomassefunktionen gewählt wurde. Die Biomasseermittlung mittels bestandesspezifischer allometrischer Biomassefunktionen zählt zu den genauesten Schätzverfahren für KUP (Röhle et al. 2006; Nordh und Verwijst 2004; Telenius und Verwijst 1995). Dabei wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen einer einfach messbaren Größe (beispielsweise dem Brusthöhendurchmesser ($d_{1,3}$) [cm])

und der Zielgröße Triebmasse mittels nichtlinearer Regression erstellt und geprüft (Verwijst und Telenius 1999; Telenius und Verwijst 1995). Werden bestandesspezifische und nicht verallgemeinerte Biomassefunktionen verwendet, so bringt das Einbeziehen des Faktors Höhe keine verbesserte Schätzgenauigkeit (Verwijst und Telenius 1999). Allometrische Biomassefunktionen bieten den Vorteil, dass der Aufwand für eine repräsentative Stichprobe minimiert wird, da von einer vergleichsweise einfach erfassbaren Brusthöhendurchmesserstichprobe – die die Durchmesserhäufigkeiten des Bestandes repräsentieren – Triebgewichte abgeleitet werden können, die die Triebgewichtshäufigkeitsverteilung des Bestandes repräsentieren. Somit lässt sich ein mittleres Triebgewicht pro Bestand bei 0 % Wassergehalt (BM_{atro} [Mg_{atro}]) bestimmen, das durch Multiplikation mit der Anzahl von Trieben pro Bestand (N_a) die Bestandestrockenmasse pro Hektar (BM_{Mgatro} [Mg_{atro}]) ergibt (Formel 3.1).

$$BM_{Mgatro} = N_a \times BM_{atro} \quad (3.1)$$

Die in Kapitel 4.3 dargestellten Biomasseerträge beziehen sich auf die oberirdische Biomasse, ohne Blätter, die mit gängigen Ernteverfahren bereitgestellt werden kann. Aus diesem Grund wurden alle Probestämme auf einer Höhe von 10 cm über dem Grund geerntet. Um systematische Messfehler zu minimieren, wurden die erhobenen Eingangsgrößen mit einem festgelegten Stichprobendesign erhoben, welches zusammen mit den entsprechenden Ausgangsgrößen erläutert wird. Alle Biomasseerträge wurden auf die Bestandesgröße von einem Hektar umgerechnet, um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Beständen zu ermöglichen.

Die Triebzahl pro Bestand wurde anhand Formel 3.2 abgeleitet und auf einen Hektar normiert berechnet:

$$N_a = \frac{(N_i - N_d) \times N_s}{A_{KUP}} \quad (3.2)$$

Wobei N_a die aktuelle Triebzahl pro Hektar, N_i die ursprüngliche Pflanzzahl, N_d die Anzahl der bereits abgestorbenen Pflanzen, N_s die durchschnittliche Triebzahl pro Pflanze und A_{KUP} die Fläche des Bestandes [ha] ist.

Die Eingangsdaten wurden wie folgt erhoben:

Ursprüngliche Pflanzzahl: Die von den KUP-Betreibern angegebenen Pflanzzahlen wurden im Bestand überprüft. Dazu wurden durchschnittliche Pflanzabstände an 30 Pflanzen in je zehn Reihen (300 Pflanzabstände innerhalb der Reihe und 300 Pflanzabstände

zwischen den Reihen) ermittelt. Die beprobten Stöcke waren über den Bestand verteilt, um die Heterogenität des Bestandes möglichst gut zu repräsentieren. Bei bereits abgestorbenen Pflanzen wurde der Pflanzabstand der nächstgelegenen vitalen Pflanze bestimmt. Danach wurde die durchschnittliche Fläche pro Pflanze und folglich die Pflanzzahl pro Hektar ermittelt.

Anzahl der bereits abgestorbenen Pflanzen: Die Anzahl der abgestorbenen Pflanzen wurde anhand der oben genannten Pflanzplätze ermittelt und die Ausfallrate bestimmt. Im Anschluss wurde die Anzahl der abgestorbenen Pflanzen durch Multiplikation der Ausfallrate mit der ursprünglichen Pflanzzahl abgeleitet.

Durchschnittliche Triebzahl pro Pflanze: Für die Ermittlung der durchschnittlichen Triebzahl pro Pflanze wurden alle Triebe der oben genannten 300 Pflanzplätze erhoben und durch die Anzahl der vitalen Pflanzen dividiert.

Durchmesser und Probestämme zur Herleitung der allometrischen Biomassefunktionen

Um bestandesspezifische Biomassefunktionen herzuleiten, wurde wie folgt vorgegangen: Zunächst wurde der $d_{1,3}$ von mindestens 250 Trieben der beprobten Reihen mittels elektronischer Kluppe (Mantax Digitec, Messgenauigkeit: 0,1 cm) bestimmt und die Durchmesserhäufigkeitsverteilung des Bestandes hergeleitet. Danach wurden, entsprechend der Durchmesserhäufigkeitsverteilung, 25 Probestämme entnommen und deren $d_{1,3}$ und Frischmasse (Hängewaage, Messgenauigkeit: 0,01 kg) [Mg] gemessen. Die Trockenmasse [M_{gatro}] wurde anhand zweier Stammscheiben pro Probestamm, die bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet wurden, ermittelt (DIN EN 52 183). Im Anschluss wurde je Bestand eine bestandesspezifische Biomassefunktion hergeleitet, die den funktionalen Zusammenhang zwischen Trockenmasse und $d_{1,3}$ der Probestämme beschreibt. Dazu wurde die nichtlineare Regression (Bates und Watts 1988) (siehe Kapitel 3.3.3) verwendet. Die Triebtrockenmasse (BM_{Mgatro} [M_{gatro}]) errechnet sich wie in Formel 3.3 beschrieben:

$$BM_{Mgatro} = a_0 \times d_{1,3}^{a_1} \quad (3.3)$$

Wobei $d_{1,3}$ der Brusthöhendurchmesser [cm] und a_0 und a_1 Regressionskoeffizienten sind.

Mit Hilfe dieser bestandesspezifischen Biomassefunktionen konnte für jeden Durchmesserwert pro Fläche eine entsprechende Trockenmasse und anschließend die mittlere

Triebmasse pro Bestand sowie die Bestandestrockenmasse nach Formel 3.1 errechnet werden.

3.3.3 Statistische Auswertung

Die statistischen Analysen erfolgten mit der Software „R 2.15.1“ (R Core Team 2012). Das Signifikanzniveau aller Tests betrug $\alpha=0,05$.

Für die Herleitung der bestandesspezifischen Biomassefunktionen wurde der Algorithmus „nlS“ des Pakets „stats“ der Software „R 2.15.1“ (R Core Team 2012) verwendet.

Die Bewertung der Modellgüte der einzelnen, also bestandesspezifischen, Biomassefunktionen erfolgte anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2). Außerdem wurden die relative Verzerrung (relativer Bias ($\bar{e}\%$)) und die relative Präzision ($s_e\%$), durch Vergleich der 25 ($i = 1, 2, \dots, n$) gemessenen Triebtrockenmassen (beobachtete Werte, X_i) und der errechneten Triebtrockenmassen (geschätzte Werte, x_i) je Bestand, in Anlehnung an Walther et al. (2005) und Pretzsch und Durksy (2001), bestimmt.

Um die Hypothese zu prüfen, dass KUP mit älteren Trieben höhere Biomasseerträge leisten, wurden die Erträge der beiden Gruppen G 3 und G 5+ mittels Mann-Whitney-Wilcoxon-Tests verglichen, da keine Normalverteilung vorlag. Dieser wurde aus demselben Grund auch für den Vergleich mit den Erträgen der bayerischen Versuchsflächen verwendet.

3.4 Betriebswirtschaftliche Analyse von KUP – KUP als Portfoliobestandteil von Marktfruchtbaubetrieben in Bayern

Im Folgenden wird die Vorgehensweise der betriebswirtschaftlichen Analyse von KUP beschrieben. Nach der Definition der Produktionsverfahren konventioneller landwirtschaftlicher Kulturen und KUP wurde deren Wirtschaftlichkeit berechnet und verglichen. Die ökonomische Zielgröße einjähriger Kulturen ist der Deckungsbeitrag I. Die ökonomische Bewertung der KUP erfolgte anhand der Annuität auf Basis der variablen Kosten, also einem Deckungsbeitragsäquivalent. Dieses gilt als geeignete Zielgröße, um die Wirtschaftlichkeit der mehrjährigen Kultur KUP mit der einjährigen Kulturen zu vergleichen (El Kasmoui und Ceulemans 2012; Ericsson et al. 2006; Rosenqvist und Dawson 2005). Um die Variabilität der Erzeugerpreise und Biomasseerträge und die Korrelationen der ökonomischen Zielgrößen der jeweiligen Kulturarten abzuleiten, wurde der Zeitraum von 2004 bis 2013 betrachtet. Anschließend wurde eine Portfoliooptimierung an acht Modellbetrieben durchgeführt.

Die finanzielle Bewertung von KUP im Vergleich zu alternativen landwirtschaftlichen Kulturen erfolgte in vier Modellregionen in Bayern. Diese Modellregionen, welche sich vor allem durch standörtliche Gegebenheiten (Boden und Klima) und angebaute Kulturarten unterschieden, waren die Landkreise: Aichach-Friedberg (AIC), Pfaffenhofen an der Ilm (PAF), Regensburg (R) und Wunsiedel (WUN). Für jeden dieser Landkreise wurden anfangs neun Hauptkulturarten (ohne Sonderkulturen), basierend auf der Anbaufläche je Kultur und Landkreis nach Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) (2007), festgelegt. Grünland wurde von der betriebswirtschaftlichen Analyse ausgenommen, da dieses derzeit aufgrund der Genehmigungs- und Ausgleichspflicht von Grünlandumbruch (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) 2014) in der Regel nicht für die Kultivierung von KUP in Frage kommt. Anschließend wurden für jede Modellregion zwei Modellbetriebe in Zusammenarbeit mit den landwirtschaftlichen Beratern der entsprechenden Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten definiert und die jeweils zu berücksichtigenden Kulturen festgelegt, um die Produktionsprogramme der Regionen möglichst gut abzubilden. Dazu wurde je Modellregion ein Modellbetrieb mit Schwerpunkt auf dem Getreideanbau und einer mit Schwerpunkt auf deckungsbeitragsstarken Hackfrüchten definiert. Demnach ergaben sich acht Modellbetriebe, bei denen die in Tabelle 2 genannten Kulturarten berücksichtigt wurden. Da sich für die Modellregion Aichach-Friedberg herausstellte, dass dort vermehrt gemischte Betriebe vorherrschen, wurden Hackfrüchte in beiden Modellbetrieben berücksichtigt; jedoch wurde der Hackfruchtanteil in Betrieben mit vornehmlichem Getreideanbau flächenmäßig stärker beschränkt. Dem Landkreis Wunsiedel attestierten die landwirtschaftlichen Berater hochspezialisierte Hackfruchtbaubetriebe, die die phytosanitären Fruchtfolgerestriktionen durch sogenannten Flächentausch umgehen und deren Kartoffelanteil somit weit über den bei Seiffert (2014) als Grenze angenommenen 33 % der Ackerfläche liegt. Dies wurde bei der Portfoliooptimierung (siehe Kapitel 4.4.2 und 4.4.4) berücksichtigt³.

³ In der Publikation Hauk et al. (2015a) wurden die ökonomischen Effekte, die durch Integration von KUP in landwirtschaftliche Portfolios entstehen, anhand der beiden Modellregionen Aichach-Friedberg und Wunsiedel dargestellt. Für die Modellbetriebe Wunsiedels wurden hierbei klassische Fruchtfolgerestriktionen nach Seiffert (2014) angenommen, um die Diversifikationseffekte des KUP-Anbaus unabhängig von regionalspezifischen Anteilen des Kartoffelanbaus zu untersuchen.

Tabelle 2: Übersicht der Kulturarten, welche in den jeweiligen Modellbetrieben berücksichtigt wurden. Dabei kennzeichnet „AIC“ die Modellregion Aichach-Friedberg, „PAF“ Pfaffenhofen an der Ilm, „R“ Regensburg (Landkreis) und „WUN“ Wunsiedel. Betriebe mit dem Anbauschwerpunkt Getreide sind mit „G“ und diejenigen mit dem Anbauschwerpunkt Hackfrucht mit „H“ gekennzeichnet

Kulturart	AIC		PAF		R		WUN	
	G	H	G	H	G	H	G	H
Grünmais	X	X	X	X	X	X	X	--
Körnermais	X	X	X	X	X	X	--	--
KUP	X	X	X	X	X	X	X	X
Sommergerste	--	--	--	--	--	--	X	X
Speisekartoffel	≤ 6 %	X	--	--	--	X	--	X
Wintergerste	X	X	X	X	X	--	X	--
Winterraps	X	X	X	X	X	--	X	--
Winterroggen	--	--	--	--	--	--	X	--
Winterweizen	X	X	X	X	X	--	--	--
Zuckerrübe	≤ 2 %	X	--	X	--	X	--	--

3.4.1 Definition der Produktionsverfahren und Datengrundlage der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen und KUP

3.4.1.1 Produktionsverfahren konventioneller landwirtschaftlicher Kulturen

Für die Berechnung der Deckungsbeiträge der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen konnte auf eine umfassende Datenbasis der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft und des Bayerischen Landesamtes für Statistik zugegriffen werden. Die variablen Kosten wurden, aufgrund der vorwiegend geringen Schlaggrößen in Bayern, für die kleinste Schlaggröße von 2 ha von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) bezogen. Da einige Arbeitserledigungskosten erntemengenspezifisch sind, wurden die Arbeitserledigungskosten des Jahres 2013 (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) basierend auf dem mittleren Ertrag der untersuchten Zeitreihe kalkuliert. Die bayerischen Erzeugerpreise konnten ebenso von Reisenweber (2014a) und Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (2014) bezogen werden. Um die standörtlichen Gegebenheiten der

untersuchten Modellregionen durch das Ertragsniveau zu repräsentieren, wurden landkreisspezifische Erträge von Reisenweber (2014b) und Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) (2014) verwendet. Die Zusammenfassung der zugrunde gelegten Kosten, Preise und Biomasseerträge ist dem Anhang (Tabelle 9-12) zu entnehmen.

3.4.1.2 Produktionsverfahren KUP

Die Definition des Produktionsverfahrens für KUP erfolgte in Anlehnung an die in Kapitel 4.2 vorgestellte Bewirtschaftungspraxis in Bayern. Demnach wurde der Anbau der Baumart Pappel (*Populus ssp.*) bei einer achtjährigen Umtriebszeit und einer Standdauer (Investitionszeitraum) von 24 Jahren bilanziert. Dazu wurden Flächenvorbereitung mittels Pflug, Egge und Vorauflaufmittel, maschinelle Pflanzung der 5000 Stecklinge pro Hektar, zweimalige Unkrautbekämpfung im Jahr der Anlage und motormanuelle Ernte während der Vegetationsruhe im Winter angenommen. Das kranbeschickte Hacken des Erntegutes zu Hackschnitzeln am Feldrand erfolgte im darauffolgenden Sommer. Als Transportdistanz zum Käufer der Biomasse wurden 20 km angenommen (siehe Preise), Kosten für das Laden der Biomasse sind in den Transportkosten enthalten. Nach der letzten Ernte erfolgte die Rekultivierung mittels Rodungsfräse. Tabelle 3 stellt die Kosten der KUP-Bewirtschaftung je Modellregion dar. Die Kosten der Flächenvorbereitung, Pflanzung und Herbizidbehandlung (zweimalig nach Pflanzung) basieren auf Angaben von Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (2015) und Wagner et al. (2012). Die Kosten für das Pflanzgut wurden mit 0,2 € pro Steckling angenommen. Die Kosten der Ernte, des Rückens und Hackens basieren auf Burger (2011) und die Transportkosten auf Schweier (2013). Da die Kosten für Ernte, Hacken und Transport in Abhängigkeit der Erntemenge variieren, wurden diese mengenspezifischen Literaturangaben an die jeweilige Erntemenge pro Modellregion angepasst. Die weiteren Einzelkosten – Kosten für Flächenvorbereitung, Pflanzgut und Pflanzung, Herbizidbehandlung und Rekultivierung – sind von den gewählten Arbeitsmitteln und -Verfahren abhängig und nicht erntemengenspezifisch, weshalb diese für alle Modellregionen als gleich angenommen wurden. Für die Berechnung der variablen Transportkosten wurden die von Schweier (2013) genannten Vollkosten um die Fixkosten reduziert und an die Transportdistanz von 20 km angepasst. Sowohl für die Transportkosten als auch für die Erlöse wurden 5 % Mengenverluste bei der Ernte angesetzt (Schweier 2013). Die Annahmen der Rekultivierungskosten stammen von Wagner et al. (2012).

Tabelle 3: Übersicht der Kosten der KUP-Bewirtschaftung der vier Modellregionen (verändert nach Hauk et al. 2015a)

	Aichach- Friedberg	Pfaffenhofen an der Ilm	Regensburg (Landkreis)	Wunsiedel
	Kosten [€ ha⁻¹]	Kosten [€ ha⁻¹]	Kosten [€ ha⁻¹]	Kosten [€ ha⁻¹]
Flächenvorbereitung (inkl. Vorauflaufmittel)	242,65	242,65	242,65	242,65
Pflanzen und Pflanzung	1144,00	1144,00	1144,00	1144,00
Herbizidbehandlung (nach Pflanzung)	87,00	87,00	87,00	87,00
Ernte, Rücken und Hacken	4264,55	3489,66	2728,18	2574,97
Transport	1761,93	1441,78	1127,17	1063,87
Rekultivierung	1950,00	1950,00	1950,00	1950,00

Preise

Die Preise der KUP Hackschnitzel für den Zeitraum 2004 bis 2013 wurden der Wald-Hackschnitzelpreisstatistik von C.A.R.M.E.N. e.V. (2015) entnommen und sind im Anhang dieser Arbeit aufgeführt (Tabelle 13). Diese beziehen sich auf einen Wassergehalt von 35 % und setzen die Lieferung im Umkreis von 20 km voraus. Letztere ist bei den oben genannten Transportkosten berücksichtigt. Eine Holzpreisreduktion für KUP-Hackschnitzel wurde nicht vorgenommen, da es aus energetischer und technischer Sicht für KUP-Holz in der betrachteten Umtriebszeit keiner Preisabschläge bedarf (CREFF Project Consortium 2011).

Erträge

Um das Ertragsniveau unter den aktuellen Standorts- und Bewirtschaftungskonditionen möglichst gut zu repräsentieren, wurden die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Erträge (Kapitel 4.3), für fünf bis zehnjährige Bestände in der ersten Rotation, verwendet. Da in den Folgerotationen Ertragssteigerungen zu erwarten sind (Larsen et al. 2014a; Strauss und Wright 1990), wurde das Ertragsniveau nach Horn et al. (2013) angepasst und damit das Ertragsniveau der zweiten Rotation als zu erwartender⁴ Ertrag in Bayern definiert.

⁴ Der erwartete Ertrag ist äquivalent zu dem Mittelwert des Ertrags aller Rotationen der jeweiligen Modellregion

Der erwartete Ertrag lag hierbei 1,6-fach über dem durchschnittlichen Ertrag der ersten Rotation. Auch wenn weitere Ertragssteigerungen in darauffolgenden Rotationen wahrscheinlich sind (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) 2012; Biertümpfel et al. 2012), sind diese noch nicht als wissenschaftlich gesichert anzusehen (z.B. Dillen et al. 2013). Daher wurden konservative Ertragsannahmen bevorzugt. Die Variabilität der Erträge wurde von der Ertragsdatensammlung in Kröber et al. (2009) abgeleitet. Schließlich wurde das bayerische Ertragsniveau an die Modellregionen angepasst, um den standörtlichen Gegebenheiten der Modellregionen Rechnung zu tragen. Dies erfolgte anhand des standortspezifischen Ertragsmodells für KUP in Bayern (Jorissen et al. 2014) nach Formel 3.4.

$$y_r = \frac{E_{yo}}{E_{yp}} \times E_{yr} \quad (3.4)$$

Wobei y_r der erwartete Ertrag [$\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] der Modellregion r , E_{yo} der erwartete Ertrag [$\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] Bayerns der zweiten Rotation, E_{yp} der erwartete Ertrag [$\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] Bayerns nach dem standortspezifischen Ertragsmodell und E_{yr} der erwartete Ertrag [$\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] der Modellregion nach dem standortspezifischen Ertragsmodell ist.

Die erwarteten Biomasseerträge der vier Modellregionen sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: KUP-Biomasseerträge (dGZ [$\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]) der vier Modellregionen (verändert nach Hauk et al. 2015a)

	Aichach-Friedberg	Pfaffenhofen an der Ilm	Regensburg (Landkreis)	Wunsiedel
Biomasseertrag erste Rotation [$\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]	9,00	7,35	5,80	5,48
Erwarteter Biomasseertrag [$\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$]	14,77	12,08	9,45	8,92

Die in Mg_{atro} gegebenen Biomasseerträge wurden für die finanzielle Bewertung, entsprechend der Preisreferenz, in Biomasseerträge bei einem Wassergehalt von 35 % konvertiert.

3.4.2 Finanzielle Bewertung

3.4.2.1 Finanzielle Zielgrößen

Die finanzielle Zielgröße der betriebswirtschaftlichen Analyse war der Deckungsbeitrag I, da fixe Kosten sehr unterschiedlich von Betrieb zu Betrieb ausfallen können und zudem als unabhängig vom Produktionsprogramm anzusehen sind (Musshoff und Hirschauer 2013). Für annuelle Kulturen wurden dazu die variablen Kosten von den Leistungen – Erzeugerpreise multipliziert mit den Erträgen – abgezogen.

Um die Wirtschaftlichkeit der mehrjährigen Kultur KUP mit derjenigen der annualen Kulturen zu vergleichen, wurden die Zahlungsströme der KUP abgezinst, der Kapitalwert berechnet und dieser in eine Annuität überführt. Die errechnete Annuität, bei der wiederum nur variable und keine fixen Kosten berücksichtigt wurden, gilt als Deckungsbeitragsäquivalent. Dieses wird in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten (z.B. El Kasmioui und Ceulemans 2012; Rosenqvist und Dawson 2005; Rosenqvist H. 1996; Bergez et al. 1991) als geeignete finanzielle Zielgröße für den Vergleich von KUP und annualen Kulturen beschrieben. Da der hierzu verwendete Kalkulationszinssatz einerseits die Kapitalkosten und andererseits eine investitionsspezifische Risikoprämie adäquat repräsentieren soll, ist die Wahl eines angemessenen Kalkulationszinssatzes für KUP nicht trivial (vergleiche Hauk et al. 2014a; El Kasmioui und Ceulemans 2013). In dieser Studie wurde ein Kalkulationszinssatz von 5 % verwendet. Dieser entspricht dem Kalkulationszinssatz, welcher in betriebswirtschaftlichen Analysen für KUP in Mitteleuropa typisch ist (z.B. Schweier 2013; Krasuska und Rosenqvist 2012; Kröber et al. 2010; Ericsson et al. 2009) und entspricht außerdem dem mittleren Kalkulationszinssatz der in die Literaturstudie einbezogenen Artikel (vergleiche hierzu Kapitel 4.1.4). Um die Auswirkungen eines veränderten Kalkulationszinssatzes auf die Wirtschaftlichkeit von KUP zu prüfen, wurde außerdem eine Sensitivitätsanalyse mit Kalkulationszinssätzen von 3 % und 7 % durchgeführt. Deren Ergebnis in Kapitel 4.4.1 exemplarisch für die Modellregion Aichach-Friedberg dargestellt ist.

3.4.2.2 Ableitung des finanziellen Risikos und der Korrelationen zwischen den finanziellen Zielgrößen der jeweiligen Kulturen

Als Maß für das finanzielle Risiko wurde die Standardabweichung (SD) des Deckungsbeitrags herangezogen, da sie (als Quadratwurzel der Varianz) die Variabilität einer normalverteilten Größe sehr genau beschreibt (Markowitz 2014; Sharpe 1964; Markowitz 1952) und somit in der Finanzwissenschaft häufig verwendet wird, um Risiko zu quantifizieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass sie aufgrund der selben Einheit wie die zu beschreibende Größe einfach zu interpretieren ist.

Zur Herleitung des finanziellen Risikos der untersuchten Kulturen wurde der Betrachtungszeitraum 2004 bis 2013 gewählt, da vorherige Preise für landwirtschaftliche Produkte von den EU-Agrarsubventionen beeinflusst waren und somit nicht geeignet sind, die aktuellen Bedingungen zu repräsentieren. Die Herleitung der entscheidungsrelevanten Zielgrößen Deckungsbeitrag(-säquivalent) und deren Standardabweichung erfolgte für landwirtschaftliche Kulturen mittels historischer und für KUP mittels stochastischer Simulation. Für einjährige landwirtschaftliche Kulturen wurde das finanzielle Risiko folgendermaßen hergeleitet: Zunächst wurden die Leistungen – Preise des jeweiligen Jahres multipliziert mit den Biomasseerträgen des jeweiligen Jahres – für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums 2004 bis 2013 berechnet. Letztlich wurde der Deckungsbeitrag für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums, durch Subtraktion der aktuellen Kosten des Jahres 2013, errechnet. Um jedoch die historischen Leistungen an das Preisniveau des Jahres 2013 anzupassen, wurden in einem Zwischenschritt, in Anlehnung an Castro et al. (2015), die Leistungen durch den Mittelwert der Leistungen der Zeitreihe normiert und schließlich mit dem Wert der Leistung des aktuellen Jahres 2013 multipliziert. So konnte die Schwankung der DB des Betrachtungszeitraums, basierend auf empirischen Preis- und Ertragsdaten, auf das aktuelle Niveau übertragen und die Standardabweichung des Deckungsbeitrags für jede einjährige landwirtschaftliche Kultur abgeleitet werden.

Für eine vergleichbare Herleitung des finanziellen Risikos der mehrjährigen KUP wurde folgendermaßen vorgegangen: Zunächst wurden die Kapitalwerte der Ein- und Auszahlungen von KUP, basierend auf dem Erzeugerpreis des Jahres 2013, dem mittleren Biomasseertragsniveau der jeweiligen Modellregion und den in Kapitel 3.4.1.2 aufgeführten Kosten berechnet. Anschließend wurden die Kapitalwerte der Ein- und Auszahlungen annuisiert. Da für KUP keine umfassenden Ertragsdaten vorlagen, aus welcher sich die jährliche Ertragsvariabilität und schließlich die Variabilität der finanziellen Zielgröße ableiten ließen, wurde das Ertragsrisiko mittels Monte-Carlo-Simulation aus der Ertragsdatensammlung aus Kröber et al. (2009) abgeleitet. Diese geben Verteilungsparameter von Ertragsdaten für mittlere und gute Standorte an, welche entsprechend des mittleren Ertrags der jeweiligen Modellregionen zugewiesen wurden. Schließlich wurde die Variabilität der Einzahlungen (Produkt aus Erzeugerpreis und Biomasseertrag) mittels Bootstrapping (Chernick 2008; Efron 1979) der Erzeugerpreise des Betrachtungszeitraums hergeleitet, indem der Erzeugerpreis eines jeden Jahres des Betrachtungszeitraums (zehn Preise des Betrachtungszeitraums à 1000 Wiederholungen) mit Biomasseerträgen, entsprechend der oben generierten Verteilung, multipliziert wurde (daraus resultierten 10000 Einzahlungen). Analog zur Vorgehensweise bei den landwirtschaftlichen Kulturen wurden daraufhin die jährlichen Einzahlungen der Zeitreihe durch den Mittelwert der Einzahlungen der Zeitreihe normiert und mit dem Wert der Einzahlung des

aktuellen Jahres 2013 multipliziert. Im Anschluss konnten hiervon die annuisierten Auszahlungen abgezogen, die Deckungsbeitragsäquivalente berechnet und die Standardabweichung der Deckungsbeitragsäquivalente der Zeitreihe abgeleitet werden.

Aus den Deckungsbeiträgen und Deckungsbeitragsäquivalenten der untersuchten Kulturen konnten schließlich die Korrelationskoeffizienten und Kovarianzen, welche für die Portfoliooptimierung benötigt wurden, abgeleitet und in Korrelations- beziehungsweise Kovarianzmatrizen dargestellt werden. Hierbei ist zu beachten, dass für KUP unterstellt wurde, dass Preise und Erträge unabhängig voneinander sind, während die Deckungsbeiträge der landwirtschaftlichen Kulturen die empirischen Korrelationen zwischen Preisen und Erträgen beinhalten.

3.4.2.3 Portfoliooptimierung

Um die betriebswirtschaftlichen Effekte, welche sich durch Diversifikation landwirtschaftlicher Betriebe durch KUP ergeben, zu quantifizieren, wurde die Portfoliotheorie verwendet. Die Portfoliotheorie wurde von Markowitz (1952) eingeführt und später von Sharpe (1964) zum Capital Asset Pricing Model (CAPM) weiterentwickelt. Ziel der Portfoliotheorie ist es, die Mischungsanteile verschiedener Investitionsalternativen (Portfoliokomponenten) so zu verändern, dass das finanzielle Risiko (Variabilität der finanziellen Zielgröße) bei einem definierten erwarteten⁵ betriebswirtschaftlichen Erfolg minimiert wird oder umgekehrt, dass der betriebswirtschaftliche Erfolg bei einer bestimmten akzeptierten Variabilität maximiert wird. Die Grundlage dafür, dass das Risiko durch Mischung verschiedener Investitionsalternativen vermindert – in der Theorie sogar nahezu eliminiert – werden kann, ist, dass sich die betriebswirtschaftlichen Erfolge der einzelnen Investitionsalternativen nicht vollständig gleichgerichtet entwickeln (Markowitz 1952). Ein Maß dafür ist der Korrelationskoeffizient k . Der Einbezug der Korrelationen zwischen den verschiedenen Investitionsalternativen nimmt demnach eine bedeutende Rolle bei der Portfoliooptimierung ein und wird bei der Berechnung des Portfoliorisikos berücksichtigt. Dass die Portfoliotheorie auch für die Landnutzungsoptimierung anwendbar ist, wurde in zahlreichen Studien belegt (z.B. Djanibekov und Khamzina 2014; Hahn et al. 2014; Castro et al. 2013; Paydar und Qureshi 2012; Knoke et al. 2005; Roche und McQuinn 2004; Macmillan 1992).

Die Standardabweichung – als quantitatives Risikomaß – des betriebswirtschaftlichen Erfolgs des Portfolios s_P errechnet sich wie folgt:

⁵ Der erwartete betriebswirtschaftliche Erfolg, beziehungsweise der erwartete Deckungsbeitrag des Portfolios ist äquivalent zu dem Mittelwert des betriebswirtschaftlichen Erfolgs, beziehungsweise des Deckungsbeitrags des Portfolios.

$$s_P = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_i \times f_j \times \text{cov}_{i,j}} \quad (3.5)$$

Wobei gilt: $\text{cov}_{i,j} = k_{i,j} \times s_i \times s_j$; $\text{cov}_{i,i} = s_i^2$ und f die anteilige Fläche, i und j die jeweiligen Kulturarten, $\text{cov}_{i,j}$ die Kovarianz des betriebswirtschaftlichen Erfolgs der Kulturarten i und j , s die Standardabweichung der jeweiligen Kulturart und k der Korrelationskoeffizient des betriebswirtschaftlichen Erfolgs der Kulturarten i und j ist. Als Nebenbedingungen gelten: $\sum f_i = 1$ und $f_i \geq 0$.

Der erwartete betriebswirtschaftliche Erfolg des Portfolios E_P errechnet sich wie folgt, wobei E_i der betriebswirtschaftliche Erfolg der Kulturart i ist:

$$E_P = \sum_{i=1}^N f_i \times E_i \quad (3.6)$$

Die Verteilung der Erwartungswerte der einzelnen Portfoliokomponenten wird somit durch die ersten beiden Momente ihrer Verteilung, dem Erwartungswert und der Standardabweichung, beschrieben. Dies setzt allerdings die Normalverteilung der Erwartungswerte der einzelnen Investitionsalternativen voraus (Markowitz 1952), die mittels Shapiro-Wilk-Tests getestet wurden. Eine weitere Voraussetzung für die Anwendung der Portfoliotheorie ist, dass der Investitionsentscheidungsträger risikoavers ist. Dies ist bei vielen Landwirten, den in dieser Studie zugrunde gelegten Landnutzungsentscheidungsträgern, der Fall, wenngleich deren Risikoaversion von mehreren Faktoren, wie zum Beispiel deren Betriebsvermögen und persönlicher Einstellung, abhängt (Moschini und Hennessy 2001).

Die Portfoliooptimierung erfolgte mittels MS EXCEL®-Solver, basierend auf der nichtlinearen Programmierung. Nachdem das risikominimale Portfolio bestimmt wurde (Zielgröße: s_P ; Zielfunktion: $\min s_P$), wurde der maximale Portfolioerfolg (Zielgröße: E_P ; Zielfunktion $\max E_P$, bei $s_P \leq s_a$; wobei s_a die maximal akzeptierte Standardabweichung des Portfolios ist) schrittweise durch Erhöhen des zulässigen Portfoliorisikos bestimmt. Dadurch konnten effiziente⁶ Portfolios berechnet werden, die für das jeweils zugelassene Portfoliorisiko den maximalen betriebswirtschaftlichen Erfolg erzielten. Als Nebenbedin-

⁶ Ein Portfolio gilt nach Markowitz 1952 als effizient, wenn bei einem gewissen erwarteten finanziellen Ertrag kein Portfolio mit einem geringeren Risiko oder bei einem gewissen Risiko kein Portfolio mit einem höheren erwarteten finanziellen Ertrag existiert.

gungen wurden, neben dem Portfoliorisiko und der Bedingung, die Anbaufläche vollständig zu nutzen, phytosanitäre Fruchtfolgerestriktionen nach Seiffert (2014) berücksichtigt.

3.4.3 Variante – erhöhte Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen

Der lange Investitionszeitraum von KUP im Vergleich zu konventionellen annualen Kulturen wird zum Beispiel von Wolbert-Haverkamp und Musshoff (2014) und Musshoff und Jerchel (2010) als Nachteil von KUP genannt, da er mit einem Flexibilitätsverlust einhergeht. In Verbindung mit den vergleichsweise hohen Kosten der Anfangsinvestition beziehungsweise der nach mehreren Jahren erst eintretenden Gewinnschwelle (Buchholz und Volk 2011; Ericsson et al. 2006), böten KUP nur bedingt die Möglichkeit auf veränderte Märkte, durch Wechsel der angebauten Kultur, zu reagieren. Im Falle gesteigerter Wirtschaftlichkeit von KUP können beliebige Anteile der Restfläche konventioneller Kulturen in KUP umgewandelt werden. Im umgekehrten Fall ist die Rückumwandlung von KUP, vor dem geplanten Ende des Investitionszeitraums, nur mit wirtschaftlichen Einbußen möglich. Um die Effekte von gesteigerter Wirtschaftlichkeit konventioneller annualer Kulturen und somit die diesbezügliche Robustheit der Optimierung zu prüfen, wurde eine „Extremvariante“ definiert. Hierzu wurde das Niveau des erwarteten Deckungsbeitrags aller Kulturen, außer KUP, auf das Maximum der Zeitreihe (Niveau von 2012) gehoben. Das Niveau der Deckungsbeiträge von KUP hingegen wurde auf dem Ausgangsniveau gehalten. Die Deckungsbeiträge der landwirtschaftlichen Kulturen lagen in diesem Szenario weitaus höher als im Basisszenario. Der Faktor betrug je nach Kultur und Region zwischen 1,6 und 9,5; von Wintergerste sogar 22,9; einzig die Kultur Speisekartoffel wies in diesem Jahr etwas geringere Deckungsbeiträge auf (vergleiche Tabelle 8 und Tabelle 9).

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Kernergebnisse der vier Publikationen (Tabelle 1) zusammenfassend dargestellt und diskutiert.

4.1 Literaturrecherche zur betriebswirtschaftlichen Analyse von KUP

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der Literaturrecherche zur betriebswirtschaftlichen Analyse von Kurzumtriebsplantagen, basierend auf der Publikation Hauk et al. (2014a), vorgestellt. Die einbezogenen 37 Studien, die die Wirtschaftlichkeit von KUP analysiert haben und die Auswahlkriterien (Kapitel 3.1) erfüllten, stammen vorwiegend aus Nordamerika und Europa. Die in den Studien verwendeten Methoden, die zugrunde gelegten Prozessketten, das Referenzsystem beziehungsweise die Alternativinvestition, die beabsichtigte Biomasseverwertung sowie die verwendeten Baumarten und Standorte wiesen eine hohe Heterogenität auf (Hauk et al. 2014a). Die Baumarten der bilanzierten KUP waren: Pappel (*Populus ssp.*) (n=20), Weide (*Salix ssp.*) (n=15), Robinie (*Robinia pseudoacacia*) (n=4), Eukalyptus (*Eucalyptus ssp.*) (n=1) und *Daniellia oliveria* (n=1). Drei der 37 Studien untersuchten die Wirtschaftlichkeit von KUP für mehr als eine Baumart. In 43 % der Studien waren KUP der Alternativinvestition wirtschaftlich überlegen und in 19 % unterlegen, wohingegen 38 % gemischte Ergebnisse in Abhängigkeit der zugrunde gelegten Annahmen erzielten.

4.1.1 Methoden der betriebswirtschaftlichen Analyse von KUP

Insgesamt wurden 13 Methoden gefunden, mit denen die betriebswirtschaftliche Analyse von KUP durchgeführt wurde. Diese lassen sich in *statische Methoden der Investitionsrechnung*, *dynamische Methoden der Investitionsrechnung* und *Methoden der Investitionsrechnung unter Unsicherheit* unterteilen.

Statische Methoden wurden in drei der 37 Studien angewandt. Durch Anwendung statischer Methoden wurde neben der Unsicherheit jedoch auch der Zeitpunkt und die Diskontinuität der Zahlungsflüsse vernachlässigt, was einen Nachteil für die Analyse von KUP darstellt, da der Investitionszeitraum meist zwei bis drei Jahrzehnte umfasst (vergleiche Kapitel 4.1.4). Zudem weisen KUP keine konstanten Zahlungsflüsse auf: Den hohen Auszahlungen im Jahr der Begründung folgen mehrere Jahre mit vergleichsweise geringen Auszahlungen für Pflege und Pacht bis zum Erntezeitpunkt, bei dem einerseits erste Erlöse realisiert werden, aber auch Erntekosten anfallen. Gefolgt von mehreren Zyklen der Pflege und Ernte, werden schließlich Auszahlungen für die Rekultivierung der

Fläche fällig. In 31 der 37 Studien wurden daher *dynamische Methoden* angewandt, die den Zeitpunkt und die Diskontinuität der Zahlungsflüsse berücksichtigen. Neben den bekannten Zielgrößen Kapitalwert, Annuität, interner Zinsfuß und Bodenertragswert wurden außerdem der Annualized Gross Margin (Annuität des Deckungsbeitrags), Equivalent Annual Value (gleichwertiger jährlicher Wert) und Average Discounted Annual Gross Margin (durchschnittlicher, diskontierter jährlicher Deckungsbeitrag) gefunden. Trotz der unterschiedlichen Namensgebung verfolgten alle das gleiche Ziel: die Annuität auf Basis der Deckungsbeitragsrechnung, durch Subtraktion der Auszahlung (basierend auf variablen Kosten) von den Einzahlungen und anschließender Abzinsung und Annuisierung, zu bestimmen. Diese Zielgröße kann schließlich mit dem in der Landwirtschaft gängigen Deckungsbeitrag verglichen werden und lässt den Vergleich mit Investitionsalternativen, unterschiedlichen landwirtschaftlichen Kulturen, zu. In 20 der 37 Studien wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss der Unsicherheit der Eingangsgrößen auf die Zielgröße zu quantifizieren. Alle Studien attestierten der Unsicherheit der Eingangsgrößen, insbesondere der des Biomassepreises und des Biomasseertrags, einen entscheidenden Einfluss auf die ökonomische Zielgröße. Wenngleich Sensitivitätsanalysen Auskunft darüber geben, wie stark die Veränderung der Eingangsgröße das betriebswirtschaftliche Ergebnis beeinflusst, sind sie jedoch nicht in der Lage, die Risiken in die betriebswirtschaftliche Analyse zu integrieren. So sprechen beispielsweise Ben-Tal und Nemirovski (2000) mit Blick auf die Sensitivitätsanalyse von einer „post-mortem“ Betrachtung. Somit bieten betriebswirtschaftliche Analysen von KUP, welche statische oder dynamische Methoden der Investitionsrechnung anwenden, lediglich eine Entscheidungsgrundlage unter der Voraussetzung, dass Erzeugerpreise und Biomasseerträge konstant sind, was eine starke Vereinfachung darstellt.

Trotz des großen Einflusses der Variabilität der Eingangsgrößen und des langen Investitionszeitraums wurden in nur drei Studien Methoden der *Investitionsrechnung unter Unsicherheit* angewandt: Die Risikoanalyse, der Erwartungsnutzenansatz und die Realloptionstheorie. Die von Kröber et al. (2010) durchgeführte Risikoanalyse, bei der die Eintrittswahrscheinlichkeiten der ökonomischen Zielgröße mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen quantifiziert wurden (Kruschwitz 2009), erzielte eine differenziertere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von KUP, als dies mit dynamischen Methoden unter Annahme von Sicherheit möglich ist. Demnach erreichte KUP Annuitäten (Vollkostenrechnung) zwischen $-280 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $423 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. In 73 % der Fälle konnten positive Annuitäten erzielt werden. Gandorfer et al. (2011) konnten durch Anwendung des Erwartungsnutzenansatzes zeigen, dass KUP hinsichtlich des erwarteten Nutzens mit konventionellen Ackerfrüchten konkurrenzfähig sind. Die Variabilität des erwarteten Nutzens lag bei KUP deutlich unter derjenigen der konventionellen Ackerfrüchte. Der Realloptionsansatz wur-

de von Musshoff und Jerchel (2010) verwendet, um den Wert der Investitionsflexibilität beziehungsweise die Kosten einer durch KUP verminderten Flexibilität zu quantifizieren. Eine Investitionsentscheidung für KUP erforderte demnach 60 % höhere Kapitalwerte als dies bei Vernachlässigung des Flexibilitätsverlusts der Fall wäre.

Es zeigte sich, dass *dynamische Methoden* der Investitionsrechnung in der Lage sind, die Variation der Zahlungsflüsse (sowohl deren Höhen als auch Zeitpunkte) pro Intervall, vor allem die mögliche Schwankungsbreite der Erzeugerpreise und Biomasseerträge (vergleiche Kapitel 4.1.2. bis Kapitel 4.1.4), zu berücksichtigen. Eine Überführung der Kapitalwerte in Annuitäten – unter Berücksichtigung der variablen Kosten oder auch Vollkosten – ermöglichte eine Vergleichbarkeit mit Investitionen kürzerer Laufzeit. Durch Anwendung von Methoden der *Investitionsrechnung unter Unsicherheit* gelang es zudem, Unsicherheiten der Eingangs- und Zielgrößen zu quantifizieren und in die ökonomische Analyse zu integrieren. Obwohl KUP in den meisten untersuchten Studien als Portfoliobestandteil landwirtschaftlicher Betriebe beschrieben wird, wird die Wirtschaftlichkeit von KUP meist mit nur einer Alternativkultur verglichen und die ökonomischen Effekte, die durch geeignete Kulturartendiversifizierung auftreten können, werden vernachlässigt.

4.1.2 Mögliche Prozessketten und Arbeitsschritte

Entsprechend der in den untersuchten Studien vorgefundenen Arbeitsschritte konnten vier typische Prozessketten für den Anbau von KUP definiert werden (Tabelle 5). Diese waren: „Begründung – Bestand“, welche die Arbeitsschritte und entsprechende Kosten und Erlöse der Etablierung und Pflege bilanzierten. Die Biomasse wurde dabei auf dem Stock, als stehendes ungeerntetes Holz verkauft. Die Prozesskette „Begründung – Hof“ beinhaltete zusätzlich die Ernte der Biomasse und den innerbetrieblichen Transport bis zum Bewirtschafter; Lagerung und Trocknung sowie Rekultivierung wurden nicht in allen Studien berücksichtigt. Die Prozesskette „Begründung – Abnehmer“ bilanzierte zusätzlich den außerbetrieblichen Transport der Biomasse zum Abnehmer. Außerdem wurde eine vierte Prozesskette „Begründung – unbekannt“ definiert. Darunter fielen Studien, die keine genauen Informationen über den Bestimmungsort der Biomasse und die über die Ernte hinausgehenden Arbeitsschritte zur Verfügung stellten.

Tabelle 5: Übersicht möglicher Prozessketten der KUP-Bewirtschaftung sowie darin enthaltene Arbeitsschritte. Die in Klammern dargestellten Arbeitsschritte wurden nicht in jeder Studie der jeweiligen Prozesskette berücksichtigt (verändert nach Hauk et al. 2014a)

Prozesskette	Etablierung	Pflege	Ernte	Transport	Lagerung/ Trocknung	Rekultivierung
Begründung - Bestand (n=3)	x	x				
Begründung - Hof (n=7)	x	x	x	Feld	(x)	(x)
Begründung - Abnehmer (n=22)	x	x	x	x	(x)	(x)
Begründung - unbekannt (n=5)	x	x	x			

Die Bestandesbegründung, welche im Durchschnitt den drittgrößten Anteil an den Gesamtkosten hatte (Tabelle 6), umfasste Kosten für Flächenvorbereitung, Pflanzen oder Stecklinge und deren Pflanzung. In 34 der 37 Studien wurden Kosten für Voraufaulherbizide berücksichtigt. Die Unkrautbekämpfung, als Pflegemaßnahme in dem ersten oder den ersten beiden Jahren bis zur Bestandessicherung, wurde in 29 Studien bilanziert.

Tabelle 6: Anteilige Kosten [%] der jeweiligen Arbeitsschritte, inklusive Pachtkosten, an den Gesamtkosten (verändert nach Hauk et al. 2014a)

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Anzahl der Werte
Begründung	4,4	89,8	17,1	18,1	28
Pflege	0,8	20,2	7,2	4,3	16
Ernte und Hacken	4,7	91,2	18,9	18,4	27
Innerbetrieblicher Transport	5,3	14,8	6,7	6,6	7
Außerbetrieblicher Transport	1,8	26,9	8,6	8,2	11
Laden	1,3	7,3	2,8	0,9	3
Lagerung	5,7	12,6	4,3	4,9	4
Verkauf	5,8	9,6	4,6	4,0	3
Verwaltung	0,3	28,2	3,4	2,6	10
Rekultivierung	1,4	14,5	5,0	5,7	11
Flächenpacht	1,5	63,7	21,4	26,3	16

Die Ernte wurde in allen Studien, außer denen der „Begründung – Bestand“-Prozesskette, bilanziert. Die vorgefundenen Erntemethoden sowie deren anteilige Kosten variierten stark. Sowohl einphasige Ernteverfahren (n=23), die Ernte und Hacken auf einem Trägerfahrzeug realisierten, als auch absätziges Ernteverfahren, bei denen Ernte und Hacken in getrennten Arbeitsschritten durchgeführt wurden, konnten identifiziert werden (n=5). In manchen Studien fehlten Angaben zum gewählten Ernteverfahren. Die Kosten für die Ernte und das Hacken betragen im Durchschnitt knapp 20 % der Gesamtkosten. Aufgrund ihrer hohen anteiligen Kosten und den vielfältigen Ernteverfahren, welche unterschiedliche Kosten verursachen, sollten die Erntekosten daher gewissenhaft gewählt werden.

Der Arbeitsschritt Transport lässt sich untergliedern in: innerbetrieblichen Transport, der den Transport vom Feld zum Bewirtschafter oder Lager beinhaltet, und außerbetrieblichen Transport, vom Bewirtschafter oder Lager zum Abnehmer. Dabei reichten die Straßentransportdistanzen, die die Transportkosten beeinflussen, von 5 bis 65 km, welche im Mittel 8,6 % der Gesamtkosten ausmachten. Kosten für das Laden (Be- und Entladen) der Biomasse wurden in acht Studien berücksichtigt; deren Kosten jedoch sind mit unter 3 % der Gesamtkosten gering.

Kosten für die Rekultivierung, die in 14 der 37 Studien bilanziert wurden, betragen im Mittel 5 %. Die Rekultivierung wurde als nötig beschrieben, sobald die Fläche nach Beendigung der KUP wieder landwirtschaftlich genutzt werden soll.

Weitere Kosten, die jedoch keine Arbeitserledigungskosten darstellen sondern als Opportunitätskosten des eigenen Bodens oder als Kosten für die Nutzung fremden Bodens angesetzt wurden, sind die Kosten für die Flächenpacht. Diese betragen mit durchschnittlich 21,4 % den größten Anteil der Gesamtkosten.

4.1.3 Erlöse

4.1.3.1 Preis

Der Erzeugerpreis der bereitgestellten Biomasse wurde in den meisten Studien (z.B. Krasuska und Rosenqvist 2012; Musshoff und Jerchel 2010; Ericsson et al. 2006; Rosenqvist und Dawson 2005; Lothner et al. 1986) als die Eingangsgröße mit dem stärksten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von KUP identifiziert. In allen anderen Studien wurde er als einer der stärksten Einflussfaktoren beschrieben.

Es konnten zwei Produkte, auf welche sich die Erzeugerpreise bezogen, identifiziert werden: Holzhackschnitzel und Rundholz. In den meisten Studien waren allerdings Holzhackschnitzel das verkaufsfähige Produkt. Insgesamt wiesen die den ökonomischen

Analysen zugrunde gelegten Holzhackschnitzelpreise eine große Spannweite von 29 € Mg_{atro}⁻¹ bis 100 € Mg_{atro}⁻¹ sowie eine hohe Variabilität (SD=20,5 € Mg_{atro}⁻¹) auf (Abbildung 2).

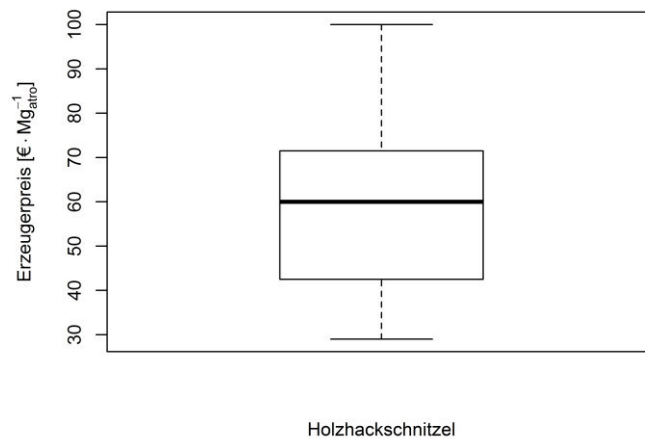


Abbildung 2: Holzhackschnitzelpreise (n=25) der untersuchten Studien (verändert nach Hauk et al. 2014a)

Zusätzlich wurden vier unterschiedliche Maßeinheiten festgestellt, auf welche sich die Erzeugerpreise bezogen: [€/GJ⁻¹], [€/MWh⁻¹], [€/Mg_{atro}⁻¹] und [€/Mg⁻¹]. Dabei lieferte einzig die am häufigsten verwendete Einheit [€/Mg_{atro}⁻¹] ohne zusätzliche Angaben eindeutige Informationen über den Preis der Biomasse, da hierbei der Preis der Biomasse bei 0 % Wassergehalt angegeben wurde. Die Einheit [€/Mg⁻¹] erforderte zusätzlich die Angabe des Wassergehalts. Bei den Einheiten [€/GJ⁻¹] und [€/MWh⁻¹] muss klargestellt werden, ob es sich um die im Holz gespeicherte Energiemenge oder um die erzeugte Energie handelt; im letzteren Fall bedarf es der Information des Wirkungsgrades der Konversionsanlage. Diese Konkretisierungen blieben jedoch häufig aus.

Die in € pro Mg_{atro} angegebenen oder konvertierten Preise wiesen eine hohe Streuung (SD=20,5 € Mg_{atro}⁻¹) auf (Abbildung 3). Wenngleich ein signifikanter zeitlicher Preistrend nachgewiesen wurde (p<0,05) und demnach eine Verdopplung der Erzeugerpreise im Untersuchungszeitraum auftrat, konnten jedoch nur 14 % der Varianz durch den Zeitpunkt der Veröffentlichung der Studien (stellvertretend für das Bezugsjahr der Hack-schnitzelpreise, da zu letzterem keine Angaben in den Studien gemacht wurden) erklärt werden.

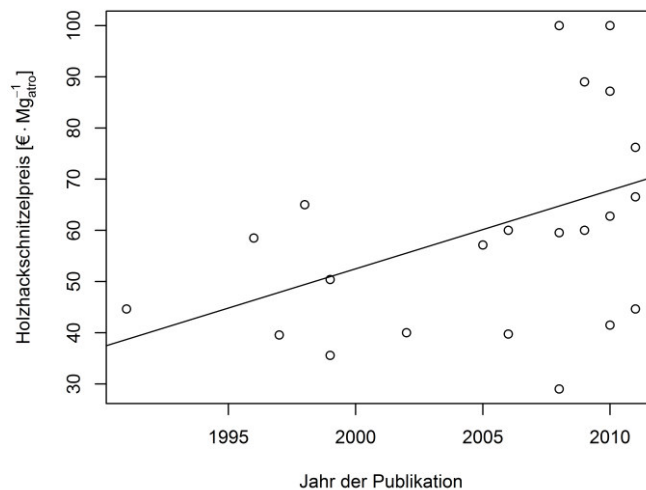


Abbildung 3: Holzackschnitzelpreise (n=25) in Abhängigkeit des Veröffentlichungsdatums der untersuchten Studien (verändert nach Hauk et al. 2014a)

4.1.3.2 Biomasseertrag

Der Biomasseertrag ist der Faktor, der am zweithäufigsten als stärkster Einflussfaktor auf die Wirtschaftlichkeit beschrieben wurde (z.B. Gandorfer et al. 2011; Kröber et al. 2010; Londo et al. 2001; Heaton et al. 1999). In allen weiteren untersuchten Studien wurde er als einer der einflussreichsten Faktoren identifiziert, weshalb er neben dem Biomassepreis als die Eingangsgröße mit dem stärksten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von KUP betrachtet werden kann.

Die verwendeten Maßeinheiten des Biomasseertrags von KUP bezogen sich ausschließlich auf die Masse [Mg] und nicht, wie in der Forstwirtschaft üblich, auf das Volumen [m³]. Dabei gaben 35 Studien die Biomasseerträge in [Mg_{atro}] und die restlichen beiden Studien die Biomasseerträge in [Mg] in Verbindung mit dem Wassergehalt an. Die Biomasseerträge wurden entweder als Gesamtwuchsleistung (GWL [Mg_{atro} ha⁻¹]) oder als dGZ [Mg_(atro) ha⁻¹ a⁻¹], in jedem Fall jedoch pro Hektar, präsentiert.

Die Biomasseerträge der zweiten und der Folgerotationen waren im Mittel um 1,2 Mg_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ oder 15 % höher (p<0,01) als die der ersten Rotation (Abbildung 4). Für die erste Rotation wurden Erträge von 3,0 Mg_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ bis 15,7 Mg_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ (Mittelwert=8,1 Mg_{atro} ha⁻¹ a⁻¹) und für die Folgerotationen 4,0 Mg_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ bis 16,0 Mg_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ (Mittelwert=9,3 Mg_{atro} ha⁻¹ a⁻¹) angegeben. Zwischen den Baumarten konnten jedoch keine Ertragsunterschiede festgestellt werden (p>0,1). Wie durch die hohe Ertragsamplitude angedeutet, waren sowohl in der ersten als auch in den Folgerotationen hohe Ertragsvariationen auffällig (SD=3,0 Mg_{atro} ha⁻¹ a⁻¹; SD=2,9 Mg_{atro} ha⁻¹ a⁻¹).

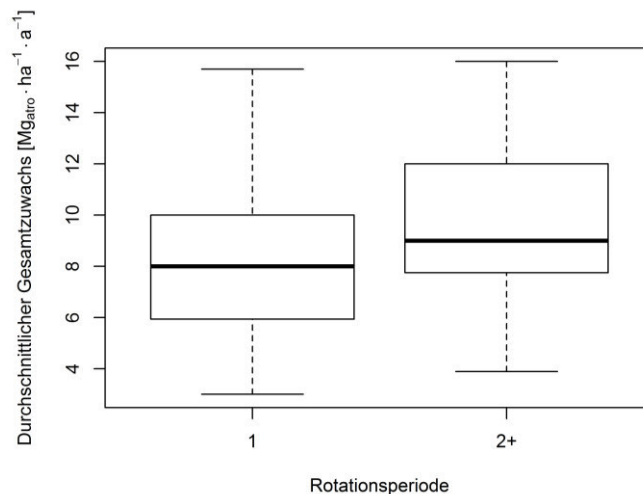


Abbildung 4: Durchschnittlicher Gesamtzuwachs [$\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] der ersten Rotation (1, $n=35$) und der folgenden Rotationen (2+, $n=35$) (verändert nach Hauk et al. 2014a)

4.1.4 Weitere Annahmen

Pflanzzahl, Rotationslänge und Investitionszeitraum

Die Begründungskosten, die den dritthöchsten Anteil der Gesamtbewirtschaftungskosten von KUP haben (siehe Kapitel 4.1.2), werden direkt durch die Pflanzzahlen beeinflusst. Diese wiederum wiesen Unterschiede zwischen den Baumarten auf ($p < 0,05$). So lagen die Pflanzzahlen von Robinie zwischen 3.200 und 8.860 Pflanzen ha^{-1} (Mittelwert=5.087 Pflanzen ha^{-1}), von Pappel zwischen 1.100 und 20.833 Pflanzen ha^{-1} (Mittelwert=7.705 Pflanzen ha^{-1}) und von Weide zwischen 6.666 bis 20.000 Pflanzen ha^{-1} (Mittelwert=13.768 Pflanzen ha^{-1}). Über alle Baumarten hinweg konnte ein signifikant linearer Zusammenhang zwischen Pflanzzahl und Rotationslänge festgestellt werden. Demnach sanken die Pflanzzahlen bei zunehmender Rotationslänge ($p < 0,0001$), wodurch 39 % der Pflanzzahlvariation erklärt werden konnten.

Die Investitionszeiträume von KUP umfassten acht bis 30 Jahre (Mittelwert=20,9 Jahre), wobei 50 % der Studien Investitionszeiträume zwischen 17 und 25 Jahren angaben. Es wurden keine baumartenspezifischen Unterschiede festgestellt.

Kalkulationszinsfuß

Die den betriebswirtschaftlichen Analysen zugrunde gelegten Kalkulationszinsfüße lagen zwischen drei und sieben Prozent (Mittelwert=5,4 %). Der Extremwert von zehn Prozent fand in der einzigen ausgewerteten Studie Südamerikas (Chile) Anwendung.

4.2 Bewirtschaftungspraxis von KUP in Bayern

Durch eine schriftliche KUP-Betreiberbefragung in Bayern mittels standardisiertem Fragebogen wurden mit dieser Studie erstmals empirisch Informationen zu den Anbausystemen, den verwendeten Prozessketten und den Arbeitsschritten bereitgestellt, welche der ökonomischen Analyse von KUP (Kapitel 4.4) zugrunde gelegt wurden. Das nachfolgende Kapitel ist an die Veröffentlichung Hauk et al. (2014b) angelehnt.

Die Auswertung der schriftlichen Befragung ermöglichte es, eine typische Bewirtschaftungspraxis zu identifizieren und der ökonomischen Analyse von KUP (Kapitel 4.4) zugrunde zu legen. In 98 % der Fälle wurden die KUP mit der Baumart Pappel (*Populus ssp.*) auf vorwiegend kleinen Schlägen (Median der Schlaggröße=1 ha) begründet. Alle Arbeitsschritte erfolgten bevorzugt in Eigenarbeit. Die Bestandesbegründung, nach der Flächenvorbereitung mittels Pflug, Egge und Voraufbauherbizid, erfolgte in 69 % der Fälle durch Handpflanzung der rund 20 cm langen Stecklinge (Median=5.556 Stück pro Hektar). Im Jahr der Pflanzung wurden durchschnittlich zwei Maßnahmen zur Unkrautunterdrückung, zusätzlich zum Voraufbauherbizid, durchgeführt. Die geplante Rotationslänge betrug in 86 % der Fälle fünf bis zehn Jahre (Abbildung 5). Als favorisierte Erntetechnik gaben 53 % der Befragten die motormanuelle Ernte und 22 % der Befragten eine vollmechanisierte Ernte an; 25 % waren noch unentschlossen, welche Erntetechnik sie wählen werden. Nach der Ernte planten 75 % der Befragten eine passive Trocknung des Ernteguts durch Lagerung der Stämme am Feldrand und die Weiterverarbeitung zu Hackschnitzeln im darauffolgenden Sommer. 21 % der Befragten gaben an, die Biomasse direkt, ohne Zwischenlagerung und Trocknung, an Heizwerke oder Heizkraftwerke verkaufen zu wollen oder bereits bei der vollmechanisierten Ernte Hackschnitzel zu produzieren. In nur 4 % der Fälle wurde eine Rundholzproduktion für die stoffliche Nutzung geplant. Erwähnenswert war, dass 80 % der Befragten selbst eine Hackschnitzelheizung betriebe, für welche das Erntegut bestimmt war, oder deren Installation in Planung war.

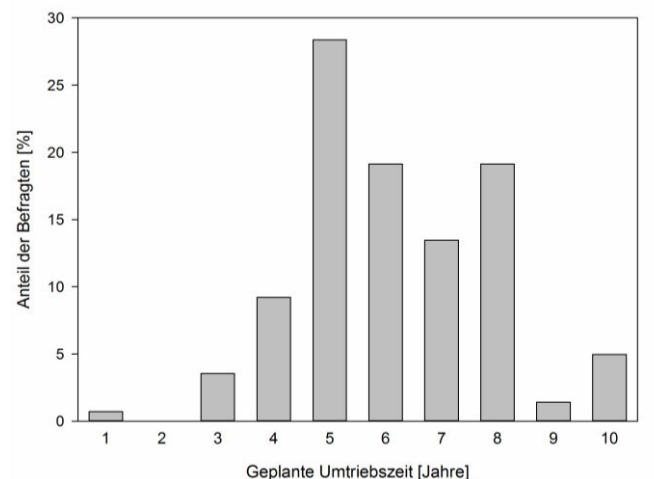


Abbildung 5: Geplante Umtriebszeiten für KUP in Bayern (n=159) (verändert nach Hauk et al. 2014b)

Diese Bewirtschaftungsweise unterscheidet sich deutlich von der in Skandinavien typischen, wo vornehmlich die Baumart Weide mit rund 13.000 Stecklingen pro Hektar in drei- bis vierjährigen Umtriebszeiten angebaut wird (Dimitriou et al. 2011). Pflanzung, Ernte und Hacken erfolgen dort vollmechanisiert. In Italien hingegen wird die Baumart Pappel mit 1.000 bis 6.000 Pflanzen je Hektar angebaut. Sowohl kurze zweijährige Umtriebe als auch längere Umtriebe von fünf- bis zehn Jahren sind dort üblich (Fiala et al. 2010). Während bislang Informationen zur Bewirtschaftungspraxis weder für Deutschland noch für Bayern vorlagen, werden in wissenschaftlichen Arbeiten häufig drei- bis vierjährige Umtriebszeiten mit vollmechanisierter Ernte, ähnlich wie in Skandinavien, als typisch angenommen (z.B. Schweier und Becker 2013; Faasch und Patenaude 2012). Besonders in süddeutschen Studien werden jedoch auch motormanuelle Ernteverfahren analysiert (z.B. Schweier 2013; Burger 2010) und teilweise sogar ertragskundliche Untersuchungen zur KUP-Bewirtschaftung mit längeren Umtriebszeiten durchgeführt (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) 2012). Dies weist darauf hin, dass längere Umtriebszeiten inklusive angepasster Ernteverfahren und Logistikketten für die regionalen Gegebenheiten Süddeutschlands – unter anderem aufgrund der kleinstrukturierten landwirtschaftlichen Flächen – als sinnvolle Möglichkeit der KUP-Bewirtschaftung in Betracht gezogen werden. Dass diese Bewirtschaftung tatsächlich häufig in der Praxis vorzufinden ist, wurde in dieser Studie erstmals empirisch belegt. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten der KUP-Bewirtschaftung, ist die Kenntnis der typischen Bewirtschaftungsverfahren für die ökonomische Analyse von KUP unerlässlich, da erst bei vorliegenden Informationen zu diesen das bilanzierte System und sowohl Zeitpunkt als auch Höhe der Zahlungsflüsse entsprechend definiert werden können.

Informationen zur tatsächlichen Bewirtschaftungsweise von KUP sind jedoch nicht nur für ökonomische Fragestellungen von Interesse. Sie liefern auch wertvolle Hinweise für Anpassungen beziehungsweise Optimierungen der Bewirtschaftungsverfahren an besondere regionalspezifische Gegebenheiten. Der KUP-Anbau in Bayern beispielsweise, findet auf kleinen Schlägen statt, meist unter einem Hektar, und ist durchaus wirtschaftlich (vergleiche Kapitel 4.4). Häufig werden jedoch für den KUP-Anbau Flächengrößen > 1 ha empfohlen und die Verwendung kleinerer Flächen als ungünstig beschrieben, da auf Kleinflächen unverhältnismäßig hohe Anfahrtskosten für vollmechanisierte Ernteverfahren anfallen (Vanbeveren et al. 2015; Bayerisches Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht (ASP) 2013; Schweier 2013). Wird jedoch die Umtriebszeit und somit die zu erntende Einzelbaummasse erhöht, können motormanuelle Ernteverfahren wirtschaftlich eingesetzt (Hauk et al. 2014b; Burger 2011) und Anfahrtskosten vermieden werden. Diese Bewirtschaftungsweise, wie sie in Bayern hauptsächlich vorgefunden wird, stellt also eine Anpassung und Optimierung der Bewirtschaftung dar, wobei die Nachteile der Verwendung von Kleinflächen reduziert wurden.

Kommerziell betriebene KUP stellen eine bisher unerschlossene Datenquelle dar, deren Analyse eine kostengünstige Art der Informationsgewinnung und eine gute Ergänzung der bisherigen Forschung auf Versuchsflächen darstellt. Politischen Entscheidungsträgern bieten Informationen zur Adoption von KUP und Implementierung des KUP-Anbaus in der Praxis die Möglichkeit, politische Rahmenbedingungen für eine effektive Förderung des KUP-Anbaus zu schaffen. Nicht zuletzt kann die Beratung von interessierten Landnutzern auf die regionalen Gegebenheiten zugeschnitten und somit verbessert werden, wodurch sich weitere Adoptionshemmnisse abbauen lassen (Hauk und Wittkopf 2012; CREFF Project Consortium 2011). Für ein besseres Verständnis der KUP-Implementierung in der Praxis müssen jedoch neben der Bewirtschaftungsweise noch weitere Faktoren untersucht und betrachtet werden. Aus diesem Grund wurden im Zuge der vorgestellten KUP-Betreiberbefragung bei Hauk et al. (2014b), zusätzlich zu den ökonomisch relevanten Daten der Bewirtschaftungspraxis in Bayern, Charakteristika der KUP-Betreiber in Bayern erhoben sowie die verwendeten Standorte erfasst und charakterisiert. Da diese vorwiegend ein besseres Verständnis für die tatsächlich stattfindende Adoption von KUP ermöglichen und weniger für die Ziele dieser Dissertation (vergleiche Kapitel 1) relevant sind, sind die Hauptergebnisse im folgenden Absatz kurz dargestellt. Eine ausführliche Ergebnisdarstellung inklusive Diskussion und Erläuterung der Methodik findet sich im Anhang (Kapitel 8.4) in der entsprechenden Publikation Hauk et al. (2014b).

Die meisten KUP in Bayern wurden von Landwirten betrieben. Diese unterschieden sich von Landwirten ohne KUP hauptsächlich dadurch, dass sie geringere Viehbestände auf-

wiesen, größere Betriebe, geringere Pachtanteile, höhere Ackerlandanteile sowie höhere Forstflächenanteile bewirtschafteten. Die für den KUP-Anbau verwendeten Standorte wiesen Bodenwertzahlen und Winterweizenerträge auf, welche meist unter dem Durchschnitt der jeweiligen landwirtschaftlichen Betriebe lagen. Dennoch waren die Standorte in mehr als zwei Dritteln der Fälle ganzjährig ausreichend wasserversorgt, was einen positiven Einfluss auf die Biomasseproduktivität von KUP hat (Petzold et al. 2010; Styles et al. 2008; Lindroth und Båth 1999).

Um die bisher unerschlossene Datenquelle „kommerziell betriebene KUP und deren Betreiber“ jedoch nutzen und auswerten zu können, müssen effektive und kosteneffiziente Möglichkeiten gefunden und genutzt werden. Eine Möglichkeit ist die Auswertung der Zentralen InVeKoS Datenbank, ein „Informationsangebot und Programm zur Meldung und Dokumentation der Übertragung von Zahlungsansprüchen (ZA) im Rahmen der Betriebsprämienregelung in Deutschland“ (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) 2015). Über das Statistische Bundesamt kann auf die Datenbank (kostenpflichtig) zugegriffen und die im Rahmen der Zahlungsansprüche erhobenen Daten (v.a. Betriebscharakteristika) landwirtschaftlicher Betriebe ausgewertet werden. Für alle weiteren Daten und Informationen – wie beispielsweise in der vorliegenden Studie Daten zur Bewirtschaftungsweise und den verwendeten Standorten – müssen die KUP-Bewirtschafter selbst kontaktiert werden. Da eine Weitergabe der Adressen der KUP-Betreiber in Bayern durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht möglich war, mussten die Adressen von auskunftswilligen KUP-Eigentümern über Baumschulen und Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie Regionalzeitungen akquiriert werden. Die Stichprobe wurde nach dem Schneeballsystem (Bruns 2008; Kastin 2008) erweitert. Schließlich konnten Adressen von 372 Eigentümern auffindig gemacht werden, was der Anzahl der registrierten KUP-Betreiber nach Zentraler InVeKoS Datenbank (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) 2015) (Stand 2011), also der Grundgesamtheit, entsprach. Aufgrund der kleinen Grundgesamtheit wurde eine hohe Rücklaufquote angestrebt. Um die Rücklaufquote zu erhöhen, wurde das Forschungsprojekt in einschlägigen Zeitschriften (z.B. landwirtschaftliche Wochenblätter) vorgestellt und auf die Relevanz der Teilnahme für den Projekterfolg hingewiesen. So konnten insgesamt 167 beantwortete Fragebögen empfangen werden, was einer Rücklaufquote von 45 % entspricht. Dies ist im Vergleich zu anderen Studien ungewöhnlich hoch (Porst 2001) und ermöglichte verlässliche Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit. Auch hinsichtlich der geographischen Verteilung repräsentierten die Antwortenden die Grundgesamtheit (Vergleich der Anteile der KUP-Betreiber in Bayern und Anteil der Antwortenden je Regierungsbezirk mittels Kolmo-

gorov-Smirnow-Test: $p=0,54$). Da mit diesem Verfahren einerseits die Gesamtzahl der gelisteten KUP-Betreiber angeschrieben werden konnten und zudem eine hohe Rücklaufquote erreicht wurde, war dieses Verfahren durchaus effektiv. Die Adressgewinnung war jedoch vergleichsweise arbeitsintensiv, weshalb es für zukünftige Studien effizienter sein könnte, mit den entsprechenden Ministerien und Baumschulen nach Wegen zu suchen, um standardisierte Fragebögen über deren Adressverteiler indirekt an die KUP-Betreiber zu versenden. Da hierbei keine Adressdaten weitergegeben werden müssen, sind datenschutzrechtliche Einschränkungen unwahrscheinlich.

4.3 Biomasseerträge von kommerziell betriebenen KUP in Bayern

Da die Biomasseerträge in der Literaturrecherche als zweitgrößter Einflussfaktor der ökonomischen Analyse von KUP identifiziert wurden, sie sowohl von den standörtlichen Gegebenheiten, der Baumart und Sorte als auch von der Bewirtschaftungsweise beeinflusst werden und nicht abschließend geklärt ist, inwiefern Ertragsdaten von Versuchsfeldern das Ertragsniveau der kommerziell betriebenen Bestände widerspiegeln, wurden in der vorliegenden Studie 30 kommerziell betriebene KUP Bestände in Bayern gemessen. Ausgewählt wurden 30 Bestände, die mit Balsampappelhybriden (*P. maximowiczii* x *P. nigra*) – die typische KUP-Baumart der Untersuchungsregion – begründet wurden und sich im ersten Umtrieb befanden, also noch nicht geerntet wurden. Die Auswahl der Bestände erfolgte entsprechend der angestrebten Rotationslängen in Bayern (vergleiche Kapitel 4.2). Die durchschnittlichen Gesamtwüchse der fünf- bis zehnjährigen KUP waren die empirische Kalkulationsgrundlage der ökonomischen Analyse (Kapitel 4.4). Das nachfolgende Kapitel basiert auf der Publikation Hauk et al. (2015b).

Für die Bestimmung der Biomasseerträge wurde ein Schätzverfahren basierend auf bestandesspezifischen allometrischen Biomassefunktionen verwendet (vergleiche Kapitel 3.3.2). Dieses zählt zu den genauesten Verfahren zur Biomasseermittlung in KUP (Röhle et al. 2006; Nordh und Verwijst 2004; Telenius und Verwijst 1995). So konnten beispielsweise bei Röhle (2009) oder Verwijst und Telenius (1999) keine signifikanten Unterschiede zwischen gemessenen und errechneten Triebgewichten festgestellt werden. Die hohe Genauigkeit der Biomasseermittlung mittels bestandesspezifischen allometrischen Biomassefunktionen konnte in dieser Studie bestätigt werden; es wurden ebenfalls für keinen der untersuchten Bestände signifikante Unterschiede zwischen gemessenen und errechneten Triebgewichten festgestellt. Die Korrelationen zwischen gemessenen und errechneten Triebgewichten waren ebenso in allen Beständen hoch (Korrelationskoeffizienten nach Spearman $>0,9$ bei $p \leq 0,001$ in jedem der untersuchten Bestände). Es kann daher begründet davon ausgegangen werden, dass die Triebgewichte der

einzelnen Bestände hinreichend genau von den allometrischen Biomassefunktionen geschätzt wurden. Ein weiteres Indiz waren die geringen relativen Abweichungen zwischen mittlerer gemessener und mittlerer errechneter Triebtrockenmasse. Diese lagen in der vorliegenden Studie zwischen -3,88 % und 2,29 % (Mittelwert=0,38 %). Im Vergleich dazu berichteten Nordh und Verwijst (2004) von einer mittleren relativen Abweichung von 0,9 % und einer Amplitude der relativen Abweichungen von -7 % bis 6 %, welche jedoch ebenso als gering eingestuft werden können. Die geringen relativen Abweichungen der vorliegenden Studie können durch den vergleichsweise hohen Stichprobenumfang erklärt werden. Die allometrischen Biomassefunktionen wurden von 25 Probebäumen je Bestand abgeleitet, wohingegen der Stichprobenumfang in anderen Studien zwischen fünf und zehn Probebäumen (z.B. Laureysens et al. 2004; Nordh und Verwijst 2004; Telenius und Verwijst 1995) und nur in wenigen Fällen bei 25 lag (Röhle et al. 2006). Durch den erhöhten Stichprobenumfang konnte somit die allometrische Variation der Triebgewichte in den bestandesspezifischen Biomassefunktionen berücksichtigt werden (Walther et al. 2005). Dies wurde angestrebt, da die kommerziell betriebenen KUP in manchen Fällen (bedingt durch kleinflächigen Pflanzausfall) heterogene Triebtrockenmassen bei ähnlichem BHD aufwiesen. In Nachfolgeuntersuchungen von kommerziell betriebenen KUP, insbesondere wenn diese hohe oder flächige Pflanzausfälle ausweisen, sind daher Biomassefunktionen basierend auf mehr als zehn Probebäumen zu empfehlen.

Die Biomasseerträge, welche bei der Analyse von 30 kommerziell betriebenen KUP in Bayern ermittelt wurden, reichten von 0,39 bis 16,98 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (Abbildung 6). Dabei wiesen fünf bis zehnjährige Bestände (G 5+) signifikant höhere ($p < 0,001$) dGZ auf als dreijährige Bestände (G 3).

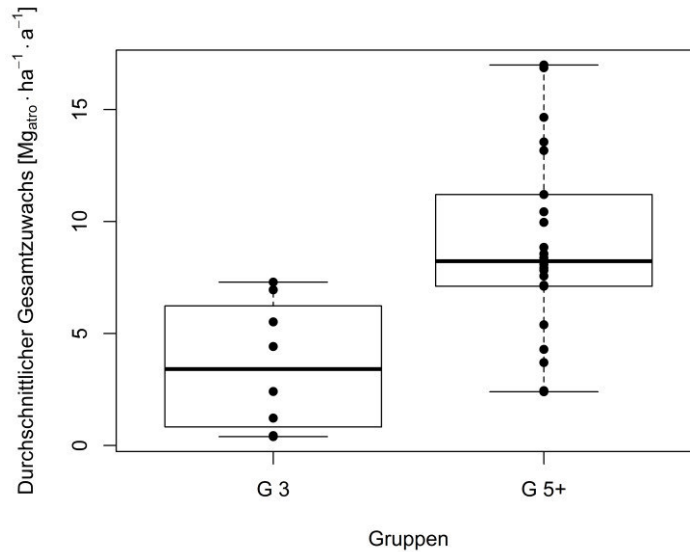


Abbildung 6: Durchschnittlicher Gesamtzuwachs dreijähriger (G 3) (n=8) und fünf- bis zehnjähriger (G 5+) (n=22) KUP der ersten Rotation (verändert nach Hauk et al. 2015b)

Die in G 5+ erzielten dGZ reichten von 2,39 bis 16,98 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ und erreichten einen mittleren dGZ von 8,93 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (Median=8,23 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Das Ertragsniveau der untersuchten fünf- bis zehnjährigen Bestände ist im oberen Bereich der mitteleuropäischen Erträge: So werden für Schweden 8,00 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (Christersson 2008), für Italien 10,00 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (Manzone et al. 2009) und für Deutschland 5,00 bis 8,00 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ in der ersten (Musshoff und Jerchel 2010) und 12,00 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ in der zweiten Rotation (Kröber et al. 2010) angenommen. Für KUP auf landwirtschaftlichen Marginalflächen in Baden-Württemberg wurden mittlere Erträge von 7,60 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ berichtet (Schweier und Becker 2013). Auf bayerischen Versuchsflächen wurden in fünf und zehnjährigen Beständen im Mittel 6,74 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (SD=2,75) erreicht (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) 2012). Somit sind die Biomasseerträge, welche in der Praxis erzielt wurden, signifikant höher ($p < 0,001$) als die der bayerischen Versuchsflächen. Berücksichtigt man die Ertragssteigerungen, welche für Folgerotationen berichtet werden (Horn et al. 2013; Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) 2012; Strauss und Wright 1990), so ist es wahrscheinlich, dass die langfristigen Erträge der Praxisflächen im oberen Bereich der für Mitteleuropa getroffenen Annahmen oder sogar darüber liegen werden.

Mögliche Gründe für die hohen Biomasseerträge auf landwirtschaftlicher Fläche mit unterdurchschnittlicher Güte (Pacht und Winterweizenerträge (Hauk et al. 2014b)) sind die ausreichende Wasserverfügbarkeit der Standorte und die gewissenhafte Bewirtschaftungspraxis. Die Wasserverfügbarkeit wird bei Petzold et al. (2010) und Yin et al. (2009)

als einer der Faktoren beschrieben, die die Biomasseerträge von KUP am stärksten beeinflussen. Dieser Trend zeichnet sich auch in den hier vorgestellten Erträgen ab (Abbildung 7), wobei eine Zunahme der ökologischen Feuchtestufe des Standorts (vergleiche Arbeitskreis Standortkartierung 2003) mit einer Ertragssteigerung einhergeht.

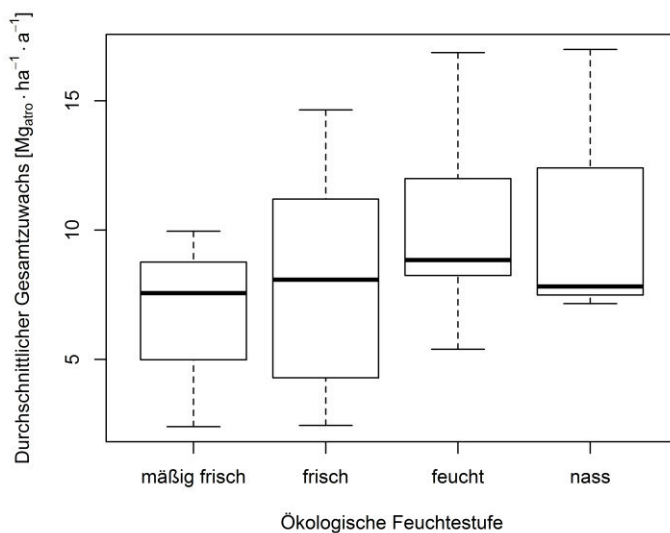


Abbildung 7: Durchschnittlicher Gesamtzuwachs [$\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] in Abhängigkeit der ökologischen Feuchte des Standorts (verändert nach Hauk et al. 2015b)

Dass sich dieser Trend in der Feuchtestufe „nass“ nicht fortsetzt, liegt vermutlich an dem bereits auftretenden Sauerstoffmangel im Wurzelbereich (Du et al. 2012). Ein weiterer möglicher Grund für die hohen Biomasseerträge ist die sehr gewissenhafte Bewirtschaftung der KUP-Betreiber, welche als starker Einflussfaktor auf Biomasseerträge beschrieben wird (z.B. Dimitriou et al. 2011; Stoll und Dohrenbusch 2009; Mola-Yudego und Aronsson 2008). Die KUP-Betreiber berichteten von bis zu viermaliger Unkrautbekämpfung im Jahr der Begründung und manche sogar von Nachbesserung bei nichtausgetriebenen Stecklingen. Somit wird die generelle Annahme von niedrigeren Erträgen der kommerziell betriebenen KUP (z.B. Krasuska und Rosenqvist 2012; Mola-Yudego und Aronsson 2008; Larsson und Rosenqvist 1996) nicht von den Daten der fünf- bis zehnjährigen Bestände dieser Studie gestützt; in diesem Fall stellen die Ertragsdaten der Versuchsflächen eine konservative anstelle einer optimistischen Annahme für die betriebswirtschaftliche Analyse von KUP dar.

Die Biomasseerträge der dreijährigen Bestände dieser Studie lagen zwischen 0,39 und 7,29 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ und wiesen einen mittleren dGZ von 3,58 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (Median=3,41 $\text{Mg}_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) auf. Das mittlere Ertragsniveau der untersuchten dreijährigen Bestände war somit niedriger als die Annahmen für Mitteleuropa (siehe oben). Bei ver-

gleichbarer Bewirtschaftungsintensität und Wasserverfügbarkeit, waren jedoch geringe Pflanzzahlen von 2.500 – 8.300 Pflanzen pro Hektar auffällig. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Murach et al. (2008), wonach die Wuchsleistung der Baumart Pappel auf Bestandesebene bis zum Alter fünf stark von der Pflanzzahl beeinflusst wird und Pflanzzahlen von über 10.000 Stück ha⁻¹ für eine maximale Bestandeswuchsleistung empfohlen werden, da andernfalls der verfügbare Standraum nicht gänzlich ausgefüllt und die optimale Photosyntheserate nicht erreicht werden kann (Murach et al. 2008).

Die Ertragsamplitude beider Gruppen G 3 und G 5+ deutete eine hohe Variabilität an, welche durch die Standardabweichung (SD) der Erträge bekräftigt wurde; $SD_{G3}=2,84 \text{ Mg}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $SD_{G5+}=4,18 \text{ Mg}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die hohe Ertragsvariabilität in beiden Gruppen, G 3 und G 5+, verdeutlicht die Notwendigkeit, diese in ökonomischen Analysen von KUP zu berücksichtigen. Die relative Abweichung in G 3 reichte von -94 % bis +103 % und die der G 5+ von -73 % bis +90 %, wobei der Variationskoeffizient 0,79, beziehungsweise 0,47 betrug. Ähnlich hohe Ertragsvariationen wurden von den bayerischen Versuchsflächen, mit relativen Abweichungen von -69 % bis +70 % und einem Variationskoeffizient von 0,4, berichtet (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) 2012). Somit sollte die Ertragsvariabilität zusätzlich zu dem Ertragsniveau, welches meist durch den Mittelwert repräsentiert wird, in betriebswirtschaftlichen Analysen berücksichtigt werden; vor allem, wenn standörtliche Gegebenheiten und die Bewirtschaftungspraxis heterogen sind.

4.4 Betriebswirtschaftliche Analyse von KUP – KUP als Portfoliobestandteil von Marktfruchtbaubetrieben in Bayern

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der betriebswirtschaftlichen Analyse von KUP, basierend auf der Publikation Hauk et al. (2015a), dargestellt und diskutiert.

4.4.1 Betriebswirtschaftliche Analyse von KUP – Basisszenario

Die ökonomische Analyse von KUP und ausgewählten landwirtschaftlichen Kulturen im Betrachtungszeitraum 2004 bis 2013 ergab, dass KUP die Kultur war, welche in allen Modellregionen die geringste ökonomische Variabilität, also die stetigsten Deckungsbeiträge, aufwies (Tabelle 7).

Tabelle 7: Übersicht der durchschnittlichen Deckungsbeiträge⁷ (\bar{DB}) [$\text{€ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] und Standardabweichung (SD) [$\text{€ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] der untersuchten Kulturen in den vier Modellregionen: Aichach-Friedberg, Pfaffenhofen an der Ilm, Regensburg und Wunsiedel (verändert nach Hauk et al. 2015a)

Kultur	Aichach-Friedberg		Pfaffenhofen an der Ilm		Regensburg (Landkreis)		Wunsiedel	
	\bar{DB}	SD	\bar{DB}	SD	\bar{DB}	SD	\bar{DB}	SD
Grünmais	-186	500	-224	456	-234	444	-246	436
Körnermais	312	616	387	664	-190	552	--	--
KUP	617	338	466	276	317	239	287	235
Sommergerste	--	--	--	--	--	--	442	533
Speisekartoffel	3862	3285	4251	3339	3478	2996	3204	2709
Wintergerste	234	508	18	385	11	362	21	384
Winterraps	364	481	211	410	245	413	293	474
Winterroggen	--	--	--	--	--	--	-50	306
Winterweizen	467	603	251	476	274	492	--	--
Zuckerrübe	2158	912	1926	863	1839	909	--	--

Somit konnten die stetigsten Deckungsbeiträge mit KUP erzielt werden. Zu demselben Ergebnis kamen Gandorfer et al. (2011), obwohl jene noch höhere Ertragsvariabilität für KUP unterstellten, sowie Djanibekov und Khamzina (2014) und Krasuska und Rosenqvist (2012). Ridier (2012) schlussfolgerte sogar, das vergleichsweise hohe ökonomische Risiko von landwirtschaftlichen Kulturen stelle einen „Bonus“ für die Adoption des KUP-Anbaus dar.

Zusätzlich zu der geringen Variabilität der DB von KUP in dieser Studie, konnten weitere positive ökonomische Merkmale für KUP nachgewiesen werden, welche durch die kumulierten Häufigkeiten der DB verdeutlicht werden (Abbildung 8 und Abbildung 9). Zum einen wies KUP die geringste Spannweite der Deckungsbeiträge aller Kulturen auf und zum anderen war die Wahrscheinlichkeit negativer Deckungsbeiträge mit KUP am geringsten (geringstes Lower Partial Moment 0-ter Ordnung (Harlow und Rao 1989)). Die minimalen Deckungsbeiträge von KUP waren weitaus höher, als die minimalen Deckungsbeiträge der landwirtschaftlichen Kulturen. Somit zeigte KUP ökonomische Stärken besonders unter ungünstigen Wuchs- und Marktbedingungen. Das geringe ökonomische

⁷ Zur Verbesserung des Textflusses wird in der Ergebnisdarstellung der Begriff „Deckungsbeitrag“ beziehungsweise „DB“ für alle Kulturen verwendet. Für KUP bezieht sich dieser auf das Deckungsbeitragsäquivalent.

mische Risiko von KUP kann hauptsächlich durch die vergleichsweise geringe Volatilität der Erzeugerpreise erklärt werden (z.B. C.A.R.M.E.N. e.V. 2015; Reisenweber 2014a). Während der Variationskoeffizient der Erzeugerpreise für holzige Biomasse 0,21 betrug, lagen die der landwirtschaftlichen Kulturen zwischen 0,3 und 0,46. Wenngleich für landwirtschaftliche Kulturen eine empirische Datenbasis zur Ertragsvariabilität (Änderung des mittleren Ertrags von Jahr zu Jahr) vorlag, existierten bislang keine vergleichbaren Daten für KUP. Somit wurden die Häufigkeitsverteilungen der KUP-Erträge von der Ertragsdatensammlung bei Kröber et al. (2009) approximiert. Diese beinhalten jedoch nicht nur die Ertragsvariabilität von Jahr zu Jahr, sondern darüber hinaus eine gewisse standörtliche Variabilität; wenngleich nach mittleren und guten Standorten unterschieden wurde. Somit ist davon auszugehen, dass die geringe Ertragsvariabilität und das geringe ökonomische Risiko von KUP tatsächlich sogar noch etwas geringer sind. Um dies zu prüfen, sind weitere Untersuchungen nötig, welche die jährliche Ertragsvariabilität von KUP analysieren. Dennoch konnte mit dieser Studie bereits gezeigt werden, dass die Analyse ökonomischer Risiken auch bei KUP ein wichtiger Bestandteil ökonomischer Analysen darstellt, da sie zu einer umfassenderen Betrachtung beiträgt. Gleichzeitig konnten positive ökonomische Merkmale des KUP-Anbaus identifiziert werden. Diese positiven ökonomischen Merkmale sind jedoch bei Entscheidungsträgern, trotz ihrer Bedeutung speziell für risikoaverse Entscheidungsträger, kaum bekannt. Eine wichtige Aufgabe wird es daher sein, die Entscheidungsträger über die vergleichsweise geringen ökonomischen Risiken des KUP-Anbaus zu informieren.

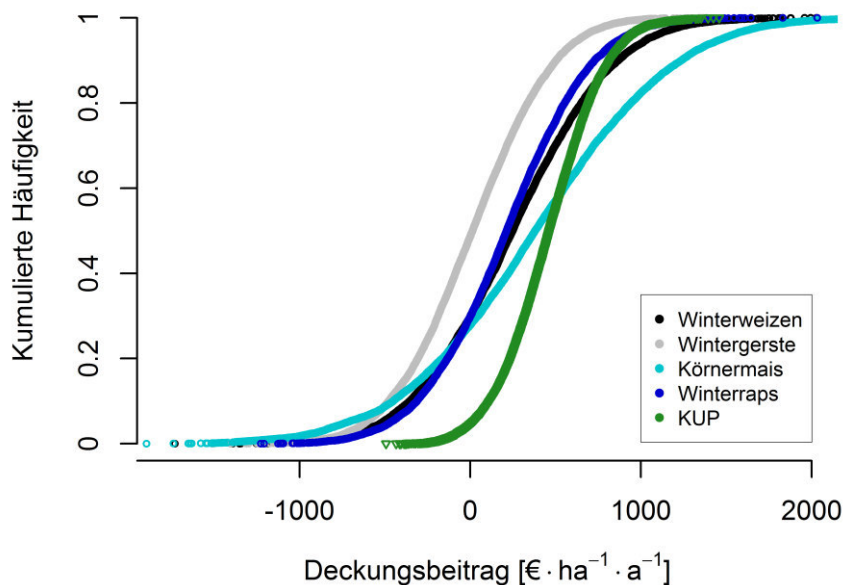


Abbildung 8: Kumulierte Häufigkeiten der Deckungsbeiträge ausgewählter Getreidearten und KUP am Beispiel der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm

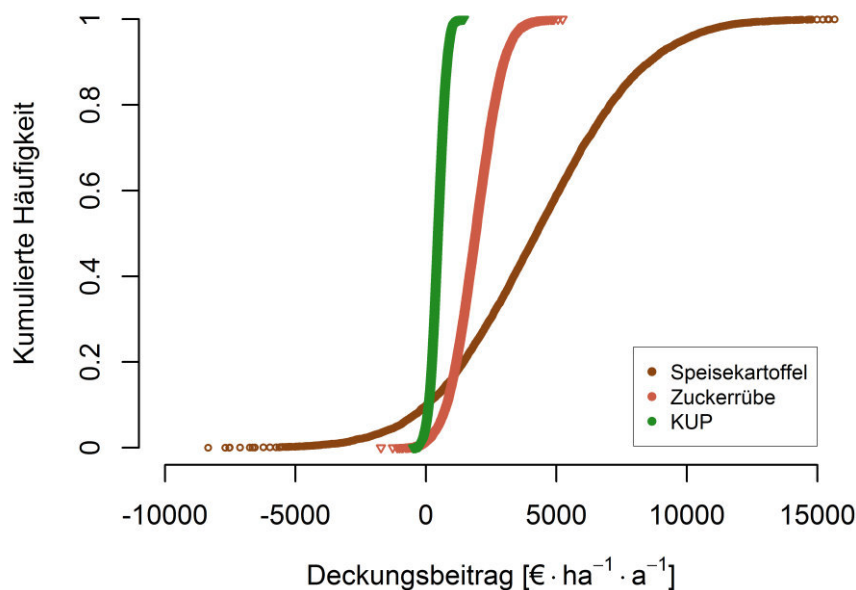


Abbildung 9: Kumulierte Häufigkeiten der Deckungsbeiträge ausgewählter Hackfrüchte und KUP am Beispiel der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm

KUP zeigte in dieser Studie nicht nur in Bezug auf das Risiko, sondern auch hinsichtlich des erwarteten Deckungsbeitrags interessante Ergebnisse. Wenngleich der erwartete DB von KUP geringer als diejenigen von Speisekartoffel und Zuckerrübe waren, so war er dennoch in drei der vier untersuchten Modellregionen höher als diejenigen aller Getreidearten (Tabelle 7). Einzig in der Modellregion Wunsiedel, welche, gemessen an den Naturalerträgen und Deckungsbeiträgen der konventionellen Kulturen, die schwächste Modellregion war, konnten mit Speisekartoffel, Sommergerste und Winterraps höhere erwartete Deckungsbeiträge als mit KUP erzielt werden. Der Anbau von KUP erzielte somit in allen Regionen die stetigsten Deckungsbeiträge. Darüber hinaus waren die erwarteten Deckungsbeiträge von KUP höher als diejenigen der meisten konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen. Ein weiterer Vorteil des KUP-Anbaus, der besonders im Hinblick auf die ökonomische Diversifizierung interessant ist (vergleiche Kapitel 3.4.2 und z.B. Markowitz (1952)), waren die geringen Korrelationen der Deckungsbeiträge von KUP mit denen der verglichenen Kulturen (Korrelationskoeffiziente nach Pearson (k): AIC: $k=0,57-0,8$; PAF: $k=0,5-0,76$; R: $k=0,49-0,7$; WUN: $k=0,43-0,76$).

Ordnet man die verglichenen Kulturen entsprechend des erwarteten Deckungsbeitrags (Rangnummer eins entspricht dem höchsten Deckungsbeitrag) und dessen Standardabweichung (Rangnummer eins entspricht der geringsten Standardabweichung), so zeichnete sich ein Trend ab, demzufolge hohe Deckungsbeiträge mit hohen Standardabweichungen – also hohem ökonomischen Risiko – einhergingen (Abbildung 10). Auffällig waren dabei zwei Kulturen, die diesem allgemeinen Trend nicht folgten: Grünmais war

ein, aus ökonomischer Sicht, ungünstiger Ausreißer, der bei geringem Deckungsbeitrag ein verhältnismäßig hohes Risiko aufwies. Der zweite, aus ökonomischer Sicht jedoch positive, Ausreißer war KUP, welcher bei dritthöchstem Deckungsbeitrag die geringste Standardabweichung aufwies.

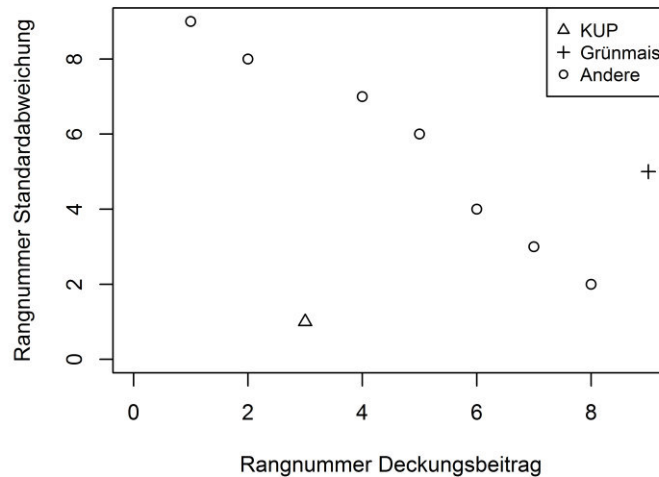


Abbildung 10: Rangfolge der Wirtschaftlichkeitsparameter einzelner Kulturen am Beispiel der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm. Für die konventionellen Kulturen ist der Deckungsbeitrag [$\text{€ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] und die Standardabweichung [$\text{€ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] angegeben

Die erwarteten Deckungsbeiträge von KUP in dieser Studie sind vergleichbar mit denen von Dimitriou und Rosenqvist (2011), welche Preise von 7 € GJ^{-1} ($\sim 110 \text{ € Mg}_{\text{atro}}^{-1}$) unterstellten. Die ökonomische Konkurrenzfähigkeit von KUP mit einjährigen landwirtschaftlichen Kulturen (Hackfrüchte ausgenommen) wurde ebenso in den Studien von Krasuska und Rosenqvist (2012) und Ericsson et al. (2006) bestätigt. In der Studie von Krasuska und Rosenqvist (2012) konnte KUP trotz der geringeren Erzeugerpreise von $70,3 \text{ € Mg}_{\text{atro}}^{-1}$ in acht von zehn Jahren mit landwirtschaftlichen Kulturen konkurrieren und war nur in zwei Jahren – in denen die landwirtschaftlichen Kulturen die maximalen Erzeugerpreise der Zeitreihe erzielten – unterlegen. Dies unterstreicht die Ergebnisse der vorliegenden Studie und verdeutlicht zugleich die Relevanz, sowohl die Variabilität der ökonomischen Zielgrößen von KUP und der Alternativinvestition als auch deren Korrelationen in ökonomischen Analysen zu berücksichtigen.

Die Wirtschaftlichkeit der KUP selbst wird, neben dem Biomasseertrag, am stärksten durch den Erzeugerpreis beeinflusst (Hauk et al. 2014a; Krasuska und Rosenqvist 2012; Styles et al. 2008). Als Erzeugerpreise, ab denen Gewinne erzielbar sind (Break-Even-Preis), wurden beispielsweise $77 \text{ € Mg}_{\text{atro}}^{-1}$ (Manzone et al. 2009) bzw. $78 \text{ € Mg}_{\text{atro}}^{-1}$ (El Kasmioui und Ceulemans 2013) berechnet. Kröber et al. (2010), die sogar die Eintritts-

wahrscheinlichkeiten der ökonomischen Zielgröße mittels Monte-Carlo-Simulationen ermittelten, berichteten bei Erzeugerpreisen von 87 € Mg_{atro}⁻¹ von einer 73 %-igen Wahrscheinlichkeit positive Annuitäten zu erzielen. Bei höheren Erzeugerpreisen von 100 € Mg_{atro}⁻¹ betrug die Wahrscheinlichkeit positiver Annuitäten bereits 99 %. In der vorliegenden Arbeit konnte auf empirische Daten der Waldhackschnitzelpreisstatistik (C.A.R.M.E.N. e.V. 2015) zurückgegriffen werden, welche von 74 € Mg_{atro}⁻¹ (2004) bis 147 € Mg_{atro}⁻¹ (2013) reichten. Während der minimale Erzeugerpreis der Zeitreihe gerade unter den genannten Break-Even-Preisen lag, lag der mittlere Erzeugerpreis (117,4 € Mg_{atro}⁻¹) bereits deutlich darüber. Somit sind die positiven Deckungsbeiträge, die mit dem KUP-Anbau erzielt werden konnten und in den meisten Regionen sogar höher, als die erwarteten Deckungsbeiträge der landwirtschaftlichen Kulturen lag, schlüssig. Die Preis-Zeitreihe weist jedoch auch auf einen anderen, für die Wirtschaftlichkeit von KUP, interessanten Fakt hin: den starken und signifikanten Anstieg der Erzeugerpreise im Betrachtungszeitraum, welcher über den Betrachtungszeitraum ansteigende Deckungsbeiträge der KUP impliziert. Dass noch vor dem Jahr 2004 weitaus geringere Preise für holzige Biomasse erzielt wurden und dementsprechend ältere Studien KUP häufig keine Wirtschaftlichkeit attestierten (Hauk et al. 2014a), mag teilweise erklären, weshalb mangelnde Wirtschaftlichkeit von KUP ein gängiges (Vor-) Urteil von Landwirten (Glithero et al. 2013; Neubert et al. 2013) ist. In diesem Fall wäre es nötig, die Öffentlichkeit über die Ergebnisse aktueller ökonomischer Analysen und die aus aktueller Sicht positiven ökonomischen Merkmale des KUP-Anbaus zu informieren.

Die für landwirtschaftliche Kulturen verwendete ökonomische Zielgröße „Deckungsbeitrag“ ist eine gängige Vergleichsgröße der Agrarökonomie (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014; Barkley und Barkley 2013; Musshoff und Hirschauer 2013), die auch in der landwirtschaftlichen Praxis weit verbreitet ist. Um eine Vergleichbarkeit mit landwirtschaftlichen Kulturen zu ermöglichen, wurde für KUP das Deckungsbeitragsäquivalent errechnet, welches bereits in mehreren Studien als geeignete Zielgröße identifiziert wurde (z.B. Hauk et al. 2014a; El Kasmioui und Ceulemans 2012; Rosenqvist und Dawson 2005; Rosenqvist H. 1996; Bergez et al. 1991). So konnten einjährige und mehrjährige Kulturen anhand ökonomischer Zielgrößen verglichen werden, die einerseits aus wissenschaftlicher Sicht als geeignet gelten und andererseits gewährleisten, dass die Ergebnisse dieser Arbeit auch für Landnutzungsentscheidungsträger verständlich und interpretierbar sind. Dies ist besonders wichtig, wenn man bedenkt, dass mangelnde oder unklare ökonomische Konkurrenzfähigkeit von KUP die Hauptadoptionshemmnisse darstellen (McKenney et al. 2014; Glithero et al. 2013; Neubert et al. 2013; Styles et al. 2008).

Für die Berechnung des Deckungsbeitragsäquivalents ist auf die Wahl eines angemessenen Kalkulationszinssatzes (i) zu achten, mit dem die Ein- und Auszahlungen diskontiert werden. In der vorliegenden Studie betrug dieser 5 %. Dieser entspricht etwa dem Median ($n=33$) der in Kapitel 4.1 untersuchten ökonomischen Studien, liegt im Bereich der Kalkulationszinssätze, welche für landwirtschaftliche Investitionen und KUP in Mitteleuropa angesetzt werden (vergleiche Kapitel 3.4.2 und Musshoff und Jerchel (2010)) und kann somit als angemessen betrachtet werden. Nähere Ausführungen zu Kalkulationszinssätzen für KUP finden sich beispielsweise bei Hauk et al. (2014a) und El Kasmioui und Ceulemans (2012). Um die Auswirkungen geänderter Zinssätze auf das finanzielle Ergebnis von KUP zu untersuchen, wurde zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei dem der Kalkulationszinssatz entsprechend der verwendeten Zinssätze, der in Kapitel 4.1 untersuchten ökonomischen Studien, variiert wurde. Am Beispiel der Modellregion Aichach-Friedberg betrug das mittlere Deckungsbeitragsäquivalent von KUP: $620 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, bei $i=5 \%$; $694 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, bei $i=3 \%$ und $538 \text{ € ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, bei $i=7 \%$. Die Änderung des Kalkulationszinssatzes beeinflusste somit das Deckungsbeitragsäquivalent, führte jedoch zu keiner Änderung der relativen Vorzüglichkeit der verglichenen Kulturen (vergleiche Tabelle 7). In Anbetracht der geringen Kapitalmarktzinsen kann zumindest mittelfristig eher mit niedrigeren als höheren Kalkulationszinssätzen gerechnet werden, womit die in dieser Studie getroffenen Annahmen zum Kalkulationszinssatz und somit auch die entsprechenden Deckungsbeitragsäquivalente von KUP, die Wirtschaftlichkeit von KUP eher unter- als überschätzen. Eine ausführliche Diskussion zur Bedeutung und Wahl von Kalkulationszinssätzen für KUP findet sich beispielsweise in Hauk et al. (2014a) und El Kasmioui und Ceulemans (2012).

Es sei außerdem angemerkt, dass die Verwendung der Bruttoerfolgsgröße „Deckungsbeitrag“, beziehungsweise „Deckungsbeitragsäquivalent“ impliziert, dass keine Veränderung der Fixkostenstruktur landwirtschaftlicher Betriebe durch Variation der Flächenanteile der jeweiligen Kulturen entstehen (Barkley und Barkley 2013; Musshoff und Hirschauer 2013). Da KUP eine vergleichsweise arbeitsextensive Kultur ist, für deren Bewirtschaftung sowohl weniger Maschinen benötigt werden als auch weniger Maschinenarbeitsstunden anfallen (z.B. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014; Schweier 2013), eröffnet der KUP-Anbau in landwirtschaftlichen Betrieben die Chance den Fuhrpark und entsprechende Fixkosten zu reduzieren. Der KUP-Anbau bietet also weitere langfristige ökonomische Vorteile für landwirtschaftliche Betriebe die in dieser Studie nicht berücksichtigt wurden, besonders wenn der KUP-Flächenanteil gesteigert und der Anteil landwirtschaftlicher Kulturen entsprechend verringert wird. Pannell et al. (2000), die den Mehrwert von Risikoanalysen für landwirtschaftliche Entscheidungsträger kritisch diskutieren, berichten sogar, dass der Unternehmenserfolg landwirtschaftlicher

Betriebe mitunter stark durch zu hohe Investitionen in Maschinen gefährdet wird. Da die Möglichkeiten der Fixkostenreduktion durch KUP und die damit verbundenen Effekte auf landwirtschaftliche Betriebe in dieser Studie nicht berücksichtigt wurden, ist davon auszugehen, dass die Wirtschaftlichkeit sowie die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von KUP insgesamt eher unterbewertet wurden.

4.4.2 KUP als Portfoliobestandteil von Marktfruchtbaubetrieben – Basisszenario

Die Ergebnisse der Portfoliooptimierung von landwirtschaftlichen Betrieben haben gezeigt, dass eine ökologische Diversifizierung landwirtschaftlicher Portfolios durch KUP auch mit ökonomischen Vorteilen verbunden ist. Das geringste ökonomische Risiko, im Betrachtungszeitraum 2004-2013, konnte in allen Modellbetrieben durch den Anbau von (nahezu) 100 % KUP erzielt werden (Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13), da KUP das geringste Risiko aller Kulturen aufwies. Gleichzeitig wiesen die risikominimalen Portfolios höhere erwartete Deckungsbeiträge auf als die risikominimalen Portfolios ohne KUP, welche geringe Deckungsbeiträge von knapp über Null € ha⁻¹ a⁻¹ erzielten. In den Getreidebaubetrieben (Abbildung 11) führte das geringe ökonomische Risiko von KUP in Verbindung mit erwarteten Deckungsbeiträgen, welche über denen der Getreidearten lagen, dazu, dass für alle Getreidebaubetriebe der Anbau von 100 % KUP ökonomisch vorteilhaft war. Einzig in der Modellregion Wunsiedel konnte durch Kombination von Getreidekulturen ein Portfolio mit höheren Deckungsbeiträgen erreicht werden. Die 20 %ige Steigerung des Deckungsbeitrags ging in diesem Fall jedoch mit einer Erhöhung des Risikos um knapp 100 % einher. Somit konnten durch den Anbau von (nahezu) 100 % KUP die stetigsten Deckungsbeiträge in allen untersuchten Getreidebaubetrieben erzielt werden. In drei der vier Modellbetriebe schnitt der Anbau von 100 % KUP sogar hinsichtlich des erwarteten Deckungsbeitrags am besten ab.

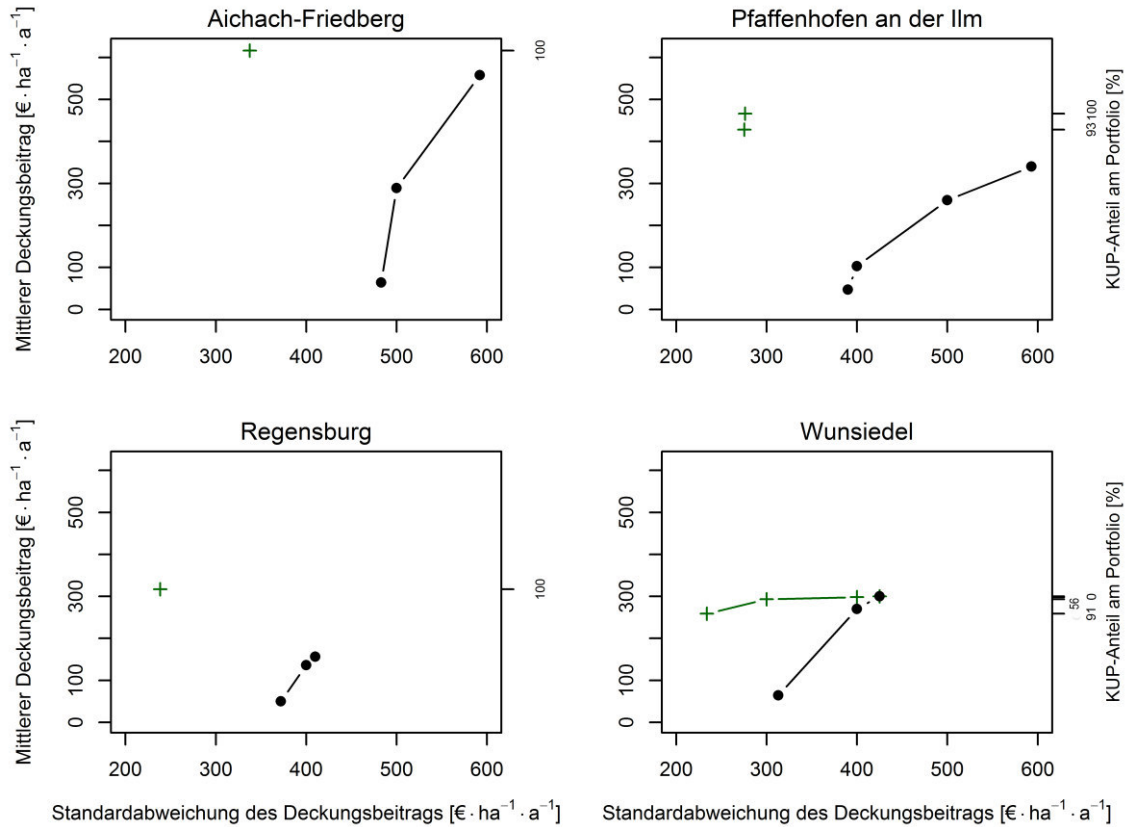


Abbildung 11: Übersicht der effizienten Portfolios von Getreidebaubetrieben der vier Modellregionen. Portfolios mit konventionellen Kulturen, ohne KUP, sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet. Portfolios, bei denen zusätzlich KUP zugelassen wurden, sind mit grünen Kreuzen gekennzeichnet. Für diese sind die KUP-Anteile auf der zweiten (rechten) y-Achse angegeben (verändert nach Hauk et al. 2015a)

Es muss jedoch erwähnt werden, dass der Anbau von 100 % KUP, ohne den Anbau von konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen, zu einer absoluten Abhängigkeit von der Biomasseproduktion mit KUP führt. Die fehlende Anbau- und Produktdiversifizierung würde landwirtschaftliche Betriebe verletzlich gegenüber Ertrags- und Preisvariabilität oder sogar starken Preiseinbrüchen machen. Da zukünftige Erzeugerpreisentwicklungen nur bedingt prognostizierbar sind und der KUP-Anbau mit einer vergleichsweise hohen Anfangsinvestition sowie einer nach mehreren Jahren erst eintretenden Gewinnschwelle verbunden ist (Buchholz und Volk 2011; Ericsson et al. 2006), kann nicht empfohlen werden, dieses Extremszenario zu realisieren. Es weist jedoch eindeutig auf die Vorteilhaftigkeit des KUP-Anbaus in Getreidebaubetrieben hin. Ein weiterer Grund gegen den Anbau von 100 % KUP ist, dass die biophysikalischen Risiken, die bei großflächigem KUP-Anbau auftreten können, bislang nur unzureichend quantifiziert wurden. Besonders mangelt es an Langzeitstudien zu biophysikalischen Risiken des KUP-Anbaus (z.B.

Nordman et al. 2005; Coyle et al. 2002). Wenngleich versucht wurde, die biophysikalischen Risiken in dieser Studie bestmöglich abzubilden, besteht hierbei weiterer Forschungsbedarf. Hierzu kann empfohlen werden, umfassende Meta-Analysen zur Ertragsvariabilität durchzuführen und diese in weiteren Portfoliooptimierungen zu berücksichtigen. Unter Beachtung der aufgeführten Einschränkungen zeigen die Ergebnisse dieser Studie, dass der KUP-Anbau eine Portfolioerweiterung von Getreidebaubetrieben darstellt, die zu gesteigerten Deckungsbeiträgen und deutlich verringertem Risiko auf Betriebsebene führt. Daher kann der KUP-Anbau besonders in Getreidebaubetrieben – aus ökonomischer Sicht sogar mit hohen Flächenanteilen – empfohlen werden.

Auch in Hackfruchtbaubetrieben, welche zusätzlich zu den Getreidearten in der Lage waren, die deckungsbeitragsstarken Hackfrüchte (Speisekartoffel und Zuckerrübe) anzubauen, wurde das geringste ökonomische Risiko durch den Anbau von (nahezu) 100 % KUP erzielt (Abbildung 12 und Abbildung 13).

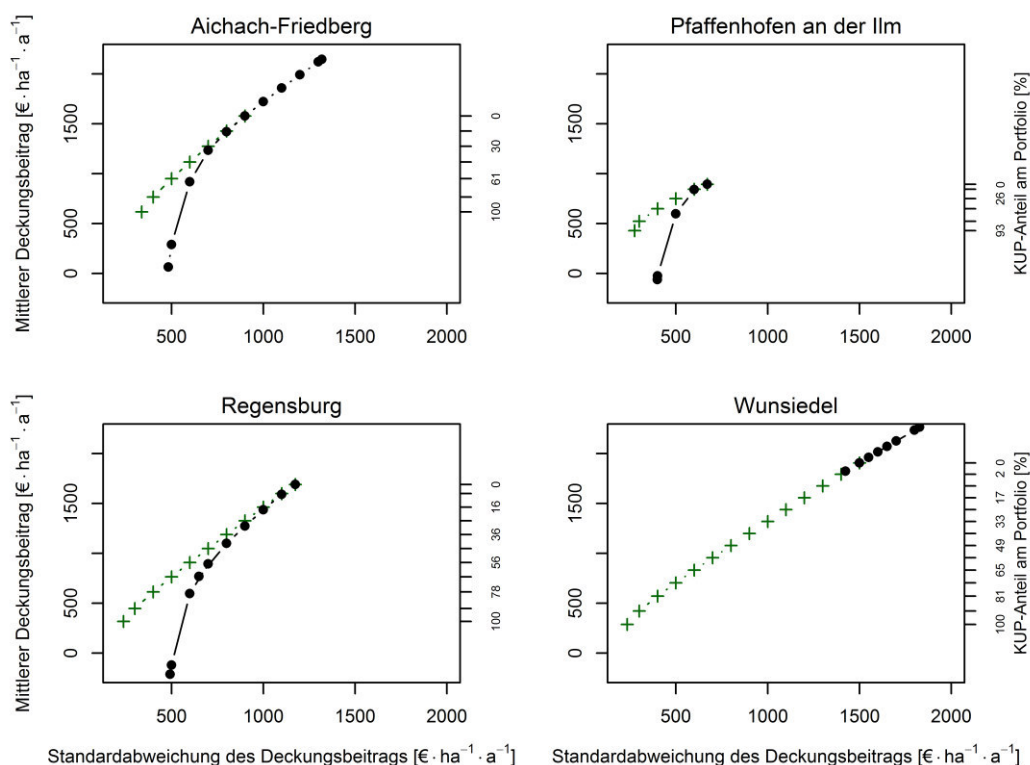


Abbildung 12: Übersicht der effizienten Portfolios von Hackfruchtbaubetrieben der vier Modellregionen. Portfolios mit konventionellen Kulturen, ohne KUP, sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet. Portfolios, bei denen zusätzlich KUP zugelassen wurden, sind mit grünen Kreuzen gekennzeichnet. Für diese sind die KUP-Anteile auf der zweiten (rechten) y-Achse angegeben (verändert nach Hauk et al. 2015a)

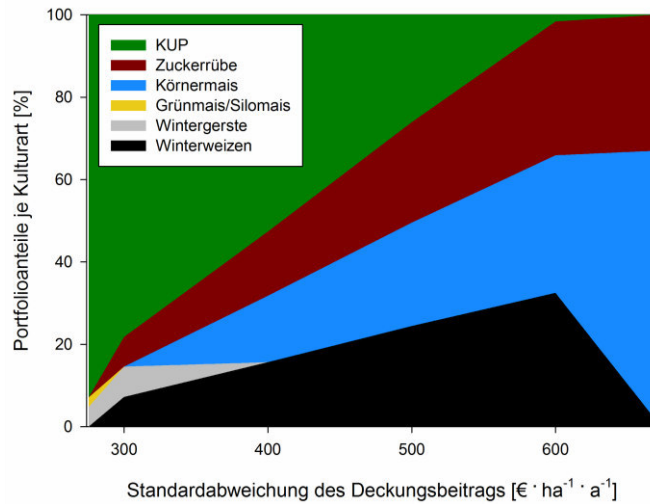


Abbildung 13: Portfolioanteile der jeweiligen Kultur in Abhängigkeit des akzeptierten Risikos am Beispiel des Hackfruchtbaubetriebs der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm

Gleichzeitig wiesen diese risikominimalen Portfolios höhere Deckungsbeiträge auf, als die risikominimalen Portfolios ohne KUP. Je mehr Risiko akzeptiert wurde, desto mehr nahm der Anteil der deckungsbeitragsschwachen und risikoarmen Kulturen zugunsten der deckungsbeitragsstarken und riskanteren Kulturen ab (Abbildung 13), wodurch die Deckungsbeiträge auf Betriebsebene gesteigert werden konnten. Dieser Trend zeichnete sich sowohl für Portfolios mit KUP als auch für Portfolios ohne KUP ab. Wurde der KUP-Anbau zugelassen, traten Diversifikationseffekte auf, die höhere Anteile deckungsbeitragsstärkerer (und meist riskanterer) Kulturen bei gleichem akzeptierten Risiko ermöglichten und sich somit höhere Deckungsbeiträge des Portfolios realisieren ließen (vergleiche Portfolios mit und ohne KUP in Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 16 und Abbildung 17). Dieser Effekt trat auf, sobald und solange KUP Portfoliobestandteil landwirtschaftlicher Betriebe war. Umgekehrt ließen sich durch Integration von KUP in landwirtschaftliche Portfolios gleich hohe Deckungsbeiträge bei geringerem Risiko erzielen, als dies ohne KUP möglich war. Die beschriebenen Diversifikationseffekte traten auf, da die Deckungsbeiträge von KUP und den landwirtschaftlichen Kulturen schwächer korrelierten als die der landwirtschaftlichen Kulturen untereinander. Einzig in der Modellregion Wunsiedel traten nur geringe Diversifikationseffekte auf, was jedoch an der Besonderheit des Modellhackfruchtbaubetriebs in Wunsiedel lag. Um der landwirtschaftlichen Praxis in der Region gerecht zu werden, wurde ein spezieller Kartoffelbetrieb modelliert, bei dem hohe Kartoffelanteile bis 66 % (Kartoffelbewirtschaftung mit Flächentausch) und als einzige weitere Kultur Sommergerste angenommen wurde. Die resultierenden landwirtschaftlichen Portfolios wiesen sehr hohe Deckungsbeiträge und gleichzeitig hohes Risiko auf. Erst die Integration von KUP ermöglichte in dem Hackfruchtbaubetrieb Wunsiedels

landwirtschaftliche Portfolios mit geringerem ökonomischem Risiko. Wurden anstelle dieser speziellen Kulturartenzusammensetzung und besonderen Fruchtfolgerestriktion (Speisekartoffel >33 %) die übliche Fruchtfolgerestriktion für Speisekartoffel eingehalten und weitere – in der Region übliche – Kulturen zugelassen, waren Diversifikationseffekte in ähnlichem Umfang wie in den anderen Hackfruchtbaubetrieben zu beobachten (vergleiche Kapitel 8.6). Somit führte die Integration von KUP in landwirtschaftliche Portfolios auch in Hackfruchtbaubetrieben zu Diversifikationseffekten auf Betriebsebene. Diese positiven ökonomischen Effekte machten KUP zu einer ökonomisch sinnvollen Erweiterung landwirtschaftlicher Anbau- und Produktportfolios.

Aufgrund der Unterschiede von KUP und landwirtschaftlichen Kulturen hinsichtlich Ökologie und Standortsansprüche, deren Produkte sowie Absatzmärkte, basieren die erzielten Diversifikationseffekte auf einer soliden Grundlage. Von ähnlichen Diversifikationseffekten, durch Diversifizierung der Kultur- oder sogar der Landnutzungsarten, wurde bereits in mehreren Studien berichtet (z.B. Castro et al. 2015; Djanibekov und Khamzina 2014; Knoke et al. 2014; Knoke et al. 2005; Macmillan 1992; Kaplan 1985), sobald deren ökonomische Zielgrößen schwach korreliert waren. Die Eignung der Modernen-Portfolio-Theorie zur Quantifizierung von ökonomischen Diversifikationseffekten sowie zur Optimierung von Portfolios wird in den zuvor genannten Studien und besonders ausführlich von Markowitz (2014) und Markowitz (1952) diskutiert. Die Vorteile und Einschränkungen der Modernen-Portfolio-Theorie hinsichtlich der Fragestellung dieser Arbeit werden in Kapitel 5 zusammenfassend beleuchtet.

Die in dieser Studie vorgestellten ökonomischen Diversifikationseffekte sind besonders aus Sicht von risikoaversen Landnutzungsentscheidungsträgern relevant, deren Entscheidung über die Flächenallokation nicht nur von den erwarteten Deckungsbeiträgen, sondern auch von den ökonomischen Risiken abhängig ist (Kruschwitz 2009; Dayanada 2002). Die Berechnung der effizienten Portfolios ermöglichte es, optimale Portfolios für alle Landnutzungsentscheidungsträger mit (unterschiedlich hoher) Risikoaversion darzustellen. Je nach Grad der Risikoaversion betragen die KUP-Anteile zwischen 0 % und 100 %. Werden also für bestimmte Hackfruchtbaubetriebe Empfehlungen zu den KUP-Anteilen angestrebt, sind entweder Kenntnisse des Grades der Risikoaversion notwendig oder es müssen geeignete Kennzahlen zur Auswahl optimaler Portfolios angewendet werden. Eine in der Finanzbranche gängige Kennzahl zur Auswahl optimaler Portfolios ist die Sharpe-Ratio oder auch Reward-to-Variability-Ration genannt (Sharpe 1994; Sharpe 1966). Diese setzt die Überrendite einer Investition oder auch eines Portfolios ins Verhältnis zur ökonomischen Variabilität der Investition. Wird diese unter der Annahme des inflationsbereinigten Zinssatzes von 0,01 % (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2015) von quasi risikofreien Anlagen – Deutsche Bundeswertpapierrendite mit einer

Laufzeit von über zehn Jahren (Deutsche Bundesbank 2015) – für den betrachteten Zeitraum angewandt, werden folgende KUP-Flächenanteile für risikoaverse Landwirte empfohlen: 61 % (AIC), 78 % (PAF), 16 % (R), 65 % (WUN). Da die standörtlichen Bedingungen der landwirtschaftlichen Betriebe in den Modellregionen jedoch variabel sind, die Risikoeinstellung der Landwirte sehr unterschiedlich ist (Ewald et al. 2012) und die Annahmen hierzu nicht trivial sind (Pannell et al. 2000), wird aufbauend auf den präsentierten Ergebnissen empfohlen, konkrete Empfehlungen zu KUP-Flächenanteilen mit Hilfe der empirischen Sozialforschung (z.B. Befragung von Landwirten) abzuleiten.

4.4.3 Betriebswirtschaftliche Analyse von KUP – Variante unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen

Aufgrund der hohen Investitionskosten und der verhältnismäßig späten Gewinnschwelle des KUP-Anbaus, ist es aus ökonomischer Sicht ineffizient, eine KUP vor dem geplanten Investitionszeitraum zu rekultivieren (Buchholz und Volk 2011; Ericsson et al. 2006). Somit geht ein gewisser Flexibilitätsverlust mit dem Anbau von KUP einher (z.B. Wolbert-Haverkamp und Musshoff 2014), da auf sich verändernde Marktsituationen nicht – oder nur unter Hinnahme der daraus entstehenden ökonomischen Nachteile – mit einem Wechsel der Kulturart reagiert werden kann. Um den Einfluss veränderter Markt- oder Umweltzustände, welche die Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturarten überproportional begünstigen, auf die in Kapitel 4.4.1 und Kapitel 4.4.2 präsentierten Ergebnisse zu testen, wurde eine Variante betrachtet, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden. In dieser Variante wurden die Deckungsbeiträge der konventionellen Kulturen auf dem mittleren Niveau des Jahres angenommen, in welchem, über alle Kulturen gemittelt, die höchsten Deckungsbeiträge der Zeitreihe erzielt wurden, wohingegen das Niveau der DB der KUP konstant blieb.

Auch unter der Annahme einer erhöhten Wirtschaftlichkeit der konventionellen Kulturen, war KUP die Kultur, mit welcher sich die stetigsten Deckungsbeiträge erzielen ließen (Tabelle 8). Die erwarteten Deckungsbeiträge der KUP waren jedoch geringer als die aller verglichenen konventionellen Kulturen. Dennoch waren die minimalen Deckungsbeiträge nach wie vor höher als diejenigen aller verglichenen Kulturen; negative Deckungsbeiträge blieben mit KUP aus.

Tabelle 8: Übersicht der durchschnittlichen Deckungsbeiträge (\bar{DB}) [$\text{€ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] und Standardabweichung (SD) [$\text{€ ha}^{-1} \text{a}^{-1}$] der untersuchten Kulturen in den vier Modellregionen: Aichach-Friedberg, Pfaffenhofen an der Ilm, Regensburg (Landkreis) und Wunsiedel für die Variante unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen (verändert nach Hauk et al. 2015a)

	Aichach-Friedberg		Pfaffenhofen an der Ilm		Regensburg (Landkreis)		Wunsiedel	
	\bar{DB}	SD	\bar{DB}	SD	\bar{DB}	SD	\bar{DB}	SD
Grünmais	1162	910	1111	847	1054	815	959	805
Körnermais	1404	1014	1475	1070	1120	1052	--	--
KUP	617	338	466	276	317	239	287	235
Sommergerste	--	--	--	--	--	--	442	533
Speisekartoffel	3703	3213	--	--	3306	2922	2529	2430
Wintergerste	714	697	519	572	427	509	418	535
Winterraps	925	650	741	564	837	583	869	660
Winterroggen	--	--	--	--	--	--	423	481
Winterweizen	973	788	842	679	896	707	--	--
Zuckerrübe	3145	1132	2985	1100	3336	1269	--	--

Selbst unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit der konventionellen Kulturen, wies KUP die im Basisszenario (Kapitel 4.4.1) präsentierten positiven Merkmale hinsichtlich des ökonomischen Risikos auf (Abbildung 14 und Abbildung 15). So ergaben sich für KUP nach wie vor die geringste Spannweite der Deckungsbeiträge aller Kulturen und die geringste Wahrscheinlichkeit negativer Deckungsbeiträge.

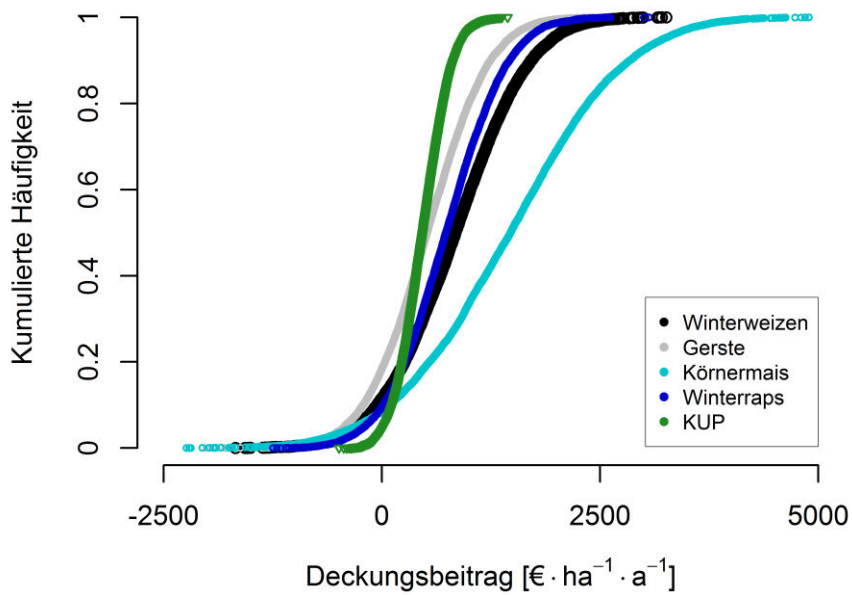


Abbildung 14: Kumulierte Häufigkeiten der Deckungsbeiträge ausgewählter Getreidekulturen und KUP unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen, am Beispiel der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm

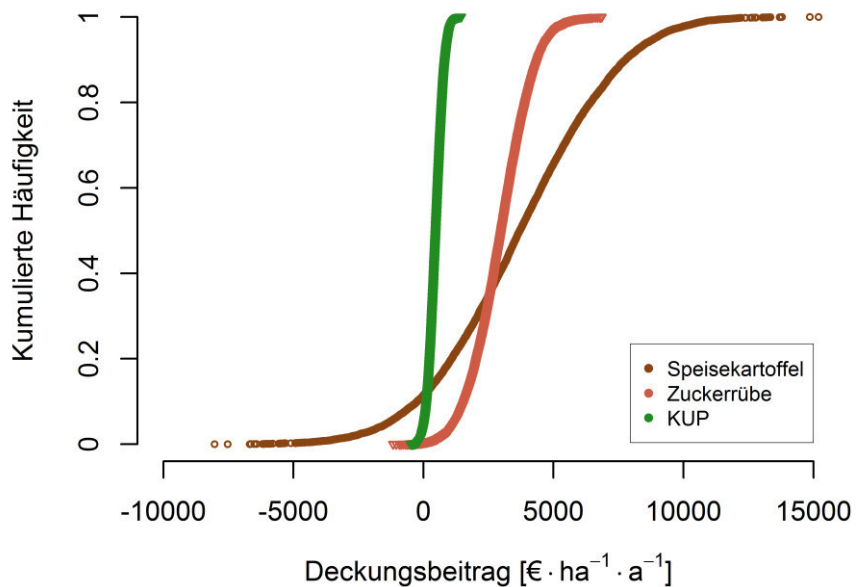


Abbildung 15: Kumulierte Häufigkeiten der Deckungsbeiträge ausgewählter Hackfrüchte und KUP unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen, am Beispiel der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm

4.4.4 KUP als Portfoliobestandteil von Marktfruchtbaubetrieben – Variante unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen

Auch unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller landwirtschaftlicher Kulturen, konnten die stetigsten Deckungsbeiträge auf Betriebsebene mit dem Anbau von 100 % KUP erreicht werden (Abbildung 16, Abbildung 17 und Abbildung 18).

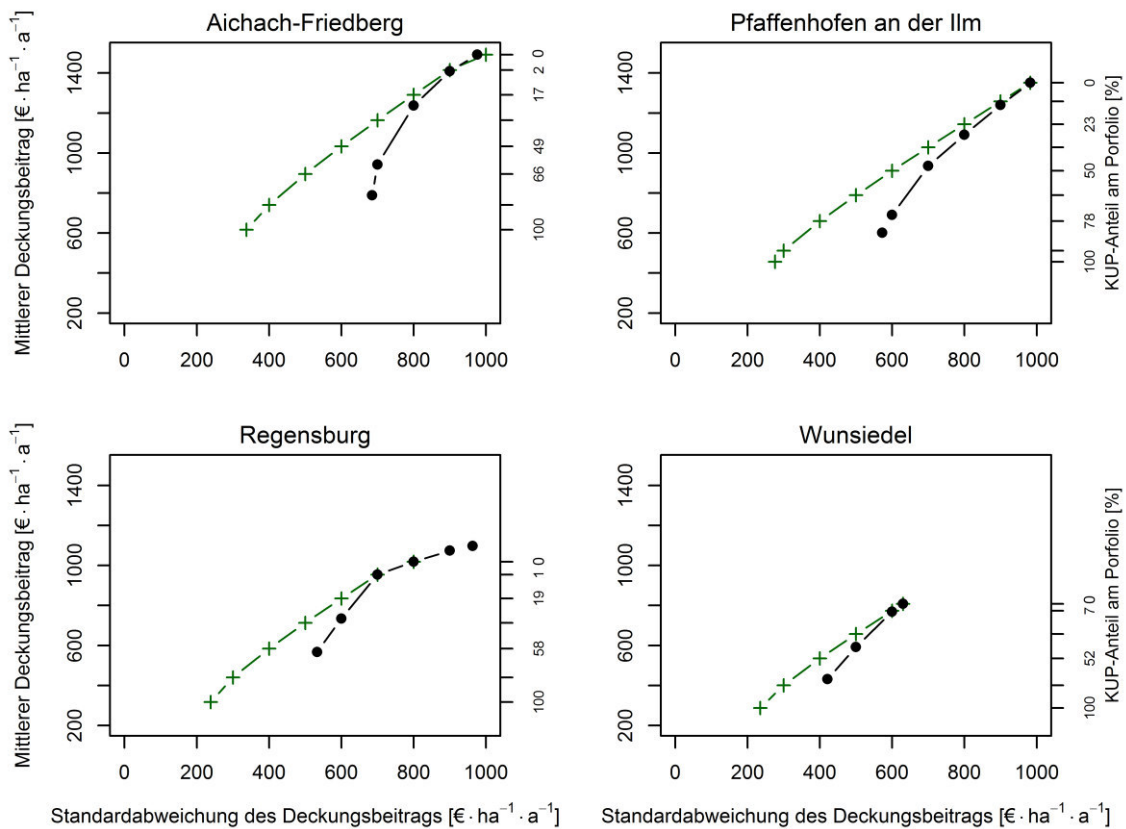


Abbildung 16: Übersicht der effizienten Portfolios von Getreidebaubetrieben der vier Modellregionen unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen. Portfolios mit konventionellen Kulturen, ohne KUP, sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet. Portfolios bei denen zusätzlich KUP zugelassen wurden, sind mit grünen Kreuzen gekennzeichnet. Für diese sind die KUP-Anteile auf der zweiten (rechten) y-Achse angegeben (verändert nach Hauk et al. 2015a)

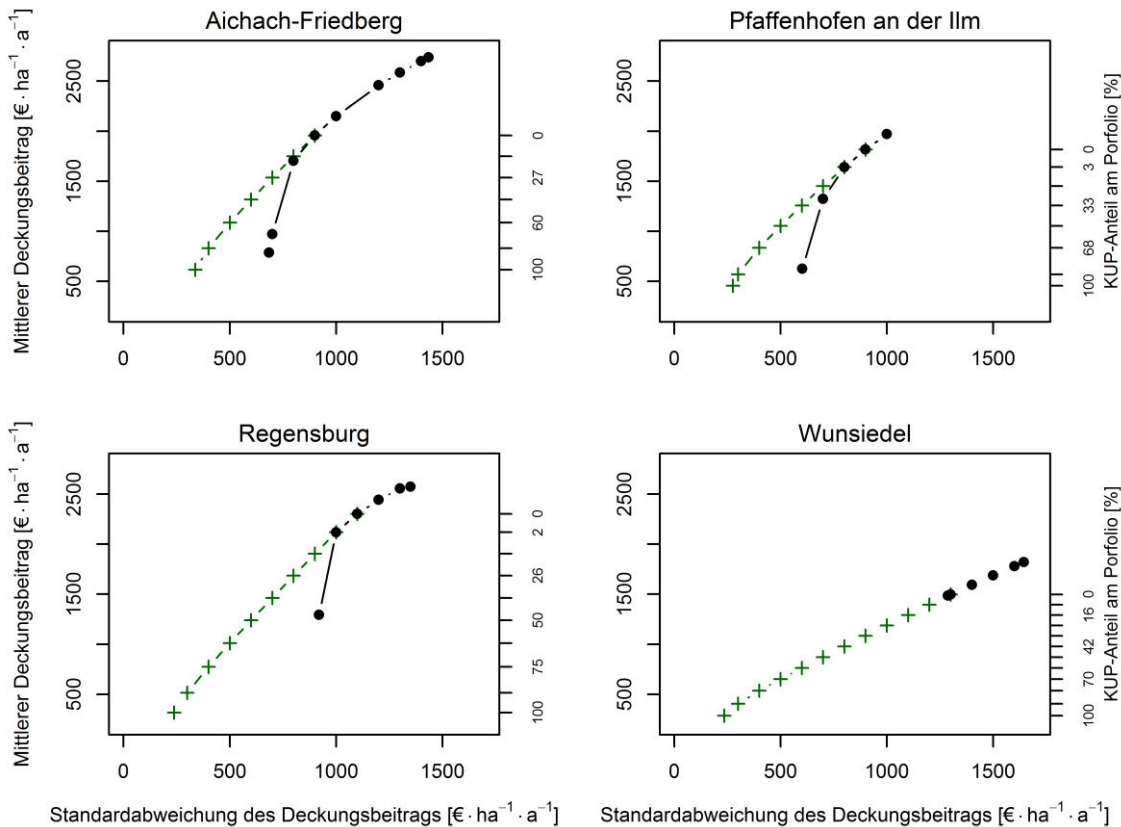


Abbildung 17: Übersicht der effizienten Portfolios von Hackfruchtbaubetrieben der vier Modellregionen unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen. Portfolios mit konventionellen Kulturen, ohne KUP, sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet. Portfolios bei denen zusätzlich KUP zugelassen wurden, sind mit grünen Kreuzen gekennzeichnet. Für diese sind die KUP-Anteile auf der zweiten (rechten) y-Achse angegeben (verändert nach Hauk et al. 2015a)

Dahingegen wiesen alle risikominimalen Portfolios, bestehend aus rein konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen, höhere Deckungsbeiträge auf. Die erhöhte Wirtschaftlichkeit der konventionellen Kulturen resultierte insgesamt in einem deutlichen Anstieg der Deckungsbeiträge der Portfolios, einhergehend mit einem Anstieg des ökonomischen Risikos, im Vergleich zum Basisszenario (vergleiche Kapitel 4.4.2). Trotz der erhöhten Wirtschaftlichkeit der konventionellen Kulturen, war KUP über weite Bereiche des akzeptierten Risikos Bestandteil des jeweiligen Portfolios (Abbildung 18).

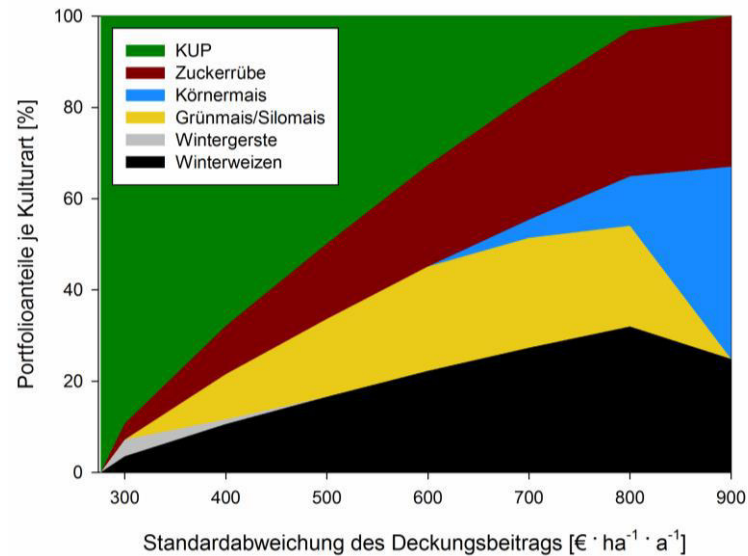


Abbildung 18: Portfolioanteile der jeweiligen Kultur in Abhängigkeit des akzeptierten Risikos, unter der Annahme erhöhter Wirtschaftlichkeit konventioneller Kulturen, am Beispiel des Hackfruchtbaubetriebs der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm

In allen Getreidebaubetrieben sowie in den Hackfruchtbaubetrieben der Modellregionen Pfaffenhofen an der Ilm und Regensburg war KUP sogar bis ausschließlich der risikomaximalen Portfolios in allen effizienten Portfolios, bei denen KUP zugelassen wurde, enthalten. In Getreidebaubetrieben (Abbildung 16) führte die gesteigerte Wirtschaftlichkeit der konventionellen Kulturen dazu, dass nun höhere Deckungsbeiträge mit kulturarten- diversifizierten Portfolios – inklusive KUP – erzielt wurden als durch den reinen KUP- Anbau, wie dies im Basisszenario der Fall gewesen ist (vergleiche Kapitel 4.4.2). Die Ergebnisse der Variantenrechnung zeigten, dass der KUP-Anbau aufgrund des diversifi- zierenden beziehungsweise risikomindernden Effekts, selbst dann für landwirtschaftliche Betriebe ökonomisch sinnvoll und KUP daher in den meisten Portfolios enthalten war, wenn mit konventionellen Kulturen weitaus höhere Deckungsbeiträge als mit KUP erzielt werden konnten. Somit waren die im Basisszenario identifizierten Diversifikationseffekte robust gegenüber den untersuchten Marktverschiebungen zugunsten landwirtschaftlicher Kulturen. Die Bedeutung beziehungsweise der Erkenntnisgewinn einer solchen Vari- antenrechnung wird im nachfolgenden Kapitel zusammenfassend dargelegt.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch Wahl eines breiten Forschungsansatzes konnten in der vorliegenden Studie:

- Vorschläge für eine verbesserte und transparentere ökonomische Analyse von KUP gemacht werden,
- bislang einzigartige Daten von und Informationen zu kommerziell betriebenen KUP in Bayern gewonnen und bereitgestellt werden,
- positive ökonomische Merkmale des KUP-Anbaus – geringste ökonomische Variabilität sowie erwartete Deckungsbeiträge, die höher als die der meisten verglichenen Kulturen waren – identifiziert werden,
- ökonomische Effekte, die durch Integration von KUP in landwirtschaftliche Portfolios entstehen modelliert und quantifiziert werden
- und somit eine umfassendere Betrachtung der ökonomischen Bewertung von KUP sowie eine Grundlage zur Entscheidung unter Unsicherheit bereitgestellt werden.

Die in dieser Studie vorgestellten Merkmale von KUP-Betreibern bestätigten die ersten Hinweise von Roos et al. (2000) und Rosenqvist et al. (2000) auf die Präsenz von spezifischen Merkmalen von KUP-Betreibern. Diese sollten in weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen, die sich mit der praktischen Implementierung von KUP beschäftigen, beachtet und für andere Regionen geprüft werden. Außerdem erleichtern die gefundenen Merkmale von KUP-Betreibern und von landwirtschaftlichen Betrieben mit KUP, politischen Entscheidungsträgern die Entwicklung zielgruppenorientierter Maßnahmen zur Förderung von KUP. Dass für den KUP-Anbau vorzugsweise Flächen verwendet werden, die unterdurchschnittliche Eignung für eine landwirtschaftliche Produktion aufweisen, ist im Hinblick auf die Flächenkonkurrenz und somit aus ethischer Sicht positiv zu bewerten. Da eine unterdurchschnittliche landwirtschaftliche Produktivität auch zu geringeren Opportunitätskosten führt, ergibt sich daraus ebenso ein positiver ökonomischer Effekt. Die Analyse von kommerziellen KUP und der Merkmale ihrer Betreiber bietet also die Chance die realen Verhältnisse bei der Implementierung besser einzuschätzen, tendenziell (weitere) adoptionsoffene Zielgruppen zu identifizieren und Möglichkeiten eine effiziente sowie regionale Biomasseproduktion, unter Berücksichtigung von Landnutzungskonkurrenzen, zu erzielen.

Die hohen Biomasseerträge der untersuchten kommerziell betriebenen KUP, welche auf Flächen mit unterdurchschnittlicher Standortsgüte erzielt wurden, weisen darauf hin, dass eine effiziente Landnutzung mit KUP möglich ist. So muss die Biomasseproduktion mit KUP nicht unweigerlich zu Flächennutzungskonkurrenzen und damit zu deutlichen

Preissteigerungen zum Beispiel für den Kauf oder die Pacht von Land führen, wie dies aktuell beim Maisanbau für Bioenergie zu beobachten ist. Wenngleich die Standortsansprüche sowohl von KUP-Baumarten als auch von landwirtschaftlichen Kulturen jeweils umfassend untersucht und der Öffentlichkeit zugänglich sind (z.B. Serapiglia et al. 2013; Schubert 2011; Lindroth und Båth 1999; Lang 1994), wurden die ökonomischen und ökologischen Synergieeffekte und die sich daraus ergebenden Chancen, bisher weder in der Wissenschaft, noch in der öffentlichen Beratung umfassend thematisiert. Erste Ansätze dazu finden sich in den Arbeiten von Aust et al. (2014) und Murn (2007), die durch Verschneidung von Standortdaten und Standortsansprüchen der KUP-Baumarten sowohl geeignete Regionen, als auch die jeweiligen Anbaupotenziale identifizieren und darstellen konnten. Damit bieten diese Studien erste methodische Ansätze, um geeignete Standorte für den KUP-Anbau zu identifizieren. Während beide Modelle regionale Potenziale aufzeigen konnten, sind sie – aufgrund der begrenzten Geodatenlage in entsprechend hoher Auflösung – weder in der Lage Biomasseerträge für KUP noch die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen mit hoher Genauigkeit flurstückspezifisch zu berechnen. Genau dies wäre jedoch nötig, um interessierten Flächeneigentümern eine rationale Entscheidungsgrundlage für die Flächenauswahl zu bieten und Flächenkonkurrenzen zu reduzieren. Bis die Geodatenlage verlässliche flurstückspezifische Aussagen zulässt, erscheint es daher sinnvoll, die Beratungsleistung durch regionale Institutionen (z.B. Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) insofern zu verbessern, als dass sie interessierten Flächeneigentümern besonders geeignete Standorte für den KUP-Anbau (hohe Biomasseproduktion mit KUP bei gleichzeitig nur mäßigen Erträgen traditioneller landwirtschaftlicher Kulturen und damit geringen Opportunitätskosten) aufzeigen sollten.

Die hohe Ertragsvariabilität der untersuchten KUP sollte in betriebswirtschaftlichen Analysen berücksichtigt werden. Besonders bei heterogenen standörtlichen Gegebenheiten und heterogenen Bewirtschaftungsmaßnahmen erscheint daher allein die Verwendung von mittleren Biomasseerträgen als nicht ausreichend, um die Frage der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit von KUP realitätsnah zu beantworten.

Da die Deckungsbeiträge von KUP und diejenigen der betrachteten landwirtschaftlichen Kulturen nicht perfekt positiv korreliert sind, führte die Integration von KUP in landwirtschaftliche Portfolios zu Diversifikationseffekten. Damit stellt der Anbau von KUP eine effektive Strategie des Risikomanagements landwirtschaftlicher Betriebe dar. Die Portfoliotheorie bietet ein methodisches Instrument zu einer ökonomischen Analyse, mit der sich verschiedene Investitionsalternativen betrachten, Unsicherheiten berücksichtigen und besonders die durch Mischung der einzelnen Portfoliobestandteile entstehenden Effekte quantifizieren lassen. Da hierdurch die Frage der ökonomischen Konkurrenzfähigkeit umfassender als mit den bisher verwendeten methodischen Ansätzen beantwor-

tet werden kann, wird die Anwendung der Portfoliotheorie für weitere Studien mit vergleichbaren Fragestellungen empfohlen. Dabei sind jedoch folgende Einschränkungen zu beachten:

Die Anwendung der Portfoliotheorie setzt unter anderem voraus, dass der Entscheidungsträger rationell handelt und risikoavers ist (Markowitz 1952). Wenngleich viele Landnutzungsentscheidungsträger als risikoavers eingeschätzt werden (z.B. Jianjun et al. 2015; Holt und Laury 2014; Reynaud und Couture 2012), trifft dies nicht für alle zu; einige zeigen sich sogar als risikofreudig (Ewald et al. 2012). Daher beschränkt sich die Bedeutung der aufgezeigten Diversifikationseffekte auf risikoaverse Entscheidungsträger. Eine weitere Voraussetzung zur Anwendung der Portfolio-Theorie ist, dass die finanziellen Zielgrößen der einzelnen Portfoliobestandteile normal verteilt sind. Dies traf für die Deckungsbeiträge der analysierten Kulturen zu, muss jedoch für jede Anwendung bei ähnlichen Fragestellungen geprüft werden. In dem jüngsten Artikel von Markowitz (2014) geht dieser auf diese Voraussetzung ein und zeigt auf, weshalb eine Portfoliooptimierung allerdings auch bei nicht normalverteilten Zielgrößen angewendet werden kann.

Die Variantenrechnung, für die eine (teilweise stark) erhöhte Wirtschaftlichkeit konventioneller landwirtschaftlicher Kulturen angenommen wurde, lieferte Hinweise dafür, dass der Anbau von KUP beziehungsweise die Integration in landwirtschaftliche Portfolios, selbst bei starken ökonomischen Verschiebungen zugunsten konventioneller Kulturen, noch zu Diversifikationseffekten führt und ökonomisch sinnvoll sein kann. Solch extreme Verschiebungen zugunsten landwirtschaftlicher Kulturen erscheinen aus momentaner Sicht, aufgrund der nach wie vor hohen Nachfrage nach holziger Biomasse, eher unwahrscheinlich. Die Analyse einer solchen Variante ist jedoch aufschlussreich, um die Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen und damit die Stabilität der Ergebnisse und getroffenen Aussagen zu testen. Dies ist bei dem Anbau von KUP umso wichtiger, da der Landnutzungsentscheidungsträger bei KUP auf veränderte (Markt-) Bedingungen nur bedingt mit einem Kulturartenwechsel reagieren kann. Aufgrund der hohen Anfangsinvestition und der erst nach mehreren Jahren eintretenden Gewinnschwelle ist eine frühzeitige Rückumwandlung und ein Kulturartenwechsel mit ökonomischen Einbußen verbunden (Buchholz und Volk 2011; Ericsson et al. 2009). Der Anbau von KUP geht also mit einem gewissen Flexibilitätsverlust einher. Die Kosten dieses Flexibilitätsverlustes wurden mit Hilfe der Realoptionstheorie in den Studien von Wolbert-Haverkamp und Musshoff (2014) und Musshoff (2012) quantifiziert. Demnach müsse die Wirtschaftlichkeit der KUP circa 50 % höher sein, als dies die herkömmliche Investitionsentscheidungstheorie vorschlägt, um den Flexibilitätsverlust zu kompensieren. Wenngleich die verwendete Methode nicht unumstritten ist (Kruschwitz 2009), verdeutlicht die Höhe der

Kosten des Flexibilitätsverlustes durch KUP, weshalb dieser eines der wichtigsten Hemmnisse des KUP-Anbaus darstellen kann (Sherrington und Moran 2010; Sherrington und Moran 2008). Andererseits bietet der Anbau von mehrjährigen Kulturen jedoch auch einen Gewinn an Flexibilität. Da der Erntezeitpunkt um ein oder sogar mehrere Jahre verschoben werden kann, hat der Bewirtschafter die Chance, die Erlöse des Holzverkaufs gezielt bei günstigen Marktbedingungen zu realisieren. Sollen also die durch den KUP-Anbau entstehenden Änderungen der Handlungsflexibilität untersucht werden, so wird empfohlen, sowohl die Flexibilitätsverluste als auch die Flexibilitätsgewinne zu berücksichtigen. Da jedoch selbst in der betrachteten Variante mit deutlich erhöhter Wirtschaftlichkeit von landwirtschaftlichen Kulturen, der Anbau von KUP nach wie vor empfohlen werden kann, ist es durchaus offen, ob die Höhe der Kosten des Flexibilitätsverlusts und somit die Bedeutung des Flexibilitätsverlusts von Wolbert-Haverkamp und Musshoff (2014) und Musshoff (2012) nicht überschätzt wurde.

Sherrington et al. (2008) konnten in Fokusgruppenbefragungen von KUP-Betreibern und -Interessierten nachweisen, dass die Entscheidung für oder gegen den KUP-Anbau in erster Linie von der Einschätzung der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit und der ökonomischen Risiken abhängt. Während Landnutzungsentscheidungsträger sowohl Höhe als auch Variabilität der Erlöse konventioneller Kulturen sehr gut beurteilen konnten, fehlten ihnen entsprechende Erfahrungen zu KUP. Außerdem bemängelten sie die Schwierigkeit, die Wirtschaftlichkeit von KUP selbst zu berechnen, da sie keinen Zugriff auf verlässliche Datensammlungen zu Kosten, Preisen und Erträgen haben. Daher ist es nicht verwunderlich, dass KUP als Kultur mit großen Unsicherheiten wahrgenommen wird. Aufgrund dieser gefühlten Unsicherheit, in Verbindung mit einem Investitionszeitraum, der nicht nur ein Jahr, sondern gleich mehrerer Jahrzehnte umfasst, erscheint es daher nur allzu plausibel, dass Landnutzungsentscheidungsträger dem KUP-Anbau skeptisch gegenüber stehen und sich KUP nur zögerlich verbreiten. Mit dieser Studie konnten die Hauptadoptionshemmnisse von Landnutzungsentscheidungsträgern adressiert werden, indem die Wirtschaftlichkeit von KUP, unter Berücksichtigung von Ertrags- und Preisrisiken kalkuliert und konventionellen Kulturen gegenüber gestellt wurde. Entgegen der Bedenken der Landnutzungsentscheidungsträger, wies KUP das geringste ökonomische Risiko von allen verglichenen Kulturen sowie durchschnittliche Deckungsbeiträge auf, die mit den meisten konventionellen Kulturen konkurrieren konnten. Die Erweiterung des Anbau- und Produktportfolios durch KUP führte darüber hinaus zu Diversifikationseffekten und wirkte sich daher positiv auf landwirtschaftliche Betriebe aus. Somit konnten Landnutzungsentscheidungsträgern nun erstmals die erwartete Entscheidungsgrundlage unter Risiko bereitgestellt und die Vorbehalte gegen den KUP-Anbau relativiert werden.

Neben den in dieser Studie aufgezeigten ökonomischen Effekten der Diversifizierung, bietet eine Kulturartendiversifizierung landwirtschaftlicher Betriebe die Chance, die Resilienz von landwirtschaftlichen Betrieben zu steigern. Eine ausführliche und aktuelle Diskussion zur Resilienz landwirtschaftlicher Betriebe findet sich beispielsweise bei Darnhofer (2014). Im Hinblick auf die Klimaänderung, die vermutlich für Mitteleuropa höhere Temperaturen und geringere Niederschlagsmengen während der Vegetationsperiode bringt (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2014; Hollweg et al. 2008), kann der Anbau von Baumarten ein wertvolles Diversifikationselement darstellen, da diese im Vergleich zu konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen tiefere Bodenschichten erschließen und somit bei Witterungsschwankungen eine geringere Ertragsvariabilität zu erwarten ist. Über die Anbaudiversifizierung hinaus, ergeben sich Chancen der Produktdiversifizierung: Durch Anpassung der Umtriebszeit, und entsprechender Bewirtschaftung, kann mit KUP Biomasse sowohl für die stoffliche Nutzung als auch für die energetische Nutzung produziert werden. Wird die Biomasse zur Wärmebereitstellung verwendet, beispielsweise im eigenen landwirtschaftlichen Betrieb, lassen sich sogar, je nach den alternativen Wärmegestehungskosten (Hartmann et al. 2010), Gewinne durch die erweiterte Wertschöpfungskette realisieren. Im weitesten Sinne kann die Wärmeerzeugung mit eigenen Hackschnitzeln sogar als Hedgegeschäft verstanden werden, wobei Steigerungen der Kraftstoffpreise für Traktoren durch relative Verbesserung der Wärmegestehungskosten teilweise kompensiert werden können.

Somit scheint der KUP-Anbau für landwirtschaftliche Betriebe noch weitere (ökonomisch) günstige Effekte zu bieten. Um den KUP-Anbau zu fördern, das regionale Holzangebot zu erhöhen und von den damit einhergehenden Chancen zu profitieren, sollten aktuelle Forschungsergebnisse verstärkt in die Beratungspraxis einfließen, bei der sowohl die bestehenden Adoptionshemmnisse (z.B. McKenney et al. 2014; Neubert et al. 2013; Mola-Yudego und Pelkonen 2008; Sherrington und Moran 2008; Roos et al. 2000) als auch die Chancen des KUP-Anbaus gezielt thematisiert werden.

6 Literaturverzeichnis

- Arbeitskreis Standortkartierung (2003): Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 6. Aufl. Eching bei München: IHW-Verl.
- Aust, C.; Schweier, J.; Brodbeck, F.; Sauter, U. H.; Becker, G.; Schnitzler, J.-P. (2014): Land availability and potential biomass production with poplar and willow short rotation coppices in Germany. In: *GCB Bioenergy* 6 (5), S. 521–533.
- Barkley, A.; Barkley, P. W. (2013): Principles of agricultural economics. London, New York: Routledge.
- Bates, Douglas M.; Watts, Donald G. (Hg.) (1988): Nonlinear Regression Analysis and Its Applications. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc (Wiley Series in Probability and Statistics).
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (2014): LfL Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten. Konventionelle und ökologische Verfahren. Online verfügbar unter <https://www.stmelf.bayern.de/idb/default.html>, zuletzt geprüft am 03.02.2015.
- Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hg.) (2012): Biomasseproduktion von Kurzumtriebsplantagen. Ertragskundliche Ergebnisse des Projekts "Anbauversuche mit schnellwachsenden Baumarten im Kurzumtrieb". Freising.
- Bayerisches Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht (ASP) (2013): Energiewald. Anbau schnellwachsender Baumarten in Kurzumtriebskulturen. Online verfügbar unter http://www.asp.bayern.de/mam/cms02/asp/dateien/merkblatt_energiewald.pdf, zuletzt geprüft am 17.06.2015.
- Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) (2007): Agrarstrukturerhebung (Bodennutzung). Landwirtschaftlich genutzte Fläche. Online verfügbar unter <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/data?operation=abruftabelleAbrufen&selectionname=41121-202s&levelindex=1&levelid=1422903883705&index=7>, zuletzt geprüft am 02.02.2015.
- Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) (2009): Ernte- und Betriebsberichterstattung. Online verfügbar unter <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/data?operation=abruftabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1393601060726&auswahloperation=abruftabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=41241-001r&auswahltext=%23Z->

01.01.2009&nummer=5&variable=2&name=REGBEZ&werteabruf=Werteabruf, zuletzt geprüft am 28.02.2014.

Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) (2014): Ernte-, Betriebsberichterst.(EBE):Feldfr.,Grünland. Ernte: Kreis, Durchschnittlicher Hektarertrag, Fruchtart. München. Online verfügbar unter <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online>, zuletzt geprüft am 19.02.2015.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) (2014): Genehmigungspflicht für den Umbruch von Dauergrünland. Online verfügbar unter <http://www.stmelf.bayern.de/agrarpolitik/foerderung/072871/>, zuletzt geprüft am 05.03.2015.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) (Hg.) (2015): Zentrale InVeKoS Datenbank (ZID). Online verfügbar unter <http://www.zi-daten.de/>, zuletzt geprüft am 02.06.2015.

Becker, R.; Röhricht, C.; Ruscher, K.; Jäkel, K. (2014): Schnellwachsende Baumarten im Kurzumtrieb. Anbauempfehlungen. Hg. v. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden.

Ben-Tal, A.; Nemirovski, A. (2000): Robust solutions of Linear Programming problems contaminated with uncertain data. In: *Math. Program.* 88 (3), S. 411–424.

Bergez, J.-E.; Bouvarel, L.; Auclair, D. (1991): Short rotation forestry: An agricultural case study of economic feasibility. In: *Bioresour. Technol.* 35 (1), S. 41–47.

Bhende, M. J.; Venkataram, J. V. (1994): Impact of diversification on household income and risk: A whole-farm modelling approach. In: *Agricultural Systems* 44 (3), S. 301–312.

Biedermann, G.; Moitzi, G.; Boxenberger, J. (2010): Klar positive Energiebilanz in der Getreideproduktion. In: *Blick ins Land* 45 (2), S. 34–36.

Biertümpfel, A.; Graf, T.; Vetter, A. (2012): Ölfrüchte und Nachwachsende Rohstoffe. Feldversuchsbericht 2010 und 2011. Hg. v. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL). Jena.

Boehmel, C.; Lewandowski, I.; Claupein, W. (2008): Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. In: *Agricultural Systems* 96 (1–3), S. 224–236.

Brown, C. (2000): The global outlook for future wood supply from forest plantations. Global Forest Products Outlook Study. Working Paper No: GFPOS/WP/03. Hg. v. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome (FAO Working Paper Series). Online verfügbar unter <http://www.fao.org/docrep/003/X8423E/X8423E00.HTM>, zuletzt geprüft am 09.02.2015.

- Bruns, J. (2008): Marktforschung. Verfahren, Datenauswertung, Ergebnisdarstellung. 2., überarb. und erweiterte Auflage. Hg. v. Werner Pepels. Düsseldorf: Symposion (Marktforschung, 1).
- Buchholz, T.; Volk, T. (2011): Improving the Profitability of Willow Crops – Identifying Opportunities with a Crop Budget Model. In: *Bioenergy Res* 4 (2), S. 85–95.
- Bullard, M. J.; Mustill, S. J.; McMillan, S. D.; Nixon, P. M. I.; Carver, P.; P. Britt, C. (2002): Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp. – 1. Yield response in two morphologically diverse varieties. In: *Biomass & Bioenergy* 22 (1), S. 15–25.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV) (2010a): Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz). BWaldG, vom 31.07.2010. Fundstelle: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bwaldg/gesamt.pdf>. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bwaldg/gesamt.pdf>, zuletzt geprüft am 09.01.2015.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV) (2010b): Verordnung zur Durchführung der einheitlichen Betriebsprämie. BetrPrämDurchfV, vom 10.05.2010. Fundstelle: http://www.gesetze-im-internet.de/betrpr_mdurchfv/. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/betrpr_mdurchfv/, zuletzt geprüft am 09.01.2015.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2015): Dritte Bundeswaldinventur. Ergebnisdatenbank. Online verfügbar unter <https://bwi.info/inhalt1.3.aspx?Text=5.01%20Eigentumsart&prRolle=public&prInv=BW12012&prKapitel=5.01>, zuletzt geprüft am 05.01.2015.
- Burger, F. J. (2010): Bewirtschaftung und Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen. Dissertation. Technische Universität München, Freising. Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik, zuletzt geprüft am 28.03.2012.
- Burger, F. J. (2011): Viel Energie bei wenig Aufwand. Kurzumtriebsplantagen können rund 30 Jahre lang genutzt werden. In: *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt* (43), S. 56.
- C.A.R.M.E.N. e.V. (2015): Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln. Straubing. Online verfügbar unter <http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel/jahresmittelwerte>, zuletzt geprüft am 02.02.2015.
- Carle, J.; Holmgren, P. (2008): Wood from Planted Forests. Global Outlook 2005–2030. In: *Forest Prod J* (12), S. 6–18.

- Castro, L.; Calvas, B.; Hildebrandt, P.; Knoke, T. (2013): Avoiding the loss of shade coffee plantations: how to derive conservation payments for risk-averse land-users. In: *Agroforest Syst* 87 (2), S. 331–347.
- Castro, L. M.; Calvas, B.; Knoke, T. (2015): Ecuadorian banana farms should consider organic banana with low price risks in their land-use portfolios. In: *PloS one* 10 (3), S. e0120384.
- Chernick, M. R. (2008): Bootstrap methods. A guide for practitioners and researchers. 2. überarb. Aufl. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience (Wiley Series in Probability and Statistics).
- Christersson, L. (2008): Poplar plantations for paper and energy in the south of Sweden. In: *Biomass & Bioenergy* 32 (11), S. 997–1000.
- Coyle, D. R.; McMillin, J. D.; Hall, R. B.; Hart, E. R. (2002): Cottonwood leaf beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) defoliation impact on Populus growth and above-ground volume in a short-rotation woody crop plantation. In: *Agricultural and Forestry Entomology* 4 (4), S. 293–300.
- CREFF Project Consortium (2011): Cost reduction and efficiency improvement of Short Rotation Coppice. on small field sizes and under unfavorable site conditions by focusing on high product quality and a product-oriented cooperative value chain. CREFF Final Report - Project ERA-NET Bioenergy CREFF. Online verfügbar unter https://www.hs-rottenburg.net/fileadmin/user_upload/Forschung/Forschungsprojekte/Biomass/Era-Net/ERA-Net-Abschlussbericht.pdf, zuletzt geprüft am 02.02.2015.
- Darnhofer, I. (2014): Resilience and why it matters for farm management. In: *European Review of Agricultural Economics* 41 (3), S. 461–484.
- Dauber, J.; Jones, M. B.; Stout, J. C. (2010): The impact of biomass crop cultivation on temperate biodiversity. In: *GCB Bioenergy* 2 (6), S. 289–309.
- Dayanada, D. (2002): Capital budgeting. Financial appraisal of investment projects. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Deutsche Bundesbank (2015): Zinsstruktur für börsennotierte Bundeswertpapiere (Monats- und Tageswerte). Zinsstrukturkurve (Svensson-Methode) / Börsennotierte Bundeswertpapiere / 10,0 Jahr(e) RLZ / Monatsendstand. Online verfügbar unter http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen_Datenbanken/Makrooekonomische_Zeitreihen/its_list_node.html?listId=www_s140_it03a, zuletzt geprüft am 22.04.2015.

- Dillen, S. Y.; Djomo, S. N.; Al Afas, N.; Vanbeverem, S.; Ceulemans, R. (2013): Biomass yield and energy balance of a short-rotation poplar coppice with multiple clones on degraded land during 16 years. In: *Biomass & Bioenergy* 56, S. 157–165.
- Dimitriou, I.; Busch, G.; Jacobs, S.; Schmidt-Walter, P.; Lamersdorf, N. (2009): A review of the impacts of Short Rotation Coppice cultivation on water issues. In: *Agriculture and Forestry Research* 59 (3), S. 197–206.
- Dimitriou, I.; Mola-Yudego, B.; Aronsson, P. (2012a): Impact of Willow Short Rotation Coppice on Water Quality. In: *Bioenergy Res* 5 (3), S. 537–545.
- Dimitriou, I.; Mola-Yudego, B.; Aronsson, P.; Eriksson, J. (2012b): Changes in Organic Carbon and Trace Elements in the Soil of Willow Short-Rotation Coppice Plantations. In: *Bioenergy Res* 5 (3), S. 563–572.
- Dimitriou, I.; Rosenqvist, H. (2011): Sewage sludge and wastewater fertilisation of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production-Biological and economic potential. In: *Biomass & Bioenergy* 35 (2), S. 835–842.
- Dimitriou, I.; Rosenqvist, H.; Berndes, G. (2011): Slow expansion and low yields of willow short rotation coppice in Sweden; implications for future strategies. In: *'Biofuels and Bioenergy: Challenges and Opportunities' Proceedings of a joint workshop of IEA Bioenergy Tasks 29, 31 and 39, August 2006, Vancouver, British Columbia, Canada* 35 (11), S. 4613–4618.
- DIN EN 52 183 (1977): Prüfung von Holz - Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes. Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin.
- Djanibekov, U.; Khamzina, A. (2014): Stochastic Economic Assessment of Afforestation on Marginal Land in Irrigated Farming System. In: *Environ Resource Econ*, S. 1–23.
- Don, A.; Osborne, B.; Hastings, A.; Skiba, U.; Carter, M. S.; Drewer, J. et al. (2012): Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. In: *GCB Bioenergy* 4 (4), S. 372–391.
- Du, K.; Xu, L.; Wu, H.; Tu, B.; Zheng, B. (2012): Ecophysiological and morphological adaptation to soil flooding of two poplar clones differing in flood-tolerance. In: *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 207 (2), S. 96–106.
- Efron, B. (1979): Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. In: *Ann. Statist.* 7 (1), S. 1–26.
- El Kasmioui, O.; Ceulemans, R. (2012): Financial analysis of the cultivation of poplar and willow for bioenergy. In: *Biomass & Bioenergy* 36 (43), S. 52–64.
- El Kasmioui, O.; Ceulemans, R. (2013): Financial Analysis of the Cultivation of Short Rotation Woody Crops for Bioenergy in Belgium: Barriers and Opportunities. In: *Bioenergy Res* 6 (1), S. 336–350.

- Ericsson, K.; Rosenqvist, H.; Ganko, E.; Pisarek, M.; Nilsson, L. (2006): An agro-economic analysis of willow cultivation in Poland. In: *Biomass & Bioenergy* 30 (1), S. 16–27.
- Ericsson, K.; Rosenqvist, H.; Nilsson, L. J. (2009): Energy crop production costs in the EU. In: *Biomass & Bioenergy* 33 (11), S. 1577–1586.
- Ewald, J.; Maart, S. C.; Musshoff, O. (2012): Measuring the Subjective Risk Attitude of Decision-Makers: Are there Differences between Groups of Methods and of Persons? In: *German Journal of Agricultural Economics* 61 (3), S. 148–161.
- Faasch, R. J.; Patenaude, G. (2012): The economics of short rotation coppice in Germany. In: *Biomass & Bioenergy* 45, S. 27–40.
- Felten, D.; Fröba, N.; Fries, J.; Emmerling, C. (2013): Energy balances and greenhouse gas-mitigation potentials of bioenergy cropping systems (Miscanthus, rapeseed, and maize) based on farming conditions in Western Germany. In: *Renewable Energy* 55, S. 160–174.
- Fiala, M.; Bacenetti, J.; Scaravonati, A.; Bergonzi, A. (2010): Short rotation coppice on Northern Italy: comprehensive sustainability. In: ETA-Florence Renewable Energies (Hg.): 18th European Biomass Conference and Exhibition. From research to industry and markets. [Lyon]: Produced and published by ETA-Florence Renewable Energies, S. 342–348.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (1998): Global Forest Products Consumption, Production, Trade and Prices: Global Forests Products Model Projections to 2010. Global Forest Products Outlook Study. Working Paper GFPOS/WP/01. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome (FAO Working Paper Series).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2009): State of the World's Forests 2009. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2010): Global forest resources assessment 2010. Main report. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (163).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2014): Assessment of industrial roundwood production from planted forests. Working Paper FP/48/E. Unter Mitarbeit von C. Jürgensen, W. Kollert und A. Lebedys. Rome (Planted Forests and Trees Working Paper Series).
- Gandorfer, M.; Eckstein, K.; Hoffmann, H. (2011): Modeling Economic Performance of an Agroforestry System under Yield and Price Risk. 15th International Consortium on Ap-

- plied Bioeconomy Research (ICABR) Annual Conference. International Consortium on Applied Bioeconomy Research (ICABR). Villa Mondragone (Frascati), 26.06.2011. Online verfügbar unter http://www.economia.uniroma2.it/icabr-conference/paper_view.php?id=2439&p=12, zuletzt geprüft am 08.03.2012.
- Glithero, N. J.; Wilson, P.; Ramsden, S. J. (2013): Prospects for arable farm uptake of Short Rotation Coppice willow and miscanthus in England. In: *Applied Energy* 107, S. 209–218.
- Groves, R. M.; Fowler, F. J.; Couper, M.; Lepkowski, J. M.; Singer, E.; Tourangeau, R. (2009): Survey methodology. 2. überarb. Aufl. Hoboken, N.J.: Wiley (Wiley series in survey methodology).
- Hahn, W. A.; Härtl, F.; Irland, L. C.; Kohler, C.; Moshhammer, R.; Knoke, T. (2014): Financially optimized management planning under risk aversion results in even-flow sustained timber yield. In: *Forest Policy and Economics* 42, S. 30–41.
- Hardaker, J. B. (2004): Coping with risk in agriculture. 2. überarb. Aufl. Wallingford, Oxfordshire, Cambridge, MA: CABI Pub.
- Harlow, W. V.; Rao, R. K. S. (1989): Asset Pricing in a Generalized Mean-Lower Partial Moment Framework: Theory and Evidence. In: *The Journal of Financial and Quantitative Analysis* 24 (3), S. 285.
- Hartmann, H.; Reisinger, K.; Nothaft, C.; Turowski, P. (2010): Kleine Biomassefeuerungen. Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit. Hg. v. Technologie und Förderzentrum. Straubing (Berichte aus dem TFZ, 21). Online verfügbar unter http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/21_bericht.pdf, zuletzt geprüft am 20.04.2015.
- Hauk, S.; Gandorfer, M.; Wittkopf, S.; Müller, U.; Knoke, T. (2015a): Ecological diversification is economically profitable - farmers should include short rotation woody crops for bio-energy in their land-use portfolios. In: *GCB Bioenergy* Zur Publikation eingereichtes Manuskript.
- Hauk, S.; Knoke, T.; Wittkopf, S. (2014a): Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass – A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, S. 435–448.
- Hauk, S.; Skibbe, K.; Röhle, H.; Schröder, J.; Wittkopf, S.; Knoke, T. (2015b): Nondestructive Estimation of Biomass Yield for Short-Rotation Woody Crops Is Reliable and Shows High Yields for Commercial Stands in Bavaria. In: *Bioenergy Res* Online-Vorabpublikation, S. 1–13.
- Hauk, S.; Wittkopf, S. (2012): Short Rotation Forestry in Bavaria - Sites, Biomass Yields, Operators and Effects on German Climate Targets. In: ETA-Florence Renewable Ener-

- gies (Hg.): 20th European Biomass Conference and Exhibition. Setting the course for a biobased economy. [Milan]: Produced and published by ETA-Florence Renewable Energies, S. 264–272.
- Hauk, S.; Wittkopf, S.; Knoke, T. (2014b): Analysis of commercial short rotation coppices in Bavaria, southern Germany. In: *Biomass & Bioenergy* 67, S. 401–412.
- Heaton, R. J.; Randerson, P. F.; Slater, F. M. (1999): The economics of growing short rotation coppice in the uplands of mid-Wales and an economic comparison with sheep production. In: *Biomass & Bioenergy* 17 (1), S. 59–71.
- Hollander, M.; Wolfe, D. A. (1999): Nonparametric statistical methods. 2. überarb. Aufl. New York: Wiley (Wiley series in probability and statistics. Texts and references section).
- Hollweg, H.-D.; Böhm, U.; Fast, I.; Hennemuth, B.; Keuler, K.; Keup-Thiel, E. et al. (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. Hamburg (Technical Report, 3).
- Holt, C. A.; Laury, S. K. (2014): Chapter 4 - Assessment and Estimation of Risk Preferences. In: M. Machina und Viscusi. K. (Hg.): Handbook of the Economics of Risk and Uncertainty : Handbook of the Economics of Risk and Uncertainty, Volume 1: North-Holland, S. 135–201. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444536853000040>.
- Horn, H.; Skibbe, K.; Röhle, H. (2013): Wuchsleistung von KUP aus Pappel in Folgerotationen. In: *AFZ-DerWald* (7), S. 53–55.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hg.) (2014): Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von R.K. Pachauri und L.A. Meyer. Genf, Schweiz.
- Jianjun, J.; Yiwei, G.; Xiaomin, W.; Nam, P. K. (2015): Farmers' risk preferences and their climate change adaptation strategies in the Yongqiao District, China. In: *Land Use Policy* 47, S. 365–372.
- Jorissen, T.; Hauk, S.; Wittkopf, S.; Zerle., P. (2014): Volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Untersuchung des Anbaus von schnellwachsenden Baumarten im Kurzumtrieb auf landwirtschaftlichen Flächen als nachhaltige CO₂-Vermeidungsoption. Projektbericht für das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst. Straubing: Wissenschaftszentrum Straubing.
- Kandulu, J. M.; Bryan, B. A.; King, D.; Connor, J. D. (2012): Mitigating economic risk from climate variability in rain-fed agriculture through enterprise mix diversification. In: *Ecological Economics* 79, S. 105–112.

- Kaplan, H. M. (1985): Farmland as a portfolio investment. In: *Portfolio Management* 11 (2), S. 73–78.
- Kastin, K. S. (2008): Marktforschung mit einfachen Mitteln. Daten und Informationen beschaffen, auswerten und interpretieren. Orig.-Ausg., 3., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. München, [München]: Dt. Taschenbuch-Verl.; Beck (Dtv, 5846 : Beck-Wirtschaftsberater).
- Knoke, T.; Bendix, J.; Pohle, P.; Hamer, U.; Hildebrandt, P.; Roos, K. et al. (2014): Afforestation or intense pasturing improve the ecological and economic value of abandoned tropical farmlands. In: *Nature communications* 5, S. 5612.
- Knoke, T.; Stimm, B.; Ammer, C.; Moog, M. (2005): Mixed forests reconsidered: A forest economics contribution on an ecological concept. In: *Forest Ecol Manag* 213 (1–3), S. 102–116.
- Kort, J.; Collins, M.; Ditsch, D. (1998): A review of soil erosion potential associated with biomass crops. In: *Biomass & Bioenergy* 14 (4), S. 351–359.
- Krasuska, E.; Rosenqvist, H. (2012): Economics of energy crops in Poland today and in the future. In: *Biomass & Bioenergy* 38, S. 23–33.
- Kröber, M.; Hank, K.; Heinrich, J.; Wagner, P. (2009): Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des Energieholzanzbaus in Kurzumtriebsplantagen - Risikoanalyse mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation. In: Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V., Ernst Berg und Josef Apfelbeck (Hg.): Risiken in der Agrar- und Ernährungswirtschaft und ihre Bewältigung. Vom 24. bis 26. September 2008. Unter Mitarbeit von Ernst Berg, M. Hartmann, T. Heckeley, K. Holm-Müller und G. Schiefer. 1 // 1. Aufl. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GmbH; Landwirtschaftsverl. (Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V., Band 44 // 48), S. 127–139.
- Kröber, M.; Heinrich, J.; Wagner, P.; Schweinle, J. (2010): Ökonomische Bewertung und Einordnung von Kurzumtriebsplantagen in die gesamtbetriebliche Anbaustruktur. In: A. Bemann und C. Knust (Hg.): Agrowood. Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. 1. Aufl. Berlin: Weißensee Verlag, S. 217–229.
- Kromrey, H. (2006): Empirische Sozialforschung. Modelle und Methoden der standardisierten Datenerhebung und Datenauswertung. 11., überarb. Aufl. Stuttgart: Lucius & Lucius (UTB, 1040).
- Kruschwitz, L. (2009): Investitionsrechnung. 12. Aufl. München: Oldenbourg.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (2015): Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Darmstadt. Online verfügbar unter

<http://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html;jsessionid=F3CA3084DCDCA9CF8D735A75F2AD9BD0>, zuletzt geprüft am 19.02.2015.

- Lang, R. (1994): Ökologische Ansprüche der Kulturarten: Ackerkulturen: GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (FAM-Bericht).
- Larsen, S. U.; Jørgensen, U.; Kjeldsen, J. B.; Lærke, P. E. (2014a): Long-term yield effects of establishment method and weed control in willow for short rotation coppice (SRC). In: *Biomass & Bioenergy* 71, S. 266–274.
- Larsen, S. U.; Jørgensen, U.; Lærke, P. (2014b): Willow Yield Is Highly Dependent on Clone and Site. In: *Bioenergy Res* 7 (4), S. 1280–1292.
- Larsson, S. (1997): Commercial breeding of willow for short rotation coppice. In: *Aspects of Applied Biology* (49), S. 215–218.
- Larsson, S.; Rosenqvist, H. (1996): Willow coppice in Sweden – politics, cropping, development and economy. European energy crop conference, 30 September–1 October 1996, Enschede, the Netherlands. Enschede, the Netherlands, 30.09.1996.
- Laureysens, I.; Bogaert, J.; Blust, R.; Ceulemans, R. (2004): Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. In: *Forest Ecol Manag* 187 (2–3), S. 295–309.
- Liebhart, P. (2007): Energieholz im Kurzumtrieb. Rohstoff der Zukunft. Graz, Stuttgart: Stocker (Praxisbuch).
- Lindroth, A.; Båth, A. (1999): Assessment of regional willow coppice yield in Sweden on basis of water availability. In: *Forest Ecol Manag* 121 (1–2), S. 57–65.
- Londo, M.; Vleeshouwers, L.; Dekker, J.; Graaf, H. de (2001): Energy farming in Dutch desiccation abatement areas: yields and benefits compared to grass cultivation. In: *Biomass & Bioenergy* 20 (5), S. 337–350.
- Lothner, D. C.; Hoganson, H. M.; Rubin, P. A. (1986): Examining short rotation hybrid poplar investments by using stochastic simulation. In: *Can J Forest Res* 16 (6), S. 1207–1213.
- Macmillan, W. (1992): Risk and agricultural land use: A reformulation of the portfolio-theoretic approach to the analysis of a von Thünen economy. In: *Geographical Analysis* 24, S. 142–158.
- Makeschin, F. (1994): Effects of energy forestry on soils. In: *Environmental Aspects of Energy Forest Cultivation* 6 (1–2), S. 63–79.
- Manzone, M.; Airoidi, G.; Balsari, P. (2009): Energetic and economic evaluation of a poplar cultivation for the biomass production in Italy. In: *Biomass & Bioenergy* 33 (9), S. 1258–1264.

- Markowitz, H. (1952): Portfolio Selection. In: *The Journal of Finance* 7 (1), S. 77–91.
- Markowitz, H. (2014): Mean–variance approximations to expected utility. In: *European Journal of Operational Research* 234 (2), S. 346–355.
- Masiero, M.; Secco, L.; Pettenella, D.; Brotto, L. (2015): Standards and guidelines for forest plantation management: A global comparative study. In: *Forest Policy and Economics* 53, S. 29–44.
- Mather, A. S.; Needle, C. L. (2000): The relationships of population and forest trends. In: *Geographical Journal* 166 (1), S. 2–13.
- Mayring, P. (2010): Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. 11., aktual., überarb. Aufl. Weinheim: Beltz (Beltz Pädagogik).
- McKenney, D. W.; Weersink, A.; Allen, D.; Yemshanov, D.; Boyland, M. (2014): Enhancing the adoption of short rotation woody crops for bioenergy production. In: *Biomass & Bioenergy* 64, S. 363–366.
- Mitchell, C. P. (1992): Ecophysiology of short rotation forest crops. London, New York: Elsevier Applied Science.
- Mola-Yudego, B.; Aronsson, P. (2008): Yield models for commercial willow biomass plantations in Sweden. In: *Biomass & Bioenergy* 32 (9), S. 829–837.
- Mola-Yudego, B.; Pelkonen, P. (2008): The effects of policy incentives in the adoption of willow short rotation coppice for bioenergy in Sweden. In: *Energy Policy* 36 (8), S. 3062–3068.
- Moschini, G.; Hennessy, D. A. (2001): Chapter 2 Uncertainty, risk aversion, and risk management for agricultural producers. In: Bruce L. Gardner und Gordon C. Rausser (Hg.): *Handbook of Agricultural Economics : Agricultural Production, Volume 1, Part A*: Elsevier, S. 88–153. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574007201100058>.
- Murach, D.; Hartmann, H.; Walotek, P. (2008): Ertragsmodelle für landwirtschaftliche Dendromasse. In: Dieter Murach, Lisa Knur und Mareike Schultze (Hg.): *DENDROM - Zukunftsrohstoff Dendromasse. Systemische Analyse, Leitbilder und Szenarien für die nachhaltige energetische und stoffliche Verwertung von Dendromasse aus Wald- und Agrarholz : Endbericht*. Remagen-Oberwinter: Kessel, S. 93–116.
- Murn, Y. (2007): Modeling potentials of short rotation coppice systems in Brandenburg with GIS. Master Thesis. Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Eberswalde. Wald und Umwelt.
- Musshoff, O. (2012): Growing short rotation coppice on agricultural land in Germany: A Real Options Approach. In: *Biomass & Bioenergy* 41, S. 73–85.

- Musshoff, O.; Hirschauer, N. (2013): Modernes Agrarmanagement. Betriebswirtschaftliche Analyse- und Planungsverfahren. 3., überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen.
- Musshoff, O.; Jerchel, K. (2010): Die Umstellung landwirtschaftlich genutzter Flächen auf Kurzumtriebsplantagen – Eine Anwendung des Realoptionsansatzes. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 181 (9–10), S. 175–188.
- Neubert, F. P.; Boll, T.; Zimmermann, K.; Bergfeld, A. (2013): Chancen und Hemmnisse von Kurzumtriebsplantagen – Online-Umfrage unter Praktikern. In: *AFZ - Der Wald* (4), S. 4–6.
- Nielsen, U. B.; Madsen, P.; Hansen, J. K.; Nord-Larsen, T.; Nielsen, A. T. (2014): Production potential of 36 poplar clones grown at medium length rotation in Denmark. In: *Biomass & Bioenergy* 64, S. 99–109.
- Njakou Djomo, S.; Ac, A.; Zenone, T.; Groote, T. de; Bergante, S.; Facciotto, G. et al. (2015): Energy performances of intensive and extensive short rotation cropping systems for woody biomass production in the EU. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, S. 845–854.
- Nordh, N. E.; Verwijst, T. (2004): Above-Ground Biomass Assessments and First Cutting Cycle Production in Willow (*Salix* sp.) Coppice - A Comparison between Destructive and Non-Destructive Methods. In: *Biomass & Bioenergy* 27, S. 1–8.
- Nordman, E. E.; Robison, D. J.; Abrahamson, L. P.; Volk, T. A. (2005): Relative resistance of willow and poplar biomass production clones across a continuum of herbivorous insect specialization: Univariate and multivariate approaches. In: *Forest Ecology and Management* 217 (2–3), S. 307–318.
- Pannell, D. J.; Malcolm, B.; Kingwell, R. S. (2000): Are we risking too much? Perspectives on risk in farm modeling. In: *Agricultural Economics* 23 (1), S. 69–78.
- Paquette, A.; Messier, C. (2010): The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. In: *Frontiers in Ecology and the Environment* 8 (1), S. 27–34.
- Paydar, Z.; Qureshi, M. E. (2012): Irrigation water management in uncertain conditions – Application of Modern Portfolio Theory. In: *Agricultural Water Management* 115, S. 47–54.
- Perry, C. H.; Miller, R. C.; Brooks, K. N. (2001): Impacts of short-rotation hybrid poplar plantations on regional water yield. In: *Special Issue: The Science of Managing Forests to Sustain* 143 (1–3), S. 143–151.
- Petzold, R.; Feger, K.-H.; Röhle, H. (2010): Standortliche Voraussetzungen für Kurzumtriebsplantagen. In: A. Bemann und C. Knust (Hg.): *Agrowood. Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. 1. Aufl. Berlin: Weißensee Verlag.

- Porst, R. (2001): Wie man die Rücklaufquote bei postalischen Befragungen erhöht. Zentrum für Umfragen, Methoden und Analysen, Mannheim. Mannheim (ZUMA How-to-Reihe, 9). Online verfügbar unter http://www.gesis.org/fileadmin/upload/forschung/publikationen/gesis_reihen/howto/howto9rp.pdf, zuletzt geprüft am 05.06.2015.
- Pretzsch, H.; Durksy, J. (2001): Evaluierung von Waldwachstumssimulatoren auf Baum- und Bestandesebene. In: *Allg. Forst- Jagdztg.* 172 (8–9), S. 146–150.
- R Core Team (2012): R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Online verfügbar unter <http://www.R-project.org/>, zuletzt geprüft am 15.01.2015.
- Raab-Steiner, E.; Benesch, M. (2008): Der Fragebogen. Von der Forschungsidee zur SPSS-Auswertung. Wien: UTB (UTB L (Large-Format), 8406).
- Rajapaksha, N. S. S.; Butt, K. R.; Vanguelova, E. I.; Moffat, A. J. (2013): Effects of Short Rotation Forestry on earthworm community development in the UK. In: *Influence of tree species on forest soils: New evidence from field studies* 309, S. 96–104.
- Reisenweber, J. (2014a): Erzeugerpreise wichtiger Marktfrüchte Entwicklung von 1978 bis heute in Bayern, 22.01.2014. E-Mail an S. Hauk.
- Reisenweber, J. (2014b): Hektarerträge Bayerns 1958 – 2012; Land - Regierungsbezirke - Landkreise, 04.08.2014. E-Mail an S. Hauk.
- Reynaud, A.; Couture, S. (2012): Stability of risk preference measures: results from a field experiment on French farmers. In: *Theory and Decision* 73 (2), S. 203–221.
- Ridier, A. (2012): Farm Level Supply of Short Rotation Woody Crops: Economic Assessment in the Long-Term for Household Farming Systems. In: *Canadian Journal of Agricultural Economics* (60), S. 357–375.
- Roche, M. J.; McQuinn, K. (2004): Riskier product portfolio under decoupled payments. In: *European review of agricultural economics : ERAE* 31 (2), S. 111–123.
- Röhle, H. (2009): Arbeitskreis Biomasse: Verfahrensempfehlung zur Methodik der Biomasseertmittlung in Kurzumtriebsbeständen. In: Jürgen Nagel (Hg.): Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten Sektion Ertragskunde. Sektion Ertragskunde : Beiträge zur Jahrestagung 2009, S. 220–226.
- Röhle, H.; Hartmann, K. U.; Gerold, D.; Steinke, C.; Schröder, J. (2006): Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände. In: *Allg. Forst- Jagdztg.* 177 (10–11), S. 178–187.
- Roos, A.; Rosenqvist, H.; Ling, E.; Hektor, B. (2000): Farm-related factors influencing the adoption of short-rotation willow coppice production among Swedish farmers. In: *ACTA Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* 50 (1), S. 28–34.

- Rosenqvist, H.; Dawson, M. (2005): Economics of willow growing in Northern Ireland. In: *Biomass & Bioenergy* 28 (1), S. 7–14.
- Rosenqvist, H.; Roos, A.; Ling, E.; Hektor, B. (2000): Willow growers in Sweden. In: *Biomass & Bioenergy* 18 (2), S. 137–145.
- Rosenqvist H. (Hg.) (1996): Calculation method and economy in Salix production, Biomass for energy and environment. Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference. Copenhagen.
- Rowe, R. L.; Street, N. R.; Taylor, G. (2009): Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (1), S. 271–290.
- Vanbeveren, S. S. P.; Schweier, J.; Berhongaray, G.; Ceulemans, R. (2015): Operational short rotation woody crop plantations: Manual or mechanised harvesting? In: *Biomass & Bioenergy* 72, S. 8–18.
- Sage, R.; Cunningham, M.; Boatman, N. (2006): Birds in willow short-rotation coppice compared to other arable crops in central England and a review of bird census data from energy crops in the UK. In: *Ibis* 148, S. 184–197.
- Schreiner, E. J. (1970): Mini-Rotation-Forestry. Darby (U.S.D.A. Forest Service Research Paper, NE-174), zuletzt geprüft am 25.09.2014.
- Schubert, S. (2011): Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor. 2., korr. Aufl. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (UTB, 2802 : Agrarwissenschaften).
- Schweier, J. (2013): Erzeugung von Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Marginalstandorten in Südwestdeutschland. Umweltbezogene und ökonomische Bewertung alternativer Bewirtschaftungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung verschiedener Holzernteverfahren. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg im Breisgau. Institut für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaften.
- Schweier, J.; Becker, G. (2012): Motor manual harvest of short rotation coppice in South-West Germany. In: *Allg. Forst- Jagdztg.* 178 (7–8), S. 159–167.
- Schweier, J.; Becker, G. (2013): Economics of poplar short rotation coppice plantations on marginal land in Germany. In: *Biomass & Bioenergy* 59, S. 494–502.
- Seiffert, M. (2014): Landwirtschaftlicher Pflanzenbau. Grundlagen des Acker und Pflanzenbaus. 13., völlig neu bearb. u. erw. Aufl. München: BLV Buchverlag (Die Landwirtschaft).
- Serapiglia, M. J.; Cameron, K. D.; Stipanovic, A. J.; Abrahamson, L. P.; Volk, T. A.; Smart, L. B. (2013): Yield and Woody Biomass Traits of Novel Shrub Willow Hybrids at Two Contrasting Sites. In: *Bioenergy Res* 6 (2), S. 533–546.

- Sharpe, W. (1964): Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk. In: *The Journal of Finance* 19 (3), S. 425–442.
- Sharpe, W. (1966): Mutual Fund Performance. In: *The Journal of Business* 39 (1), S. 119–138.
- Sharpe, W. F. (1994): The Sharpe Ratio. In: *Portfolio Management* 21 (1), S. 49–58.
- Sherrington, C.; Bartley, J.; Moran, D. (2008): Farm-level constraints on the domestic supply of perennial energy crops in the UK. In: *Energy Policy* 36 (7), S. 2504–2512.
- Sherrington, C.; Moran, D. (2008): Farmer attitudes and intentions towards the adoption of perennial energy crops in the UK: an application of the Theory of Planned Behaviour. Paper presented at the. 16th European Biomass Conference & Exhibition - From Research to Industry & Markets. Feria Valencia, Spanien, 02.06.2008.
- Sherrington, C.; Moran, D. (2010): Modelling farmer uptake of perennial energy crops in the UK. Large-scale wind power in electricity markets with Regular Papers. In: *Energy Policy* 38 (7), S. 3567–3578.
- Spinelli, R.; Nati, C.; Magagnotti, N. (2009): Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. In: *Biomass & Bioenergy* 33 (5), S. 817–821.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2015): Verbraucherpreisindex für Deutschland. Lange Reihen ab 1948. März 2015. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Verbraucherpreise/VerbraucherpreisindexLangeReihen.html>, zuletzt aktualisiert am März 2015, zuletzt geprüft am 22.04.2015.
- Stoll, B.; Dohrenbusch, A. (2009): Der Einfluss der Flächenvornutzung und Begleitwuchsregulierung auf den Anwuchserfolg von Energieholzplantagen. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 181 (3/4), S. 71–76.
- Strauss, C. H.; Wright, L. L. (1990): Woody biomass production costs in the United States: An economic summary of commercial Populus plantation systems. In: *Solar Energy* 45 (2), S. 105–110.
- Styles, D.; Thorne, F.; Jones, M. B. (2008): Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and Miscanthus production with conventional farming systems. In: *Biomass & Bioenergy* 32 (5), S. 407–421.
- Telenius, B.; Verwijst, T. (1995): The influence of allometric variation, vertical biomass distribution and sampling procedure on biomass estimates in commercial short-rotation forests. In: *Bioresour. Technol.* 51 (2–3), S. 247–253.
- Thompson, R. C.; Luckman, P. G. (1993): Performance of biological erosion control in New Zealand soft rock hill terrain. In: *Agroforest Syst* 21 (2), S. 191–211.

- Verheyen, K.; Buggenhout, M.; Vangansbeke, P.; Dobbelaere, A. de; Verdonckt, P.; Bonte, D. (2014): Potential of Short Rotation Coppice plantations to reinforce functional biodiversity in agricultural landscapes. In: *Biomass & Bioenergy* 67, S. 435–442.
- Verlinden, M. S.; Broeckx, L. S.; Van den Bulcke, J.; van Acker, J.; Ceulemans, R. (2013): Comparative study of biomass determinants of 12 poplar (*Populus*) genotypes in a high-density short-rotation culture. In: *Forest Ecol Manag* 307, S. 101–111.
- Verwijst, T.; Telenius, B. (1999): Biomass Estimation Procedures in Short Rotation Forestry. In: *Forest Ecol Manag* (121), S. 137–146.
- Wagner, P.; Schweinle, J.; Setzer, F.; Kröber, M.; Dawid, M. (2012): DLG-Merkblatt 372. DLG-Standard zur Kalkulation einer Kurzumtriebsplantage. 1. Aufl. Hg. v. DLG e.V. Frankfurt (Main) (DLG-Merkblatt).
- Walther, B. A.; Moore, J. L.; Rahbek, C. (2005): The Concepts of Bias, Precision and Accuracy, and Their Use in Testing the Performance of Species Richness Estimators, with a Literature Review of Estimator Performance. In: *Ecography* 28 (6), S. 815–829.
- Warman, R. D. (2014): Global wood production from natural forests has peaked. In: *Biodivers Conserv* 23 (5), S. 1063–1078.
- Willebrand, E.; Ledin, S.; Verwijst, T. (1993): Willow coppice systems in short rotation forestry: Effects of plant spacing, rotation length and clonal composition on biomass production. In: *Biomass & Bioenergy* 4 (5), S. 323–331.
- Wolbert-Haverkamp, M.; Musshoff, O. (2014): Is short rotation coppice economically interesting? An application to Germany. In: *Agroforest Syst* 88 (3), S. 413–426.
- Yin, C.; Pang, X.; Chen, K. (2009): The effects of water, nutrient availability and their interaction on the growth, morphology and physiology of two poplar species. In: *Environ. Exp. Bot.* 67 (1), S. 196–203.
- Zacios, M.; Niederberger, J.; Schulz, C. (2011): Energiewald unter Dauerbeobachtung. Seit zwei Jahren werden in Kaufering die Auswirkungen einer Kurzumtriebsplantage auf die Grundwasserneubildung und die Trinkwasserqualität untersucht. In: *LWF aktuell* (85), S. 34–36.
- Zacios, M.; Niederberger, J.; Seidel, H.; Schulz, C.; Zimmermann, L.; Burger, F. (2012): Hydrologische und ökologische Aspekte bei Kurzumtriebsplantagen. Ökologisch wertvoll: KUPs liefern mehr als nur nachwachsende Energie. In: *LWF aktuell* (90), S. 21–23.

7 Danksagung

Im Folgenden möchte ich mich ganz herzlich bei denjenigen Personen bedanken, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinen beiden Betreuern Prof. Dr. Thomas Knoke und Prof. Dr. Stefan Wittkopf, die mir die Möglichkeit der Promotion eröffneten und mich vollumfänglich unterstützten. Beide hatten jederzeit ein offenes Ohr für meine Anliegen und förderten mich durch positive und konstruktive Gespräche sowie durch konstruktive Kritik an Publikationen und Vorträgen. Bei Prof. Dr. Stefan Wittkopf bedanke ich mich außerdem für die Leitung und Betreuung meiner beiden Forschungsprojekte. Er hat mir viele Möglichkeiten und Freiheiten gegeben, meine Aufgaben weitgehend selbstständig zu bearbeiten, zahlreiche wissenschaftliche Konferenzen zu besuchen und Erfahrungen in der Lehre zu sammeln, wofür ich ihm besonders dankbar bin.

Mein Dank gilt auch meinem dritten Prüfer, Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker (i.R.), für seine gewissenhaften und konstruktiven Anmerkungen sowie für die Begutachtung dieser Arbeit. Ich bedanke mich ebenso bei Prof. Dr.-Ing. Stephan Pauleit für den Prüfungsvorsitz.

Weiterhin bedanke ich mich bei meiner Mentorin Prof. Dr. Ulrike Müller für die wertvollen fachlichen und persönlichen Gespräche, für die sie jederzeit zur Verfügung stand und für die fantastischen Paper-Writing-Kurse im Rahmen der TUM Graduate School. PD Dr. Markus Gandorfer danke ich für den gewinnbringenden Austausch zu agrarökonomischen Aspekten.

Den bayerischen Staatsministerien – für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst – danke ich für die Finanzierung meiner Forschungsprojekte. Den KUP-BetreiberInnen Bayerns danke ich, für die bereitwillige Unterstützung dieser Arbeit und die inspirierenden Gespräche.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Wissenschaftszentrum Straubing und am Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung bedanke ich mich für die motivierende und heitere Arbeitsatmosphäre. Besonders möchte ich mich bei Prof. Dr. Klaus Menrad, Dr. Thomas Decker, Dr. Agnes Emberger-Klein, Ulla Kainz, Tobias Jorissen, Dorothea Rönsch und Corinna Braun bedanken, die mich auf unterschiedlichste Weise unterstützt haben, meine Herausforderungen zu meistern.

Besonders danke ich außerdem meinen Eltern, meiner Großmutter Isolde, meiner Freundin Carmen, meinem Onkel Dieter, Philipp Schneider, Sebastian Haldenwang und der Haus- und Gartengemeinschaft Unterm Rain 10/12, die mich mit ihrer herzlichen Art unterstützten und meine Arbeitsmoral förderten.

8 Anhang

8.1 Kosten, Preise und Biomasseerträge der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen

Tabelle 9: Übersicht der Biomasseerträge (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014; Reisenweber 2014b), Preise (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014; Reisenweber 2014a) und variablen Kosten (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen für den Betrachtungszeitraum 2004 bis 2013 in der Modellregion Aichach-Friedberg. Hierbei kennzeichnet $\bar{}$ den Mittelwert und „SD“ die Standardabweichung (verändert nach Hauk et al. 2015a)

	$\bar{}$ Ertrag [dt ha ⁻¹]	SD Ertrag [dt ha ⁻¹]	$\bar{}$ Preis [€ dt ⁻¹]	SD Preis [€ dt ⁻¹]	Kosten [€ ha ⁻¹]
Grünmais	513,19	56,41	3,51	0,91	1829,40
Körnermais	99,32	10,17	17,08	5,44	1380,85
Speisekartoffel	419,92	43,87	12,22	5,95	3452,30
Wintergerste	67,80	5,64	15,37	5,13	1053,55
Winterraps	40,71	2,72	34,54	10,90	1235,55
Winterweizen	80,95	5,94	17,63	5,99	1176,80
Zuckerrübe	756,79	51,81	4,63	0,82	1937,25

Tabelle 10: Übersicht der Biomasseerträge (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014; Reisenweber 2014b), Preise (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014; Reisenweber 2014a) und variablen Kosten (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen für den Betrachtungszeitraum 2004 bis 2013 in der Modellregion Pfaffenhofen an der Ilm. Hierbei kennzeichnet Ø den Mittelwert und „SD“ die Standardabweichung (verändert nach Hauk et al. 2015a)

	Ø Ertrag	SD Ertrag	Ø Preis	SD Preis	Kosten
	[dt ha⁻¹]	[dt ha⁻¹]	[€ dt⁻¹]	[€ dt⁻¹]	[€ ha⁻¹]
Grünmais	493,90	49,38	3,51	0,91	1784,40
Körnermais	101,30	10,80	17,08	5,44	1392,85
Wintergerste	59,20	5,13	15,37	5,13	1009,55
Winterraps	37,40	2,66	34,54	10,90	1196,55
Winterweizen	73,60	6,08	17,63	5,99	1132,80
Zuckerrübe	749,60	65,32	4,63	0,82	1932,25

Tabelle 11: Übersicht der Biomasseerträge (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014; Reisenweber 2014b), Preise (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014; Reisenweber 2014a) und variablen Kosten (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen für den Betrachtungszeitraum 2004 bis 2013 in der Modellregion Regensburg (Landkreis). Hierbei kennzeichnet Ø den Mittelwert und „SD“ die Standardabweichung (verändert nach Hauk et al. 2015a)

	Ø Ertrag	SD Ertrag	Ø Preis	SD Preis	Kosten
	[dt ha⁻¹]	[dt ha⁻¹]	[€ dt⁻¹]	[€ dt⁻¹]	[€ ha⁻¹]
Grünmais	489,25	42,77	3,51	0,91	1773,40
Körnermais	94,13	10,37	17,08	5,44	1634,85
Speisekartoffel	426,03	41,39	12,22	5,95	3472,30
Wintergerste	59,29	2,53	15,37	5,13	1014,55
Winterraps	37,59	3,94	34,54	10,90	1200,55
Winterweizen	76,24	4,79	17,63	5,99	1148,80
Zuckerrübe	758,30	74,06	4,63	0,82	1938,25

Tabelle 12: Übersicht der Biomasseerträge (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014; Reisenweber 2014b), Preise (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014; Reisenweber 2014a) und variablen Kosten (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) der konventionellen landwirtschaftlichen Kulturen für den Betrachtungszeitraum 2004 bis 2013 in der Modellregion Wunsiedel. Hierbei kennzeichnet $\bar{\emptyset}$ den Mittelwert und „SD“ die Standardabweichung (verändert nach Hauk et al. 2015a)

	$\bar{\emptyset}$ Ertrag [dt ha ⁻¹]	SD Ertrag [dt ha ⁻¹]	$\bar{\emptyset}$ Preis [€ dt ⁻¹]	SD Preis [€ dt ⁻¹]	Kosten [€ ha ⁻¹]
Grünmais	445,98	41,17	3,51	0,91	1672,40
Sommergerste	48,74	6,11	17,21	5,70	866,05
Speisekartoffel	387,96	42,03	12,22	5,95	3344,30
Wintergerste	55,28	4,46	15,37	5,13	987,55
Winterraps	35,37	4,00	34,54	10,90	1174,55
Winterroggen	50,97	5,33	15,71	5,87	876,00

8.2 Holzhackschnitzelpreise

Tabelle 13: Zugrunde gelegte Holzhackschnitzelpreise [€ Mg_{WG35}⁻¹] des Betrachtungszeitraums 2004 bis 2013 (C.A.R.M.E.N. e.V. 2015)

Jahr	Holzhackschnitzelpreis [€ Mg _{WG35} ⁻¹]
2004	48,05
2005	51,35
2006	65,94
2007	69,90
2008	76,58
2009	82,63
2010	85,94
2011	94,59
2012	92,19
2013	95,80

8.3 Publikationsliste

Begutachtete Publikationen (peer review)

Hauk, S.; Knoke, T.; Wittkopf, S. (2014): Economic evaluation of short rotation coppice for energy from biomass – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29. S. 435-448

Hauk, S.; Wittkopf, S.; Knoke, T. (2014): Analysis of commercial short rotation coppices in Bavaria, southern Germany. *Biomass and Bioenergy*. 67. S. 401–412

Hauk, S.; Skibbe, K.; Röhle, H.; Schröder, J.; Wittkopf, S.; Knoke, T. (2015): Non-destructive estimation of biomass yield for short rotation woody crops is reliable and shows high yields for commercial stands in Bavaria. *BioEnergy Research*. Online-Vorabpublikation. DOI: 10.1007/s12155-015-9602-5

Publikation zur Begutachtung beim Verlag eingereicht (submitted)

Hauk, S.; Gandorfer, M.; Wittkopf, S.; Müller, U.K.; Knoke, T. (2015): Ecological diversification is economically profitable - farmers should include short rotation woody crops for bio-energy in their land-use portfolios. *Global Change Biology Bioenergy*. Zur Publikation eingereichtes Manuskript

8.4 Veröffentlichung I

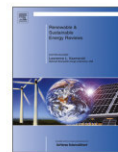
Hauk, S.; Knoke, T.; Wittkopf, S. (2014): Economic evaluation of short rotation coppice for energy from biomass – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29. S. 435-448⁸

⁸ Beitrag von Sebastian Hauk (90 %): Datenakquise, Datenbearbeitung, statistische Analysen und Interpretation der Ergebnisse sowie Erstellen des Manuskripts. Beitrag von Thomas Knoke und Stefan Wittkopf: konstruktive Kritik an der Datenauswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie Korrektur des Manuskripts.



Contents lists available at ScienceDirect

Renewable and Sustainable Energy Reviews

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rser

Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review

Sebastian Hauk^{a,*}, Thomas Knoke^b, Stefan Wittkopf^a^a University of Applied Sciences Weihenstephan-Triesdorf, Faculty of Forestry, Chair of Wood Energy, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 3, 85354 Freising Weihenstephan, Germany^b Institute of Forest Management, Center of Life and Food Sciences Weihenstephan, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising Weihenstephan, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 April 2013
 Received in revised form
 22 August 2013
 Accepted 24 August 2013

Keywords:

Bioenergy crops
 Woody biomass
 Economics
 Renewable energy sources
 Poplar
 Profitability

ABSTRACT

Since economic profitability is the most important factor for the adoption of short rotation coppice (SRC) for energy from biomass, our objective was to analyze and summarize published knowledge about the economic evaluation of SRC. Of 37 studies, 43% reported economic viability of SRC in comparison to a reference system; whereas 19% stated economic disadvantages of SRC, and 38% reported mixed results, depending on the underlying assumptions. We found a wide variety of underlying assumptions, underlying costs, process chains and methods used to evaluate SRC systems. Of the 37 studies, 8% used static approaches of capital budgeting, 84% used dynamic approaches and 8% applied approaches in which uncertainties were taken into account. Due to the long-term nature of investment in SRC, and therewith, the uncertain development of sensitive assumptions, approaches which consider uncertainties were best suited for economic evaluation. The profitability of SRC was found to be most sensitive to the price for biomass and biomass yield, but site-specific biomass data was lacking. Despite the wide variation within each cost unit, costs for land rent, harvesting, chipping, and establishment consistently made up the largest proportion of overall costs, and should therefore, be chosen carefully. We close with suggestions for improving the economic evaluation of SRC and enhancing traceability and comparability of calculations.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Contents

1. Introduction	436
2. Material and methods	437
2.1. Database creation	437
2.2. Data collection and analysis	437
3. Results and discussion	437
3.1. Methods of capital budgeting applied in economic analyses of SRC	439
3.2. Process chains and working steps	440
3.2.1. Analysis of working steps	440
3.2.2. Overview: proportion of overall costs per cost unit	441
3.2.3. Process chains of the studies examined	442
3.3. Underlying assumptions of the studies reviewed	442
3.3.1. Returns of biomass sale	442
3.3.2. Biomass yield	443
3.3.3. Total cultivation time	443
3.3.4. Planting density	444
3.3.5. Rotation length	444
3.3.6. Interest rate	445

* Corresponding author. Tel.: +49 9421 187 235; fax: +49 9421 187 211.

E-mail addresses: s.hauk@wz-straubing.de (S. Hauk), knoke@forst.wzw.tum.de (T. Knoke), stefan.wittkopf@hswt.de (S. Wittkopf).

4. Implications for future dealings with the economics of SRC.....	445
5. Conclusion.....	446
Acknowledgments.....	446
References.....	446

1. Introduction

The worldwide energy demand is growing faster than ever before [1]. Escalating prices for fossil fuels combined with increasing environmental problems intensified by climate change have forced policy makers to introduce policies to support alternative energy sources. RES¹ such as solar, wind, or biomass are one option to counteract climate change, since they generally create lower CO₂-equivalent emissions and are thus considered “cleaner” than fossil fuels.

Among RES, biomass plays an especially important role. RES currently contribute 19% of the global final energy consumption, half of which is supplied by biomass [2]. The energy present in plants is naturally produced through the process of photosynthesis and stored in the biomass itself. To generate energy from other RES, such as solar, wind and water, initial technological innovation was needed. Effort is still required to develop methods to store energy produced by RES other than biomass [3]. This is different with biomass production through SRC, because production technology is known since long and the energy may be stored a long time after harvesting, particularly in woody biomass. In contrast to other RES, socio-economic and policy aspects rather than technological aspects are fundamental to increasing the supply of energy from biomass (as confirmed by [4] for the case of land use in general). The few technological aspects which need to be improved with regard to SRC cultivation are harvesting techniques [5] and optimization of use-specific logistic chains. [6], therefore, provided an overview of the economic feasibility of power generation from SRC where 12 different scenarios with varying harvesting methods, crop distributions and power plant sizes were analyzed. What is lacking, however, is a comprehensive analysis of the economic characteristics of SRC carried out from the perspective of land owners. Consequently, in order to support an increase in the supply of biomass through SRC, we will focus here on methods and underlying assumptions for economic evaluation of SRC.

Biomass – particularly woody biomass – has many advantages over other RES.

In contrast to solar and wind power, where the energy output is highly dependent on time of day and weather conditions, power output from woody biomass can be adjusted to consumer energy demand. Hence the demand for woody biomass for energy purposes is high – 1.9 bn. m³ of the 3.5 bn. m³ of wood harvested annually worldwide is already used to produce energy [7]. However, increasing demand for woody biomass for material use, and particularly for energetic use, has led to the exploitation of natural forest resources and a decrease in forest area worldwide [8].

One way to increase the supply of woody biomass is SRC,² where fast-growing tree species such as poplar (*Populus spp.*) and willow (*Salix spp.*) are planted on agricultural land, and harvested after a short rotation period for bioenergy (electricity and/or heat) or for material use. Wood chips from SRC have better fuel properties than other renewable raw materials such as miscanthus or straw [9]. When used for electricity generation, wood chips from SRC create lower CO₂ emissions than straw but slightly higher CO₂ emissions than forest residues [10]. Furthermore, SRC

is more productive per area unit than natural forest in Europe and is also ecologically advantageous in comparison to more input-intensive agricultural energy crops such as corn and rape [11–13]. Further advantages and disadvantages, along with the environmental impacts of various bioenergy sources and their utilization were compared and discussed by [10,14,15].

However, the cultivated area of SRC in Europe is miniscule in comparison to the whole agricultural area [16]. Styles et al. [9] pointed out that “the main barriers to energy crop production are the high upfront establishment costs in combination with long payback periods, lack of an established biomass market [...] associated with future price uncertainties, and a lack of policy coordination among sectors”. [17] also named long payback periods as an obstacle to investment in forestry. In summary, while land-use decision making is strongly influenced by economic factors [18,19], an analysis of current research paints an inconsistent picture of the economic viability of SRC.

Previous studies of the viability of SRC used different approaches to evaluating economic viability which made use of various cost assessment techniques and divergent data sets, and were based on a wide range of assumptions. As a result, the outcomes are not comparable, thus creating further challenges for policy makers, investors and farmers. To identify suitable methods for economic evaluation of SRC, [20] summarized and compared 23 studies on the economics of SRC. In their analysis, although they stressed the impact of underlying assumptions such as biomass yield and price on profitability, they did not investigate these assumptions in depth. They also did not include methods which consider uncertainty in their analysis, distinguish between different process chains for SRC production, evaluate the necessity of the inclusion of different working steps in the analysis, or give support for the choice of realistic assumptions. All of these topics will be addressed here.

Given the wide range of variability in methods used to assess the economic viability of SRC, and particularly in the basic constraints and assumptions used, the present study will review and summarize the established knowledge on the economic evaluation of SRC. The following research questions will be answered in this review-paper:

- (I) Which methods of capital budgeting have been used for economic evaluation of SRC, and what are their strengths and weaknesses?
- (II) Which process chains along with different working steps and associated costs and revenues can be found in economic evaluations of SRC, which of these are worth considering and which can be ignored?
- (III) What other underlying assumptions have been made in economic evaluations of SRC, and do they differ in relation to the tree species being evaluated?
- (IV) What are the knowledge gaps in economic evaluations of SRC, and how can the comparability of economic analyses be enhanced?

To address the above research questions, we will demonstrate, classify and discuss the methods used to evaluate the economics of SRC. In a second step we will explain, summarize and critically analyze the assumptions made that form the basis for calculation

¹ Renewable energy sources.

² Short rotation coppice.

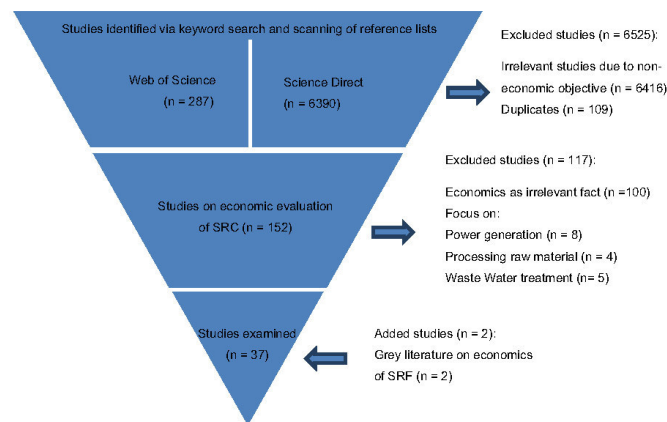


Fig. 1. Overview of literature database development. The reverse pyramid represents the three selection processes and “n” represents the number of studies. The horizontal arrows represent exclusion or inclusion of studies. The text next to the horizontal arrows describes the exclusion or inclusion criteria.

of profitability, including the process chain. During this step, species-specific differences in the underlying assumptions, and possible flaws in the analyses will be highlighted and discussed. Finally, we will conclude our findings and give suggestions for improvement in Sections 4 and 5.

2. Material and methods

2.1. Database creation

To identify relevant papers for this study, ISI Web of KnowledgeSM and ScienceDirect[®] were queried for original studies published in peer-reviewed journals. All of the following terms were found in the literature to describe the “Short rotation coppice” concept: “Short Rotation Coppice” (SRC), “Short Rotation Forestry” (SRF), “Short Rotation Woody Crops” (SRWC) and “Short Rotation Intensive Culture” (SRIC). In our queries of the two databases, each of the following economic keywords – investment, capital investment, capital asset, economics, profitability, economic evaluation, economic feasibility, economic uncertainty, and economic risk – was combined with each of the four terms for SRC.

The total number of matches found for all possible combinations of the SRC terms and the economic keywords in each database is shown in Fig. 1. The literature was exported to the “Citavi 3.0” – Citation-Software, where duplicates ($n=109$) were automatically removed. The titles and abstracts of the remaining 6416 studies were screened to ensure suitability. Only studies which reported on the economic profitability of SRC were further investigated. The remaining 152 studies were precisely screened, and the exclusion criteria displayed in Fig. 1 were applied. Studies in which economic evaluation played a minor part and that did not provide information about the underlying assumptions used in the calculations were excluded ($n=100$). Furthermore, studies were excluded which did not allow for general comparison due to their consideration of special processes used to generate energy or fuel from the raw biomass – for example those which dealt with gasification or flash pyrolysis of SRC ($n=17$). In addition, two German studies taking uncertainties of cash flows into account and published as gray literature – one from a conference proceeding [21] and one book chapter [22] – were added to this collection. All prices were converted from other currencies

into Euros using the exchange rate from March 3th 2012 according to the European Central Bank.

The majority of studies examined – 23 out of 37 – originated from Europe. Ten studies were conducted in the US, one in Canada, one in Chile, one in Benin and one in Belarus. Thirty-four studies examined only one tree species – poplar, willow, black locust, eucalyptus or daniellia. An overview of the 37 studies selected is given in Table 1.

2.2. Data collection and analysis

To evaluate methods of capital budgeting applied for economic evaluation of SRC, we sorted the selected studies based on the methods applied, and compared and discussed them. Second, we sorted the studies based upon the working steps considered. Below, we will briefly introduce each working step, and discuss them regarding their relevance for future economic evaluations of SRC. To indicate frequency of use, the number of studies which included each working step is given. Additionally we sorted the selected studies with regard to the underlying assumptions and tested for differences between analyses of different tree species. As information about underlying assumptions was not consistently provided, and due to differences in the respective process chains, the n^3 of data for each evaluation varied and therefore is given in the associated figures.

For an evaluation of differences among studies based upon the cultivated tree species, 35 studies based on at least one of three species – willow (*Salix ssp.*), poplar (*Populus ssp.*) and black locust (*Robinia pseudoacacia*) – were analyzed. The studies which were based only on eucalyptus (*Eucalyptus ssp.*) or *Daniellia oliveria* were excluded from this analysis, due to the small sample size ($n=1$ for each) and their evidently small importance in SRC literature. For statistical tests, p -values lower or equal to 0.05 were used to indicate significant difference.

3. Results and discussion

Of 37 studies, 43% reported economic viability of SRC in comparison to the reference system, whereas 19% stated economic disadvantages of SRC and 38% stated mixed results, depending on

³ Number.

Table 1
Overview of studies examined.

No.	Methodology	Process chain	Rotation length*	Use	Interest rate [%]	Reference system	Land used	SRC species	Country/Region	References
1	DCF (NPV, IRR, BCR)	Cradle-purchaser	4	Energy	5	Energy price	sa	Willow	Finland	[9]
2	DCF (AGM)	Cradle-purchaser	3	Energy	6	Agr. crops	agr	Willow	Poland	[13]
3	DCF (NPV, Ann)	Cradle-purchaser	3	Energy	-	Agr. crops	agr & sa	Willow	UK	[21]
4	DCF (AGM)	Cradle-purchaser	3	Energy	6	Agr. crops& animal prod.	agr & sa	Willow	UK (NI)	[22]
5	DCF (AGM)	Cradle-stand	2/5	Energy	3	Agr. crops	agr	Black Locust	Southern EU	[23]
6	DCF (AGM)	Cradle-farm gate	3	Energy	5	Agr. crops& animal prod.	agr & sa	Willow	Ireland	[24]
7	DCF (NPV)	Cradle-purchaser	2	Energy	-	-	agr	Poplar	Italy	[25]
8	DCF (BEP)	Cradle-farm gate	4	Energy	7	Agr. crops	buf	Willow	Netherlands	[26]
9	DCF (NPV)	Cradle-na	4	Energy	6	Agr. crops	agr	Willow	UK	[27]
10	DCF (NPV, IRR)	Cradle-purchaser	15	Energy or fibers	4	-	-	Poplar	USA	[28]
11	DCF (NPV, IRR)	Cradle-purchaser	-	Energy or fibers	4	Coal price and fiber	agr & ero	Poplar	USA	[29]
12	CA	Cradle-purchaser	4	energy or ethanol	5	-	agr	Poplar	USA	[30]
13	DCF (NPV)	Cradle-na	-	Energy or pulp	6	-	sa	Poplar	Sweden	[31]
14	DCF (AGM)	Cradle-na	2/5/7	Energy	6	Agr. crops	agr	Poplar	France	[32]
15	DCF (NPV, BCR)	Cradle-purchaser	0.5-3.5	Energy	3	-	sa	Daniellia	Benin	[33]
16	DCF (BEP)	Cradle-farm gate	4	Energy	7	Agr. crops	buf	Willow	Netherlands	[34]
17	DCF (Annual Costs)	Cradle-purchaser	-	Energy	6	Agr. crops	agr	Willow, Poplar	EU	[35]
18	DCF (AGM)	Cradle-na	3	Energy	6	Agr. crops	min	Black Locust	Germany	[36]
19	DCF (NPV, IRR)	Cradle-purchaser	3	Energy	5	-	cae	Willow	Belarus	[37]
20	DCF (AGM)	Cradle-purchaser	4	Energy	6	Agr. crops	agr	Willow	Sweden	[38]
21	DCF (Biomass cost)	cradle-stand	5-8	Energy	5	Agr. crops	agr	Poplar	USA	[39]
22	DCF (NPV)	Cradle-farm gate	3-12	Energy	7	-	agr	Poplar	USA	[40]
23	DCF (NPV, BCR, BEP)	Cradle-farm gate	5-10	Energy	4/6/8	-	agr	Black Locust	USA	[41]
24	DCF (SEV)	Cradle-stand	-	energy	4/7/10	-	min	Eucalyptus	USA	[42]
25	ROA	Cradle-purchaser	5	Energy	3.87	-	sa	Poplar	Germany	[43]
26	DCF (NPV)	Cradle-purchaser	3	Energy	4/6/8/10	Agr. crops	agr	Willow	Wales	[44]
27	DCF (NPV,AGM)	Cradle-purchaser	3	Energy	6	Agr. crops	agr	Willow	Poland	[45]
28	DCF (NPV)	Cradle-farm gate	3	Energy	5	-	agr	Willow	UK	[46]
29	CA	Cradle-purchaser	-	Energy	6.5	-	agr	Poplar	USA	[47]
30	DCF (BCR)	Cradle-purchaser	3	Energy	5	-	agr	Poplar	Germany	[48]
31	DCF (SEV)	Cradle-purchaser	3	Energy	6	-	agr	Poplar	Canada	[49]
32	RA, DCF (NPV, Ann)	Cradle-purchaser	3	Energy	6	Agr. crops	agr	Poplar	Germany	[50]
33	DCF (IRR)	Cradle-purchaser	3	Energy	na	-	agr	Willow	USA	[51]
34	DCF (NPV)	cradle-purchaser	4	Energy	7	-	sa	Willow	Denmark	[52]
35	EUA	Cradle-na	5	Energy	4	Agr. crops	agr	Poplar	Germany	[53]
36	DCF (NPV, DCA)	Cradle-farm gate	5-16	Energy	10	Energy price	agr	Poplar, Willow	Chile	[54]
37	CA	Cradle-purchaser	-	Fibers	-	Fiber price	agr	Poplar	USA	[55]

Methodology: General remarks: DCF=Discounted Cash Flow Approach is used as an umbrella term for dynamic approaches. The target figures analyzed are given in brackets, "-"=not reported or not specified, NPV=Net Present Value, IRR=Internal Rate of Return, BCR=Benefit-Cost Ratio, AGM=Annual Gross Margin, BEP=Break-Even Point, CA=Cost Accounting, SEV=Soil Expected Value, ROA=Real Options Approach, RA=Risk Analysis, EUA=Expected Utility Approach, DCA=Discounted Cost Analysis; Process chain: cradle-purchaser=biomass is sold to any party and transport costs to this party were included, cradle-farm gate=where it was not obvious, whether biomass was to be sold or used by the SRC operator himself, cradle-stand=biomass is sold on stool, cradle-na=process chain is not described continuously; Use: energy=heat and/or power; Rotation length [years] for the second and further rotations: more than one value is given only, if no base scenario was marked; Interest rate: more than one value is given only, if no base scenario was marked; Reference system: is stated if the financial output has to compete with others than capital costs only, represented by the applied interest rate; Land used: agr=agricultural land, sa=set-aside land, buf=buffer areas around nature reserves, ero=erodible land, min=post-mining land, cae=cesium contaminated land.

* Rotation lengths after first harvest (the first rotation length is often shorter than subsequent ones).

Table 2

Properties and differences of methods used for economic evaluation of SRC. The approaches are classified into the three different groups “Static methods”, “Dynamic methods” and “Methods for uncertain expectations”. Sensitivity Analysis is presented separately, since it is more common to measure the impact of uncertain expectations on the outcome than taking the uncertainty for economic evaluation into account. The components which are taken into account increase from “Static methods” to “Methods for uncertain expectations”.

Methods used for economic evaluation of SRF	Components taken into account					
	Costs	Benefits	Timing of costs/benefits	Uncertainty of costs/benefits	Worth of flexibility	Risk attitude of the decision maker
Static methods	x					
Cost analysis	x					
Cost-type accounting	x					
Dynamic methods	x	x	x			
Discounted cash flow approach	x	x	x			
Annuity method	x	x	x			
Annualized gross margin	x	x	x			
Internal rate of return	x	x	x			
Soil expected value approach	x	x	x			
Break even price analysis	x	x	x			
Soil expected value approach	x	x	x			
Discounted cost analysis	x	x	x			
Methods for uncertain expectations	x	x	x	x		
Expected utility approach	x	x	x	x		x
Risk analysis	x	x	x	x		
Real options approach	x	x	x	x	x	x
Sensitivity Analysis	x	x	x			

underlying assumptions. As we found a wide variance of underlying assumptions, underlying costs, process chains and methods used to evaluate economic profitability of SRC, our aim was to analyze the 37 studies with regard to their assumptions.

3.1. Methods of capital budgeting applied in economic analyses of SRC

Numerous methods of financial budgeting exist, each of which has its own special focus and associated benefits and drawbacks. In general, these methods can be divided between those that consider uncertainty, and those which do not. Methods which exclude uncertainty can be further subdivided into *static* and *dynamic methods* – the big difference being that static methods use average costs and benefits over time, whereas dynamic methods consider the actual timing of specific costs and benefits [56]. In evaluation methods which try to take into account the uncertainty of future cost and benefits, both amount and timing of future costs and revenues are considered. In Table 2, the main methods found in our analysis are grouped according to these categories, and their most important aspects are summarized.

Static methods were the least frequently applied methods – only three studies made use of them. Because changes in costs and benefits over time affect the profitability of SRC, it is necessary to consider them in the economic assessment. This fact is of great economic importance, since SRC cultivation involves relatively high cultivation costs at the beginning of the total cultivation time, followed by a period of lower maintenance costs as well as land rent costs. The first cash inflows are not realized until after additional costs for harvesting are incurred and the product is finally sold. According to the rotation lengths in the studies reviewed, this positive influx of cash occurred at various intervals between one and 14 years, but on average every fourth year [26,57] stated that dynamic methods are appropriate for considering the intermittent cash flows of SRC, whereas if only the costs or benefits of alternative investments are to be compared, it is better to use discounted costs or benefits, such as Discounted Cost Analysis.

Dynamic methods – applied 31 times in the studies examined here – seemed to be favored for the economic evaluation of SRC, while only three methods considered uncertainty. Sensitivity

Analyses – whose exceptional position within methods dealing with uncertain expectations is discussed later on – were used 20 times in combination with dynamic methods. Although the level of uncertainty about future cash flows of SRC is high, due to limited experience and data availability, methods for evaluation appropriate in situations with uncertain expectations were rarely applied. In addition to the many well-established methods listed there, the *AGM*⁴ – a relatively new method which was applied – attracts attention. By use of methods such as *AGM*, as well as *EAV*⁵ and *ADAGM*⁶ positive and negative cash flows – fixed and variable costs – are discounted and converted to an average annual value; thus it is the same as the *Annuity* method but is listed separately, due to its frequent use in SRC literature.

*NPV*⁷ – one target figure of *DCF*⁸ approaches – allows for comparisons among alternative investments. *Annuity* – where the *NPV* is converted into a figure representing a consistent annual cash flow of an investment over its lifetime – is an appropriate method for comparison of perennial crops with annual crops. However, certain provisions must be met: (i) Both the *Annuity* of SRC and the gross margins of annual crops should include variable as well as fixed costs. (ii) If there is a rotation cycle for annual crops, the costs and benefits of all crops should be taken into account according to their proportion [58]. A frequent point of criticism of *DCF* and *Annuity* approaches is the assumption of the ideal capital market, where interest on debt is equal to credit interest. In fact, the interest rate applied has a strong impact on both the *NPV* and the annuity [59]. But in the case of SRC, it is difficult to identify an interest rate which takes into account both the value of the money and the appropriate risk premium, given the uncertainty of future cash flows – especially as there is so little quantitative data about the potential for events which can be damaging to SRC.

The main advantage of the *IRR*⁹ – another discounted cash flow approach – is that this value can allegedly be compared directly to

⁴ Annual(ized) Gross Margin.

⁵ Equivalent Annual Value.

⁶ Average Discounted Annual Gross Margin.

⁷ Net Present Value.

⁸ Discounted Cash Flow.

⁹ Internal Rate of Return.

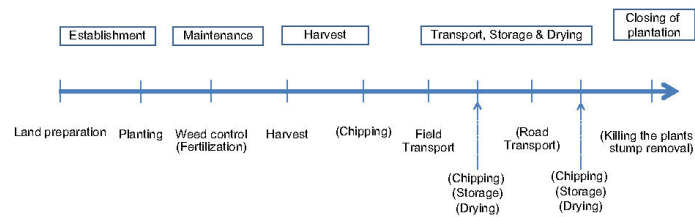


Fig. 2. Possible process chains of SRC management and individual working steps. Working steps in brackets are either optional or variable in timing. To increase traceability and comparability of studies on economic evaluation of SRC the underlying process chain along with underlying costs should be indicated in the future; since there is not only one typical process chain along with typical individual working steps but various possible combinations.

the IRRs of alternative investments, and to interest on credits offered by a bank. However, the underlying assumption of IRR – that costs and benefits are immediately invested with an interest rate according to the IRR – is often criticized as unrealistic. Furthermore, IRR is not suitable for comparisons among investments with different upfront costs, where money is invested at different points in time (i.e. in different years) and where investments have different life spans [56,60].

Due to the long life span of an investment in SRC, cash flows are subject to a high level of uncertainty. Given the high uncertainty in the profitability of SRC [46], it is surprising that only three of the 37 studies examined used methods which consider risk, such as RA,¹⁰ the EUA,¹¹ and the Real Options Approach ROA.¹²

Risk Analysis is a tool used to quantify the risks of an investment project, and is therefore a powerful approach to evaluating investment projects under uncertainty [56]. Its drawbacks were summarized by [17] who stated, that the assumptions regarding the distributions of input data “have considerable effects on the tails of the simulated probability distribution functions” and “the correlation between different input factors are often unknown, assumed to be static or simply ignored”.

In the Expected Utility Approach (EUA) the expected value is replaced by the expected utility, where the investors' attitude towards risk is also considered. EUA is a powerful way to take the investors' risk profile into account, if the investors' attitude towards risk is represented accurately by the underlying utility function. The choice of specified approaches in the expected utility framework is discussed in [17].

The Real Options Approach – a tool derived from the finance sector – is used to consider the value of flexibility, or the value of losses of flexibility. Musshoff and Jerchel [46], for example, state that the NPV of an investment in SRC must be 1.5 times higher, in order to account for the value of flexibility losses in land use through SRC cultivation. Critics of the approach mention that real options are not arbitrarily divisible and there is not always a market or price for real options [56].

Sensitivity Analysis is not a method which accounts for uncertainty, but rather a method to test if the uncertainty of particular input parameters had a significant influence on the outcome of the analysis [56]. In 20 out of 37 of the studies examined, Sensitivity Analyses were carried out to check whether the variance of input data was crucial to the predictions about the economic viability of SRC. In all cases, the authors concluded that the uncertainty of input parameters – especially biomass price and biomass yield assumptions – was crucial in evaluating the profitability of SRC. This result is an important indicator of the need for economic calculations which take heed of the uncertainty of both prices and yields for SRC.

¹⁰ Risk Analysis.

¹¹ Expected Utility Approach.

¹² Real Options Approach.

3.2. Process chains and working steps

To ensure both traceability and comparability of calculations, it is very important to precisely describe the process chain used as a basis for the economic evaluation of SRC. Different working steps, along with differences in time requirements, type of machines used and the number of hours they are operated, and distances to market must all be taken into account (Fig. 2), since these lead to varying costs, and thus effects on the profitability of SRC. Due to the lack of experience with SRC management worldwide, and the manifold possibilities in terms of working steps, it is a challenge to choose appropriately among them, which ultimately affects the costs calculated and therewith the financial outcome. Therefore, we have dedicated a large section of this review to providing an overview and explanation of all possible working steps in SRC production – from cradle (land preparation and planting) to purchaser – that have the potential to contribute a meaningful share of overall costs. These include costs for: establishment, harvesting and chipping, transport loading, storage and closing of the plantation [28,33,61,62]. Maintenance costs, such as fertilization, application of insecticides, and weed control, contribute only a small share to overall costs [29,63] and therefore will not be discussed in detail in this paper. As an indicator of the necessity to include a particular working step in an economic analysis of SRC, we additionally indicate the number of studies which carried out each working step. We end with an overview of costs per working step and a summarizing definition of four typical process chains and the studies we examined which can be categorized under each.

3.2.1. Analysis of working steps

Establishment costs are one of the highest cost units of SRC cultivation [33]. Hence, careful consideration must be given to which actions must be included in analysis, and which can be omitted [9]. For successful cultivation of SRC, good site conditions are necessary [64] {Bemmann 2010 #182 hence costs for land preparation as well as costs for procurement or generation of cuttings or seedlings and for planting must be considered, as they are the basis for growth.

Among the studies analyzed, 35 of 37 considered costs for land preparation, cuttings and planting

Competing vegetation and therewith weed control are among the most important factors influencing the growth of SRC plants in the first couple of years after establishment of the plantation [48,55]. Thus, in 34 out of 37 studies, pre-emergence herbicides were applied either immediately before or after planting. Depending on site conditions and relative levels of competition between weeds and trees, weed control might be required one to three times a year in the first one or two years following plantation establishment [55,65,66]. In 29 out of 37 studies, costs for weed control were indicated.

Harvesting methods for SRC can be divided into two main types. First, there is a fully mechanized harvesting system, where SRC trees are harvested and chipped in one continuous operation. Second, there are harvesting techniques where harvesting, skidding and chipping of the shoots are carried out in two or more working steps. This can be accomplished either manually – with a handheld chainsaw – or with machines which harvest and collect the shoots to deposit them at a central spot where they are then dried and/or chipped. Fully mechanized harvesting systems are said to be the cheapest for short rotations of about three years due to high productivity [5,22,61]. This 3-year threshold is based on tree diameter at harvesting height. However, newer machines are capable of harvesting stems of up to 13 cm in diameter, which must be considered in future calculations. For SRC with a rotation length of ten years, the manually harvesting technique is economically competitive due to the relatively high amount of biomass per stem [61]. Since harvesting is always required, with the exception of the two studies where biomass is sold at stool, all of the studies examined indicated harvesting costs.

Costs for chipping were indicated in 23 studies. As noted, in two of the 37 studies the biomass was sold at stool, and in five, biomass was sold as round wood, thus chipping was not required. The remaining studies did not give explicit information about chipping, since the fully mechanized harvesting technique where chipping is automatically included was applied.

Field Transport refers to transport on field and dirt road, whereas Road Transport takes place on paved roads. Transport distances in the studies examined ranged from 5 to 65 km, with a median of 30 km. Even in countries with large land bases like the USA and Canada the average transport distance was 44.7 km, due to the strong influence of transport cost on profitability [23,28,32].

Loading stems or wood chips on a transport vehicle is always required when biomass is moved from one interim storage site to another, or to final storage. Round wood or wood chips are, for instance, stored at the field site or at the farm prior to being transported to the power plant.

Many interim storage steps imply rising costs for loading and unloading, which must be included in economic calculations. Fourteen of our studies considered field transport and 22 road transport, but only eight studies took costs for loading into account.

Two main types of woody biomass drying can be distinguished – passive, natural drying without any external energy input, and active drying with external energy input. Furthermore, the medium to be dried can be round wood or wood chips. Round wood is usually air-dried at the field site, where the water content is generally reduced from 50% to 25–30% in one summer [67]. Wood chips can either be air-dried, or dried with external energy input. Some of the benefits in terms of energy and cost savings gained from air-drying of wood chips are lost through decomposition [68]. Active drying, in contrast, increases energy, material and labor costs. Further details on drying technologies for bioenergy may be adopted from [69].

When biomass is provided for energetic use in heating plants, drying is not necessarily needed. For smaller, domestic heating plants, the acceptable water content of biomass can be as high as 30% [70]. Costs for drying were taken into account in only four out of the 37 studies. Hence, it seems to be generally assumed that drying of wood chips is either not done, or it is done passively without direct costs for drying. In the latter case, at least additional costs for loading and unloading the biomass at the interim storage site should be considered. Due to its higher heating value, it is obvious that biomass with a relatively low water content of about 20% can fetch a higher price [71].

At the end of the total cultivation time, the plantation must be closed – which means killing the plants and preparing stool free topsoil – if new trees are to be planted mechanically, or if farming

with conventional agricultural crops is desired. Therefore, stools can be either pulled up and collected, or killed using rototillers up to a soil depth of 30 cm or by herbicides. The overall cost of this process depends primarily on the given conditions. Herbicide application is the cheapest method, at about 250 Euro per hectare, and is suitable if the land can be left fallow until the stools decompose. Pulling up and collecting the stools is the most expensive method, whereas milling or crushing the roots with rototillers is the method with the best cost-benefit ratio [62]. Fourteen out of 37 studies included costs for stool removal. However, because SRC is such a long-term project it is often not known ahead of time what the preferred land-use will be at the end of the rotation period.

Additional costs that were found in some studies included costs for Planning ($n=1$), Marketing ($n=3$) and Supervision ($n=10$). We however, feel these costs can be ignored for small scale SRC areas, and should be included in economic calculations only if several SRC sites are to be managed simultaneously.

3.2.2. Overview: proportion of overall costs per cost unit

To highlight which cost units (costs for working steps plus costs for land rent) had the biggest impact on the overall costs, and thus should be chosen carefully in future calculations; we calculated the proportion each individual working step contributed to the overall costs per study, and summarized the results in Table 3. We included only costs which were clearly assignable to the cost units we have defined for this review.

The three cost units with the highest median share of the costs included in the studies we analyzed were land rent, harvesting and chipping, and establishment, which is in line with [23,28,61,9]. This ranking remained valid even when we analyzed the data separately according to the four process chains described in 3.2.3. Only where the biomass was considered to be sold per stool (cradle-stand process chain) did the ranking of proportional costs change – to land rent, establishment and maintenance. Thus in an economic evaluation of cradle-stand SRC production, maintenance costs have to be chosen carefully, as well. Even when more cost units were included in the calculation, the relative proportion of costs attributable to land rent, harvesting and chipping, and establishment did not change. Therewith, the overall variance of proportionate cost assumptions could not be explained by the process chain. Ericsson et al. [38] mentioned the nascent status of SRC production in most countries as one reason for heterogeneity of cost estimates. In our study, harvesting and chipping, and costs for land rent were found to have the highest variance. As harvesting and chipping can be accomplished by one of several techniques in addition to the cost differences per county this result is plausible. The high variance of

Table 3

Costs per cost unit as a proportion of overall costs found in the studies examined. On average costs for land rent, harvesting and chipping and establishment are the largest contributors to the overall costs and therefore have to be chosen carefully.

	Minimum	Maximum	Mean	Median	Number of values
Establishment	4.68	54.96	24.99	24.39	28
Maintenance	0.76	29.8	10.33	6.54	16
Harvesting and chipping	4.67	91.22	33.7	26.21	27
Field Transport	5.28	14.82	9.9	9.75	7
Road Transport	1.81	26.87	13.41	11.99	11
Loading	1.31	7.28	4.4	4.8	3
Storage	5.68	12.84	8.65	8.05	4
Marketing	5.78	9.57	7.06	5.83	3
Supervision	0.3	28.24	6.69	4.31	10
Closing	1.38	14.47	7.47	8.51	11
Land rent	1.28	63.73	33.97	37.9	16

Table 4

Overview of working steps per process chain. Working steps indicated in brackets were found in some, but not all of the studies falling in the particular category. “Cradle – stand” summarizes studies where biomass is sold at the stool. “Cradle – farm gate” summarizes studies where biomass is not delivered to any purchaser. “Cradle – purchaser” summarizes studies where the end of the process chain is either a power plant, a marketplace or a mill. “Cradle – na” represents all studies where the destination and therewith the process chain is not precisely defined. By trend the number of working steps along with the production costs increase from “Cradle – stand” to “Cradle – purchaser”.

Process chain	Establishment	Maintenance	Harvest	Transport	Storage and drying	Closing of plantation
Cradle – stand (n=3)	x	x				
Cradle – farm gate (n=7)	x	x	x	Field	(x)	(x)
Cradle – purchaser (n=22)	x	x	x	x	(x)	(x)
Cradle – na (n=5)	x	x	x			

costs for land rent, stated for instance by Toivonen and Tahvanainen [23] may be due to the heterogeneity of soil quality and of regional prices for land, or alternatively, due to different definitions of land rent. As stated by Ericsson et al. [38]: “It is difficult to estimate the general cost of land, as it may be defined as a tenancy cost, the interest rate on loans taken out to purchase the land or the opportunity cost.”

We found the fourth and fifth most important cost units to be road transport – with a median of 11.99% – and field transport with a median of 9.75%. As they are directly dependent on the yield level per hectare [48] and the distance to market [23]. Both factors must be included in the determination of appropriate transport costs.

We found closing of the plantation to be the sixth most important cost unit. Further cost units – listed by median impact on the overall costs – are storage, maintenance, marketing, loading, and supervision. In the future, the costs for SRC management are expected to decrease, due to the high learning potential with regard to SRC management [72]. De Wit et al. [72] indicated potential cost reductions in the management of SRC poplar in Italy of 65% and SRC willow in Sweden of 57% within the next 20 years. Therefore, more effort needs to be put into investigations of the development of SRC management costs over time, in order to include likely trends in future calculations.

3.2.3. Process chains of the studies examined

To summarize and simplify the classification of studies according to their underlying working steps and associated costs and revenues, we defined four process chains and assigned each of the studies we examined to one of the four (Table 4). Along the continuum from “cradle-stand” to “cradle-purchaser” methods, both costs and revenues tended to increase. Facultative, working steps that may or may not be carried out, working steps are indicated in brackets.

The majority of the studies examined used the process chain “cradle-purchaser,” where biomass was sold to any party and transport costs to this party were included (Table 4). Seven studies chose a “cradle-farm gate” process chain where it was not obvious, whether biomass was to be sold or used by the SRC operator himself. Three studies were based on the “cradle-stand” process chain, where biomass was sold on stool. Thus no costs for harvesting, chipping and transport were included, but the price for biomass was low compared to wood chips, at about 15€ per ton fresh matter (Fig. 3). In five studies, the working steps were not specified continuously after harvesting, but single working steps were stated “cradle-na”.

3.3. Underlying assumptions of the studies reviewed

The assumptions on which an economic calculation is based strongly affect the financial outcome. As there is little real data on costs and benefits due to the small area of SRC worldwide, we give an overview of the underlying assumptions used in the studies reviewed. We also provide the results here of statistical tests we

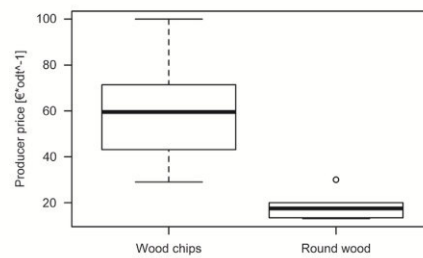


Fig. 3. Wood chip (n=25) and round wood (n=6) prices [€/odt⁻¹] of examined studies (n=25). Wood chip prices are on average 2.6 times higher than prices for non chipped wood.

conducted to determine whether differences in the assumptions made for different tree species were statistically significant.

3.3.1. Returns of biomass sale

The price for SRC biomass, round wood or wood chips, was viewed by [24,26,32,48,73] as the most important factor for the profitability of SRC. In all other studies, biomass price was considered to be one of the most important factors. Studies which directly compared SRC to agricultural crops stated that the opportunity cost of competing land uses also has a significant influence on the economic viability of SRC [22,48]. Therefore, the biomass price assumption for economic calculation of SRC must be as realistic as possible. Furthermore, it is important to highlight the measurement unit to which the price refers. All of the following measurement units were found in the studies examined: [€/GJ⁻¹], [€/MWh⁻¹], [€/odt⁻¹]¹³ and finally [€/t⁻¹] with accompanying information about water content. For instance, [€/GJ⁻¹] and [€/MWh⁻¹] can refer either to the energy content of biomass or to the converted energy output of biomass. In the latter case, the efficiency factor of the heating system must also be provided. A similar problem exists for [€/odt⁻¹] and [€/t⁻¹]: When the water content is known, the price for biomass can be converted to the price per odt, according to its heating value. However, there are additional costs for the dry-down of biomass to zero % water content, which are dependent on both the original water content and the technique applied.

In all studies, the prices for round wood were given for a water content of between 40% and 50%, while the prices for wood chips were given in [€/GJ⁻¹], [€/MWh⁻¹], [€/odt⁻¹] or [€/t⁻¹], which makes it difficult to compare them. To make prices for this study approximately comparable, wood chip prices were converted to prices per [odt].

Prices for round wood were ranging from 14.8€ per odt up to 31.4€ per odt with a mean price of 23.01€ per odt.

¹³ Oven dry ton.

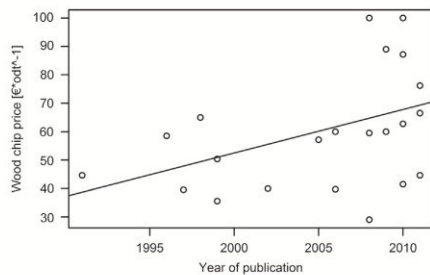


Fig. 4. Wood chip prices of the studies examined by year of publication ($n=25$). The prices for wood chips are significantly increasing over time, but absolute deviation is scattering stronger in the last years. These trends should be considered when evaluating economics of SRC.

Wood chip prices differed strongly within the studies examined (Fig. 3), ranging from 30€ per odt up to 100€ per odt with a mean price of 60.69€ per odt.

A mean price difference of 37.6€ per odt between wood chips and round wood was found in the analyzed literature (Fig. 3). Hence, chipping wood offers an additional benefit to SRC. While a trend of increasing prices over time was confirmed via regression analysis (Fig. 4), no statistically significant price difference was found between countries. The R-squared value for this regression equaled about 0.14, which means that only 14% of the total variance could be characterized by the regression line, but the increasing price over time was statistically significant.

Considering the fast growing population, the increasing demand for fossil fuel and increasing prices, this result seems to be plausible. Styles et al. [9] for example, reported that large-scale energy producers in Ireland were offering more and more money for wood chips. Rosenqvist and Dawson [26], on the other hand, referred to the opposite situation in Sweden, where prices for wood chips were decreasing due to increasing SRC area, and an associated increase in wood chip supply. However, in the long term, an undersupply of woody biomass, and therefore, increasing biomass prices seem to be more likely [74]. Nevertheless, some authors reported that there is still no established market for wood chips in their country, as indicated by the great price variance within the countries themselves (see for instance [51]). This fact, and the relatively long time span – 20 years – covered by the studies may also have contributed to the high variance of wood chip prices.

3.3.2. Biomass yield

The biomass yield of SRC was seen by [21,22,37,47] as the most important driving factor for the economic success of SRC. In all remaining studies in our sample, it was named as one of the most important driving factors. Thus biomass yield and price assumptions have to be made critically and as realistically as possible.

Growth of an SRC stand can be expressed in one of two ways – either by the total growth of a stand over its lifetime in relation to its area, or by the average annual growth – often referred to as MAI.¹⁴ To calculate the MAI, the total growth of a stand is divided by the number of years since establishment or since resprout. In forestry, the measurement unit “cubic meters” for timber is most commonly used. The measurement unit for SRC yield when expressed as total growth – especially in regard to SRC timber for energetic use is “tons per hectare”, and for average annual growth (MAI), “tons per hectare per year”. To make biomass prices comparable in terms of their dry matter content, they are

¹⁴ Mean Annual Increment.

commonly given as “oven-dry tons”. In four of 37 of the studies examined, yield was indicated as total growth. In the remaining studies, yield was given as MAI. Thirty-five of the 37 studies reported the yield in “oven-dry tons” [odt], whereas only two of 37 studies indicated the yield in tons, along with a statement of the water content.

Yield development over the lifetime of SRC trees was frequently discussed [33,75]. A two-sided T-Test of the Mean Annual Increment (MAI) in the first and subsequent rotation periods from the studies examined showed evidence of an increase in yield over time. The median MAI for the first rotation was 8 odt ha⁻¹ a⁻¹ and the median MAI of second and further rotations was 9 odt ha⁻¹ a⁻¹, which represents an average increase of 12.5% (Fig. 5). This result concurs with the findings of [42,33] who reported an average yield increase of 11% from the first to the second rotation.

A general increase from the first to second rotation seems logical, since in the first years, cuttings use energy to establish a rooting system and must compete with weeds for light, nutrients and water.

A closer inspection of MAI and MAI development amongst the three tree species – black locust, poplar and willow – indicated no statistical evidence either for different MAIs, or for different MAI development over time (Fig. 6). The median MAI of black locust was 5.7 odt in the first rotation and 7.35 odt in further rotations. The median MAI of poplar was higher, with 8 odt in the first rotation and 9 odt in further rotations. The median MAI of willow was the highest, with 9 odt in the first rotation and 9.5 odt in further rotations. The absence of statistically significant differences between the yields of the various tree species may be due to the fact that most of the studies examined calculated on the basis of average yields per country, which have mostly been derived from test plots. Strauss et al. [33], Buchholz and Volk [13], Avohou et al. [36], Styles et al. [9] and Ericsson et al. [24] affirmed that SRC yield strongly depends on site characteristics, in particular on water supply. If water on site is scarce, urban or industrial water – if available nearby – is a cheap and efficient way of irrigation which leads to increased yields, and therewith increased profitability of SRC [76]. Furthermore, biomass yield derived from test plots reflects yield levels under optimum conditions. So, they do not represent yield levels achievable under field conditions in every case. Krasuska and Rosenqvist [48] assumed a 25% lower yield level when taking into account losses involved with commercialized cultivation. However the fact that SRC cultivation is still in the initial phase and there is great potential for increasing future yields should be considered. De Wit et al. [72] who evaluated past trends in development of different wood production systems and provided a future outlook for different wood production systems, stated that yield is the factor with the strongest influence on increase in the profitability of SRC. According to [72]: “Yields were augmented through implementation of improved breeds and clonal varieties, increased fertilization levels, better pest control and ongoing mechanization in planting and tillage.”

3.3.3. Total cultivation time

Assuming an appropriate total cultivation time for SRC, the period from establishment until closing of the plantation is economically relevant, as it affects the period of discounting each cash flow. In the studies examined, total cultivation time varied between eight and 50 years (Fig. 7). The total cultivation time of black locust varied between eight and 30 years, with a median cultivation time of 15 years. Poplar was cultivated for eight to 50 years, with a median cultivation time of 21 years; and willow for 16–25 years, with a median cultivation time of 22 years. However, a Kruskal–Wallis one-way analysis of variance showed no statistically significant difference between the cultivation times of the three tree species.

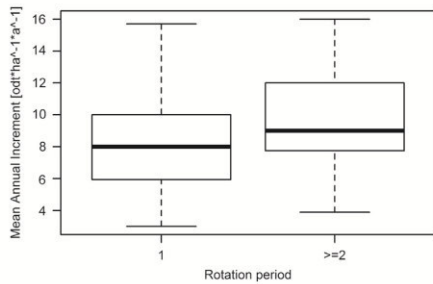


Fig. 5. MAI in the first ($n=35$) and second ($n=35$) or later rotation(s) (2+) of black locust, poplar and willow. On average the MAIs examined are increasing from the first to the second and further rotations by 12.5%.

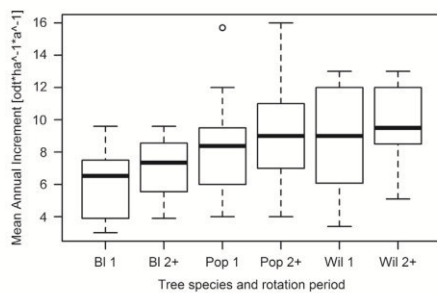


Fig. 6. MAI of black locust (BI) ($n=4$), poplar (Pop) ($n=13$) and willow (Wil) ($n=15$). Index "1" represents the first rotation. Index "2+" represents the second and further rotations.

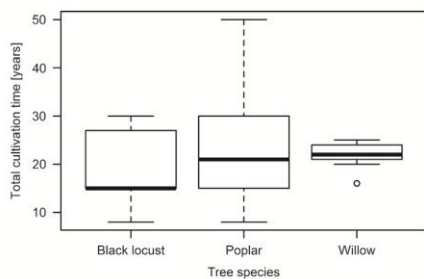


Fig. 7. Total cultivation time of three established SRC tree species in years ($n=36$).

In general, the total cultivation time depends on the favored end product and rotation length. However, with longer rotation lengths, trees' resprouts are more vital [77]. If the yield level is tolerable, a longer cultivation time can be economically interesting, because the cultivation costs decrease in proportion to the lifetime of an investment. Rosenqvist and Dawson [26], Avohou et al. [36] and Londo et al. [37] stated that the total cultivation time is a very important factor for the economic viability of SRC. In their evaluation, [26] estimated the necessary minimum cultivation time to reach a positive Net Present Value at 16 years.

3.3.4. Planting density

Since planting density directly affects the total cultivation costs of SRC, realistic and appropriate planting densities are recommended. The planting density of the three established SRC tree species varied widely (Fig. 8). Planting densities for black locust

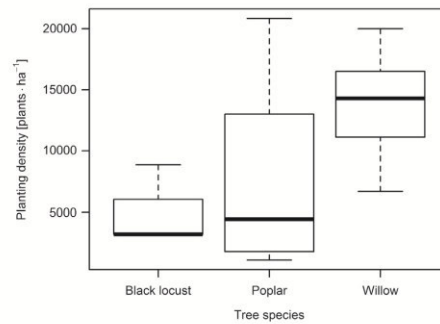


Fig. 8. Planting density [Plants ha^{-1}] of three established SRC tree species ($n=26$). Willow is the SRC tree species which is cultivated with the highest planting densities, whereas planting densities of poplar are on average much lower. A wider range of assumed planting densities was found for poplar.

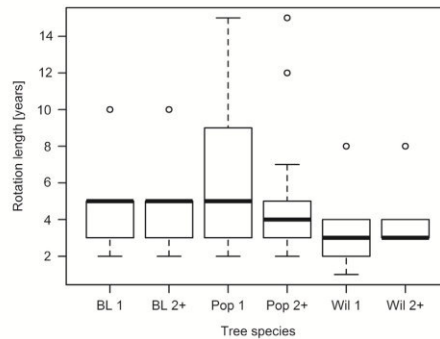


Fig. 9. The rotation lengths [years] of three SRC tree species black locust (BL), poplar (Pop) and willow (Wil). The additional index "1" represents the first rotation. The additional index "2+" represents the second and further rotations.

ranged from 3200 to 8860 plants per hectare, with the lowest of all medians at 3200 plants per hectare. Poplar was the tree species with the highest variance in planting density – from 1100 to 20,833 per ha, with a median of 4445 plants per hectare. Willow planting density ranged from 6666 to 20,000, with a median of 14,300 plants per hectare. Hence, the difference in planting density used for willow cultivation was statistically significant – 3.2 times higher than the planting densities of poplar and 4.5 times higher than those assumed for black locust. This must be considered in future calculations. The large variance in the planting densities of poplar may be explained through the wide range of rotation lengths, as the longer the rotation length, the fewer plants per hectare are necessary. On the one hand, high densities result in relatively higher yields per hectare – especially in the first rotation cycle – and faster canopy closure, along with decreased need for weed control [55]. On the other hand, higher planting densities mean higher cultivation costs. Buchholz and Volk [13] conclude: "[...] increased planting density does reduce the overall profitability of the crop over multiple rotations significantly [...]. Increasing planting density to raise yield might therefore not result in an improved profitability of the crops."

3.3.5. Rotation length

The rotation length is the period between cultivation and first harvest, or alternatively the period between one harvest and the

following harvest. It affects the timing of economic benefits delivered by harvested biomass. The rotation lengths of black locust and willow are strikingly similar, whereas the rotation length of poplar deviates (Fig. 9). A Nemenyi–Damico–Wolfe–Dunn test – a post-hoc test which provides a pairwise comparison if the collected data does not follow a normal distribution – showed that poplar had a significantly higher range in rotation length than the other SRC species. The length of the first rotation ranged from two to 15 years, with a median length of five years. Interestingly, in the second rotation, with the exception of two outliers, all of the data was within a much smaller range – between two and seven years, with a median of four years.

The differences in length between the first and second rotations in poplar can be explained by the production of round wood. As stated in Section 3.3.3, poplar in fact is an SRC tree species which is also suitable for round wood production. In all studies in our sample where round wood was mentioned, the trees were harvested after the first rotation, stumps were extracted and the land was replanted. Thus, the second rotation of poplar (Pop2) in our database contains only data for wood chips.

The rotation length is an economically interesting variable: The optimal yield increment of SRC poplar, depending on the site conditions, is about ten years [78]. Increasing the rotation length from three to seven years, for instance, leads to both higher yields and better wood quality, due to an increase in wood content relative to bark content. However, there are economic disadvantages, due to delayed cash flows and the necessity of using a more expensive harvesting technique. Burger et al. [61] states that manual harvesting of ten-year-old poplars is economically competitive and ecologically preferable to fully mechanized harvesting techniques. In five year old stands, however, manual harvesting is the most expensive harvesting technique, due to the smaller amount of biomass per shoot. Concerning the rotation length, the following conclusion was drawn by [13]: “As long as stem diameters do not exceed the size that can be managed by this harvesting system, longer rotations are more profitable than shorter rotations. The reduction of harvest costs outweigh the negative economic effects caused by delaying the start of positive cash flow due to a longer rotation.”

3.3.6. Interest rate

The interest rate which is used to discount or prorate cash flows in order to compare values represents the value of invested money itself – the capital costs – and the additional risk premium [59]. For this review, two types of interest rates which are typically used in forestry and agriculture were relevant – (i) the nominal interest rate, which is the payable percentage interest of an investment, (ii) and the real interest rate, which is the nominal interest rate minus inflation.

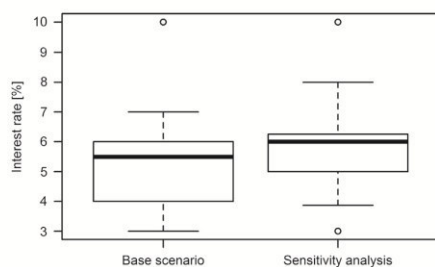


Fig. 10. Interest rates applied in economic calculations of SRC ($n=33$). If a sensitivity analysis was conducted, the interest rates applied are given in the right Box plot ($n=41$).

The interest rates used for economic calculation varied from three to seven percent with an extreme value of ten percent, and a median rate of 5.5%. The interest rates used for sensitivity analysis ranged from three to eight percent, with an extreme value of 10% (Fig. 10). The median interest rate among those used in the studies analyzed of 5.5% seems appropriate for agricultural investments [46]. In forestry, expected real interest rates are normally lower 1.5%, according to [79] or from 2 to 6% according to [80]. The application of interest rates appropriate for agricultural investments is reasonable, however, since SRC has to compete with alternative agricultural crops for land.

4. Implications for future dealings with the economics of SRC

As shown in our review, the calculation of profitability for SRC is not trivial. First of all, there is a need for a precise nomenclature for woody biomass production from short rotation coppice. Four different terms were found in the literature – *Short Rotation Forestry*, *Short Rotation Coppice*, *Short Rotation Woody Crops* and *Short Rotation Intensive Culture* – all of them basically describing the same process. Therefore a concise definition of the terminology which includes the rotation length as well as rotation length-specific properties (for example, plant density) is recommended.

Due to the long life span of SRC, static methods are not appropriate for calculation of profitability. Dynamic approaches are more appropriate, as they consider the timing of future cash flows and are easy to apply. However, they do have drawbacks such as the difficulty of choosing an appropriate interest rate, and the neglect of uncertainty of future cash flows. The use of different terms for *Annuity – Equivalent Annual Value*, *Annualized Gross Margin* and *Average Discounted Annual Gross Margin* – in the studies may also cause confusion, and should be standardized. To date, methods of capital budgeting which take into account uncertainty are rarely applied in economic evaluations of SRC. As the timing and amount of cash flows are highly uncertain, due to the long life span of an investment in SRC, approaches which additionally take heed of uncertainty of future cash flows should be applied.

Four different types of *process chains* in SRC operations were distinguished, which contained different working steps and thus differing costs. Each working step consisted of further sub-working steps with the potential for differences among them as well, and there were several ways to perform many working steps. For instance, weeding was carried out both mechanically and chemically. The most important cost units, which have to be chosen carefully due to their high impact on overall costs, are land rent, harvesting and chipping, establishment, and transport. Costs for land preparation and planting must be included in economic calculations of SRC, as they are basis for growth. Costs for weed control should be included until plants reach the stage where they are higher than competing vegetation. However, as these costs are generally relatively insignificant in proportion to the other costs, large investments of time researching appropriate estimations are probably not justified. Instead, average figures based on national-level studies of fertilizer requirements for SRC that consider local or regional soil conditions are no doubt sufficient. In fully mechanized harvesting systems, chipping is accomplished during the harvest, skidding of stems from the harvest site to a second chipping location requires an additional step and therefore, additional costs for handling and chipping must be considered. Costs for loading were stated in only 8 of 37 studies, although biomass must be loaded and unloaded in every process chain with the exception of “cradle to stand”, and should therefore be considered in further studies. Only 14 studies considered costs for closing of the plantation. As closing of the

plantation, e.g. stump removal, is costly and necessary if the land is to be converted to agricultural use after the final harvest of SRC, we recommend calculating two scenarios if the subsequent land use is not yet clear – one with and one without costs for closing the plantation. To deliver comprehensible and comparable calculations we recommend precisely describing the underlying process chain and all of the working steps to be performed, including a clearly arranged overview of underlying costs and revenues. This was done in only a few of the studies we analyzed.

In our analysis of the underlying assumptions, we found that tree species-specific differences occurred in planting density – which was assumed to be 3.2 times higher for willow than for poplar, and 4.5 times higher than for black locust. Poplar was found to be the species with the longest rotation length. No statistically significant differences were found in the total cultivation time, biomass prices, biomass yield or interest rate of different species. The revenues from an SRC are *prices per unit of biomass multiplied by the amount of biomass*. Both were found to be the most important factors influencing the profitability. The *yield of SRC for energetic use* was given either as total increment per rotation in oven dry tons per hectare [odt ha^{-1}] or as mean annual increment (MAI) [$\text{odt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$], both of which are suitable. The water content should be indicated if greater than zero. A suitable yield measurement unit for round wood is cubic meters. In that case, water content and density by volume should be given, to make yields comparable to the measurement units of biomass for energetic use.

Bearing in mind the great influence of biomass yield on profitability, (e.g. [23,47]) we suggest calculating highly accurate site-specific biomass yields to facilitate a precise calculation of the profitability of an SRC. Additionally, the yield trend over lifetime should be included (e.g. the increase from first to second rotation).

Both [21,33] criticized the fact that there is too little reliable data on biomass yield under different site conditions. Thus a standardized, transnational arrangement for biomass testing field trials is called for to increase the availability of comparable yield datasets. Furthermore, there is need for a comparison between biomass yields from field trials and those from existing stands managed by farmers.

Large variance in *prices* – even between studies which covered the same time period – and increasing prices over time were found in the studies examined. Moreover, the measurement units to which the prices referred varied, making comparisons of biomass prices difficult. To allow easy comparison of prices, either the reference system of biomass prices for energetic use should be the energy content of the biomass itself, or prices should be given for oven-dry tons. The prices of SRC round wood for material use should be indicated in cubic meters, with the water content specified. Due to the very strong influence of price on profitability, we advise realistic determination of current prices. Additionally, we recommend analysis of past trends and careful definition of future price assumptions, due to the long lifespan of a SRC as well as the uncertainty of future prices. The *interest rate* plays an important and multifunctional role. It represents the value of the money, capital costs and a certain risk premium. Therefore, we recommend the use of an interest rate which includes the value of the land for other uses (i.e. site quality), and which has also been adjusted to take into account the risk due to the uncertainty in future costs and revenues from SRC. Furthermore, it should be indicated if the nominal or the real interest rate has been applied, since they differ significantly. Because SRC is still in its nascency, [72] indicated a high optimization potential and therewith a great potential for increases in the profitability of SRC in the future. Specifically, [72] mentioned the following factors as the ones with the greatest potential for improvement: increasing yield development, improved harvest equipment, rotation optimization,

optimized establishment and maintenance. To give quantitative support for likely future trends, and therewith, to increase the accuracy of economic evaluations, cost and yield development over time should be analyzed to a greater extent.

5. Conclusion

To improve economic calculations of SRC we examined 37 studies on economic evaluation of SRC, identified appropriate economic evaluation methods and summarized and discussed the underlying assumptions to provide a basis for future studies. Due to the long lifespan of an SRC, static methods of capital budgeting are not appropriate to evaluate the profitability of SRC. Dynamic methods are suitable if the underlying assumptions are certain – in ex post facto assessments – if not, methods appropriate for uncertain expectations should be applied. The choice of underlying assumptions, particularly the process chain, biomass yield and biomass price, should be made carefully, and clearly stated, as they directly influence both the costs and the benefits. We found evidence that yield level increased by a median of 12.5% from the first to subsequent rotations, and therefore, the development of yield level should be taken into account, by applying regional yield functions over the lifetime of the plantation. Increasing wood chip prices over time and prices for wood chips that are 2.6 times higher than those for non-chipped biomass ought to be considered. We pointed out tree species-specific assumptions, where they occurred. The median planting density of willow of 14,300 plants per hectare was 4.5 times higher than the median planting density of black locust and 3.2 times higher than the planting density of poplar. This can directly affect the establishment costs and therefore must be considered. We also gave suggestions for an appropriate choice of the units used for costs and prices. Additionally, a range of underlying process chains and assumptions was discovered. Even though, it was not possible to identify one single appropriate value per assumption due to different natural conditions and objectives of SRC management, we provided an essential basis for further calculations and underlined the importance of the critical choice of underlying assumptions. Suggestions for ease of traceability and comparability of calculations were also given.

Acknowledgments

This research was supported by the Bavarian State Ministry of Sciences, Research and the Arts. We wish to thank Dr. Ulrike K. Müller and Dr. Sylvestre Njakou Djomo for their helpful comments on the manuscript and Laura Carlson for language editing.

References

- [1] International Energy Agency. World energy outlook 2011, IEA, International Energy Agency; OECD, Paris, 2011.
- [2] REN21 (Ed.), Renewables 2013: Global status report, Paris, 2013.
- [3] Rahman F, Rehman S, Abdul-Majeed MA. Overview of energy storage systems for storing electricity from renewable energy sources in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012; 16:274–83.
- [4] Lambin EF, Turner BL, Geist HJ, Agbola SB, Angelsen A, Bruce JW, et al. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 2001; 11:261–9.
- [5] Fiala M, Bacenetti J. Economic, energetic and environmental impact in short rotation coppice harvesting operations. *Biomass & Bioenergy* 2012; 42:107–13.
- [6] Gasol CM, Martínez S, Rigola M, Rieradevall J, Anton A, Carrasco J, et al. Feasibility assessment of poplar bioenergy systems in the Southern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009; 13:801–12.
- [7] FAO, Faostat, (<http://faostat.fao.org/site/626/default.aspx#ancor>); 2012, [accessed 1.8.13].
- [8] FAO, State of the world's forests, 2012, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2012.

- [9] Styles D, Thorne F, Jones MB. Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and Miscanthus production with conventional farming systems. *Biomass & Bioenergy* 2008;32:407–21.
- [10] Evans A, Strezov V, Evans TJ. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:1419–27.
- [11] Ceulemans R, Deraedt W. Production physiology and growth potential of poplars under short-rotation forestry culture. *Forest Ecology and Management* 1999;121:9–23.
- [12] Jørgensen U, Dalgaard T, Kristensen ES. Biomass energy in organic farming—the potential role of short rotation coppice. In: Proceedings of the joint IEA bioenergy task 30 and task 31 workshop sustainable bioenergy production systems: environmental, operational and social implications, *Biomass & Bioenergy* 2005; 28: 237–48.
- [13] Buchholz T, Volk T. Improving the profitability of willow crops—identifying opportunities with a crop budget model. *BioEnergy Research* 2011;4:85–95.
- [14] Abbasi T, Abbasi SA. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:919–37.
- [15] Rowe RL, Street NR, Taylor G. Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13:271–90.
- [16] Don A, Osborne B, Hastings A, Skiba U, Carter MS, Drewer J, et al. Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon, 2012. [accessed 26.6.12].
- [17] Hildebrandt P, Knoke T. Investment decisions under uncertainty—A methodological review on forest science studies. *Forest Policy and Economics* 2011;13:1–15.
- [18] Castro, L, Calvas B, Hildebrandt, P, Knoke, T. Avoiding the loss of shade coffee plantations: how to derive observation payments for risk-averse land-users. *Agroforestry Systems* <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.07.004>, in press.
- [19] Knoke T, Calvas B, Moreno SO, Onyekwelu JC, GriessVC. Food production and climate protection—What abandoned lands can do to preserve natural forests. *Global Environmental Change*.
- [20] El Kasmioui O, Ceulemans R. Financial analysis of the cultivation of poplar and willow for bioenergy. *Biomass & Bioenergy* 2012;43:52–64.
- [21] Gandorfer M, Eckstein K, Hoffmann H. Modeling Economic Performance of an Agroforestry System under Yield and Price Risk, 15th international consortium on applied bioeconomy research (ICABR) annual conference, 2011.
- [22] Kröber M, Heinrich J, Wagner P, Schweinle J. Ökonomische Bewertung und Einordnung von Kurzumtriebsplantagen in die gesamtbetriebliche Anbaustruktur. In: Bemannann A, Knust C, Bemannann A, editors. *Agrowood: Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. 1st ed. Berlin: Weißensee Verlag; 2010. p. 217–29.
- [23] Toivonen RM, Tahvanainen LJ. Profitability of willow cultivation for energy production in Finland. *Biomass & Bioenergy* 1998;15:27–37.
- [24] Ericsson K, Rosenqvist H, Ganko E, Pisarek M, Nilsson L. An agro-economic analysis of willow cultivation in Poland. *Biomass & Bioenergy* 2006;30:16–27.
- [25] Mitchell CP, Stevens EA, Watters MP. Short-rotation forestry—operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest Ecology and Management* 1999;121:123–36.
- [26] Rosenqvist H, Dawson M. Economics of willow growing in Northern Ireland. *Biomass & Bioenergy* 2005;28:7–14.
- [27] Gasol CM, Brun F, Mosso A, Rieradevall J, Gabarrell X. Economic assessment and comparison of acacia energy crop with annual traditional crops in Southern Europe. *Energy Policy* 2010;38:592–7.
- [28] Manzone M, Airolidi G, Balsari P. Energetic and economic evaluation of a poplar cultivation for the biomass production in Italy. *Biomass & Bioenergy* 2009;33:1258–64.
- [29] Londo M, Roose M, Dekker J, de Graaf H. Willow short-rotation coppice in multiple land-use systems: evaluation of four combination options in the Dutch context. *Biomass & Bioenergy* 2004;27:205–21.
- [30] Sherrington C, Moran D. Modelling farmer uptake of perennial energy crops in the UK: Large-scale wind power in electricity markets with Regular Papers. *Energy Policy* 2010;38:3567–78.
- [31] Lothner DC, Hoganson HM, Rubin PA. Examining short rotation hybrid poplar investments by using stochastic simulation. *Canadian Journal of Forest Research* 1986;16:1207–13.
- [32] Lothner DC. Short-rotation energy plantations in north central united states: an economic analysis: energy sources. *Energy Sources* 1991;13:111–7.
- [33] Strauss CH, Grado SC, Blankenhorn PR, Bowersox TW. Economic evaluations of multiple rotation sycamore plantations. *Solar Energy* 1988;41:207–14.
- [34] Christersson L. Poplar plantations for paper and energy in the south of Sweden. *Biomass & Bioenergy* 2008;32:997–1000.
- [35] Bergez J-E, Bouvarel L, Auclair D. Short rotation forestry: An agricultural case study of economic feasibility. *Bioresource Technology* 1991;35:41–7.
- [36] Avohou TH, Houehounha R, Glele-Kakai R, Assogbadjo AE, Sinsin B. Firewood yield and profitability of a traditional *Daniellia oliveri* short-rotation coppice on fallow lands in Benin. *Biomass & Bioenergy* 2011;35:562–71.
- [37] Londo M, Vleeshouwers L, Dekker J, de Graaf H. Energy farming in Dutch desiccation abatement areas: yields and benefits compared to grass cultivation. *Biomass & Bioenergy* 2001;20:337–50.
- [38] Ericsson K, Rosenqvist H, Nilsson LJ. Energy crop production costs in the EU. *Biomass & Bioenergy* 2009;33:1577–86.
- [39] Grünwald H, Böhm C, Quinkenstein A, Grundmann P, Eberts J, von Wühlisch G. *Robinia pseudoacacia* L.: a lesser known tree species for biomass production. *BioEnergy Research* 2009;2:123–33.
- [40] Vandenhove H, Goor F, O'Brien S, Grebenkov A, Timofeyev S. Economic viability of short rotation coppice for energy production for reuse of caesium-contaminated land in Belarus. *Biomass & Bioenergy* 2002;22:421–31.
- [41] Johansson H, Rosenqvist H. Economics of short rotation forestry. In: Ledin S, Aliksson A, editors. *Handbook on how to grow short rotation forests*. 2nd ed. Uppsala, Sweden: Sveriges Lantbruksuniversitet; 1992.
- [42] Strauss CH, Wright LL. Woody biomass production costs in the United States: An economic summary of commercial *Populus* plantation systems. *Solar Energy* 1990;45:105–10.
- [43] Goerndt ME, Mize C. Short-rotation woody biomass as a crop on marginal lands in Iowa. *Northern Journal of Applied Forestry* 2008;25:82–6.
- [44] Linville WR. Better, Short-rotation forest plantations—Economic feasibility in eastern Colorado. *Journal of Sustainable Agriculture* 1997;9:49–66.
- [45] Langholtz M, Carter DR, Rockwood DL, Alavalapati JRR. The economic feasibility of reclaiming phosphate mined lands with short-rotation woody crops in Florida. *Journal of Forest Economics* 2007;12:237–49.
- [46] Musshoff O, Jerchel K. The conversion of farm land to short rotation coppice—an application of the real options approach. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 2010;181:175–87.
- [47] Heaton RJ, Randerson PF, Slater FM. The economics of growing short rotation coppice in the uplands of mid-Wales and an economic comparison with sheep production. *Biomass & Bioenergy* 1999;17:59–71.
- [48] Krasuska E, Rosenqvist H. Economics of energy crops in Poland today and in the future. *Biomass & Bioenergy* 2012;38:23–33.
- [49] Sells JE, Audsley E. The profitability of an arable wood crop for electricity. *Journal of Agricultural Engineering Research* 1991;48:273–85.
- [50] Perlick RD, Walsh ME, Wright LL, Ostlie LD. The economic potential of whole-tree feedstock production. *Bioresource Technology* 1996;55:223–9.
- [51] Pallast G, Breuer T, Holm-Müller K. Short rotation coppice—opportunities for more income in rural areas? *Berichte über Landwirtschaft* 2006;84:144–59.
- [52] Moran LA, Nautiyal JC. Present and future feasibility of short-rotation energy farms in Ontario. *Forest Ecology and Management* 1985;10:323–38.
- [53] Kuemmel B, Langer V, Magid J, de Neergaard A, Porter JR. Energetic, economic and ecological balances of a combined food and energy system. *Biomass & Bioenergy* 1998;15:407–16.
- [54] Faúndez P. Potential costs of four short-rotation silvicultural regimes used for the production of energy. In: Proceedings of the IEA bioenergy task 31 workshop “Principles and practice of forestry and bioenergy in densely-populated regions”. *Biomass & Bioenergy* 2003;24:373–80.
- [55] Gallagher T, Shaffer B, Rummer B. An economic analysis of hardwood fiber production on dryland irrigated sites in the US Southeast. In: Proceedings of the 5th biennial meeting of the short rotation woody crops operations working group in conjunction with international energy agency bioenergy, task 30, Short rotation crops for bioenergy systems and international union of forest research organization, Working Unit 1.09.01, Integrated Research in Temperate Short-Rotation Energy Plantations, *Biomass & Bioenergy* 2006;30:794–802.
- [56] Kruschwitz L. *Investitionsrechnung*. 12th ed. München: Oldenbourg; 2009.
- [57] Rosenqvist H. (editor). Calculation method and economy in Salix production, Biomass for energy and environment. In: Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference, 1996.
- [58] Rosenqvist H. *Salixodling – Kalkylmetoder och lönsamhet* [Willow cultivation – Methods of calculation and profitability]. För Skog-Industri-Marknad Studier. Doctoral dissertation, Uppsala, 1997.
- [59] Dayanada D. *Capital budgeting: Financial appraisal of investment projects*. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2002.
- [60] Bergen V, Loewenstein W, Olschewski R. *Forstökonomie: Volkswirtschaftliche Grundlagen*. München: Vahlen; 2002.
- [61] Burger FJ. *Bewirtschaftung und Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen*. (Doctoral dissertation).
- [62] Große W, Boecker L, Landgraf D, Scholz V. Rückwandlung von Plantagenflächen in Ackerland. In: Bemannann A, Knust C, editors. *Agrowood: Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. 1st ed. Berlin: Weißensee Verlag; 2010. p. 130–8.
- [63] Wuehlisch G. Fertilizer requirements of poplar and willow. In: Benwood project consortium (editor). *Short rotation forestry and Agroforestry: an exchange of experience between CDM countries and Europe*, 2011. p. 39–45.
- [64] Reeg T, editor. *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Weinheim: Wiley-VCH; 2009.
- [65] Biloiseau-Gauthier S, Pare D, Messier C, Belanger N. Juvenile growth of hybrid poplars on acidic boreal soil determined by environmental effects of soil preparation, vegetation control, and fertilization. *Forest Ecology and Management* 2011;261:620–9.
- [66] Sage RB. Weed competition in willow coppice crops: the cause and extent of yield losses. *Weed Research* 1999;39:399–411.
- [67] Ledin S. Willow wood properties, production and economy: modeling short rotation forestry growth. *Biomass & Bioenergy* 1996;11:75–83.
- [68] CREFF Project Consortium, CREFF Final Report: Cost reduction and efficiency improvement of Short Rotation Coppice, 2011.
- [69] Brammer JG, Bridgewater AV. Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1999;3:243–89.

- [70] FNR, Leitfaden Bioenergie: Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen, 4th ed., Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow, 2007.
- [71] Brummack J. Aufbereitung von hackschnitzeln für eine energetische Nutzung. In: Bemann A, Knust C, editors. *Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. 1st ed. Berlin: Weißensee Verlag; 2010. p. 117–29.
- [72] de Wit M, Junginger M, Faaij A. Learning in dedicated wood production systems: Past trends, future outlook and implications for bioenergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013;19:417–32.
- [73] Musshoff O, Jerchel K. Die Umstellung landwirtschaftlich genutzter Flächen auf Kurzumtriebsplantagen—Eine Anwendung des Realloptionsansatzes. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 2010;181:175–88.
- [74] Seiffert M. Biomassepotenziale und -märkte aus Sicht grenzüberschreitender Betrachtungen—Rahmenbedingungen der Bereitstellung und Nutzung von Bioenergie, Zittau, 2010.
- [75] Röhle H, Hartmann K-U, Steinke C, Murach D. Leistungsvermögen und Leistungserfassung von Kurzumtriebsbeständen. In: Reeg T, editor. *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Weinheim: Wiley-VCH; 2009. p. 41–55.
- [76] Sevigne E, Gasol CM, Brun F, Rovira L, Pagés JM, Camps F, et al. Water and energy consumption of *Populus* spp. bioenergy systems: A case study in Southern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15:1133–40.
- [77] Johansson T, Hjelm B. The Sprouting Capacity of 8–21-Year-Old Poplars and Some Practical Implications. *Forests* 2012;3:528–45.
- [78] Schirmer R. Pappel-Energiewälder: Nur geprüfte Sorten garantieren einen wirtschaftlichen Erfolg: Der Anbau nicht empfohlener Sorten beinhaltet ein hohes wirtschaftliches Risiko. *LWF aktuell* 2012;19:24–6.
- [79] Möhring B, Rüping U. A concept for the calculation of financial losses when changing the forest management strategy. *Forest Policy and Economics* 2008;10:98–107.
- [80] Moog M, Borchert H. Increasing rotation periods during a time of decreasing profitability of forestry—a paradox?: Faustmann formula: applications and extensions *Forest Policy and Economics* 2001;2:101–16.

8.5 Veröffentlichung II

Hauk, S.; Wittkopf, S.; Knoke, T. (2014): Analysis of commercial short rotation coppices in Bavaria, southern Germany. *Biomass and Bioenergy*. 67. S. 401–412⁹

⁹ Beitrag von Sebastian Hauk (90 %): Datenakquise, Datenbearbeitung, statistische Analysen und Interpretation der Ergebnisse sowie Erstellen des Manuskripts. Beitrag von Thomas Knoke und Stefan Wittkopf: konstruktive Kritik an der Datenauswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie Korrektur des Manuskripts.

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

<http://www.elsevier.com/locate/biombioe>

Analysis of commercial short rotation coppices in Bavaria, southern Germany



Sebastian Hauk ^{a,*}, Stefan Wittkopf ^a, Thomas Knoke ^b

^a Faculty of Forestry, University of Applied Sciences Weihenstephan-Triesdorf, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 3, 85354 Freising Weihenstephan, Germany

^b Institute of Forest Management, Center of Life and Food Sciences Weihenstephan, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising Weihenstephan, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 January 2014

Received in revised form

11 April 2014

Accepted 30 May 2014

Available online

Keywords:

Bioenergy crops

Woody biomass

Farm management

Land use

Survey

Poplar

ABSTRACT

The total area of short rotation coppice (SRC) in Germany has increased to about 6000 ha in the last decade, without the benefit of subsidies. About 15% of Germany's total SRC area is in Bavaria. Up to now, the main focus of studies of SRC has been on experimental sites. Hence, as yet there have been no studies analyzing the sites used to cultivate SRC commercially, the management practices used, or the characteristics of the farmers who cultivate SRC. To fill this knowledge gap, we used a standardized questionnaire to gather information about SRC operators in Bavaria and their SRCs. SRC farmers differed from farmers who did not grow SRC: They had larger farms, often farmed organically, and the proportion of land they leased from other owners was lower. Furthermore, the relative forest area of SRC farmers was greater, whereas the relative area of permanent grassland was lower. The sites used for SRC cultivation showed below-average land rents, but generally were well supplied with water. The tree species cultivated in 98% of the cases was poplar. Biomass was predominantly harvested motor-manually after five to ten years for use in private wood chip heating systems. The use of marginal lands with sufficient water supply for biomass production with SRC in relatively long rotation cycles seems to be a favorable method of biomass production in southern Germany. This management practice on marginal land might be interesting for other countries because the competition with food production is low. However, economic analyses are needed.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The German government aims to increase sustainability by increasing the proportion of renewables in the energy mix [1]. In 2012, renewable energy sources provided 12.6% of Germany's final energy consumption, with woody biomass as the second largest contributor [2]. Woody biomass is a popular renewable energy source because the technology used to

generate heat and power from biomass is fully developed, the fuel is easy to store, biomass is capable of providing base load power, and, so far, biomass material is available in sufficient quantities to satisfy demand at relatively low prices [3]. Hence, the amount of energy obtained from wood has been increasing in many other European countries as well. This increase in demand has led to an increase in the amount of timber harvested over the last decade [4]. Although Germany is the European country with the largest timber stock [5], a

* Corresponding author. Tel.: +49 9421 187235; fax: +49 9421 187211.

E-mail addresses: s.hauk@wz-straubing.de (S. Hauk), stefan.wittkopf@hswt.de (S. Wittkopf), knoke@forst.wzw.tum.de (T. Knoke).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.027>

0961-9534/© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

shortage of biomass has been forecast for Germany by either the year 2015 or 2025, depending on the mobilization scenario used [4].

SRC¹ is one option for increasing the supply of woody biomass. The biomass increment of SRC is high in comparison to that of longer rotation European forests. For example, the average annual increment of forests in Bavaria is 13.5 m³ [6], whereas the average annual increment of SRC in Bavaria is 23.5² m³ [7]. Furthermore, biomass production from SRC is energy efficient, with an average energy ratio from cradle-to-farm gate of 30.7 [8], and SRC has fewer negative and more positive environmental impacts than most of conventional agricultural crops. For example the NO₃ leaching associated with SRC is lower [9] and the C organic concentration in the soil is higher [10] than that found when cereal crops are cultivated.

Hence, expansion of SRC area is on the agenda of many political decision makers. However, up to now, the total SRC area in Europe has been relatively small – 39,200 ha was reported by Ref. [11]. There are various reasons for the relatively small SRC area in Europe. The main reasons, as summarized by Refs. [12], are uncertain profitability, long term capital commitment, high up-front costs [13], and loss of flexibility, because land use is fixed for some years under SRC. In Germany, about 6000 ha of SRC has already been cultivated, despite the absence of any special incentives promoting SRC cultivation [14]. In accordance with the Common Agricultural Policy of the European Union, a farmer is entitled to the same payment per hectare for SRC as is paid for land where conventional crops are grown, which is currently about 300 Euro in Germany [15]. In Bavaria (southern Germany), 920 ha of SRC had been established by 2013, whereas only 1.85 ha were being cultivated in 2005 (Fig. 1).

This increase in Bavaria is particularly interesting, as the site conditions, and therefore, the potential yields of agricultural crops in Bavaria (e.g. average corn yield of 11.2 tons per hectare and year [16]) are above the German average (average corn yield of 9.9 tons per hectare and year [17]). This translates to higher opportunity costs for cultivating SRC in Bavaria than in other areas of Germany. The average land rent in Germany in 2010 was 230 Euro, whereas in Bavaria it was 290 Euro [18,12] found the opportunity costs (in this study represented by the land rent) of foregoing potential alternative agricultural uses to be the highest cost unit for SRC cultivation. Therefore, one would assume that, given the relatively high value of agricultural land in Bavaria, associated high opportunity costs would hamper the extension of total SRC area, unless they were outweighed by specific gains. The additional opportunity costs could, for example, be compensated for by increased biomass yields, by increased prices for biomass or by reductions in management costs. The latter cost unit can be influenced through the use of optimized harvesting. Under German conditions [19], advised the use of fully mechanized harvesting with a modified forage harvester for short rotation cycles of about four years and [20] advised motor-manual

harvesting for rotation cycles of ten years or longer, due to the resulting low costs per unit of biomass produced. The extension of the SRC area in Bavaria suggests that – in some cases – the high opportunity costs are already outweighed at commercial SRC stands (i.e. stands established for profit rather than as field trials) by advantageous conditions, possibly because optimized management is already being practiced. But there is currently no information available about such commercial stands, about the sites being used for commercial SRC cultivation, or about the typical management practices used in the commercial production of SRC in southern Germany.

Sweden has the largest SRC area in Europe [11] – about 16,000 ha [21] – and its commercial SRC sites and their operators have been well studied in comparison to their German counterparts (see for example [22–24]). In addition to investigations of biomass production and management techniques, information about the socio-economic aspects of growing SRC has been gathered for Sweden. Therefore our findings will be compared with those from Swedish studies. There, the total amount of SRC area has not increased since subsidies and tax incentives for SRC cultivation were phased out [24]. In addition to the abolition of governmental incentives, lower yields from commercial SRC stands than anticipated and derived from field trial sites [25] led to lower profits than expected. The situation in Sweden was analyzed in studies such as those by Refs. [22,24–26], in order to find areas for potential improvement by SRC operators and to recommend actions to political decision makers. To identify specific traits of SRC farmers [22], compared structural characteristics (e.g. farm size, land use patterns, livestock) of SRC farmers and farmers who were not growing SRC; data were obtained from the Swedish Farm Register. They found that SRC farmers differed from non-SRC farmers in certain structural characteristics [24,25] analyzed the sites and yields of commercial SRC plantations in Sweden and found that SRCs were frequently cultivated on sites with below-average production properties.

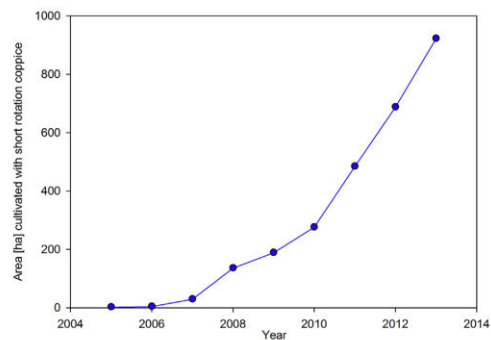


Fig. 1 – Development of the total area of short rotation coppice (SRC) in Bavaria (Southern Germany) over time, data obtained from Ref. [14]. Although the total area of SRC is low compared to the amount of arable land in Bavaria, the land area in SRC has shown uninterrupted growth - from 1.8 ha in 2005 to 920 ha in 2013.

¹ Short rotation coppice.

² To convert the average annual increment of SRC in Bavaria from oven-dry tons to cubic meters, we applied an oven-dry density of 400 kg/m³.

The management practices used in SRC can vary widely. Typical SRC cultivation and management in Sweden was described by Refs. [27,28] and summarized by Ref. [24]: SRC in Sweden is typically cultivated with willow (*Salix* spp.), with approximately 13,000 cuttings per hectare planted in double rows. Planting, harvesting and chipping is fully mechanized, and the rotation length is currently about three years. In comparison, SRC in Italy is typically cultivated with poplar (*Populus* spp.) in rotation cycles of either 2 or 5 to 10 years, and with lower planting densities of about 1000–6000 plants per hectare [29]. Both, material uses, such as pulp, paper, and plywood, and energetic uses for biomass from SRC are common in Italy.

Studies comparable to those by Refs. [22,24,25] that have identified and analyzed SRC cultivation and management practices in Germany do not exist to our knowledge. To identify the circumstances under which SRC is cultivated in Bavaria (southern Germany), we addressed the following research questions:

- (I) Do SRC farmers differ from non-SRC farmers with regard to the following characteristics: amount of arable land they farm, likelihood of farming organically, age, proportion of the total land farmed which is leased from other owners, proportion of total land under various land uses, and numbers of livestock raised. If differences do exist, are they similar to those reported for Scandinavia?
- (II) What are the physical, geographical and economic characteristics of the sites farmers use to grow SRC?
- (III) What are the common management practices used in commercial stands? What tree species are grown? What is the typical rotation length and associated harvesting technique, and what is the intended use of the biomass produced?

To answer these research questions, we compared the characteristics of SRC farmers and the structural characteristics of SRC farms – based on data gathered using standardized questionnaires mailed to SRC farmers – and those of farms without SRC – from data obtained from the Federal Statistical Office. The results obtained based on these data

sets are presented in Section 3.1. As a second step, we analyzed the sites where SRC was cultivated, and the management practices used, based on the answers obtained from our survey of SRC farmers. The results obtained for SRC farmers only are presented in Sections 3.2 And 3.3. We conclude with recommendations for how this information can be used to help policy makers create legislation that supports a further expansion of SRC cultivation and suggestions for further research questions that arose from the findings of our study.

2. Material and methods

2.1. Data collection

To analyze structural farm characteristics, data from the Federal Statistical Office was obtained for farmers whose farms are located in Bavaria and who have not yet cultivated SRC [17]. The agricultural statistics gathered by the Federal Statistical Office are listed in the “Census of Agriculture 2010” which contains information on every farm in Germany. As this survey is conducted only once every ten years, we chose the latest survey from 2010 for a comparison with the data we collected from SRC farmers using our mailed survey form. As SRC is still relatively new in Germany, complete and current data for SRC growers is lacking in the official agricultural census. Because of this lack of information – less than half of the SRC farmers mentioned in Ref. [14] are listed there and the census also does not provide data on the sites used for SRC cultivation or the management practices of SRC – we excluded the data from the small number of SRC farms listed to create a data set with no-SRC farmers. To gather complete data according to our objectives from SRC growers, we used a standardized questionnaire where we asked for a) farm characteristics similar to those gathered by the “Census of Agriculture 2010” statistics, b) information about the site conditions where SRC is cultivated, and c) information about the management practices used in commercial SRC cultivation (Table 1). To facilitate a comparison of farm characteristics between all farmers in Bavaria and those who have chosen to cultivate SRC, our definitions and questions were

Table 1 – Excerpt of data gathered from short rotation coppice (SRC) operators by standardized questionnaire. The information on site conditions and management refers to the SRC, except where otherwise specified.

Farm characteristics	Site conditions of commercial SRC	Management of commercial SRC
Geographical information	Temperature [°C]	Number and area [ha] of SRC plantations
Legal form	Precipitation [mm]	per manager
Size of workforce	Soil type and soil moisture level	Tree species
Total area of arable land [ha]	Previous use of the site and yield	Plants per hectare [number ha ⁻²]
Area under cultivation of each	of the previous use	(Intended) rotation length [years]
cash crop [ha]		
Area of permanent crop [ha]	Distances from farm to fields [km]	Establishment
Area of permanent grassland [ha]	Distances from farm to SRC [km]	Maintenance
Forest area [ha]	Land rent of arable land per farm [€ ha ⁻¹]	Harvesting and chipping
Head of livestock	Land rent [€ ha ⁻¹]	Drying and storage practices
Organic or conventional farming	Winter wheat yields per farm [dt ha ⁻¹]	Utilization
	Previous winter wheat yield [dt ha ⁻¹]	Ownership of a personal wood chip heating system and heat demand

similar to those used in the Census of Agriculture 2010. We also structured our questions in such a way as to facilitate a comparison of management practices and site conditions with studies from Sweden. To compare the site qualities used for SRC cultivation, we gathered both information on current land rent and previous winter wheat yields on the SRC sites, and on every single farm. To characterize the sites according to their water availability, we determined the soil moisture level. This figure is commonly used in Germany to classify the water availability of forest sites or other sites where trees are to be grown. It is based on the water storage capacity of the rooting layer, and additionally takes topography and precipitation into account [30].

The standardized questionnaires were sent by mail to all 372 farm managers in Bavaria who had established SRC prior to the winter of 2011/2012. All addresses of SRC managers were collected with help from both the regional offices for agriculture and forestry and from tree nurseries. The number of addresses gathered was compared with the population size of SRC managers in Bavaria mentioned in Ref. [14]. The response rate for our mailed survey was 45% with 167 respondents. The first mailing yielded 161 responses, and six more were obtained from a second mailing.

2.2. Data evaluation

The data from the standardized questionnaires were digitized and analyzed using R Project 2.15.2. For the comparison of farm characteristics between farmers with SRC and those without SRC, we distinguished between full-time and part-time farmers according to the classification in the Census of Agriculture 2010. The resulting four groups were thus, full-time farmers with SRC, full-time farmers without SRC, part-time farmers with SRC and part-time farmers without SRC. The data for non-SRC farmers is the entire population of farmers without SRC in Bavaria – 93,300 data points. Based on the response rate for our questionnaire and the estimate of the number of SRC farmers in Bavaria obtained from Refs. [14], the data for SRC farmers represented 45% of the SRC farmers' population in Bavaria in the winter of 2011/12.

Given the nature of the data, two special considerations were necessary when evaluating the datasets. First, due to privacy protection requirements, no individual values from the population of farmers can be presented here, but rather only descriptive values for the entire population, such as means, medians, variances and quantiles. Second, from the "Census of Agriculture 2010" we had data about the total population of farmers without SRC. Therefore no estimations about the population based on a sample were required. On the other hand, we had an unbalanced sample size for statistical comparisons between full-time farmers without ($n = 47,852$) and full-time farmers with SRC ($n = 50$), as well as for part-time farmers without ($n = 45,485$) and part-time farmers with SRC ($n = 68$) which would have influenced statistical tests such as Analysis of Variance. Therefore, one-sided Mann–Whitney–Wilcoxon Tests were chosen (because the farm characteristics were not normally distributed) to test the individual farm characteristics of SRC farmers – both full-time and part-time – against the median value for these characteristics found for non-SRC farmers. To test for a normal

distribution, we applied a Shapiro–Wilk Test. For all statistical tests applied, p -values lower than or equal to 0.05 were considered significant. To determine whether the geographic distribution of the respondents of our survey accurately represented that of the basic population of SRC managers, we applied a Kolmogorow–Smirnow Test to compare the proportions of SRC and non-SRC farmers per administrative district. We also applied a Kolmogorow–Smirnow Test to compare the rotation lengths for SRC grown in Bavaria to that grown in Sweden. Data on site conditions and SRC management were evaluated based on the answers obtained from the 167 SRC operators surveyed. The site characteristics, winter wheat yield and land rent, for the SRC and the non-SRC sites managed by farmers with SRC were compared using a two-sided T-Test. The site characteristics, distance from farm to field and distance from farm to SRC, were evaluated using a two-sided Mann–Whitney–Wilcoxon, as these data were not normally distributed.

3. Results

There were 372 SRC managers managing 484 ha of SRC registered in Bavaria as of winter 2011/2012 [14]. Most of these farmers were just registered as SRC managers but further information about farm characteristics, character of the sites used, and management practices is lacking. Therefore, we gathered information from 167 SRC growers managing 260 ha of SRC. With regard to the geographic distribution of SRC and SRC growers, our respondents and the basic population of SRC growers did not differ significantly (two-sided Kolmogorow–Smirnow Test $p = 0.54$), and thus, the results obtained can be seen as representative in terms of the geographic distribution of SRC growers in Bavaria (Table 2).

3.1. Characteristics of SRC farmers in Bavaria

Of those who responded to our questionnaire, 50 were full-time farmers and 68 were part-time farmers. Less than one third (49) of the SRC growers in our sample were not farmers.

Table 2 – Geographical distribution of managers of poplar plantations in Bavaria. The proportions of the respondents do not significantly differ from registered short rotation coppice (SRC) managers published by Ref. [14]. Thus, geographic characteristics of SRC managers can be seen as represented adequately by the respondents.

Administrative district	Proportion of SRC managers registered [%]	Proportion of respondents [%]
Mittelfranken	6.8	9.6
Niederbayern	32.7	22.3
Oberbayern	32.2	31.9
Oberfranken	8.2	6.0
Oberpfalz	6.8	6.6
Schwaben	9.3	13.3
Unterfranken	4.1	10.2

When comparing the SRC farmers and the non-SRC farmers, the following facts became apparent: a) The arithmetic mean farm size of SRC farmers was greater than that of non-SRC farmers, which was statistically significant for full-time farmers with a $p \leq 0.05$ (Table 3) b) SRC farmers were more likely to be organic farmers. c) Of the land cultivated by SRC farmers, a smaller proportion was leased from other owners ($p \leq 0.05$). d) SRC farmers did not differ in age from farmers who were not growing SRC.

A more detailed analysis of land-use patterns showed that farmers that grew SRC and farmers that did not differ with regard to the proportions of their land which was dedicated to various land-use as well (Fig. 2). Mann–Whitney–Wilcoxon tests were used to assess whether the proportions of land dedicated to various land uses for both full-time and part-time SRC farmers were different than the median values for the proportions of the equivalent land uses of full-time and part-time non-SRC farmers. These tests indicated statistically significant differences at $p \leq 0.05$ for every land-use evaluated. Hence, SRC farmers had a larger share of forest area, than non-SRC farmers. Full-time farmers growing SRC had more forest area ($\Delta 14\%$), relatively more cropland ($\Delta 4\%$), but relatively less permanent grassland ($\Delta 18\%$) than non-SRC farmers. Part-time SRC farmers cultivated much more forest area ($\Delta 48\%$) but had less area planted with cash crops ($\Delta 28\%$) and less permanent grassland ($\Delta 21\%$) than part-time farmers who were not growing SRC. In conclusion, SRC farmers had larger farm sizes with more total arable land and more forest area than non-SRC farmers, whereas their share of permanent grassland was lower.

In contrast, SRC farmers owned less livestock (Fig. 3). For instance, the number of cattle raised was significantly lower ($p \leq 0.05$) for both full-time ($\Delta 24$) and part-time SRC farmers ($\Delta 4$) compared to that of farmers without SRC. One exception was the number of pigs which were being bred by full-time SRC farmers, where no differences were found between them and full-time non-SRC farmers.

3.2. Sites used for SRC cultivation in Bavaria

To compare qualities of sites used for SRC cultivation with the ones used for other crops, we compared the land rents and winter wheat yields of SRC sites with the range of land rents and winter wheat yields on farm average. The sites used for SRC cultivation showed significantly lower land rents and lower winter wheat yields (both $p \leq 0.05$) than the average

land rents and winter wheat yields per SRC farm (Fig. 4). Even though the range of land rents was similar – from zero to 1000 € ha⁻¹ a⁻¹ for SRC sites, and from 40 to 1000 € ha⁻¹ a⁻¹, with a median of 390 € ha⁻¹ a⁻¹, for the average land rent per farm – their distribution was significantly different. In 97% of the cases, the land rent for the SRC site was equal or lower than the average price for land rent per farm. Only 3% of SRC was cultivated on land with a higher land rent than the average land rent per farm. The average land rent for SRC was 301 € ha⁻¹ a⁻¹, whereas the average land rent per farm was 424 € ha⁻¹ a⁻¹. The same was true for the winter wheat yield on SRC sites and the winter wheat yield on the average site per farm. Previous winter wheat yields on SRC sites where winter wheat was the previous crop ranged from 3.5 t ha⁻¹ a⁻¹ to 10 t ha⁻¹ a⁻¹, and were, on average, 6.48 t ha⁻¹ a⁻¹. The winter wheat yields per farm ranged from 4.3 t ha⁻¹ a⁻¹ to 10.5 t ha⁻¹ a⁻¹, with an average of 7.17 t ha⁻¹ a⁻¹. The winter wheat yields of SRC farms were lower or equal to the average yield per farm in 86% of the cases.

A more detailed analysis at the administrative district level showed similar trends (Table 4). The previous winter wheat yields on the SRC sites were significantly lower ($p \leq 0.05$) in five of the seven districts analyzed than the standard yields for winter wheat based on the five year average per administrative district. In Oberbayern and Unterfranken, the yields on SRC sites were not significantly different from the standard winter wheat yield. Hence, with the exception of Oberbayern and Unterfranken, SRC was established on sites which showed less than the average grain productivity. The land rents for sites used for SRC cultivation were significantly lower than the average in every administrative district with the exception of Schwaben, where the land rent of the SRC site was not significantly different to the average land rent in Schwaben.

No significant differences between the distances from farm to SRC and the distances from farm to field were found. The median distance from farm to SRC was 1 km and the median distance from farm to field was 0.9 km (Fig. 5). The minimum distance for both groups was less than 0.5 km, whereas the maximum distances varied widely: the maximum distance from farm to field was 15 km, but the maximum distance from farm to SRC was 60 km. Three of the SRC sites were from 15 to 60 km from the main farm.

Another important factor in the characterization of sites for SRC cultivation is soil moisture. After average annual temperature, soil moisture has been found to be the site

Table 3 – Overview of the average farm characteristics of full-time and part-time farmers who grow short rotation coppice (SRC) and those who do not. The characteristics of farms with SRC were compared to these without SRC, separately for full- and part-time farmers. Statistical significance at $p \leq 0.05$ is indicated with “*”. By trend, SRC farmers had bigger farms, were more likely to be organic farmers and had a smaller proportion of leased land than farmers who did not grow SRC.

Characteristics	Full-time farmers				Part-time farmers			
	No SRC (n = 47,852)		Growing SRC (n = 50)		No SRC (n = 45,485)		Growing SRC (n = 68)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Arable land [ha]	41.8	38.1	67.0*	42.4	17.8	14.2	20.5	24.1
Share of organic farmers [%]	5.7	–	17.9	–	5.8	–	16.3	–
Average age of farmers [years]	49	9.9	50	11.3	47	9.9	47	10.1
Leased land as proportion of arable land [%]	47.4	34.7	36.1*	28.9	42.9	39.7	23.6*	22.5

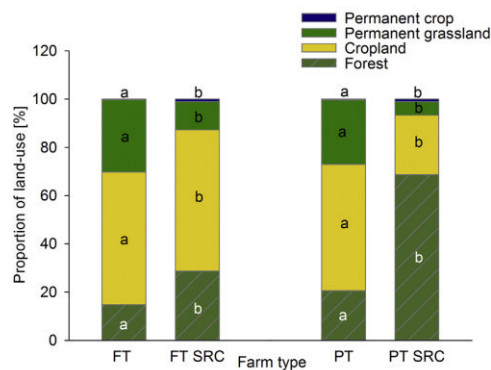


Fig. 2 – Land-use proportions of non-short rotation coppice (SRC) farmers divided into full-time (FT) and part-time (PT) farmers and SRC farmers (labeled with the addition of SRC). The sample size of FT SRC was 50, the one of PT SRC 68, with 47,852 FT and 45,485 PT of non-SRC farmers. Statistical significance at $p \leq 0.05$ is indicated with lower case letters in the bars. By trend, SRC farmers had a higher proportion of forest area but a lower proportion of permanent grassland. The proportion of cropland of full-time SRC farmers was higher than the one of full-time non-SRC farmers, whereas the proportion of cropland of part-time SRC farmers was much lower.

characteristic with the largest influence on the growth of SRC stands [13,31–33]. Most of the SRC in our sample – 78% – were cultivated on sites with sufficient water supply during the year – from moderately fresh to wet. Only 22% of the SRC stands

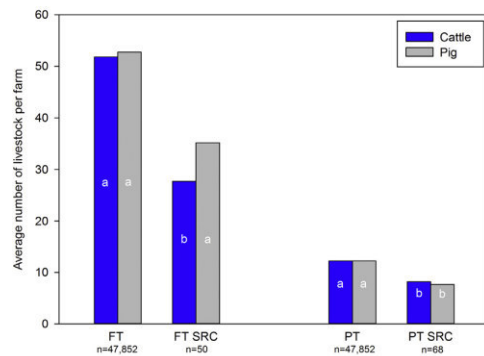


Fig. 3 – Number of livestock being raised by non-short rotation coppice (SRC) farmers divided into full-time (FT) and part-time (PT) farmers and by SRC farmers (labeled with the addition of SRC). The livestock being raised of farms with SRC was compared to those without SRC, separately for full- and part-time farmers. Statistical significance at $p \leq 0.05$ is indicated with lower case letters in the bars. The average number of cattle reported by SRC farmers was lower than for non-SRC farmers.

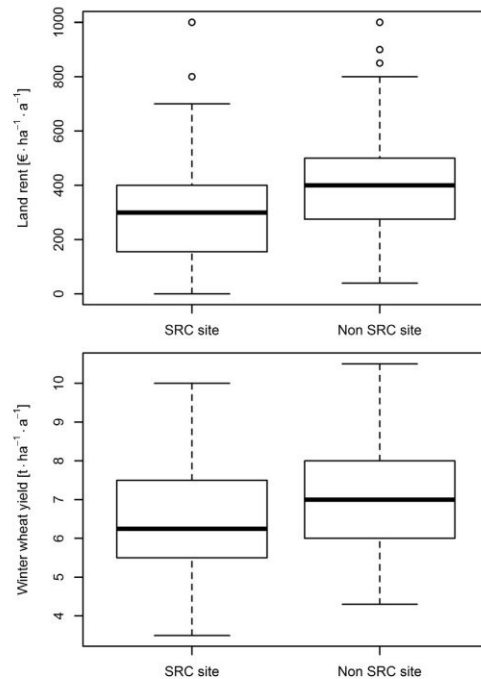


Fig. 4 – Average land rent [$\text{€} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] and winter wheat yields [$\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$] on the short rotation coppice (SRC) sites in comparison to the average land rent per farm and the average winter wheat yield per farm respectively. Both land rent and winter wheat yields were, on average, lower on SRC sites; land rent of the SRC site was equal or lower than the average land rent per farm in 97% of the cases surveyed.

were cultivated on sites where water is scarce. In comparison to the soil moisture level in most Bavarian forests –62% are classified between moderately fresh to wet [34]: Thus, a higher proportion of SRC sites is sufficiently water supplied.

3.3. Management practices used in cultivation of SRC in Bavaria

The average size of SRC plantations in the sample was 1.1 ha. As for species, 164 of the 167 SRCs in our survey were cultivated with poplar *Populus* spp.), whereas willow (*Salix* spp.), black locust (*Robinia pseudoacacia*) and Paulownia (*Paulownia* spp.) were each mentioned only once as the cultivated tree species. Sixty-nine percent of the operators surveyed planted their cuttings manually. The planting density used was between 500 and 25,000 plants per hectare, with an average of 6580 (SD = 3225) and a median of 5556 plants per hectare. Most farmers – 51% – intended to harvest SRC motor-manually, 26% intended to harvest their SRC using only machines and

Table 4 – Overview of former winter wheat yields and land rent of the sites used for short rotation coppice (SRC) cultivation in comparison to mean winter wheat yields [16] and mean land rents [18] per administrative district. The standard yield for winter wheat represents the average of the years 2008–2012.

Administrative district	Mean winter wheat yield of SRC sites [t]	Standard deviation of winter wheat yield of SRC sites [t]	Standard yield for winter wheat [t]	Mean land rent [€ ha ⁻¹] of SRC sites	Standard deviation of land rent [€ ha ⁻¹] of SRC sites	Mean land rent [€ ha ⁻¹]
Mittelfranken	5.1	1.3	6.5	230.6	177.6	245
Niederbayern	6.3	1.3	7.4	283.1	334.7	347
Oberbayern	7.1	1.7	7.1	204.3	235.2	272
Oberfranken	6.0	1.2	6.4	146.0	149.6	167
Oberpfalz	5.0	1.5	7.1	159.1	215.4	245
Schwaben	6.6	1.9	7.5	363.3	295.3	342
Unterfranken	6.3	1.5	6.4	117.6	166.7	256

23% of the operators did not yet know how they would harvest the trees. The intended rotation lengths are notable. Most respondents intended to harvest after five or more years, whereas only 15% intended to harvest in shorter rotations of up to four years (Fig. 6). Thus, the average rotation length in Bavaria based on our survey did not significantly differ from the rotation length in Sweden reported by Ref. [35].

After harvest, 75% of the respondents planned to let the stems dry down passively at the field site for one summer before being chipped and stored. Only 21% of respondents intended to either sell the biomass directly to a heating plant (2%) or to convert it immediately to wood chips after harvesting and store it with the resulting relatively high water content (19%). The remaining – only 4% – of respondents intended to produce biomass for material use. Sixty-six percent of the SRC operators were already running a WCH,³ and an additional 14% planned to build a WCH within the next two years. Therewith, only 20% of SRC operators did not intend to run a WCH and thus, to produce biomass directly for the market – at least to a greater degree than WCH operators.

4. Discussion

4.1. Characteristics of SRC farmers in Bavaria

In accord with the studies by Refs. [22,26] for Sweden, several differences in the structural agricultural characteristics between Bavarian farmers who grew SRC and farmers who did not grow SRC were confirmed by our analysis. We discovered that farmers with larger farms were more likely to cultivate SRC. This was true for both full-time and part-time farmers [22], who did not differentiate between full-time and part-time farmers, came to the same conclusion and saw the greater ability of farmers with larger farms to assess and diversify risks as the reason. Additionally, we found that the proportion of leased land was lower for both full-time and part-time SRC farmers than for non-SRC growers. This finding is in line with the results from Refs. [23], who found similar trends for Sweden. This makes sense, as farmers who need to lease land do so to cover their business purpose and therewith tend to have no land available for experiments with new crops with high levels of uncertainty. Moreover leasing land creates a

³ Wood chip heating.

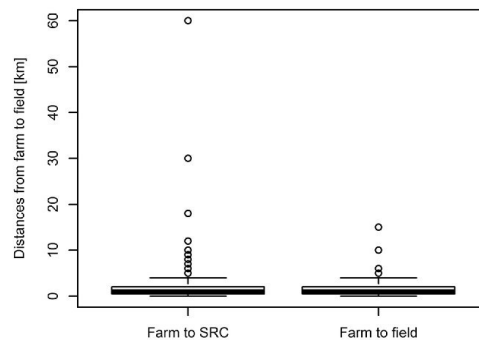


Fig. 5 – Distances [km] from farm to short rotation coppice (SRC) in comparison to distances from farm to field.

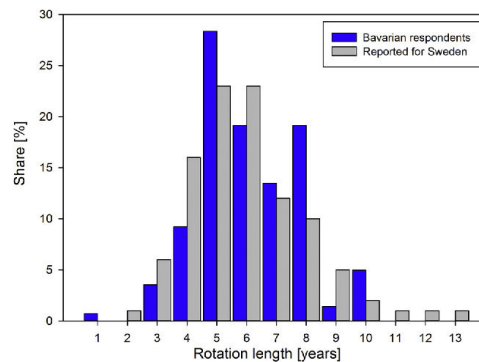


Fig. 6 – Rotation lengths for short rotation coppice (SRC) in Bavaria. As the SRCs have not been harvested yet, the intended rotation length is given. Eighty-five percent of respondents intended to harvest their SRC in rotation cycles of five to ten years, whereas only 15% planned to harvest in shorter rotation cycles up to four years. The distribution of rotation length does not significantly differ from the ones reported for Sweden in the first rotation [25].

duty to pay which farmers prefer to cover with a quantifiable gain from conventional crops [36]. On the other hand, farmers with enough of their own or a lower proportion of leased land seem to have more capacity to try cultivation of new crops. This is particularly important for perennial crops such as SRC, where land is occupied for two to three decades. Another aspect is that farmers are skeptical about the unproblematic reconversion of SRC plantations to fully agriculturally usable land [37], albeit indicated in scientific studies, which might lead to further obstacles of SRC cultivation on leased land. If drainage systems are endangered, the restraint of lessors may even be higher [38], who investigated reasons for and obstacles to SRC cultivation, emphasized land availability as the most important factor in adoption of SRC. This makes sense as availability of land represents all the aspects mentioned above. In reverse, a lack of land availability constrains the adoption of SRC. Large farm sizes accompanied by a low proportion of leased land translate to land availability, and therewith, farmers in this position seem more likely to cultivate SRC.

Another factor which we found to be significantly correlated with SRC cultivation was the amount of forest area cultivated by the farmer. This is also in line with results from Sweden [23] attributed this to a higher level of knowledge about growing long-rotation varieties. As the rotation length for SRC in Bavaria was found to be generally between five and ten years, forest rather than agricultural harvesting techniques were used [39] found that the availability of machinery for SRC harvesting was one of the top five factors influencing SRC adoption in Bavaria [23] showed that pasture area influenced SRC cultivation negatively, as farmers with livestock need land for both pasture and fodder production. Our data confirmed these findings, as the proportion of permanent grassland at SRC farms was significantly lower than that on non-SRC farms. This is in line with our findings regarding SRC farmers' livestock holdings: the number of cattle was lower on SRC farms. Reducing the number of livestock per farm also frees up permanent grassland for other uses, for example for SRC cultivation. Our data showed that thirty-five percent of the SRC sites surveyed were previously permanent grasslands which had been converted to SRC. Most of this area would otherwise have been converted to set-aside land, according to the statements of the farmers with regard to the alternative land uses they had considered. This land is particularly interesting for SRC cultivation, as the sites used for permanent grassland have soils with relatively high levels of available moisture, which is, again, one of the key factors for the growth of SRC [32]. Only a few of the farmers surveyed reported having considered converting permanent grasslands to conventional crops. Most of the farms where permanent grassland was converted to SRC are located in regions where the majority of farmers are focused on dairy cattle, however, a general decrease in dairy cattle breeding has been found to be occurring in these regions [40]. Therewith, SRC cultivation might offer a viable alternative for farmers in these areas as more of these sites become available. Additionally, providing biomass through SRC cultivation might be an opportunity for farmers to diversify their incomes. In contrast, farmers who still have a large number of dairy cattle and a large proportion of permanent grassland are not likely to cultivate SRC, based

on the results of our survey. No differences were found between full-time SRC and non-SRC farmers in the number of pigs they raised. This may be due to the fact that farmers focusing on pig breeding are accustomed to purchasing fodder, and therewith, pig breeding does not necessarily influence the amount of land available for SRC cultivation.

The share of organic farmers was higher in the group of SRC farmers than in the non-SRC farmers. SRC is an extensively managed energy crop with a wide energy output–input ratio [41] which fits well with the principles of organic farming. The positive effects of SRC, as summarized by Refs. [42], such as reduced nutrient leaching, reduction in the need for pesticides due to increased biodiversity, protection from erosion due to wind and water and recovery of the organic soil component provide an opportunity for organic farmers to produce bioenergy in accordance with their guiding principles.

Most of the structural characteristics of SRC farmers found in studies conducted in Sweden were also found in our sample from Bavaria. By focusing on the farmers who are most likely to cultivate SRC based on these characteristics, purposeful policies for the extension of SRC area can be developed. Farmers with above average farm sizes, below average proportions of leased land and below average number of cattle raised, may be a focus group. But these tendencies have to be considered in the context of entire land use systems. For example, in regions where dairy cattle breeding is decreasing, farmers will have more land available which they might be willing to cultivate with SRC. Particularly these farmers could be provided with informative literature about SRC cultivation and the opportunities to diversify their income with (perennial) energy crops. This information could also be formulated with particular emphasis on efficient use of marginal lands or the potential for woody biomass production to be used to supply private heating plants. Subsidies such as those discussed in Ref. [43] might also support the extension of SRC. If similar trends are found in future studies in other European countries, this could simplify and harmonize Europe-wide policies for increasing the extension of SRC.

4.2. Sites used for SRC cultivation in Bavaria

Both land rents and the yields of winter wheat on sites where SRC has already been cultivated, were generally found to be below farm average. This general trend found for Bavaria was supported by the more detailed analysis at the administrative district level as well. The use of sites of below-average quality might be a reaction to the high land rents (up to 1000 € ha⁻¹ a⁻¹) common in southern Germany. The demand for agricultural area is particularly affected by the large number of biogas plants in Bavaria, where 2300, or 31%, of German biogas plants are located [44]. Opportunity costs are, of course, lower on land which demands lower land rent. At the same time, two-thirds of the sites used for SRC cultivation were sufficiently supplied with water, which is one of the most important factors for SRC growth [13,31–33,45], who measured the biomass yields from commercial SRC stands in Bavaria, found that the amount of biomass produced on sites with sufficient water supply but below-average land rents was not lower, but actually, slightly higher than that measured in field trials – 9

odt ha⁻¹ a⁻¹ in the first rotation. If we apply the yield factors mentioned in Ref. [46] this would lead to yields of 12.2 odt ha⁻¹ a⁻¹ in the second rotation. In addition to having sufficient water supply, most of the sites surveyed were subject to consequent weed control at the establishment phase, which is also crucial for high biomass yields in the first years [47]. Therewith, above-average revenues were achieved due to the resulting high yields and at the same time, costs for land rent were lowered by use of marginal lands [19], who evaluated the economics of SRC on marginal lands, and [12] both pointed out that the economic success of SRC is highly dependent on both the yield levels and the market price for wood chips. Assuming a constant yield level of 12.2 odt ha⁻¹ a⁻¹ over the entire cultivation time and the current wood chip price of 150 € odt⁻¹ [48], the annuities found for SRC were over 1000 € ha⁻¹ a⁻¹ [19]. Even given the lower yield level of the first rotation (9 odt ha⁻¹ a⁻¹), the annuities could potentially come close to 1000 € ha⁻¹ a⁻¹. Whereas [43] found SRC to be uneconomical on marginal lands due to both, low prices and low biomass yields, assuming the current price level and the yields found in Bavaria, they also calculated positive annuities for yields of both 9 odt ha⁻¹ a⁻¹ and 12 odt ha⁻¹ a⁻¹. Our findings suggest that farmers are willing to establish SRC on these sites due to its economic advantages. Additionally, high woody biomass yields from SRC can act as a balance for potentially low food crop yields, thus resulting in more efficient use of land, which is meaningful if the demand for land exceeds availability. The cultivation of SRC on marginal lands can additionally be stimulated by appropriate incentive programs [49]. Thus, identifying sites with the characteristics found in our study and focusing on these sites for SRC cultivation seems reasonable. In our study, distances from farm to SRC were not significantly different from the distances from farm to conventional agricultural sites, but the maximum distance from farm to SRC was four times higher than the maximum distance from farm to field. Generally, SRC cultivation on sites which are far from the main farm seems to be an interesting land-use choice, if they are appropriate for SRC cultivation. This is true because, after successful establishment of an SRC plantation, the next working step does not happen until the first harvest which does not occur for a number of years, whereas certain working steps need to be performed every year for annual crops. Thus, there is an additional benefit to SRC due to the lack of the annual maintenance costs necessary when growing conventional agricultural crops.

4.3. Management practices used in the production of SRC in Bavaria

The average SRC size in Bavaria was small – 1.1 ha. The average size of the second SRC, if a farmer established a second SRC, increased slightly - up to 1.3 ha. In comparison [22], found an average SRC size of 11.5 ha in Sweden [50], mentioned an average of 6.6 ha in Saxony (Eastern Germany), while [51] reported an average of about 2 ha for southwest Germany. One would assume that SRC - as a new crop with a relatively high potential for optimization [52,53] which is economically advantageous only under certain assumptions [12] – is particularly in need of improvement with regard to economies of scale in order to be profitable [52–54]. But in the

case of Bavaria's SRC, the total SRC area continues to increase, whereas the individual SRC areas remain small. To effectively analyze the situation, a broader viewpoint must be taken.

At the moment, the cheapest harvesting systems for SRC in rotation cycles of about four years are fully mechanized systems such as modified forage harvesters equipped with special headers capable of cutting woody biomass [51]. Use of this system is limited by the maximum harvestable stem diameter of about 13–15 cm [55] which is likely to be exceeded in rotation lengths of five and more years. Additionally, this harvesting technique is only sparsely available in Bavaria due to the relatively small amount of SRC grown there. Thus, the relative call-out charges per unit of biomass are large for sites as small as those found to be the norm in Bavaria, and this must be noted when considering the harvesting costs. Motor-manual harvesting was mentioned as the most expensive harvesting technique by Ref. [51] in a rotation cycle of four years, and by Ref. [20] for a rotation cycle of five years. However, in longer rotation cycles of about ten years, motor-manual harvesting (hauling and chipping included) has been found to be economically competitive with fully mechanized harvesting per unit of biomass [20]. Therewith, motor-manual harvesting of SRC at small sites with longer rotation cycles (as is the norm in Bavaria) is almost economically competitive with the use of the modified forage harvesters. Motor-manual harvesting can be done by the farmers themselves if they are experienced with forest harvesting techniques. We assumed this to be the case for most of the farmers in our study because of the relatively large amount of forest area owned by the SRC farmers surveyed. Carrying out the harvesting themselves, and therewith, generating additional income, is seen as an advantage by farmers [39], as SRC harvesting takes place in wintertime when the workload from conventional agriculture is rather low. If SRC is harvested motor-manually using internal labor (thus eliminating labor costs) the costs for harvesting can be reduced to the lowest harvesting costs found in any of the published studies of SRC, namely 12.20 € odt⁻¹ [51]. An appropriate tree species for longer rotation cycles is poplar (*Populus* spp.) [12]. The high proportion of intended rotation lengths of between five and ten years might explain why poplar was cultivated in 98% of the SRCs in our sample from Bavaria [35], who analyzed trends of commercial SRC plantations in Bavaria, reported significant decreases in the rotation length from the time commercial SRC management began in Sweden up to 2000. It remains to be seen if this trend will occur in Bavarian SRC management in the long run, or if management practices optimized for longer rotation cycles will dominate. The low average planting density of 6580 plants per hectare found in the sample confirms that rotation cycles longer than three years were already anticipated at the time of establishment of the plantations. The technique of letting the stems dry down passively - which was the intention of 75% of the respondents - has advantages over other drying techniques, as it reduces the water content to <30% [56,57], while at the same time dry matter losses are lower than with other techniques [57]. Consequently, it offers high quality biomass without the need for special techniques, and it is therefore appropriate for small, private SRC managers.

Most SRC operators in Bavaria (66% plus the 14% who already had plans to build a WCH) already include the benefits of a private WCH in their economic analysis of SRC. The economic benefits of SRC can be increased by the substitution of fossil fuels with wood fuel, as operators have the additional benefit of costs saved by avoiding the purchase of fossil fuels [51,58,3] compared the heat generation costs of wood combustion using a 500 kW gasification reactor with the heat generation costs of conventional fuels such as liquid gas, natural gas, heating oil and coal, as well as for alternative sources, such as pellets and straw. They found that the heat generation costs of woody biomass from SRC were half of what they would be if oil were used. They predicted heat generation costs of 6.6 € GJ^{-1} if the plant were operated only during the heating season, and 4.8 GJ^{-1} if the plant operation time were 7920 h per year. They also highlighted the fact that heat generation from woody biomass is economically appealing for family house dwellers of 30 kW. The fact that 80% of SRC managers currently operate or plan to build a WCH seems to indicate that most SRC operators have explored a value-added supply chain from biomass production on marginal lands that includes heat as the final product. Additionally there are economic incentives in place that provide 1400 € for systems generating between 30 and 100 kW [59], which amounts to about five percent of the initial investment costs for such systems [60]. Another advantage of producing woody biomass for private use is that the internal prices for wood chips can be fairly accurately estimated over the long run, whereas fossil fuel prices are relatively volatile.

We found management practices for SRC in our sample, which seem to be optimized for a region with high yields, and therewith, a high level of competition with cash crops. First, land with below-average land rent was chosen for SRC cultivation, whereby opportunity costs were reduced. However, if it is well-maintained and has a sufficient water supply, SRC will not necessarily attain below-average biomass yields [45]. Thereby, sites far off the farm could be chosen, as SRC requires less maintenance and thus fewer visits to the field than conventional agricultural crops. In such cases, however, the increase in transportation costs needs to be considered, as they contribute significantly to the total costs if wood chips are produced for combustion on farm. Second, the parcel size of SRC sites was small in comparison to the sizes reported by studies done in other countries and other regions of Germany (see Refs. [50,51]). Our findings suggest that farmers in Bavaria prefer SRC cultivation on sites with these properties, and therefore, such small parcels should be considered as potential SRC sites from a scientific perspective as well, at least in our study area. On these sites, fully mechanized harvesting would be too expensive due to high relative call-out charges. However, if cultivated for longer rotation cycles of five to ten years and harvested mostly motor-manually, harvesting costs can be kept low and thus, be competitive with fully mechanized systems in shorter rotation cycles [51,61]. Costs can be further reduced if the shoots are dried down passively, thus requiring no special techniques and allowing SRC managers with a small total SRC area and low levels of technical know-how to accomplish it themselves. If the biomass is used in a private WCH there is an additional benefit due to lowered heat generation costs [51].

5. Conclusions

In accordance with the findings by Refs. [23,22] for Sweden, Bavarian farmers who grew SRC were different from farmers who did not grow SRC. SRC farmers were more likely to be organic farmers, have larger farms, lease a lower proportion of land, breed fewer livestock, have less permanent grassland and work a higher proportion of forest area. By focusing on those farmers who are most likely to cultivate SRC, purposeful policies to promote the extension of SRC area can be developed. If similar trends are found in future studies in other European countries, this could simplify and harmonize Europe-wide policies to increase the extent of SRC.

The sites chosen for SRC cultivation and the management practices used in short rotation coppice in Bavaria (southern Germany) seem to result from high opportunity costs due to the relatively high yields of conventional agricultural crops and thus, a high level of competition for land, which leads to high land rent prices. SRC in Bavaria was cultivated mostly on sites with below-average land rent prices, whereby opportunity costs were lower. However, SRC were cultivated on land that, in most cases, has sufficient water supply and thus, is capable of producing high biomass yields of poplar [31,45]. The size of individual SRC plantations was small – on average 1.1 ha – and hence farmers chose longer rotation cycles of between five and ten years, making motor-manual harvesting economically competitive with fully-mechanized harvesting and shorter rotation cycles. The biomass produced was passively dried down next to the field in 75% of the cases, and in 66% of the cases, biomass was grown for use in a private wood chip heating system, thus bringing additional benefit to the operator due to lower heat generation costs [51].

We assume that it is this combination of factors under conditions of high competition for land, which have contributed to the relatively large increases in total SRC area in Bavaria. At the same time, the need to compete for land with food crops is assumed to be lower than if SRC were to be established on the best soils, because the sites chosen have generally been those with comparably low soil quality. Additionally, the competition for land is lower because of the use of small field sizes, where employment of the machinery needed for the cultivation of conventional agricultural crops is rather difficult. The question is still open as to whether this is a niche for SRC production in other European countries as well. If SRC will be included as Ecological Focus Area in the Common Agricultural Policy of the EU [62], biomass production under encountered conditions may become more attractive, as farmers will be able to fulfill the restrictions of the CAP by producing biomass on land which is less suitable for conventional crops. In order to quantify the profitability of SRC under these special conditions, an economic analysis is required.

Acknowledgments

The data collection on which these results are based was funded by the Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft,

Forschung und Kunst and data evaluation was funded by the Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. We thank all respondents who participated in our survey; without detailed information from the operators, status-quo analyses would not have been possible. We thank three anonymous reviewers for their valuable and constructive comments on our manuscript. We also thank our colleagues from the Straubing Center of Science, Ulrike K. Muller, and Luz Maria Castro for their helpful suggestions on the manuscript, Robert Bauer for his valuable advice on the statistics and Laura Carlson for language editing.

REFERENCES

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm. Available from: <http://www.bmu.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/eckpunkte-fuer-ein-integriertes-energie-und-klimaprogramm/>; November 25, 2013 [German].
- [2] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Erneuerbare Energien 2012: Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat); October 09, 2013 [German].
- [3] Stolarski MJ, Szczukowski S, Tworkowski J, Krzyżaniak M. Cost of heat energy generation from willow biomass. *Renew Energy* 2013;59(0):100–4.
- [4] Mantau U. EUwood - real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report. Hamburg, Germany; 2010.
- [5] United Nations Economic Commission for Europe Food and Agriculture Organization of the United Nations. Forest resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand (industrialized temperate. New York: United Nations; 2000.
- [6] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. National Forest Inventory 2. Available from: [- \[8\] Djomo SN, Kasmoui OEL, Ceulemans R. Energy and greenhouse gas balance of bioenergy production from poplar and willow: a review. *GCB Bioenergy* 2011;3\(3\):181–97.
- \[9\] Dimitriou I, Mola-Yudego B, Aronsson P. Impact of willow short rotation coppice on water quality. *Bioenergy Res* 2012;5\(3\):537–45.
- \[10\] Dimitriou I, Mola-Yudego B, Aronsson P, Eriksson J. Changes in organic carbon and trace elements in the soil of willow short-rotation coppice plantations. *Bioenergy Res* 2012;5\(3\):563–72.
- \[11\] Don A, Osborne B, Hastings A, Skiba U, Carter MS, Drewer J, et al. Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon; June 26, 2012.
- \[12\] Hauk S, Knoke T, Wittkopf S. Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—a review. *Renew Sust Energ Rev* 2014;29\(0\):435–48.
- \[13\] Styles D, Thorne F, Jones MB. Energy crops in Ireland: an economic comparison of willow and Miscanthus production with conventional farming systems. *Biomass Bioenerg* 2008;32\(5\):407–21.
- \[14\] Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten \(StMELF\). Zentrale InVeKoS Datenbank \(ZID\). Available from: <http://www.zi-daten.de/>; October 14, 2013 \[German\].
- \[15\] European Union. Verordnung \(EG\) Nr. 1120/2009 der Kommission; 2009 \[German\].
- \[16\] Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung. Ernte- und Betriebsberichterstattung. Available from: \[- \\[18\\] Destatis SB. Eigentums- und Pachverhältnisse Landwirtschaftszählung 2010. E-Mail; 2014. p. 1 \\[German\\].
- \\[19\\] Schweier J, Becker G. Economics of poplar short rotation coppice plantations on marginal land in Germany. *Biomass Bioenergy* 2013;59\\(0\\):494–502.
- \\[20\\] Burger FJ. Viel Energie bei wenig Aufwand: Kurzumtriebsplantagen können rund 30 Jahre lang genutzt werden. *Bayer Landwirtsch Wochenbl* 2011;43:56 \\[German\\].
- \\[21\\] Larsson S, Lindgaard K. Full scale Implementation of short rotation willow coppice, SRC, in Sweden. Örebro, Sweden; 2003. p. 5.
- \\[22\\] Rosenqvist H, Roos A, Ling E, Hektor B. Willow growers in Sweden. *Biomass Bioenergy* 2000;18\\(2\\):137–45.
- \\[23\\] Roos A, Rosenqvist H, Ling E, Hektor B. Farm-related factors influencing the adoption of short-rotation willow coppice production among Swedish farmers. *Acta Agr Scand B-S P* 2000;50\\(1\\):28–34.
- \\[24\\] Dimitriou I, Rosenqvist H, Berndes G. Slow expansion and low yields of willow short rotation coppice in Sweden; implications for future strategies. *Biomass Bioenergy* 2011;35\\(11\\):4613–8.
- \\[25\\] Mola-Yudego B, Aronsson P. Yield models for commercial willow biomass plantations in Sweden. *Biomass Bioenergy* 2008;32\\(9\\):829–37.
- \\[26\\] Mola-Yudego B, Pelkonen P. The effects of policy incentives in the adoption of willow short rotation coppice for bioenergy in Sweden. *Energy Policy* 2008;36\\(8\\):3062–8.
- \\[27\\] Gustafsson J, Larsson S, Nordh N. Manual för Salixodlare; 2007.
- \\[28\\] Danfors B, Ledin S, Rosenqvist H. Short-rotation willow coppice growers' manual. Uppsala; 1998.
- \\[29\\] Fiala M, Bacenetti J, Scaravonati A, Bergonzi A. Short rotation coppice on Northern Italy: comprehensive sustainability. In: *ETA-Florence Renewable Energies*, editor. 18th European biomass Conference and Exhibition: From research to industry and markets. \\[Lyon\\]: Produced and published by ETA-Florence Renewable Energies; 2010. pp. 342–8.
- \\[30\\] Arbeitskreis Standortskartierung. Forstliche Standortsaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen,\]\(https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/data?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1393601060726&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=41241-001&auswahltext=%23Z-01.01.2009&nummer=5&variable=2&name=REGBEZ&werteabruf=Werteabruf; February 28, 2014 \[German\].
\[17\] Destatis SB. Ernte- und Betriebsbericht: Feldfrüchte und Grünland. Available from: <a href=\)](http://www.bundeswaldinventur.de/enid/0a5898a9c4c3b69b26a58f0967d220f3d5e5e76277695f70616765092d09746162656c6c652e706870093a095f7472636964092d093432377g.html?source=zielmerkmale&theme=0&hrs_database=&hrs_database=&Jahr=8702&K1=9999&K2=9999&K3=9999&K5=9999&abschicken=Proceed&ZNR=11443-1950&Archiv_Datum=2004-11-09+08%3A37%3A32&x_coord=Gebiet&y_coord=K4; February 27, 2014.
[7] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), editor. Biomasseproduktion von Kurzumtriebsplantagen: Ertragskundliche Ergebnisse des Projekts)

- Kennzeichnungen, Erläuterungen. 6th ed. Eching bei München: IHW-Verl; 2003 [German].
- [31] Petzold R, Feger K, Röhle H. Standortliche Voraussetzungen für Kurzumtriebsplantagen. In: Bemann A, Knust C, editors. *Agrowood: Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. 1st ed. Berlin: Weißensee Verlag; Weissensee-Verl; 2010 [German].
- [32] Lindroth A, Båth A. Assessment of regional willow coppice yield in Sweden on basis of water availability. *For Ecol Manag* 1999;121(1–2):57–65.
- [33] Stephens W, Hess T, Knox J. Review of the effects of energy crops on Hydrology: NF0416, Report to MAFF by Institute of Water and the Environment. Silsoe: Cranfield University; 2001.
- [34] Kölling C. Ökologische Feuchtestufe in Bayern. E-Mail; 2014. p. 1 [German].
- [35] Mola-Yudego B. Trends and productivity improvements from commercial willow plantations in Sweden during the period 1986–2000. *Biomass Bioenergy* 2011;35(1):446–53.
- [36] Maye D, Ilbery B, Watts D. Farm diversification, tenancy and CAP reform: results from a survey of tenant farmers in England. *J Rural Stud* 2009;25(3):333–42.
- [37] Bemann A, Nahm M, Brodbeck F, Sauter U. Holz aus Kurzumtriebsplantagen: Hemmnisse und Chancen: Wood from short rotation coppice: obstacles and chances. *Forstarchiv* 2010;81(6):246–54.
- [38] Neubert FP, Boll T, Zimmermann K, Bergfeld A. Constraints on & recommendations for the expansion of SRC plantations in Germany: results of an online survey of practitioners. In: *Fachgespräche Gülzower*, editor. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR); 2013. pp. 257–66. *Agrarholz - Kongress 2013*. 19./20. Februar 2013 Berlin. Gülzow-Prüzen.
- [39] Hauk S, Wittkopf S. Kurzumtriebsplantagen in Bayern - Ergebnisse der ersten Betreiberbefragung. In: 20. C.A.R.M.E.N.-Symposium. Bausteine der Ressourcen- und Energiewende., p. 357–361. [German].
- [40] Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF). *Bayerischer Agrarbericht 2012*. München; 2012. p. 8 [German].
- [41] Djomo SN, El Kasmoui O, de Groot T, Broeckx LS, Verilinden MS, Berhongaray G, et al. Energy and climate benefits of bioelectricity from low-input short rotation woody crops on agricultural land over a two-year rotation. *Appl Energy* 2013;111(0):862–70.
- [42] Ostwald M, Jonsson A, Wibeck V, Asplund T. Mapping energy crop cultivation and identifying motivational factors among Swedish farmers. *Biomass Bioenergy* 2013;50(0):25–34.
- [43] Faasch RJ, Patenaude G. The economics of short rotation coppice in Germany. *Biomass Bioenergy* 2012;45(0):27–40.
- [44] German Biogas Association Branchenzahlen - Prognose 2013/2014. [February 28, 2014]; Available from: [http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/13-11-11_Biogas%20Branchenzahlen_2013-2014.pdf](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/13-11-11_Biogas%20Branchenzahlen_2013-2014.pdf). [German].
- [45] Hauk S, Wittkopf S. Biomasseleistung von Kurzumtriebsplantagen im ersten Umtrieb - Erträge von bayerischen Praxisflächen. In: Pekrun C, Wachendorf M, Francke-Weitmann I, editors. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften: Nachhaltige Erzeugung von Nachwachsenden Rohstoffen*; 2013. pp. 44–7 [German].
- [46] Horn H, Skibbe K, Röhle H. Wuchsleistung von KUP aus Pappel in Folgerotationen7. *AFZ-DerWald*; 2013. pp. 53–5 [German].
- [47] Gallagher T, Shaffer B, Rummer B. An economic analysis of hardwood fiber production on dryland irrigated sites in the US Southeast: Proceedings of the 5th Biennial meeting of the short rotation woody crops operations working group in conjunction with International Energy Agency bioenergy, Task 30, short rotation crops for bioenergy systems and International Union of Forest research Organization, working Unit 1.09.01, Integrated research in Temperate short-rotation Energy plantations. *Biomass Bioenergy* 2006;30(8–9):794–802.
- [48] C.A.R.M.E.N. e.V. Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln: der Energieholz-Index. [March 04, 2014]; Available from: <http://www.carmen-ev.de/infotehk/preisindizes/hackschnitze/jahresmittelwerte>. [German].
- [49] Buchholz T, Volk T. Profitability of willow biomass crops affected by incentive programs. *Bioenergy Res* 2013;6(1):53–64.
- [50] Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen. Kurzumtriebsplantagen in Sachsen. [October 09, 2013]; Available from: <http://www.energieholz-portal.de/257-0-KUP-in-Sachsen.html>. German.
- [51] Schweier J. Erzeugung von Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Marginalstandorten in Südwestdeutschland: Umweltbezogene und ökonomische Bewertung alternativer Bewirtschaftungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung verschiedener Holzermittelfverfahren. Doctoral dissertation. Freiburg im Breisgau; 2013. p. 273 [German].
- [52] Ericsson K, Rosenqvist H, Nilsson LJ. Energy crop production costs in the EU. *Biomass Bioenergy* 2009;33(11):1577–86.
- [53] de Wit M, Junginger M, Faaij A. Learning in dedicated wood production systems: past trends, future outlook and implications for bioenergy. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;19(0):417–32.
- [54] Rosenqvist H, Berndes G, Börjesson P. The prospects of cost reductions in willow production in Sweden. *Biomass Bioenergy* 2013;48:139–47.
- [55] Bertelsmeier M. *Praxiserfahrung bei der Beemung von Kurzumtriebsplantagen*. Germany: Cottbus; 2012 [German].
- [56] Kent T. Moisture content Variation in Forest biomass during storage: a result of COFORD Forest Energy Programme. Trento; 2010.
- [57] Focke J, Pelz S, Beimgraben T. Work Package 3-Value added Conditioning of SRC raw material. online. In: CREFF Project Consortium, editor. *CREFF Final Report: Project ERA-Net Bioenergy CREFF "Cost reduction and efficiency improvement of Short Rotation Coppice"*. on small field sizes and under unfavourable site conditions by focusing on high product quality and a product-oriented cooperative value chain; 2012. pp. 63–90.
- [58] Technologie- und Förderzentrum (TFZ). *Kleine Biomassefeuerungen: Marktbeobachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit*. Straubing; 2010 [German].
- [59] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. *Förderung von Biomasseanlagen*. Available from: http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/biomasse/index.html; March 04, 2014 [German].
- [60] Technologie- und Förderzentrum (TFZ). *Kleine Biomassefeuerungen: Marktbeobachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit*; 2010 [German].
- [61] Burger FJ. *Bewirtschaftung und Ökobilanzierung von Kurzumtriebsplantagen*. Doctoral dissertation. Freising; 2010. p. 180 [German].
- [62] Institute of European Environmental Policy *Political Agreement on the CAP – is this really a paradigm shift for the environment?* [March 25, 2014]; Available from: <http://www.cap2020.ieep.eu/2013/7/3/political-agreement-on-the-cap-is-this-really-a-paradigm-shift-for-the-environment?s=1&selected=latest>.

8.6 Veröffentlichung III

Hauk, S.; Skibbe, K.; Röhle, H.; Schröder, J.; Wittkopf, S.; Knoke, T. (2015): Non-destructive estimation of biomass yield for short rotation woody crops is reliable and shows high yields for commercial stands in Bavaria. BioEnergy Research. Online-Vorabpublikation. DOI: 10.1007/s12155-015-9602-5¹⁰

¹⁰ Beitrag von Sebastian Hauk (80 %): Datenakquise, Datenbearbeitung, statistische Analysen und Interpretation der Ergebnisse sowie Erstellen des Manuskripts. Beitrag von Katja Skibbe (10 %): statistische Analyse und Interpretation der Ergebnisse sowie erstellen des Manuskripts. Beitrag von Thomas Knoke, Stefan Wittkopf, Heinz Röhle und Jens Schröder: konstruktive Kritik an der Datenauswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie Korrektur des Manuskripts.

Nondestructive Estimation of Biomass Yield for Short-Rotation Woody Crops Is Reliable and Shows High Yields for Commercial Stands in Bavaria

Sebastian Hauk · Katja Skibbe · Heinz Röhle ·
Jens Schröder · Stefan Wittkopf · Thomas Knoke

© Springer Science+Business Media New York 2015

Abstract Realistic yield data are essential for evaluating the economic viability of short-rotation woody crops (SRWC). However, we lack not only realistic yield data, particularly for commercial stands, but also easily applicable methods to estimate biomass. To address these shortcomings, we evaluated 30 commercial stands in Bavaria during the first rotation (not yet coppiced) using three different methods—the quadratic mean diameter (QMD) approach, the yield appraiser (YA), and allometric power equations (APE). Of the three, APE requires the highest sampling effort, data, and expertise. APE was used to establish a baseline for bias and precision to

assess the performance of the QMD and YA methods. We found that neither the QMD nor the YA produced biomass estimation results different to that of the APE. Commercial stands 5 years old or older yielded, on average, $8.9 \text{ odt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, more than field trials of comparable age in the first rotation in Bavaria. This finding contradicts the common expectation that field trials yield more biomass than commercial stands. The mean annual increment in 3-year-old stands was significantly lower than that in stands 5 years old or older with comparable planting densities. Given that measured yields varied widely around the mean, economic evaluations should not use means, but take into account uncertainties. We found that YA and QMD are generally suitable biomass estimation methods for practitioners, with the QMD approach providing higher accuracy due to a lower relative bias and relative precision (−6.15 and 13.3 %) than YA (−12.97 and 21.87 %).

S. Hauk (✉) · S. Wittkopf
Chair of Wood Energy, Faculty of Forestry, University of Applied Sciences Weihenstephan-Triesdorf, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 3, 85354 Freising, Weihenstephan, Germany
e-mail: s.hauk@wz-straubing.de

S. Wittkopf
e-mail: stefan.wittkopf@hswt.de

K. Skibbe · H. Röhle
Institute of Forest Growth and Computer Science, Technische Universität Dresden, Piener Str. 8, 01737 Tharandt, Germany

K. Skibbe
e-mail: Skibbe@forst.tu-dresden.de

H. Röhle
e-mail: roehle@forst.tu-dresden.de

J. Schröder
Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde, Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde, Germany
e-mail: jens.schroeder@lfe-e.brandenburg.de

T. Knoke
Institute of Forest Management, TUM School of Life Sciences Weihenstephan, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising, Weihenstephan, Germany
e-mail: knoke@forst.wzw.tum.de

Keywords Short-rotation coppice (SRC) · Above-ground biomass production · Basal area · Allometric equations · Bioenergy crops · Hybrid poplar

Introduction

Worldwide, the forest area, and hence the supply of woody biomass, is decreasing [1, 2], whereas demand is increasing [3]. Therefore, more efficient methods of wood production are needed. One way to efficiently increase the woody biomass supply is the cultivation of short-rotation woody crops (SRWCs)—fast-growing tree species cultivated on agricultural land. So far, SRWC, however, are uncommon in developed countries [4] because their economic performance is uncertain

Published online: 17 March 2015

 Springer

[5] due to uncertain biomass yields and biomass prices [6–8]. Biomass prices can be easily derived by statistics or are even contractually secured. In contrast, biomass yields are difficult to predict, and data are scarce because yields are site specific [9–12]. Biomass yields from commercial stands (stands established as business ventures rather than as field trials and managed under real-world conditions mainly by farmers) are particularly scarce, and it is not yet clear whether yield levels from field trials reliably predict yield from commercial sites. The aims of this study were twofold: To narrow the data gap on biomass yields, we measured 30 commercial SRWC stands in the first rotation in the state of Bavaria in southern Germany. To narrow the knowledge gap on biomass estimation, we investigated two different, easily applicable biomass estimation methods that are accurate and simple enough to be applied by SRWC owners.

Biomass yields vary strongly with the tree species and genotypes used [13, 14], the planting density, age, management, and site conditions [9–12]. Site condition strongly depends on water supply and temperature [10]. Consequently, the mean annual increments (MAIs) recorded in the first rotation in SRWC vary substantially across Germany—between 0 and 26 oven-dry tons (odt) $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ [15, 16]—and range from 1.28 to 11.5 odt $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ across Bavaria [17]. Hence, yield data, which reflect the site and management conditions, are crucial. Despite the high variation in yields, most economic analyses of SRWC stands use mean values for biomass yields per rotation and assume both perfect predictability and the absence of risk and uncertainties. To assess whether the arithmetic mean of biomass yields is a suitable measure for evaluating the economic profitability of SRWC under practical conditions, we additionally analyzed the distribution of yield data. Quantification, and thus inclusion of yield uncertainties, is crucial for life cycle assessment [18] and for economic analyses [5] as long as site-specific, low variation yield data remain scarce.

Commonly used estimation methods for biomass yields are accurate, but they involve considerable effort and require both extensive data acquisition and a high level of expertise. Generally, “[...] a biomass estimation procedure is a compromise in which accuracy, speed and knowledge of the underlying biological reality determine the final shape of the procedure and its results” [19]. A commonly used and simple method is to harvest and weigh a stand or a representative part, yet this approach is time consuming, expensive, and destructive [20–22]. To save time, expense and trees harvested, scientists commonly use a biomass estimation method based on allometric power equations (APE). These usually site-specific APEs are biomass functions that describe the relationship between shoot dry mass and an easily measurable input value (mainly diameter at various possible heights [e.g., basal diameter or diameter at breast height ($D_{1.30}$ or DBH)]); they are derived using nonlinear regression analysis [23]. These estimation

techniques have been mainly used to estimate biomass yields accurately and to provide data essential for the use of biomass yield models. Although APE is considered among the most precise techniques for calculating the biomass yields of SRWC stands [24, 22, 25], APEs have several downsides. APE’s accuracy is sensitive to the choice of the regression model itself as well as the choice of input data [26, 19]; they involve considerable effort and require both extensive data acquisition and a high level of expertise.

To save cost and labor, biomass yield models were developed. There are models based on site-specific input data (see, e.g., [27]) and models using readily acquirable input data (e.g., stand mean height, diameter, and plants per hectare), see e.g. [28, 29]. One of these models—the “yield appraiser” (YA) developed by [28]—was constructed and tested using an extensive database obtained mainly from SRWC projects in central and eastern Germany. The study found a low bias of -0.9% [30]. However, it is unknown how suitable the YA method is for poplar in other regions, such as southern Germany. Another established method for estimating biomass yields in forest stands is the quadratic mean diameter (QMD) method. The QMD is the diameter of a shoot that is representative of the average cross-sectional area of a stand, which is closely correlated with the average volume. Therefore, the volume of the stand as well as the amount of dry matter present can be estimated from its average cross-sectional area, as derived from the QMD—or rather, the dry matter of the QMD stem—multiplied by the number of trees in the stand [31, 32]. While biomass estimation based on QMD is appropriate for forest stands, whether it is applicable for SRWC stands has not yet been tested in depth. Therefore, Hauk and Wittkopf [33] conducted a pilot study using QMD as the predictor of stand biomass. The resulting relative bias was low at 6.15%. They assume that even better estimation results could be achieved if the average biomass were derived from the average weight of several shoots with the same QMD, as the weights of the various shoots may differ due to the possibility of having stems of different heights with the same QMD. Therefore, we tested whether the QMD using three shoot weights and the YA are readily applicable methods to provide accurate biomass data.

The main objectives of this study were to (a) provide and analyze scarce biomass data for commercial SRWC stands, (b) to evaluate uncertainty by examining distributions of these yield data, and to (c) test if biomass estimates based on YA and QMD are reliable. Therefore, we measured 30 stands of commercial SRWC in the first rotation in Bavaria. Yields were estimated using the APE, YA, and QMD methods. To test how precisely the QMD method and the YA method estimate the oven-dry biomass, these results were compared with biomass yields derived by APE and validated based on the relative bias and relative precision.

Material and Methods

Description of the Soil and Climate Conditions in the Stands Examined

In order to analyze biomass yields from commercial stands, we selected 30 of approximately 300 SRWC stands that had been established in Bavaria by the winter of 2011/2012. To predict achievable biomass yields at the age of harvest, we drew a sample of stands that was stratified based on the distribution of intended harvest ages, the rotation length, reported by the SRWC operators surveyed in [34]. Rotation length is commonly used as a proxy for the product [35] and (the resulting) process chains [5] and, to a certain extent, for a range of planting densities [36], diameter development [36], biomass yields [37], and harvesting techniques [38, 39]. Hence, the literature distinguishes between (i) short-rotation cycles of about 3 years with relatively high planting densities and harvested mainly with modified forage harvesters and (ii) longer rotation cycles of 5 years and older with lower planting densities that are typically harvested using forest harvesting techniques (see, e.g., [37, 40, 38, 39]). Therefore, the biomass yields we present here are divided into two age groups: 3-year-old stands (G3)—as a proxy for the shorter rotation cycles, and 5- to 10-year-old stands (G5+)—as a proxy for longer rotation cycles. Accordingly, G3 contains eight 3-year-old stands and G5+ contains twenty-two 5- to 10-year-old stands. All of the stands examined were in the first rotation and were located in Bavaria in southern Germany at longitudes between 10°20' E and 13°31' E and latitudes between 48°06' N and 50°02' N and at elevations between 196 and 586 m above sea level (Table 1). Mean annual temperatures in this region range from 6.2 to 9.0 °C, and annual precipitation is from 600 to 1010 mm. The site qualities—soil value and land rent—are mostly below the Bavarian average. Soil moisture level was used as a proxy for the amount of water available to the trees. It reflects the water storage capacity of the rooting layer and takes into account the topography and amount of precipitation [42]. Based on this measure, water supply is sufficient for woody species throughout the year at two thirds of the sites examined. All of the SRWC stands investigated are cultivated with poplar hybrids *Populus maximowiczii* × *Populus nigra* (max., 1–4).

Measurements

The sampling unit used in all three methods was the single shoot. Sampling was carried out during the wintertime when plants are dormant and without leaves. The harvesting height of all samples was 10 cm above the soil level—as variation in harvesting height would lead to variation in stem weight at the same DBH [25]—according to current harvesting techniques [43]. To facilitate comparison between sites of different sizes,

Table 1 Site characteristics in each of the 30 SRWC stands examined

Stand no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Soil type	sgl	csl	sl	sl	le	le	le	l	c	sl	l	sl	csl	csl	csl	c	l	c	sl	l	sl	csl	sl	l	sl	c	le	csl	c	c	
Soil value	35	50	20	35	80	54	58	35	50	54	50	50	62	60	80	10	35	49	50	35	20	45	54	51	53	50	30	50	49	40	
Altitude above sea level (m)	577	579	328	196	462	462	432	510	551	436	486	572	530	530	530	462	582	501	543	368	586	315	316	436	486	572	551	586	462	543	530
Annual precipitation (mm)	900	900	600	603	872	803	722.1	815	715	740	800	1000	864.3	864.3	803	972	820	840	800	830	690	957	740	805	1010	715	700	872	840	864	
Soil moisture level	mf	f	mf	w	f	mw	mw	mf	mf	mf	f	f	f	f	f	w	mf	mf	mf	mf	mw	mf	mf	f	f	mf	w	f	mw	mw	
Average temperature (°C)	8	8	8.4	8.2	7.6	8.1	8.3	8.2	7.8	9	7.5	7	7.5	7.5	8.1	7.4	8.3	7.9	7.5	6.2	8.3	8	9	7.5	7	7.8	7.2	7.6	7.9	7.5	
Field size (ha)	3.1	1.6	0.27	4	3.35	1.6	0.32	1.15	1.5	2.24	0.3	0.8	0.23	0.63	1.71	1.3	1.1	1.2	0.3	1.1	0.3	0.7	2.24	0.35	0.75	1.5	0.9	0.36	1.2	0.56	

Soil types are loam (l), sandy loam (sl), sandy gravelly loam (sgl), clayey silty loam (csl), loamy clay (lc), and clay (c). The soil value is classified according to the German soil inventory [41]. Soil moisture level values at the sites include moderately dry (md), moderately fresh (mf), fresh (f), moderately wet (mw), and wet (w)

the biomass yield was calculated for a field size of 1 ha for each stand. Three biomass estimation methods were applied, compared, and validated. The APE method requires the most input data, and YA requires the least amount of both effort and data (Table 2).

Data Collection

All three estimation methods presented multiply the average shoot weight by the number of shoots per hectare. Hence, these parameters must either be collected or accurately estimated [23]. The number of shoots per hectare was estimated using the following equation:

$$N_a = (N_i - N_d) * N_s \tag{1}$$

where N_a is the current number of shoots per hectare, N_i is the initial number of plants per hectare, N_d is the number of failed plants and N_s is the average number of shoots per root stock.

Plants per Hectare The initial number of plants per hectare provided by the operators was validated in the field. For this purpose, 30 sample planting distances (distances between and within each row of thirty stools) were measured in each of ten rows (part of rows) at various locations across each site. These ten lines were located within the stand (e.g., sample row 1 southwest of the stand, sample row 10 northeast of the stand) in such a way as to provide samples representing different site conditions. If a plant had failed, the nearest living tree was measured. Using these measurements, the average planting distance and the number of root stocks per hectare were calculated.

Table 2 Input data used for each of the biomass estimation methods examined

	APE	QMD	YA
Number of shoots (nha^{-1})	x	x	x
DBH of a random sample (cm)	$n=250+$		x
DBH of sample trees (cm)	$n=25$	$n=3$	
Weight of sample trees (g)	$n=25$	$n=3$	
Average height (m)			x
QMD (cm)		x	x
Average shoot weight (kg DM)	x	x	
Dry mass (%)	x	x	

The amount of data required for the allometric power equation (APE) is greater than that needed for both, the quadratic mean diameter (QMD) and the yield appraiser (YA). For biomass estimation with the QMD method, the number of sample trees required is significantly less than for the APE, and no DBHs of random sample trees are required. For biomass estimation using the YA, only DBH and average height of the sample trees is necessary, and neither weight of the sample trees nor a determination of dry mass is required

Failure Rate To derive the average failure rate per site, 30 planting spots were sampled in each of the ten rows described above (300 samples per site). A failure was recorded if no shoot of at least 1.3 m in height was found at a sample location.

Shoots per Root Stock To determine the average number of shoots per root stock for each site, the number of shoots from each of the 30 root stocks sampled in each of the ten rows was counted. Again, a shoot had to be at least 1.3 m in height to be counted.

Diameter at Breast Height At least 250 diameters were measured at 1.3 m above soil level using an electronic caliper running “diagonally” across the site in order to represent the diameter distribution of the stand [23]. The use of this fixed pattern was intended to help avoid a choice-specific bias.

Sample Trees In order to derive the APE, both the DBH and dry weight (g) were measured for each of 25 sample trees selected based on the shoot diameter frequency distribution. The weights of only three sample trees are required for biomass estimations using the QMD method, and no sample trees are required as inputs to the YA.

Dry Mass (%) To determine the dry mass per shoot, a required input for APE and QMD methods, two samples per shoot were taken and dried at 105 °C until oven dry mass was constant. The ratio of dry to fresh weight of the samples was used to estimate the dry weight of the whole tree from the fresh weight of the whole tree.

Biomass Estimation Using Allometric Power Equations

The APE method uses the relationship between DBH and dry mass per shoot to estimate biomass. Thus, the relationship between the 25 DBHs and the weights of the sample trees was established for each of the stands using an APE (see Eq. (2)).

$$BM = a_0 * d_{1,3}^{a_1} \tag{2}$$

where BM is shoot dry mass (odt), $d_{1,3}$ is DBH (cm), and a_0 and a_1 are regression coefficients.

Equation (2) was used to calculate the dry masses of the sampled 250+ trees with measured DBH. The average weight of these shoots—representing the weight distribution of the stand—was multiplied by the number of shoots per hectare to derive the biomass yield per hectare. This allometric model is considered particularly precise, as it is sensitive to site, species, and age effects. Several APEs have been tested by Verwijst and Telenius [23]: “The use of the variable allometric model [...] may lead to improved estimations.[...]”

furthermore, the inclusion of height next to DBH does not in general contribute to a much better explanation of the variation.” Both Verwijst and Telenius [23] and Röhle [21] found no statistically significant difference between real shoot weight and shoot weight estimated using APEs, and Nordh and Verwijst [22] reported a maximum difference of 7 %.

Biomass Estimation Using the Quadratic Mean Diameter Method

As basal area is correlated with shoot biomass, it is possible to deduce the biomass in a forest stand based on the QMD of the stand [32]. In a pilot study, Hauk and Wittkopf [33] tested whether the stand biomass of SRWC stands could also be accurately described using the weight of one QMD. To achieve a more reliable estimate, we based biomass estimation using the QMD method in this study on the average weight of three rather than a single tree. After measuring 250+ DBHs and calculating the QMD from these measurements, three shoots with the QMD were harvested and weighed. Two samples per shoot were taken to determine the dry mass. The ratio of dry to fresh weight of the samples was used to estimate the dry weight of the whole tree from the fresh weight of the tree. Finally, the average dry mass was multiplied by the number of shoots per hectare.

Biomass Estimation Using “Yield Appraiser”

YA [28, 30] is an empirical model for general application in the field that estimates the yield of a poplar SRWC in the first rotation cycle based on observed data. The model was developed on poplar clones in trial stands with varying spacing patterns and ages. The dataset selected for model parameterization covers a wide range of values for age (1–14), stand mean height (1.5–14.7 m), shoot number per hectare (1099–44,701), and productivity in dry weight of biomass (0.59–110.01 odt ha⁻¹). The YA determines the yield [BM_{odt} (odt ha⁻¹)] of a current plantation by means of Eq. (3):

$$BM_{odt} = \frac{a_0 * QMD^{a_1} * N_a}{1000} \quad (3)$$

where a_0 and a_1 are biomass function coefficients, QMD is the diameter of the stem with the average basal area (cm), N_a is the current number of shoots per hectare (number ha⁻¹). Dividing by “1000” converts the biomass from kilograms to oven-dry tons.

The first part of the formula (blue) corresponds to the biomass function. The QMD represents the DBH of a single shoot. Thus, all diameter values are represented by one single averaged value (QMD). The weight of an average shoot is derived by adapting the coefficients. The dry biomass per

hectare can be derived by multiplying the average shoot weight by the number of shoots per hectare (N_a).

Depending on the mean stand height and stand density, different functions are used by the model to calculate a_0 . Coefficient a_1 is produced using a linear function where the modeled value a_0 is the independent variable (Eq. (4)).

$$a_1 = -3379 * a_0 + 2593 \quad (4)$$

Statistical Analysis

The statistical evaluation was conducted, and associated graphics were created using the software “R 2.15.1” [44]. The significance level was set at 5 %, unless otherwise stated.

Biomass Yields

The biomass yields provided for commercial SRWC stands refer to the yields calculated with the APEs, as they are thought to be the most accurate [22, 23, 25, 45]. For the discussion, the yields of G5+ were compared with the yields from field trials (LWF 5+) using a two-sided Wilcoxon–Mann–Whitney test, as the data were not normally distributed. To ensure comparability between the two groups, the factors thought to have the greatest influence on yields—age ($p=0.82$), plants per hectare ($p=0.38$), soil moisture level ($p=0.73$), and temperature ($p=0.28$)—were compared using two-sided Wilcoxon–Mann–Whitney tests.

Validation of Biomass Estimation Methods

Empirical evaluations can be made with data used in creating the model as well as with additional data not previously used [46]. In this study, we compared the biometric deviations between measurements and model calculations. Because biomass estimation using APE is considered to be precise [22, 23, 25, 45], the biomass yields calculated for each stand in our study using APE were set as the 100 % level (control or observed values, X_j) for comparison with the biomass estimates (estimated values, x_i) calculated using the QMD method and the YA. To assess the quality of the APE computed for each of the 30 stands, 25 measured shoot weights and the 25 shoot weights generated using APE were compared and tested for correlations and concurring mean values. Spearman’s rank tests and two-sided Wilcoxon–Mann–Whitney tests were applied in this assessment, as the data were not normally distributed.

The assessment of model quality focused on a quantitative comparison between predicted and observed biomass values. The relevant measures are bias (\bar{e}) and precision (s_e), as outlined by [47, 48]. For ease of comparison with other studies, we also calculated the scaled (relative) bias ($\bar{e}\%$) and

precision ($s_e\%$) by dividing both bias and precision by the average of the observed values (\bar{X}) multiplied by 100 [48]. To calculate the bias (\bar{e}), the difference between the estimated biomass x_i and the observed biomass X_i was determined over stands $i=1, 2, \dots, n$:

$$\bar{e} = \frac{\sum (x_i - X_i)}{n} \quad (5)$$

Thus, the relative systematic deviation ($\bar{e}\%$) is:

$$\bar{e}\% = \frac{\bar{e} * 100}{\bar{X}} \quad (6)$$

A positive bias indicates underestimation, while a negative bias indicates overestimation.

The precision (s_e) describing the variability of the estimation procedure is calculated as:

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} \quad (7)$$

Thus, the relative precision ($s_e\%$) is:

$$s_e\% = \frac{s_e * 100}{\bar{X}} \quad (8)$$

Additionally, the ranges of relative deviations per estimation method are given, whereby the relative deviation of a stand's biomass ($\Delta_i\%$) is calculated as:

$$\Delta_i\% = \frac{(x_i - X_i) * 100}{X_i} \quad (9)$$

Results

All results refer exclusively to the first rotation in stands, which have not yet been harvested and, thus, cannot readily be projected onto further rotation cycles. The biomass yields presented were derived through the most accurate sound biomass estimation method—the allometric power equation

Biomass Yields

The yields from the commercial SRWC stands [expressed as the mean annual increment (MAI)] calculated using the APE ranged from 0.39 to 16.98 $\text{odt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. The MAIs (mean = 8.93 $\text{odt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) of stands 5 years old or older (G5+), which ranged from 2.39 to 16.98 $\text{odt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ were significantly higher ($p < 0.001$) than those in the 3-year-old stands (G3), which ranged from 0.39 to 7.29 $\text{odt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (mean = 3.58 $\text{odt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) (Fig. 1). While the data from both groups

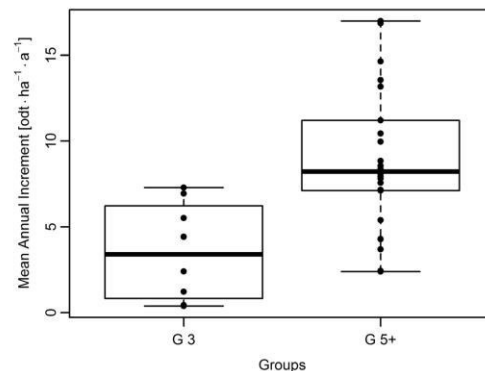


Fig. 1 Comparison between observed biomass yields from commercial SRWC stands. On average, observed biomass yields in the first rotation in stands 5 years old or older (G 5+) were significantly (2.49 times) higher than observed biomass yields in the first rotation from 3-year-old stands (G 3) at comparable planting densities

deviated widely from the mean, the standard deviation (SD) of the MAI in stands 5 years old or older ($SD = 4.18 \text{ odt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) was nearly twice that of the 3-year-old stands ($SD = 2.84 \text{ odt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$).

Comparison of Biomass Estimation Methods

Quadratic Mean Diameter

The average biomass estimated using APE was 41.42 odt ha^{-1} , and that estimated using the QMD method was 38.87 odt ha^{-1} . An overall comparison of biomass estimates derived using APE and the QMD method showed no statistically significant difference between the two results ($p = 0.77$) and a relative bias of -6.15% . The Spearman's rank correlation coefficient for predicted and observed values was 0.98 at $p < 2e^{-16}$. The relative deviation did not change significantly with increasing age (Fig. 2). However, the absolute deviation increased with increasing biomass (Fig. 3, square). The relative deviation of the stand biomass estimated using QMD from the reference estimate generated using APE ranged from -23.21 to 32.59% (Fig. 2), with a relative precision of 13.32% . The range of relative deviations within the G3 stands was higher (ranging from -23.21 to 32.59%) than the range of relative deviation within stands G5+ (ranging from -20.49 to 12.17%). These results were echoed by the relative precision: The relative precision for G5+ was 12.05% and, thus, 1.85 times lower than that for G3, which was 22.32% . The relative bias of biomass yields calculated for G3 using QMD (-7.7%) was slightly higher than that for G5+ using the same method, which was -6.0% .

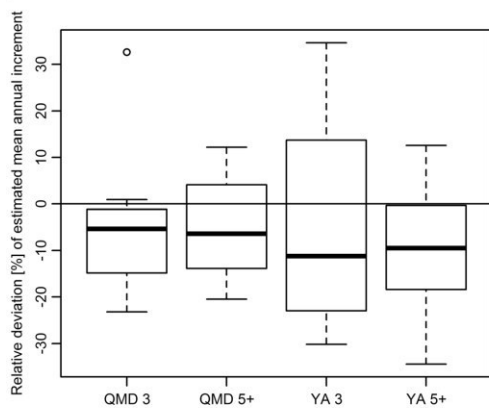


Fig. 2 Relative deviation of stand biomass estimates calculated using the quadratic mean diameter (QMD) method and the “yield appraiser” (YA) with the stand biomass calculated using the allometric power equation (APE) as a reference. The biomass estimation generated using the QMD method showed a relative bias of -6.15% and a relative precision of 13.32% , whereas that obtained from the YA showed a relative bias of -12.97% and a relative precision of 21.87% . The outlier of QMD 3 occurred in a stand with a high dropout rate, where one of three sampled trees showed a weight that was twice as high as the other two sampled trees

Yield Appraiser

The mean observed biomass over all stands was $41.42 \text{ odt ha}^{-1}$, while predictions with the YA for the same stands showed an average of $34.64 \text{ odt ha}^{-1}$. This difference is statistically not significant and is related to a relative bias of -12.97% . The Spearman’s rank correlation coefficient for

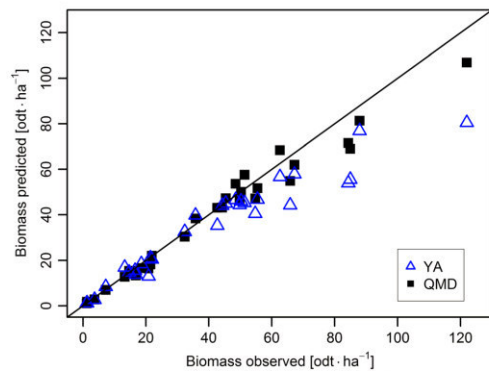


Fig. 3 Correlation between observed biomass (odt ha^{-1}) and predicted biomass (odt ha^{-1}). The Spearman’s rank correlation coefficients for predicted and observed values were 0.98 for the quadratic mean diameter (QMD) method and 0.95 for the “yield appraiser” (YA), both at $p < 2e^{-16}$. By trend, the absolute deviation of the predicted biomass increased with increasing biomass (odt ha^{-1}). This was particularly true for the YA estimations

predicted and observed values was 0.95 at $p < 2e^{-16}$. The individual absolute and relative deviations ranged from -29.2 to 4.4 odt ha^{-1} (Fig. 3, triangles) or from -34.4 to 33.4% . Thus, there are considerable over- and underestimations expressed by a relative precision of -21.87% . The greatest differences were observed in the upper biomass range beginning from circa 50 odt ha^{-1} . Here, yields were underestimated by, on average, -19.4% .

A differentiated assessment of the quality of the estimations was possible by categorizing the SRWC into different strata based on mean stand height and age. This approach showed that the relative bias of the estimation rose with increasing mean stand height and increasing age. For stands with a mean height between 1.3 and 4 m, the relative bias amounted to -0.19% ($s_e\% = 46.75\%$), between 4 and 8 m, it was -4.83% ($s_e\% = 18.08\%$) and between 8 and 12 m, -18.69% ($s_e\% = 20.19\%$). The biomass yield of the 3-year-old SRWC was determined with an average bias of -3.88% ($s_e\% = 54.56\%$)—a result which was less biased but also less precise than that for the older plantations where the average bias was -13.95% ($s_e\% = 19.06\%$).

Discussion

Our objectives were to provide and analyze scarce yield data from commercial SRWC stands in Bavaria and to test the accuracy of two readily applicable biomass estimation methods. The biomass yields discussed were derived through the most accurate biomass estimation method—the allometric power equation.

Biomass Yields

The average biomass yield of commercial stands at ages from 5 to 10 years was $8.93 \text{ odt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. This is in line with, at the upper end of, general European yield assumptions, derived from field trials: $8 \text{ odt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ for Sweden [49]; $10 \text{ odt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ for Italy [50]; and $5\text{--}8 \text{ odt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ [51] in the first, and $12.1 \text{ odt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in subsequent rotations in Germany [52]. Average yields for field trials in Bavaria of $6.74 \text{ odt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($SD = 2.75$) were reported for 5- to 10-year-old stands in the first rotation (LWF 5+) [17]. Thus, biomass yields of commercial stands G5+ (mean = 8.93 , $SD = 4.18$) were significantly higher than published biomass yields from field trials in Bavaria at comparable ages ($p < 0.001$). Keeping in mind yield increases in the second and subsequent rotations [17, 53], the average MAI over the SRWC lifetime of commercial stands examined in Bavaria is likely to be above the central European average.

A possible reason for the high yields from the commercial stands examined is the sufficient water supply they receive throughout the year. Grouping our data according to the soil

moisture level underlines the positive correlation between water availability and growth increment in SRWC stands, as mentioned by [10, 54], and provides some explanation for the relatively high yields measured here on commercial stands (Fig. 4). Another factor that might explain the high yields is the management intensity, which is said to have a strong influence on yields [12, 55, 56]: The commercial SRWC in this study were diligently weeded—the managers reported weed control measures one to four times during the first year. A few also reported replanting when individual plants had died. Whereas no differences were found between commercial stands and field trials in age, plants per hectare, soil moisture level, or temperature, the management intensity—particularly weed control—was much lower on the field trials: Poor application of herbicides was named by [17] as the main reason for the low yields of the field trials. The investigator of the field trials specified that during the establishment phase, it was often the case that either no weed control was carried out or it was done an insufficient number of times (only one trial was reported to have received more than one treatment). Thus, Krasuska and Rosenqvist's [6] assumption and Mola-Yudego and Aronsson's [56] finding of lower yields at commercial stands due to management failures was not supported by our data. In our case, the data available from field trials should be considered conservative rather than optimistic estimates. Consequently, assumptions of lower biomass yields in commercial stands should not be adopted generally. Rather, further studies should analyze yields of commercial stands to provide biomass data and to test whether similar trends occur.

Whereas yields from stands 5 years old and older were in line with European yield data, 3-year-old stands with low

planting densities of between 2500 and 8300 yielded 2.49 times less. This may have several explanations: First, poplar hybrids commonly used for SRWC have their optimum growth rate between the ages of 7 and 15 years [57–59]. In the first years after stand establishment, the newly planted trees use much of the available energy for root growth and to compete for light and water [60], whereas older stands are able to expend a greater amount on above-ground biomass production. Additionally, the canopy of a 3-year-old stand with a comparatively low number of plants per hectare does not encompass the entire amount of available space and, thus, does not achieve the optimum photosynthesis rate per unit of area [61].

The need to consider yield variation in economic analyses is underlined by the high variation of biomass yields of commercial stands examined in this study. The relative deviation from the mean of G3 ranged from –94 to +103 % and that of G5+ from –73 to +90 %. The coefficients of variation (CV) were 0.79 for G3 and 0.47 for G5+, accordingly. Such high deviations in yields were also found on the Bavarian field trials with 5–10-year-old stands, which ranged from –69 to +70 % (CV = 0.4) [17], reflecting the wide variation in factors that influence tree growth, such as occurrence of pests, planting density, rotation length, maintenance practices, weather, and site conditions [9–13, 62]. Consequently, the distribution of biomass yields should be taken into account in any economic evaluation of SRWC, instead of focusing on mean values.

In summary, we measured biomass yields at stands managed under real world condition and found that they were not lower than those reported from field trials, but instead were in line with European yield predictions.

Comparison of the Three Biomass Estimation Methods

Allometric Power Equation

Biomass estimation using APE is thought to be one of the most precise biomass estimation techniques for SRWC stands (see, for example, [19, 23, 26]). This observation is also borne out in all the stands examined in this study: We found no significant differences between the observed values (measured shoot weights) and estimated values (calculated shoot weights). Additionally, the Spearman's rank correlation coefficients between observed and estimated values were >0.9 at $p \leq 0.001$ in each of the stands. Thus, it is reasonable to assume that the APE method predicted the individual shoot weight for every stand examined with a reasonable degree of accuracy. In addition, the relative deviation of the mean observed and the mean predicted biomass per stand can be considered low, mean = 0.38 %, range from –3.88 to 2.29 %. In comparison, Nordh and Verwijst [22] stated an overall overestimation of the estimated mean stem weights (nondestructive approach) of 0.9 %, with relative deviations between –7 and 6 %. The low relative deviations found in our study can be explained by the

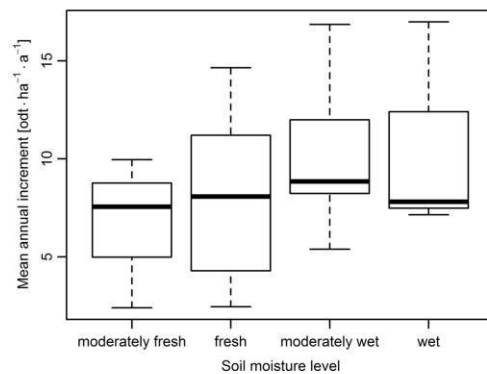


Fig. 4 Mean annual increments ($\text{odt} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) observed in commercial SRWC stands in Bavaria grouped by soil moisture level as an indicator of water availability in forest stands [42]. Both the median and the maximum of observed biomass increased with movement across the moisture level spectrum from “moderately fresh” sites to “moderately wet” areas. Upon reaching the soil moisture level “wet”—where water availability is high but deficits of oxygen at the rooting system are likely—the median of observed biomass ceased to increase

relatively high sampling effort: To establish stand-specific APE, we determined DBH and dry weight of 25 shoots selected according to the diameter distribution of the stand. In contrast, Telenius and Verwijst [25] measured approximately ten sample trees to establish the APE used in that study. By increasing the number of samples used, allometric variation of shoots can be more precisely reflected in the stand-specific APE and the estimation quality rises [47]. Additionally, we applied a systematic sampling of 250 DBHs in order to represent the diameter distribution of the stand. This systematic sampling was deemed very important by Telenius and Verwijst [25], as the person sampling the stand tends to avoid small shoots which can lead to an overestimation of stand biomass. Hence, again, accurate estimations were achieved by applying the APE method, at the cost of considerable effort and extensive amount of data it required.

Quadratic Mean Diameter

The relative bias of biomass estimation using three QMD shoots per stand was low (-6.15%). This means that, using this method, the sum of biomass for all of the stands examined was underestimated by -6.15% . This value falls between the relative biases for biomass estimation in SRWC using the simplified models reported by [63], who listed relative biases between 0 and -29.99% . In comparison to biomass estimation with only one QMD shoot (relative bias= -6.14), the increased sampling effort required to provide an average weight from three stems with the QMD did not lead to improvement in terms of the relative bias. Given that the bias of the QMD approach using one sample tree and the one using three sample trees were similar, we recommend that the summed biomass of several stands can be estimated with less effort yet the same accuracy using just one rather than several QMD samples.

In terms of precision, strong differences were found between biomass estimation using only one QMD (precision= 35.3% [33]) and estimation using three. The addition of two additional samples per stand in our study improved the relative precision to 13.3% . Furthermore, the range of relative deviations was reduced from -50.43 to 12.3% to -23.21 to 32.59% . As the range of deviations usually increases with increasing sampling effort [47], a lowered range of relative deviation also underlines the increased precision gained using three QMDs. The improved precision, due to the increase in the number of sample trees from one to three in our study, was particularly obvious in stands that were 5 years old or older. There, the range of relative deviations dropped to between -20.5 and 12.17% , with a relative precision of 12% .

We conclude that the QMD approach is a reasonable approach for deriving the biomass of SRWC stands, as has been reported for forest stands for decades [32]. The QMD approach is appropriate for use by practitioners, both because the know-how required is low in comparison to the APE

approach and because the relative bias and relative precision are both lower than has been reported for other biomass estimation approaches with little data requirement (see, for example, [25, 63, 64]). Due to the low relative bias of -6.15% , the estimation technique might even be interesting to scientists if the sum of biomass yields of several stands were of interest, or if the biomass potential for a whole region must be derived; as the relative bias would not be expected to differ significantly, the biomass can be derived by sampling one QMDs. If the biomass of one certain stand were of interest, however, three rather than only one QMD should be sampled in order to achieve higher precision. Biomass estimation based on three sampled QMDs was both less biased and more precise in 5-year-old and older stands—with an overall range of deviation of just 32.7% —than in younger stands. This is of particular interest, as the number of sample trees used for biomass estimation by QMD is much lower than for the APE method. The advantage of a lower number of sample trees increases as the shoots get older and heavier.

Yield Appraiser

The application of the YA to Bavarian SRWCs resulted in an average bias of -12.97% . This is in line with biases of other generalized biomass estimation procedures. For example, both Arevalo et al. [64] and Telenius and Verwijst [25] reported relative biases of about 10% , and relative precisions of between 25.5 and 38.7% [64] and 22 and 31% [25]. Thus, the 21.87% precision obtained from the YA is higher than that from QMD approach but relatively low in comparison to other generalized biomass estimation approaches. MAIs of SRWCs with biomass yields of up to 50 odt ha^{-1} (19 of 30 SRWCs) were determined with an average bias of -4% using this approach, whereas SRWCs with MAIs of more than 50 odt ha^{-1} showed a higher underestimation of -19.1% .

Both the relative bias and relative precision of yields correlate with the individual stand mean height (Spearman's rank correlation coefficient= 0.85 , $p=0.0047$) and the number of shoots (Spearman's rank correlation coefficient= 0.54 , $p\leq 0.001$). Increasing relative bias of the estimation beginning at mean stand heights of about 10 m and number of shoots per hectare of about 6000 was found. Both parameters, which correlated with the biomass yield, showed interactions (Fig. 5): For example, a biomass yield of about 89 odt ha^{-1} was achieved with a mean stand height of 11.3 m as well as with a mean height of 13.5 m . The stand with 11.3 m mean height achieved the same biomass yield due to its higher stand density (about 2400 shoots more than the 11.3-m high stand), which in turn complies with the estimation of the YA. Thus, a parametrization that considers variation in mean heights and planting densities is crucial and needs to be reflected by the regression coefficients, as it is the case for the YA.

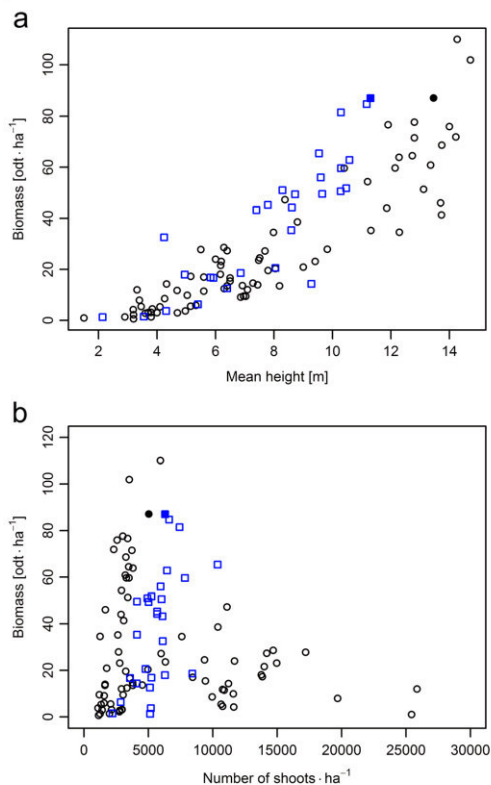


Fig. 5 Relationship between mean stand height (m) and biomass (odt ha^{-1}) (a) (Spearman's rank correlation coefficient=0.85, $p=0.0047$), and relationship between number of shoots per hectare and biomass (odt ha^{-1}) (b) (Spearman's rank correlation coefficient=0.54, $p<0.001$) for individual stands. The data pairs that were used for the parameterization of the "yield appraiser" are presented as circles, and the Bavarian validation data are presented as squares. The filled symbols exemplarily show stands with equivalent biomass yields but different mean heights or different shoot numbers per hectare

Generally speaking, the Bavarian validation data pairs (Fig. 5, squares) followed the trend of the scatter diagram of the parameterization data set (circle). Nevertheless, effects due to the lack of sufficient parameterization data were detectable: The mean stand heights in the validation plots were lower than those in the parameterization plots with identical biomass. This was particularly true in the upper range of biomass (more than 50 odt ha^{-1}) and can be attributed to a comparatively greater number of shoots in the validation plots. The systematic underestimation of the biomass yield of the validation data in the upper biomass range can be explained by the missing parameterization data of stands with both relatively higher shoots numbers per hectare at lower mean heights.

Springer

Summary Assessment of the Biomass Estimation Methods Investigated and Conclusions

The present study examined the yields of 30 commercial SRWC stands in the first rotation in Bavaria. Three biomass estimation methods were applied and evaluated with regard to bias and precision. Yields in 5-year-old and older commercial stands (mean MAI= $8.93 \text{ odt ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) were higher, not lower, than those reported in Bavarian field trials of comparable ages, contrary to predictions. The high standard deviation of yields due to the variety of growth and management conditions present among the different commercial stands highlights the importance of taking into account yield uncertainties in economic analyses instead of relying on mean values. Although the stands examined were cultivated on below-average agricultural sites (see Table 1 and [34]), the calculated yields agree with previously reported central European yield prospects for poplar, probably due to the sufficient water supply that characterized the majority of the stands investigated, as well as proper management—particularly weed control. Hence, diligently managed SRWCs on sites that are capable of producing high SRWC yields but disproportionally low biomass yields from conventional crops seems to be an efficient way to ease the problem of biomass production with SRWC competing with food production. These trends, however, must be validated in further studies. The MAI of stands 5 years old or older was, on average, 2.49 times higher than that of 3-year-old stands with similar planting densities. We were able to provide quantitative support for the assumption that the QMD—long used as one of the key methods in forest mensuration [32]—can be used in SRWC stands to estimate biomass. Biomass estimations using three QMD samples led to an average relative bias of -6.15% , and a relative precision of 13.32% . As this sampling procedure is easier and less destructive than the APE method, the QMD method seems useful for practitioners interested in biomass yields of single stands or in the sum of biomass yields of larger areas. The low relative bias of the QMD method implies that it can also serve data for scientific purposes: if the sum of biomass yields for larger areas is of interest, e.g., per farm or region; second, it is also useful for single stands if the level of precision is appropriate for the purposes of the estimation. Thus, accuracy, the amount of effort, time, and level of knowledge required to use this method fall between that of the APE and YA methods. The significant reduction in the required number of sampled trees compared with the APE method leads to relatively little work and time demand, which is of particular interest in older stands (5 years and older), when the weight of a single shoot is greater, and thus, the shoots are difficult for one or even two people to handle. It is also appropriate when it is practical to only harvest a few shoots (e.g., in small stands or field trials). In younger stands, the time required to find three shoots with the QMD and conduct the sampling on them was comparable

with the time it took to sample the 25 trees according to the diameter distribution of the stand for the APE method. Hence, in young stands with low shoot weights, the APE method should be carried out if the practitioner has the necessary knowledge, as the estimation quality is high in relationship to the amount of work required.

Application of the YA model can be recommended for practitioners based on the results for SRWC in the lower and medium biomass ranges presented here and due to its simple, nondestructive application method. This range corresponds to SRWC with a mean stand height up to about 9 m. Under these circumstances, it is possible to achieve a yield determination with an average relative bias of -4 %. With an overall bias of -12.97 % and a relative precision of 21.87 %, this yield determination method can be recommended even for stands with larger mean heights if time and cost efficiency are of particular importance. Thus, biomass amounts can be estimated without destructive biomass sampling. Furthermore, an “easy-to-apply-software” and handbook are already available (see Acknowledgments), making this method even easier for practitioners to use. However, the high range of relative deviations and relatively low precision leads to somewhat uncertain estimation results for individual stands. We assume that the precision of the YA can be improved by an extension of the parameterization data, such as the inclusion of data from stands showing properties similar to the Bavarian validation stands.

Acknowledgments Our research received funding from the Bayerisches Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst. We wish to thank the SRWC operators who allowed us to measure their stands, as well as our colleagues from the Straubing Center of Science, and Ulrike K. Müller for their helpful suggestions on the manuscript and Laura Carlson for language editing. Further, we gratefully acknowledge the anonymous reviewers for their valuable and constructive comments on our manuscript, and Tobias Aschwer, Benedikt Buchholz, and Johannes Schmid for their assistance with the data collection. A computer program was developed for an easy application of the Yield Appraiser that can be accessed under the address (http://www.forst.tu-dresden.de/Waldwachstum/uploads/downloads/schaetzer_weide-pa/index.php).

Conflicts of Interest All authors have agreed to the submission of the manuscript and do not have any conflicts of interest concerning this submitted manuscript. The work presented complies with the ethical guidelines of BioEnergy Research.

References

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2011) State of the world's forests 2011. FAO, Rome
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2010) Global forest resources assessment 2010. Main report. FAO forestry paper, vol 163. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2015) The European forest sector outlook study II. 2010–2030. <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/publications/sp-28.pdf>
4. Don A, Osborne B, Hastings A et al (2012) Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. *Glob Chang Biol Bioenergy* 4(4):372–391. doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01116.x
5. Hauk S, Knoke T, Wittkopf S (2014) Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—a review. *Renew Sust Energ Rev* 29:435–448. doi:10.1016/j.rser.2013.08.103
6. Krasuska E, Rosenqvist H (2012) Economics of energy crops in Poland today and in the future. *Biomass Bioenergy* 38:23–33. doi:10.1016/j.biombioe.2011.09.011
7. Ericsson K, Rosenqvist H, Nilsson LJ (2009) Energy crop production costs in the EU. *Biomass Bioenergy* 33(11):1577–1586. doi:10.1016/j.biombioe.2009.08.002
8. Heaton RJ, Randerson PF, Slater FM (1999) The economics of growing short rotation coppice in the uplands of mid-Wales and an economic comparison with sheep production. *Biomass Bioenergy* 17(1):59–71. doi:10.1016/S0961-9534(99)00025-2
9. Bullard MJ, Mustill SJ, McMillan SD et al (2002) Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp.—1. Yield response in two morphologically diverse varieties. *Biomass Bioenergy* 22(1):15–25. doi:10.1016/S0961-9534(01)00054-X
10. Petzold R, Feger K, Röhle H (2010) Standortliche Voraussetzungen für Kurzumtriebsplantagen. In: Bemmman A, Knust C (eds) *Agrowood. Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*, 1st edn. Weißensee Verlag, Weissensee-Verl, Berlin [German]
11. Liebhard P (2007) *Energieholz im Kurzumtrieb. Rohstoff der Zukunft. Praxisbuch*. Stocker, Graz, Stuttgart [German]
12. Dimitriou I, Rosenqvist H, Berndes G (2011) Slow expansion and low yields of willow short rotation coppice in Sweden; implications for future strategies. *Biofuels and bioenergy: challenges and opportunities*. Proceedings of a joint workshop of IEA Bioenergy Tasks 29, 31 and 39, August 2006, Vancouver, British Columbia, Canada 35(11):4613–4618. doi:10.1016/j.biombioe.2011.09.006
13. Verlinden MS, Broeckx LS, Van den Bulcke J et al (2013) Comparative study of biomass determinants of 12 poplar (*Populus*) genotypes in a high-density short-rotation culture. *For Ecol Manag* 307:101–111. doi:10.1016/j.foreco.2013.06.062
14. Serapiglia MJ, Cameron KD, Stipanovic AJ et al (2013) Yield and woody biomass traits of novel shrub willow hybrids at two contrasting sites. *Bioenergy Res* 6(2):533–546. doi:10.1007/s12155-012-9272-5
15. Biertümpfel A, Graf T, Vetter A (2012) *Ölfrüchte und Nachwachsende Rohstoffe. Feldversuchsbericht 2010 und 2011*, Jena. [German]
16. Röhle H (2012) Ertragspotential zeitlicher Beimischungen schnellwachsender Baumarten in Hochwaldsystemen im Vergleich zu Kurzumtriebsplantagen. *HeRo Biomasse-Kolloquium*, Witzenhausen [German]
17. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (ed) (2012) *Biomasseproduktion von Kurzumtriebsplantagen. Ertragskundliche Ergebnisse des Projekts “Anbauversuche mit schnellwachsenden Baumarten im Kurzumtrieb”*. [German]
18. Caputo J, Balogh SB, Volk TA et al (2014) Incorporating uncertainty into a life cycle assessment (LCA) model of short-rotation willow biomass (*Salix* spp.). *Crops Bioenergy Res* 7(1):48–59. doi:10.1007/s12155-013-9347-y
19. Verwijst T (1991) Logarithmic transformations in biomass estimation procedures: violation of the linearity assumption in regression analysis. *Biomass Bioenergy* 1(3):175–180. doi:10.1016/0961-9534(91)90026-9

20. Röhle H (2008) Methoden zur Schätzung der Ertragsleistung in Kurzumtriebsbeständen. In: Hüttl R, Gerwin W, Bens O et al (eds) Holzherzeugung in der Landwirtschaft. Beiträge zur 3. Fachtagung "Anbau und Nutzung von Bäumen auf Landwirtschaftlichen Flächen", Kooperationsveranstaltung von DENDROM, AGROFORST und AGROWOOD an der BTU Cottbus vom 28. - 30.04.2008. Forschungszentrum Landschaftsentwicklung und Bergbaulandschaften, Cottbus, pp 91–100 [German]
21. Röhle H (2009) Arbeitskreis Biomasse: Verfahrensempfehlung zur Methodik der Biomasseermittlung in Kurzumtriebsbeständen. In: Nagel J (ed) Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten Sektion Ertragskunde. Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung 2009, pp 220–226. [German]
22. Nordh N, Verwijst T (2004) Above-ground biomass assessments and first cutting cycle production in willow (*Salix* sp.) coppice—a comparison between destructive and non-destructive methods. *Biomass Bioenergy* 27:1–8
23. Verwijst T, Telenius B (1999) Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *For Ecol Manag* 121:137–146
24. Röhle H, Hartmann K, Gerold D et al (2006) Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände. *Allg Forst- Jagdztg* 177(10–11):178–187 [German]
25. Telenius B, Verwijst T (1995) The influence of allometric variation, vertical biomass distribution and sampling procedure on biomass estimates in commercial short-rotation forests. *Bioresour Technol* 51(2–3):247–253. doi:10.1016/0960-8524(94)00133-L
26. Vasudevan P, Madan M, Singh A (1986) Estimating the above ground biomass of *Ipomoea fistulosa* by regression methods. *Biomass* 11(3):223–230. doi:10.1016/0144-4565(86)90069-7
27. Aust C, Schweier J, Brodbeck F et al (2014) Land availability and potential biomass production with poplar and willow short rotation coppices in Germany. *GCB Bioenergy* 6(5):521–533. doi:10.1111/gcb.12083
28. Hartmann K- (2010) Entwicklung eines Ertragsschätzers für Kurzumtriebsbestände aus Pappel, Technische Universität Dresden. [German]
29. Oliveira N, Sixto H, Cañellas I et al (2014) Productivity model and reference diagram for short rotation biomass crops of poplar grown in Mediterranean environments. *Biomass Bioenergy*. doi:10.1016/j.biombioe.2014.09.019
30. Skibbe K, Horn H, Röhle H (2013) Ertragsschätzung von Kurzumtriebsplantagen. *AFZ-DerWald* 7:50–52 [German]
31. Kramer H, Akça A (2008) Leitfaden zur Waldmesslehre, 5th edn. Sauerländer, J D, Frankfurt am Main [German]
32. Prodan M (1965) Holzmesslehre. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M [German]
33. Hauk S, Wittkopf S (2011) Results of testing various biomass estimation methods for short rotation coppice with poplar (suitable to Southern German conditions). In: Benwood project consortium (ed) Short rotation forestry and agroforestry: an exchange of experience between CDM countries and Europe. pp 141–149
34. Hauk S, Wittkopf S, Knoke T (2014) Analysis of commercial short rotation coppices in Bavaria, southern Germany. *Biomass Bioenergy* 67:401–412. doi:10.1016/j.biombioe.2014.05.027
35. Schreiner EJ (1970) Mini-rotation-forestry. Accessed 25 Sep 2014
36. Willebrand E, Ledin S, Verwijst T (1993) Willow coppice systems in short rotation forestry: effects of plant spacing, rotation length and clonal composition on biomass production. *Biomass Bioenergy* 4(5): 323–331. doi:10.1016/0961-9534(93)90048-9
37. Nielsen UB, Madsen P, Hansen JK et al (2014) Production potential of 36 poplar clones grown at medium length rotation in Denmark. *Biomass Bioenergy* 64:99–109. doi:10.1016/j.biombioe.2014.03.030
38. Schweier J, Becker G (2012) Motor manual harvest of short rotation coppice in South-West Germany. *Allg Forst- Jagdztg* 178(7–8):159–167
39. Spinelli R, Nati C, Magagnotti N (2009) Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. *Biomass Bioenergy* 33(5): 817–821. doi:10.1016/j.biombioe.2009.01.001
40. Schweier J, Becker G (2013) Economics of poplar short rotation coppice plantations on marginal land in Germany. *Biomass Bioenergy* 59:494–502. doi:10.1016/j.biombioe.2013.10.020
41. Deutscher Bundestag (2007) Bodenschätzgesetz. *BodSchätzG*. <https://www.juris.de/purl/gesetze/BodSch%C3%A4tzG>. Accessed 23 February 2015. [German]
42. Arbeitskreis Standortskartierung (2003) Forstliche Standortsaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen, 6. Aufl. IHW-Verl., Echting bei München. [German]
43. Hytönen J (1994) Effect of cutting season, stump height and harvest damage on coppicing and biomass production of willow and birch. *Biomass Bioenergy* 6(5):349–357. doi:10.1016/0961-9534(94)E0029-R
44. Core Team R (2014) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna
45. Afas NA, Marron N, van Dongen S et al (2008) Dynamics of biomass production in a poplar coppice culture over three rotations (11 years). *For Ecol Manag* 255(5–6):1883–1891. doi:10.1016/j.foreco.2007.12.010
46. Vanclay JK, Skovsgaard JP (1997) Evaluating forest growth models. *Ecol Model* 98(1):1–12. doi:10.1016/S0304-3800(96)01932-1
47. Walther BA, Moore JL, Rahbek C (2005) The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing the performance of species richness estimators, with a literature review of estimator performance. *Ecography* 28(6):815–829. doi:10.2307/3683546
48. Pretzsch H, Durksy J (2001) Evaluierung von Waldwachstumssimulatoren auf Baum- und Bestandesebene. *Allg Forst- Jagdztg* 172(8–9):146–150 [German]
49. Christerson L (2008) Poplar plantations for paper and energy in the south of Sweden. *Biomass Bioenergy* 32(11):997–1000. doi:10.1016/j.biombioe.2007.12.018
50. Manzone M, Airoidi G, Balsari P (2009) Energetic and economic evaluation of a poplar cultivation for the biomass production in Italy. *Biomass Bioenergy* 33(9):1258–1264
51. Musshoff OJK (2010) Die Umstellung landwirtschaftlich genutzter Flächen auf Kurzumtriebsplantagen—Eine Anwendung des Realoptionsansatzes. *Allg Forst- Jagdztg* 181(9–10):175–188 [German]
52. Kröber M, Heinrich J, Wagner P et al (2010) Ökonomische Bewertung und Einordnung von Kurzumtriebsplantagen in die gesamtbetriebliche Anbaustruktur. In: Bemmann A, Knust C (eds) *Agrowood. Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*, 1st edn. Weißensee Verlag, Weissensee-Verl, Berlin, pp 217–229 [German]
53. Strauss CH, Wright LL (1990) Woody biomass production costs in the United States: an economic summary of commercial *Populus* plantation systems. *Sol Energy* 45(2):105–110. doi:10.1016/0038-092X(90)90035-B
54. Yin C, Pang X, Chen K (2009) The effects of water, nutrient availability and their interaction on the growth, morphology and physiology of two poplar species. *Environ Exp Bot* 67(1):196–203. doi:10.1016/j.envexpbot.2009.06.003
55. Stoll B, Dohrenbusch A (2009) Der Einfluss der Flächenvernutzung und Begleitwuchsregulierung auf den Anwuchserfolg von Energieholzplantagen. *Allg Forst- Jagdztg* 181(3/4):71–76 [German]
56. Mola-Yudego B, Aronsson P (2008) Yield models for commercial willow biomass plantations in Sweden. *Biomass Bioenergy* 32(9): 829–837. doi:10.1016/j.biombioe.2008.01.002
57. Schirmer R (2009) Sortenprüfung von Pappelklonen—Voraussetzung für einen erfolgreichen Energieholzanbau. Testing of cultivars of poplar (*Populus spec.*) clones—qualifications required for successfully cultivating short rotation energy wood. In:

- Maurer W, Haase B (eds) Holzproduktion auf forstgenetischer Grundlage im Hinblick auf Klimawandel und Rohstoffverknappung. The production of wood based on forest genetic aspects with respect to climate change and shortage of basic materials. pp 123–129
58. Hofmann M (2005) Pappeln als nachwachsender Rohstoff auf Ackerstandorten—Kulturverfahren, Ökologie und Wachstum unter dem Aspekt der Sortenwahl. Printec Offset, Kassel [German]
59. Unseld R (1999) Kurzumtriebsbewirtschaftung auf landwirtschaftlichen Grenzertragsböden. Biomassenproduktion und bodenökologische Auswirkungen verschiedener Baumarten. Berichte aus der Agrarwissenschaft. Shaker, Aachen [German]
60. Gallagher T, Shaffer B, Rummer B (2006) An economic analysis of hardwood fiber production on dryland irrigated sites in the US Southeast. Proceedings of the 5th Biennial meeting of the Short Rotation Woody Crops Operations Working Group in conjunction with International Energy Agency Bioenergy, Task 30, Short Rotation Crops for Bioenergy Systems and International Union of Forest Research Organization, Working Unit 1.09.01, Integrated Research in Temperate Short-Rotation Energy Plantations. Biomass Bioenergy 30(8–9): 794–802. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.08.004
61. Murach D, Hartmann H, Walotek P (2008) Ertragsmodelle für landwirtschaftliche Dendromasse. In: Murach D, Knur L, Schultze M (eds) DENDROM—Zukunftsrohstoff Dendromasse. Systemische Analyse, Leitbilder und Szenarien für die nachhaltige energetische und stoffliche Verwertung von Dendromasse aus Wald- und Agrarholz: Endbericht. Kessel, Remagen-Oberwinter, pp 93–116 [German]
62. Lu S, Chen B, Li S et al (2013) Variations of whole-tree transpiration of poplar with different diameters in the wet and dry seasons. J Food Agric Environ 11(2):1262–1267
63. Zabek LM, Prescott CE (2006) Biomass equations and carbon content of aboveground leafless biomass of hybrid poplar in Coastal British Columbia. For Ecol Manag 223(1–3):291–302. doi:10.1016/j.foreco.2005.11.009
64. Arevalo CBM, Volk TA, Bevilacqua E et al (2007) Development and validation of aboveground biomass estimations for four *Salix* clones in central New York. Biomass Bioenergy 31(1):1–12. doi:10.1016/j.biombioe.2006.06.012

8.7 Veröffentlichung IV

Hauk, S.; Gandorfer, M.; Wittkopf, S.; Müller, U.K.; Knoke, T. (2015): Ecological diversification is economically profitable - farmers should include short rotation woody crops for bio-energy in their land-use portfolios. *Global Change Biology Bioenergy*. Zur Publikation eingereichtes Manuskript¹¹

¹¹ Beitrag von Sebastian Hauk (85 %): Datenakquise, Datenbearbeitung, statistische Analysen und Interpretation der Ergebnisse sowie Erstellen des Manuskripts. Beitrag von Thomas Knoke, Stefan Wittkopf, Markus Gandorfer und Ulrike Müller: konstruktive Kritik an der Datenauswertung und Interpretation der Ergebnisse sowie Korrektur des Manuskripts.

Ecological diversification is economically profitable – farmers should include short rotation woody crops for bio-energy in their land-use portfolios

Sebastian Hauk^{1,3}, Markus Gandorfer², Stefan Wittkopf³, Ulrike K. Müller⁴,
Thomas Knoke¹

¹ Institute of Forest Management, Center of Life and Food Sciences Weihenstephan, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising Weihenstephan, Germany, E-Mail: ga82bow@mytum.de and knoke@forst.wzw.tum.de

² Chair Group Economics of Horticulture and Landscaping, Center of Life and Food Sciences Weihenstephan, Technische Universität München, Alte Akademie 16, 85350 Freising, Germany, E-Mail: markus.gandorfer@tum.de

³ Chair of Wood Energy, Faculty of Forestry, University of Applied Sciences Weihenstephan-Triesdorf, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 3, 85354 Freising Weihenstephan, Germany, E-Mail: ga82bow@mytum.de and stefan.wittkopf@hswt.de

⁴ Department of Biology, California State University Fresno, 2555 E San Ramon Avenue, Fresno, CA 93740, USA, E-Mail: umuller@csufresno.edu

Type of Contribution: Original Research

Correspondence: Thomas Knoke, Institute of Forest Management, Center of Life and Food Sciences Weihenstephan, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising Weihenstephan, Germany

E-Mail: knoke@forst.wzw.tum.de; Phone: +49-8161-715911; Fax: +49-8161-714545

Abstract

Short rotation woody crops (SRWC) feature high biomass productivity and provide positive external effects, such as reduced soil erosion, increased soil life, and reduced nitrate leaching compared with most common bioenergy plants. However, they are not widespread in intensive cropping systems because they are thought to be less economically viable and perceived as more risky than conventional crops. Nevertheless, the perceived uncertainty as main barrier of adoption has not been addressed sufficiently, since the economic risk of SRWC has not been quantified and compared with conventional crops so far. Another shortcoming of recent economic evaluations is that they are based on mutually exclusive comparisons of alternative investments. In fact, SRWC can be considered as assets of agricultural portfolios, whereby diversification effects are expected due to different ecology, products, and markets. To address these shortcomings, we quantified the economic risk of SRWC and conventional crops and applied the Modern Portfolio Theory to evaluate the economic effects of SRWC at the farm level in a low- and high-yielding study region in Bavaria (Germany). In SRWC-crop comparisons, SRWC showed the lowest economic risk of all crops compared and gross margins which were competitive with most alternative crops. Furthermore, the correlation of the gross margins of SRWC and agricultural crops compared was relatively low. Therefore, the inclusion of SRWC into existing farm production plans offered economic diversification, whereby the profitability at farm scale increased, while lowering risk. Thus, diversifying cash crop rotations with SRWC is an effective risk-management instrument for land-use decision makers that can furthermore provide positive external effects.

Keywords: Profitability; Diversification; Land-use optimization; Risk; Modern Portfolio Theory

1 Introduction

The demand for woody biomass is increasing worldwide, for both material and for energetic use (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2009; Mather & Needle 2000). At the same time forests, the main source for woody biomass, are diminishing, and this decrease makes it more difficult for resource managers to provide woody biomass sustainably. Forest area dropped by 6.8 million ha per year, equal to 0.16 % between 1990 and 2010 (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2010). This drop was accompanied by increased greenhouse gas (GHG) emissions (Fargione *et al.* 2008) as well as loss of biodiversity and livelihood (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2010). Given these trends, it is important to find sustainable solutions that meet the increasing demand for woody biomass yet maintain natural forests and reduce the pressure on natural forests.

Woody biomass for energetic uses is experiencing a renaissance (International Energy Agency (IEA) 2013), which heats up markets further. About 8 % of the global final energy consumption is supplied by bioenergy (International Energy Agency (IEA) 2013), accounting for 1.9 bn m³ of the 3.5 bn m³ wood harvested (FAO 2012). To meet the increasing demand for energy from biomass, biomass production is extended to agricultural land. Such biomass production is competing with food and feed for land resources (Foley *et al.* 2011). Already 3 % of worldwide non woody crop production on agricultural land is used as bioenergy and the land devoted to bioenergy is projected to increase substantially in the 21st century (International Energy Agency (IEA) 2013; Melillo *et al.* 2009). How bioenergy will affect the environment and economy is ambiguous. On the one hand, bioenergy crops grown on marginal lands can mitigate GHG emissions (Gelfand *et al.* 2013; Fargione *et al.* 2008). Particularly perennial lignocellulosic crops can store carbon, above- and belowground (Dimitriou *et al.* 2012b; Rowe *et al.* 2009). Furthermore, bioenergy from decentralized energy supply chains provides energy security, labor, and diversified income in rural areas (Dale *et al.* 2011). On the other hand, negative impacts are – inter alia – the land consumption of bioenergy crops, carbon losses due to indirect land use change (Fargione *et al.* 2008), intensified agricultural practices along with enormous nitrous oxide emissions (Melillo *et al.* 2009), and lower water quality and quantity. To meet the increasing demand for biomass, we need sustainable systems for biomass production.

Short rotation woody crops (SRWC), fast growing tree species grown on agricultural land, provide woody biomass for energetic as well as for material use more efficiently than long-rotation forest systems grown of forest land because of their higher productivity (Hauk *et al.* 2014b; Paquette & Messier 2010). Furthermore, SRWC are more environ-

mentally beneficial than many annual bioenergy crops: First, the production of biomass and its conversion is energy efficient (Don *et al.* 2012; Djomo *et al.* 2011) because they require little to no application of pesticides and fertilizers, and few working steps. This extensive production system causes low nitrate leaching, leads to increased water quality (Dimitriou *et al.* 2012a), and positively affects soil life (Rajapaksha *et al.* 2013; Makeschin 1994) and soil quality; the effects on soils range from increased organic carbon stocks (Dimitriou *et al.* 2012b) to phytoremediation effects and phytoextraction of contaminated land (Ruttens *et al.* 2011). Second, SRWC with poplar or willow are richer in species than conventional arable land (Dauber *et al.* 2010; Rowe *et al.* 2009). Despite these benefits, SRWC are not widespread in Europe (Don *et al.* 2012) and Northern America.

The low adoption of SRWC has been attributed mainly to economic and socio-economic reasons (Hauk *et al.* 2014a; McKenney *et al.* 2014; Glithero *et al.* 2013; Neubert *et al.* 2013; Styles *et al.* 2008): high upfront establishment costs, long payback periods, lack of established markets, scarcity of land, and low or uncertain profitability. While farmers are familiar with conventional crops and are experienced with the level of and variability of returns, they lack comparable experience with SRWC. Farmers perceive SRWC as crop with high uncertainty (Sherrington & Moran 2010), less viable, and more risky than conventional agricultural crops (Sherrington & Moran 2008; Sherrington *et al.* 2008). This perception, combined with the long payback periods of SRWC, leads to adoption restraints.

Recent economic evaluations provide no clear answer regarding the economic competitiveness and risks of SRWC. Hauk *et al.* (2014a) reviewed 37 studies on the economic evaluation of SRWC: only two of the 37 studies quantified economic risk; in 43 % of all studies analyzed SRWC was identified as economically competitive; economic competitiveness depended on alternative investments and assumptions for costs and revenues of both SRWC and alternative investments. Overall, these economic evaluations of SRWC have three shortcomings. First, they compare SRWC with just one or a few alternative crops instead of considering all potential alternative land use options. Second, they neglect or underestimate risk, yet SRWC and conventional agricultural crops are subject to market and biophysical (yield) risk. Third, they do not take into account diversification, yet farmers usually grow several crops with different ecologies, products, and markets, which has the potential to lead to ecological and economic diversification (Aimin 2010). To provide reliable decision support for land-use decision makers, all potential alternative crops need to be taken into account and the economic risks as well as the effects of mixing crops need to be quantified. An approach that is capable of fulfilling these requirements is the Modern Portfolio Theory (MPT). The concept of diversification

was mathematically described by Markowitz (1952) as MPT and improved over time (see, e.g. Sharpe 1964). Its application is sophisticated in the stock industry (Graham & Harvey 2001) and there is evidence that MPT is an appropriate method to optimize land use allocation (see, e.g. Djanibekov & Khamzina 2014; Hahn *et al.* 2014; Castro *et al.* 2013; Paydar & Qureshi 2012; Hildebrandt & Knoke 2011; Knoke *et al.* 2005; Roche & McQuinn 2004; Macmillan 1992). However, this approach has not yet been used to explore potential economic diversification effects by mixing SRWC into conventional agricultural portfolios. If SRWC improves economic diversification on existing agricultural crop portfolios, this would provide an economic motivation for the ecological diversification of farm enterprises by SRWC (Fig.1).



Fig. 1: Short rotation woody crop with hybrid poplar, surrounded by conventional agricultural land use options

In order to provide land use decision makers with reliable decision support under risk, we quantified the economic performance and economic risk of SRWC and alternative crops. Furthermore, we applied the expected value-variance framework, based on the Modern Portfolio Theory (MPT) (Sharpe 1964; Markowitz 1952) to analyze the economic effects at farm level of mixing perennial woody crops into portfolios of conventional agricultural crops. The following research questions lead our conceptual analysis, which is exemplified on four selected model farms in southern Germany:

1. How high are the expected return and the standard deviation of SRWC in comparison with selected agricultural crops?
2. Are SRWC an economically efficient diversification strategy for farm enterprises?
In other words: do positive economic effects occur if farmers biologically diversify their agricultural portfolio by perennial woody crops?

2 Material and Methods

2.1 General framework, methods of capital budgeting and underlying assumptions

To demonstrate the economic effects of SRWC as part of an agricultural portfolio, we chose one high-yielding county, Aichach (AIC), and one low-yielding county, Wunsiedel (WUN), in Bavaria (Germany). For each county we selected two common farm types that focus on crop production: one type with standard cash crops (cereals and maize) and one type that can additionally grow the highly profitable root-crop potato. All crops with a share of more than 5 % of the cropland per county (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2007) were considered standard crops in each study region and thus included in the assessment.

The profitability of conventional agricultural crops was analyzed based on gross margins GM_i for conventional crops by subtracting variable costs c_i of land use i from revenues (crop prices p_i multiplied by crop yield y_i) (Eq. 1). To ensure comparability, we calculated annualized gross margins (AGM) for the perennial SRWC. AGM, which is the annuity of cash flows considering only variable costs, was stated in several studies as appropriate economic target figure to compare SRWC with conventional crops (see e.g. El Kasmioui & Ceulemans 2012; Rosenqvist & Dawson 2005; Rosenqvist H. 1996; Bergez *et al.* 1991). We used a discount rate of 5 %, the mean interest rate applied for SRWC in Europe (Hauk *et al.* 2014a).

$$GM_i = (p_i \times y_i) - c_i \quad (1)$$

We obtained the prices for agricultural products, their yields, and their variable costs for each of the study regions (Tables S1 and S2) from the Bavarian State Research Center for Agriculture (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014) and Bavarian State Office of Statistics (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014). However, no such single data base was available for the SRWC. Given that biomass price, biomass yield, land rent, and harvesting and chipping are the most important drivers for profitability (Hauk *et al.* 2014a), these factors were chosen carefully. Biomass prices were obtained from official wood chip statistics by C.A.R.M.E.N. e.V. (2015) and the costs were adopted from Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (2015), Schweier (2013) and Burger (2011). SRWC yields, which are the important representatives of biophysical risks, were derived by Hauk *et al.* (2015) who analyzed the biomass yields of commercial stands in the first rotation period in Bavaria. The average yield of the second rotation, which was

assumed as expected yield for Bavaria in our study, was computed according to Horn *et al.* (2013). Afterwards, the expected yield for Bavaria E_{y0} was adapted to the yield level of the study regions to consider specific growth conditions of the study regions according to Eq. 2:

$$y_r = \frac{E_{y0}}{E_{yp}} \times E_{yr} \quad (2)$$

with y_r being the expected SRWC yield in the study region r , E_{yp} the expected yield level for Bavaria, and E_{yr} the expected yield level in the study region. Both, E_{yr} and E_{yp} were derived by a site-specific yield model for SRWC by Jorissen *et al.* (2014).

As economic risk measure we used the standard deviation (SD) of gross margins for conventional crops and the standard deviation of annualized gross margins for SRWC. The SD as risk measures describes the variability of normally distributed parameters (Markowitz 2014; Sharpe 1964; Markowitz 1952) and thus is commonly used in finance to quantify risk. Furthermore, unlike variance, SD has the same unit as the described parameter and hence is easy to interpret.

To calculate economic risk of and the correlations between the considered crops, we choose an observation period from 2004 to 2013. Before 2004, agricultural prices were substantially influenced by agricultural subsidies and were therefore not suitable for our analysis. For agricultural crops, we applied a historic simulation approach. Since we lack extensive yield data on SRWC, from which the annual yield variability and the variability of the annualized gross margins could be derived, we approximated the yield variability of SRWC by means of Monte-Carlo-Simulations based on empirical yield data for Germany according to Kröber *et al.* (2009). To adjust the historical revenues to the current cost level we normalized the revenues of each year and each crop by dividing by the average revenue per crop (see e.g. Castro *et al.* 2015).

The assumed rotation length of SRWC was eight years at a lifespan of 24 years. Direct payments were excluded, as they are currently the same for each of the analyzed crops, including SRWC.

In the Supplementary Material (Table S1 – Table S7) all assumptions are given, made on prices, yields, and variable costs of each crop.

2.2 Financial modeling – the Modern Portfolio Theory

The theoretical core of our land use optimization approach is based on financial theory around portfolio selection developed by Markowitz (1952) and revised by Sharpe (1964). The purpose of the MPT – based on quadratic optimization using an expected value-variance framework – is to combine different investment options by varying their shares in such a way that risks are minimized at a certain return or, vice versa, the returns are maximized at a certain risk. Portfolios that achieve the highest return (in our case gross margins) at certain accepted risk (in our case the standard deviation of gross margins) or, vice versa, achieve the lowest risk at a certain return are named efficient portfolios. These efficient portfolios are analyzed and presented in sections 3.2 and 3.3. We implemented our analysis in an MS-EXCEL spreadsheet, using the MS-EXCEL-solver function.

The return of a portfolio R_p with at least two assets was calculated as the proportional f_i expected (annualized) gross margins of the assets r_i .

$$R_p = \sum_{i=1}^N f_i \times r_i \quad (3)$$

The standard deviation of returns of the portfolio σ_p , used to quantify the risk of the portfolio σ_p not only summarizes the proportional standard deviations of each of the assets, but also includes the interactions of returns between each of the asset by considering their covariance, calculated as:

$$\sigma_p = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_i \times f_j \times \text{cov}_{i,j}} \quad (4)$$

$$\text{cov}_{i,j} = k_{i,j} \times \sigma_i \times \sigma_j; \text{cov}_{i,i} = \sigma_i^2; \sum_{i=1}^N f_i = 1; f_i \geq 0$$

with, σ_p being the standard deviation of portfolio returns (set of risky assets), i, j the indices for specific assets, f_i the portfolio weight of a specific asset, σ_i the standard deviation of returns for asset i , $k_{i,j}$ the coefficient of correlation between the returns of asset i and asset j (the matrix of coefficients of correlation is given in the Supplementary Material), and $\text{cov}_{i,j}$ the covariance between the returns asset i and asset j .

We tested the gross margins (annualized gross margins) of each crop analyzed for normal distribution to ensure that this requirement for the application of the expected value-variance framework is met.

One of the perceived economic disadvantages of SRWC, in contrast to annual crops, is the long investment period along with the loss of flexibility to react to changing markets (Wolbert-Haverkamp & Musshoff 2014; Musshoff 2010). However, once a land-use decision maker is economically convinced of growing SRWC, only disproportionate shifts between the expected returns or risks of the assets would change the decision. To consider the effects of disproportionately high returns from conventional crops on our land-use allocation optimization, we included the following scenario: we set the highest gross margins of conventional agricultural crops of our time series – the level of 2012 – as the new baseline and adopted the variability from our time series; in contrast, we kept the returns of SRWC as is. The returns of each conventional crop were thus between 1.6 and 9.5 times higher (the low-yielding winter barley even 22 times higher) than the average of the time series.

3 Results

3.1 Economic assessment of selected crops at per hectare scale

Our results reveal in both study regions that SRWC was the crop with the lowest risk (standard deviation of returns) and the lowest amplitude of returns (Table 1). In other words, SRWC was not highly risky, contrary to the perception of many land-use decision makers (Sherrington & Moran 2008; Sherrington *et al.* 2008). Instead, it offered the steadiest gross margins. At the same time SRWC's minimum gross margins were higher than those of every crop we compared. More impressively, SRWC cultivation yielded no negative gross margin. Hence, SRWC showed economic strengths particularly under unfavorable conditions (market or growth conditions). The crop with the second lowest risk in both of the study regions was rye, but returns were consistently low. In contrast to rye, SRWC showed the second highest returns of 617 € ha⁻¹ a⁻¹ in the high-yielding study region and the fifth highest average returns of 287 € ha⁻¹ a⁻¹ in the low-yielding study region for the period between 2004 and 2013. The highest returns by far were achieved by potatoes with 3204 € ha⁻¹ a⁻¹ or 3862 € ha⁻¹ a⁻¹. However, potatoes also had the highest variability in their returns. Spring barley had the second highest return of 442 € ha⁻¹ a⁻¹ at moderate risk of 533 € ha⁻¹ a⁻¹. Thus, SRWC provided the steadiest returns, and the expected returns were competitive with most other crops. The correlation of expected returns between the comparison crops were comparably low for SRWC (Table S6 and Table S7); which is the basis for economic diversification effects.

Table 1: Economic performance of selected agricultural crops and SRWC in two study regions for the period between 2004 and 2013. In both study regions SRWC showed the lowest economic risk, expressed by the standard deviation (SD) of gross margins

Crop	Aichach-Friedberg (high yielding study region)				Wunsiedel (low yielding study region)			
	Gross margins [€ ha ⁻¹ a ⁻¹]							
	Min.	Max.	Mean	SD	Min.	Max.	Mean	SD
Silage Maize	-777	893	-186	500	-736	715	-246	436
Rye	-	-	-	-	-394	479	-50	306
Barley	-314	1098	234	507	-384	662	21	384
Maize	-484	1376	312	616	-	-	-	-
Winter Rape-seed	-301	1238	364	481	-274	1301	293	474
Winter Wheat	-248	1281	467	603	-350	1177	310	527
Spring Barley	-	-	-	-	-82	1269	442	533
Potato	-1072	8322	3862	3285	-606	7171	3204	2709
SRWC	133	1048	617	338	6	559	287	235

The low economic risk, associated with growing SRWC was underlined by the cumulative frequencies of gross margins (annualized gross margin of SRWC) of the comparison crops (Fig. 2).

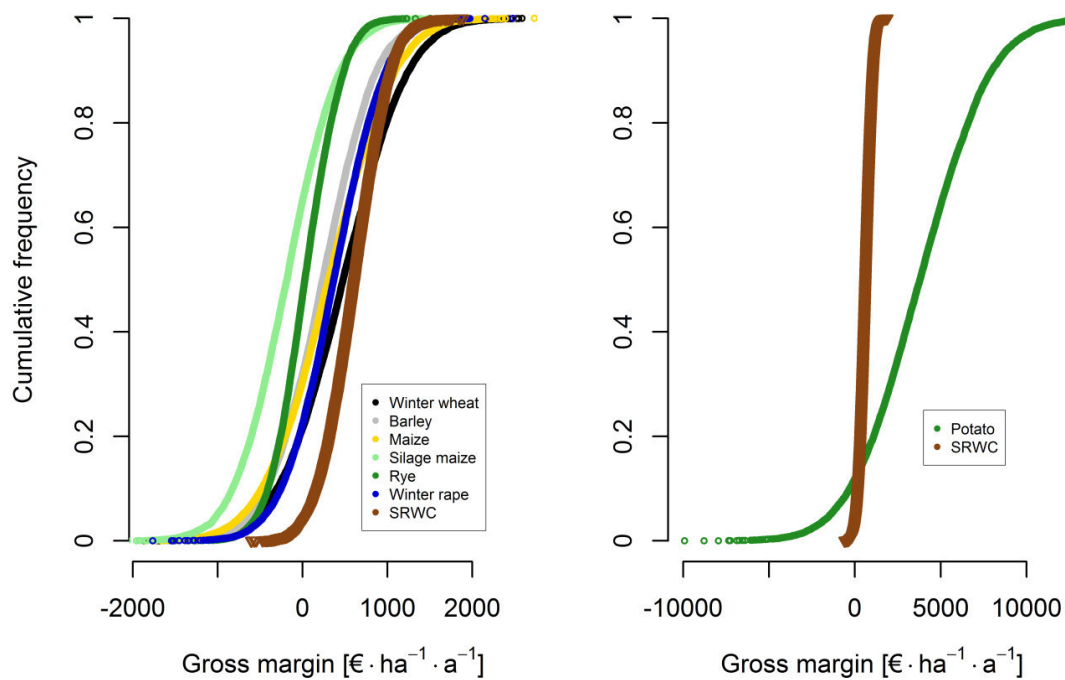


Fig. 2: Cumulative frequencies of gross margins (annualized gross margins of SRWC) of the comparison crops. Exemplified by the high-yielding study region Aichach-Friedberg

In terms of risk, SRWC offered two more economic advantages: the lowest amplitude of gross margins and the lowest probability of negative gross margins (or annualized gross margins of SRWC) per hectare compared with all other considered cereal crops (lowest lower partial moment 0th order (Harlow & Rao 1989)). Furthermore, SRWC showed second order stochastic dominance (Brandes 1992) over all cereal crops. Thus, land-use decision makers should opt for SRWC instead of cereal crops independent of their degree of risk aversion.

3.2 The economic influence of SRWC on agricultural portfolios under risk – economic effects at farm scale

At the farm-level perspective, SRWC had further economic advantages. The lowest economic risk (variability of gross margins) at farm scale was achieved by growing 100 % SRWC (Fig. 3 green crossed lines); in all model farms.

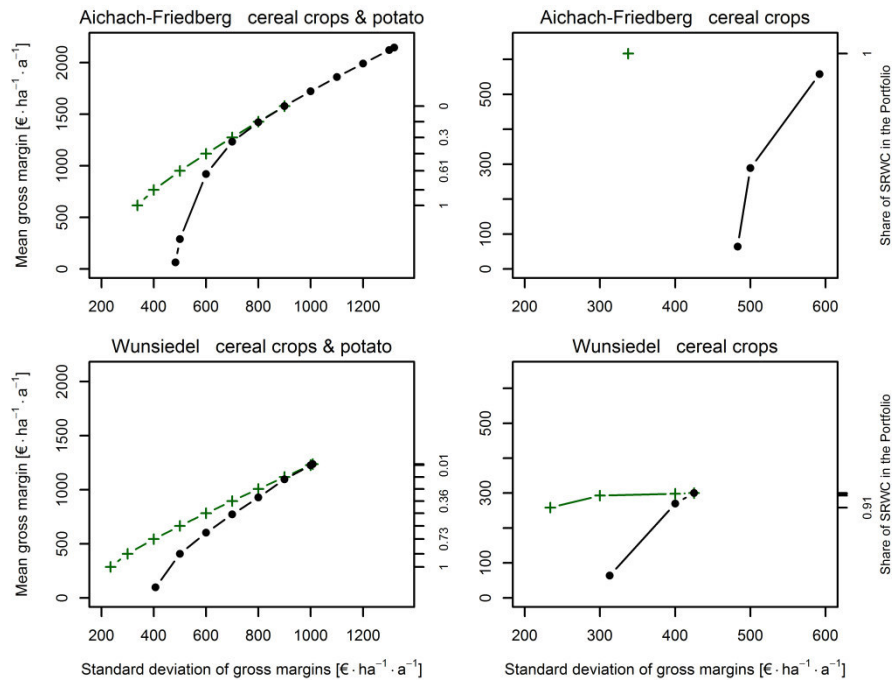


Fig. 3: Efficient portfolios of farm enterprises in the high yielding study region (Aichach-Friedberg) and the low yielding study region (Wunsiedel) in a world with disproportionately increased profitability of conventional crops. The efficient portfolios consisting of conventional agricultural crops are given as black dotted line. Efficient portfolios for which SRWC were allowed additionally are given as green crossed line; the second y-axis indicates the shares of SRWC in the portfolios

Thereby, expected returns achieved were higher than with conventional crops only, if risk minimization is assumed to be the main objective of the land use decision maker. At the cereal farm in the high-yielding study region AIC (Fig. 3), SRWC cultivation with shares of 100 % SRWC offered not only the lowest risk at farm scale but also the highest expected returns of 616 € ha⁻¹ a⁻¹. In contrast, without SRWC (Fig. 3 black dotted lines) the expected gross margins of the portfolio with the lowest risk consisting of conventional crop were just slightly positive. The maximum expected returns of the portfolio without SRWC, consisting of 33 % winter wheat, 25 % winter rape and 42 % maize, were 556 € ha⁻¹ a⁻¹. Thus without SWRC, expected returns were lower at higher risk. In WUN, the lowest risk was achieved by a mixture of 3 % barley, 6 % rye and 91 % SRWC at expected gross margins of 259 € ha⁻¹ a⁻¹. By growing 25 % barley, 25 % winter rape and 50 % spring barley the expected gross margins of the agricultural portfolio were raised to 300 € ha⁻¹ a⁻¹ in WUN. However, this maximization of gross margin was accompanied by an increase of the variability by almost 100 %. Thus, the pure SRWC growing farm was economically favorable over a farm growing intensively managed conventional cereal crops in the high-yielding study region. Furthermore, in the low-yielding study region high

shares of SRWC resulted in expected gross margins at the farm level that were close to the maximum possible at much lower risk than without SRWC. In both cereal farms, the variability of gross margins at the farm scale was lowered significantly by growing SRWC.

Including SRWC in the portfolio also reduces economic variability at farms that can grow the high-yielding and risky root crop potato – beside cereals. Similarly to cereal farms, the expected gross margins of portfolios with SRWC were higher, 617 and 287 € ha⁻¹ a⁻¹, than without SRWC. Without SRWC (Fig. 3 black dotted lines) the portfolio with the smallest risk in both study regions showed expected gross margins that were slightly greater than zero € ha⁻¹ a⁻¹. These portfolios with the lowest variability consisted of 27 % barley, 48 % silage maize and 25 % winter rapeseed in AIC and 50 % silage maize and 50 % spring barley in WUN. By allowing more and more risk (representing less risk averse decision makers), the expected gross margins of the portfolios without SRWC increased as the share of the high-yielding and risky crop potato, in AIC also the share of winter wheat, increased. Thus, tolerating more risk increases the expected gross margins at the farm scale. The same was true for farms that include SRWC as a portfolio asset. In this case, increasing acceptance of risk increased the share of more risky crops and decreased the share of SRWC. The shares of each crop in the land-use portfolios depending on the accepted risk are illustrated by the Wunsiedel model farm (Fig. 4).

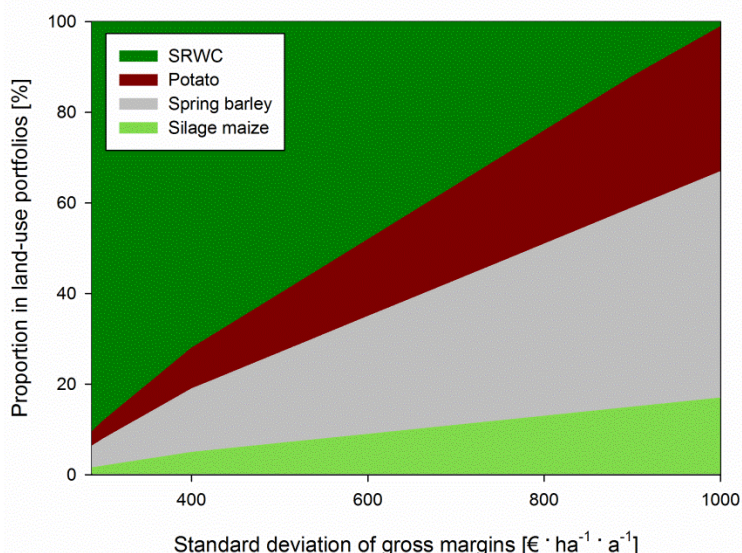


Fig. 4: Example of proportions in land-use portfolios illustrated by the Wunsiedel model farm growing high-yielding potato plus cereal crops

Yet, portfolios with SRWC achieved higher expected gross margins than those without SRWC at the same risk tolerated. Or from a risk perspective: if the farmer wants to lower risk, portfolios with SRWC deliver the same expected gross margins at a lower level of

risk (compare the portfolios with SRWC (green crossed lines) and without SRWC (black dotted lines) Fig. 3). Hence, the integration of woody crops (SRWC) into portfolios of agricultural crops led to economic diversification effects at the farm level, such as lower risk and higher gross margins. These effects occurred because the correlations of gross margins between SRWC and other crops were not perfectly positive and lower than most of the correlations between the conventional crops. In summary, these economic benefits at the farm scale occur due to ecological and economic diversification with SRWC and they have similar tendencies for the low and the high yielding study region.

3.3 The economic influence of SRWC on agricultural portfolios under risk at farm scale – in a world with disproportionately increased profitability for conventional agricultural crops

SRWC reduce risk in farm portfolios even during extreme market shift towards increased profitability of conventional crops. Our analysis in the previous section showed that SRWC are an effective strategy to reduce risk in farm portfolios if we assume typical profitability values for SRWC and conventional crops. However, this situation might change if profitability changes drastically. Farms with SRWC might not be able to respond quickly to such changes given that, unlike conventional crops, SRWC have high upfront costs and long payback times, and it is therefore economically inefficient to shut down SRWC prematurely (Buchholz & Volk 2011; Ericsson *et al.* 2006). Thus, SRWC provide less flexibility to react to changing markets than annual crops, which allow a crop choice to be made every year (Wolbert-Haverkamp & Musshoff 2014). Given this lower flexibility of SRWC, we wanted to test how robust the benefits of SRWC portfolio shares are against shifts towards higher profitability of conventional crops. To this end, we analyzed a scenario with disproportionately high gross margins for annual crops, whereby the gross margins of SRWC were kept as is. We assumed the level of expected returns for conventional crops to be the highest of the time series – represented by level of gross margins of the year of 2012 – and adopted the relative variability from the baseline scenario.

Overall, the increased profitability of conventional crops increased the expected gross margins of the portfolios at the farm-level, but also significantly increased economic risk (compare Fig. 3 and 5). Yet even in this ‘disproportional profitability’ scenario, the most effective strategy to reduce risk is as before – to include SRWC in the portfolio (Fig. 5). Only in the maximum-risk-allowed scenarios was SRWC not part of the portfolio. The prediction to include SRWC in the portfolio in all but the maximum-risk scenario emerged

from SRWC's ability to reduce risk of agricultural portfolios. In contrast to a farm-level comparison, a crop-by-crop comparison would result in recommending a portfolio with only conventional crops because such a crop-by-crop comparison focuses solely on profitability and neglects the economic interaction of returns of different crops (correlation). However, the fact that the returns of conventional crops correlate with each other, combined with the fact that the returns of conventional crops are highly variable, means that conventional crops, despite leading to a more profitable portfolio, make a portfolio much riskier than a portfolio that includes SRWC. To reduce risk, the portfolio should include alternative crops, whose returns are less variable and correlate only weakly with the other crops in the portfolio, even if that alternative crop is considerably less profitable. As in the first scenario with typical profitability, we find also in the scenario with disproportionally high profitability of conventional crops that the low economic risk of SRWC and the weak correlation between the returns of SRWC and conventional crops make SRWC an effective mechanism to reduce risk in farm portfolios.

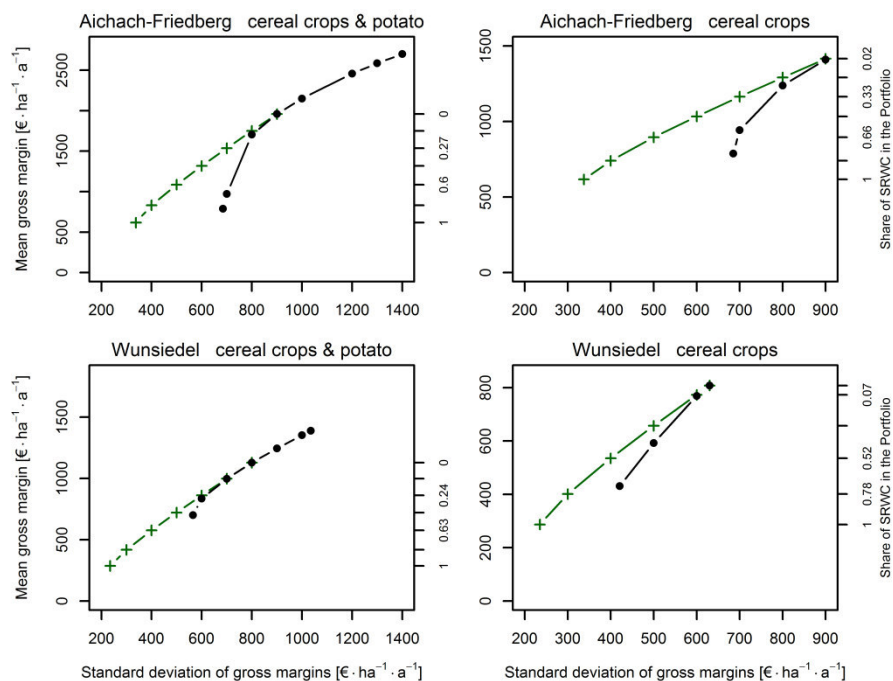


Fig. 5: Efficient portfolios of farm enterprises in the high yielding study region (Aichach-Friedberg) and the low yielding study region (Wunsiedel) in a world with disproportionally increased profitability of conventional crops. The efficient portfolios consisting of conventional agricultural crops are given as black dotted line. Efficient portfolios for which SRWC were allowed additionally are given as green crossed line; the second y-axis indicates the shares of SRWC in the portfolios

4 Discussion and conclusions

In our study SWRC emerged as an economically viable crop both in a crop-by-crop comparison and in a farm-level analysis. Our study compared the magnitude and variability of the expected returns (standard deviation) of SRWC versus selected annual crops, and tested whether SRWC are an economically efficient diversification strategy for farm enterprises. In the crop-by-crop comparison, SRWC had by far the lowest variability of gross margins. Furthermore, the annualized gross margins of SRWC were competitive with many of the comparison crops in both study regions. Hence, by considering price and yield variability in our economic analysis, we were able to not only provide quantitative decision support for land use decision makers but also to refute their perception of low economic viability and high uncertainty of SRWC (see e.g. Sherrington & Moran 2008; Sherrington *et al.* 2008).

Our farm-level analysis showed that, because prices and yields of agricultural crops and SRWC were not perfectly positive correlated, the inclusion of SRWC into agricultural crop portfolios provided a viable risk-management strategy for risk-averse land-use decision makers. So, SRWC not only have positive economic features in a crop-by-crop comparison, but also economic benefits at the farm level. By applying Modern Portfolio Theory, our approach was the first to find that SRWC reduce risk in agricultural portfolios. Our approach provided economic evidence that diversification of farm enterprises with cellulosic crops, for bioenergy or material use, not only provides environmental benefits (Dimitriou *et al.* 2012a; Dimitriou *et al.* 2012b; Don *et al.* 2012; Rowe *et al.* 2009), but also economic benefits to crop producing farm enterprises.

4.1 Economic assessment of SRWC

Our crop-based analysis revealed that SRWC had the lowest economic risk across all analyzed model farms. We looked at risks in three different ways. First, as variability in the gross margins as expressed by the standard deviation of gross margins or annualized gross margins. We found that SRWC have the lowest standard deviation of all crops considered in this study across all analyzed model farms. Second, we looked at the minimum gross margin. We found that the SRWC's minimum annualized gross margins – as representatives for the worst market conditions – were higher than the ones of all other crops considered in this study. Third, we looked at value of the minimum gross margin. We found that SRWC always yielded positive gross margins – SRWC are economically strong when market prices are low. Our findings are consistent with previous findings that the economic risk of cereal crops is higher than SRWC (Krasuska & Rosenqvist

2012; Ridier 2012; Gandorfer *et al.* 2011), even when assuming higher yield variability for SRWC (Gandorfer *et al.* 2011). (Ridier 2012) reasoned the high market risk of agricultural crops represents an extra bonus for the SRWC cultivation. The main reason for the low economic risk is that prices for woody biomass are less volatile than those of conventional agricultural crops (see C.A.R.M.E.N. e.V. (2015) and Reisenweber (2014)). For example, the coefficient of variation of biomass prices for SRWC was 0.22, whereas the values for the agricultural crops ranged from 0.3 to 0.46. These facts, underlined by the cumulative frequencies of gross margins (or annualized gross margins of SRWC) (Fig. 2), attest to the low economic risk of growing SRWC. This feature is particularly relevant for risk averse decision makers. However, the low risk found in our and previous studies is in contrast to the perceptions of land use decision makers, who assume a low viability and high uncertainty for growing SRWC (Sherrington & Moran 2008; Sherrington *et al.* 2008). Sherrington & Moran (2008) and Sherrington *et al.* (2008) explain this counterfactual perception of SRWC's risk as follows: Land use decision makers have experience with conventional crops and are aware of their possible gross margins as well as of the variability of these gross margins, but they do not with SRWC. Without experience and typically not in a position to derive such economic target figures mathematically, land use decision makers project their experience of high economic variability of conventional crops onto SRWC. By quantifying economic risk, our economic assessment of SRWC hopes to alter these perceptions and break down the main barrier to growing SRWC.

SRWC is a favorable crop not only in terms of reducing risk, but also in terms of expected gross margins. In the high-yielding study region AIC, SRWC was economically competitive with all other comparison crops, except potato. In the low-yielding study region, SRWC was competitive with three of the comparison crops (silage maize, rye, and barley), but not with spring barley, winter wheat, winter rapeseed, and potato. This finding refutes another barrier to adoption, namely that SRWC is perceived as less economically viable than conventional crops. The expected returns calculated for SRWC in our study were in line with the ones calculated by Dimitriou & Rosenqvist (2011) at a price of 7 € per Gigajoule (~ 110 € odt⁻¹) at comparable yield levels. Also, SRWC was reported to be economically competitive with other annual crops in eight out of ten years by Krasuska & Rosenqvist (2012) and Ericsson *et al.* (2006). Krasuska & Rosenqvist (2012) who assumed lower biomass prices of 70.3 € per odt – SRWC was not competitive only when cereal crops were sold for the maximum price of the time series. These findings are underlined by Ericsson *et al.* (2006) who reported that SRWC are economically competitive with annual crops, even at wood chip prices of 58 € odt⁻¹. Studies that find that SRWC underperform assume essentially lower biomass prices (e.g. Kasmioui & Ceulemans 2013). Hauk *et al.* (2014a) who reviewed 37 studies on the economics of SRWC – pub-

lished from 1990 to 2011 – found that the price for biomass is the most important factor affecting the profitability of SRWC, consistent with the findings of Ericsson *et al.* (2006), Rosenqvist & Dawson (2005) and Lothner (1991). SRWC cultivation is economically viable when sale prices for SRWC biomass are at least 77 € per odt (Manzone *et al.* 2009) to 78 € per odt (Kasmioui & Ceulemans 2013). Kröber *et al.* (2010) who carried out a risk analysis of SRWC based on Monte-Carlo-Simulations found a 73 % probability of achieving annuities greater than zero € ha⁻¹ a⁻¹ at wood chip prices of 87 € per odt; this probability increases to 99 % at an average price of 100 € per odt. Our study uses prices that represent the real sale prices of biomass in Bavaria over the last ten years: prices range from 74 (2004) to 147 € per odt (2013), with an average price of 117.4 € per odt (C.A.R.M.E.N. e.V. 2015) and thus are mainly above the break-even prices of about 78 €. Furthermore, during the last ten years wood chip prices increased significantly in southern Germany, which underlines the increasing economic competitiveness of SRWC during the last decade. Hence, the perceived main adoption barriers – low economic viability and high economic variability – were refuted by our and other recent studies, and the multiplication of these results has a strong potential to increase the SRWC cultivation.

4.2 The economic influence of SRWC on agricultural portfolios under risk

SRWC not only have a low economic risk and high economic viability, they also help farms to diversify their agricultural portfolios. Our farm-level analysis showed the lowest economic risk in all considered model farms was achieved by shares of 100 % SRWC, because SRWC had the lowest variability of gross margins within the considered period (2004-2013). At cereal farms, SRWC showed the lowest risk and high expected returns at a hectare level. Hence high SRWC shares are advisable at the farm level, in the high-yielding study region even 100 %. Although such a single focus on SRWC – pure SRWC farming with zero percent of conventional crops – minimizes risk in our model, it makes farmers vulnerable to natural and market shocks associated with SRWC because they lack crop and product diversification. There are two reasons not solely focus on SRWC but to instead maintain a diverse portfolio. First, this prediction assumes no extreme market shifts. Yet market prices are difficult to forecast and growing SRWC requires substantial capital commitment – because of the high upfront costs and long payback times of SRWC, it is economically inefficient to shut down the SRWC earlier than planned (Buchholz & Volk 2011; Ericsson *et al.* 2006). A strong market shift towards agricultural crops would increase their competitiveness and reduce the economically optimal share of SRWC. We analyzed the impact of such a market shift towards agricultural crops (see

section 3.3) and found that when conventional crops achieve high gross margins, farms fair worse in terms of maximum gross margin achievable if they grow 100 % SRWC. Instead of 100 % SRWC, farms achieve much higher gross margins with diversified portfolios – consisting of SRWC and conventional crops. Hence, we recommend less than 100 % SRWC in cereal farms. Second, this prediction is based on insufficient long-term data about the natural risks of growing SRWC (biotic and abiotic risks; see e.g. Nordman *et al.* 2005; Coyle *et al.* 2002). In the absence of such data, our study represented the yield variability based on biotic and abiotic influencing factors by using a wide range of biomass yields instead of mean values. However, future economic studies should use ecological data to quantify and implement the natural risks represented by biomass yield variability. Within these limitations, our results revealed that SRWC was an economically favorable asset for (extending) agricultural crop portfolios; from an economic point of view SRWC was even suggested to be grown at high shares in farms focusing on cereal production.

Diversification of conventional crop portfolios with SRWC is beneficial even at farms capable of growing the high yielding root crop potato. Including SRWC resulted in the lowest economic variability at the farm scale. However, also if higher risk was accepted – supposing a less risk averse farmer – farmers can expect higher gross margins if they diversify by integrating SRWC into their portfolios of conventional crops SRWC. Alternatively, instead of increasing gross margins, farmers that diversify with SRWC can reduce risk while maintaining the same expected gross margins (compare (black dotted and green crossed lines) Fig. 4). SRWC are an effective diversification strategy to lower the economic variability of farms because of their inherent low risk but more importantly because their returns correlate only weakly with conventional crops, whereas conventional crops correlate strongly with each other. The twofold reasons for this low correlation is based in the fact that conventional crops and SRWC have very different markets and biologies (see e.g. Markowitz 1952). First, the product wood (-chip) is different from products of conventional agricultural crops supplying different markets, along with different prices and price trends. Second, the biology, site requisition, and in turn productivity (biomass yield) of woody and conventional crops, are different. Similar economic benefits had already been shown for diversification of land use options: weak correlations of returns between different land use options and crops had beneficial diversification effects (see e.g. Djanibekov & Khamzina 2014; Castro *et al.* 2013; Knoke *et al.* 2005; Roche & McQuinn 2004). Our study found beneficial diversification effects even for disproportionate high returns of conventional crops. Even for farms capable of growing the high-yielding crop potato, their portfolio share of SRWC was robust against market shifts favoring conventional crops.

In summary, by taking into account price and yield variability we were able to quantify economic risk, quantify the economic strengths of SRWC, and demonstrate strong reasons to adopt SRWC through a crop-by-crop comparison. To translate our findings to the farm level, we identified the positive economic effects of diversifying conventional crop portfolios with SRWC. This diversification effects are particularly relevant to risk averse decision makers, whose land use decision is not only influenced by potential returns, but also by the underlying economic risk. For them, growing SRWC provides an effective and economically viable risk-management strategy. The multiplication of these positive economic effects of SRWC hopefully breaks down barriers to adoption, which will increase woody biomass supply, diversify farming activities, and offer ecological diversification of intensively managed farming systems.

5 Transferability, limitations and conclusions

With our farm-level approach, we provide an important complement to crop-by-crop comparisons that led to new findings at farm level. Crop-by-crop comparisons are typically based on mean values of economic target figures, assuming certain price and biomass yield for crops compared. Consequently, the outcomes of these studies strongly depend on the made assumptions and vary between studies. In contrast, our study compares crops based on empirical data for prices and yields collected over a ten-year period – the probabilities of SRWC yields were stochastically approximated based on empirical data; so rather than using estimated means, we were able to approximate gross margins or annualized gross margin distributions and do differentiated assessments. We then translated these crop-by-crop comparisons to risk management and portfolio strategies at the farm level.

Our study not only confirmed that SRWC are profitable – they have higher gross margins than all comparison crops except potato – but we also showed that SRWC have a low economic variability and therefore are able to reduce risk in farm portfolios. Diversifying farm portfolios by including SRWC is an effective risk management strategy for land use decision makers. This strategy results from the fact that the prices and yields of agricultural crops and SRWC are not strongly positively correlated. By applying the Modern Portfolio Theory to analyze the effects of SRWC cultivation on the farm level, we found many economic reasons for growing SRWC for all analyzed model farms.

Our study also showed that beneficial diversification effects are not detected by commonly used approaches (e.g. discounted cash flow approaches) that neglect economic uncertainties and the correlation of returns. Our new approach of considering SRWC as

portfolio asset of agricultural or other land use portfolios offers a new insight into the economic evaluation of sustainable SRWC. By including uncertainties in our approach, we discovered economic benefits of growing and mixing cellulosic crops for bioenergy and material use into conventional cash crop farms. These economic benefits add to the environmental benefits and ecological diversification of SRWC.

MPT provides a framework considering various alternative land use options, and uncertainties of their returns, thus drawing a more comprehensive picture on land use economics. We suggest to apply this framework in future studies that aim to analyze the profitability of SRWC as a possible land use option. We expect that the substantial biological and economical differences between SWRC and conventional agricultural crops and products will lead to similar economic effects in other regions and other farm enterprises. In order to expand our analysis to other regions and farms enterprises, the following considerations should to be taken into account:

The Modern Portfolio Theory assumes that the investor is rational and risk averse (Markowitz 1952). Whereas many land use decision makers are characterized as risk averse (Jianjun *et al.* 2015; Holt & Laury 2014; Reynaud & Couture 2012), not all are (Ewald *et al.* 2012). So our findings are particularly relevant to risk-averse land use decision makers, facilitating their decision to grow SRWC. The Modern Portfolio Theory further assumes that the returns of the assets are normally distributed (Markowitz 1952), which was true in our case. However, based on empirical data Markowitz (2014) demonstrates that a Gaussian normal distribution is not a necessary condition for applying the mean-variance framework and the Modern Portfolio Theory.

A challenge for economic evaluations of SRWC that quantify economic risks of SRWC or integrate economic risks in economic optimization is lack of data on biomass yields of SRWC; particularly scarce are data on (inter annual) yield variability. To consider yield variability in addition to price variability of SRWC, we approximated the probability distribution of SRWC yields based on a yield collection published in Kröber *et al.* (2009). This study contains yield parameters for two site-classes. By using those data, we were able to approximate yield probabilities differentiated according to these two site classes. However, the yield variability approximated not only represents inter-annual yield variability (as it is the case for conventional crops) but also yield variability due to site differences within each site class. Hence, our study likely overestimates standard deviation of yields – expect that the actual standard deviation of annualized gross margins of SRWC is even lower than the one predicted in our study. Therefore, we recommend to make more data available on biomass yields of SRWC, to intensify analyses of yield variability

(based on primary or secondary data), and finally to focus in future economic evaluations of SRWC on yield variability issues.

In this study, we explored a counterfactual scenario, namely disproportionately high returns for conventional crops. Although our time series data show that this scenario is counterfactual, it helped us to demonstrate that our main finding is highly robust – SRWC have a positive economic effect at the farm level when added to portfolios of conventional crops. Growing SRWC is an effective way for farmers to reduce risk, even in the times of drastic changes in profitability. Yet farmers perceive SRWC as a loss of flexibility to react on changing market conditions by changing crops or adjusting crop shares during the investment period. Previous studies quantified the effects of loss of flexibility due to SRWC cultivation (e.g. Wolbert-Haverkamp & Musshoff 2014; Musshoff 2012) using the Real Options Approach. The studies concluded that the loss of flexibility by growing SRWC needs to be compensated for by 1.6 times higher net present values for risk neutral decision makers than classical investment theory would suggest. However, this analysis does not take into account that growing SRWC not only purely a loss of flexibility, but that there are also aspects of SRWC that allow farmers to gain flexibility – unlike conventional crop, SRWC allow the harvest time and timing of the sale to be shifted by one or even several years. This flexibility further reduces economic variability and improves the viability of growing SRWC. To sum up, our study showed the many benefits of growing SRWC, mainly a reduced risk at the farm-level; this finding is highly robust and indicates that the costs of flexibility losses due to growing SRWC are likely overestimated in previous studies because they neglect the compensating benefits of growing SRWC.

Our findings revealed that SRWC offers an effective risk management strategy for farmers – land use decision makers – as the integration of SRWC resulted in reduced variability of profits on farm scale or in improved profits at a certain risk. On top of providing economic benefits to farm enterprises, SRWC provide positive external effects (ecosystem services) without added costs. Hence, growing SRWC or mixing SRWC into agricultural portfolios can increase the biomass supply and can provide a cost-efficient way for policy makers to achieve environmental benefits in regions with intensive farming practices. Ecological interactions between crops, which might occur by mixing SRWC into intensively managed crops, were not considered in this study, but may bring additional benefits to the ecological and economic performance of mixed wood-conventional-crop farms. SRWC can be grown on marginal land with sufficient water supply, on which conventional cash crops are low yielding and least profitable (or marginal and degraded land respectively). Such use of marginal land may increase the economic advantages of SRWC and may maximize land use efficiency. In summary, SRWC offer manifold advantages and opportunities for land-use decision makers and policy makers.

Despite these many advantages, there are many adoption restraints of land-use decision makers, such as high upfront establishment costs, long payback periods, lack of established markets, limited trialability, scarcity of land, and low or uncertain profitability (Hauk *et al.* 2014a; McKenney *et al.* 2014; Glithero *et al.* 2013; Neubert *et al.* 2013; Styles *et al.* 2008). Yet our study and other recent findings have shown that SRWC have clear benefits that should help land-use decision makers to overcome these adoption restraints and come to a more informed decision. To reap the economic benefits and ecological gains of woody biomass production by SRWC, the scientific community needs to reach out to land-use decision makers and policy makers to explain to them the opportunities and risks of SRWC in order to support rational decisions and to address adoptions restraints.

6 Acknowledgements

This research has received funding from the Bavarian State Ministry of Food, Agriculture and Forestry (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten). This work was supported by the German Research Foundation (DFG) and the Technische Universität München within the funding programme Open Access Publishing.

References

- Aimin H (2010) Uncertainty, Risk Aversion and Risk Management in Agriculture. *International Conference on Agricultural Risk and Food Security 2010*, **1**, 152–156. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210784310000197>. Accessed 04 Feb 2015.
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (2014) LfL Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten. Konventionelle und ökologische Verfahren. Available via <https://www.stmelf.bayern.de/idb/default.html>. Accessed 03 Feb 2015.
- Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) (2007) Agrarstrukturserhebung (Bodennutzung). Landwirtschaftlich genutzte Fläche. Available via <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/data?operation=abruftabelleAbrufen&selectionname=41121-202s&levelindex=1&levelid=1422903883705&index=7>. Accessed 02 Feb 2015.
- Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) (2014) Ernte-, Betriebsberichterst.(EBE):Feldfr.,Grünland. Ernte: Kreis, Durchschnittlicher Hektarertrag, Fruchtart. Available via <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online>. Accessed 19 Feb 2015.
- Bergez J, Bouvarel L, Auclair D (1991) Short rotation forestry: An agricultural case study of economic feasibility. *Bioresource Technology*, **35**, 41–47.
- Brandes W (1992) Investition, Finanzierung und Wachstum in der Landwirtschaft. 31 Tabellen. Ulmer, Stuttgart, 303 S.
- Buchholz T, Volk T (2011) Improving the Profitability of Willow Crops—Identifying Opportunities with a Crop Budget Model. *BioEnergy Research*, **4**, 85–95.
- Burger FJ (2011) Viel Energie bei wenig Aufwand. Kurzumtriebsplantagen können rund 30 Jahre lang genutzt werden. *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt*, 56. http://www.lwf.bayern.de/mitarbeiterverzeichnis/a-e/burger/30737/linkurl_3.pdf.
- C.A.R.M.E.N. e.V. (2015) Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln. Available via <http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel/jahresmittelwerte>. Accessed 02 Feb 2015.
- Castro LM, Calvas B, Hildebrandt P *et al.* (2013) Avoiding the loss of shade coffee plantations: how to derive conservation payments for risk-averse land-users. *Agroforestry Systems*, **87**, 331–347.

- Castro LM, Calvas B, Knoke T (2015) Ecuadorian banana farms should consider organic banana with low price risks in their land-use portfolios. *PloS one*, **10**, e0120384.
- Coyle DR, McMillin JD, Hall RB *et al.* (2002) Cottonwood leaf beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) defoliation impact on Populus growth and above-ground volume in a short-rotation woody crop plantation. *Agriculture and Forest Entomology*, **4**, 293–300.
- Dale VH, Kline KL, Wright LL *et al.* (2011) Interactions among bioenergy feedstock choices, landscape dynamics, and land use. *Ecological Applications*, **21**, 1039–1054.
- Dauber J, Jones MB, Stout JC (2010) The impact of biomass crop cultivation on temperate biodiversity. *GCB Bioenergy*, **2**, 289–309.
- Dimitriou I, Mola-Yudego B, Aronsson P (2012a) Impact of Willow Short Rotation Coppice on Water Quality. *BioEnergy Research*, **5**, 537–545.
- Dimitriou I, Mola-Yudego B, Aronsson P *et al.* (2012b) Changes in Organic Carbon and Trace Elements in the Soil of Willow Short-Rotation Coppice Plantations. *BioEnergy Research*, **5**, 563–572.
- Dimitriou I, Rosenqvist H (2011) Sewage sludge and wastewater fertilisation of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production--Biological and economic potential. *Biomass and Bioenergy*, **35**, 835–842.
- Djanibekov U, Khamzina A (2014) Stochastic Economic Assessment of Afforestation on Marginal Land in Irrigated Farming System. *Environmental and Resource Economics*, 1-23. <http://dx.doi.org/10.1007/s10640-014-9843-3>.
- Djomo SN, Kasmioui OE, Ceulemans R (2011) Energy and greenhouse gas balance of bioenergy production from poplar and willow: a review. *GCB Bioenergy*, **3**, 181–197.
- Don A, Osborne B, Hastings A *et al.* (2012) Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. Accessed 26 Jun 2012.
- El Kasmioui O, Ceulemans R (2012) Financial analysis of the cultivation of poplar and willow for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, **43**, 52–64.
- Ericsson K, Rosenqvist H, Ganko E *et al.* (2006) An agro-economic analysis of willow cultivation in Poland. *Biomass and Bioenergy*, **30**, 16–27.

- Ewald J, Maart SC, Musshoff O (2012) Measuring the Subjective Risk Attitude of Decision-Makers: Are there Differences between Groups of Methods and of Persons? *German Journal of Agricultural Economics*, **61**, 148–161.
- Fargione J, Hill J, Tilman D *et al.* (2008) Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science (New York, N.Y.)*, **319**, 1235–1238.
- Foley JA, Ramankutty N, Brauman KA *et al.* (2011) Solutions for a cultivated planet. *Nature*, **478**, 337–342. <http://dx.doi.org/10.1038/nature10452>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) State of the World's Forests 2009, Rome.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2010) Global forest resources assessment 2010. Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, xxxi, 340.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2012) FaoStat. Available via <http://faostat.fao.org/site/626/default.aspx#ancor>. Accessed 01 Aug 2013.
- Gandorfer M, Eckstein K, Hoffmann H (2011) *Modeling Economic Performance of an Agroforestry System under Yield and Price Risk*. 15th International Consortium on Applied Bioeconomy Research (ICABR) Annual Conference, Villa Mondragone (Frascati).
- Gelfand I, Sahajpal R, Zhang X *et al.* (2013) Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. *Nature*, **493**, 514–517. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11811>.
- Glithero NJ, Wilson P, Ramsden SJ (2013) Prospects for arable farm uptake of Short Rotation Coppice willow and miscanthus in England. *Applied Energy*, **107**, 209–218.
- Graham JR, Harvey CR (2001) The theory and practice of corporate finance: evidence from the field. *Journal of Financial Economics*, 187–243.
- Hahn WA, Härtl F, Irland LC *et al.* (2014) Financially optimized management planning under risk aversion results in even-flow sustained timber yield. *Forest Policy and Economics*, **42**, 30–41.
- Harlow WV, Rao, RKS (1989) Asset Pricing in a Generalized Mean-Lower Partial Moment Framework: Theory and Evidence. *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*, **24**, 285.

- Hauk S, Knoke T, Wittkopf S (2014a) Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **29**, 435–448.
- Hauk S, Skibbe K, Röhle H *et al.* (2015) Nondestructive Estimation of Biomass Yield for Short-Rotation Woody Crops Is Reliable and Shows High Yields for Commercial Stands in Bavaria. *BioEnergy Research*, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-015-9602-5>.
- Hauk S, Wittkopf S, Knoke T (2014b) Analysis of commercial short rotation coppices in Bavaria, southern Germany. *Biomass and Bioenergy*, **67**, 401–412.
- Hildebrandt P, Knoke T (2011) Investment decisions under uncertainty—A methodological review on forest science studies. *Forest Policy and Economics*, **13**, 1–15.
- Holt CA, Laury SK (2014) Chapter 4 - Assessment and Estimation of Risk Preferences. In: *Handbook of the Economics of Risk and Uncertainty : Handbook of the Economics of Risk and Uncertainty* (eds Machina M, Viscusi. K.), pp 135–201. North-Holland.
- Horn H, Skibbe K, Röhle H (2013) Wuchsleistung von KUP aus Pappel in Folgerotationen. *AFZ - Der Wald*, 53–55.
- International Energy Agency (IEA) (2013) World energy outlook 2013. OECD/IEA, Paris, 687 pp.
- Jianjun J, Yiwei G, Xiaomin W *et al.* (2015) Farmers' risk preferences and their climate change adaptation strategies in the Yongqiao District, China. *Land Use Policy*, **47**, 365–372.
- Jorissen T, Hauk S, Wittkopf S, Zerle. P (2013) Volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Untersuchung des Anbaus von schnellwachsenden Baumarten im Kurzumtrieb auf landwirtschaftlichen Flächen als nachhaltige CO₂-Vermeidungsoption. Projektbericht für das Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst., Straubing: Wissenschaftszentrum Straubing.
- Kasmioui O, Ceulemans R (2013) Financial Analysis of the Cultivation of Short Rotation Woody Crops for Bioenergy in Belgium: Barriers and Opportunities. *BioEnergy Research*, **6**, 336–350.
- Knoke T, Stimm B, Ammer C *et al.* (2005) Mixed forests reconsidered: A forest economics contribution on an ecological concept. *Forest Ecology and Management*, **213**, 102–116.

- Krasuska E, Rosenqvist H (2012) Economics of energy crops in Poland today and in the future. *Biomass and Bioenergy*, **38**, 23–33.
- Kröber M, Hank K, Heinrich J *et al.* (2009) Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des Energieholzanbaus in Kurzumtriebsplantagen - Risikoanalyse mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation. In: *Risiken in der Agrar- und Ernährungswirtschaft und ihre Bewältigung*. Vom 24. bis 26. September 2008 (eds Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V., Berg E, Apfelbeck J), pp 127–139. Landwirtschaftsverlag GmbH; Münster-Hiltrup.
- Kröber M, Heinrich J, Wagner P *et al.* (2010) Ökonomische Bewertung und Einordnung von Kurzumtriebsplantagen in die gesamtbetriebliche Anbaustruktur. In: *Agrowood*. Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven (eds Bemmann A, Knust C), pp 217–229. Weissensee-Verl, Berlin.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (2015) Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Available via <http://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html;jsessionid=F3CA3084DCDCA9CF8D735A75F2AD9BD0>. Accessed 19 Feb 2015.
- Lothner D (1991) Short-rotation energy plantations in north central united states: an economic analysis. *Energy Sources*, 111–117.
- Macmillan W (1992) Risk and agricultural land use: A reformulation of the portfolio-theoretic approach to the analysis of a von Thünen economy. *Geographical Analysis*, **24**, 142–158.
- Makeschin F (1994) Effects of energy forestry on soils. *Environmental Aspects of Energy Forest Cultivation*, **6**, 63–79.
- Manzone M, Airoldi G, Balsari P (2009) Energetic and economic evaluation of a poplar cultivation for the biomass production in Italy. *Biomass and Bioenergy*, **33**, 1258–1264.
- Markowitz H (1952) Portfolio Selection. *The Journal of Finance*, **7**, 77–91.
- Markowitz H (2014) Mean–variance approximations to expected utility. *European Journal of Operational Research*, **234**, 346–355.
- Mather AS, Needle CL (2000) The relationships of population and forest trends. *Geographical Journal*, **166**, 2–13. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-4959.2000.tb00002.x>.
- McKenney DW, Weersink A, Allen D *et al.* (2014) Enhancing the adoption of short rotation woody crops for bioenergy production. *Biomass and Bioenergy*, **64**, 363–366.

- Melillo JM, Reilly JM, Kicklighter DW *et al.* (2009) Indirect emissions from biofuels: how important? *Science (New York, N.Y.)*, **326**, 1397–1399.
- Musshoff O (2012) Growing short rotation coppice on agricultural land in Germany: A Real Options Approach. *Biomass and Bioenergy*, **41**, 73–85.
- Musshoff OJ (2010) Die Umstellung landwirtschaftlich genutzter Flächen auf Kurzumtriebsplantagen – Eine Anwendung des Realoptionsansatzes. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, **181**, 175–188.
- Neubert FP, Boll T, Zimmermann K *et al.* (2013) Chancen und Hemmnisse von Kurzumtriebsplantagen – Online-Umfrage unter Praktikern. *AFZ - Der Wald*, 4–6.
- Nordman EE, Robison DJ, Abrahamson LP *et al.* (2005) Relative resistance of willow and poplar biomass production clones across a continuum of herbivorous insect specialization: Univariate and multivariate approaches. *Forest Ecology and Management*, **217**, 307–318.
- Paquette A, Messier C (2010) The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the environment*, **8**, 27–34.
- Paydar Z, Qureshi ME (2012) Irrigation water management in uncertain conditions—Application of Modern Portfolio Theory. *Agricultural Water Management*, **115**, 47–54. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377412002181>.
- Rajapaksha, N. S. S., Butt KR, Vangelova El Moffat AJ (2013) Effects of Short Rotation Forestry on earthworm community development in the UK. *Influence of tree species on forest soils: New evidence from field studies*, **309**, 96–104. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112713002107>.
- Reisenweber J (2014) Erzeugerpreise wichtiger Marktfrüchte Entwicklung von 1978 bis heute in Bayern. E-Mail to Hauk S.
- Reynaud A, Couture S (2012) Stability of risk preference measures: results from a field experiment on French farmers. *Theory and Decision*, **73**, 203–221.
- Ridier A (2012) Farm Level Supply of Short Rotation Woody Crops: Economic Assessment in the Long-Term for Household Farming Systems. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie*, **60**, 357–375.
- Roche MJ, McQuinn K (2004) Riskier product portfolio under decoupled payments. *European review of agricultural economics: ERAE*, **31**, 111–123.

- Rosenqvist H, Dawson M (2005) Economics of willow growing in Northern Ireland. *Biomass and Bioenergy*, **28**, 7–14.
- Rosenqvist H (Ed.) (1996) Calculation method and economy in Salix production, Biomass for energy and environment. Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference.
- Rowe RL, Street NR, Taylor G (2009) Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 271–290.
- Ruttens A, Boulet J, Weyens N *et al.* (2011) Short rotation coppice culture of willows and poplars as energy crops on metal contaminated agricultural soils. *International journal of phytoremediation*, **13 Suppl 1**, 194–207.
- Schweier J (February 2013) Erzeugung von Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Marginalstandorten in Südwestdeutschland. Umweltbezogene und ökonomische Bewertung alternativer Bewirtschaftungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung verschiedener Holzernteverfahren. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg im Breisgau.
- Seiffert M (2014) Landwirtschaftlicher Pflanzenbau. Grundlagen des Acker und Pflanzenbaus. BLV Buchverlag, München, 1205 S.
- Sharpe W (1964) Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk. *The Journal of Finance*, **19**, 425–442.
- Sherrington C, Bartley J, Moran D (2008) Farm-level constraints on the domestic supply of perennial energy crops in the UK. *Energy Policy*, **36**, 2504–2512.
- Sherrington C, Moran D (2008) *Farmer attitudes and intentions towards the adoption of perennial energy crops in the UK: an application of the Theory of Planned Behaviour. Paper presented at the. 16th European Biomass Conference & Exhibition - From Research to Industry & Markets, Feria Valencia, Spain.*
- Sherrington C, Moran D (2010) Modelling farmer uptake of perennial energy crops in the UK. Large-scale wind power in electricity markets with Regular Papers. *Energy Policy*, **38**, 3567–3578.
- Styles D, Thorne F, Jones MB (2008) Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and Miscanthus production with conventional farming systems. *Biomass and Bioenergy*, **32**, 407–421.

Wolbert-Haverkamp M, Musshoff O (2014) Is short rotation coppice economically interesting? An application to Germany. *Agroforestry Systems* **88**, 413–426.

Supplementary Material

Table S1: Overview of yields (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014; Reisenweber 2014b), prices (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014; Reisenweber 2014a), and variable costs (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014), of conventional crops in the high-yielding model region Aichach-Friedberg (observation period 2004-2013). Ø indicates the mean and „SD“ indicates the standard deviation

	Ø Yield [dt ha ⁻¹]	SD Yield [dt ha ⁻¹]	Ø Price [€ dt ⁻¹]	SD Price [€ dt ⁻¹]	Costs [€ ha ⁻¹]
Barley	67.80	5.64	15.37	5.13	1053.55
Maize	99.32	10.17	17.08	5.44	1380.85
Potato	419.92	43.87	12.22	5.95	3452.30
Silage Maize	513.19	56.41	3.51	0.91	1829.40
Winter Rape- seed	40.71	2.72	34.54	10.90	1235.55
Winter Wheat	80.95	5.94	17.63	5.99	1176.80

Table S2: Overview of yields (Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (BayLfStaD) 2014; Reisenweber 2014b), prices (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014; Reisenweber 2014a), and variable costs (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 2014), of conventional crops in the low-yielding model region Wunsiedel (observation period 2004-2013). Ø indicates the mean and „SD“ indicates the standard deviation

	Ø Yield [dt ha ⁻¹]	SD Yield [dt ha ⁻¹]	Ø Price [€ dt ⁻¹]	SD Price [€ dt ⁻¹]	Costs [€ ha ⁻¹]
Barley	55.28	4.46	15.37	5.13	987.55
Potato	387.96	42.03	12.22	5.95	3344.30
Rye	50.97	5.33	15.71	5.87	876.00
Silage Maize	445.98	41.17	3.51	0.91	1672.40
Spring Barley	48.74	6.11	17.21	5.70	866.05
Winter Rapeseed	35.37	4.00	34.54	10.90	1174.55

Table S3: Overview of variable costs assumed for SRWC

Working step	Aichach-Friedberg	Wunsiedel
	Costs [€ ha ⁻¹]	Costs [€ ha ⁻¹]
Site preparation	242.65	242.65
Planting and cuttings	1144.00	1144.00
Weed control	87.00	87.00
Harvesting, forwarding and chipping	4264.55	2574.97
Transportation	1761.93	1063.87
Recultivation	1950.00	1950.00

Table S4: Overview of expected yields (arithmetic mean) and standard deviation of yields (SD) approximated for SRWC

	Aichach-Friedberg	Wunsiedel
Expected biomass yield [t _{odt} ha ⁻¹ a ⁻¹]	14.77	8.92
SD of biomass yields [t _{odt} ha ⁻¹ a ⁻¹]	1.56	1.63

Table S5: Wood chip prices at a water content of 35 % [€ t_{wc35}⁻¹] during the observation period (C.A.R.M.E.N. e.V. 2015)

Year	Wood chip price [€ t _{wc35} ⁻¹]
2004	48.05
2005	51.35
2006	65.94
2007	69.90
2008	76.58
2009	82.63
2010	85.94
2011	94.59
2012	92,19
2013	95,80

Table S6: Coefficients of correlation between (annualized) gross margins from conventional agricultural crops and SRWC for the model region Aichach-Friedberg

	Barley	Maize	Potato	Silage Maize	Winter Rapeseed	Winter Wheat	SRWC
Barley	1.00	0.95	0.37	0.88	0.96	0.96	0.67
Maize	0.95	1.00	0.44	0.94	0.95	0.95	0.70
Potato	0.37	0.44	1.00	0.38	0.49	0.48	0.57
Silage Maize	0.88	0.94	0.38	1.00	0.92	0.82	0.68
Winter Rapeseed	0.96	0.95	0.49	0.92	1.00	0.92	0.80
Winter Wheat	0.96	0.95	0.48	0.82	0.92	1.00	0.65
SRWC	0.67	0.70	0.57	0.68	0.80	0.65	1.00

Table S7: Coefficients of correlation between (annualized) gross margins from conventional agricultural crops and SRWC for the model region Wunsiedel

	Barley	Potato	Rye	Silage Maize	Spring Barley	Winter Rapeseed	SRWC
Barley	1.00	0.28	0.99	0.91	0.73	0.89	0.64
Potato	0.28	1.00	0.32	0.32	0.17	0.43	0.43
Rye	0.99	0.32	1.00	0.94	0.85	0.89	0.63
Silage Maize	0.91	0.32	0.94	1.00	0.67	0.88	0.63
Spring Barley	0.73	0.17	0.85	0.67	1.00	0.68	0.64
Winter Rapeseed	0.89	0.43	0.89	0.88	0.68	1.00	0.76
SRWC	0.64	0.43	0.63	0.63	0.64	0.76	1.00

8.8 Lebenslauf

Christoph Sebastian Hauk

geboren am 22.04.1985 in Buchen (Odenwald)

Berufliche Erfahrung

Seit 05.2015	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf; Fakultät Wald und Forstwirtschaft; Fachgebiet für Betriebswirtschaftslehre Nachwachsender Rohstoffe
08.2010 – 04.2015	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf; Fakultät Wald und Forstwirtschaft; Fachgebiet für Holzenergie
09.2005 – 08.2006	Freiwilliges Ökologisches Jahr; Regierungspräsidium Freiburg; Referat 56 - Naturschutz und Landschaftspflege

Studium und Ausbildung

10.2006 – 07.2010	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (ehemals FH Weihenstephan); Fakultät Wald und Forstwirtschaft Studiengang: Wald und Forstwirtschaft Abschluss: Dipl.-Ing. (FH) Diplomarbeit: Wuchsleistung verschiedener Balsampappelhybride im zweiten Umtrieb
08.1995 – 07.2005	Eckenberg-Gymnasium Adelsheim Abschluss: Abitur