

Erweiterung der Studie

«Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich»: Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen



Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Matthias Stucki, Sarah Wettstein, Alex Mathis und Simon Amrein

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW

Wädenswil, 10. Oktober 2019

IMPRESSUM

Titel	Erweiterung der Studie «Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich»: Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Ökonomie und Innovation, CH-3003 Bern Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
Auftragnehmer	ZHAW Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
Autoren	Matthias Stucki und Sarah Wettstein (Forschungsgruppe Ökobilanzierung), Alex Mathis (Forschungsgruppe Hortikultur), Simon Amrein (Forschungsgruppe Bodenökologie), Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Begleitung BAFU	Laura Tschümperlin, Severin-Luca Bellè
Hinweis	Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.
Titelbilder	Bild: ©ZHAW
Projektleitung	Matthias Stucki, Forschungsgruppe Ökobilanzierung, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Kontakt	matthias.stucki@zhaw.ch https://www.zhaw.ch/iunr/lca
Haftungsausschluss	IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Grüental, Postfach CH-8820 Wädenswil Dieser Bericht beruht auf als verlässlich eingeschätzten Quellen. Die ZHAW und die Autoren geben keine Garantie bezüglich der Vollständigkeit der aufgeführten Informationen und lehnen eine rechtliche Haftung für Schäden jeglicher Art ab.
Dank der Autoren	Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der RICOTER Erdaufbereitung AG, insbesondere bei Maria Hogrebe, welche ihre Erfahrung sowie Daten für diese Studie zur Verfügung stellte. Ein herzlicher Dank geht auch an Herr Elmar Hartauer von der Deltaflor GmbH für die Überprüfung der Tabellenwerte sowie an Laura Tschümperlin vom Bundesamt für Umwelt, Severin-Luca Bellè von der Universität Zürich und Inge Forster von JardinSuisse, welche gemeinsam mit Maria Hogrebe die Studie im Rahmen einer Begleitgruppe unterstützten. Danke an die Verora AG und die Myerhans AG für die Bereitstellung von Daten.
Autorenbeiträge	Simon Amrein: Kapitel 3; Alex Mathis: Kapitel 4 und 5; übrige Kapitel: Sarah Wettstein und Matthias Stucki
Zitierung	Stucki, M., Wettstein, S., Mathis, A. und Amrein, S. 2019: Erweiterung der Studie «Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich»: Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen. Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wädenswil
Version	Version 3 vom 10/10/2019 13:31:00 Copyright © 2019

ZUSAMMENFASSUNG

Der Abbau von Torf ist mit relevanten Treibhausgasmissionen verbunden und führt zur Zerstörung sensibler Ökosysteme. Aus diesem Grund bestehen in den Garten- und Gemüsebau-Branchen Bestrebungen, den Torfverbrauch zu reduzieren. Der Verzicht auf Torf bedingt die Verfügbarkeit von alternativen Substraten, welche den pflanzenbaulichen Anforderungen genügen. Gleichzeitig sollen die Alternativsubstrate auch tatsächlich zu einer Reduktion und nicht zu einer Verlagerung der Umweltbelastung führen. Um Torf und Torfalternativprodukten umfassend zu beurteilen wurden im Jahr 2015 einer ersten Studie der ZHAW zehn Substratkomponenten und sieben Substratmischungen untersucht.

Durch die Bestrebungen von Torf als Pflanzensubstrat wegzukommen werden vermehrt auch andere Ausgangsstoffe relevant. In der vorliegenden Studie wurden deshalb neun weitere Substratkomponenten bezüglich ihrer Ökobilanz, pflanzenbaulichen Eigenschaften, sozialen Risiken der Produktion und ihrer zukünftigen Verfügbarkeit untersucht. Die beurteilten Substratkomponenten sind Pflanzenkohle aus Pyrolyse, Pflanzenkohle aus HTC, Pflanzenkohle-Kompost-Mischung, Chinaschilf, Hanffasern, Flachsschäben, Haferspелzen, Schilfrohr und angebautes Torfmoos.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass sämtliche untersuchten neun Substratkomponenten deutlich klimafreundlicher als Torf sind. Besonders umweltfreundlich sind Substratkomponenten aus angebauten, nachwachsenden, sekundären Reststoffen mit geringer Konkurrenz anderweitiger Nutzung oder Substratkomponenten aus Abfallprodukten. Die Umweltbelastung ist vor allem bei Chinaschilf, Hanffasern, Flachsschäben, Schilfrohr und angebautem Torfmoos tiefer als bei Torf.

Bei allen untersuchten Komponenten zeigte sich, dass durch die Produktionsmöglichkeit in der Schweiz keine wesentlichen sozialen Risiken bestehen. Trotz der ökologischen Vorteile ist beim angebauten Torfmoos zurzeit die Verfügbarkeit nicht gewährleistet.

Im Vergleich mit den Komponenten aus der Studie von 2015 zeigt sich, dass Holzfasern und Holzhäcksel den anderen Substratkomponenten in der Umweltbelastung und dem Treibhauspotential überlegen sind. Jedoch haben alle neu untersuchten Substratkomponenten deutlich geringere Umweltauswirkungen als Kokosfasern, welche als Alternative für Torf weit verbreitet sind.

In geeigneten Mischungen können aus den Komponenten Substrate mit hochwertigen pflanzenbaulichen Eigenschaften für verschiedene Anwendungen im Gartenbau und der Gemüseproduktion hergestellt werden. Wenn einheimische Substratkomponenten eingesetzt werden, besteht ein grosses Potential zur Reduktion von negativen Umweltauswirkungen und sozialen Risiken im Vergleich zu Produkten aus Torf und Kokosfasern.

Tab. 1: Pflanzenbauliche Eigenschaften, zukünftige Verfügbarkeit, Umweltauswirkungen und soziale Risiken der Substratkomponenten aus der Studie von 2015 und der 2019-Erweiterung. Die Gesamtumweltbelastung ist inklusive und exklusive der Schwermetall-Emissionen (SM) während der Nutzungsphase ausgewiesen. Die Farbcodierung kennzeichnet, ob das Resultat als positiv (■), eher positiv (■), eher negativ (■) oder negativ (■) beurteilt werden kann. (■): keine Daten / keine Beurteilung vorgenommen.

		Pflanzenbauliche Eigenschaften											Verfügbarkeit	Preisabhängigkeit	Umweltaspekte			Soziale Aspekte						
		Schüttdichte, trocken kg TS/m ³	pH (CaCl ₂)	Pufferkapazität	Nährstoffgehalt			Salzgehalt	Stickstoffimmobilisierung	Wässerrückhaltevermögen	Luftkapazität	Strukturstabilität			Mittel- bis langfristige Verfügbarkeit	Abhängigkeit des Preises von der Energiewirtschaft	Treibhauspotenzial kg CO ₂ -eq/m ³		Gesamtumweltbelastung		Kumulierter nicht erneuerbarer Energieaufwand	Soziale Risiken		
					mg/l NO ₃ -N, NH ₄ -N	mg/l P ₂ O ₅	mg/l K ₂ O	g/L	-	Vol.-%	Vol.-%	-	-	-	kg CO ₂ -eq/m ³	inkl. SM aus Nutzung	exkl.	MJ/m ³	-					
Bisherige Substratkomponenten (Studie 2015)	Schwarztorf	120-250	2.5-3.5	klein	≤50	≤30	≤40	≤0.4	keine	70	20	mittel	+/-	gering	350 ^e	260 ^e	250 ^e	3700	Gesundheitl. Risiken					
	Weisstorf	80-120	2.5-3.5	klein	≤50	≤30	≤40	≤0.4	keine	60	30	mittel												
	Rindenkompost	200-300	5.0-7.0	gross	≤400	≤150	≤600	≤1.5	mittel	50	40	mittel	+ / ++	keine	32	65	36	300	keine Risiken					
	Grüngutkompost	600	7.6	mittel	70	700	2000	2	mittel	>50	30	klein	+ / ++	keine	90	860 ^e	110 ^e	330	keine Risiken					
	Reisspelzen	90-100	5.0-6.0	keine	0	0	800	0.6	klein	9	90	mittel	++	hoch	29	62	47	260	bei Import aus Asien					
	Holzfasern	80-130	4.7-6.0	klein	≤50	80	100	0.1	mittel	20	60	klein	+	mittel	9.5	22	14	170	keine Risiken					
	Holzhäcksel fein	130-140	3.5-4.0	klein	≤50	80	100	0.2	klein	30	>70	mittel	++	mittel	9.2	37	13	120	keine Risiken					
	Kokosfasern	50-150	4.5-6.5	klein	<50	<50	600	0.8	hoch	40	60	klein	+ / ++	hoch	85	520	510	890	beachtenswert					
	Cocopeat	80	4.0-5.5	klein	<5	10	500	0.6	hoch	70	30	klein	+ / ++	mittel	40	120	120	400	beachtenswert					
	Xylit	160-230	4.5	klein	<10	<10	<50	0.5	mittel	50	40	mittel	+/-	gering										
Landerde	1300	5.5-6.5	mittel						keine			mittel	++	keine	4.9	7.0	7.0	55	keine Risiken					
TEFA	200	6.8	mittel	180	<5	150	0.4			50	40	mittel	++	gering	26	93	71	370	keine Risiken					
Neue Substratkomponenten (Studie 2019)	Pflanzenkohle (Pyrolyse) ^{a,b}	300	5.2-8.8	gross	<5	200	2000	3	mittel	50	20	hoch	+	hoch	80 ^{a,f}	48 ^{b,f}	190 ^{a,f}	130 ^{b,f}	120 ^{a,f}	59 ^{b,f}	1700 ^a	1200 ^a	keine Risiken	
	Pflanzenkohle (HTC)	340	5.8-6.4	gross	0.4	300	1000	2	mittel	60	20	hoch	+	hoch										keine Risiken
	Chinaschilf	70	5.1-6.1	keine	<5	30	300	0.2	mittel	10	80	hoch	+	gering	11	90	30	140	keine Risiken					
	Hanf Fasern	31	7.0	keine	20	60	900	0.5	klein	50	40	mittel	+	mittel	27	130	130	270	keine Risiken					
	Flachsschäben	150-220	5.0-5.6	klein	10	80	300	0.2	mittel	20	80	hoch	+	mittel	17	69	39	230	keine Risiken					
	Getreidespelzen (Hafer)	150	7.6	keine	80	800	900	0.6	mittel	<20	80	mittel	++	mittel	31	260	250	220	keine Risiken					
	Schilf ^{c,d}	65	6.4	keine	<5	<10	200	0.3	mittel	10	80	hoch	++	gering	15 ^c	8.0 ^d	110 ^c	65 ^d	58 ^e	10 ^d	220 ^c	110 ^d	keine Risiken	
	Torfmoos (Anbau)	30-60	3.3-5.8	klein	20	10	70	0.2	klein	50	40	mittel	-	gering	19	38	35	120	geringe Risiken					
	Pflanzenkohle-Kompost	620-810	7.2-7.5	gross	60	500	2000	2	mittel	60	30	mittel	+	mittel	80 ^f	320 ^f	120 ^f	780	keine Risiken					

^a Pflanzenkohle aus Holz mit ökonomischem Wert

^b Pflanzenkohle aus Abfallholz

^c Schilf aus Anbau

^d Schilf aus Naturschutzgebiet

^e 2018 aktualisiert

^f Die Verminderung der Umweltbelastung durch die potentielle Kohlenstoff-Speicherung der Pflanzenkohle übersteigt die hier ausgewiesene Umweltauswirkung.

INHALT

1	EINLEITUNG	3
2	ZIEL UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN	4
2.1	Ziel der Studie.....	4
2.2	Die Ökobilanz-Methode	4
2.3	Systembeschreibung	5
2.4	Beschreibung der Substratkomponenten	6
2.5	Bewertungsmethoden.....	13
2.6	Datenquellen für die Ökobilanzierung	15
3	PFLANZENBAULICHE EIGENSCHAFTEN	16
3.1	Substratkomponenten	16
3.2	Bewertung der chemisch-physikalischen Eigenschaften von Substraten	24
4	ZUKÜNFTIGE VERFÜGBARKEIT	28
4.1	Allgemeine Situation	28
4.2	Substratkomponenten	28
4.3	Zwischenfazit.....	33
5	SOZIALE AUSWIRKUNGEN	35
5.1	Soziale Wirkungsabschätzung von nachwachsenden Rohstoffen	35
5.2	Substratkomponenten Schweizer Herkunft.....	37
5.3	Substratkomponenten aus dem Ausland	38
5.4	Zwischenfazit.....	39
6	ÖKOBILANZ	41
6.1	Sachbilanz.....	41
6.2	Wirkungsbilanz	49
6.3	Zwischenfazit.....	56

Einleitung

7	ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE DER SUBSTRATKOMPONENTEN	57
8	DISKUSSION	59
8.1	Unsicherheiten	59
8.2	Empfehlungen und Fazit.....	61
9	LITERATUR.....	63
	ANHANG A.....	74
	ANHANG B – VERTRAULICHE INFORMATIONEN	82

1 EINLEITUNG

Seit Dezember 2012 liegt das vom Bundesrat verabschiedete Torfausstiegskonzept des Bundes vor. Ziel ist die Reduktion der Verwendung von Torf. Im Vordergrund stehen freiwillige Massnahmen. Unabhängig vom Torfausstiegskonzept besteht ein Druck seitens der Öffentlichkeit, insbesondere des Naturschutzes, auf die Verwendung von Torf zu verzichten. Auch in den Medien wird das Thema immer wieder aufgegriffen. Als Verbraucher von Torf sind die Garten- und Gemüsebau-Branchen sowie der Detailhandel aufgefordert, den Torfverbrauch zu reduzieren. Entsprechend sind alternative Substrate gefragt, welche den pflanzenbaulichen Anforderungen genügen.

Die pflanzenbaulichen Eigenschaften vieler gängiger Alternativsubstrate sind bekannt, so dass entsprechende Empfehlungen abgegeben werden können. Während mit dem Verzicht auf Torf bekannte negative Umweltauswirkungen der Torfgewinnung und -anwendung vermindert werden, gilt es bei der Wahl von Alternativsubstraten eine Verlagerung der Umweltwirkungen zu vermeiden. Bei der Betrachtung der Umweltwirkungen ist die Verwendung eines Lebenszyklusansatzes wichtig. Mit auf den Schweizer Kontext zugeschnittenen Ökobilanzstudien kann aufgezeigt werden, mit welchen Alternativsubstraten die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus tatsächlich reduziert und nicht nur verlagert werden.

Im Jahr 2015 wurde im Auftrag der Branchenverbände JardinSuisse, des Unternehmerverbandes Gärtner Schweiz und der VSGP mit Unterstützung des Bundesamts für Umwelt (BAFU) an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften eine Studie erarbeitet, welche Torf und verschiedene Torfersatzprodukte miteinander vergleicht (Eymann et al., 2015). Im Vordergrund des Vergleichs standen die pflanzenbaulichen Eigenschaften, die Verfügbarkeit, die preisliche Abhängigkeit von der Energiewirtschaft, die ökologische Nachhaltigkeit und soziale Risiken. Insgesamt wurden 12 verschiedene Substratkomponenten und Substrate analysiert, die zum Zeitpunkt der Studie praxisgänglich waren.

In der vorliegenden neuen Studie wurde die Studie von 2015 um weitere Substratkomponenten erweitert, welche aufgrund von definierten Kriterien ein hohes Potential als Torfsubstitut aufweisen. Analog der Studie von 2015 wurden die Substratkomponenten insbesondere auf deren pflanzenbauliche Eigenschaften, mittel- bis langfristigen Verfügbarkeit für die Schweiz sowie die ökologische mittels der Ökobilanz-Methode und die soziale Nachhaltigkeit mittels einer qualitativen Abschätzung evaluiert.

Gemeinsam mit dem Auftraggeber wurden folgende Substratkomponenten ausgewählt: Pflanzenkohle (aus Pyrolyse), Pflanzenkohle-Kompost, Chinaschilf, Hanffasern, Flachsschäben, Getreidespelzen (Hafer), Schilf (angebaut und aus Naturschutzgebiet) und Torfmoos (angebaut).

2 ZIEL UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN

2.1 ZIEL DER STUDIE

Die Studie von Eymann et al. (2015) soll um die in Tabelle 2-1 aufgeführten Substrate erweitert werden. Die Studie soll folgende Kriterien erfüllen:

1. Die Studie liefert ein Bild der Umweltwirkungen von Substratkomponenten, wobei für die Ökobilanzierung jeweils der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt wird (Rohstoffgewinnung, Substratproduktion, Transporte, Nutzung).
2. Die Studie berücksichtigt neben ökologischen auch sozialen Kriterien. Diese werden qualitativ beurteilt.
3. Die Studie gibt Auskunft über die mittel- und langfristige Verfügbarkeit einzelner Substrate.
4. Die Studie soll Empfehlungen für den Garten- und Landschaftsbau, für Baumschulen, Behörden, den gärtnerischen Detailhandel sowie für Produzenten von Zierpflanzen, Stauden und Gemüse abgeben.

Tabelle 2-1: In dieser Studie untersuchte Substratkomponenten

Substratkomponenten
<ul style="list-style-type: none">• Pflanzkohle aus Pyrolyse sowie HTC-Kohle• Pflanzkohle-Kompost• Chinaschilf• Hanffasern• Flachsschäben• Getreidespelzen (Hafer)• Schilf (Anbau)• Schilf (aus Naturschutzgebiet)• Torfmoos (Anbau)

2.2 DIE ÖKOBILANZ-METHODE

Die Beurteilung der Umweltwirkungen der Substratkomponenten erfolgt anhand von Ökobilanzen. Die Ökobilanzierung ist eine standardisierte Methode zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Produkten über deren gesamten Lebenszyklus.

Gemäss ISO 14040 erfolgt die Ökobilanzierung in vier Phasen: In einem ersten Schritt werden **Ziel und Untersuchungsrahmen** definiert. Die zweite Phase ist die **Sachbilanzierung**, in der für jeden Prozess innerhalb des betrachteten Systems die Ressourcen- und Energieflüsse sowie die Emissionen und Abfälle quantifiziert werden. In der dritten Phase, der **Wirkungsabschätzung**, werden mit Hilfe der Sachbilanzergebnisse die Um-

weltwirkungen des Systems beurteilt. Dazu werden die Sachbilanzdaten mit spezifischen Wirkungsindikatoren verknüpft. Für diesen Schritt stehen verschiedene Wirkungsabschätzungsmethoden zur Verfügung (vgl. Abschnitt 2.5.1). In der letzten Phase, der **Auswertung**, werden die Ergebnisse interpretiert (International Organization for Standardization, 2006).

In der vorliegenden Studie wird in Abschnitt 6.1 die Sachbilanz für die untersuchten Substratkomponenten beschrieben. In Abschnitt 6.2 erfolgt die ökologische Wirkungsabschätzung.

2.3 SYSTEMBESCHREIBUNG

Im Folgenden wird das System, das in der vorliegenden Studie untersucht wird, beschrieben. In Abschnitt 2.3.1 wird die funktionelle Einheit für die Ökobilanz definiert und in Abschnitt 2.3.2 erfolgt eine Beschreibung des in der Ökobilanz betrachteten Systems. Die Systemgrenze für die Abschätzung der sozialen Risiken wird in Abschnitt 2.3.3 festgelegt.

2.3.1 FUNKTIONELLE EINHEIT FÜR DIE ÖKOBILANZIERUNG

Die Ökobilanzergebnisse werden für die Substratkomponenten einzeln ausgewiesen. Als funktionelle Einheit für die Ökobilanzierung der Substratkomponenten wurde die Nutzung von 1 m³ der jeweiligen Produkte definiert.

2.3.2 SYSTEMGRENZE FÜR DIE ÖKOBILANZIERUNG

Das in dieser Studie betrachtete Produktsystem umfasst die Herstellung der Rohstoffe der in Tabelle 2-1 aufgeführten Substratkomponenten, deren Transport zu einer Verarbeitungsanlage in der Schweiz, die Aufbereitung zu Substratkomponenten und die Nutzung der Substratkomponenten (Abbildung 2-1). Das Produktionssystem ist in folgende Phasen aufgeteilt:

- **Herstellung der Substratkomponenten:** Hierzu berücksichtigt werden der Ressourcenaufwand und die Emissionen für den Abbau oder die Produktion der Substratkomponenten.
- **Transport:** Diese Phase umfasst sämtliche Transporte der Substratkomponenten von ihrer Abbau- oder Produktionsstätte zu einer Verarbeitungsanlage in der Schweiz.
- **Nutzung der Substratkomponenten:** Die Nutzungsphase umfasst Emissionen, welche während und nach der Nutzung der Substratkomponenten im Gartenbau auftreten (z.B. CO₂-Emissionen bei der Zersetzung von Torf). Es wird davon ausgegangen, dass die Substrate einmalig genutzt werden. Eine Aufdüngung der Substratkomponenten wird nicht berücksichtigt, weil diese je nach Anwendung und Substratmischung unterschiedlich ausfällt und diese die pflanzenbaulichen Eigenschaften gemäss Kapitel 3 verändern würde.

Ziel und Untersuchungsrahmen

Für die Entsorgung der Substratkomponenten sind keine Umweltauswirkungen berechnet, da Emissionen beim Ausbringen der Substratkomponenten ins Freiland der Nutzungsphase angerechnet werden.

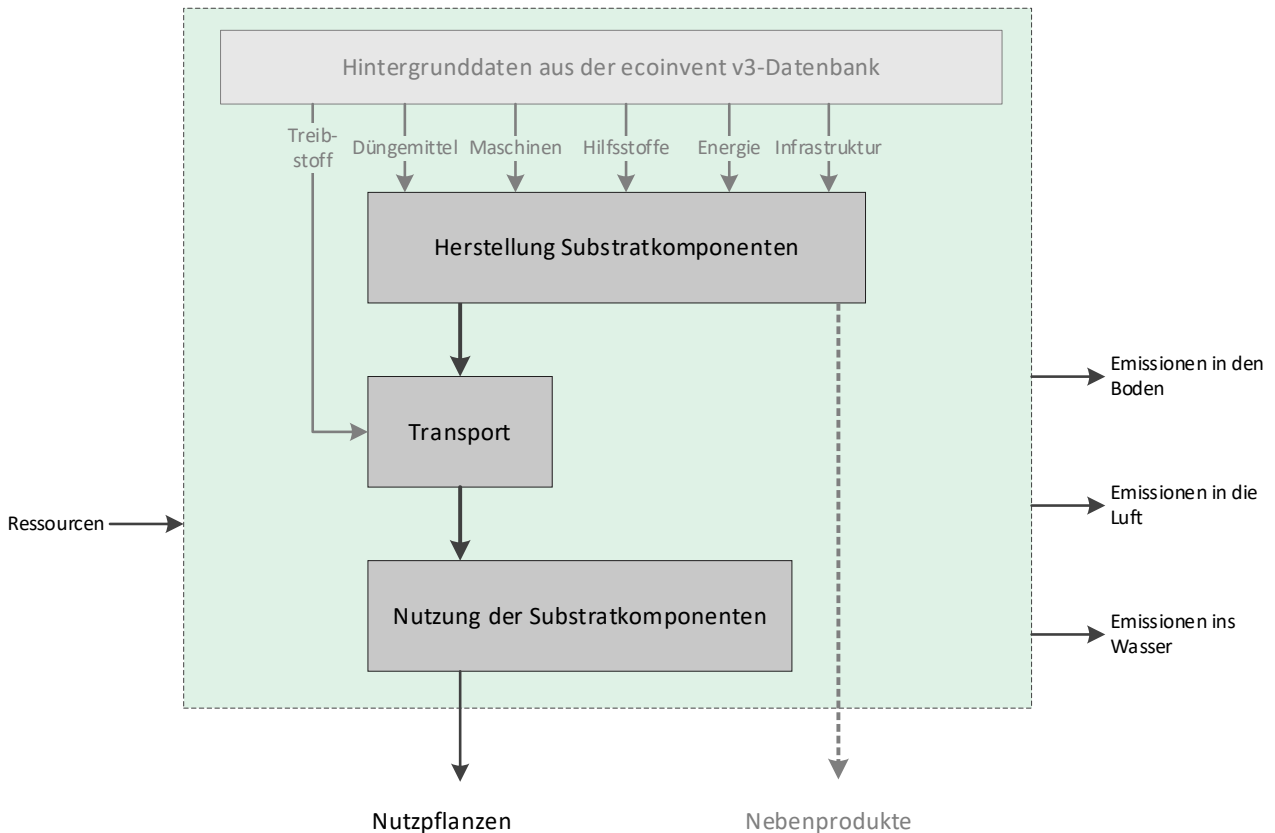


Abbildung 2-1: Systemgrenze für die Ökobilanzierung.

2.3.3 SYSTEMGRENZE FÜR DIE ABSCHÄTZUNG DER SOZIALEN RISIKEN

Die Beurteilung der sozialen Auswirkungen beschränkt sich auf eine Analyse der Substratkomponenten-Produktion, während die restlichen Prozesse im Lebenszyklus der Substrate ausgeklammert werden (z.B. Transporte, Nutzung). Es handelt sich somit nicht um eine komplette soziale Lebenszyklusanalyse.

2.4 BESCHREIBUNG DER SUBSTRATKOMPONENTEN

2.4.1 PFLANZENKOHLE

Durch pyrolytische oder hydrothermale Behandlung von fester bzw. feuchter Biomasse in einer sauerstoffbegrenzten Umgebung kann Kohle hergestellt werden, welche sich durch einen mit hohem C-Gehalt in Form von aromatischen Ringen auszeichnet (Abbildung 2-2). Im Folgenden wird Kohle aus dem HTC-Prozess als «HTC-Kohle» bezeichnet und jene aus dem Pyrolyseprozess als «Pflanzenkohle». Grundsätzlich sind Pflanzenkohle- und HTC-Kohle das Ergebnis unterschiedlicher Herstellungstechniken. Die HTC-Kohle entsteht bei

der hydrothermalen Carbonisierung unter Luftabschluss und hohem Druck (15–35 bar) und einer Temperatur zwischen 200–250 °C. Pflanzenkohle hingegen ist das Produkt einer pyrolytischen Carbonisierung bei minimalem Sauerstoffgehalt und einer Temperatur zwischen 350–1000 C (Schmilewski, 2018). Das brennbare Gas im Pyrolyseprozess besteht aus den Hauptkomponenten CO, CO₂, H₂, CH₄, einer kleineren Menge an Hydrokarbonaten sowie weiteren, komplexen Pyrolysegasen. Untersuchungen zur Pflanzenkohle im Zusammenhang mit der Bodenfruchtbarkeit konzentrierten sich in den vergangenen Jahren auf die Verbesserung der Bodenqualität, Möglichkeiten der Reduktion von unerwünschten Emissionen, applikationstechnische Aspekte sowie der Möglichkeit einer Kohlenstoff-Sequestrierung (Kammann et al., 2016). Ebenso wurde auch in verschiedenen Studien die Möglichkeit der Ergänzung von Pflanzenkohle in Substraten für den Horssol-Anbau sowie als Zusatz in Anzuchtsubstraten untersucht (Dumroese et al., 2011; Nieto et al., 2016; Kaudal et al., 2015). HTC-Kohle und Pflanzenkohle zeigen bezüglich dem Wasser- und Luftspeichervermögen sowie dem Kohlenstoffgehalt eine Vergleichbarkeit mit Torf. Durch Veränderungen der Herstellungsbedingungen kann die Qualität der Pflanzenkohlenprodukte wesentlich beeinflusst werden. Eine Annäherung an die Konsistenz und Eigenschaften von Torf ist für Pflanzenkohle schwierig, für HTC-Kohle ansatzweise möglich, wie Versuche von Tolksdorf-Lienemann & Rebling (2009) zeigten. Pflanzenkohle hat im Gartenbau bzw. der Landwirtschaft vor allem ihre Bedeutung als Nährstoff- und Wasserspeicher, wenn sie bereits im Kompostierprozess oder durch Zugabe einer organischen oder anorganischen Nährlösung, wie Gülle oder flüssige Gärreste, vorgängig «aufgeladen» wurde.



Abbildung 2-2: Pflanzenkohle aus Siebresten der Holzschnitzelaufarbeitung (Bild ZHAW)

2.4.2 CHINASCHILF (MISCANTHUS)

Die Gattung *Miscanthus* (C₄-Pflanze) gehört zur Familie der Süßgräser. Die bekanntesten Arten für eine stoffliche Verwertung sind *M. sinensis* (Chinaschilf) und *M. giganteus* (Riesen-Chinaschilf). Das Gras wird seit den

1980er Jahren angebaut und als nachwachsender Rohstoff von der Bauindustrie als Dämmstoff, von der Zellstoffindustrie, im Gartenbau als Torfersatz, in der Tierhaltung als Einstreu, als Mulchmaterial sowie in der Energiewirtschaft zum Heizen genutzt. Die Pflanzen sind mehrjährig und stammen ursprünglich aus Asien. Sie lassen sich in unseren Breitengraden nur über Rhizome vermehren. Das Erntegut wird auf Längen zwischen 15 und 70 mm gehäckselt und in einem späteren Prozessschritt durch Nutzung verschiedener Mühlen-typen auf ≤ 30 mm weiter verkleinert (Maendy & Formowitz, 2009). Entsprechend ist die Struktur dieses Häckselguts als eher grob zu betrachten (Abbildung 2-3). Eine weitere thermische Nachbehandlung, beispielsweise über einen Extruder, ist möglich (Klawitter, 2015) und erlaubt eine zusätzliche Vergrößerung der inneren Oberfläche. Dieser Schritt wäre notwendig, damit Chinaschilf als Substratkomponente verwendet werden könnte. In neuen Versuchen der Firma Gramoflor zeigen neben Miscanthus noch andere Schilfarten ein gutes Potential als nachwachsende Rohstoffpflanzen für Torf (Fischer-Klüver, 2018).



Abbildung 2-3: Miscanthus-Häcksel mit unterschiedlicher Korngrösse
(Quelle: <https://www.fennington-fibres.co.uk/products/>)

2.4.3 PRODUKTE AUS DER HANFFASER- UND FLACHSAUFBEREITUNG

Hanf- und Flachsfasern werden aus dem Stängel der Hanf- (*Cannabis sativa* L) bzw. Ölleinpflanze (*Linum usitatissimum*) gewonnen. Ein wichtiger Produktionsschritt ist das «Rösten» der Stängel. Dabei erfolgt der Faseraufschluss. Es ist ein biologischer oder chemischer Fermentationsprozess, bei welchem die als Leim wirkenden Pektine im Stängel aufgelöst werden. Bei der anschliessenden mechanischen Aufbereitung fallen Restprodukte an, die als Torfersatzstoffe in gärtnerischen Substraten interessant sein können.

2.4.3.1 HANFFASER

Hanf und Flachs gehören zu den Bastfaserpflanzen. Die sehr stabilen Hanf- und Flachsfasern werden aus dem Stängel der Hanfpflanze (*Cannabis sativa* L) bzw. Ölleinpflanze (*Linum usitatissimum*) gewonnen. Bei der mechanischen Aufbereitung nach dem Faseraufschluss fallen Schäben, Faser-Schäben-Gemisch und Feinfasern an, die vielversprechende Eigenschaften als Torfersatz in gärtnerischen Substraten aufweisen.

Reine Hanffaserzellstoffe werden heutzutage in Textilien, Zellstoffen, Papieren, Isolationsmaterial oder als Naturfaserverbundwerkstoffe der Automobilindustrie eingesetzt. Da die Hanffaser teurer ist als Holzfasern, wird sie vorwiegend im höherpreisigen Industriebereich eingesetzt (Carus & Sarmiento, 2016) (Abbildung 2-4)).



Abbildung 2-4: Hanffaser (Bild zhaw)

2.4.3.2 FLACHSSCHÄBEN

Flachs gehört wie Hanf, Jute, Sunn, Kenaf, Urena, Rosella und Ramie zu den Bastfasern. Flachsschäben sind ein Nebenprodukt der Flachsfasergewinnung. Die Bastpflanzen werden kurz vor der Samenreife ausgerissen und auf dem Feld während 5 bis 8 Wochen getrocknet. Blätter und Seitenäste werden durch «Riffeln» beseitigt. Beim anschließenden «Rösten» erfolgt eine Auflösung von mikrobiell leicht abbaubaren Substanzen. Der verholzte Pflanzenstängel wird nun mechanisch in sogenannte Schäben gebrochen und in einer Schwinganlage ausgeschlagen. Dabei lassen sich die Leinfasern aus dem Röststroh herausarbeiten. Zurück bleibt das verholzte Flachsstroh, die Flachsschäben (Schmilewski, 2018). Flachsschäben haben eine Länge von ca. 6 bis 15 mm und eine Breite von ca. 1 mm (Abbildung 2-4, Abbildung 2-5). Vor dem Einsatz als Substratausgangsstoff werden Flachsschäben thermisch behandelt, um eventuell enthaltene Unkraut- und Leinsamen sicher

abzutöten oder andere pflanzliche Eigenschaften zu verändern (SCHACHT & HÖRMANDIGER 1993). Der Schäbenanteil am Leinstängel liegt zwischen 45 und 55 Gew.-% (Jauch, 2009). Für die Flachsfaser gilt das gleiche wie für die Hanffaser: Das Potential für die Verwendung in gärtnerischen Substraten ist da, aber die mechanische und thermische Aufbereitung sind Schlüsselaspekte für die Weiterverwendung.



Abbildung 2-5: Flachsschäben (Bild zhaw)

2.4.4 GETREIDESPELZEN

Aus der Getreideverarbeitung resultieren verschiedene Restprodukte als Mühlennachfolgegemisch, wozu bei gewissen Getreidearten auch die Spelzen zählen. Sie gelangen in der Regel in den Futtermittelsektor und stehen als Einzelprodukt für andere Verwertungszwecke nicht zur Verfügung (Villiger, 2018). Dies gilt auch für Getreidekleie, welches als Einzelprodukt gewonnen und zur Hauptsache als Futtermittel vermarktet wird. Eine Verwendung dieser Futtermittelprodukte als Ersatzstoff für Torf in gärtnerischen Substraten wird wegen der geringeren Wertschöpfung und aus ethischen Gründen nicht in Betracht gezogen.

Eine spezielle Gruppe unter den Getreidearten bilden Hafer, Einkorn und Dinkel. Die Körner sind von einer festen Hülle umschlossen, die sich im Gegensatz bspw. zu Nacktweizen nicht allein durch Dreschen entfernen lässt. Für menschliche Ernährungszwecke müssen die Körner separat entspelzt werden, da Spelzen unverdaulich und somit nicht für den Verzehr geeignet sind (Abbildung 2-6).



Abbildung 2-6: Dinkelspelzen (Bild <https://jovial-foods.com/how-we-remove-einkorns-husk/>)

2.4.5 SCHILFROHR (*PHRAGMITES AUSTRALIS*)

Schilfrohr ist eine Sumpfpflanze, die bis 4 m hoch werden kann. In vielen Seen, Mooren und sonstigen Riedflächen kann sich Schilf monokulturartig vermehren. Die Pflanze trägt aktiv zur Verlandung von stehenden oder langsam fliessenden Gewässern bei. Schilf ist ein natürlicher Baustoff. Es nimmt keine Feuchtigkeit auf und verrottet langsam. Bei der Pflege von Schilfgebieten fallen grössere Mengen an Schilf an, welches entweder kompostiert oder in Biogasanlagen verwertet werden kann. Im Gartenbau kann Schilfrohr ähnlich dem Chinaschilf als Mulchmaterial zur Bodenabdeckung verwendet werden. Für eine Nutzung in gärtnerischen Substraten sind Prozessschritte wie Fermentation, Trocknung, thermische Aufbereitung oder mechanische Bearbeitung notwendig. Aktuell arbeiten Firmen an der Weiterentwicklung dieses Fasertyps (GABOT, 2018)

2.4.6 TORFMOOS

Torfmoos lässt sich auf genutzten oder stillgelegten Mooren wieder anbauen und als Torfersatz verwenden (Abbildung 2-7). Zu den Torfmoosen zählen weltweit etwa 286 Arten (Michaelis, 2012). Nur ein kleiner Teil ist für die weitläufigen Moorlandschaften verantwortlich und kann dort geerntet werden (Kämäräinen et al., 2018). Eine Entnahme von Torfmoos aus Naturschutzgebieten ist in der Schweiz und in Deutschland jedoch verboten. Getrocknetes Torfmoos wird von Ländern wie Chile oder Neuseeland exportiert (Schmilewski, 2018). Aber es lässt sich auch auf genutzten oder stillgelegten Mooren wieder anbauen und als Torfersatz verwenden (Abbildung 2-7). Die Kultur erfolgt entweder bodenbasiert oder auf Wasserflächen. Torfmoos zeigt ähnliche wasserspeichernde Eigenschaften wie Torf. Voraussetzung für die Rekultivierung ist, dass die Flächen nicht entwässert sind und die gleichen Wachstumsvoraussetzungen bieten, wie die ehemaligen Moore. Gemäss Versuchen an der Universität Greifswald ist es möglich, alle drei Jahre Torfmoos zu ernten. Die Ertragsmengen betragen 3–7 Tonnen Frischmasse pro Hektare (Gaudig et al., 2016).



Abbildung 2-7: Geerntete Torfmoose von wieder vernässtem Hochmoorgrünland (Bild <https://www.warum-torf.info/torf-alternativen/torfmoose>)

2.4.7 PFLANZENKOHLE-KOMPOST

Pflanzenkohle-Kompost-Mischungen werden vor allem zur gezielten Förderung der Bodengesundheit auf Freilandböden eingesetzt (Abbildung 2-8). Es ist aber auch möglich, mit einer ausgewogenen Kompost-Pflanzenkohlemischung ein Anzuchtsubstrat von ausreichender Qualität für die praktische Verwendung herzustellen (Schmidt et al., 2014). Insbesondere die Kombination mit Vermicompost verspricht ein grosses Potential als Torfersatz zu haben (Álvarez et al., 2018). Bei der Herstellung von Pflanzenkohle-Kompostmischungen hat sich die Zugabe von Pflanzenkohle bereits beim Kompostierstart durchgesetzt (Godlewska et al., 2017). Während der Kompostierung vermögen Zugaben von 5–30 Vol-% Pflanzenkohle Verluste an Kohlenstoff und Stickstoff, störende Geruchsemissionen sowie den Austritt von klimarelevanten Gasen zu reduzieren.



Abbildung 2-8: Kohle-Kompostmischung, wo ein Grossteil der Kohlestücke bereits «verkompostet» ist (Bild Verora GmbH)

2.5 BEWERTUNGSMETHODEN

Im Folgenden werden die Methoden für die Beurteilung der Umweltauswirkungen (Abschnitt 2.5.1) und der sozialen Risiken (Abschnitt 2.5.2) beschrieben.

2.5.1 ÖKOBILANZ

Für die Beurteilung der Umweltwirkungen von Substratkomponenten wurden die in Tabelle 2-2 aufgeführten Umweltindikatoren ausgewertet.

Ziel und Untersuchungsrahmen

Tabelle 2-2: In dieser Studie verwendete Indikatoren für die ökologische Wirkungsabschätzung

Indikator	Methode	Beschreibung
Gesamtumweltbelastung	Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht et al., 2013) mit zusätzlichem Ökofaktor für die Energieressource Torf	Die Methode der ökologischen Knappheit gewichtet die Emissionen und Ressourcenverbräuche anhand der politischen Zielwerte. Das Ergebnis wird dabei in Umweltbelastungspunkten (UBP) ausgedrückt. Für die vorliegende Studie wird basierend auf dem Heizwert von Torf ein zusätzlicher Ökofaktor für die Nutzung der Energieressource Torf hergeleitet (30.6 UBP/kg Torf ¹).
Treibhauspotenzial	IPCC (2013)	Die Wirkungskategorie Klimawandel nach IPCC 2013 berücksichtigt alle Emissionen, die zum Klimawandel beitragen. Die potenzielle Klimawirkung eines Treibhausgases wird dabei mit den Klimawirkungen von CO ₂ verglichen und in CO ₂ -Äquivalenten ausgedrückt.
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	Frischknecht et al. (2007)	Der kumulierte Energieaufwand gibt den Verbrauch erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Energieressourcen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts an. Dabei wird sowohl der direkte als auch der indirekte (graue) Energieaufwand berücksichtigt. Als Einheit werden MJ-Äquivalente verwendet. In der vorliegenden Studie wird der nicht-erneuerbare Energieaufwand ausgewiesen.
Süswasser-Eutrophierung	ILCD 2011+ Midpoint (Hauschild et al., 2011) ohne Langzeitemissionen	Unter Süswasser-Eutrophierung versteht man die Anreicherung von Nährstoffen im Süswasser. Für die Wirkungsabschätzung werden nur diejenigen Nährstoffe berücksichtigt, welche die Produktion von aquatischer Biomasse limitieren. Für Süswasser ist der limitierende Nährstoff Phosphor (Goedkoop et al., 2009). Als Einheit werden entsprechend P-Äquivalente verwendet. In der vorliegenden Studie werden Langzeitemissionen, welche zur Süswasser-Eutrophierung beitragen, ausgeschlossen. Dies bedeutet, dass beispielsweise Emissionen aus Depo-nien, welche nach einem Zeithorizont von 60'000 Jahren anfallen, nicht bewertet werden (Frischknecht et al., (2007).
Landnutzung	ReCiPe Midpoint v1.12 (Goedkoop et al., 2009)	Die Landnutzung ist ein Indikator für den Flächenbedarf. Unterschiedliche Flächentypen werden bei dieser Methode gleich bewertet.

2.5.2 SOZIALE AUSWIRKUNGEN DER SUBSTRATKOMPONENTENPRODUKTION

Die Beurteilung der sozialen Auswirkungen der Substratkomponenten-Produktion erfolgt qualitativ. Gemäss Andrews et al. (2009) sind soziale und sozio-ökonomische Auswirkungen insbesondere für die in Tabelle 2-3 aufgeführten Stakeholder-Gruppen von Bedeutung. Für jede Stakeholder-Gruppe definieren Andrews et al.

¹ Der kumulierte Energieaufwand pro kg Torf beträgt 9 MJ/kg (Hischier et al., 2009), der Ökofaktor beträgt 3.4 UBP/MJ (Frischknecht et al., 2013, S. 164). Dies ergibt einen Ökofaktor von $9 \text{ MJ/kg} \cdot 3.4 \text{ UBP/MJ} = 30.6 \text{ UBP/kg}$

(2009) ein Set von Subkategorien (Tabelle 2-3), welche anhand von verschiedenen Indikatoren bewertet werden. So ist beispielsweise der Mindestlohn ein Indikator der Subkategorie „faire Bezahlung“ (Benoît Norris et al., 2013).

Tabelle 2-3: Stakeholder-Gruppen und Subkategorien für soziale Lebenszyklusanalysen gemäss Andrews et al. (2009)

Stakeholder-Gruppe	Beispiele für Subkategorien
Arbeitnehmer	Faire Bezahlung; Mitspracherecht; Kinderarbeit; Arbeitsbedingungen; Gesundheit
Lokale Gemeinschaft	Lokale Beschäftigung; sichere und gesunde Lebensbedingungen
Gesellschaft	Öffentliches Bekenntnis zur Nachhaltigkeit; Korruption; Technologieentwicklung
Konsumenten	Gesundheit und Sicherheit; Feedback-Möglichkeiten; End-of-life-Verantwortung
Zulieferer	Soziale Verantwortung; fairer Wettbewerb; Lieferantenbeziehungen

Da die Datenverfügbarkeit zu sozialen Aspekten sehr unterschiedlich ist, erfolgt in der vorliegenden Studie keine quantitative Bewertung anhand der von Andrews et al. (2009) beschriebenen Stakeholder-Gruppen und Subkategorien. Stattdessen werden in Kapitel 6 für die verschiedenen Substratkomponenten qualitativ die Arbeitsbedingungen und die wirtschaftlichen Chancen und Risiken für die lokale Gemeinschaft beschrieben.

2.6 DATENQUELLEN FÜR DIE ÖKOBILANZIERUNG

Die Ökobilanzierung der Substratkomponenten basiert auf Primärdaten und auf Literaturwerten. Primärdaten zu Getreidespelzen wurden von den Meyerhans Mühlen AG zur Verfügung gestellt und Verora AG stellte Informationen zur Herstellung von Pflanzenkohle mittels Pyrolyse zur Verfügung. Als Hintergrunddaten werden Sachbilanzen aus der ecoinvent v3.5-Datenbank mit dem Systemmodell «Allocation, cut-of by classification» genutzt (ecoinvent Centre, 2018).

3 PFLANZENBAULICHE EIGENSCHAFTEN

Substrate lassen sich durch ihre pflanzenbaulichen Eigenschaften charakterisieren und für einen gärtnerischen Einsatz bewerten. Diskutiert werden im Folgenden chemisch-physikalische Aspekte wie die Wasser- und Luftkapazität, pH, Salzgehalt oder C/N-Verhältnis und deren Wirkung auf das Pflanzenwachstum.

3.1 SUBSTRATKOMPONENTEN

3.1.1 PFLANZENKOHLE

Pflanzenkohle verändert die physikalisch-chemischen Verhältnisse in entsprechenden Substratmischungen. Die Wirkung auf das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen hängt entscheidend von den Ausgangsstoffen, dem Herstellungsprozess, den Applikationsmengen, dem pH, der inneren Oberfläche und der Porosität der Kohle ab. HTC-Kohle und Pflanzenkohle besitzen mindestens zum Teil unterschiedliche chemisch-physikalische Eigenschaften. Bezüglich der Eignung für einen Einsatz in der Hortikultur liegen bei beiden Kohletypen unterschiedliche Erfahrungen vor, sowohl in positiver wie auch negativer Hinsicht (Kammann et al., 2016; Fornes et al., 2015). Zugaben von Pflanzenkohle in Substraten können je nach Partikelgrösse der Kohle zu einer Erhöhung oder einer Verminderung der Schüttdichte führen, zu einem höheren pH-Wert sowie zu einer erhöhten elektrischen Leitfähigkeit (EC) im Vergleich zu traditionellen Torfsubstraten (Vaughn et al., 2013). Der chemisch-physikalische, aber auch pflanzenphysiologische Effekt von Pflanzenkohle hängt im Wesentlichen vom Ausgangsmaterial, den Pyrolysebedingungen sowie den Zusatzmengen in Substratmischungen ab (McBeath et al., 2014; Zhang et al., 2012). Die Qualitätseigenschaften von Pflanzenkohle werden im Gesamten als ungenügend beurteilt für einen vollständigen Torfersatz. Trotzdem besteht ein Einsatzpotential in als Teilkomponente in gärtnerischen Substraten und bei der Anwendung in bodenunabhängigen Kulturen (Nieto et al., 2016; Méndez et al., 2015). Als ein Hauptproblem wird der pH-Wert betrachtet (Mukome et al., 2013). Der neutrale bis alkalische Wert der Kohle kann zu Erhöhungen des pH's oberhalb des optimalen Bereichs für Topfpflanzensubstrate führen, sofern der pH-Wert nicht mit sauer wirkenden Hilfsstoffen nach unten korrigiert wird (Fryda & Visser, 2015; Steiner & Harttung, 2014). Zu beachten ist die Zusammensetzung der Ausgangsprodukte bei der Herstellung von Pflanzenkohle, denn diese beeinflussen wesentlich das Wachstumsverhalten der Kulturpflanzen (Fryda & Visser, 2015; Steiner & Harttung, 2014). Zudem kann ein zu hoher Salzgehalt in der Kohle zu Wachstumsschwierigkeiten der Pflanzen führen kann. Im Weiteren wird die Wasserspeicherkapazität von Pflanzenkohle als weniger günstig beurteilt im Vergleich zu Torf (Nieto et al., 2016b). Aktuelle Versuche im Bereich der Hortikultur ergaben unterschiedliche Ergebnisse. Fornes et al., 2015) et al. zeigte an Tomaten, Peperoni und der Zierpflanze *Calathea rotundifolia*, dass Substratmischungen

mit Pflanzenkohle bis zu einer Dosis von 50% gute Kulturergebnisse erzielen können. Diese positiven Resultate für Mischungen von Pflanzenkohle und Torf bestätigen auch Versuche mit Salat (Méndez et al., 2017). Álvarez et al. (2018) wiesen bei der Produktion von Geranien (*Pelargonium peltatum*) und Petunien (*Petunia hybrida*) unter Pflanzenkohlezugaben von 8-12 Vol% ein im Vergleich zu Torf als Standardmedium besseres Wachstum und Blütenproduktion nach. Dispenza et al. (2017) verglich den Zusatz von Pflanzenkohle aus Koniferen in bodenunabhängigen Kulturen von Christusdorn (*Euphorbia x lomi*) mit einer torfhaltigen Standardmischung. Dabei erhöhte der Pflanzenkohle-Zusatz den pH- und EC-Wert sowie den Kaliumgehalt, die Schüttdichte und die Luftkapazität im Substrat. Eine Kombination von 40% Torf und 60% Pflanzenkohle führte zu einer grösseren Anzahl von Trieben und Blättern, Blattfläche und Trockensubstanz der Biomasse. Margetnot et al. (2018) wiesen in einem Versuch mit Tagetes (*Tagetes erecta* L.) bei einem Pflanzenkohle-Anteil von > 50% eine signifikante Keimhemmung nach, was die Autoren auf die hohen Anteile an Milchsäure (PLA) zurückführen, welche zur Neutralisierung des hohen pH-Wertes der Pflanzenkohle notwendig war. Trotzdem empfehlen die Autoren bei Tagetes einen Torfersatz von 10 – 30% mit Pflanzenkohle, da bei dieser Mischung die Biomasse und die Chlorophyllgehalte im Blatt höher ausfielen im Vergleich zur Standardvariante. Keimhemmungen können zudem bei einem Einsatz von HTC-Kohle auftreten. Nach (Álvarez et al., 2017)(Nieto et al., 2016a)(Bargmann et al., 2013) sind Wuchsdepressionen möglich als Folge flüchtiger Stoffe (Essig-/Ameisensäure), eines hohen Aschegehalts (Schwermetalle) oder N-Immobilisierungsprozesse. Dies ist ein Grund dafür, dass der Einsatz von HTC-Kohle in der Landwirtschaft nicht zugelassen ist. Demgegenüber vertritt Tolksdorf-Lienemann & Rebling (2009) nach Versuchen mit HTC-Kohle die Meinung, dass HTC-Kohle mit vergleichbarem Schüttgewicht, Wasserkapazität, Kationenaustauschkapazität und Nährstoffgehalten als Torfersatz möglich wäre.

Fazit: Auf Grund der pflanzenbaulichen Eigenschaften kann Pflanzenkohle pyrolytischer Herkunft in gärtnerischen Substraten Torf anteilmässig ersetzen, aber es besteht eine grosse Abhängigkeit des Kulturerfolgs von der Kulturart, sowie von der Qualität der Pflanzenkohle. HTC-Kohle besitzt ein agronomisches Risiko im gartenbaulichen oder landwirtschaftlichen Einsatz. Pflanzenkohle kommt als Mischungspartner in Torfersatzsubstraten in Frage, sie eignet sich aber nicht als Vollersatz für Torf.

3.1.2 CHINASCHILF (MISCANTHUS)

Chinaschilf ist sehr saugfähig und kann bis zum Dreifachen seines Gewichts an Wasser aufnehmen. Die wasserspeichernde Fähigkeit ist in gartenbaulichen Substraten willkommen. Ein Schüttgewicht von 70–90 kg je m³ kann als relativ gering eingestuft werden. Der Nährstoffgehalt von Miscanthus ist deutlich geringer im Vergleich zu Getreidestroh (Maendy & Formowitz, 2009). In der Prüfung als Torfersatz für den Gartenbau zeigten höhere Mengen an Miscanthus eine Tendenz zur Nährstoffblockierung im Vergleich zu Substrat mit Torf (Frangi et al., 2012). Mit pH-Werten zwischen 5.9 und 6.2 bewegten sich die Versuchsergebnisse von

Griesser (2016) bei der Testkultur Chinakohl in einem optimalen, stabilen Bereich. Hingegen brachte eine Auffaserung von Chinaschilf durch Bioextrusion nicht den erwarteten Wachstumseffekt im Vergleich zur Torfvariante. Mit steigendem Chinaschilfanteil in der Substratmischung nahm der Frischmasseertrag zunehmend ab, was direkt mit der Stickstoffverfügbarkeit der Varianten im Zusammenhang stehen könnte. Extrudierende, retrudierende und raffinierende Nachbehandlungen sowie eine Dampfexplosion zur pH-Reduktion verringern die N-Immobilisierung in einer Substratmischung (Vandecasteele et al., 2017). Neben der Anpassung der physikalischen Eigenschaften können auch über modifizierte Düngeverfahren und Depotdüngung deutlich substratverbessernde Effekte erzielt werden. Substratversuche zeigten, dass die Mischungszusammensetzung von Chinaschilfsubstraten und die Zugabe von N-Düngern, wie Hornspänen, das ober- und unterirdische Pflanzenwachstum entscheidend positiv beeinflussen (Griesser, 2016). Dresbøll und Magid (2006) wiesen bei Chinaschilf im Vergleich zu Weizenstroh eine reduzierte Abbaugeschwindigkeit im Boden nach, was auf eine erhöhte Strukturstabilität schliessen lässt.

Fazit: Eine physikalische Nachbehandlung von Chinaschilfstroh kann die pflanzenbaulichen Eigenschaften verändern, aber für einen erfolgreichen Einsatz in gärtnerischen Substraten als Torfersatzprodukt bedarf es noch einiges an Forschung und Entwicklung.

3.1.3 HANFFASERN

Die chemisch-physikalischen Eigenschaften von Restprodukten aus der Hanffasergewinnung sind stark von der Partikelgrösse und dem Röstverfahren abhängig. Hanffasern sind grundsätzlich als Zuschlagstoff für Kultursubstrate geeignet. Allerdings ist in Abhängigkeit des Holzanteils des Fasergemisches eine mittlere bis starke Stickstoffimmobilisierung zu beobachten (Fuchs, 2001). Im Vergleich zu Getreidestroh ist aber gemäss Dresbøll and Magid (2006) die Abbaugeschwindigkeit der Hanffaser als Folge einer anatomisch unterschiedlichen Gewebearrangung verlangsamt, was die Gefahr einer N-Immobilisierung etwas mindert. Die Strukturstabilität zeigt sich auch bei den Reststücken abgebauter Hanffasern im Vergleich zu Getreidestroh oder Chinaschilf. Die Elastizität ist deutlich erhöht als Folge der vorhandenen, schraubenförmigen Xylemgefässstruktur im verholzten Material. Diese Gefässe können dank ihrer Form und Ausdehnung grössere Partikel derart miteinander verbinden, dass das Porenvolumen vergrössert wird und die Wasserkapazität einer Substratmischung zunimmt. Dies begünstigt auch die Ansiedlung von Mikroorganismen.

In einem Praxisversuch mit Topfchrysanthen in stickstoffdotierten Substraten mit bis zu 50 Vol.-% Hanffasern konnten vergleichbare Pflanzenqualitäten wie beim Referenzsubstrat mit Torf erzielt werden. Der Stickstoffausgleich kann dabei sowohl als Langzeitdüngergabe in das Substrat als auch über eine flüssige Stickstoffgabe in den ersten Kulturwochen erfolgen und federt damit das Problem der N-Fixierung von Hanfstroh ab (Lohr et al., 2014). Im Substratanbau von Tomaten bewegten sich bei einem Versuch von (Dannehl et al., 2015) die Ernteergebnisse in Hanffasern rund 15% unter jenen von aufbereitetem Torfmoos. Das

Hauptproblem bei diesem Versuch lag bei der geringen Wasserverfügbarkeit des Hanffasergemisches von 10%.

Fazit: Es gibt kaum Hanffaserprodukte als Torfersatz im produzierenden Gartenbau. Die Qualität des Fasermaterials beeinflusst entscheidend die Wasserkapazität von Hanffasern und entsprechend die Einsatzmöglichkeit im gärtnerischen Bereich. Es sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, um Hanffasern als Torfersatzprodukt zu etablieren.

3.1.3.1 FLACHSSCHÄBEN (ÖLLEIN)

Die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Restprodukte aus der Flachsfasergewinnung sind stark von der Partikelgrösse und dem Röstverfahren abhängig. Im Vergleich zu den Fasern sind die Schäbengemische in erster Linie Luftlieferanten und begünstigen das Drainvermögen in den Substraten.

Nach (Jauch, 2009) weisen Flachsschäben eine mit rund 15 Vol.-% sehr geringe maximale Wasserkapazität und eine mit bis zu 70% sehr hohe Luftkapazität auf. Verantwortlich für die vergleichsweise gute Strukturstabilität ist der hohe Wachsanteil von 1.5 bis 3%. Wegen der geringen Wasserkapazität kommen nur Anteile an Flachsschäben in der Höhe von bis zu 20% in gärtnerischen Substraten für Freilandkulturen in Stauden- und Baumschulbetrieben in Frage (Schmilewski, 2015). Der pH-Wert (CaCl₂) beträgt 5.0 bis 6.5, was als günstig für ein Anzuchtsubstrat betrachtet werden kann. Aufgrund ihres hohen Wachsanteils werden Flachsschäben relativ langsam mikrobiell abgebaut und zeigen sich somit als weitgehend strukturstabil. Im Gegensatz zu den Reisspelzen kann sich das weite C/N-Verhältnis negativ auf die Stickstoffverfügbarkeit auswirken. Auf diese Stickstoff-Immobilisierung muss mit einer gezielten Stickstoffgabe reagiert werden, um eine N-Unterversorgung bei Kulturpflanzen zu vermeiden. Dieses Vorgehen ist unproblematisch und entspricht der gärtnerischen Praxis. Der Salzgehalt der Schäben ist gering und liegt im Bereich zwischen 0.1 bis 0.3 g/Liter. Verantwortlich für diesen Wert ist vor allem der Kaliumgehalt (Schmilewski, 2018).

Fazit: Schäben besitzen gute Eigenschaften zur Verbesserung des Lufthaushaltes in Substraten. In der vorliegenden Form ohne weitere mechanische, chemische oder thermische Behandlung haben Schäben nur ein marginales pflanzenbauliches Potential, Torf in gärtnerischen Substraten zu ersetzen.

3.1.4 GETREIDESPELZEN

Über die Verwendung von Getreidespelzen liegen keine wissenschaftlichen Ergebnisse vor. Das Grundproblem bei der Verwendung von Getreidespelzen in Substraten ist die Auskeimgefahr von Ausfallkörnern. Eine thermische Behandlung zur Stabilisierung der Qualität wäre notwendig und technisch umsetzbar, aber aus energetischer Sicht kostenbelastend (schriftliche Mitteilung von S. von Felten, Firma Meyerhans Mühlen AG, am 20.11.2018). Bezüglich den pflanzenbaulichen Eigenschaften drängt sich ein Vergleich mit Reisspelzen

auf, welche in verschiedenen Substratmischungen zur Anwendung kommen. Typisch für Reisspelzen ist der hohe Gehalt an Silicium, der zusammen mit dem Ligningehalt für die Strukturstabilität der Spelze in Substraten oder im Boden verantwortlich sein soll (Schmilewski, 2015). Dies wird wohl auch auf Dinkelspelzen zutreffen als Vertreter der Getreidespelzen, da Dinkel in der Populärwissenschaft bekannt ist für seine erhöhten Siliziumwerte. Bei Haferspelzen wies Saake (2011) Ligningehalte zwischen 30–40 Gew.-% nach. Das C/N-Verhältnis beträgt ca. 90 : 1 und ist damit etwas kleiner als bei Reisspelzen (Rehnert et al., 2007), aber vergleichbar mit Stroh. Eigentlich wäre mit einer N-Immobilisierung zu rechnen. Aber ob diese wie bei Reisspelzen wegen dem Siliciumgehalt tatsächlich gering ausfällt (Schmilewski 2015), wurde nicht wissenschaftlich geprüft. Chemisch betrachtet sind Getreidespelzen nährstoffarm. Der Stickstoffgehalt bspw. beträgt bei Dinkel zwischen 0.4 und 0.6 Gew.-%, was etwa dem Gehalt in Getreidestroh entspricht (Rehnert et al., 2007). Beim Kalium ist der Gehalt in den Spelzen um ein fünffaches kleiner als in Stroh. Die Roh- bzw. Schüttdichte ist bei Getreidespelzen ähnlich gering wie bei Reisspelzen. Die Luftkapazität ist hoch mit 78 Volumen-% (Messwert Ricoter nach EN 12580 (2014)). Sowohl das geringe Gewicht wie auch die extrem hohe Luftkapazität sind auf die morphologisch gekrümmte Form der Reisspelze zurückzuführen.

Fazit: Ähnlich den Schäben besitzen Spelzen von Dinkel oder Hafer gute Eigenschaften zur Verbesserung des Lufthaushaltes in Substraten. Aber In der vorliegenden Form ohne weitere mechanische, chemische oder thermische Behandlung haben sie ebenfalls nur ein geringes marginales pflanzenbauliches Potential, Torf in gärtnerischen Substraten zu ersetzen. Eine Aufwertung der physikalisch-chemischen Eigenschaften von Spelzen wäre die Pyrolyse zu Pflanzenkohle.

3.1.5 TORFMOOS

Abhängig von der Art des Torfmooses hat getrocknetes Sphagnum ähnliche chemische und physikalische Eigenschaften wie Weisstorf (Emmel 2013; Gaudig et al. 2014). Labortests mit aufbereiteten Sphagnum-Arten in Kanada zeigten positive Eigenschaften als Substratkomponente, ähnlich Perlit oder Vermiculite (Aubé et al., 2015). Nur ist die Strukturstabilität von Torfmoos im Vergleich zu den genannten mineralischen Produkten deutlich geringer. Die Wasserkapazität von getrocknetem Moos kann abhängig von Torfmoosart und Aufbereitung sehr hoch sein und bis 2000 g/100 g TS betragen (Schmilewski, 2018). Eine Rolle spielt die Faserlänge der Torfmoose. Längere Fasern von 40 mm wiesen in Versuchen von (Kämäräinen et al., 2018) eine bessere Wasserrückhaltefähigkeit auf als kurzgeschnittene Fasern von 5 mm Länge. In einem Substratkulturversuch von (Tahvonen et al., 2015) mit Gurken in Torf- und Sphagnum-Substrat zeigte die Torfmoosmischung zwar eine geringere Wasserspeicherfähigkeit als bei Torf, dafür überzeugte sie durch ein deutlich besseres Suppressivitätsverhalten gegenüber Schadorganismen. Der Gurkenenertrag in Sphagnum-Substrat mit einer Faserlänge > 40 mm war vergleichbar mit jenem in Torfsubstrat.

Bei den chemischen Eigenschaften sind die tiefen Nährstoffwerte auffallend und vergleichbar mit jenen von Weisstorf. Der Salzgehalt beträgt nach einer unveröffentlichten Studie des Institutes für Torf- und Humusforschung GmbH (Schmilewski, 2018) zwischen 0.25 und 0.35 g KCl/l bzw. der EC 0.03–0.04 mS. Wegen dem Fehlen der wichtigsten Nährstoffe ist eine Aufdüngung von Torfmoos unerlässlich. Dies gilt auch für die Aufkalkung als Folge der tiefen pH-Werte.

Eine Beimischung in Substraten sollte bis zu 50 % Volumenanteil möglich sein, ohne dass wachstumshemmende Wirkungen im Vergleich zu Torfsubstraten auftreten. (Gaudig et al., 2014).

Negative Eigenschaften als Substratkomponente sind möglich: Ein Feuchtigkeitsgehalt von getrocknetem Sphagnum < 20 % wirkt hydrophob. Sphagnum kann gemäss (Gaudig et al., 2018) sekundäre Metaboliten enthalten, welche das Wurzelwachstum behindern. Zudem können Torfmoose mit anderen moortypischen Pflanzen oder Wildkräutern verunreinigt sein. Ob eine Hygienisierung die Wirkung von Sphagnum, welches für die auftretende Suppressivität von schwach zersetztem Hochmoortorf verantwortlich ist (Stalheim et al., 2009), beeinflussen würde, müsste verfahrensabhängig geprüft werden.

Fazit: Sphagnum besitzt von den physikalisch-chemischen und biologischen Eigenschaften her ein hohes pflanzenbauliches Potential als Torfersatz. Ein Einflussfaktor ist die mechanische Nachbearbeitung des Torfmooses in getrockneter Form, was bedeutende Auswirkungen auf den Wachstumserfolg einer Kultur haben kann. Trotz den guten pflanzenbaulichen Voraussetzungen sind aber auch bei Torfmoos noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig.

3.1.6 PFLANZENKOHLE-KOMPOST

Das generelle Problem von Kompost als alleiniges Substratmedium liegt bei den oft erhöhten pH-Werten, erhöhten Salzgehalten, hohen Gehalten an Phosphor und Kalium, einer potentiellen N-Immobilisierung sowie weniger günstigen Verhältnissen beim Wasser- und Lufthaushalt (Schmilewski, 2015). Wissenschaftliche Untersuchungen über den Einsatz von Kompost-Kohlemischungen als torffreie gärtnerische Anzucht- oder Kultursubstrate liegen in geringem Umfang vor und lassen keine allgemeingültigen Aussagen zu. Grundsätzlich führen die Bedingungen im Kompostierprozess bei der Pflanzenkohle zur verstärkten Entwicklung von funktionellen Gruppen an der Oberfläche, zur Bindung von Nährstoffen und zu weiteren komplexen Veränderungsprozessen (Briones, 2012; Cheng et al., 2006; Joseph et al., 2013, Prost et al., 2013). Im Vergleich zu unbehandelter Pflanzenkohle kann mitkompostierte Pflanzenkohle das Wachstum von Pflanzen in Topfsubstraten stimulieren (Kammann et al., 2015). Versuche am Ithaka-Institut im Wallis im Jahre 2011 mit verschiedenen Pflanzenarten in Kompost mit und ohne Pflanzenkohlezugabe zeigten eine ertragssteigernde und lachgasreduzierende Wirkung bei der Pflanzenkohle-Kompostvariante. Eine Überdosierung von Pflanzen-

kohle kann zu negativen Wachstumseffekten führen. Autoren verschiedener wissenschaftlicher Studien vertreten die Ansicht, dass ein optimaler Anteil an Pflanzenkohle in Substratmischungen zur höchsten Widerstandskraft der Topfpflanzen führt (Elad et al., 2010; Graber et al., 2010; Zwart & Kim, 2012). Pflanzenkohle – Kompost sowie Kompost sind primär bedeutend wegen ihrer Nährstoffwirkung, Strukturunterstützung und vor allem auch wegen ihrer biologische Wirkung (suppressive Effekte). Tabelle 1 vergleicht Eigenschaften von pyrolytisch hergestellter Pflanzenkohle, Pflanzenkohle-Kompost und Kompost (Tabelle 3-1). Zwischen den verschiedenen Qualitäten an Kompost und Kompost-Pflanzenkohle-Mischungen sind keine eindeutigen Unterschiede feststellbar. Die Schwermetallgrenzwerte nach der Chemikalien-Risiko-Reduktionsverordnung ChemRRV werden in beiden Fällen eingehalten. Das gilt auch für die reine Pflanzenkohle der Verora GmbH. Diese fällt primär auf durch ihren hohen Kohlenstoffgehalt, sowie ihre grosse innere Oberfläche.

Von der Tabelle 3-1 ist ableitbar, dass eine Zugabe von Pflanzenkohle den pH-Wert von Kompost in den alkalischen Bereich verschieben kann. Ebenfalls verschärft sich die Problematik mit dem Salzgehalt (EC). Das weite C/N-Verhältnis von HTC- oder Pyrolysekohle ist dann ein Problem, wenn ein grösserer Anteil des Kohlenstoffs in labiler Form vorliegt. Pyrolysekohlen können unter Freilandbedingungen von mehr als 100 bis über 1000 Jahre verweilen. Der Anteil der labilen C-Fraktion scheint in HTC-Kohle grösser zu sein, wie in Pyrolysekohle (Haubold-Rosar et al., 2016). Es kann auch bei Pyrolysekohle zu einer Erhöhung des C/N – Verhältnisses und zu einer Stickstoffunterversorgung kommen (Gale & Thomas, 2019). Dieser kann aber mittels einer zusätzlicher N-Düngergabe vorgebeugt werden.

Auf diesen Angaben begründet sich die Erfahrung, dass Anteile von Pflanzenkohle in der Kompost-Kohle-Mischung bis 50% Volumenanteil betragen dürfen, ohne dass deutliche Wachstumshemmungen auftreten. Die Verträglichkeit der Anteile ist stark abhängig von den Qualitäten der Substratkomponenten (Méndez et al., 2017).

Fazit: Kompost-Kohlegemische haben von den pflanzenbaulichen Eigenschaften her gesehen ein grosses Potential als Torfersatz bei Substraten im Hobbybereich und als Teilkomponente in Profimischungen für den gedeckten Anbau. Phytotoxische Stoffe im Kompost können durch den Kohlezusatz gebunden. Für einen 100%igen Torfersatz unter gärtnerischen Praxisbedingungen in Topfsubstratmischungen sind Pflanzenkohle-Komposte in der Regel nicht ausreichend homogen bzw. stabil. Von den Nährstoffgehalten her erfüllen Qualitätskomposte sowie Kompost-Pflanzenkohlemischungen die geforderten Grenzwerte für Schwermetalle. Im Übrigen beinhalten Kompostsubstrate ein hohes Risiko bezüglich unkontrollierter Nährstofffreisetzung oder Stickstoff-Immobilisierung.

Pflanzenbauliche Eigenschaften

Tabelle 3-1: Eigenschaften von Pflanzenkohle und Grüngut-Qualitätskompost mit bzw. ohne Kohle

	Einheit	Richtwerte oder Grenzwerte nach ChemRRV	Pflanzenkohle (Durchschnittswerte verschiedener Kohlen. Verora, 2019)	Kompost für den Gartenbau, (Kupper & Fuchs, 2007)	Qualitätskompost ohne Pflanzenkohle (Abächerli, 2010)	Qualitätskompost mit Pflanzenkohle
Schüttdichte	kg/l		0.25 +/- 0.1	0.62	0.8 +/- 0.03	0.9 +/- 0.03
Spezifische Dichte	g/cm ³		1.55 +/- 0.1			
Gesamtwassergehalt	Gew.-%		32.2 +/- 2.1	44.1	42.1 +/- 5.3	40.6 +/- 8.5
spezifische Oberfläche	m ² /g		233 +/- 44			
pH (CaCl ₂)			8.5 +/- 0	8.3	8.2 +/- 0.5	7.9 +/- 0.2
Kohlenstoff - Gesamt	g/kg TS	> 500	867 +/- 16			
Kohlenstoff - Organisch	g/kg TS		862 +/- 18		162.2 +/- 19.6	161.3 +/- 42.6
Stickstoff - Gesamt	g/kg TS		5.95 +/- 0.05	14.9	11.6 +/- 2.4	9.2 +/- 1.75
C/N-Verhältnis			145 +/- 4		14.5 +/- 4.6	17.8 +/- 5.9
Leitfähigkeit	µS/cm		734 +/- 233	2957	2673 +/- 2196	807 +/- 482
Phosphor (P ₂ O ₅)	g/kg TS		31 +/- 12	7.3	6.8 +/- 1.5	4.9 +/- 1.8
Kalium (K ₂ O)	g/kg TS		104 +/- 36	13.7	15.8 +/- 4.2	12 +/- 5.3
Calcium (Ca)	g/kg TS		196 +/- 1	65.9	51.6 +/- 28.2	54.1 +/- 20.9
Magnesium (MgO)	g/kg TS		42 +/- 11	12	7 +/- 1.5	5.7 +/- 0.7
Kupfer	g/t TS	< 100	17 +/- 9		38.3 +/- 8.7	32.9 +/- 12.8
Mangan	g/t TS		734 +/- 437	480		
Nickel	g/t TS	< 50	4 +/- 0.0	15.8	20 +/- 2.8	16.7 +/- 4.2
Chrom	g/t TS	< 90	4 +/- 2	20		
Zink	g/t TS	< 400	30 +/- 0.5	155.4	129.4 +/- 18	110.9 +/- 16.9
Blei	g/t 88% TS	< 120	0.86 +/- 0.4	69.7	29.1 +/- 12	22.5 +/- 2.1
Cadmium	g/t 88% TS	< 1	0.001 +/- 5*10 ⁻⁴	0.1	0.4 +/- 0.3	0.4 +/- 0.11
Quecksilber	g/t 88% TS	< 1	0.01 +/- 0.0005	n.n.	0.1 +/- 0.1	0.1 +/- 0.02
PCDD/F	ng/kg TS		n.n.			
PCB	ng/kg TS		n.n.			

3.2 BEWERTUNG DER CHEMISCH-PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN VON SUBSTRATEN

Die Einschätzung der einzelnen Parameterwerte zur Beurteilung der pflanzenbaulichen Eignung beruht auf diversen Quellen und erlaubt lediglich eine ungefähre Einschätzung der tatsächlichen Substratqualität. Entscheidend für den Kulturerfolg ist der fachgerechte Umgang mit alternativen Substratmischungen.

3.2.1 PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE PARAMETER ZUR BESCHREIBUNG VON SUBSTRATKOMPONENTEN

Zu den physikalischen Eigenschaften der Substratkomponenten zählen die Schüttdichte, die Wasserkapazität, die Luftkapazität und die Strukturstabilität. Chemische Eigenschaften, welche die Substratkomponenten kennzeichnen, sind der pH, die Pufferkapazität, die Stickstoffmobilisierung, der Nährstoffgehalt und der Salzgehalt. Eine Beschreibung der einzelnen Parameter ist in Tabelle 3-2 gegeben.

Pflanzenbauliche Eigenschaften

Tabelle 3-2: Physikalische und chemische Eigenschaften von Substratkomponenten und für den Pflanzenbau gewünschte Ausprägungen (p.-abh: pflanzenabhängig). Quellen: Reidel (2014), Sachweh (1987), Blume et al. (2010), Jansen et al. (1998) und Koller et al. (2005)

Parameter		Gewünschte Ausprägung		
		hoch	gering	p.-abh.
Physikalische Eigenschaften				
Schüttdichte	Die Schüttdichte ist die Masse eines Substrats in einem bestimmten Volumen. Eine hohe Schüttdichte erzielt einerseits eine hohe Standfestigkeit für Pflanzen, andererseits bewirkt eine hohe Schüttdichte eine geringere Wasser- und Luftkapazität.		-	
Wasserkapazität	Als Wasserkapazität (oder Feldkapazität) bezeichnet man den Anteil an Wasser, der gegen die Schwerkraft zurückgehalten werden kann. Sie wird in Volumenprozent ausgedrückt. Ungeeignet für die pflanzenbauliche Produktion ist ein hoher Totwasseranteil, der durch die Kapillarwirkung so stark zurückgehalten wird, dass die Pflanzen ihn nicht nutzen können.	x		
Luftkapazität	Als Luftkapazität wird der Anteil an Luft in einem Substrat bezeichnet, der bei Wasserkapazität vorliegt. Sie wird ebenfalls in Volumenprozent ausgedrückt.	x		
Strukturstabilität	Durch den Abbau von organischer Substanz oder durch andere Gefügeveränderungen wird die Strukturstabilität eines Substrats beeinflusst. Je stabiler ein Substrat bei Spannungsveränderungen reagiert, desto besser ist es gegen bleibende Verformungen geschützt. Eine hohe Strukturstabilität eignet sich demnach besser im Pflanzenbau.	x		

Pflanzenbauliche Eigenschaften

Parameter		Gewünschte Ausprägung		
		hoch	gering	p.-abh.
Chemische Eigenschaften				
pH	Über den pH wird der Säuregehalt des Substrats ausgedrückt. Der ideale pH-Wert eines Substrats wird durch Toleranzbereiche der zu verwendenden Pflanzenart vorgegeben.			x
Pufferkapazität	Der Eintrag von Nährstoffen, Säuren und Basen kann im Substrat bis zu einem gewissen Anteil ausgeglichen werden. Je höher diese Pufferkapazität eines Substrats ist, desto besser können Schwankungen bei der Zugabe von Dünger und der Bewässerung abgefangen werden.	x		
Stickstoffimmobilisierung	Die Mikroorganismen bauen den vorhandenen mineralischen Stickstoff in ihre organische Substanz ein. Dadurch ist er für Pflanzen nicht mehr verfügbar. Eine hohe mikrobielle Aktivität, vor allem bei einem grossen C/N-Verhältnis führt zur Immobilisierung von Stickstoff.		x	
Nährstoffgehalt	Bei den Nährstoffgehalten ist auf die Verträglichkeit der eingesetzten Pflanzen zu achten. Die Substratrohstoffe verfügen meist über einen geringen Nährstoffgehalt. Substratmischungen werden deshalb oft noch aufgedüngt. In dieser Studie werden die vorhandenen pflanzenverfügbaren Nährstoffe in Substrate und Substratkomponenten ohne Düngergabe betrachtet.	x		
Salzgehalt	Der Salzgehalt eines Substrates gibt den Anteil an Salz-Ionen an. Ein zu hoher Salzgehalt behindert die Nährstoffaufnahme der Pflanzen. Wie hoch der Salzgehalt im Substrat sein darf, wird ebenfalls durch die Toleranz der verwendeten Pflanzen limitiert.		(x)	x

3.2.2 CHARAKTERISIERUNG DER SUBSTRATKOMPONENTEN

Anhand der in Tabelle 3-2 gegebenen Parameter können die Substratkomponenten charakterisiert werden (Tabelle 3-3). Für Chinaschilf, HTC-Kohle und Schilfrohr wurden neue Analysewerte erhoben. Der pH, und Stickstoff wurden im 1:1.5 Volumen-Extrakt mit H₂O gemessen und Phosphor und Kalium im 1:1.5 Volumen-Extrakt EDTA nach den Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (1996). Die Strukturanalysen mit Schüttdichte, Luft- und Wasserkapazität wurden nach FAW-Flugschrift Nr. 113 (Gysi et al., 1995) durchgeführt. Für die anderen Substratkomponenten wurden Literaturwerte verwendet.

3.2.3 BEWERTUNGSKRITERIEN

Für die Bewertung der pflanzenbaulichen Eigenschaften der einzelnen Substratkomponenten werden die Wertebereiche aus Tabelle A - 3 im Anhang verwendet. Dafür wurden sie in Tabelle 3-3 arithmetisch gemittelt und auf eine signifikante Stelle gerundet. Die Grenzwerte der Kriterien in aus Tabelle A - 3 lehnen an die RAL-Gütekriterien von Substraten der Gütegemeinschaft Substrate für Pflanzen e.V. Hannover.

Pflanzenbauliche Eigenschaften

Tabelle 3-3: Pflanzenbauliche Eigenschaften der Substratkomponenten

	pH	N	P	K	Salzgehalt	Wasserkapazität	Luftkapazität	Schüttdichte, trocken
	(0.01 M CaCl ₂)	mg NO ₃ -N + NH ₄ -N /l	mg P ₂ O ₅ /l	mg K ₂ O/l	g/l	Vol.-%	Vol.-%	kg TS/m ³
Chinaschilf	7.0–7.1 ^{a, d}	<5 ^a	32 ^a	308 ^a	1.2 ^b	30–55 ^c	40–65 ^c	70 ^a
Getreidespelzen (Hafer)	7.6 ^d	76 ^d	196 ^d	859 ^d	0.61 ^d	< 20 ^e	78 ^e	150 ^e
Hanffasern	7.0 ^d	16 ^d	61 ^d	911 ^d	0.54 ^d	40–65 ^c	30–50 ^c	31 ^e
Pflanzenkohle-Kompost	7.2–7.5 ^{f, g}	66 ^f	324 ^f	2231 ^f	1.76 ^f	76 ^f	25 ^g	620–813 ^{f, g}
Flachsschäben	5–6.5 ^h	0–20 ⁱ	40–120 ⁱ	150–400 ⁱ	0.1–0.3 ⁱ	18 ^k	70–80 ^k	150–217 ^k
Pflanzenkohle (HTC)	5.8–6.4 ^{i, a}	0.4 ^a	301 ^a	1286 ^a	0.45 ^a	59 ^a	23 ^a	335 ^a
Pflanzenkohle (Pyrolyse, holz-basiert)	5.2–8.8 ^l	<5 ^g	218 ^g	2429 ^g	2.85–3.28 ^g	27–71 ^m	22 ^m	300 ^m
Schilf	6.4 ^a	<5 ^a	9 ^a	163 ^a	0.27 ^a	12 ^a	84 ^a	65 ^a
Torfmoos	4.6 ⁿ	5–27 ⁱ	5–15 ⁱ	50–90 ⁱ	0.08–0.4 ⁱ	42–60 ^o	35–50 ^o	30–60 ^o

^a (Messwert JardinSuisse siehe Anhang A1.1)

^h (Grantzau & Ter Hell, 1993)

^b (Kraska et al., 2018)

ⁱ (Schmilewski, 2018)

^c (Dresbøll & Thorup-Kristensen, 2005)

^k (Kymalainen, 2004)

^d (Messwert Ricoter nach Gysi et al. (1995))

^l (Dumroese et al., 2011)

^e (Messwert Ricoter nach EN 12580 (2014))

^m (Tian et al., 2011)

^f (Bruckman, 2016)

ⁿ (Aubé et al., 2015)

^g (Schmidt et al., 2014)

^o (Kumar, 2017)

4 ZUKÜNFTIGE VERFÜGBARKEIT

4.1 ALLGEMEINE SITUATION

Grundsätzlich steht kein Substratausgangsstoff bedingungslos zur Verfügung (Schmilewski, 2018). Was für Europa zutrifft, gilt auch für die Schweiz. Kaum ein Rohstoff fällt sekundär an und kann ohne weitere Aufbereitung verwendet werden. Erst mit einem nachgelagerten biologischen, physikalischen oder chemischen Prozessverfahren wird die Substratkomponente einsatzbereit. Massgebend für die Verfügbarkeit ist bei Bio-rohstoffen der wirtschaftliche Wettbewerb. Die Energienutzung konkurriert die Verfügbarkeit von holzigem Material als Kohlenstoffzuschlag für die Herstellung von Grünkompost. Bei Pflanzenfasern bestehen diverse Nutzungsmöglichkeiten im industriellen Bereich mit höherer Wertschöpfung im Vergleich zur gärtnerischen Produktion. Die hohen Ansprüche an die Qualität gärtnerischer Substrate verlangen strenge Qualitätsrichtlinien für Zuschlagsstoffe. Alternative gärtnerische Torfersatzsubstrate haben im Vergleich zu den traditionellen Torfprodukten höhere Produktions- und wegen der meist erhöhten Schüttdichten auch höhere Transportkosten. Die Verfügbarkeit von Alternativsubstraten zu Torf hängt einerseits von der gesetzlichen Situation ab und andererseits von der Nachfrage. Es ist damit zu rechnen, dass bei der aktuellen europäischen und schweizerischen Politik zum Schutz natürlicher Torfressourcen vermehrt Produktionsbetriebe in der Landwirtschaft und im Gartenbau auf Ersatzprodukte umsteigen. In der gärtnerischen Produktion sind die Lohn- und Infrastrukturkosten die bedeutenden Kostenarten, während die Betriebsmittel nur wenige Prozente der Produktionskosten ausmachen. Trotzdem besteht in diesem Wirtschaftszweig ein starker Preisdruck, von welchem kein Produktionsfaktor ausgenommen ist. Es wird weiteren äusseren Druck benötigen, damit die Nachfrage nach Torfersatzprodukten erhöht und damit das Angebot bzw. die Verfügbarkeit verbessert wird. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der künftigen Verfügbarkeit von Torfersatzstoffen und der politischen Situation bzw. der wirtschaftlichen Weiterentwicklung der landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Produktion.

4.2 SUBSTRATKOMPONENTEN

In diesem Abschnitt werden für die einzelnen Substratkomponenten jeweils das Angebot und die Nachfrage sowie die zukünftige Verfügbarkeit beschrieben.

Die in dieser zweiten Studie berücksichtigten Substratkomponenten werden in der Schweiz als Rohstoff angebaut, aber nicht zwingend als Zusatzstoff für gärtnerische Substrate gehandelt. Neben dem Potential der schweizerischen Produktion wird eine grobe Abschätzung für das Angebot aus dem europäischen Raum gemacht.

4.2.1 PFLANZENKOHLE

Da Holz als Rohstoffquelle für Pflanzenkohle aus dem Pyrolyseprozess eine erneuerbare Kohlenstoffquelle darstellt und auch andere organische Quellen mit niedrigerer Trockensubstanz als Ausgangsprodukt für die hydrothermale Karbonisierung bereitstehen, ist die materielle Verfügbarkeit von Pflanzenkohle grundsätzlich gewährleistet. Im Moment besteht aber noch kein Design einer Pflanzenkohle als vollwertigen Torfersatz. Probleme verursachen die Wachstumseigenschaften auf diesem Substrat, welche nicht mit dem Anbau in Torf oder anderen Substitutionsmaterialien, wie Kokosfasern, vergleichbar sind. Zudem besteht die Herausforderung der Pflanzenkohle-/ HTC-Kohlenindustrie auch darin, ein qualitativ hochwertiges Substrat zu einem konkurrenzfähigen Preis erzeugen zu können. Die Preise für Pflanzenkohle sind auf dem Markt markant höher im Vergleich zu anderen potentiellen organischen Torfersatzkomponenten (Kern et al., 2017). Der Vorteil bei der Nutzung von HTC-Kohle besteht darin, dass jedes organische (nasse) Material genutzt werden kann. Die technische Herstellung sowohl von Pflanzenkohle nach EBC-Standards wie auch HTC-Kohle ist kostspielig und die Verfügbarkeit im Moment entsprechend knapp. Zusätze von Pflanzenkohle in gärtnerischen Substraten verteuern das Produkt. Es ist eine Frage der weiteren Forschung und Marktentwicklung, ob sich Pflanzenkohle als Zuschlagskomponente in Substraten etablieren kann.

Fazit: Die künftige Verfügbarkeit von Pflanzenkohle- und HTC-Kohle hängt wesentlich von anderen Einsatzbereichen ab, wie dem industriellen oder energiewirtschaftlichen Sektor. Grundsätzlich steht eine Vielzahl an Biomasseprodukten aus der Kreislaufwirtschaft zur Karbonisierung zur Verfügung.

4.2.2 CHINASCHILF

Eine weitere Verbreitung des Chinaschilfanbaus hängt im Wesentlichen von der Pflanzgutqualität bei der Rhizomvermehrung, der Risikoverminderung bei der Bestandesführung sowie vom Absatz und der Verwertung als Ersatz für Holz für die Zellstoff- und Papierindustrie ab. Agronomisch gesehen können die Böden in der Schweiz und im europäischen Raum als geeignet für die Produktion von Chinaschilf betrachtet werden. Dennoch sind standortabhängige Ertragsunterschiede beim Anbau festzustellen, welche neben dem Bodentyp, pH- und Nährstoffgehalt im Boden wesentlich auch auf die Temperatur, die Windexposition sowie die Niederschlagsmenge zurückzuführen sind. Langzeitversuche der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau zeigen aber das Potential neuer Miscanthustypen als Ergebnis einer intensiven Gewebekulturzüchtung (Maendy & Formowitz, 2009). Der Anbau von Chinaschilf in der Schweiz ist wegen der ausländischen Konkurrenz nicht rentabel. Die Weiterentwicklung des Miscanthusanbaus hängt wesentlich auch vom Bund ab, seinem Engagement in der Forschung und Entwicklung nachwachsender Rohstoffe sowie finanzieller Unterstützungsprämien für die Produktion.

Fazit: Die Verfügbarkeit von Chinaschilf ist gewährleistet, unterliegt aber dem Wettbewerbsdruck aus der Zellindustrie und dem Bioenergiebereich. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist im Augenblick der Import von Miscanthus in die Schweiz nach Aussage von Ueli Freudiger, Landwirt und Produzent von Chinaschilf, billiger als die Produktion in der Schweiz (Pressmann, 2017).

4.2.3 HANFFASERN

Neben den agronomischen Anbaumöglichkeiten und der Nachfrage des Hauptproduktes der Kultur beeinflussen die Aufbereitungskosten der Fasern die Verfügbarkeit der potentiellen Zuschlagsstoffe für gärtnerische Substrate. Als Folge der zähen Materialeigenschaften ist insbesondere bei der Mechanisierung mit erhöhten Unterhaltskosten zu rechnen.

In der Schweiz ist die Hanffaserindustrie praktisch inexistent, ganz im Gegensatz zu Frankreich und Deutschland (Klaiss & Hirschi, 2018). Der Hanfanbau in der Schweiz konzentriert sich im Moment primär auf die Produktion von Hanföl bzw. dem CBD (Cannabidiol). Theoretisch könnte Hanf sowohl für die Fasergewinnung als auch Körnergewinnung angebaut werden. Eine gleichzeitige Ernte von Körnern und Fasern liefert aber keine optimale Faserqualität (Enggist, 2016). Es ist zu prüfen, inwieweit sich der nach der Ernte der Samen zurückbleibende Stängel für die Aufarbeitung zu Torfsubstituten weiterverarbeiten lässt. Der Anbau von CBD-Hanf in der Schweiz ist unter Druck. Gemäss (Jorio & Unterfinger, o. J.) ist der Preis für CBD-Hanf innerhalb kurzer Zeit um etwa 70% gesunken. Der Markt in der Schweiz muss als gesättigt angesehen werden. Ohne Direktzahlungen für die Produktion der Faserpflanze oder einer zusätzlich belebten Hanfindustrie wird sich ein Hanfanbau zur Fasergewinnung als Torfersatzsubstrat kaum durchsetzen können. Die weltweit produzierte Menge an Hanf-Bastfasern wird gemäss (FAO, 2018) auf 57'000 Tonnen geschätzt. Die EU ist ein bedeutender Anbieter von Hanf- oder Flachsprodukten (Schmitz, 2006). Aufgrund der steigenden Erdöl- und Kunststoffpreise wird der industrielle Einsatz von Naturfasern immer attraktiver. Es werden auch beim Anbau von Hanf oder Flachs vermehrt Reststoffe anfallen, die für eine Verwendung in der Herstellung gärtnerischer Substrate zur Verfügung stehen. Die Preise für Jute, Hanf- und Flachsfasern sind seit 2013 stabil oder leicht ansteigend (FAO, 2017), was auf einen gesunden Markt hinweist.

Fazit: Hanffasern mit Eignungspotential für einen Einsatz im gärtnerischen Substratbereich müssen importiert werden. Es existieren im Moment jedoch noch keine Hanfprodukte mit direktem Verwendungspotential als gärtnerische Profisubstrate. Aus Gründen der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit muss die Verfügbarkeit von Hanffasern als Rohstoff für Torfersatzprodukte als eingeschränkt bewertet werden.

4.2.3.1 FLACHSSCHÄBEN

Flachsschäben haben bei der Substratherstellung zu gärtnerischen Zwecken im Vergleich zu Torf, Kompost, Kokos- oder Holzfasern nur eine geringe Bedeutung (Schmilewski, 2018). Andere Einsatzbereiche, wie die

Brikettierung zu Brennstoff, Herstellung von Spanplatten oder Dämmstoffe sind wichtiger und wirtschaftlich interessanter. Ob verfügbare Flachsschäben in der Substratherstellung wirtschaftlich interessant sind, hängt wesentlich von den Aufbereitungskosten der Fasern ab. Als Folge der zähen Materialeigenschaften ist insbesondere bei der Mechanisierung mit erhöhten Unterhaltskosten zu rechnen.

Grundsätzlich wären Flachsschäben in kleineren Mengen in der Schweiz theoretisch verfügbar, müssten aber noch entsprechend aufbereitet werden. Die Menge an weltweit produzierten Flachsfasern wird für das Jahr 2016 auf rund 800'000 Tonnen geschätzt, wobei mehr als die Hälfte aus Frankreich kommt (FAO, 2018). Auf eine Tonne Hanffasern fallen 2 Tonnen Schäben an, was auch vergleichsweise für Flachs angenommen werden kann. Die Verfügbarkeit der Schäben steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Nachfrage nach den Leinfasern. Die Anbaufläche von Öllein betrug 2016 in der Schweiz rund 60 ha (biofarm, o. J.). Leinöl ist ein Nischenprodukt und verzeichnet einen langsam wachsenden Markt. Mit 60 ha ist die Anbaufläche in der Schweiz bescheiden, obwohl der Leinanbau von den Einzelkulturbeiträgen des Bundes in der Höhe von Fr. 700 je ha und Jahr profitiert. Anbieter des Leinöls ist die Firma biofarm, an welche rund 50 Bauernfamilien ihre Leinsamenernte liefern. Wegen der geringen Nährstoffansprüche eignet sich die Kultur insbesondere auch für extensive Standorte (Luginbühl et al., 2015). Der Anbau von Lein ist in der Schweiz grundsätzlich standortgerecht. Ertragsentscheidend ist eine gute Wasserversorgung. Durch den Anbau von Winterformen und die damit verbundene Vorverlegung des Blühbeginns kann aber der Wasserstress in sommertrockenen Regionen vermindert werden. Bei einem durchschnittlichen Ertrag von 1.5–3 Tonnen Leinsamen je ha (Agristat SBV im Mandat von swiss granum) fällt ein Strohanteil von rund 5 T je ha an. Bei 60 ha Anbau ist dies eine Menge an Flachs von 300 Tonnen Stroh.

Die bescheidenen Kulturansprüche und die Möglichkeit des Anbaus der Kultur unter Biorichtlinien erlauben aus agronomischer Sicht eine beliebige Ausweitung des Anbaus im Inland und Ausland. Eine Ausdehnung der Anbaufläche hängt aber in erster Linie mit der Nachfrage nach Leinöl zusammen. Die Importe von Lein sind bescheiden mit 1.5 Tonnen Leinsamenschrot im Jahre 2015 (Quelle EVZ).

Fazit: Die Verfügbarkeit von Schäben als Rohmaterial aus dem Ausland ist grundsätzlich gewährleistet. Aber wie bei den Hanffasern besteht noch keine Angebotsform, welche mit einer Torfqualität nur annäherungsweise vergleichbar wäre.

4.2.4 GETREIDESPELZEN (HAFER, DINKEL, EMMER UND EINKORN)

Ein Grossteil der Getreidearten mit separatem Entspelungsbedarf wird verfüttert. Der Spelzenanteil beträgt etwa 25 bis 30 Prozent des Gesamtkorngewichts. Hafer wird in der Schweiz gemäss dem Schweizerischen Bauernverband auf rund 1600 Hektaren angebaut. Haferflocken für die menschliche Ernährung aus Schweizer Anbau sind eine Ausnahme.

Der Anbau von Emmer, Dinkel und Einkorn ist in der Schweiz grundsätzlich möglich, für die Kultivierung sind aber fundierte Kenntnisse zu ihren agronomischen Eigenheiten unerlässlich. Im Jahr 2016 betrug die Anbaufläche von Emmer und Einkorn in der Schweiz 134 Hektaren, während sich die Fläche des Dinkelanbaus auf 4610 Hektaren erstreckte. Im Vergleich zu den fast 76'500 Hektaren Weizenanbaufläche ist klar, dass die Einkorn- und Emmerproduktion nur eine kleine Nische innerhalb der Nische der alten Getreidearten darstellt und dass in einigen Regionen nur der Dinkel seinen Platz unter den Brotkulturen behaupten konnte. Bei einem mittleren Ernteertrag von 4 Tonnen je ha (Agristat SBV im Mandat von swiss granum) fallen in der Schweiz jährlich etwa 5'700 Tonnen Schälreste, vornehmlich als Spelzen an. Die Verfügbarkeit als Torfersatzstoff ist gegeben, wenn mit den höherwertigen Absatzkanälen, wie der Befüllung von Kissen, bzw. die Verwendung als Zuschlagsstoff in der Tierfütterung konkurriert werden kann.

Fazit: Anfallenden Spelzen von Hafer, Dinkel, Emmer und Einkorn werden als Futtermittel genutzt und beschränken daher deren Verfügbarkeit als Substratkomponente aus Gründen der Wertschöpfung in hohem Mass. Es werden bisher keine Spelzen der genannten Getreidearten als Substratzuschlagsstoffe in der Schweiz verwendet.

4.2.5 TORFMOOS

Im Moment ist die Verfügbarkeit von Torfmoos eingeschränkt. Torfmoos aus wilden Beständen wurde ab dem Jahre 1970 in Neuseeland geerntet und in grösseren Mengen exportiert (Buxton et al., 1996). Nach (Kumar, 2017) musste bisher Torfmoos mit Verwendung in der Hortikultur aus Gründen der maschinellen Befahrbarkeit des Moorbodens von Hand geerntet werden. Ein bekanntes Exportland für dieses getrocknete Produkt ist Chile. Eine Ernte von Hand und die nachfolgende Aufbereitung ist aber nur dann wirtschaftlich, wenn die Arbeitskosten tief sind und der Verkaufspreis unter jenem anderer Kultursubstrate liegt. Aber sowohl in Deutschland und anderen nordeuropäischen Ländern als auch in Kanada laufen intensive Forschungsprojekte mit dem Ziel, nicht nur Torf zu ersetzen, sondern auch die begrenzt verfügbaren Vermiculite und Perlite (Kumar, 2017; Schmilewski, 2018; Wichmann et al., 2017). In Kanada angebautes Torfmoos in einem grossflächigen Kulturbecken erzielte vergleichbare Ernteergebnisse wie Torfmoos auf wieder vernässten ehemals genutzten Torfflächen oder landwirtschaftlich nutzbar gemachten Moorböden (Pouliot et al., 2015). In der Schweiz gibt es rund 17'800 ha trockengelegte Moorböden als Acker- oder Grünland. Entwässerte Moorflächen könnten unter Wasser gesetzt werden für den Anbau von Torfmoos, aber da fehlen die gesetzlichen Voraussetzungen.

Fazit: Die Verfügbarkeit von Sphagnum für gärtnerische Substrate aus wilden Beständen ist wegen den Produktionskosten beschränkt. Alternative Kulturmethoden sind in Entwicklung und könnten mittelfristig die Nachfrage nach nachhaltig produziertem gärtnerischem Substrat auch ökonomisch befriedigen.

4.2.6 SCHILF (*PHRAGMITES AUSTRALIS*)

Ein Hauptvertreter von Schilf, das gemeine Schilfrohr (*Phragmites australis*), ist weltweit eine Bedrohung für die einheimische Vegetation und damit auch für die darin beheimatete Tierwelt (Escutia-Lara et al., 2012). Auch in der Schweiz verdrängt Schilf seit über 20 Jahren ursprüngliche Vegetationsbestände in Naturschutzgebieten (Weber, 2013). Zur Pflege der Naturschutzgebiete gehört der Schnitt des Schilfrohrs. Das gemähte Schilfrohr wird entweder geschreddert, als Einstreu verwendet, oder das Material wird kompostiert und als Bodenstrukturverbesserung auf die Äcker ausgebracht. In einem Gürtel des Schweizer Mittellandes von Basel-Zürich bis nach Genf gibt es zahlreiche Feuchtgebiete mit bedeutenden Beständen an Schilfrohr. Die Verfügbarkeit von *Phragmites australis* scheint in der Schweiz abgesehen von der Beschaffungslogistik für eine Startphase als Torfersatzstoff gewährleistet zu sein. Da Schilf keine hochwertige Biomasse bildet zur Erzeugung von Methan und das Potential zur Erzeugung von Bioethanol zwar vorhanden, aber über eine kommerzielle Nutzung wenig bekannt ist, scheint die Nutzungskonkurrenz durch die Energieindustrie bisher gering (Dragoni et al., 2017).

Fazit: Schilf ist sowohl in der Schweiz als auch aus dem benachbarten Ausland verfügbar. Die bestehende Qualität reicht aber nicht aus, das Material mit wenig Aufwand im Herstellungsprozess gärtnerischer Substrate einzubinden. Ähnlich den Schäben und Chinaschilf benötigt diese Komponente weitere Aufbereitungsprozesse.

4.2.7 PFLANZENKOHLE-KOMPOST

Die Verfügbarkeit von Pflanzenkohle-Kompostmischungen aus Schweizer Produktion ist gemäss den Ausführungen zur Pflanzenkohle in Kapitel 2 sowie zum Kompost aus der ersten BAFU-Studie zum Thema «Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich» auch bei grösserer Nachfrage gesichert, wenn der Preis für das Produkt bezahlt wird. Insofern kann Pflanzenkohle in der verlangten Qualität in ausreichender Menge produziert werden, limitierend ist aber der Markt.

4.3 ZWISCHENFAZIT

Nur wenige der in Kapitel 4.2 genannten Substratkomponenten sind in ausreichender Menge in der Schweiz als Rohstoff verfügbar. Zudem müssten sie in der Regel noch nachbearbeitet werden, um in grösserem Ausmass Torf in gärtnerischen Substraten ersetzen zu können. Kulturen wie Chinaschilf wurden in den vergangenen Jahren bereits angebaut, verzeichnen aber aus ökonomischen Gründen rückläufige Anbauzahlen. Faserpflanzen wie Hanf oder Flachs haben ein agronomisches Potential in der Schweiz. Sie werden aber nicht zur Herstellung von Torfersatzprodukten angebaut, sondern zu hochwertigeren Produkten, wie Isolationsmaterial. Hingegen kann die europäische Verfügbarkeit der meisten Substratkomponenten mittelfristig als

Zukünftige Verfügbarkeit

positiv bewertet werden, solange der Importpreis die Nutzung als Zuschlagsstoffe in Kultursubstraten erlaubt. Sowohl bei den Fasern, deren Restprodukten, aber auch bei Schilf fehlen im Moment die wirtschaftlichen Aufbereitungstechniken. In diesen Bereich ist noch einiges an Forschung und Entwicklung zu investieren. Das betrifft auch für die Verwendung von Pflanzenkohle, welche zwar theoretisch zunehmend verfügbar wäre, aber offene Fragen zur Aufbereitungsart und Produktionskosten im Raum stehen. In weiter Ferne ist im Moment ein Anbau und Gewinnung von Torfmoos in der Schweiz. Es besteht aber die Möglichkeit, dass in den kommenden 5–10 Jahren die internationalen Forschungsbestrebungen zu einer wirtschaftlichen Produktion von Torfmoos führen könnten.

Tabelle 4-1: Einschätzung der Autoren dieses Berichtes zur Preisabhängigkeit und zur zukünftigen Verfügbarkeit von Substratkomponenten auf dem europäischen Markt. Liegt die Einschätzung zwischen zwei Stufen, ist in beiden Stufen ein „x“ eingetragen.

	Mittel- bis langfristige Verfügbarkeit auf dem europäischen Markt			Abhängigkeit des Kaufpreises von der Entwicklung in der Energiewirtschaft		
	++	+	-	++	+	gering
Pflanzenkohle		x			x	
Chinaschilf	x	x				x
Hanffasern			x			x
Flachsschäben		x			x	
Getreidespelzen		x	x		x	x
Schilf	x	x				x
Torfmoos		x	x			x
Schilf	x					x
Pflanzenkohle-Kompost	x				x	x

5 SOZIALE AUSWIRKUNGEN

Die Abschätzung einer sozialen Wirkung durch den Anbau und die Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe ist komplex. Im Folgenden werden die Faktoren einer sozialen Wirkung im Zusammenhang mit Torfersatzprodukten diskutiert. Es wird dabei unterschieden zwischen Substratkomponenten, die aus dem Ausland importiert werden (Abschnitt 5.3) und solchen, die in der Schweiz gewonnen werden (5.2). In Abschnitt 5.4 erfolgt ein Zwischenfazit.

5.1 SOZIALE WIRKUNGSABSCHÄTZUNG VON NACHWACHSENDEN ROHSTOFFEN

Der Anbau und die Verarbeitung von Rohstoffen als Torfersatzprodukte kann eine soziale Wirkung auslösen, wenn unmittelbar das Leben spezifischer Nutzergruppen, deren Lebensumfeld und der Gesellschaft beeinflusst wird. Die Nutzung natürlicher Ressourcen hat gemäss dem Umwelt Bundesamt in Deutschland (UBA) neben den Folgen für die Umwelt auch vielfältige soziale Auswirkungen, wie die Frage der Rohstoffverteilung, des Zugangs zum Trinkwasser oder gesundheitsgefährdender Arbeitsbedingungen (Umwelt Bundesamt 2018). Im Folgenden werden wichtige soziale Wirkungskriterien im Zusammenhang mit der Gewinnung von alternativen Torfersatzprodukten erläutert:

5.1.1 KINDERARBEIT

Solange die Torfersatzprodukte in der Schweiz gewonnen und verarbeitet werden, ist Kinderarbeit per Gesetz ausgeschlossen. Nach Khakshour et al. (2015) ist Kinderarbeit jedoch nicht nur in Schwellenländern ein Thema, sondern auch in Industriestaaten wie der USA, Kanada oder Europa mit rund einem Prozent der vorhandenen Arbeitskräfte. Gerade in osteuropäischen Staaten ist Kinderarbeit verbreitet möglich, wie bspw. in der Ukraine (Putnick and Bornstein 2015).

5.1.2 UNGLEICHE ROHSTOFFVERTEILUNG

Die ungleiche Verteilung von Vorkommen und Reserven natürlicher Rohstoffe kann zu Interessenskonflikten führen, wenn Länder oder Regionen eine Verfügbarkeit in unfairer Weise ausnutzen. Dieser Aspekt ist bei den untersuchten Torfersatzprodukten kaum zu erwarten, da es sich um nachwachsende und wenig preiselastische Stoffe handelt.

5.1.3 VERSCHLECHTERTER ZUGANG ZUM TRINKWASSER

Der Zugang zu sauberem Trinkwasser in ausreichender Menge kann an niederschlagsarmen Orten ein Thema sein, wo der Anbau eines Torfersatzstoffes im Vergleich zur bisherigen Landnutzung bedeutend höhere Wasserressourcen beansprucht. Auch in Europa und Nordamerika haben gemäss einem Bericht der World Health Organization WHO (2017) 6% der Bevölkerung keinen gesicherten Zugang zu sauberem Trinkwasser. Dieser Umstand ist bei der Nutzung einer spezifischen Rohstoffquelle zu berücksichtigen.

5.1.4 GEFÄHRDETE ERNÄHRUNGSSICHERHEIT DER MENSCHEN

Die Ernährungssicherheit wird durch den Anbau eines Rohstoffes dann gefährdet, wenn dadurch zur Nahrungsmittelproduktion genutztes Land in erheblichem Ausmass nicht mehr zur Verfügung steht. Dies ist in Europa dann denkbar, wenn es regional in ruralen Gebieten mit tiefem Lebensstandard zu Landenteignungen kommt. In der Regel sollten die gesetzlichen Regelungen des Grundbesitzes in Europa gewährleistet sein.

5.1.5 GESUNDHEITSSCHÄDIGENDE ARBEITSBEDINGUNGEN

Landwirtschaftliche und gartenbauliche Arbeiten sind geprägt durch körperlich beanspruchende Tätigkeiten. Zwar hat die Mechanisierung in den vergangenen Jahrzehnten massgeblich die Arbeitsbedingungen erleichtert, doch nicht alle Bereiche sind ausreichend mechanisiert, teilweise bedingt durch die geringe Betriebsgrösse. Eine Mechanisierung kann, muss aber nicht die körperliche Belastung reduzieren. Gesundheitliche Risiken bestehen durch Verletzungsgefahr, Folgen des Umgangs mit Pflanzenschutzmitteln, Stress, Lärmeinwirkung bei der Bedienung von Maschinen, Atmungsstörungen als Folge nicht geschützter Atemwege im Umgang mit staubproduzierenden Stoffen, Rücken-, Gelenk- und Kopfschmerzen (Knoop and Theuvsen 2018). Die Arbeitssicherheit und Gesundheit hat sich als Folge der präventiven Massnahmen in der Landwirtschaft massiv verbessert.

5.1.6 ENTLÖHNUNG UND HOHE ÜBERSTUNDEN

In der Landwirtschaft bestehen generell grosse Unterschiede betreffend die Einkommenssituation. Die arbeitszeitliche Belastung ist deutlich erhöht. Wie der Agrarbericht 2018 (BLW 2018) zeigt, erreichen mehr als 10'000 Bauern in der Schweiz mit ihrem Betriebseinkommen nicht das notwendige Existenzminimum. Die Produktion eines landwirtschaftlichen Rohstoffes unterliegt einem grossen Kostendruck, dem nur mit Direktzahlungen für kulturbegleitende ökologische Dienstleistungen entgegnet werden kann. Die Wertschöpfung von Torfersatzprodukten liegt bei der Aufbereitung der Ausgangsstoffe zum verwendbaren Endprodukt.

5.1.7 LANDRECHTE WERDEN NICHT MISSACHTET

Die Eigentumsgarantie ist in der Schweizer Verfassung geschützt und ist auch im europäischen Recht verankert. In der Schweiz kann es lediglich bei überwiegenden staatlichen Interessen und Ortsgebundenheit zu Enteignungen kommen, bspw. für Bauten im Bereich der Flughäfen, von Eisenbahnen, für Rohrleitungen, elektrische Anlagen, Nationalstrassen oder militärische Einrichtungen. In der Regel führen Enteignungen in der Schweiz nicht zu einer existentiellen Bedrohung.

5.2 SUBSTRATKOMPONENTEN SCHWEIZER HERKUNFT

Es ist davon auszugehen, dass sich die sozialen Auswirkungen eines erweiterten Anbaus und Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen in der Schweiz im Rahmen der landwirtschaftlichen und industriellen Praxis bewegen. Das gilt auch für die in der vorliegenden Studie untersuchten Substratkomponenten. Eine Spezialrolle nimmt die Pflanzenkohle ein, da deren Rohstoff keine ackerbauliche Herkunft hat. Die Bewirtschaftung der übrigen Kulturen ist stark mechanisiert. Es besteht kaum eine Gefahr, dass der Anbau von ungelernten Tieflohnrarbeitern aus dem Ausland bestritten wird. Das gilt auch für die Nachbearbeitung des Chinaschilfstrohs bis zur verkaufsfähigen Endqualität als Substratzuschlagstoff. In der Schweiz sollten die bestehenden Standards der Produktion eine sozial nachhaltige Produktion von Chinaschilf, Flachs und Hanf auch bei einem erweiterten Anbau gewährleisten. Die Erfahrungen aus dem international grossflächigen Anbau der 2G-Biokraftrohstoffe können übernommen werden, um die soziale Wirkung einer Ausdehnung der betroffenen Kulturen zu beurteilen. Dabei stehen Fragen zur Ressourcennutzung im Vordergrund, von welcher die ansässige Bevölkerung direkt betroffen sein kann.

Bei der Produktion von **Pflanzenkohle** aus Reststoffen, wie Altholz oder Gartenschnitt im Herbst, schliesst die Verwertung dieses naturbelassenen Rohstoffes eine ökologisch wertvolle Lücke. In der Schweiz ist, wie bereits ausgeführt, nicht mit einer Beeinträchtigung der Lebensbedingungen in der Umgebung der Produktionsstätte oder der Arbeitsbedingungen für angestellte Personen zu rechnen.

Chinaschilf wird bereits seit einigen Jahren in der Schweiz angebaut und kann bezüglich sozialer Nachhaltigkeit einer normalen Feldkultur gleichgesetzt werden. Gegenwärtig bestehen kaum wirtschaftliche Anreize zum Anbau dieser Kultur. Ein ausgeweiteter Anbau dieser Faserpflanze müsste die Kostendeckung für Produzentinnen und Produzenten gewährleisten. Ansonsten ist beim Anbau von Chinaschilf keine Gefährdung der sozialen Sicherheit zu erwarten.

Eine **Hanffaser und Flachsaufbereitung** in der Schweiz wird im Bedarfsfall als landwirtschaftliche Spezialkultur angebaut und ähnlich den übrigen Nischenprodukten, wie Öllein oder Kenaf, durch spezialisierte landwirtschaftliche Betriebe bewirtschaftet. Da diese Produktion regional unter den bestehenden Standards der

landwirtschaftlichen Praxis in der Schweiz erfolgen wird, ist nicht mit negativen sozialen Auswirkungen zu rechnen.

Bei der Beurteilung der sozialen Auswirkungen einer Gewinnung von **Getreidespelzen** aus dem Produktionsprozess von Dinkel, Einkorn oder Hafer wird in erster Linie der Anbau der Getreidearten untersucht werden müssen. Für den Anbau in der Schweiz gelten dieselben Voraussetzungen wie bereits bei der Produktion von Hanf und Flachs erläutert.

Torfmoos zur Herstellung gärtnerischer Substrate aus Schweizer Produktion wird mittelfristig kein Thema sein und wird bezüglich sozialer Aspekte beim Anbau und der Aufbereitung nicht beurteilt.

Schilfrohr ist in der Schweiz in der Regel ein Abfallprodukt aus der Pflege von Riedflächen. Da Schilf kaum mehr als Einstreu in der Schweizer Landwirtschaft eingesetzt wird und eine sinnvolle Verwertung schwierig ist, wäre dieses Produkt eine verfügbare Rohstoffquelle in gärtnerischen Substraten

Beim Gemisch **Pflanzenkohle-Kompost** gelten die Ausführungen zu den sozialen Auswirkungen des Anbaus und Verwertung von Fasern gemäss Kapitel 5.1.

5.3 SUBSTRATKOMPONENTEN AUS DEM AUSLAND

Bei einer Produktion von **Pflanzenkohle** im Ausland ist zu prüfen, woher die Ausgangsstoffe zur Herstellung der Pflanzenkohle kommen und inwieweit der Lebensraum in Gebieten gefährdet werden könnte. Dies betrifft bei der Holzwahl Tropenhölzer, die zur Herstellung von Holzkohle verwendet werden. Je nach Herstellung der Pflanzenkohle können Kohlemeiler mit den monoxidhaltigen Abgasen eine Belastung für die Umgebung darstellen. Pflanzenkohle steht im Ausland zudem stark in Konkurrenz mit der traditionellen Nutzung von Abfallprodukten, bspw. als Tierfutter oder Brennstoff. Die soziale Wirkung einer Umnutzung von Holz zur Herstellung von Pflanzenkohle ist insbesondere in Schwellenländern gross.

Die Produktion von **Chinaschilf** als 2G-Bioenergiepflanze kann in Europa bei grossflächigem Anbau einen sozialen Impact haben, wenn bspw. in Regionen mit beschränkter Wasserverfügbarkeit diese stark wasseraufnehmende Kultur angebaut wird. So konkurriert der Anbau von Chinaschilf die Wasserverfügbarkeit der Bewohner dieser Region. Dagegen kann Miscanthus an Orten, die durch wiederkehrende Überflutungen bedroht sind, eine puffernde Wirkung haben und damit einen positiven sozialen Impact auf die Bevölkerung ausüben (Davis et al. 2012). Da die ganze Pflanze als Rohstoff zur Erzeugung von Torfsubstituten verwendet werden kann, besteht für den Anbau von Chinaschilf keine Wechselwirkung mit der Produktion von Chinkohl als Energiepflanze oder zur industriellen Nutzung in Werkstoffen.

Bei einer Produktion von **Getreidearten mit Spelzen** als Reststoff im Ausland, spielt der Wasserbedarf der Kulturen und der Einsatz von Pflanzenschutzmittel eine Rolle. Im Vergleich zu einer Reiskultur im Wasseranbau schneidet ein Anbau von Getreide bezüglich Wasserbilanz deutlich besser ab. Als umweltverträglicher und aus Sicht der Pflanzenschutzmittelanwendung weniger problematisch ist eine biologische Produktion, welche bei Kulturen wie Einkorn und Dinkel gut möglich ist. Im Ausland könnte die Ertragskraft in der biologischen Landwirtschaft eine Rolle spielen. Für den Anbau von Biogetreide muss mit einer grösseren Anbaufläche gerechnet werden.

Bei einem Bezug von **Flachs oder Hanffasern** aus dem Europäischen Ausland ist die soziale Nachhaltigkeit zu berücksichtigen. Gemäss Bouloc (2013) führt die Hanfproduktion nicht zu einer signifikanten Umweltverschmutzung. Der Autor des Buchs «HEMP» führt eine Studie von Van der Werf (2004) auf, in welcher Hanf mit anderen Pflanzkulturen verglichen wird. Da die Anbauweise der untersuchten Produktion in Frankreich mit der Europäischen Agrarpraxis vergleichbar ist, wären die Ergebnisse auf andere Länder in Europa übertragbar. Über die Lohnverhältnisse und Arbeitsbedingungen an den Europäischen Stätten der Hanffaserproduktion kann an dieser Stelle nichts ausgesagt werden.

Schilfrohr ist weltweit wenig interessant für eine industrielle Nutzung. In einigen Ländern wird Schilf als Baumaterial genutzt. Da diese Pflanze natürlicherweise wächst und deshalb kein Landnutzungskonflikt besteht, ist das soziale Risiko durch die Gewinnung dieses Rohstoffs gering.

Eine Gewinnung von **Torfmoos** kann eine nachhaltige und klimafreundliche Landnutzung bedeuten. Es ermöglicht eine Landnutzung, wo ansonsten nur unter erschwerten Bedingungen eine pflanzenbauliche Nutzung erfolgen kann. Die Wirtschaftlichkeit von Torfmoos aus Wildbeständen ist jedoch nur dann wirtschaftlich, wenn die Arbeitslöhne niedrig sind (Kumar, 2017).

5.4 ZWISCHENFAZIT

Die Gefährdung der sozialen Sicherheit beim Anbau nachwachsender Torfersatzprodukte ist national wie auch international als gering einzuschätzen. Tabelle 5-1 gibt eine Einschätzung des sozialen Risikopotentials für die Gewinnung und Aufbereitung von Torfersatzprodukten wieder.

Bei der Gesamtbeurteilung fällt auf, dass zwei der sechs bewerteten Produkte ein minimales soziales Risikopotential beinhalten und Pflanzenkohle speziell beachtet werden muss. Es wird im Sinne der künftigen Qualitätssicherung empfohlen, in den Qualitätsrichtlinien für Torfersatzprodukte soziale Standards zu definieren.

Soziale Auswirkungen

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der sozialen Auswirkungen der Substratkomponentenproduktion.

Risikopotential	Kinderarbeit	Rohstoffverteilung	Zugang zu Trinkwasser	Ernährungssicherheit	Gesundheit	Lohn, Arbeitsstunden	Landrechte	Gesamt
Pflanzenkohle	0	+	-	-	+	+	0	+
Chinaschilf	0	-	+		0	+	0	-
Hanf und Flachs	+	-	0	0	0	+	0	0
Getreidespelzen	-	-	+	-	+	0	-	0
Schilf	0	-	-	-	0	0	-	-
Torfmoos	0	-	-	0	0	0	0	-

Legende: - = kein Risiko / 0 = minimales Risiko / + = ernstzunehmendes Risiko / ++ erhöhtes Risiko, Massnahmen vornehmen

6 ÖKOBILANZ

Dieses Kapitel dokumentiert die Sachbilanzen der in Tabelle 2-1 auf Seite 4 aufgeführten Substratkomponenten (Abschnitt 6.1) und zeigt deren Umweltwirkungen auf (Abschnitt 6.2). In Abschnitt 6.3 wird ein Zwischenfazit zu den Umweltwirkungen der Substratkomponenten gezogen.

6.1 SACHBILANZ

Die Sachbilanzen werden für die einzelnen Substratkomponenten (Abschnitt 6.1.1.4) erstellt. Abschnitt 6.1.1 dokumentiert zudem das allgemeine Vorgehen zur Sachbilanzierung der Transporte und der Emissionen während der Nutzungsphase sowie die verwendeten Dichten zur Umrechnung der Substratkomponenten-Massen in entsprechende Volumen.

6.1.1 ALLGEMEIN

6.1.1.1 TRANSPORTE

Für Transporte innerhalb der Schweiz wird in der vorliegenden Studie mit dem in Tabelle 6-1 aufgeführten LKW-Transportprozess aus der ecoinvent Datenbank gerechnet.

Tabelle 6-1: Verwendete ecoinvent v3-Datensätze zur Sachbilanzierung von Transporten

Transportweg	Transportmittel	Distanz	Verwendeter ecoinvent v3-Datensatz
Innerhalb der Schweiz	LKW	70 km	Transport, freight, lorry, unspecified {RER}

6.1.1.2 EMISSIONEN DER NUTZUNGSPHASE

In der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass die Substratkomponenten nach ihrer Nutzung im Gartenbau nicht weiterverwendet werden. Sämtliche Emissionen, die während oder nach der Nutzung der Substrate auftreten, werden daher der Nutzungsphase angerechnet. Eine Aufdüngung der Substratkomponenten wird nicht berücksichtigt, weil diese je nach Anwendung und Substratmischung unterschiedlich ausfällt und diese die pflanzenbaulichen Eigenschaften gemäss Kapitel 3 verändern würde. Allerdings hat die Aufdüngung Auswirkungen auf die Lachgas-Emissionen, so dass ein Unterschied zwischen Substraten besteht, die aufgedüngt oder nicht aufgedüngt werden. Entsprechend muss die Auf Düngung beim Vergleich verschiedener Substratmischungen berücksichtigt werden (vgl. Eymann et al., 2015)

Für Torf und Kompost werden die Emissionen basierend auf bestehender Literatur im Detail modelliert (vgl. Abschnitte 5.1.2.1 und 5.1.2.3 in Eymann et al. (2015)). Für die restlichen Substratkomponenten wird wie in der Studie von Quantis (2012, S. 58) davon ausgegangen, dass 1.5% des Stickstoffgehaltes als N₂O-N emittiert

Ökobilanz

werden. Bei Pflanzenkohle und Pflanzenkohle-Kompost reduzieren sich die N₂O-Emissionen gemäss Borchard et al. (2019) um 38 %.

Die in den Substratkomponenten enthaltenen Schwermetalle werden als Emissionen in den Boden bilanziert. Biogene CO₂-Emissionen aus dem Abbau der organischen Substanz in den biogenen Substratkomponenten werden nicht miteinberechnet.

6.1.1.3 DICHTEN DER SUBSTRATKOMPONENTEN

Für die Ökobilanzierung der Substratkomponenten wird die Dichte der einzelnen Substratkomponenten gemäss Tabelle 6-2 verwendet. Gegenüber der Studie von Eymann et al. (2015) wurde die Ökobilanzergebnisse für Torf auf eine mittlere Schüttdichte von 120 kg TS/m² angepasst.

Tabelle 6-2: Für die Ökobilanzierung verwendete Schüttdichte der Substratkomponenten

Substratkomponente	Dichte (kg TS/m ³)	Quelle
Torf	120	Informationsdienst Weihenstephan (2010)
Pflanzenkohle (Pyrolyse, holzbasiert)	300	Tian et al. (2011)
Pflanzenkohle (HTC)	340	Messwert JardinSuisse nach EN-12580 (2014)
Chinaschilf	70	Altland (2010)
Hanffasern	31	Tian et al. (2011)
Flachsschäben	150-220	Kymäläinen (2004)
Getreidespelzen	150	Messwert Ricoter nach EN-12580 (2014)
Schilf	65	Messwert JardinSuisse nach EN-12580 (2014)
Torfmoos	30-60	Kumar (2017)
Pflanzenkohle-Kompost	620-810	Bruckmann (2016) und Schmidt et al. (2014)

6.1.1.4 DIREKTE FELDEMISSIONEN BEIM ANBAU VON SUBSTRATKOMPONENTEN

Durch Ausbringen von Stickstoff- und Phosphat-Dünger während des landwirtschaftlichen Anbaus resultieren Lachgasemissionen in die Luft, Nitrat- und Phosphatemissionen ins Grundwasser und Phosphatemissionen in Oberflächengewässer. Die Phosphatemissionen ins Grundwasser und in Oberflächengewässer wurden nach Nemecek und Schnetzer(2011) berechnet. Die Lachgas- und Nitratemissionen von Schilf basieren auf Bosco et al. (2016) und diejenigen von Hanf und Flachs auf Turunen und van der Werf (2006). Die Feldemissionen aus dem Anbau von Torfmoos basieren auf Wichmann et al.(2017), diejenigen aus dem Anbau von Chinaschilf und Hafer auf dem ecoinvent v3.5 Datenbestand (ecoinvent Centre, 2018). Bei Pestizidausbringung wurde angenommen, dass die aktiven Wirkstoffe zu 100% als Emissionen in den Boden gelangen.

6.1.2 SUBSTRATKOMPONENTEN

Eine Übersicht über die in der vorliegenden Studie berücksichtigten Substratkomponenten ist in Tabelle 2-1 auf Seite 4 aufgeführt. Im Folgenden wird die Sachbilanzierung der einzelnen Substratkomponenten erläutert.

6.1.2.1 PFLANZENKOHLE AUS PYROLYSE

Die Herstellung von Pflanzenkohle durch Pyrolyse ist nach der Pyreg-Anlage von Verora AG modelliert. Als Ausgangssubstrat dienen Holzschnitzel und Gartenschnitt von verholztem Material. Dieses wird in der Pyreg-Anlage bei Prozesstemperaturen von 500–600 °C unter Sauerstoffausschluss verkohlt. Neben der Pflanzenkohle entstehen Pyrolysegase, die im prozessinternen Brenner verbrannt werden, und Wärme. Diese Wärme wird in erster Linie für die Trocknung der Holzschnitzel verwendet. Der Überschuss an Wärme wird ins Fernwärmenetz gespeist.

Als Datengrundlage für die Sachbilanz der Erstellung der Pyrolyse-Anlage dienten Roberts et al. (2010a; 2010b). In Tabelle A - 4 im Anhang sind die verwendeten Daten der Pyrolysestätte aufgeführt.

Um 1 kg Pflanzenkohle herzustellen, werden bei einer Ausbeute von 30.56% 3.26 kg Holzschnitzel benötigt. Bei der Pyrolyse-Anlage wurde ein Durchlauf von 10 Tonnen Pflanzenkohle pro Stunde und eine Lebensdauer von 50 Jahren bei einer Auslastung von 80% der vollen Kapazität angenommen. Für die Holzschnitzel wurde der ecoinvent-Datensatz «Wood chips, wet, measured as dry mass {CH}| market for | Cut-off, U» verwendet. Die eigentlich autonom ablaufende Pyrolyse braucht einen initialen Energieinput, der durch Propan geliefert wird. Die aus der Pyrolyse resultierenden Abgasemissionen sind sehr gering und vernachlässigbar. Die Sachbilanz der Pyrolyse von Holzschnitzel zu Pflanzenkohle ist in Tabelle A - 20: Übersicht über die verwendeten Daten zur Pyrolyse von Holzschnitzel zu Pflanzenkohle Tabelle A - 20 im vertraulichen Anhang aufgeführt und basiert auf vertraulichen Angaben der Verora AG.

Nach Angabe von Verora AG werden hölzerne Substratanteile verschiedener Herkunft und mit unterschiedlichem ökonomischem Wert zu Pflanzenkohle verarbeitet. Um dies abzubilden, wurden zwei Varianten gerechnet. Die erste Variante deckt den Fall ab, dass Verora AG für die Holzschnitzel bezahlen muss, diese also einen ökonomischen Wert besitzen und somit mit Umweltbelastungen der Produktion beladen sind. Die zweite Variante deckt den Fall ab, dass die Holzschnitzel aus Abfallholz ohne ökonomischen Wert hergestellt werden. Diese sind mit keinen Umweltbelastungen behaftet. Beide Varianten sind in der Übersichtstabelle aufgeführt.

Um die Umweltbelastungen der Pyrolyse auf die Pflanzenkohle und die Nebenprodukte aufzuteilen, wurde die Allokation nach dem Energiegehalt der Produkte gewählt. Der untere Heizwert von Pflanzenkohle beträgt

nach Bergman et al. (2017) 31.9 MJ/kg. Die Berechnung der Allokationsfaktoren ist in Tabelle A - 21 im vertraulichen Anhang aufgeführt.

6.1.2.2 CHINASCHILF

Die Erträge von Miscanthus pro Hektar und Jahr variieren von 22.5 t/ha in Italien (Blengini et al., 2011), über 25.5 t/ha in Deutschland (Uellendahl et al., 2008) bis 30.23 t/ha für Europa (Parajuli et al., 2015). In der Schweiz werden mittlere Erträge von 10-15 t/ha erzielt (Meister et al., 1999). In ecoinvent v3.5 (ecoinvent Centre, 2018) liegen Datensätze für die Produktion von Miscanthusrhizome (Miscanthus rhizome, for planting {DE}| production) und gehäckselte Miscanthusstängel (Miscanthus, chopped {DE}| miscanthus production) aus Deutschland vor, die auch für die Verhältnisse in der Schweiz zutreffend sind und für die vorliegende Studie verwendet wurden, wobei die Datensätze entsprechend den tieferen Erträgen in der Schweiz angepasst wurden. Die Standzeit einer Fläche beträgt 20 Jahre, wobei ab dem 2. Standjahr geerntet werden kann. In Deutschland beträgt die Ernte im ersten Jahr 6'000 kg/ha und in den folgenden Jahren 17'000 kg/ha, was einen durchschnittlichen Ertrag von 16'421 kg/ha ergibt. In der Schweiz liegt der durchschnittliche Ertrag bei einer Bandbreite von 10'000–15'000 kg/ha bei 12'500 kg/ha (Meister et al., 1999). Der aus ecoinvent übernommene Datensatz wurde entsprechend angepasst. Ebenfalls wurde die Herkunft der Rhizome von global auf Herkunft Deutschland geändert (**Tabelle 6-3**).

Tabelle 6-3: Anpassungen bezüglich Ertrag und Herkunft der Miscanthusrhizome auf Schweizer Verhältnisse. Alle anderen Inputs und Emissionen wurden unverändert aus ecoinvent übernommen (ecoinvent Centre, 2018)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Miscanthus, chopped {CH} miscanthus production	1	kg	Miscanthus, chopped {CH} miscanthus production
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	Bemerkung
Miscanthus rhizome, for planting {DE} market for	0.032051/12'500 *16'421 = 0.0421	p	Ertrag in Deutschland: durchschnittlich 16'421 kg/ha; Ertrag in CH: durchschnittlich 12'500 kg/ha

Für die Aufarbeitung mit Faseraufschluss von Chinaschilf zu einem Rohmaterial für Substratmischungen wurden näherungsweise vertrauliche Daten von Ricoter zur Aufbereitung von Holzfasern verwendet (Eymann et al., 2015).

6.1.2.3 HANFFASERN

Hanf ist eine robuste, einjährige Kultur, die nicht mit Pestiziden behandelt werden muss und hohe Erträge erzielt. Nach der Ernte wird der Hanf auf dem Feld getrocknet, bevor die Rottung in Wasserbecken stattfindet. Anschliessend folgt nochmals eine Trocknungsphase, bevor die Hanfstängel in die Verarbeitungsstätte transportiert werden, wo sie maschinell gebrochen und die langen Fasern gewonnen werden. Die Sachbilanz

der Hanfproduktion und –verarbeitung basiert auf van der Werf und Turunen (2006). In Tabelle A - 5 im Anhang ist die Sachbilanz der Hanfstängelproduktion dargelegt.

Bei der Rottung liegen die Hanfstängel fünf Tage lang in warmem Wasser, wobei gemäss Turunen und van der Werf (2006) warme Quellen die Becken speisen und keine Energie zum Heizen des Wassers notwendig ist. Während der Rottung der Hanfstängel entsteht ein Verlust von 24% durch Massenverlust und Schimmelfall. In Tabelle A - 6 im Anhang ist die Sachbilanz der Hanfstängel nach der Rottung aufgelistet.

Die Hanfstängel werden von grossen Walzen gequetscht, wobei die Fasern von der Borke und dem hölzernen Kern getrennt und so die langen Fasern gewonnen werden. Als Nebenprodukte fallen ausgekämmt, kurze Fasern und Schäben an, die ebenfalls einen ökonomischen Wert besitzen und verkauft werden können. Als Torfersatzsubstrat werden die ausgekämmt, kurzen Fasern genutzt. Die Sachbilanz der Hanfverarbeitung ist in Tabelle A - 7 im Anhang dargestellt. Für die Aufarbeitung zu einem Rohmaterial für Substratmischungen wurden zusätzlich vertrauliche Daten von Ricoter zur Aufbereitung von Holzfasern verwendet (Eymann et al., 2015).

Die Aufteilung der Umweltbelastung zwischen dem Hauptprodukt, den langen Hanffasern, und den Nebenprodukten, kurze Fasern und Schäben, erfolgt nach dem Ansatz der ökonomischen Allokation. Als Abfallprodukte fallen grobe Pflanzenrückstände und Staub an. Die Allokationsfaktoren sind in **Tabelle 6-4** aufgelistet.

Tabelle 6-4: Ökonomische Allokation zwischen langen und kurzen Hanffasern und Hanfschäben nach Turunen und van der Werf (2006)

Produkte	Ertrag (% von Inputmasse)	Ökonomischer Wert (€/kg)	Allokationsfaktor (%)
Fasern, lang	9	1.75	38.41%
Fasern, kurz	23	0.75	42.07%
Schäben	40	0.2	19.51%
Grobe Pflanzenrückstände und Staub	28	0	0%

6.1.2.4 FLACHSSCHÄBEN

Die Sachbilanzierung der Flachsschäben beruht, wie die Produktion der Hanffasern, auf Turunen und van der Werf (2006). Um gute Erträge zu erzielen, muss ein Stickstoffüberschuss vermieden werden, was oft dazu führt, dass gar kein Stickstoff-Dünger ausgebracht werden muss. Im Gegensatz zur Hanfkultivierung ist der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, vor allem zur Unkrautkontrolle, jedoch erforderlich. Es ist davon auszugehen, dass die für Torfersatzsubstrat in Frage kommenden Schäben hauptsächlich in der Textilindustrie bei der Gewinnung der Hanffasern aus Faserhanf anfallen. Die Erträge variieren stark von Jahr zu Jahr und in Abhängigkeit der Anbauländer. In der vorliegenden Studie wurde, basierend auf Turunen und van der Werf (2006), mit einem Ertrag von 6'000 kg/ha gerechnet. Eine Übersicht der verwendeten Sachbilanzdaten der Flachsproduktion ist in Tabelle A - 8 im Anhang dargestellt.

Statt der Rottung im Wasser wird bei Flachs die Tau-Rottung praktiziert. Dabei werden die Flachsstängel über mehrere Wochen Wind, Regen und Sonne ausgesetzt. Tabelle A - 9 im Anhang zeigt die verwendeten Sachbilanzdaten der Tau-Rottung der Flachsstängel.

Nach der Rottung werden die Flachsstängel maschinell gequetscht, wie die Hanfstängel. Als Hauptprodukt liegen lange Flachsfasern vor und als Nebenprodukte fallen kurze Flachsfasern und Flachsschäben an. Letztere können zu gartenbaulichen Zwecken genutzt werden. Bezogen auf das Gewicht fallen am meisten Schäben an (55%), gefolgt von den langen Fasern (18%) und den kurzen Fasern (11%). Grobe Pflanzenteile (7.41%) und Staub (8.59%) fallen als Abfallprodukte an. Die verwendeten Sachbilanzdaten sind in Tabelle A - 9 im Anhang im Anhang aufgeführt.

Die Aufteilung der Umweltbelastung zwischen dem Hauptprodukt, den langen Flachsfasern und den Nebenprodukten, den kurzen Flachsfasern und den Flachsschäben, erfolgt nach ökonomischer Allokation. Die Allokationsfaktoren sind in **Tabelle 6-5** aufgelistet. Für die Aufarbeitung zu einem Rohmaterial für Substratmischungen wurden zusätzlich vertrauliche Daten von Ricoter zur Aufbereitung von Holzfasern verwendet (Eymann et al., 2015).

Tabelle 6-5: Ökonomische Allokation zwischen langen und kurzen Flachsfasern und Flachsschäben nach Turunen und van der Werf (2006)

Co-produkt	Ertrag (% von Inputmasse)	Ökonomischer Wert (€/kg)	Allokationsfaktor (%)
Flachs, lange Fasern, gequetscht	18	1.8	86.75%
Flachs, kure Fasern	11	0.35	10.31%
Flachsschäben	55	0.02	2.95%
Grobe Pflanzenrückstände und Staub	16	0	0%

6.1.2.5 HAFERSPELZEN

Die Sachbilanz von Haferspelzen basiert auf dem ecoinvent-Datensatz für finnische Haferproduktion. In diesem Datensatz wurden alle landwirtschaftlichen Produktionsschritte wie Saatgutproduktion, Säen, Pflügen, Ausbringung von Pestiziden und Dünger, Bewässerung, Ernte, Transporte und Trocknung der Haferkörner auf die Verhältnisse in der Schweiz angepasst und in ecoinvent die entsprechenden Schweizer-Datensätze gewählt. Der Ertrag wurde basierend auf FAO, auf 2.169 kg/ha (FAO, 2019) für Europäische Haferproduktion angepasst.

Die Trennung von Korn und Spelze erfolgt gemäss der Meyerhans Mühlen in Villmergen in einer strombetriebenen Entspelzungsmaschine. Die Sachbilanz von geschälten Haferkörner und Haferspelzen ist in Tabelle A - 22 im vertraulichen Anhang aufgeführt.

Die Aufteilung der Umweltbelastung auf geschälte Körner und Spelzen erfolgte nach der ökonomischen Allokation. Preisinformationen von Haferflocken und Haferspelzenmehl stammen von Daniel von Felten, Mitglied

der Geschäftsleitung von Meyerhans Mühlen in Villmergen und sind vertraulich. Die Preise variieren stark je nach Verkaufsmenge und Gebinde. Die Allokationsfaktoren sind in Tabelle A - 23 im vertraulichen Anhang aufgeführt.

6.1.2.6 SCHILF

Die Sachbilanzdaten von Schilf basieren auf Bosco et al. (2016). Gemäss dieser Studie ist die Kultivierung von Schilf in vier Phasen aufgeteilt: Anzucht der Rhizome, initiale Instandstellung des Schilfanbaus, Kultivierung von Schilf inkl. Ernte und Nachbearbeitung. Die Kultivierungsdauer von Schilf beträgt zwölf Jahre, wobei jährlich gedüngt und geerntet wird. Die Aufzucht der Rhizome, die Vorbereitungsschritte und die Nachbearbeitung sind nur einmal während den zwölf Standjahren erforderlich. In Tabelle A - 11 im Anhang ist die Sachbilanz der Schilfrhizom-Produktion aufgeführt. Nach einer Wachstumsphase von zwei Jahren können pro Hektare 160'000 Schilfrhizome gewonnen werden.

Für die initiale Instandstellung des Schilfanbaus werden pro Hektare 20'000 Schilfrhizome benötigt. Die Sachbilanz der initialen Instandstellung ist in Tabelle A - 12 im Anhang aufgeführt.

Der Schilfanbau beträgt 12 Jahre, wobei jährlich gedüngt wird und jährlich geerntet werden kann. Die Düngung erfolgt mit Harnstoff, Phosphat und Kaliumchlorid. Nach der Ernte muss das Schilf gehäckselt werden. Als Basis wurde der ecoinvent-Datensatz «Chopping, maize {CH}| processing» verwendet und der Dieserverbrauch gemäss Bosco et al. (2016) auf 110.7 kg/ha erhöht. Der neu generierte Datensatz «chopping, reed» wird im Datensatz der Schilfkultivierung verwendet. Die Sachbilanzdaten der Schilfkultivierung sind in Tabelle A - 13 im Anhang dargestellt.

Nach 12 Standjahren muss das Feld umgebrochen und für die neue Kultur vorbereitet werden, indem gedüngt wird. Die Sachbilanzdaten des Umbruchs sind in Tabelle A - 14 im Anhang aufgelistet.

In einem weiteren Datensatz «Reed, chopped, all production steps {CH}» werden nun die verschiedenen Datensätze von der Rhizomproduktion bis zum Umbruch nach 12 Standjahren im Datensatz «Reed, chopped, all production steps {CH}» zusammengefasst und anhand der Häufigkeit innerhalb der Standjahre und des Ertrags von 18'200 kg/ha (Bosco et al., 2016) auf 1 kg gehäckselt Schilf berechnet (Tabelle A - 15 im Anhang).

Es ist anzunehmen, dass in der Schweiz Schilf nicht zum Zweck des Substratgewinns als Torfersatzprodukt angebaut wird, sondern als Abfallprodukt in der Pflege von Naturschutzgebieten anfällt. Folglich ist nur die jährliche Ernte mit dem Raupenhäcksler und der Transport des gehäckselten Schilfs zur Verarbeitungsanlage in die Sachbilanz einzurechnen. Von Bosco et al. (2016) wurde ein jährlicher Ertrag von 18.2 t pro Hektare übernommen. In Tabelle A - 16 im Anhang ist die Sachbilanz der Schilfernte auf Naturschutzgebieten aufgeführt.

Für die Aufarbeitung mit Faseraufschluss von Schilf zu einem Rohmaterial für Substratmischungen wurden näherungsweise vertrauliche Daten von Ricoter zur Aufbereitung von Holzfasern verwendet (Eymann et al., 2015).

6.1.2.7 TORFMOOS

Der Torfmoos-Anbau kann entweder auf ehemaligen Abtorfungsflächen, auf Hochmoorgrünland oder auf Schwimm-Matten erfolgen (Gaudig et al., 2018). In der Schweiz ist der Anbau auf Hochmoorgrünland denkbar. Nach Wichmann et al. (2017) muss Torfmoos dauerhaft durch einen Wasserspiegel bedeckt sein. Zur Instandstellung der Kultivierung wird mit dem Bagger die ganze Fläche 40 cm tief abhumusiert, um Nährstoffe zu entfernen und eine ebene Oberfläche zu erhalten. Pro Hektare werden neun schmale, etwa 50 cm breite und 50 cm tiefe, Gräben ausgehoben, die der Bewässerung dienen. Ein Pumpsystem reguliert den Wasserpegel. Torfmoos-Fragmente werden aus dem Feld ausgebracht und mit Stroh überdeckt, um ein feuchtes Mikroklima zur besseren Keimung zu schaffen. Gemäss Wichmann et al. (2017) können pro Hektare und Jahr 13 Tonnen mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 75% geerntet werden. Die Standzeit beträgt 20 Jahre. Einen Übersicht der verwendeten Sachbilanzdaten der Torfmoos-Kultivierung ist in Tabelle A - 17 im Anhang aufgeführt.

Günther et al. (2017) weisen Methan- und Lachgasemissionen für die ersten zwei Standjahre aus den Bewässerungskanälen und den Torfmoos-Flächen auf einen Quadratmeter bezogen aus. Bezogen auf die kultivierte Fläche von 9438 m²/ha und die bewässerte Fläche von 563 m²/ha ergibt dies jährliche Methanemissionen von 20.3 kg pro Hektare und jährliche Lachgasemissionen von 0.25 kg pro Hektare (Tabelle A - 17 im Anhang).

In der Verarbeitungsanlage wird Torfmoos getrocknet. Bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 75% enthält die Ernte 2.76 L Wasser pro Kilogramm Torfmoos, das verdunstet werden muss (Tabelle A - 18 im Anhang).

6.1.2.8 PFLANZENKOHLE-KOMPOST

Pflanzenkohle-Kompost wird aus Pflanzenkohle und Kompost hergestellt, wobei die Pflanzenkohle vor der Kompostierung beigemischt und mitkompostiert wird. Die Sachbilanzdaten von Pflanzenkohle sind in Kapitel 6.1.2.1 aufgeführt und für die Sachbilanzdaten von Kompost sei auf Eymann et al. (2015) verwiesen.

Das Beispiel für Pflanzenkohle-Kompost in dieser Studie besteht zu 30 Vol.-% aus Pflanzenkohle und zu 70 Vol.-% aus Kompost (Schmidt et al., 2014). In Tabelle 6-6 sind Eckdaten der Substratkomponenten Pflanzenkohle und Kompost sowie von Pflanzenkohle-Kompost aufgeführt.

Tabelle 6-6: Mischungsverhältnis Pflanzenkohle-Kompost, nach Schmidt et al. (2014)

	Gewicht (t)	Volumen (m ³)
Pflanzenkohle	8	30
Kompost	55	72
Pflanzenkohle-Kompost	63	102

Um eine Tonne Pflanzenkohle-Kompost zu produzieren, werden dem zu kompostierenden Grüngut 0.13 t Pflanzenkohle beigemischt. Da Grüngut als Abfallprodukt betrachtet und daher keinen ökonomischen Wert besitzt, werden ihm keine Umweltbelastungen angerechnet und wird deshalb in den Sachbilanzdaten zur Kompostierung nicht aufgeführt (Tabelle A - 19 im Anhang).

Die Schwermetalle im Pflanzenkohle-Kompost wurden basierend auf Messungen von Hagemann (2018) für eine Kompost-Mischung aus grünem Pflanzenmaterial, Stallmist und Pflanzenkohle aus dem Ithaka-Institut berücksichtigt. Folgende Schwermetall-Konzentrationen wurden gemessen (Menge in mg / kg TS):, 13 mg Pb, 104 mg Zn, 23 mg Ni, 17 mg Mo, 341 mg Mn, 0.014 mg Cd (Nachweisgrenze), 0.026 mg Cu (Nachweisgrenze).

6.2 WIRKUNGSBILANZ

Im Folgenden werden die Umweltauswirkungen der einzelnen Substratkomponenten beschrieben.

Das Treibhauspotenzial für alle untersuchten Substratkomponenten ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Dabei wird ersichtlich, welcher Anteil der Treibhausgasemissionen auf die Emissionen während der Nutzung der Substratkomponenten zurückzuführen ist. Relevant sind Lachgasemissionen, die durch den Stickstoffgehalt in den einzelnen Substratkomponenten verursacht werden. Beim Torf dominieren die Kohlendioxidemissionen aus dem Abbau der fossilen organischen Substanz.

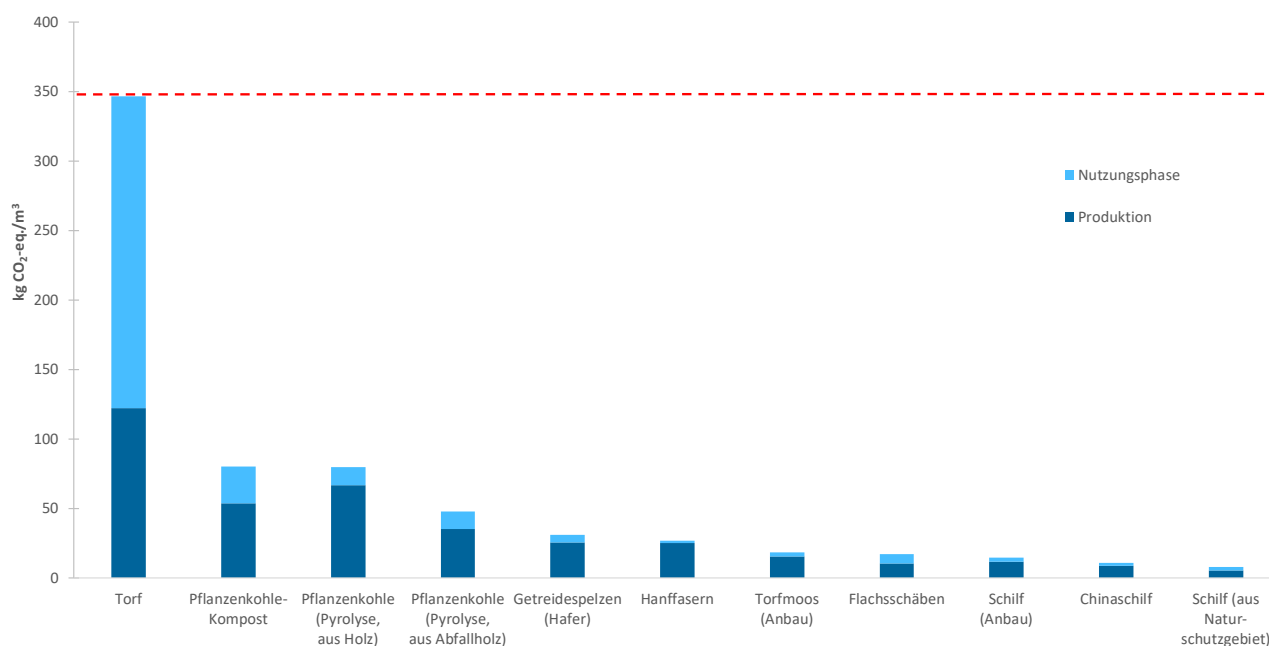


Abbildung 6-1: Treibhauspotenzial der Substratkompenten im Vergleich (rote Linie = Torf)

Verglichen mit **Torf** fällt bei allen untersuchten Substratkompenten das Treibhauspotenzial deutlich tiefer aus. Das Treibhauspotenzial von **Pflanzenkohle-Kompost** ist um 77 % tiefer als das Treibhauspotenzial von Torf. Beim Pflanzenkohle-Kompost sind neben der Produktion die Lachgasemissionen aus dem Kompost-Anteil in der Nutzungsphase für das Treibhauspotenzial relevant.

Bei **Pflanzenkohle** auf Basis von Holz mit ökonomischem Wert macht die Produktion 84 % des Treibhauspotenzials aus, wobei ein relevanter Anteil auf die Produktion der Holzschnitzel zurückzuführen ist. Dies wird deutlich bei der Pflanzenkohle aus Abfallholz, bei welcher das Treibhauspotenzial der Produktion um 40% tiefer ist, weil für die Bereitstellung des Abfallholzes keine Klimaauswirkungen berücksichtigt werden. Neben den Holzschnitzeln wird das Treibhauspotenzial durch die Nutzung der Energieträger Propan und Strom verursacht, die bei der Pyrolyse zum Einsatz kommen.

Pflanzenkohle verfügt über das Potenzial Kohlenstoff langfristig stabil zu binden und dadurch Kohlendioxid der Atmosphäre zu entziehen. Abbildung 6-2 zeigt das Treibhauspotenzial von Pflanzenkohle sowie von Pflanzenkohle-Kompost unter Berücksichtigung des maximalen Potenzials zur langfristigen Kohlenstoffspeicherung. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kohlenstoffspeicherung die Emissionen durch die Produktion und Nutzung der Pflanzenkohle deutlich übersteigen kann.

Ökobilanz

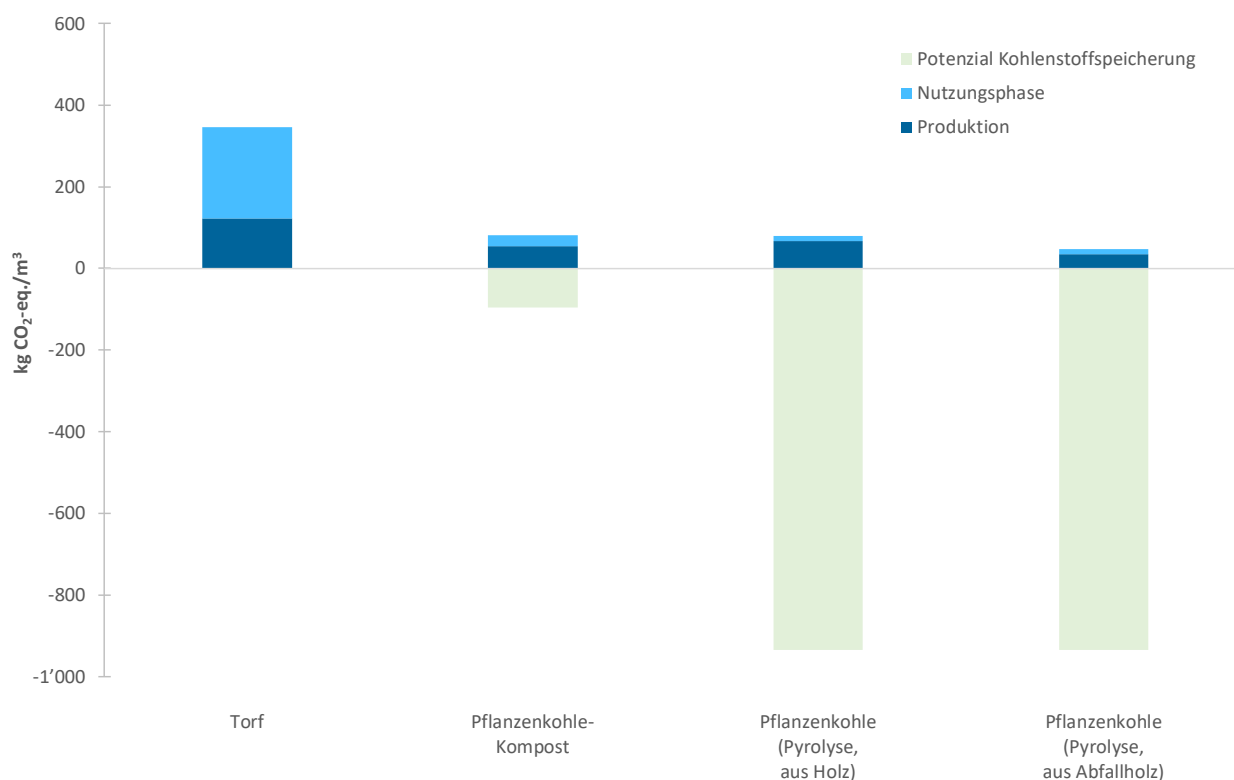


Abbildung 6-2: Treibhauspotenzial von Pflanzenkohle inkl. deren maximalen Potenzial zur langfristigen Kohlenstoffspeicherung (Gutschrift für Kohlenstoffspeicherung in grüner Farbe)

Liegt als Ausgangssubstrat für Substratkomponenten ein Nebenprodukt mit geringem ökonomischem Wert oder ein Abfallprodukt vor, wie das bei den **Flachsschäben** und dem **Schilf aus Naturschutzgebieten** der Fall ist, so ist die Produktion mit tiefen Treibhausgasemissionen verbunden. Die Nutzungsphase wird durch Lachgasemissionen dominiert.

Bei **Hafer** wird im Anbau Dünger eingesetzt, welcher zum Treibhauspotenzial beiträgt. Da es sich bei den **Getreidespelzen** um ein Nebenprodukt mit ökonomischem Wert handelt, entfallen 9% der Treibhausgasemissionen auf die Spelzen. Auch bei **Hanffasern** und **Chinaschilf** beeinflusst der Einsatz von Stickstoffdünger und Diesel im Anbau das Treibhauspotenzial.

Bei neu angebautem **Torfmoos** tragen die Aushubarbeiten mit dem Bagger in der Produktion entscheidend zum Treibhauspotenzial bei.

Die Gesamtumweltbelastung nach der Methode der ökologischen Knappheit für alle untersuchten Substratkomponenten ist in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4 dargestellt. In Abbildung 6-3 ist ersichtlich, welcher Anteil der Gesamtumweltbelastung auf die Emissionen während der Produktion, während der Nutzung der Substratkomponenten und separat aufgrund der Schwermetalle zurückzuführen ist. Der Einfluss der Schwermetalle bei der Pflanzenkohle kann dadurch relativiert werden, dass diese in der Pflanzenkohle langfristig gebunden sind und ein Leaching nur zu einem sehr kleinen Anteil zu erwarten ist.

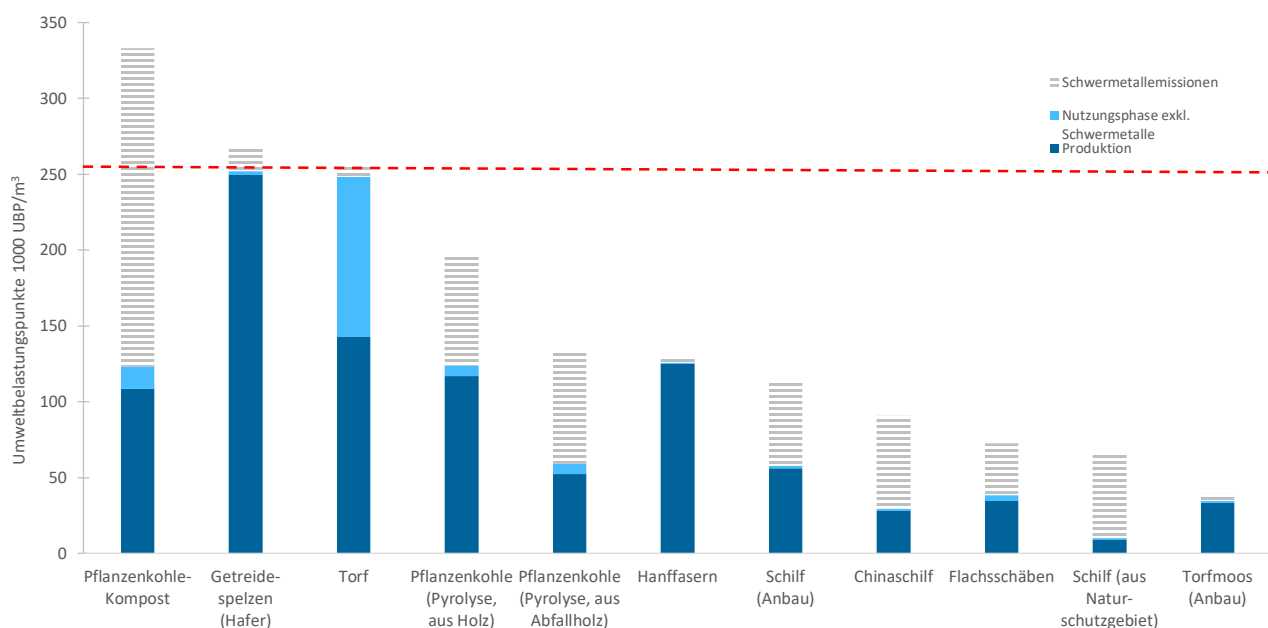


Abbildung 6-3: Gesamtumweltbelastung der Substratkomponenten im Vergleich (rote Linie = Torf)

Unter Berücksichtigung der Schwermetalle bei der Nutzung von **Pflanzkohle-Kompost** tragen diese Schwermetallemissionen 63 % zum Resultat bei. Dieses Ergebnis ist massgeblich von der Zusammensetzung des eingesetzten Komposts abhängig. In der Produktion von **Haferpelzen** tragen Lachgasemissionen in die Luft und Nitratauswaschung ins Gewässer beim Getreideanbau entscheidend zur Gesamtumweltbelastung bei und bei **Pflanzkohle aus Holz mit ökonomischem Wert** wird die Gesamtumweltbelastung durch die Herstellung der Holzschnittel dominiert. Alle anderen untersuchten Substratkomponenten verursachen eine geringere Gesamtumweltbelastung als Torf. Unter Berücksichtigung des Potentials von Pflanzkohle langfristig stabil zu binden zeigt sich, dass durch diese Kohlenstoffspeicherung deutlich mehr Umweltbelastung vermieden werden kann (430'000 UB) als Umweltbelastung bei der Herstellung und Nutzung der Pflanzkohle anfällt. Beim Pflanzkohle-Kompost kann durch die Kohlenstoffspeicherung 13 % der Umweltbelastung durch Herstellung und Nutzung vermieden werden.

Die Gesamtumweltbelastung von **Torf** ist massgeblich auf fossile Kohlendioxidemissionen aus der Zersetzung der organischen Substanz zurückzuführen. Allein die CO₂-Emissionen aus der Nutzungsphase von Torf machen 41% der Gesamtumweltbelastung aus. Nicht zu unterschätzen ist der Transport von Torf in die Schweiz, der rund 40% der Gesamtumweltbelastung verursacht.

Bei **Hanffasern** wird das Resultat durch die landwirtschaftliche Produktion verursacht, hauptsächlich durch Verbrennungsemissionen beim Einsatz von Diesel und durch die Düngernutzung. Die Gesamtumweltbelastung von **Schilf**, **Chinaschilf** und **Flachsschäben** wird durch Schwermetallemissionen mit einem Anteil von

über 49% dominiert, da die Umweltauswirkungen der Produktion sehr gering sind. Bei **Torfmoos** tragen Emissionen im Anbau von Torfmoos in der Höhe von 53% und die Trocknung des geernteten Torfmooses mit 35% zur Gesamtumweltbelastung bei.

Welche Umweltprobleme durch die Produktion der einzelnen Substratkomponenten verursacht werden, zeigt Abbildung 6-4. Die prozentualen Beiträge der einzelnen Umweltindikatoren zur Gesamtumweltbelastung sind ohne Berücksichtigung der Schwermetall-Emissionen während der Nutzungsphase ausgewiesen.

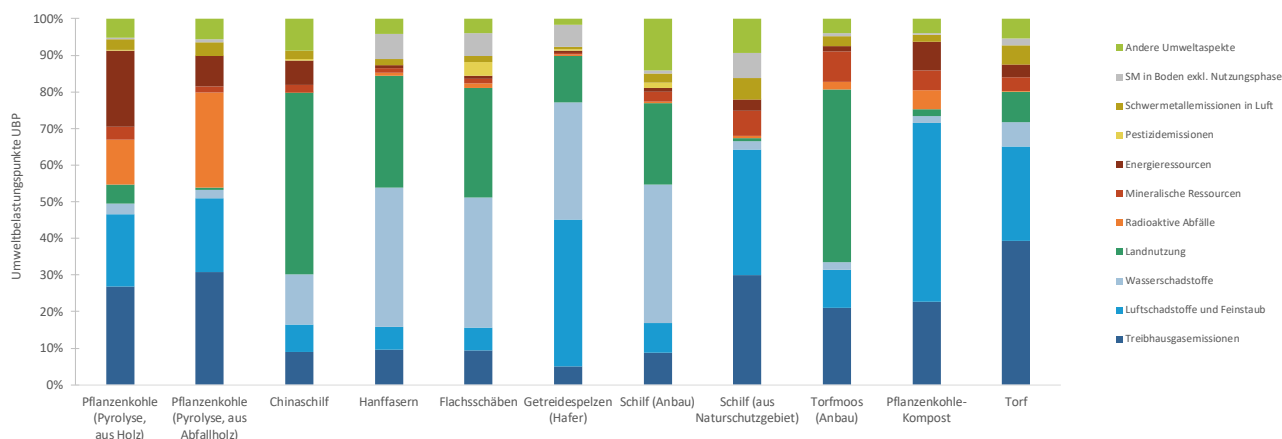


Abbildung 6-4: Gesamtumweltbelastung der Substratkomponenten. Die prozentualen Beiträge der einzelnen Umweltindikatoren zur Gesamtumweltbelastung sind ohne Berücksichtigung der Schwermetall (SM)-Emissionen während der Nutzungsphase ausgewiesen

Substratkomponenten aus landwirtschaftlicher Produktion benötigen **Landressourcen** und tragen bei Einsatz von Stickstoff- und Phosphatdünger zur **Gewässerbelastung** durch Nitrat- und Phosphatmissionen bei. **Energieressourcen** wie Strom und Propan werden in der Herstellung von Pflanzenkohle und Diesel bei den landwirtschaftlichen Produktionsschritten benötigt. **Luftschadstoffe und Feinstaub** entstehen durch Zerkleinerung und Häckseln von Holz und Pflanzenstängeln wie Schilf, Chinaschilf, Hanf und Flachs.

Der Verbrauch von nicht-erneuerbarer Primärenergie bei der Herstellung der einzelnen Substratkomponenten ist in Abbildung 6-5 dargestellt. Diese ist unterschieden nach fossiler und nuklearer Energie.

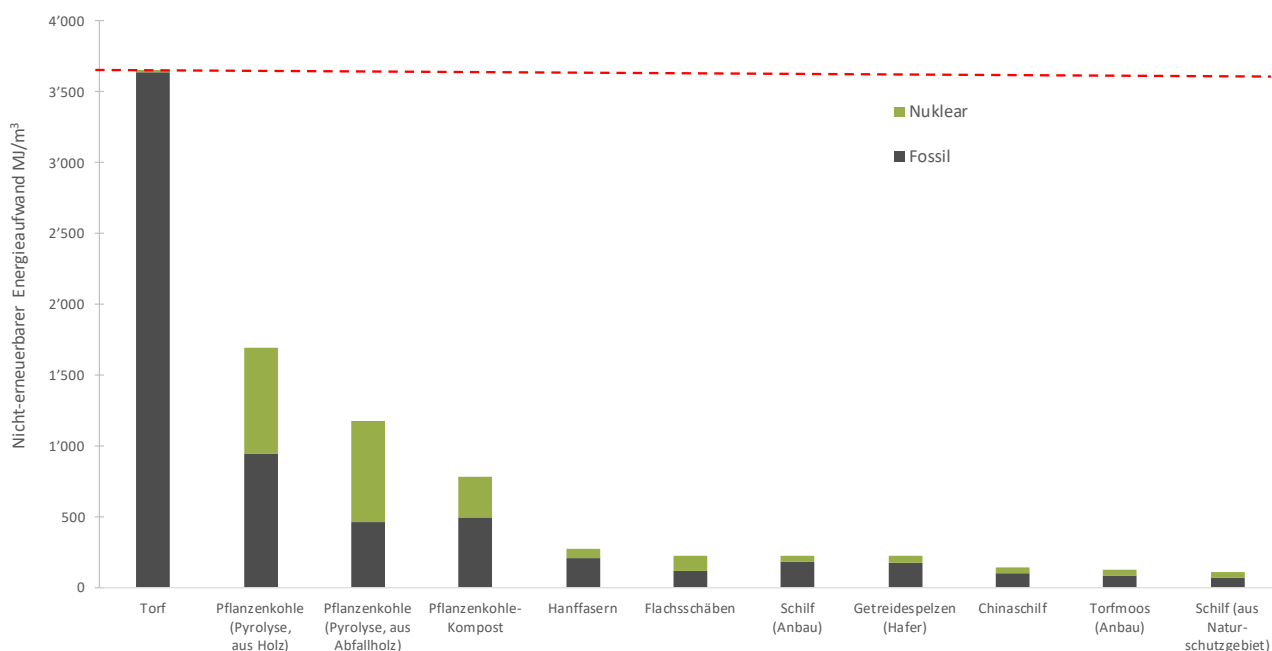


Abbildung 6-5: Nicht-erneuerbarer kumulierter Energieaufwand der Substratkomponenten im Vergleich (rote Linie = Torf)

Der hohe nicht-erneuerbare Energieaufwand beim **Torf**, wird durch die fossile Energie im Torf-Material selbst dominiert. Im Vergleich zu Torf ist der nicht-erneuerbare Energieaufwand aller anderen Substratkomponenten gering. In der Pyrolyse zur Herstellung von **Pflanzenkohle** wird Propan und Strom eingesetzt, die entscheidend zum nicht-erneuerbaren Energieaufwand beitragen. Dies ist auch beim **Pflanzenkohle-Kompost** sichtbar, da dieser ein Volumenanteil von 30% Pflanzenkohle enthält.

Bei den **restlichen Substratkomponenten** ist der Energieaufwand vergleichsweise gering und dieser wird durch Diesel als fossiler Kraftstoff auf dem Feld sowie Strom in der Verarbeitung beeinflusst. Der Strommix der Schweiz enthält Nuklearstrom und Stromimporte, die zum nicht-erneuerbaren Energieaufwand beitragen.

In Abbildung 6-6 ist das Süsswasser-Eutrophierungspotential der Substratkomponenten dargestellt. Die höchsten Emissionen stammen von den Substratkomponenten **Hanffasern**, **Schilf**, **Chinaschilf** und **Getreidespelzen** mit einem Ausgangssubstrat aus landwirtschaftlichem Anbau, bei welchem Phosphatdünger eingesetzt wird.

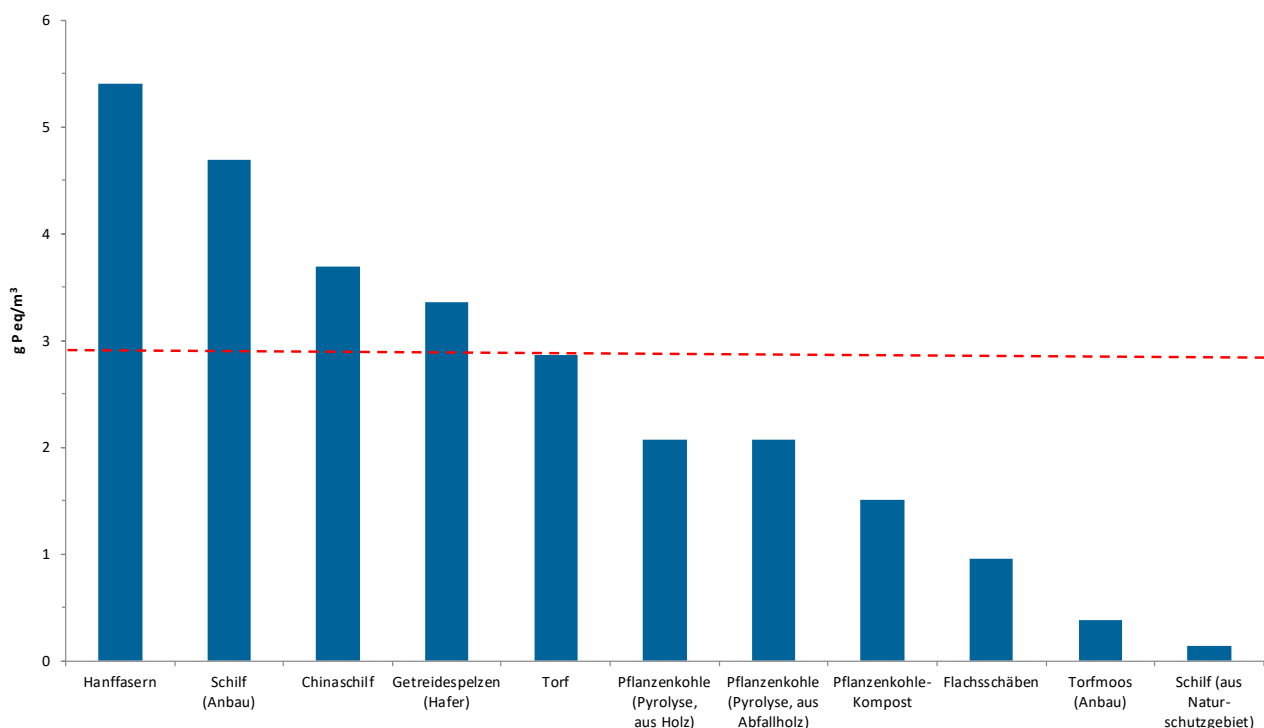


Abbildung 6-6: Süßwasser-Eutrophierungspotenzial der Substratkompnenten (ohne Langzeitemissionen) im Vergleich (rote Linie = Torf)

Die benötigte Landfläche für die Herstellung der verschiedenen Substratkompnenten ist in Abbildung 6-7 zusammengestellt. Wenn für die Herstellung von **Pflanzenkohle** Holz produziert wird und nicht Abfallholz eingesetzt wird, dann benötigt diese Produktion Waldflächen, welche jedoch im Fall der Schweizer Wälder auch ein ökologisch wertvolles Habitat darstellen können. Auch die Flächenumwandlung für den Anbau von **Torfmoos** kann einen ökologischen Mehrwert bringen. Relevant ist zudem der Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche für den Anbau von **Hanf**, **Getreide**, **Chinaschilf** oder **Schilf**. Der Flächenbedarf für **Pflanzenkohle aus Abfallholz** ist gering.

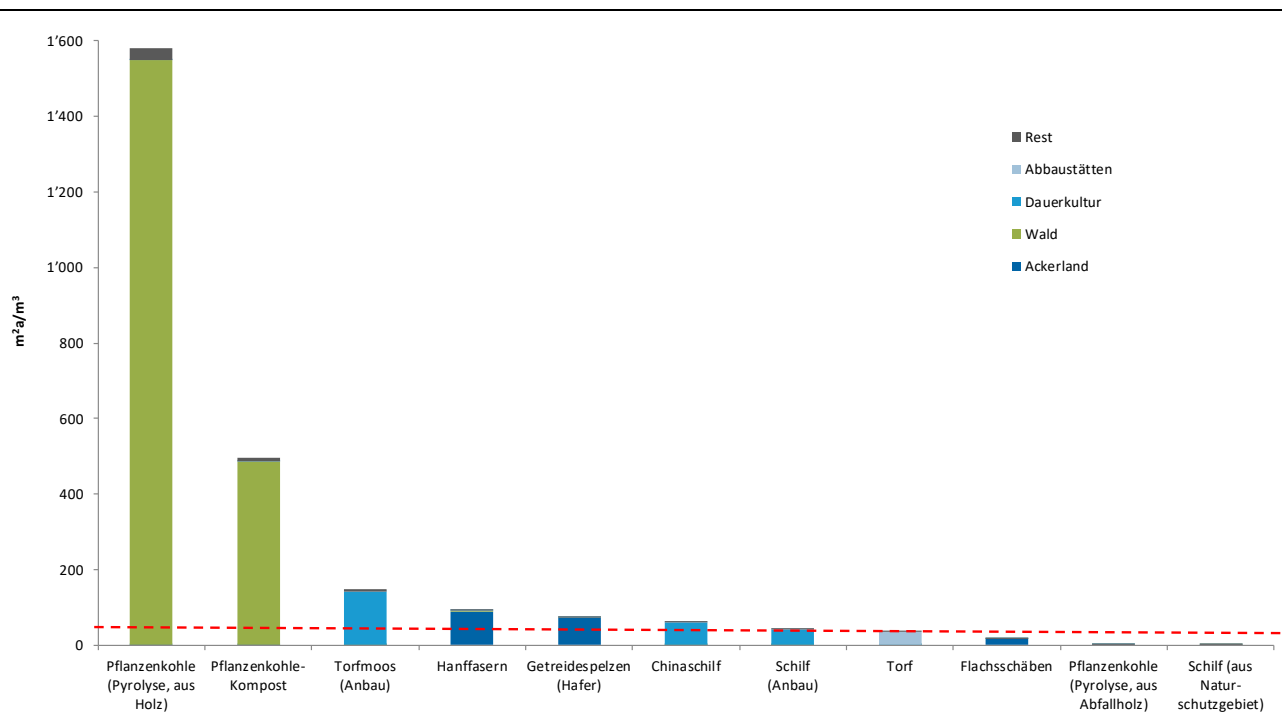


Abbildung 6-7: Flächennutzung der Substratkomponenten im Vergleich (rote Linie = Torf)

6.3 ZWISCHENFAZIT

Die untersuchten Substratkomponenten haben ein tieferes Treibhauspotenzial und in den meisten Fällen eine tiefere Gesamtumweltbelastung als Torf. Beim Einsatz von Pflanzenkohle-Kompost können Schwermetalle in die Umwelt ausgetragen werden. Sind bei der Aufarbeitung der landwirtschaftlichen Ausgangssubstrate energieintensive Prozesse notwendig, steigt der nicht-erneuerbare Energieaufwand deutlich an. Dennoch weisen alle untersuchten Substratkomponenten einen geringeren nicht-erneuerbaren Energieaufwand auf als Torf. Im Hinblick auf die Flächennutzung haben die landwirtschaftlich angebaute Substratkomponenten und solche basierend auf Holz einen höheren Flächenbedarf als Torf und sie tragen mehr zur Eutrophierung der Süßgewässer bei.

7 ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE DER SUBSTRATKOMPONENTEN

In diesem Kapitel werden die Bewertung der pflanzenbaulichen Eigenschaften, der zukünftigen Verfügbarkeit, der Umweltauswirkungen und der sozialen Risiken der einzelnen Substratkomponenten zusammengefasst (vgl. Tabelle 7-1). Mit einem Farbencode wird dargestellt, ob eine Substratkomponente in einem bestimmten Kriterium positiv, eher positiv, eher negativ oder negativ abschneidet. Diese Einstufung richtet sich bei den pflanzenbaulichen Eigenschaften nach den im Anhang aufgeführten Kriterien (vgl. Seite 74). Bei der zukünftigen Verfügbarkeit erfolgt die Kategorisierung gemäss Tabelle 4-1 (Seite 34) und bei den sozialen Risiken nach Tabelle 5-1 (Seite 40). Die Bewertung der Umweltwirkungen erfolgt nach dem im Anhang beschriebenen Schema (Seite 74). Es gilt zu berücksichtigen, dass die Einteilung der Ergebnisse in Kategorien (von negativ bis positiv) gewissermassen subjektiv und bei den pflanzenbaulichen Eigenschaften zusätzlich von der angebauten Pflanze abhängig ist.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass alle Substratkomponenten in Bezug auf die untersuchten Kriterien sowohl positive als auch eher negative Eigenschaften aufweisen. Bei den pflanzenbaulichen Eigenschaften können nachteilige Ausprägungen durch geeignete Kombination mit anderen Substratkomponenten oder durch Zugabe von Zusatzstoffen weitgehend ausgeglichen werden. Bei den Umweltauswirkungen schneiden insbesondere Substratkomponenten aus Abfallprodukten und Produkte, die unter geringen Dünger- und Pestizidgaben kultiviert wurden, gut ab. Die Verfügbarkeit wird dann als hoch und gesichert eingeschätzt, wenn die Rohstoffe jetzt schon in grossen Mengen ungenutzt anfallen oder als Nebenprodukte mit geringem ökonomischem Wert grossen Absatz finden, wie das bei Schilf und Getreidespelzen der Fall ist. Da in der Schweiz keine grossflächigen, geeigneten Anbauflächen für die Torfmooskultivierung vorliegen, wird dessen Verfügbarkeit als niedrig erachtet. Die sozialen Risiken werden einzig bei Torfmoos als gering eingestuft, bei allen anderen Substratkomponenten sind keine Risiken bekannt. Für Pflanzenkohle wird eine hohe Preisabhängigkeit festgestellt, die sie in Konkurrenz mit der energetischen Nutzung stehen lässt.

Zusammenstellung der Ergebnisse der Substratkomponenten

Tabelle 7-1: Pflanzenbauliche Eigenschaften, zukünftige Verfügbarkeit, Umweltauswirkungen und soziale Risiken der Substratkomponenten aus der Studie von 2015 und der 2019-Erweiterung. Die Gesamtumweltbelastung ist inklusive und exklusive der Schwermetall-Emissionen (SM) während der Nutzungsphase ausgewiesen. Die Farbcodierung (nach Tabelle A - 2 und Tabelle A - 3) kennzeichnet, ob das Resultat als positiv (■), eher positiv (■), eher negativ (■) oder negativ (■) beurteilt werden kann. (■): keine Daten / keine Beurteilung vorgenommen.

		Pflanzenbauliche Eigenschaften											Verfügbarkeit	Preisabhängigkeit	Umweltaspekte				Soziale Aspekte						
		Schüttdichte, trocken kg TS/m ³	pH (CaCl ₂)	Pufferkapazität	Nährstoffgehalt			Salzgehalt	Stickstoffimmobilisierung	Wasserhaltevermögen	Luftkapazität	Strukturstabilität			Mittel- bis langfristige Verfügbarkeit	Abhängigkeit des Preises von der Energiewirtschaft	Treibhauspotenzial	Gesamtumweltbelastung		Kumulierter nicht erneuerbarer Energieaufwand	Soziale Risiken				
					mg/l NO ₂ -N, NH ₄ -N	mg/l P ₂ O ₅	mg/l K ₂ O	g/L	-	Vol-%	Vol-%	-	-	-	kg CO ₂ -eq/m ³	inkl. 1000 UBP/m ³	exkl. SM aus Nutzung	MJ/m ³	-						
Bisherige Substratkomponenten (Studie 2015)	Schwarztorf	120-250	2.5-3.5	klein	≤50	≤30	≤40	≤0.4	keine	70	20	mittel	+/-	gering	350 ^e	260 ^e	250 ^e	3700	Gesundheitl. Risiken						
	Weisstorf	80-120	2.5-3.5	klein	≤50	≤30	≤40	≤0.4	keine	60	30	mittel													
	Rindenkompost	200-300	5.0-7.0	gross	≤400	≤150	≤600	≤1.5	mittel	50	40	mittel	+/++	keine	32	65	36	300	keine Risiken						
	Grüngutkompost	600	7.6	mittel	70	700	2000	2	mittel	>50	30	klein	+/++	keine	90	860 ^e	110 ^e	330	keine Risiken						
	Reisspelzen	90-100	5.0-6.0	keine	0	0	800	0.6	klein	9	90	mittel	++	hoch	29	62	47	260	bei Import aus Asien						
	Holzfasern	80-130	4.7-6.0	klein	≤50	80	100	0.1	mittel	20	60	klein	+	mittel	9.5	22	14	170	keine Risiken						
	Holzhäcksel fein	130-140	3.5-4.0	klein	≤50	80	100	0.2	klein	30	>70	mittel	++	mittel	9.2	37	13	120	keine Risiken						
	Kokosfasern	50-150	4.5-6.5	klein	<50	<50	600	0.8	hoch	40	60	klein	+/++	hoch	85	520	510	890	beachtenswert						
	Cocopeat	80	4.0-5.5	klein	<5	10	500	0.6	hoch	70	30	klein	+/++	mittel	40	120	120	400	beachtenswert						
	Xylit	160-230	4.5	klein	<10	<10	<50	0.5	mittel	50	40	mittel	+/-	gering											
Landerde	1300	5.5-6.5	mittel					keine				++	keine	4.9	7.0	7.0	55	keine Risiken							
TEFA	200	6.8	mittel	180	<5	150	0.4		50	40	mittel	++	gering	26	93	71	370	keine Risiken							
Neue Substratkomponenten (Studie 2019)	Pflanzenkohle (Pyrolyse) ^{a,b}	300	5.2-8.8	gross	<5	200	2000	3	mittel	50	20	hoch	+	hoch	80 ^f	48 ^{b,f}	190 ^{a,f}	130 ^{b,f}	120 ^{a,f}	59 ^{b,f}	1700 ^e	1200 ^e	keine Risiken		
	Pflanzenkohle (HTC)	340	5.8-6.4	gross	0.4	300	1000	2	mittel	60	20	hoch	+	hoch											keine Risiken
	Chinaschilf	70	5.1-6.1	keine	<5	30	300	0.2	mittel	10	80	hoch	+	gering	11	90	30	140	keine Risiken						
	Hanf Fasern	31	7.0	keine	20	60	900	0.5	klein	50	40	mittel	+	mittel	27	130	130	270	keine Risiken						
	Flachsschäben	150-220	5.0-5.6	klein	10	80	300	0.2	mittel	20	80	hoch	+	mittel	17	69	39	230	keine Risiken						
	Getreidespelzen (Hafer)	150	7.6	keine	80	800	900	0.6	mittel	<20	80	mittel	++	mittel	31	260	250	220	keine Risiken						
	Schilf ^{c,d}	65	6.4	keine	<5	<10	200	0.3	mittel	10	80	hoch	++	gering	15 ^e	8.0 ^d	110 ^c	65 ^d	58 ^e	10 ^d	220 ^e	110 ^d	keine Risiken		
	Torfmoos (Anbau)	30-60	3.3-5.8	klein	20	10	70	0.2	klein	50	40	mittel	-	gering	19	38	35	120	geringe Risiken						
	Pflanzenkohle-Kompost	620-810	7.2-7.5	gross	60	500	2000	2	mittel	60	30	mittel	+	mittel	80 ^f	320 ^f	120 ^f	780	keine Risiken						

^a Pflanzenkohle aus Holz mit ökonomischem Wert

^b Pflanzenkohle aus Abfallholz

^c Schilf aus Anbau

^d Schilf aus Naturschutzgebiet

^e 2018 aktualisiert

^f Die Verminderung der Umweltbelastung durch die potentielle Kohlenstoff-Speicherung der Pflanzenkohle übersteigt die hier ausgewiesene Umweltauswirkung.

8 DISKUSSION

Wie Eymann et al. (2015) aufzeigten, ist der Abbau, der Transport und die Nutzung von Torf mit relevanten Treibhausgasemissionen verbunden. Die zusätzlich untersuchten Substratkomponenten zeigen in vielen Aspekten positivere Eigenschaften als Torf, weisen geringere Umweltbelastungen und soziale Risiken auf und sind durch lokale Anbaumöglichkeiten in der Schweiz mit einer gesicherten Verfügbarkeit behaftet. Zudem können dabei Abfallprodukte oder Nebenprodukte mit geringem ökonomischem Wert durch die Nutzung als Substratkomponente aufgewertet werden. Durch die Nutzung von Abfallholz statt Holz mit ökonomischem Wert kann die Umweltbelastung von Pflanzkohle um 49% und das Treibhauspotenzial um 36% gesenkt werden. Noch deutlicher zeigt sich der Vorteil der Verwendung von Abfallprodukten bei Schilf. Schilf aus Naturschutzgebieten, das ausser schneiden und häckseln ohne jeglichen landwirtschaftlichen Einsatz gedeiht, weist ein um 87% tiefere Umweltbelastung und ein um 45% tieferes Treibhauspotenzial auf als Schilf aus Anbau. Dies verdeutlicht, dass die Nutzung von Abfallprodukten nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch sinnvoll ist.

Die meisten Substratkomponenten weisen geringere Umweltbelastungen auf als Torf. Die ökologischen Auswirkungen von Pflanzkohle-Kompost ist stark abhängig vom eingesetzten Kompost und dem Verfahren der Kompostierung, da diese Aspekte die Lachgas- und Methanemissionen im Kompostanteil sowie die Schwermetallemissionen während der Nutzungsphase beeinflussen. Bei der Produktion von Pflanzkohle tragen zudem der Verbrauch fossiler Treibstoffe in der Hackschnitzelherstellung und die damit einhergehende Feinstaubbelastung zur Umweltbelastung bei. Ist die Aufbereitung und die Herstellung der Substratkomponenten mit einem Energieaufwand verbunden, wie das bei der Herstellung von Pflanzkohle durch fossiles Propan und Strom zur Initiierung der Pyrolyse der Fall ist, steigt der kumulative nicht-erneuerbare Energieaufwand an. Wenn Pflanzkohle in den Boden eingetragen wird, besteht ein Potential einer langfristigen Kohlenstoff-Sequestrierung (Lehmann et al., 2006). Eine solche potentielle Kohlenstoff-Speicherung ist mit Unsicherheiten behaftet und situationsabhängig.

Sowohl aus ökologischer wie auch aus sozialer Sicht schneiden Chinaschilf, Flachsschäben und Schilf positiv ab. Diese Produkte vereinen geringe Pestizid- und Düngerbelastungen während des Anbaus und konkurrenzlose Verfügbarkeit zur Aufbereitung zu Torfersatzsubstraten.

8.1 UNSICHERHEITEN

Die Ergebnisse dieser Studie sind mit Unsicherheiten verbunden. Bei der Ökobilanzierung der Substratkomponenten sind in diesem Zusammenhang insbesondere zwei Aspekte von Bedeutung: Einerseits lassen sich

die Anbaumethoden und die Wahl der Substratkomponenten bei Prozessen mit mehreren Abfall- oder Nebenprodukten diskutieren (Abschnitt 8.1.1), andererseits können die Schwermetallemissionen aus der Nutzungsphase insbesondere bei Kompost debattiert werden (vgl. Eymann et al. (2015)). Unsicherheiten zur Beurteilung der pflanzenbaulichen Eigenschaften werden in Abschnitt 8.1.2 aufgeführt und Unsicherheiten im Zusammenhang mit den sozialen Risiken werden in Abschnitt 8.1.3 diskutiert.

8.1.1 WAHL DER SUBSTRATKOMPONENTEN

In der Verarbeitung der Hanfstängel zu Textilfasern fallen die in der vorliegenden Studie verwendeten kurzen, ausgekämmten Fasern sowie Hanfschäben an. Analog zu den Flachsschäben wäre es denkbar, auch die Hanfschäben als Substratkomponenten zu nutzen. Aufgrund des tieferen ökonomischen Wertes hätten Hanfschäben ein um 73% tieferes Treibhauspotenzial und eine um 73% tiefere Gesamtumweltbelastung als die kurzen Hanffasern. Aus gartenbaulicher Sicht eignen sich Hanfschäben jedoch weniger als Torfersatzsubstrat im Vergleich zu Hanffasern oder Flachsschäben.

Analog zur Diskussion der Substratwahl bei Hanf stellt sich die Frage, ob nicht auch die ausgekämmten, kurzen Fasern der Verarbeitung von Textilflachs als Substratkomponente genutzt werden könnten. Da das Treibhauspotenzial und die Gesamtumweltbelastung von kurzen Flachsfasern aber um Faktor 17 höher ist als von Flachsschäben, sind bei genügender Verfügbarkeit von Flachsschäben die kurzen Flachsschäben nicht konkurrenzfähig.

Der Vergleich der Umweltbelastung von Pflanzenkohle aus Holz mit ökonomischem Wert oder aus Abfallholz zeigt das ökologische Potenzial von der Nutzung von Abfallprodukten.

8.1.2 BEURTEILUNG DER PFLANZENBAULICHEN EIGENSCHAFTEN

Alle in dieser Studie geprüften Torfersatzkomponenten haben in pflanzenbaulicher Hinsicht im Moment nicht die Qualität, Torf als Einzelkomponente vollständig in der gärtnerischen Produktion ersetzen zu können. Trotzdem besitzen sie das Potential, als Mischung in geeigneter Zusammensetzung die pflanzenbaulichen Bedürfnisse zu befriedigen, wie dies bspw. eine Untersuchung von (Ançay, 2017) mit Erdbeeren in verschiedenen torffreien Substratmischungen zeigt. Im Vergleich mit den torfhaltigen Mischungen erreichten in dieser Studie die torffreien Varianten Erträge ohne signifikanten Unterschiede. Um Mischungen für alle Verwendungszwecke im Gartenbau und der speziellen Landwirtschaft erfolgreich einsetzen zu können, ist noch weitere Forschungsarbeit notwendig. Von den Einzelkomponenten besitzt gemäss der vorliegenden Dokumentation Torfmoos das grösste Potential, durch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten die pflanzenbaulichen Eigenschaften zu verbessern und sich der Qualität von Torf anzunähern. Die übrigen Stoffe sind zwar interessante Komponenten für Erds substratmischungen, es ist jedoch kaum zu erwarten, dass in näherer

Zukunft Produkte wie Schilf oder Schäben primär aus wirtschaftlichen Gründen zu einem vollwertigen Torfersatzstoff weiterentwickelt werden.

8.1.3 BEURTEILUNG DER SOZIALEN RISIKEN

Bezugnehmend auf die Studie von Eymann et al. (2015) ist das soziale Risiko, welches mit dem Anbau und der Verarbeitung von Torfersatzprodukten verbunden ist, ähnlich einzuschätzen. Bei einem Anbau und einer Verarbeitung in der Schweiz sind die sozialen Risiken gering. Wie bei anderen landwirtschaftlichen Rohstoffen, die exportiert werden, können beim Anbau im Ausland sowohl gesundheitliche Risiken entstehen, wie im Fall der Herstellung von Pflanzenkohle, oder es entsteht ein Wettbewerb um die Nutzung ökologischer Ressourcen. Es wäre wünschenswert, wenn bei einer künftigen Nutzung der erwähnten Torfersatzprodukte nicht nur auf umweltgerechte Produktionsbedingungen geachtet wird, sondern auch eine sozialverträgliche Anbau- und Verarbeitungspraxis gewährleistet werden kann.

8.2 EMPFEHLUNGEN UND FAZIT

Aus den Resultaten dieser Studie lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Nachwachsende Komponenten in gärtnerischen Substraten sind in bestem Fall sekundäre Reststoffe, die sich mit wenig Aufwand als Substratkomponenten in Mischungen verwenden lassen. Insbesondere Schilfrohr aus Naturschutzgebieten ist ein Sekundärprodukt, welches nicht durch andere Nutzungen konkurriert wird.
- Von den untersuchten Torfersatzprodukten hat einzig Torfmoos das pflanzenbauliche Potential, Torf vollumfänglich zu ersetzen. Bei allen anderen Substratkomponenten sind aufwändige und teils energieintensive Aufbereitungsverfahren notwendig.
- Aus Sicht des Klimaschutzes bieten sämtliche untersuchten lokalen Substratkomponenten im Vergleich zu Torf ein grosses Reduktionspotential von Treibhausgasemissionen. Bei der Nutzung dieser Produkte als Torfersatz können zwischen 62% und 97% der klimarelevanten Treibhausgasemissionen eingespart werden.
- Auch bei einer umfassenden Beurteilung mit der Methode der ökologischen Knappheit verursachen insbesondere angebautes Torfmoos, Schilf, Flachsschäben, Chinaschilf, Hanffasern, und Pflanzenkohle aus Abfallholz eine deutlich geringere Gesamtumweltbelastung als Torf.
- Für sämtliche in der Schweiz produzierten einheimischen Substratkomponenten bestehen keine wesentlichen sozialen Risiken aufgrund der rechtlichen und agrarpolitischen Rahmenbedingungen im Inland. Bei Importen aus dem Ausland können beschränkte soziale Risiken bestehen, weshalb sich eine spezifische Überprüfung der sozialen Nachhaltigkeit von Fall zu Fall empfiehlt.

Diskussion

- Für die meisten Substratkomponenten gibt es zurzeit noch keine Verfügbarkeit aus Schweizer Produktion. Jedoch wird die mittelfristige Verfügbarkeit in Europa positiv beurteilt. Einzig der Anbau von Torfmoos ist, insbesondere in der Schweiz, noch weit von einer wirtschaftlichen Anwendung entfernt.
- Getreidespelzen können als Tierfutter oder Kissenfüllstoff genutzt oder zu Spelzenmehl für die menschliche Ernährung verarbeitet werden, weshalb sie ein wertvolles Nebenprodukt mit höheren Umweltauswirkungen darstellen.
- Bei der Verwendung von Pflanzenkohle-Kompost, ist je nach Zusammensetzung des Komposts und dem Herstellungsverfahren der Pflanzenkohle mit einer erhöhten Belastung durch bestimmte unerwünschte Inhaltsstoffe zu rechnen, wie Schwermetalle oder polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe. Derartige Produkte müssen zwingend aus zertifizierten und Qualitätskriterien berücksichtigenden Herstellungsverfahren stammen. Für die Herstellung von Pflanzenkohle-Kompost ist ein gelenkter aerober Rotteprozess mit Qualitätssicherung zur Erreichung des Qualitätsnorm „gedeckter Anbau“ gemäss Qualitätsrichtlinie der Kompostier- und Vergärbranche empfohlen.
- Die untersuchten Substratkomponenten aus einheimischen Materialien stellen in geeigneten Mischungen eine sinnvolle, klimafreundliche und sozial verträgliche Alternative zu Torf dar.

9 LITERATUR

- Abächerli, F. (2010). *Chemische und physikalische Eigenschaften von Kompost* (Prüfbericht). Edlibach. Agroscope. (1996). *Schweizerischen Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope Band 1 Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngeberatung*.
- Altland, J. E. (2010). Use of Processed Biofuel Crops for Nursery Substrates. *Journal of Environmental Horticulture*, 28, 129–134.
- Álvarez, J. M., Pasian, C., Lal, R., López, R., Díaz, M. J., & Fernández, M. (2018). Morpho-physiological plant quality when biochar and vermicompost are used as growing media replacement in urban horticulture. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 175–180.
- Álvarez, M. L., Gascó, G., Plaza, C., Paz-Ferreiro, J., & Méndez, A. (2017). Hydrochars from biosolids and urban wastes as substitute materials for peat. *Land degradation & development*, 28(7), 2268–2276.
- Ançay, A. (2017). *Erdbeerversuche in Conthey* (Vortrag). Conthey: Agroscope.
- Aubé, M., Quenum, M., & Ranasinghe, L. L. (2015). Characteristics of Eastern Canadian cultivated Sphagnum and potential use as a substitute for perlite and vermiculite in peat-based horticultural substrates. *Mires and Peat*, 16, 1–18.
- Bargmann, I., Rillig, M. C., Buss, W., Kruse, A., & Kuecke, M. (2013). Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley. *Journal of agronomy and crop science*, 199(5), 360–373.
- Bergman, R. D., Gu, H., Page-Dumroese, D. S., & Anderson, N. M. (2017). Life Cycle Analysis of Biochar. In *Biochar: A regional supply chain approach in view of climate change mitigation* (Bd. Chapter 3, S. 46–69). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- biofarm. (o. J.). *Die Herausforderungen mit dem blauen Wunder* (Online Meldung).

- Blengini, G. A., Brizio, E., Cibrario, M., & Genon, G. (2011). LCA of Bioenergy Chains in Piedmont (Italy): A Case Study to Support Public Decision Makers towards Sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 36–47.
- Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M. L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizábal, T., Sigua, G., Spokas, K., Ippolito, J. A., & Novak, J. (2019). Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 651, 2354–2364.
- Bosco, S., Nasso, N., Roncucci, N., Mazzoncini, M., & Bonari, E. (2016). Environmental Performances of Giant Reed (*Arundo Donax* L.) Cultivated in Fertile and Marginal Lands: A Case Study in the Mediterranean. *European Journal of Agronomy*, 78, 20–31.
- Briones, A. (2012). The secrets of El Dorado viewed through a microbial perspective. *Frontiers in microbiology*, 3, 239.
- Bruckman, V. J. (Hrsg.). (2016). *Biochar: a regional supply chain approach in view of climate change mitigation*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Buxton, R. P., Johnson, P. N., & Espie, P. R. (1996). *Sphagnum research programme: the ecological effects of commercial harvesting*. Department of Conservation Wellington.
- Carus, M., & Sarmiento, L. (2016). *The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs, seeds and flowers*.
- Cheng, C.-H., Lehmann, J., Thies, J. E., Burton, S. D., & Engelhard, M. H. (2006). Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic geochemistry*, 37(11), 1477–1488.
- Dannehl, D., Suhl, J., Ulrichs, C., & Schmidt, U. (2015). Evaluation of substitutes for rock wool as growing substrate for hydroponic tomato production. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 88(1).

- Dispenza, V., De Pasquale, C., Fascella, G., Mammano, M. M., & Alonzo, G. (2017). Use of biochar as peat substitute for growing substrates of *Euphorbia* \times *lomi* potted plants. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *14*(4), 0908.
- Dragoni, F., Giannini, V., Ragolini, G., Bonari, E., & Silvestri, N. (2017). Effect of harvest time and frequency on biomass quality and biomethane potential of common reed (*Phragmites australis*) under paludiculture conditions. *Bioenergy Research*, *10*(4), 1066–1078.
- Dresbøll, D. B., & Magid, J. (2006). Structural changes of plant residues during decomposition in a compost environment. *Bioresource Technology*, *97*(8), 973–981.
- Dresbøll, D. B., & Thorup-Kristensen, K. (2005). Structural Differences in Wheat (*Triticum Aestivum*), Hemp (*Cannabis Sativa*) and Miscanthus (*Miscanthus Ogiformis*) Affect the Quality and Stability of Plant Based Compost. *Scientia Horticulturae*, *107*(1), 81–89.
- Dumroese, R. K., Heiskanen, J., Englund, K., & Tervahauta, A. (2011). Pelleted biochar: Chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *Biomass and Bioenergy*, *35*(5), 2018–2027.
- ecoinvent Centre. (2018). *ecoinvent data v3.5*. Zürich: ecoinvent Centre, the Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Elad, Y., David, D. R., Harel, Y. M., Borenshtein, M., Kalifa, H. B., Silber, A., & Graber, E. R. (2010). Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. *Phytopathology*, *100*(9), 913–921.
- Emmel, M. (2013). The influence of the processing stage on the suitable amount of coir dust in growing media. In *International Symposium on Growing Media and Soilless Cultivation 1034* (S. 335–339).
- EN 12580: Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate - Bestimmung der Menge. (2014).
- Eggist, A. (2016). *Steckbrief Hanf* (Online-Dokument). Gränichen: Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg.

- Escutia-Lara, Y., Lara-Cabrera, S., Gomez-Romero, M., & Lindig-Cisneros, R. (2012). Common reed (*Phragmites australis*) harvest as a control method in a Neotropical wetland in Western Mexico. *Hidrobiologica*, 22(2), 125–131.
- Eymann, L., Mathis, A., Stucki, M., & Amrein, S. (2015). *Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich: Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen*. Wädenswil: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen.
- FAO. (2017). *Jute, kenaf, sisal, abaca, coir and allied fibres* (Statistical Bulletin). Rom.
- FAO. (2018). *Food and agriculture data* (FAOSTAT). FAO.
- FAO. (2019). FAOSTAT - Crop Production Data.
- Fischer-Klüver, G. (2018). Über Torf und mögliche Ersatzstoffe. *Gramoflor*, (10, Oktober), 26.
- Fornes, F., Belda, R. M., & Lidón, A. (2015). Analysis of two biochars and one hydrochar from different feedstock: focus set on environmental, nutritional and horticultural considerations. *Journal of Cleaner Production*, 86, 40–48.
- Frangi, P., Amoroso, G., & Piatti, R. (2012). Alternative growing media to peat obtained from two fast growing species of Poaceae. *Acta horticultrae*.
- Fryda, L., & Visser, R. (2015). Biochar for soil improvement: Evaluation of biochar from gasification and slow pyrolysis. *Agriculture*, 5(4), 1076–1115.
- Fuchs, J. (2001). *Kompost im Zierpflanzenbau*. Mellikon: biophyt ag.
- GABOT. (2018). *Nachwachsende Rohstoffe als Torfersatz: Warten auf den Durchbruch* (Online Meldung). Gabot.de.
- Gale, N. V., & Thomas, S. C. (2019). Dose-dependence of growth and ecophysiological responses of plants to biochar. *Science of The Total Environment*, 658, 1344–1354.
- Gaudig, G., Fengler, F., Krebs, M., Prager, A., Schulz, J., Wichmann, S., & Joosten, H. (2014). Sphagnum farming in Germany-a review of progress. *Mires and peat*, 13(08), 1–11.

Literatur

- Gaudig, G., Krebs, M., Prager, A., Wichmann, S., Barney, M., Caporn, S. J. M., Emmel, M., Fritz, C., Graf, M., & Grobe, A. (2018). Sphagnum farming from species selection to the production of growing media: a review.
- Gaudig, G., Krebs, M., & Wichmann, S. (2016). *Paludikultur auf Hochmooren: Torfmooskultivierung - Erfahrungen und Ausblick* - Gehalten auf der Torfersatzforum, AK Substrate.
- Godlewska, P., Schmidt, H. P., Ok, Y. S., & Oleszczuk, P. (2017). Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review. *Bioresource technology*.
- Graber, E. R., Harel, Y. M., Kolton, M., Cytryn, E., Silber, A., David, D. R., Tsechansky, L., Borenshtein, M., & Elad, Y. (2010). Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and soil*, 337(1-2), 481-496.
- Grantzau, & Ter Hell. (1993). Impatiens: Substrate und Zuschlagstoffe im Vergleich. *Gärtnerbörse und Gartenwelt*, 11.
- Griesser, S. (2016). *Torfersatzsubstrate für den Erwerbsgartenbau-Ein Beitrag für nachhaltige Landnutzung in Niedersachsen* (PhD Thesis). Universität Vechta.
- Günther, A., Jurasinski, G., Albrecht, K., Gaudig, G., Krebs, M., & Glatzel, S. (2017). Greenhouse Gas Balance of an Establishing Sphagnum Culture on a Former Bog Grassland in Germany. *Mires and Peat*, 20(02), 1-16.
- Gysi, C., von Allmen, F., Heller, W., Poffet, J., & Wegmüller, H. P. (1995). *Substratuntersuchung für den Zierpflanzenbau. Flugschrift 113*, , (No. Flugschrift 113) (S. 11). Eidgenössische Forschungsanstalt für Obst-, Wein-, und Gartenbau, Wädenswil.
- Hagemann, N., Subdiaga, E., Orsetti, S., De la Rosa, J., Knicker, H., Schmidt, H.-P., Kappler, A., & Behrens, S. (2018). Effect of biochar amendment on compost organic matter composition following aerobic composting of manure. *Science of The Total Environment*, 613-614, 20-29.

Literatur

- Haubold-Rosar, M., Heinkele, T., & Rademacher, A. (2016). *Chancen und Risiken des Einsatzes von Bio- kohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden* (Texte 04). Dessau-Rosslau: Umwelt Bundesamt.
- Informationsdienst Weihenstephan. (2010). *Serie Substratkomponenten*. Weihenstephan-Triesdorf, Deutschland: Staatliche Forschungsanstalt für Gartenbau.
- Jauch, M. (2009). *Flachsschäben - Ein Nebenprodukt der Flachsfasergewinnung* (Informationsdienst). Weihenstephan - Freising: Fachhochschule Weihenstephan.
- Jorio, L., & Unterfinger, E. (o. J.). Überproduktion von legalem Cannabis lässt Hanf-Exporte anschwellen [SWI swissinfo].
- Kämäräinen, A., Simojoki, A., Lindén, L., Jokinen, K., & Silvan, N. (2018). Physical growing media characteristics of Sphagnum biomass dominated by Sphagnum fuscum (Schimp.) Klinggr. *Mires and Peat*.
- Kammann, C., Glaser, B., & Schmidt, H.-P. (2016). Combining biochar and organic amendments. In *Bio- char in European Soils and Agriculture* (S. 158–186). Routledge.
- Kammann, C. I., Schmidt, H.-P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., Koyro, H.-W., Conte, P., & Joseph, S. (2015). Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-com- posted biochar. *Scientific reports*, 5, 11080.
- Kaudal, B. B., Chen, D., Madhavan, D. B., Downie, A., & Weatherley, A. (2015). Pyrolysis of urban waste streams: Their potential use as horticultural media. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112, 105–112.
- Kern, J., Tammeorg, P., Shanskiy, M., Sakrabani, R., Knicker, H., Kammann, C., Tuhkanen, E.-M., Smidt, G., Prasad, M., & Tiilikkala, K. (2017). Synergistic use of peat and charred material in growing me- dia—an option to reduce the pressure on peatlands? *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(2), 160–174.

- Khakshour, A., Ajilian Abbasi, M., Sayedi, S. J., Saeidi, M., & Khodaei, G. H. (2015). Child labor facts in the worldwide: A review article. *International Journal of Pediatrics*, 3(1.2), 467–473.
- Klaiss, M., & Hirschi, C. (2018). *Hanf - Anbau und Verwendungsmöglichkeiten* (Online Bericht). Frick: FiBL.
- Klawitter, K. (2015). Die Landwirte mit ins Boot helfen. *TASPO*, (29), 14.
- Kraska, T., Kleinschmidt, B., Weinand, J., & Pude, R. (2018). Cascading Use of Miscanthus as Growing Substrate in Soilless Cultivation of Vegetables (Tomatoes, Cucumbers) and Subsequent Direct Combustion. *Scientia Horticulturae*, 235, 205–213.
- Kumar, S. (2017). Sphagnum moss as a growing media constituent: some effects of harvesting, processing and storage. *Mires and Peat*, 20(7), 1–11.
- Kupper, T., & Fuchs, J. (2007). Kompost und Gärgut in der Schweiz. *Umwelt Wissen*, (43), 126.
- Kymalainen, H. (2004). Technologically Indicative Properties of Straw Fractions of Flax, Linseed (*Linum Usitatissimum* L.) and Fibre Hemp (*Cannabis Sativa* L.). *Bioresource Technology*, 94(1), 57–63.
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 11(2), 403–427.
- Lohr, D., Richter, D., & Meinken, E. (2014). *Siebrückstände aus der Faserhanfaufbereitung als Torfersatzstoff*. Weihenstephan - Freising: Forschungsanstalt Weihenstephan, Institut für Gartenbau.
- Luginbühl, C., Herzog, C., Stettler, P., & Hiltbrunner, J. (2015). Ansätze zur Optimierung des Ölleinbaus in der Schweiz. *Agrar Forschung Schweiz*, (Heft 7-8), 304–310.
- Maendy, F., & Formowitz, B. (2009). *Miscanthus als nachwachsender Rohstoff* (Bericht aus dem TFZ No. 18). Straubing: Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau.
- Margenot, A. J., Griffin, D. E., Alves, B. S., Rippner, D. A., Li, C., & Parikh, S. J. (2018). Substitution of peat moss with softwood biochar for soil-free marigold growth. *Industrial Crops and Products*, 112, 160–169.

- McBeath, A. V., Smernik, R. J., Krull, E. S., & Lehmann, J. (2014). The influence of feedstock and production temperature on biochar carbon chemistry: a solid-state ^{13}C NMR study. *Biomass and Bioenergy*, *60*, 121–129.
- Meister, E., Mediavilla, V., Vetter, R., & Konermann, M. (1999). *Prüfung des Anbaus und der Möglichkeiten einer Markteinführung von neuen Faserpflanzen (Hanf, Kenaf, Miscanthus)* (Abschlussbericht) (S. 1–91). Colmar: Grenzüberschreitenden Instituts zur rentablen umweltgerechten Landbewirtschaftung ITADA, 2 Allée de Herrlisheim, F-68000 Colmar.
- Méndez, A., Cárdenas-Aguilar, E., Paz-Ferreiro, J., Plaza, C., & Gascó, G. (2017). The effect of sewage sludge biochar on peat-based growing media. *Biological Agriculture & Horticulture*, *33*(1), 40–51.
- Méndez, A., Paz-Ferreiro, J., Gil, E., & Gascó, G. (2015). The effect of paper sludge and biochar addition on brown peat and coir based growing media properties. *Scientia Horticulturae*, *193*, 225–230.
- Michaelis, D. (2012). Die Sphagnum-Arten der Welt. *TAXON*, *61*(81), 265–266.
- Mukome, F. N., Zhang, X., Silva, L. C., Six, J., & Parikh, S. J. (2013). Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks. *Journal of agricultural and food chemistry*, *61*(9), 2196–2204.
- Nemecek, T., & Schnetzer, J. (2011). *Methods of Assessment of Direct Field Emissions for LCIs of Agricultural Production Systems*. Reckenholz-Tänikon: Agroscope.
- Nieto, A., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., Fernández, J. M., Plaza, C., & Méndez, A. (2016a). The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties. *Scientia horticulturae*, *199*, 142–148.
- Nieto, A., Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., Fernández, J. M., Plaza, C., & Méndez, A. (2016b). The effect of pruning waste and biochar addition on brown peat based growing media properties. *Scientia horticulturae*, *199*, 142–148.

- Parajuli, R., Sperling, K., & Dalgaard, T. (2015). Environmental Performance of Miscanthus as a Fuel Alternative for District Heat Production. *Biomass and Bioenergy*, *72*, 104–116.
- Pouliot, R., Hugron, S., & Rochefort, L. (2015). Sphagnum farming: A long-term study on producing peat moss biomass sustainably. *Ecological Engineering*, *74*, 135–147.
- Pressmann, T. (2017). *Den Bauern ist die Lust am Chinaschilf vergangen* (srf-news regional).
- Prost, K., Borchard, N., Siemens, J., Kautz, T., Séquaris, J.-M., Möller, A., & Amelung, W. (2013). Biochar affected by composting with farmyard manure. *Journal of environmental quality*, *42*(1), 164–172.
- Rehnert, A., Heinzemann, J., Beplate-Haarstrich, L., & Lücke, W. (2007). Dinkelspelzen als Regelbrennstoff. *LANDTECHNIK–Agricultural Engineering*, *62*(2), 92–93.
- Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010a). Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential. *Environ. Sci. Technol.*, *44*, 827–833.
- Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010b). Supporting Information for: Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic and Climate Change Potential. *Environ. Sci. Technol.*, *44*, 1–32.
- Saake, B. (2011). Züchterische Veränderung der Spelzen von Sommerhafer (*Avena sativa*) sowie deren stoffliche Verwertung als nachwachsender Rohstoff: Teilvorhaben 3: Analyse der Gerüstsubstanzen und deren Extraktion.
- Schmidt, H.-P., Kammann, C., Niggli, C., Evangelou, M. W., Mackie, K. A., & Abiven, S. (2014). Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *191*, 117–123.
- Schmilewski, G. (2015). Kultursubstrate auf Torfbasis: Notwendige Produktionsmittel für die nachhaltige Entwicklung des Gartenbaus. *Telma Beiheft*, *5*, 71–92.

- Schmilewski, G. K. (2018). *Kultursubstrate und Blumenerden – Eigenschaften, Ausgangsstoffe, Verwendung*. Düsseldorf: Industrieverband Garten e.V.
- Schmitz, N. (2006). Marktanalyse. *Nachwachsende Rohstoffe*. BMELF (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten), FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe eV), Gülzow.
- Stalheim, T., Ballance, S., Christensen, B. E., & Granum, P. E. (2009). Sphagnum-a pectin-like polymer isolated from Sphagnum moss can inhibit the growth of some typical food spoilage and food poisoning bacteria by lowering the pH. *Journal of applied microbiology*, 106(3), 967–976.
- Steiner, C., & Harttung, T. (2014). Biochar as a growing media additive and peat substitute. *Solid Earth*, 5(2), 995–999.
- Tahvonen, R., Näkkilä, J., Silvan, N., & Reinikainen, O. (2015). Production and use of sphagnum biomass as a plant substrate in greenhouse.
- Tian, Y., Zhang, X., Liu, J., & Gao, L. (2011). Effects of Summer Cover Crop and Residue Management on Cucumber Growth in Intensive Chinese Production Systems: Soil Nutrients, Microbial Properties and Nematodes. *Plant and Soil*, 339(1–2), 299–315.
- Tolksdorf-Lienemann, E., & Rebling, T. (2009). Bodenkundliche Untersuchungen zu torfartigen Produkten der Hydrothermalen Carbonisierung (HTC). *Berichte der DBG*.
- Turunen, L., & Van der Werf, H. (2006). *Life Cycle Analysis of Hemp Textile Yarn: Comparison of Three Hemp Fibre Processing Scenarios and a Flax Scenario* (S. 1–81). Rennes Cedex, France: INRA - French National Institute for Agronomy Research.
- Uellendahl, H., Wang, G., Møller, H. B., Jørgensen, U., Skiadas, I. V., Gavala, H. N., & Ahring, B. K. (2008). Energy balance and cost-benefit analysis of biogas production from perennial energy crops pretreated by wet oxidation. *Water Science and Technology*, 58(9), 1841–1847.
- Vandecasteele, B., Debode, J., Muylle, H., De Windt, I., Van Acker, J., Jacquet, N., Richel, A., Ameloot, N., & Moreaux, K. (2017). Plant fibers for renewable growing media: acidification or inoculation with biocontrol fungi to reduce the N drawdown in extruded Miscanthus straw.

Literatur

- Vaughn, S. F., Kenar, J. A., Thompson, A. R., & Peterson, S. C. (2013). Comparison of biochars derived from wood pellets and pelletized wheat straw as replacements for peat in potting substrates. *Industrial crops and products*, 51, 437–443.
- Weber, U. (2013). *16 Jahre Mähversuche gegen die Verschilfung im Naturschutzgebiet Spitzmäder, Oberriet* (Bericht über die Versuchsjahre 1997-2012). Ökobüro hugentobler im Auftrag der Gemeinde Oberriet.
- Wichmann, S., Prager, A., & Gaudig, G. (2017). Establishing Sphagnum cultures on bog grassland, cut-over bogs, and floating mats: procedures, costs and area potential in Germany. *Mires & Peat*, 20.
- Zhang, A., Liu, Y., Pan, G., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J., & Zhang, X. (2012). Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. *Plant and soil*, 351(1-2), 263–275.
- Zwart, D. C., & Kim, S.-H. (2012). Biochar amendment increases resistance to stem lesions caused by *Phytophthora* spp. in tree seedlings. *HortScience*, 47(12), 1736–1740.

ANHANG A

A1.1 ANALYSERESULTATE FÜR CHINASCHILF, SCHILFROHR UND HTC-KOHLE

Tabelle A - 1: Chemische und physikalische Substrateigenschaften von Chinaschilf, Schilfrohr und HTC-Kohle nach Gysi et al. (1995) und Schweizerischen Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope (1996) gemessen von JardinSuisse

	Chinaschilf (Miscanthus sinensis)	HTC-Kohle aus Pferdemit	Schilfrohr (Phragmites australis)
pH-Wert	7.1	6.2	6.4
Leitfähigkeit (mS)	0.3	3.2	0.5
org. Kohlenstoff (Mass-%)	48.5 ±1.5	17.5 ±0.5	43.3 ±1.3
Gesamtstickstoff (Mass-%)	0.32 ±0.05	0.45 ±0.05	0.95 ±0.08
C/N-Verhältnis	152	39	46
Nitratstickstoff (mg/L)	<0.1	0.4	<0.1
P2O5 (mg/L)	32	301	9
K2O (mg/L)	308	1286	163
Volumengewicht (g/L)	64.6	334.7	69.6
Spezifische Dichte (g/cm ³)	1.5	1.8	1.5
Wasserrückhaltekapazität (Vol-%)	12.2	58.5	12.9
Luftkapazität (Vol-%)	83.5	23	82.5
Gesamtporenvolumen (Vol-%)	95.7	81.4	95.4

A1.2 BEWERTUNG DER UMWELTWIRKUNGEN DER SUBSTRATKOMPONENTEN

Für eine abschliessende Bewertung der Umweltwirkungen der Substratkomponenten werden die Ergebnisse der Ökobilanzen nach dem Schema aus Tabelle A 3 kategorisiert, wobei:

Min = geringstes Ergebnis für einen Umweltindikator (z.B. 5.0 kg CO₂-eq/m³ Landerde)

Max = höchstes Ergebnis für einen Umweltindikator (z.B. 254 kg CO₂-eq/m³ Torf)

Grenzwert 1 = Gr 1 = 5 · Min

Grenzwert 2 = Gr 2 = Gr 1 + 0.5 · (Gr 3 - Gr1)

Grenzwert 3 = Gr 3 = 0.5 · Max

Anhang A

Bei der Gesamtumweltbelastung nach der Methode der ökologischen Knappheit werden die Grenzwerte in Abhängigkeit davon festgelegt, ob die Schwermetall-Emissionen während der Nutzungsphase berücksichtigt werden.

Tabelle A - 2: Kriterien zur Bewertung der Umweltaspekte von Substratkomponenten. Die Grenzwerte für die Bewertung der Gesamtumweltbelastung hängen davon ab, ob die Schwermetall (SM)-Emissionen während der Nutzungsphase berücksichtigt werden.

Indikator / Bewertung der Umweltwirkung	tief	eher tief	eher hoch	hoch
Allgemein	< GR 1	> Gr 1 < Gr 2	> Gr 2 < Gr 3	> Gr 3
Treibhauspotenzial (kg CO ₂ -eq./m ³)	< 25	25-76	76-127	> 127
Gesamtumweltbelastung, inkl. SM (1000 UBP/m ³)	< 37	37-244	244-251	> 451
Gesamtumweltbelastung, exkl. SM (1000 UBP/m ³)	< 37	37-244	144-251	> 451
Kumulierter Energieaufwand (MJ/m ³)	< 295	295-1067	1067-1840	> 1840

Tabelle A - 3: Kriterien zur Bewertung der pflanzenbaulichen Eigenschaften von Substratkomponenten

Indikator	positiv	eher positiv	eher negativ	negativ
pH	5.5–7	7–7.5 & 4–5.5	>7.5 & 3–4	<3
mg /l NO ₃ -N, NH ₄ -N	>70	50–70	10–50	<10
mg /l P ₂ O ₅	>100	50–100	10–50	<10
mg /l K ₂ O	>250	150–250	50–150	<50
Salzgehalt (g/L)	<0.5	0.5–1.5	1.5–2.5	>2.5
Wasserkapazität (Vol.-%)	>60	40–60	20–40	<20
Luftkapazität (Vol.-%)	>60	40–60	20–40	<20

A1.3 SACHBILANZ-TABELLEN

Tabelle A - 4: Übersicht über die verwendeten Daten der Pyrolysestätte aus Roberts et al. (2010b)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Pyrolysis facility	1	p	Pyrolysis facility {CH} biochar production
Ressourcen/Material	Menge	Einheiten	ecoinvent
Occupation, construction site	84'000	m ² a	Occupation, construction site
Occupation, industrial area	2'725'000	m ² a	Occupation, industrial area
Transformation, from unknown	54'500	m ²	Transformation, from unknown
Transformation, to industrial area	54'500	m ²	Transformation, to industrial area
Concrete	1'759'482	kg	Concrete, normal {GLO} market for
Steel	558'540	kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for
Iron	7344	kg	Cast iron {GLO} market for
Aluminium	3672	kg	Aluminium, primary, ingot {CA-QC} production
Transport	232'904	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {GLO} market for

Anhang A

Entsorgung	Menge	Einheit	ecoinvent
Dismantling of pyrolysis facility	12'600'000	kg	Decommissioned chemical production facilities {GLO} market for

Tabelle A - 5: Übersicht über die verwendeten Daten zur Sachbilanzierung der Hanfproduktion nach Turunen und van der Werf (2006)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Hanfstängel	1	kg	Hemp stems {RER}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Landnutzung	1.25	m ² *Jahr	Occupation, annual crop, non-irrigated
Saatgut	0.007	kg	Wheat seed, for sowing {GLO} production
Ammoniumnitrat, als N	0.009	kg	Ammonium nitrate, as N {RER} ammonium nitrate production
Triple superphosphat, als P ₂ O ₅	0.004	kg	Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ {RER} triple superphosphate production
Kaliumchloride, als K ₂ O	0.014	kg	Potassium chloride, as K ₂ O {RER} potassium chloride production
Kalk	0.083	kg	Lime, packed {GLO} market for
Traktor	0.000	kg	Tractor, 4-wheel, agricultural {GLO} market for
Erntemaschine	0.001	kg	Harvester {GLO} market for
Landwirtschaftliche Maschinen	0.001	kg	Agricultural machinery, unspecified {GLO} market for
Diesel	0.309	MJ	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}
Transport	0.044	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}
Emissionen	Menge	Einheit	Eintrag
Ammoniak	0.00021	kg	Luft
Lachgas	0.0004	kg	Luft
Stickoxide	0.0001	kg	Luft
Nitrat	0.0222	kg	Grundwasser
Phosphat	2.68*10 ⁻⁵	kg	Grundwasser
Phosphat	7.21*10 ⁻⁵	kg	Oberflächengewässer
Cadmium	0.3330	mg	Boden
Chrom	2.4100	mg	Boden
Nickel	0.7100	mg	Boden
Blei	0.5460	mg	Boden

Tabelle A - 6: Übersicht über die verwendeten Daten zur Sachbilanzierung der Hanfverarbeitung durch Rottung nach Turunen und van der Werf (2006)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Hanf Fasern, lang, gerottet	1	kg	Hemp fibres, long, retted {RER}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Hanf Stängel	1.24	kg	Hemp stems {RER}
Traktor	0.000242	kg	Tractor, 4-wheel, agricultural {GLO} market for
Landwirtschaftliche Maschinen	0.000036	kg	Agricultural machinery, unspecified {GLO} market for
Transport, LKW	0.06	km	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}
Entsorgung	Menge	Einheit	ecoinvent
Abwasser	0.0163	m ³	Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 3/CH

Anhang A

Tabelle A - 7: Übersicht über die verwendeten Daten zur Sachbilanzierung der Hanfverarbeitung durch Quetschen nach Turunen und van der Werf (2006)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Hanf, lange Fasern, gequetscht	1.0	kg	Hemp long fibres, scutched {RER}
Hanf, kurze Fasern	2.56	kg	Hemp short fibres (scutching tow)
Hanf, Schäben	4.44	kg	Hemp shives
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Hanffasern, lang, gerottet	11.1	kg	Hemp fibres, long, retted {RER}
Maschine, Quetschwalze	0.0349	kg	Industrial machine, heavy, unspecified {RER} production
Transport	0.777	tkm	Transport, freight, lorry, unspecified {RER} market for
Strom	5.868	MJ	Electricity, low voltage {RER} market group for
Emissionen / Entsorgung	Menge	Einheit	ecoinvent
Staub	1.67	kg	Particulates, > 10 um
Grobe Pflanzenrückstände	1.44	kg	Biowaste {GLO} treatment of biowaste, municipal incineration

Tabelle A - 8: Übersicht über die verwendeten Daten zur Sachbilanzierung von Flachsstängel nach Turunen und van der Werf (2006)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Flachsstängel, grün	1	kg	Flax green stems {RER}
Leinsamen	0.1	kg	Linseed
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Ackerland	1.667	m ² *Jahr	Occupation, annual crop, non-irrigated
Saatgut	0.019	kg	Linseed seed, at farm {CH}
Ammoniumnitrat, als N	0.007	kg	Ammonium nitrate, as N {RER} ammonium nitrate production
Tripelsuperphosphat, als P ₂ O ₅	0.005	kg	Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ {RER} triple superphosphate production
Kaliumchlorid, als K ₂ O	0.010	kg	Potassium chloride, as K ₂ O {RER} potassium chloride production
Kalk	0.111	kg	Lime, packed {GLO} market for
Traktor	0.00111	kg	Tractor, 4-wheel, agricultural {GLO} market for
Landwirtschaftliche Maschinen	0.001475	kg	Agricultural machinery, unspecified {GLO} market for
Diesel	0.432	MJ	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}
Pestizide	0.00093	kg	Pesticide, unspecified {RER} production
Transport	0.05363	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}
Emissionen	Menge	Einheit	Eintrag
Ammoniak	0.000162	kg	Luft
Lachgas	0.0004	kg	Luft
Stickoxide	0.00008	kg	Luft
Nitrat	0.0295	kg	Grundwasser
Phosphat	3.58*10 ⁻⁵	kg	Grundwasser
Phosphat	9.61*10 ⁻⁵	kg	Oberflächengewässer
Cadmium	0.438	mg	Boden
Chrom	3.11	mg	Boden
Nickel	0.726	mg	Boden
Blei	0.619	mg	Boden

Anhang A

Emissionen	Menge	Einheit	Eintrag
Triallat	0.00023	kg	Boden
Linuron	0.00002	kg	Boden
Bentazon	0.00005	kg	Boden
Phosalon	0.00001	kg	Boden
Lambda-Cyhalothrin	0.00000	kg	Boden
Parathion	0.00001	kg	Boden
Prochloraz	0.00001	kg	Boden

Tabelle A - 9: Übersicht über die verwendeten Daten zur Sachbilanzierung der Tau-Rottung der Flachsstängel nach Turunen und van der Werf (2006)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Flachsstängel, gerottet	1	kg	Flax fibres, retted {RER}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Flachsstängel, grün	1.1	kg	Flax green stems {RER}
Traktor	2.42*10 ⁻⁴	kg	Tractor, 4-wheel, agricultural {GLO} market for
Landwirtschaftliche Maschinen	3.6*10 ⁻⁵	kg	Agricultural machinery, unspecified {GLO} market for
Transport	0.06	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RER}

Tabelle A - 10: Übersicht über die verwendeten Daten zur Sachbilanzierung der Flachsstängel durch Quetschen nach Turunen und van der Werf (2006)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Flachs, lange Fasern, gequetscht	1	kg	Flax long fibres, scutched {RER}
Flachs, kure Fasern	0.61	kg	Flax short fibres (scutching tow)
Flachsschäben	3.06	kg	Flax shives
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Flachsstängel, gerottet	5.56	kg	Flax stems, retted {RER}
Maschine, Quetschwalze	0.0349	kg	Industrial machine, heavy, unspecified {RER} production
Transport	0.389	tkm	Transport, freight, lorry, unspecified {RER} market for
Strom	5.868	MJ	Electricity, low voltage {RER} market group for
Emissionen / Entsorgung	Menge	Einheit	ecoinvent
Staub	0.477	kg	Particulates, > 10 um
Grobe Pflanzenrückstände	0.412	kg	Biowaste {GLO} treatment of biowaste, municipal incineration

Tabelle A - 11: Daten zur Sachbilanzierung von Schilfrhizomen zur Pflanzung nach Bosco et al. (2016)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Schilfrhizome, zur Pflanzung	160'000	p	Reed rhizomes, for planting, p {CH}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Landnutzung	2.0	ha a	Occupation, permanent crop
Glyphosat	4.0	kg	Glyphosate {RER} production
Ammoniumnitrat	160	kg	Ammonium nitrate, as N {RER} ammonium nitrate production
Phosphat	122	kg	Phosphate fertiliser, as P2O5 {RER} triple superphosphate production
Kaliumchlorid	122	kg	Potassium chloride, as K2O {RER} potassium chloride production
Transport	20.4	tkm	Transport, tractor and trailer, agricultural {CH} processing
Diesel	31'400	MJ	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}

Anhang A

Emissionen	Menge	Einheit	Eintrag
Lachgas	0.368	kg	Luft
Nitrat	95	kg	Grundwasser
Phosphat	0.215	kg	Grundwasser
Phosphat	0.7	kg	Oberflächengewässer
Glyphosat	4.0	kg	Boden

Tabelle A - 12: Daten zur initialen Instandstellung des Schilfanbaus nach Bosco et al. (2016)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Schilf, initiale Instandstellung	1	ha	Reed, establishment, ha {CH}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Landnutzung	1	ha a	Occupation, permanent crop
Schilfrhizome, zur Pflanzung	20'000	p	Reed rhizomes, for planting, p {CH}
Harnstoff	261	kg	Urea, as N {RER} production
Phosphat-Dünger	261	kg	Phosphate fertiliser, as P2O5 {RER} triple superphosphate production
Kaliumchlorid	240	kg	Potassium chloride, as K2O {RER} potassium chloride production
Transport	53.3	kg	Transport, tractor and trailer, agricultural {CH} processing
Diesel	4120	MJ	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}
Emissionen	Menge	Einheit	Eintrag
Lachgas	0.6	kg	Luft
Nitrat	155	kg	Grundwasser
Phosphat	0.215	kg	Grundwasser
Phosphate	0.887	kg	Oberflächengewässer

Tabelle A - 13: Jährliche Sachbilanzdaten der Schilfkultivierung nach Bosco et al. (2016)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Schilf, gehäckselt, Kultivierung	1	ha	Reed, chopped, cultivation, ha {CH}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Landnutzung	1	ha	Occupation, permanent crop
Harnstoff	261	kg	Urea, as N {RER} production
Phosphat-Dünger	261	kg	Phosphate fertiliser, as P2O5 {RER} triple superphosphate production
Kaliumchlorid	240	kg	Potassium chloride, as K2O {RER} potassium chloride production
Transport, Dünger	53.3	tkm	Transport, tractor and trailer, agricultural {CH} processing
Häckseln, Schilf	1.0	ha	Chopping, reed
Transport, zu Verarbeitungsanlage	1270	tkm	Transport, freight, lorry, unspecified {RER} market for
Diesel	159	MJ	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}
Emissionen	Menge	Einheit	Eintrag
Lachgas	0.6	kg	Luft
Nitrat	155	kg	Grundwasser
Phosphat	0.215	kg	Grundwasser
Phosphat	0.887	kg	Oberflächengewässer

Anhang A

Tabelle A - 14: Sachbilanzdaten des Umbruchs des Schilfanbaus nach 12 Standjahren, nach Bosco et al. (2016)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Schilf, Umbruch	1	ha	Reed, destruction, ha {CH}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Glyphosat	15	kg	Glyphosate {RER} production Cut-off, U
Transport	1.05	tkm	Transport, tractor and trailer, agricultural {CH} processing
Diesel	1080	MJ	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}
Emissionen	Menge	Einheit	Eintrag
Glyphosat	15	kg	Boden

Tabelle A - 15: Zusammenzug aller Produktionsschritte zur Schilfkultivierung, nach Bosco et al. (2016)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Schilf, gehäckselt, alle Produktionsschritte	1	kg	Reed, chopped, all production steps {CH}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Schilf, initiale Instandstellung	0.0046	ha	Reed, establishment, ha {CH}
Schilf, gehäckselt, Kultivierung	0.0549	ha	Reed, chopped, cultivation, ha {CH}
Schilf, Umbruch	0.0046	ha	Reed, destruction, ha {CH}

Tabelle A - 16: Übersicht über die verwendeten Daten zur Sachbilanzierung von Schilfrohr aus Naturschutzgebieten

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Schilf, gehäckselt, aus Naturschutzgebiet	1	kg	Reed, chopped, from nature reserve {CH}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Schilf häckseln	0.0549	ha	Chopping, reed
Transport	0.07	tkm	Transport, freight, lorry, unspecified {RER} market for

Tabelle A - 17: Sachbilanzdaten der Torfmoos-Kultivierung, nach Wichmann et al. (2017)

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Torfmoos-Anbau	1	ha	Sphagnum cultivation, ha {CH}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Landnutzung	1	ha	Occupation, permanent crop, fruit, extensive
Wasserstand	14.1	m ³	Water, well, in ground, CH
Wasser zur Bewässerung	3200	m ³	Water, well, in ground, CH
Aushub	214	m ³	Excavation, hydraulic digger {RER} processing
Stroh	150	kg	Straw, organic {CH} wheat production, organic
Stroh ausbringen	150	kg	Solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader {CH} processing
Transport Bagger und Stroh	3.22	tkm	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {RER}
Ernte	1	ha	Combine harvesting {CH} processing
Transport	227.5	tkm	Transport, freight, lorry, unspecified {RER} market for transport, freight, lorry, unspecified
Emissionen	Menge	Einheit	Eintrag
Methan, biogen	20.3	kg	Luft
Lachgas	0.25	kg	Luft

Anhang A

Tabelle A - 18: Sachbilanzdaten zur Trocknung und Herstellung von 1 kg Torfmoos

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Torfmoos-Anbau	1	kg	Sphagnum cultivation, kg {CH}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Torfmoos-Anbau	3.08*10 ⁻⁴	ha	Sphagnum cultivation, ha {CH}
Trocknung	2.76	l	Drying of grass {CH} processing Cut-off, U

Tabelle A - 19: Sachbilanzdaten zur Kompostierung von Pflanzenkohle zusammen mit Kompostiergut

Output	Menge	Einheit	ecoinvent
Pflanzenkohle-Kompost	1	t	Biochar-compost, at plant {CH}
Ressourcen/Material	Menge	Einheit	ecoinvent
Pflanzenkohle	0.1295	t	Biochar, production by pyrolysis, from wood chips
Kompostierungsanlage	7.41*10 ⁻⁶	p	Composting facility, open {CH} construction
Maschineneinsatz	0.352	h	Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor {GLO} market for
Transport	9.1	tkm	Transport, freight, lorry, unspecified {RER} market for
Strom	11.8	kWh	Electricity, low voltage {CH} market for
Emissionen	Menge	Einheit	Eintrag
Methan, biogen	0.866	kg	Luft
Kohlendioxid, biogen	190	kg	Luft
Ammoniak	0.606	kg	Luft
Lachgas, fossil	0.0216	g	Luft
Hydrogensulfid	0.455	kg	Luft
Wasser	0.108	kg	Luft