

Umwelt

Ökobilanz von Energiepflanzen

Thomas Kägi, Ruth Freiermuth Knuchel, Thomas Nemecek und Gérard Gaillard, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, CH-8046 Zürich

Auskünfte: Thomas Kägi, E-Mail: thomas.kaegi@art.admin.ch, Tel. +41 44 377 71 11

Zusammenfassung

Die Umweltwirkung der Produktion von Energieträgern aus Biomasse hängt entscheidend vom landwirtschaftlichen Anbau ab. Diese Studie untersucht, wie sich der Anbau von Biomasse ökologisch optimieren lässt. Dabei stellen sich folgende drei Fragen: Wie ökologisch ist der Biolandbau im Vergleich zur integrierten Produktion? Welche Kulturen sind für die Biomasseerzeugung besonders geeignet? Und welche anderen Faktoren spielen für eine ökologische Produktion eine Rolle? Für die Ökobilanzierung wurde die an der Forschungsanstalt Reckenholz-Tänikon ART entwickelte SALCA-Methode (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment) verwendet. Bezogen auf 1 kg Erntemasse Trockensubstanz (respektive Kilogramm Stärke bei Kulturen für Bioethanol und Kilogramm Öl bei Kulturen für Biodiesel) ist der biologische Anbau für die Bioenergienutzung aus ökologischer Sicht vor allem für Körnermais, Silomais und Soja geeignet. Bei Getreide und Winterraps hat der Biolandbau sowohl ökologische Vor- als auch Nachteile. Extensives Grasland hat für die Biogasproduktion, und zusammen mit Zuckerrüben für die Bioethanolproduktion, die geringsten Umweltwirkungen. Für die Biodieselproduktion gibt es keine eindeutig zu bevorzugende Kultur.

Die Nutzung von Bioenergie aus landwirtschaftlicher Biomasse stösst sowohl in der Öffentlichkeit als auch in der Industrie auf steigendes Interesse. Die Märkte in der EU entwickeln sich entsprechend dynamisch. In der Schweiz stehen politische Entscheidungen zur steuerlichen Begünstigung dieser Form der Energieerzeugung an.

Das Projekt «Ökobilanz von Energieprodukten» der schweizerischen Bundesämter für Energie (BFE), Umwelt (BAFU) und Landwirtschaft (BLW) soll für die politische Diskussion in den Bereichen Energie-, Umwelt- und Klimapolitik gesicherte Entscheidungsgrundlagen bereitstellen. Bei der Beurteilung der Produktionsketten von Energieträgern aus Biomasse zeigt sich, dass der Biomasseerzeugung hohe Bedeutung zukommt (Zah *et al.* 2007). Deshalb stellt sich die Frage, wie diese Erzeugung ökologisch optimiert werden kann (siehe auch Kägi *et al.* 2007a).

Im Zentrum der Untersuchung stehen dabei die Bewirtschaftungsaktivitäten des Landwirts, das heisst die Wahl der Landbauform, die Wahl der Kultur, sowie weitere Faktoren wie Düngung, Pflanzenschutzintensität und Region, welche einen direkten Einfluss auf die Umweltwirkung der Produktion haben. Dabei verste-

hen wir in diesem Artikel unter Integrierter Produktion einen Anbau gemäss den Regeln des ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN), welche jedoch nicht gleichzeitig biologisch ist. Zum Untersuchungsrahmen gehören ferner die Bereitstellung der Produktionsmittel (zum Beispiel Düngerherstellung) und der Transport der Ernte zum Hof. Zudem wird für jede untersuchte Kultur der Zeitraum nach der Ernte der Vorkultur bis zur Ernte der Hauptkultur berücksichtigt. Im Rahmen dieses Projekts geht die vorliegende Studie gezielt folgenden drei Fragen nach: Wie ist die biologische im Vergleich zur integrierten Produktion (IP) zu bewerten? Welche Kulturen sind für die Biomasseerzeugung besonders geeignet? Wie kann Biomasse am ökologischsten produziert werden? Die Umwandlung der Ernteprodukte in Bioenergieträger und deren Nutzung sind nicht Gegenstand dieser Studie. Die Leserinnen und Leser werden hierfür auf die Studie von Zah *et al.* (2007) verwiesen.

Ökoinventare und Wirkungskategorien

Die Analyse bezieht sich auf zehn Ackerkulturen und den Grasanaubau. Im Sinne der Multifunktionalität der Landwirtschaft ist eine Auswertung nach der produktiven Funktion (pro kg), nach der finanziellen Funktion (pro Franken) und nach der Funktion der Landbewirtschaftung (pro ha) gemäss Nemecek *et al.* (2005) denkbar. Wir betrachten in dieser Studie ausschliesslich die pro-

Abb. 1. Je nach Bio-treibstoff können ganz unterschiedliche Kulturen verwertet werden.



duktive Funktion, da es um die Bereitstellung von Biomasse für die Energieerzeugung geht. Die Umweltwirkungen der Kulturen und der verschiedenen Anbauformen werden auf 1 kg Erntemasse Trockensubstanz (ausser Stärke bei Kulturen für Bioethanol und Öl bei Kulturen für Biodiesel) ab «Hofator» bezogen.

Die Sachbilanz, das heisst die Zusammenstellung aller Rohstoffe und Emissionen, welche bei der Produktion der jeweiligen Biomasse benötigt werden beziehungsweise entstehen, basiert auf der FAL-Schriftenreihe 58 (Nemecek *et al.* 2005), der ecoinvent-Datenbank Version 1.2 und einem Update der Version 1.1 (Frischknecht *et al.* 2004, Nemecek und Erzinger 2005).

Die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung werden mit dem von der ART entwickelten Ökobilanzierungs-Werkzeug SALCA-Kultur Version 2.02 berechnet. Für die Allokation zwischen Körnern und Stroh bei Getreide kommt das ökonomische Prinzip zur Anwendung (Nemecek *et al.* 2005).

SALCA berücksichtigt zehn Wirkungskategorien. Es erfolgt weder eine Normalisierung noch eine Gewichtung. Wirkungskategorien, welche statistisch untereinander korrelieren, werden aber für die leichtere Interpretation der Ergebnisse gruppiert (Rossier und Gaillard 2004; Nemecek *et al.* 2005). Dies erlaubt dennoch, sich bei der Diskussion auch auf einzelne Wirkungskategorien zu beziehen. Folgende Gruppen von Wirkungskategorien wurden analysiert:

■ **Ressourcen-Management:** Bedarf an nicht-erneuerbaren Energieressourcen (EB) gemäss ecoinvent-Methodik (Frischknecht *et al.* 2004), Treibhauspotenzial (THP) nach IPCC (2001), Ozonbildungspotenzial (OBP)

gemäss EDIP 97 (Hauschild und Wenzel 1998)

■ **Nährstoff-Management:** Eutrophierungspotenzial (EP), das heisst Anreicherung von Stickstoff und Phosphor und Versauerungspotenzial (VP) für empfindliche Ökosysteme, beide gemäss EDIP 97 (Hauschild und Wenzel 1998)

■ **Schadstoff-Management** (vor allem Pestizide und Schwermetalle): Humantoxizität (HT) nach CML01 (Guinée *et al.* 2001), aquatische und terrestrische Ökotoxizität (AqÖ und TeÖ) gemäss EDIP 97 (Hauschild und Wenzel

1998) und CML01 (Guinée *et al.* 2001)

■ **Biodiversitäts-Management:** flächenbezogene Betrachtung der gesamten Artenvielfalt und des Vorkommens von Arten mit hohen ökologischen Anforderungen nach Jeanneret *et al.* (2006)

■ **Bodenqualitäts-Management:** flächenbezogene Betrachtung physikalischer, chemischer und biologischer Bodeneigenschaften gemäss Oberholzer *et al.* (2006).

Bei der Auswertung fällt die Beurteilung (günstiger, ungünsti-

Tab. 1. Vergleich der Landbauformen pro Kultur bezogen auf die jeweilige IPint Variante

Umweltwirkung	Winterweizen			Winterroggen			Körnermais CCM			Silomais	
	IPint Tal	IPext Tal	Bio Tal	IPint Tal	IPext Tal	Bio Tal	IP Tal	Bio Tal	IP Tal	Bio Tal	
EB MJ-Äq./kg TS	3,7	106%	62%	2,6	118%	85%	2,1	91%	1,3	76%	
THP g CO2-Äq./kg TS	692	117%	132%	484	122%	159%	565	90%	247	91%	
OBP mg C2H4-Äq./kg TS	122	113%	141%	93,4	119%	160%	85,8	103%	61	107%	
EP g N-Äq./kg TS	17,4	136%	215%	14,2	127%	221%	12,5	112%	4,0	112%	
VP g SO2-Äq./kg TS	5,1	129%	429%	3,98	114%	410%	6,44	188%	4,1	164%	
TeÖ TeÖ-Punkte/kg TS	0,11	80%	5%	0,13	39%	4%	0,09	3%	0,034	11%	
AqÖ AqÖ-Punkte/kg TS	0,32	119%	30%	0,10	111%	87%	0,09	62%	0,062	62%	
HT HT-Punkte/kg TS	0,3	80%	18%	0,20	86%	26%	0,05	24%	0,034	81%	
BD aggregierte Punkte	7,5	112%	116%	7,5	112%	116%	6,1	111%	6,2	111%	
Bodenqualität	Grobporenvolumen	-	-	-	-	-	0	0	0	0	
	Aggregatsstabilität	-	-	0	-	-	+	+	+	+	
	Corg-Gehalt	-	-	+	-	-	+	+	+	+	
	Schwermetallgehalt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Org. Schadstoffe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Regenwurmbiomasse	-	-	-	-	-	0	0	+	+	
	Mikrobielle Biomasse	-	-	0	-	-	0	+	+	+	
	Mikrobielle Aktivität	-	-	0	-	-	0	+	+	+	

Umweltwirkung	Soja		Winterraps			Kartoffeln			Dauerwiese		
	IP Tal	Bio Tal	IPint Tal	IPext Tal	Bio Tal	IP Tal	Bio Tal	IP Tal	Int Tal	Bio Tal	
EB MJ-Äq./kg TS	5,1	76%	6,3	94%	44%	3,4	110%	1,5	87%		
THP g CO2-Äq./kg TS	1532	97%	1304	103%	119%	653	117%	294	88%		
OBP mg C2H4-Äq./kg TS	218	87%	207	117%	123%	174	139%	90,4	100%		
EP g N-Äq./kg TS	25,9	102%	19,7	149%	152%	13,2	167%	5,8	97%		
VP g SO2-Äq./kg TS	8,6	72%	14,4	147%	275%	8,3	135%	11,1	104%		
TeÖ TeÖ-Punkte/kg TS	0,21	5%	0,31	21%	2%	1,35	1%	0,003	73%		
AqÖ AqÖ-Punkte/kg TS	0,16	89%	1,89	173%	9%	0,11	142%	0,050	88%		
HT HT-Punkte/kg TS	0,12	70%	0,21	83%	15%	0,15	102%	0,030	79%		
BD aggregierte Punkte	6,8	112%	7,2	111%	115%	6,1	115%	6,1	110%		
Bodenqualität	Grobporenvolumen	0	0	0	0	0	0	+	+		
	Aggregatsstabilität	+	+	+	+	+	+	+	+		
	Corg-Gehalt	0	0	0	0	0	0	-	-		
	Schwermetallgehalt	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Org. Schadstoffe	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Regenwurmbiomasse	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Mikrobielle Biomasse	0	0	0	0	0	+	0	0		
	Mikrobielle Aktivität	0	0	0	0	0	+	0	0		

Die Wahl der Referenz hat keinen Einfluss auf das Resultat. Die Bodenqualität wird für die Grasanbauvarianten mangels methodischer Grundlagen nicht berücksichtigt. Dunkelgrün = viel günstiger, hellgrün = günstiger, orange = ungünstiger, rot = viel ungünstiger (Beispiel: der EB von Winterweizen Bio entspricht nur 62 % des EB von IPint und ist somit deutlich geringer). IPint = Integrierte Produktion, IPext = Extensiv-Produktion, Bio = Biolandbau, EB = fossiler Energiebedarf, THP = Treibhauspotenzial, OBP = Ozonbildungspotenzial, EP = Eutrophierungspotenzial; VP = Versauerungspotenzial, TeÖ = terrestrische Ökotoxizität, AqÖ = aquatische Ökotoxizität, HT = Humantoxizität, BD = Biodiversität

ger, etc.) für die verschiedenen Umweltwirkungen wegen unterschiedlicher Variabilität und Unsicherheit anders aus (Details siehe in Nemecek *et al.* 2005). Ein tieferer Wert ist prinzipiell günstiger, ausser bei der Biodiversität (BD), bei der eine hohe Punktzahl günstiger ist.

Integrierte Produktion versus Biolandbau

Im Vergleich mit der intensiven Integrierten Produktion (IPint) weist der Biolandbau pro Kilogramm Trockensubstanz (kg TS; siehe Tab. 1) einen geringeren Energiebedarf auf. Dieser ist vor allem auf den Verzicht von Mineraldünger zurückzuführen. Eine Ausnahme bilden die Bio-Kartoffeln; ihre Erträge sind zu tief, um eine energetisch effiziente Produktion zu ermöglichen. Bei Gras sind die Unterschiede zwischen den Landbauformen gering. Das Treibhaus- und das Ozonbildungspotenzial fallen für Bio-Getreide, -Kartoffeln und -Raps hingegen höher aus. Hauptgründe liegen einerseits im teilweise intensiveren Maschineneinsatz, denn für das Ozonbildungspotenzial spielen die Traktoremissionen die Hauptrolle, und andererseits in den erhöh-

ten Hofdüngergaben, die hohe Emissionen von Ammoniak und Nitrat, und damit von induziertem Lachgas bewirken. Bei Soja, Gras und Mais sind keine Unterschiede feststellbar.

Beim Nährstoffmanagement schneidet der Biolandbau mit Ausnahme von Soja und den Wiesen im Vergleich zur Integrierten Produktion schlechter ab. Auch hier wirkt sich der grössere Hofdüngereinsatz mit den damit verbundenen höheren Ammoniakverlusten negativ aus, da für die Versauerung Ammoniak die dominante Emission ist. Bei der Eutrophierung sind die Nitratverluste ausschlaggebend: Wie im Nitratmodell angenommen, führt der Krankheits- und Schädlingsbefall bei einzelnen Kulturen zu einer Verminderung der Stickstoff-Aufnahme im Biolandbau, so dass das Risiko der Nitratauswaschung gegen die Ernte hin ansteigt.

Beim Schadstoffmanagement sind die Werte im Biolandbau bei allen Kulturen generell tiefer als in der integrierten Produktion (IP). Bei der terrestrischen Ökotoxizität gilt dies sogar für die Bio-Kartoffeln trotz des Kupfer-

einsatzes zur Krautfäulebekämpfung. Da bei der angewandten Methode EDIP 97 (Hauschild und Wenzel 1998) Kupfer kaum ins Gewicht fällt, andere Methoden jedoch teilweise zu unterschiedlichen Schlüssen kommen (siehe Nemecek *et al.* 2005), ist hier bei der Interpretation jedoch Vorsicht geboten. Beim Grasland sind keine Unterschiede auszumachen, weil hier auch in der Integrierten Produktion kaum Pestizide eingesetzt werden.

Die Biodiversität ist im Biolandbau positiver zu bewerten als in der Integrierten Produktion. Dies liegt an der Förderung der Flora und Fauna durch den Verzicht auf Pestizide und dem tieferen Düngungsniveau. Bezüglich Bodenqualität verbessert die höhere organische Düngung im Biolandbau die Humusbilanz und die damit verbundenen Indikatoren. Die Regenwurmbiomasse kann hingegen durch den Gülleeinsatz beeinträchtigt werden, was sich beim Winterweizen negativ auswirkt.

Der Verzicht auf Pestizide und Wachstumsregulatoren bei Getreide und Raps (Extensio-Produktion: in Tab. 1 als IPext bezeichnet) bewirkt eine gewisse Verbesserung beim Schadstoffmanagement und bei der Biodiversität (Tab. 1). Beim Ressourcen- und Nährstoffmanagement fallen die Umweltlasten jedoch meist höher aus. Ohne zusätzliche Bestimmungen für die Dünger- und Herbizidausbringung kann bei der Extensio-Produktion insgesamt kaum von einer ökologisch besseren Variante gesprochen werden.

Die extensive Bewirtschaftung des Graslands bringt ihrerseits eine Reduktion aller Umweltlasten (siehe Tab. 2 und 3).

Wahl der Kultur für die Bioenergieerzeugung

Nicht alle Kulturen sind aus ökologischer Sicht gleich gut geeig-

Tab. 2. Vergleich der Produktion von für Biogas geeigneten Kulturen bezogen auf Silomais (siehe auch Legende Tab. 1).

Umweltwirkung	Silomais	Dauerwiese Siloballen	3j. Kunstwiese Siloballen	Dauerwiese Bodenheu
	IP Tal			
EB MJ-Äq./kg TS	1,3	114%	124%	60%
THP g CO ₂ -Äq./kg TS	247	119%	138%	34%
OBP mg C ₂ H ₄ -Äq./kg TS	61	148%	161%	75%
EP g N-Äq./kg TS	4,0	146%	225%	46%
VP g SO ₂ -Äq./kg TS	4,1	272%	279%	9%
TeÖ TeÖ-Punkte//kg TS	0,034	11%	15%	9%
AqÖ AqÖ-Punkte/kg TS	0,062	81%	83%	40%
HT HT-Punkte/kg TS	0,034	87%	98%	102%
BD aggregierte Punkte	6,2	98%	98%	344%

net, Biomasse für die Bioenergieerzeugung herzustellen. Für die Ermittlung der ökologisch geeignetsten Kulturen liegt der Anbau gemäss ÖLN im Talgebiet zugrunde, da dies die häufigste Landbauform ist. Um die Umweltwirkungen auf die Produkte und Co-Produkte aufzuteilen, wird eine ökonomische Allokation angewendet basierend auf den Schweizer Preisen für die jeweiligen Produkte und Co-Produkte (Daten nach Jungbluth *et al.* 2007 und Streun 2006). Da eine Veränderung der Preise eine Veränderung der Allokation der Umweltlast bewirkt, haben die Resultate Gültigkeit, solange sich die Preise nicht markant ändern.

Herstellung von Biogas: Vergleich der Kulturen

Pro produziertem kg TS verursachen intensiv bewirtschaftete Dauer- und Kunstwiesen im Vergleich zu Silomais höhere Werte im Ressourcenmanagement; dies ist bedingt durch intensiveren Maschineneinsatz und den damit verbundenen Traktoremissionen. Zudem schneiden die genannten Wiesen beim Nährstoffmanagement infolge des entweichenden Ammoniaks aus der Hofdüngerausbringung schlechter ab als Silomais (Tab. 2). Bei der Toxizität sind die Werte aller Wiesenarten dank einem geringeren Pestizideinsatz kleiner. Am ökologischsten ist die extensive Dauerriese, die auch mit Abstand die meisten Biodiversitätspunkte aufweist. Das Ergebnis ist unabhängig von der Konservierungsart (hier Bodenheu).

Herstellung von Bioethanol: Vergleich der Kulturen

Hackfrüchte belasten die Umwelt pro Kilogramm enthaltene Stärke im Erntegut weniger als Getreide (mehr Ertrag bei weniger Mineraldünger) mit Ausnahme der Kartoffeln (Tab. 3). Hier fällt vor allem die hohe terrestrische Ökotoxizität auf (Krautvernichtungsmittel). Roggen ist

Tab. 3. Vergleich der Produktion von für Bioethanol geeigneten Kulturen bezogen auf Winterweizen (siehe auch Legende Tab. 1).

		Winterweizen	Wintergerste	Winterroggen	Kartoffeln	Zuckerrüben	Körnermais Corn-Cob-Mix	Dauerriese Siloballen	3j. Kunstwiese Siloballen	Dauerriese Bodenheu
Umweltwirkung		IPint Tal	IPint Tal	IPint Tal	IP Tal	IP Tal	IP Tal	Int Tal	Int Tal	Ext Tal
EB	MJ-Äq./kg Stärke	4,5	81%	69%	97%	36%	61%	40%	43%	21%
THP	g CO ₂ -Äq./kg Stärke	836	87%	70%	99%	42%	86%	42%	49%	12%
OBP	mg C ₂ H ₄ -Äq./kg Stärke	147	88%	77%	150%	50%	74%	73%	80%	37%
EP	g N-Äq./kg Stärke	21,0	111%	82%	80%	16%	76%	33%	51%	11%
VP	g SO ₂ -Äq./kg Stärke	6,2	94%	78%	171%	68%	133%	216%	222%	7%
TeÖ	TeÖ-Punkte/kg Stärke	0,13	127%	119%	1295%	109%	82%	3%	5%	3%
AqÖ	AqÖ-Punkte/kg Stärke	0,39	34%	32%	37%	28%	31%	15%	16%	8%
HT	HT-Punkte/kg Stärke	0,36	73%	65%	53%	11%	19%	10%	11%	11%
BD	aggregierte Punkte	7,5	100%	100%	81%	80%	81%	81%	81%	284%
Bodenqualität	Grobporenvolumen	-	-	-	0	0	0			
	Aggregatsstabilität	--	-	-	+	+	+			
	Org-Gehalt	--	-	-	+	+	+			
	Schwermetallgehalt	0	0	0	0	0	0			
	Org. Schadstoffe	0	0	0	0	0	0			
	Regenwurmbiomasse	-	0	-	0	-	0			
	Mikrobielle Biomasse	--	-	-	+	0	0			
Mikrobielle Aktivität	--	-	-	+	0	0				

das Getreide mit den geringsten Umweltwirkungen. Ferner erzielen die Getreide und Dauerriesen mehr Biodiversitätspunkte als Hackfrüchte. Die tiefsten Umweltlasten besitzt extensives Grasland zusammen mit Zuckerrüben. Letztere üben trotz des Verdichtungsrisikos einen guten Einfluss auf die Bodenqualität aus, da einerseits der Anteil an organischem Dünger höher ist als bei Getreide und andererseits im analysierten Anbauszenario die Rübenblätter gänzlich auf dem Feld bleiben, was die Humusbildung fördert. Intensive Dauer- und Kunstwiesen haben ihrerseits ein erhöhtes Versauerungspotenzial infolge des Hofdüngereinsatzes.

Herstellung von Methylester: Vergleich der Kulturen

Pro Kilogramm enthaltene Öl im Erntegut sind die Umweltwirkungen von Raps und Sonnenblumen im Vergleich mit Soja geringer oder etwa gleich hoch mit Ausnahme des Energiebedarfs der Sonnenblumen und der aquatischen Ökotoxizität (Tab. 4). Der Sojaanbau benötigt zwar einen etwas geringeren In-

put an Betriebsmitteln, die Ölausbeute ist jedoch weniger als halb so gross wie bei Winterrops und Sonnenblumen. Der Sojaanbau benötigt somit mehr Fläche pro Kilogramm geerntetes Öl, was die Umweltbilanz verschlechtert. Die hohen aquatischen Ökotoxizitätswerte bei Winterrops und Sonnenblumen sind auf die Wirkstoffe der Pflanzenschutzmittel zurückzuführen.

Weitere Aspekte

Neben der Landbauform sind weitere Aspekte zu berücksichtigen:

Der Vergleich von mineralischen und organischen Düngern wurde ausführlich von Gaillard und Nemecek (2006) diskutiert: Die Produktion von Mineraldüngern erfordert beträchtliche Mengen an fossiler Energie (siehe Nemecek und Erzinger 2005). Hingegen treten bei der Lagerung und Ausbringung von Hofdüngern namhafte Verluste von Ammoniak auf, weshalb das Versauerungspotenzial erhöht ist. Der Hofdünger hat einen positiven Einfluss auf die Bodenqualität, indem er die Humusbilanz und somit auch die Bodenstruktur und die mikro-

Tab. 4. Vergleich der Produktion von für Biodiesel geeigneten Kulturen bezogen auf Soja (siehe auch Legende Tab. 2).

		Soja IP Tal	Winterraps IPint Tal	Sonnenblumen IP Tal
Umweltwirkung				
EB	MJ-Äq./kg Öl	15,0	86%	123%
THP	g CO ₂ -Äq./kg Öl	4506	60%	58%
OBP	mg C ₂ H ₄ -Äq./kg Öl	641	66%	87%
EP	g N-Äq./kg Öl	76,2	53%	62%
VP	g SO ₂ -Äq./kg Öl	25,3	117%	67%
TeÖ	TeÖ-Punkte/kg Öl	0,62	103%	32%
AqÖ	AqÖ-Punkte/kg Öl	0,48	806%	377%
HT	HT-Punkte/kg Öl	0,34	126%	142%
BD	aggregierte Punkte	6,8	106%	103%
Bodenqualität	Grobporenvolumen	-	-	-
	Aggregatsstabilität	0	0	0
	Corg-Gehalt	+	+	+
	Schwermetallgehalt	0	0	0
	Org. Schadstoffe	0	0	0
	Regenwurmbiomasse	-	0	-
	Mikrobielle Biomasse	0	0	0
	Mikrobielle Aktivität	0	0	0

bielle Aktivität verbessert. Für die meisten Umweltwirkungen ist im Ackerbau eine mittlere Düngungsmenge optimal. Diese ist geringer als die praxisüblichen, empfohlenen Mengen und steht somit im Zielkonflikt mit möglichst hohen Erträgen.

Eine durchdachte Gestaltung der Fruchtfolge kann zu Reduktionen der Düngermengen führen (zum Beispiel Stickstofffixierung durch Körnerleguminosen oder Einarbeitung von Ernterückständen). Die Sicherstellung einer möglichst kontinuierlichen Bodenbedeckung vermindert die Nährstoffverluste. Mit einer geschickt gewählten Kulturfolge können folglich Pflanzenschutzmittel eingespart werden (Nemecek *et al.* 2005). Die ökologische Gestaltung von Fruchtfolgen für die Bioenergieerzeugung wurde bis jetzt nur ansatzweise untersucht (Kägi *et al.* 2007b).

Nemecek *et al.* (2005) zeigen, dass die Produktionsregion kei-

nen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung hat.

Schlussfolgerung

Der Biolandbau ist im Vergleich zu IP günstiger zu bewerten im Bereich des Energiebedarfs, des Schadstoff-Managements und der Biodiversität. Beim Nährstoff-Management hat er für die betrachteten Kulturen mit Ausnahme von Soja jedoch höhere Umweltlasten. Der biologische Anbau für die Bioenergienutzung ist aus ökologischer Sicht vor allem für Körnermais, Silomais und Soja geeignet, während bei Kartoffeln und beim Grasanaubau die Integrierte Produktion vorzuziehen ist. Beim Getreide und Winterraps hat der Biolandbau sowohl ökologische Vor- als auch Nachteile.

Von den untersuchten Kulturen für Biogas haben die extensiven Wiesen die geringsten Umweltwirkungen pro kg TS und eine sehr hohe Biodiversität. Man sollte jedoch bedenken, dass man im Vergleich zu intensiven Wiesen viermal mehr Fläche für den gleichen Ertrag an TS benötigt. In Anbetracht der Tatsache, dass im Berg- und Hügelland immer mehr Landwirtschaftsfläche aufgegeben wird, könnte die Biogasproduktion zum Erhalt von extensiven Wiesen beitragen.

Unter den analysierten Kulturen für Bioethanol weist der Anbau von Zuckerrüben und Wiesen die geringsten Umweltwirkungen auf pro Kilogramm im Erntegut enthaltene Stärke auf. Ebenfalls relativ geringe Umweltlasten hat die Produktion von Roggen und Körnermais. Die grösste Umweltlast ergibt die Kartoffelproduktion.

Von den betrachteten Kulturen für Biodiesel haben Raps und Sonnenblumen im Vergleich zu Soja pro kg enthaltenes Öl im Erntegut gleichgute oder bessere Werte mit

Ausnahme des Energiebedarfs für die Sonnenblumen und der aquatischen Ökotoxizität.

Neben der Landbauform und der Wahl der Kultur sind weitere Aspekte wie die Düngungsform und Menge sowie die Fruchtfolgegestaltung zu berücksichtigen, um die Produktion möglichst umweltfreundlich zu gestalten. Die Pflanzenschutzintensität und die Produktionsregion haben hingegen keinen grossen Einfluss.

Die vorliegende Studie zeigt, dass bei der landwirtschaftlichen Produktion von Biomasse für die energetische Verwertung durchaus ökologische Optimierungspotenziale bestehen.

Literatur

■ Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Hellweg S., Hirschler R., Nemecek T., Margni M. & Spielmann M., 2004. Implementation of life cycle assessment methods - ecoinvent data v1.1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (ecoinvent), Dübendorf; ecoinvent report 3, 116 p.

■ Gaillard G. & Nemecek T., 2006. Ökobilanz des Einsatzes von Wirtschaft- und Mineraldüngern im Acker- und Futterbau. KTBL-Schrift 444: Verwertung von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern in der Landwirtschaft – Nutzen und Risiken, 19.-20.2006, Osnabrück. KTBL, Darmstadt, 63-74.

■ Guinée J. B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H. & Weidema B. P., 2001. Life cycle assessment – An operational guide to the ISO standards. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, Netherlands.

■ Hauschild M. & Wenzel H., 1998. Environmental Assessment of Products: Scientific background. Chapman&Hall, London, 565 p.

- IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. In: Houghton, J. T. et al. (eds.), Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge, UK.
- Jeanneret P., Baumgartner D., Freiermuth R. & Gaillard G., 2006. Méthode d'évaluation de l'impact des activités agricoles sur la biodiversité dans les bilans écologiques – SALCA-BD. Agroscope FAL Reckenholz. Zugang: <http://www.reckenholz.ch/doc/fr/forsch/control/bilanz/salca-bd.pdf>, 67 p. [12.9.2006].
- Jungbluth N., Chudacoff M., Dauriat A., Dinkel F., Doka G., Faist Emmenegger M., Gnansounou E., Kljun N., Spielmann M., Stettler C. & Sutter J., 2007. Life Cycle Inventories of Bioenergy. Final report ecoinvent No. xx (draft). ESU-services, Uster, CH.
- Kägi T., Freiermuth R., Gaillard G., Nemecek Th. (2007a) Ökobilanz von Energieprodukten: Bewertung der landwirtschaftlichen Biomasse-Produktion. LCI-Bioenergie, Teilbericht ART. Zugang: <http://www.art.admin.ch/themen/00617/00618/index.html?lang=de>.
- Kägi T., Deimling S., Freiermuth R., Gaillard G., Hölscher T. & Müller-Sämann K. (2007b) Multipurpose Agriculture: does Introduction of Bioenergy Crops Contribute to Groundwater Protection, Conference Proceedings Farming Systems Design, Catania.
- Nemecek T. & Erzinger S., 2005. Modelling Representative Life Cycle Inventories for Swiss Arable Crops. Int J LCA, 10: 68-76.
- Nemecek T., Huguenin-Elie O., Dubois D. & Gaillard G., 2005. Ökobilanzierung von Anbausystemen im schweizerischen Acker- und Futterbau. Agroscope FAL Reckenholz, Zürich; Schriftenreihe der FAL 58, 155 p.
- Oberholzer H.-R., Weisskopf P., Gaillard G., Weiss F. & Freiermuth R., 2006. Methode zur Beurteilung der Wirkungen landwirtschaftlicher Bewirtschaftung auf die Bodenqualität in Ökobilanzen – SALCA-SQ. Agroscope FAL Reckenholz, Zugang: <http://www.reckenholz.ch/doc/de/forsch/control/bilanz/salca-sq.pdf>, 98 p. [12.9.2006].
- Rossier D. & Gaillard G., 2004. Ökobilanzierung des Landwirtschaftsbetriebs – Methode und Anwendung in 50 Landwirtschaftsbetrieben. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich; FAL-Schriftenreihe 53, 142 p.
- Streun C., 2006. Ölsaaten: Nach dem Raps sind nun auch die Sonnenblumen kontrahiert. Zugang: www.swissgranum.ch/chf/2_comm-press/details.php?recordID=360 [6.9.2006].
- Zah R., Böni H., Gauch M., Hirschier R., Lehmann M., Wäger P., Bach C. & Stucki S., 2007. Ökobilanz von Energieprodukten - Ökologische Bewertung mit Schwerpunkt Treibstoff-Betrachtung. Zugang: <http://www.bfe.admin.ch> [22.5.2007].

RÉSUMÉ

Analyse du cycle de vie de plantes énergétiques

L'impact environnemental de la production d'énergie issue de biomasse dépend largement de la production agricole. Cette étude analyse de quelle façon la production de biomasse peut être optimisée du point de vue environnemental. Trois questions se posent : Comparé à la production intégrée, quels sont les avantages environnementaux de la production biologique ? Quelles cultures sont particulièrement favorables à la production de biomasse ? Quels autres facteurs jouent un rôle pour une production favorable à l'environnement ? La méthode SALCA (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment) développée par la Station de Recherche Reckenholz-Tänikon ART est utilisée pour l'analyse de cycle de vie. Par kilogramme de produit récolté de matière sèche (respectivement d'amidon pour les cultures servant à la production de bioéthanol et d'huile pour celles destinées au biodiesel), la production biologique se prêle du point de vue environnemental avant tout pour le maïs grain, le maïs d'ensilage et le soja. En ce qui concerne les céréales et le colza d'automne, la production biologique présente aussi bien des avantages que des désavantages. Les prairies extensives et les betteraves sucrières ont les impacts environnementaux les plus faibles pour la production de bioéthanol. Quant au biodiesel, il ne se dégage aucune culture dont la production soit indiscutablement préférable.

SUMMARY

Life cycle assessment of energy crops

The environmental impact of bioenergy production from biomass strongly depends on the crop cultivation. This study looks into the ecological optimisation of biomass cultivation answering following three questions: What is the environmental advantage of organic over integrated farming? Which crops are suited for biomass production? What other key factors have to be considered for a ecological production? The LCA was carried out using the SALCA-methodology (Swiss Agricultural Life Cycle Assessment) of Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART. Per kg harvested product (dry matter, starch for bioethanol crops, oil for biodiesel crops respectively) organic farming of energy crops is preferred to integrated production for corn, silage maize and soy cultivation. For cereals and rapeseed cultivation organic farming has advantages and drawbacks. The lowest environmental impacts for biogas show extensive grassland. Together with sugar beets it also has the lowest environmental impact for bioethanol. There is not a preferable crop for biodiesel.

Key words: Life Cycle Assessment, bioenergy, organic agriculture, integrated production, SALCA, environmental assessment