

> Kompost und Gärgut in der Schweiz

*Studie 1: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut
Studie 2: Auswirkungen von Kompost und Gärgut auf die Umwelt,
die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit*



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Bundesamt für Energie BFE

Bundesamt für Landwirtschaft BLW



Baudirektion
Kanton Zürich

AWEL Amt für
Abfall, Wasser, Energie und Luft

43
—
07

> Kompost und Gärgut in der Schweiz

Studie 1: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut
*Studie 2: Auswirkungen von Kompost und Gärgut auf die Umwelt,
die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit*

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt BAFU

Bundesamt für Energie BFE

Bundesamt für Landwirtschaft BLW

Baudirektion Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL

Bern, 2007

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Bundesamt für Energie (BFE)

BAFU und BFE sind Ämter des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)

Das BLW ist ein Amt des Eidg. Volkswirtschaftsdepartements (EVD).

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)

Das AWEL ist ein Amt der Baudirektion des Kantons Zürich.

Autoren

Studie 1: Thomas Kupper¹, Rahel Brändli^{2,3}, Thomas Bucheli², Kristin Becker van Slooten³, Jochen Mayer², Hans-Jörg Bachmann², Mandy Pohl³, Fode Niang³, Carine Stämpfli³, Annette Aldrich², Otto Daniel², Walter Richner², Franz X. Stadelmann², Joseph Tarradellas³

Studie 2: Jacques G. Fuchs⁴, Alfred Berner⁴, Lucius Tamm⁴, Jochen Mayer², Hans-Jörg Bachmann², Urs Baier⁵, Hans-Rudolf Zweifel⁵, Arthur Wellinger⁶, Konrad Schleiss⁷

¹ Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft SHL, 3052 Zollikofen

² Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zürich

³ Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, 1015 Lausanne

⁴ Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL, 5070 Frick

⁵ Hochschule Wädenswil HSW, 8820 Wädenswil

⁶ Nova Energie, 8355 Aadorf

⁷ Umwelt- und Kompostberatung, 2540 Grenchen

Begleitung BAFU

Marc Chardonnens, Abteilung Abfall und Rohstoffe, bis 07.2004

Rolf Kettler, Abteilung Abfall und Rohstoffe, ab 07.2004 bis 12.2005

Kaarina Schenk, Abteilung Abfall und Rohstoffe, ab 01.2006

Lenkungsausschuss

Marc Chardonnens (ehemals BUWAL), David Dubois (ART), Bruno Guggisberg (BFE), Markus Hardegger (BLW), Rolf Kettler (BAFU), Andreas Röthlisberger (Vertreter Grüngutbranche), Kaarina Schenk (BAFU), Albrecht Siegenthaler (ehemals BLW), Franz X. Stadelmann (ehemals ART), Lucius Tamm (FiBL), J. Tarradellas (ehemals EPFL), Rolf Wagner (AWEL)

Zitervorschlag

Kupper T., Fuchs J. 2007: Kompost und Gärgut in der Schweiz.

Studie 1: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut.

Studie 2: Auswirkungen von Kompost und Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit.

Umwelt-Wissen Nr. 0743. Bundesamt für Umwelt, Bern. 124 S.

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelfoto

Beat Ernst, Bildarchiv Nutzpflanzen, Basel

Dank

Studie 1:

Herausgeber und Autoren danken namentlich der Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, dem Laboratorium für Umweltchemie und Ökotoxikologie der ETH Lausanne, der EMPA Dübendorf, dem Service de Protection de la Consommation, Genf, dem Institut für organische Chemie der Universität Basel, dem Norwegian Institute for Air Research (NILU) Tromsø, dem Fraunhofer Institut für Molekularbiologie und angewandte Ökologie (IME) Schmallenberg und der Eawag Dübendorf für ihre Mitarbeit. Der EU (PERFORCE Projekt NEST-508967) sei gedankt für die finanzielle Unterstützung der Analysen der perfluorierten Alkyl-Verbindungen. Ein Dank richtet sich auch an die Anlagenbetreiber, welche an der Studie beteiligt waren. Namentlich zu erwähnen sind: Gerber Gemüsebau, Fehraltorf, BV Kompostieranlage Oensingen AG sowie WIEDAG AG Oetwil am See für ihre Beteiligung an der Feldstudie zum Verhalten der Schadstoffe während Kompostierung und Vergärung.

Studie 2:

Herausgeber und Autoren danken dem Verband Kompostwerke Schweiz (VKS) für die fachliche Unterstützung. Ihr Dank richtet sich ganz besonders an alle Personen, die direkt oder indirekt an dieser Studie mitgewirkt haben, insbesondere in den Vergärungs- und Kompostierungsanlagen, in denen die Proben beschafft wurden. Zu danken ist auch der Kompostierungsanlage Gerber in Fehraltorf (ZH) und ihrem Kompostmeister Nedzadin Asani für die technische Durchführung der Nachbehandlungsversuche von Gärgut. Schliesslich geht ein Dank an Daniel Böhler (Mellikon-AG), auf dessen Felder die mittelfristigen Versuche durchgeführt wurden.

Download PDF

www.umwelt-schweiz.ch/uw-0743-d

(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)

Code: UW-0743-D

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache erhältlich (UW-0743-F).

© BAFU 2007

> Inhalt

Abstracts	5
Vorwort	7
Einleitung	9

Studie 1	
Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut	11

Studie 2	
Auswirkungen von Kompost und Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit	47

> Abstracts

Composting (i.e. aerobic treatment) of biowaste or its anaerobic digestion with the production of biogas are important waste treatment processes which are gaining in significance in Switzerland. The present report offers a comprehensive review of the organic pollutants in compost, digestate and press water and of the benefits procured by the use of these three products. The report describes their effects on the environment, soil fertility and organisms, as well as on plant health. The results of these in-depth studies show that the quality of the large majority of Swiss composts and digestates is good to very good. The input materials mainly influence the chemical properties of the products, while process management mainly determines their biological properties. If compost and digestate are to be applied successfully, care must be taken to choose the right product for the desired application.

Keywords:

compost, digestate, organic pollutants, benefits

Kompostierung (aerobe Behandlung von organischen Abfällen) und Vergärung (anaerobe Behandlung kombiniert mit der Produktion von Biogas) sind wichtige Abfallbehandlungsverfahren, deren Bedeutung in der Schweiz zunimmt. Der vorliegende Synthesebericht gibt einen vertieften Überblick über die organischen Schadstoffe in Kompost, Gärgut und Presswasser, aber auch über den Nutzen dieser drei Produkte. Er beschreibt die Auswirkungen auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit, die Bodenorganismen sowie die Pflanzengesundheit. Die Resultate der umfassenden Untersuchungen zeigen, dass ein Grossteil von Kompost und Gärgut in der Schweiz eine gute bis sehr gute Qualität (Probenahme 2003) aufweist. Dabei beeinflussen die Ausgangsmaterialien vor allem die chemischen Eigenschaften der Produkte. Deren biologische Eigenschaften werden massgebend von der Rotteführung bestimmt. Für einen erfolgreichen Einsatz von Kompost und Gärgut ist das richtige Produkt für die richtige Anwendung auszuwählen.

Stichwörter:

Kompost, Gärgut, organische Schadstoffe, Nutzen

Le compostage (traitement aérobie des déchets biodégradables) et la méthanisation (traitement anaérobie, combiné à la production de biogaz) sont des procédés de traitement des déchets dont l'importance en Suisse continue de croître. Le présent rapport de synthèse propose une revue approfondie des micropolluants présents dans le compost, le digestat et l'eau de pressage et des bénéfices qu'apportent ces trois produits. Il décrit leurs effets sur l'environnement, sur la fertilité du sol, les organismes terrestres, ainsi que sur la santé des plantes. Les résultats de ces études exhaustives montrent que la grande majorité des composts et digestats de Suisse sont de qualité bonne à très bonne (échantillonnage 2003). Les matériaux de départ (intrants) influencent surtout les caractéristiques chimiques des produits, alors que la conduite de la dégradation en détermine surtout les caractéristiques biologiques. Une application réussie de compost et de digestat exige que l'on choisisse le produit adapté à l'utilisation prévue.

Mots-clés :

compost, digestat, micropolluants organiques, effets bénéfiques

Compostaggio (trattamento aerobico di rifiuti organici) e fermentazione (trattamento anaerobico associato alla produzione di biogas) sono procedure di trattamento dei rifiuti, che assumono un'importanza sempre maggiore in Svizzera. Il presente rapporto di sintesi offre una panoramica approfondita sia sul tenore di inquinanti organici nel compost, nel digestato e nelle acque di processo sia sull'utilità di questi tre prodotti. Ne descrive gli effetti sull'ambiente, sulla fertilità del suolo, sugli organismi del suolo come pure sullo stato di salute delle piante. I risultati delle indagini dettagliate mostrano che gran parte del compost e del digestato prodotti in Svizzera è considerata di una qualità da buona a molto buona (campionamento del 2003). I materiali di partenza influenzano soprattutto le proprietà chimiche dei prodotti. Le proprietà biologiche dei prodotti sono invece determinate soprattutto dai processi di decomposizione. Per consentire un impiego ottimale del compost e del digestato è necessario scegliere il prodotto giusto per l'utilizzazione giusta.

Parole chiave:

**compost, digestato,
inquinanti organici, utilità**

> Vorwort

Kompostierung und Vergärung von biogenen Abfällen und Materialien sind wichtige Abfallbehandlungsverfahren, deren Bedeutung in der Schweiz zunimmt. Schon heute sind die biogenen Abfälle und Materialien auf Grund der Energiediskussionen begehrte einheimische Rohstoffe. Die energetische Nutzung der Biomasse und insbesondere der biogenen Abfälle und Materialien kann einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele der Schweiz, zur Reduktion der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Energien sowie zur Verbesserung der Versorgungssicherheit leisten. Anpassungen im Raumplanungsgesetz und neu geschaffene Fördermassnahmen, wie beispielsweise die kostendeckende Einspeisevergütung, haben die Rahmenbedingungen bereits entsprechend verändert und werden diese auch in Zukunft beeinflussen.

Jährlich werden in der Schweiz rund 800'000 Tonnen biogene Abfälle in industriellen Kompostier- und Vergärungsanlagen verarbeitet. Dabei entstehen Kompost und Gärgut, die meist als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden, wodurch Nährstoffe rezykliert und die Bodeneigenschaften positiv beeinflusst werden. Vor dem Hintergrund der immer wieder aufgeworfenen Frage der Bodenbelastungen durch schadstoffhaltige Dünger wurden zwei Studien im Auftrag des BAFU, BFE, BLW und AWEL lanciert, welche die Risiken und Nutzen der Grüngutverwertung in der Schweiz auf einer naturwissenschaftlichen begründeten Basis aufzeigen sollten. Die erste Studie sollte zeigen, ob mit Kompost und Gärgut organische Schadstoffe in die Umwelt eingetragen werden und ob dies Auswirkungen auf die Bodenlebewesen hat. Die zweite Studie untersuchte den Nutzen von Kompost und Gärgut für die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit.

Die Resultate der umfassenden Untersuchungen zeigen, dass ein Grossteil von Kompost und Gärgut in der Schweiz eine gute bis sehr gute Qualität aufweist. Für einen erfolgreichen Einsatz von Kompost und Gärgut ist für eine bestimmte Anwendung das richtige Produkt auszuwählen. Jetzt gilt es, die positiven Ergebnisse in der Praxis umzusetzen. Das Ziel dabei ist, für Dünger aus Kompost und Gärgut Akzeptanz zu gewinnen. Diese lassen sich nämlich in der Landwirtschaft, Gartenbau und bei Privaten langfristig nur absetzen, wenn die Schadstoffgehalte minimal sind und die Eigenschaften als Bodenverbesserer bekannt sind. Mit einer entsprechenden Qualitätssicherung und einem guten Marketing für Kompost und Gärgut kann es gelingen, die Öffentlichkeit vom Wert der Produkte zu überzeugen.

An dieser Stelle sei den Mitgliedern des Lenkungsausschusses, den beteiligten Forschungsinstitutionen und der Grüngutbranche bestens für die tatkräftige Mitarbeit und Unterstützung der beiden Studien gedankt. Mit dem gemeinsamen Interesse für einen

nachhaltigen Umgang mit der nicht erneuerbaren und knappen Ressource Boden und einer weiterhin erfolgreichen Zusammenarbeit lässt sich die stoffliche und energetische Verwertung der biogenen Abfälle und Materialien optimieren.

Gérard Poffet
Vizedirektor
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Michael Kaufmann
Vizedirektor
Bundesamt für Energie (BFE)

Eduard Hofer
Vizedirektor
Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)

Jürg Suter
Amtschef
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Kanton Zürich

> Einleitung

In der Schweiz werden jährlich rund 800'000 Tonnen biogene Abfälle in grösseren Kompost- und Vergärungsanlagen verarbeitet. Damit sind die Kompostierung und die Vergärung von grosser ökologischer aber auch ökonomischer Bedeutung und ein wichtiger Bestandteil der Abfallwirtschaft Schweiz. Als Folge der BSE-Krise und der Diskussion um die Klärschlammdeponierung waren auch zunehmend Recyclingdünger wie Kompost und Gärgut in die Kritik geraten. Kompost und Gärgut lassen sich längerfristig nur noch absetzen, wenn nachgewiesen wird, dass der Schadstoffgehalt von Kompost und Gärgut minimal ist und der Einsatz der Recyclingdünger eine Wertsteigerung der Böden bewirkt. Das damalige BUWAL, das BLW, das BFE und das AWEL haben im Jahr 2003 in Zusammenarbeit mit der Grüngutbranche zwei Studien in Auftrag gegeben, die sich der Schadstoff- und Nutzenproblematik von Kompost und Gärgut annehmen sollten.

Studie 1 – Organische Schadstoffe und Kompost und Gärgut – hatte die beiden Projektziele:

- > Erhebung der aktuellen Belastungen in Kompost und Gärgut mit organischen Schadstoffen
- > Evaluation der wichtigsten Eintragspfade und Erarbeitung von Empfehlungen bezüglich Qualitätssicherung und Risikomanagement

Studie 2 hatte den «Nutzen von Kompost und Gärgut» zum Thema mit dem Ziel: Evaluieren der Auswirkungen von Kompost- und Gärgutapplikationen auf das Pflanzenwachstum, die Pflanzengesundheit sowie die Bodenparameter und die Umwelt.

Beide Projekte waren sehr gut miteinander koordiniert, so wurden nahezu die gleichen Proben verwendet und analysiert und die wissenschaftlichen Resultate wurden regelmässig kommuniziert. Ein Lenkungsausschuss (siehe Impressum) begleitete die Forschungsarbeiten und traf die wichtigen strategischen Entscheide während der Projektlaufzeit.

Der vorliegende Synthesebereich gibt einen vertieften Überblick über die Untersuchungen, Methoden, Ergebnisse und Schlussfolgerungen der beiden Studien. Weiterführende Details sind in den wissenschaftlichen Publikationen zu finden.

> Studie 1

Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut

> Inhalt

Zusammenfassung	14		
1 Einleitung	17		
2 Material und Methoden	20		
2.1 Monitoringstudie	20		
2.1.1 Versuchsanlage	20		
2.1.2 Untersuchte Stoffe	21		
2.2 Verhalten von organischen Schadstoffen während Kompostierung und Vergärung	21		
2.3 Ökotoxikologische Untersuchungen	23		
2.3.1 Literatur basierte ökotoxikologische Risikoabschätzung	23		
2.3.2 Ökotoxikologische Tests	23		
3 Resultate und Diskussion	24		
3.1 Monitoringstudie	24		
3.1.1 Belastung von Kompost, Gärgut und Presswasser	24		
3.1.2 Quellen von organischen Schadstoffen	25		
3.1.3 Frachten der Stoffe in die Böden	26		
3.2 Verhalten von organischen Schadstoffen während Kompostierung und Vergärung	28		
3.3 Ökotoxikologische Untersuchungen	28		
3.3.1 Literatur basierte ökotoxikologische Risikoabschätzung	28		
3.3.2 Ökotoxikologische Tests	28		
3.4 Weitere Arbeiten	29		
4 Schlussfolgerungen	30		
5 Empfehlungen	33		
5.1 Kurzfristige Massnahmen	33		
5.1.1 PAK-Gehalte von Kompost, Gärgut und Presswasser	34		
5.1.2 Periodisches Monitoring von organischen Schadstoffen	35		
5.1.3 Netto-Stoffflüsse in landwirtschaftliche Nutzflächen	36		
		5.1.4 Qualität von Substraten für die Co-Vergärung und von deren Endprodukten	36
		5.1.5 Langzeitverhalten und Auswirkungen von organischen Schadstoffen in Böden	37
		5.2 Mittelfristige Massnahmen, Strategien und Perspektiven	38
		5.2.1 Grundsätze	38
		5.2.2 Umsetzung	39
		5.2.3 Zukünftige Zusammenarbeit und Stakeholderplattformen	40
		Anhang	41
		A1 Korrelationen	41
		Verzeichnisse	42
		Literatur	42
		Publikationen	44
		Berichte	45
		Konferenzbeiträge, Vorträge und Poster	45

> Zusammenfassung

Einleitung

Kompostierung (aerobe Behandlung von organischen Abfällen) und Vergärung (anaerobe Behandlung kombiniert mit Produktion von Biogas) sind wichtige Abfallbehandlungsverfahren, deren Bedeutung in Europa und in der Schweiz zunimmt. Kompost, Gärgut und Presswasser werden vorwiegend auf landwirtschaftliche Böden ausgebracht, wodurch Nährstoffe rezykliert und die Bodeneigenschaften positiv beeinflusst werden. Diese Produkte können jedoch Stoffe enthalten, welche für die Böden schädlich sein können. Die Probleme im Zusammenhang mit Schwermetallen wurden erkannt und entsprechende Massnahmen ergriffen. Die Kenntnisse über organische Schadstoffe sind jedoch ungenügend für eine möglichst umweltverträgliche Verwertung dieser Produkte.

Der vorliegende Synthesebericht gibt einen vertieften Überblick über organische Schadstoffe in Kompost, Gärgut und Presswasser. Er beschreibt Faktoren, welche die Konzentrationen beeinflussen, sowie Auswirkungen auf Bodenorganismen. Als erstes wurde eine umfassende Literaturstudie durchgeführt und die Datenlage zusammengefasst (Modul 1). Die in Kompost, Gärgut und Presswasser zu analysierenden organischen Schadstoffe wurden priorisiert (Modul 1), entsprechende Analysemethoden erarbeitet (Modul 2) sowie eine Monitoringstudie konzipiert, durchgeführt und ausgewertet (Module 1, 3, 4, 6 und 9). Diese Arbeiten wurden mit einer Feldstudie zum Verhalten organischer Schadstoffe während Kompostierung und Vergärung (Modul 8) sowie mit ökotoxikologischen Studien (Modul 5) ergänzt. Verschiedene betroffene und interessierte Kreise wurden mittels Publikationen, Poster und Referaten über die Resultate informiert.

Resultate

Die Stoffklassen polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenylen (PCB), polychlorierte Dibenzo-*p*-dioxine und -furane (PCDD/F), dioxin-ähnliche PCB (DL PCB), bromierte Flammschutzmittel, perfluorierte Alkyl-Verbindungen (PFAS), Pflanzenschutzmittel (PSM), Phthalate, und chlorierte Paraffine (CP) wurden gefunden. Nonylphenol (NP) war nicht nachweisbar. Etliche Stoffe (bromierte Flammschutzmittel, PFAS, verschiedene PSM, CP) konnten erstmals in Kompost nachgewiesen werden. Für sämtliche Stoffklassen waren bisher keine Daten für Gärgut und Presswasser verfügbar. Die Gehalte lagen meist im Bereich von $\mu\text{g}/\text{kg}$ TS, jedoch über den Konzentrationen von Böden, die eine übliche Hintergrundbelastung aufweisen. Die höchsten Gehalte wiesen PAK (600 bis 12'470 $\mu\text{g}/\text{kg}$ Trockensubstanz) auf. Etwa 25 % der Proben lagen über dem Richtwert von 4000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TS gemäss ChemRRV. Die Gehalte variierten für die meisten Stoffgruppen stark. Nur einzelne der Schadstoffklassen korrelierten untereinander. Dies gilt auch für organische Schadstoffe und weitere Parameter wie Nährstoffe, Schwermetalle und Fremdstoffe.

Organische Schadstoffe

Gärgut zeigte in der Tendenz höhere Gehalte an organischen Schadstoffen im Vergleich zu Kompost mit Ausnahme von PCB, PCDD/F und PFAS. Die Konzentrationen in Presswasser waren in der Regel höher als diejenigen in Gärgut ausser für PCB und einzelne bromierte Flammschutzmittel.

Die Gehalte sämtlicher Stoffgruppen mit Ausnahme von PAK und HBCD waren in Kompost und Gärgut städtischer Herkunft tendenziell höher. Analysen von Markern wiesen auf Verbrennungsprozesse als Hauptquelle der PAK hin. Eine detaillierte und abschliessende Bezeichnung von Schadstoffquellen war im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

Die atmosphärische Deposition war die wichtigste Ursache für den Eintrag von PAK in die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz (ca. 1700 kg pro Jahr). Die Fracht in Kompost und Gärgut von 570 kg pro Jahr lag deutlich höher im Vergleich zu Hofdüngern und Klärschlamm und betrug ca. 20% der Gesamtfracht. Kompost und Gärgut verursachten bei weitem die höchste Fracht pro ha bei üblichen Ausbringungsmengen. Gärgut führte zu deutlich, Presswasser zu leicht höheren flächenspezifischen Einträgen von PAK im Vergleich zu Kompost. Die Frachten der übrigen Schadstoffe aufgrund der Verwendung von Kompost und Gärgut waren verhältnismässig niedrig ($\leq 6\%$ der Gesamtfrachten).

Ein Abbau von PCB während der Kompostierung erscheint als eher unwahrscheinlich. Eine Verminderung der Gehalte wurde für die niedermolekularen PAK beobachtet. Die meisten PSM (60 bis 90% der untersuchten Einzelverbindungen) wurden zu mindestens 50% eliminiert.

**Verhalten von organischen
Schadstoffen während
Kompostierung und Vergärung**

Im Rahmen der Literatur basierten ökotoxikologischen Risikoabschätzung waren für drei (PCDD, PAK, PCB) der untersuchten Substanzen genügend Daten vorhanden, um ein unannehmbares Risiko auszuschliessen. Für Atrazin oder Captan war trotz gewisser Datenlücken bei Einarbeitung von Kompost in den Boden kein erhöhtes Risiko zu erwarten. Für die restlichen 12 Substanzen war aufgrund fehlender Analysedaten von Kompost oder mangels Daten bezüglich ökotoxikologischer Effekte eine zuverlässige Risikoabschätzung nicht möglich.

**Ökotoxikologische
Untersuchungen**

Verschiedene der geprüften Testmethoden erwiesen sich für ökotoxikologische Untersuchungen von Kompost und Gärgut als geeignet. Im Rahmen der Monitoringstudie wurden etwa je zur Hälfte hemmende und stimulierende Wirkungen auf die Reproduktion von *Folsomia candida* (eine Art der Klasse Springschwänze) beobachtet. Die Effekte konnten nicht mit den Schadstoffgehalten korreliert werden.

Insgesamt wiesen die Resultate der ökotoxikologischen Untersuchungen darauf hin, dass die Ausbringung von organischen Schadstoffen mittels Verwendung von Kompost und Gärgut kein unmittelbares Risiko für den Boden darstellt. Negative Auswirkungen können jedoch aufgrund der grossen Kenntnislücken bezüglich der terrestrischen Ökosysteme nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Nach Abwägung der Düngewirkung und weiterer nutzbringender Wirkungen gegen bekannte und potentielle Schadeffekte sowie unter Berücksichtigung der Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Bewertung erscheint ein Ausstieg aus der Verwertung von Kompost und Gärgut aus getrennt gesammelten Abfällen urbaner Herkunft als weder nötig noch verhältnismässig. Das System sollte jedoch aufgrund der (a) grossen Spannbreite der Gehalte von organischen Schadstoffen, (b) Netto-Stoffflüsse von urbanen Gebieten in landwirtschaftliche Nutzflächen, (c) unvollständig geschlossenen Stoffkreisläufen innerhalb der Landwirtschaft und (d) Kenntnislücken bezüglich Auswirkungen der Schadstoffe weiter optimiert werden. Die Notwendigkeit zur Optimierung basiert demnach nicht auf einem unmittelbar nachweisbaren Risiko sondern auf dem offensichtlich vorhandenen Potential zur Minimierung der Schadstoffbelastung (a), der suboptimalen Konzeption des Systems (b, c) und potentieller Risiken, die heute nicht ausreichend beurteilt werden können (d). Zudem sollte die Qualitätssicherung von Kompost und Gärgut aus getrennt gesammelten Abfällen grundsätzlich Aspekte wie weitestgehend mögliche Absenz von Schadstoffen einbeziehen, auch wenn diese nicht gesetzlich reguliert sind.

Im Hinblick auf eine möglichst umweltfreundliche und nachhaltige stoffliche Verwertung von getrennt gesammelten organischen Abfällen werden kurz- bis mittelfristige Massnahmen empfohlen:

- > Verminderung der PAK-Gehalte von Kompost, Gärgut und Presswasser (vgl. Richtwert gemäss ChemRRV)
- > Periodisches Monitoring von organischen Schadstoffen in Kompost, Gärgut und Presswasser
- > Untersuchung
 - der Qualität von Substraten für die Co-Vergärung und von deren Endprodukten
 - der Netto-Stoffflüsse in landwirtschaftliche Nutzflächen
 - von Langzeitverhalten und Auswirkungen von organischen Schadstoffen in Böden

**Schlussfolgerungen und
Empfehlungen**

1 > Einleitung

Die Kompostierung von getrennt gesammelten, organischen Abfällen ist seit Jahren fester Bestandteil der Abfallwirtschaft in der Schweiz und in Europa. Die Vergärung anstelle oder in Kombination mit der Kompostierung hat in jüngster Zeit an Bedeutung zugenommen. Die anaerobe Behandlung von organischen Abfällen wird im Zusammenhang mit der Förderung von erneuerbarer Energie weiter zunehmen, so dass mit einer Erhöhung der Endprodukte Gärgut und Presswasser zu rechnen ist. Etwa 32 Mio t organische Abfälle werden in der EU25 pro Jahr zu Kompost und Gärgut verarbeitet (European Communities 2005). In der Schweiz sind es momentan rund 0,8 Mio t (Hügi und Kettler 2004). Die Produktion von Kompost und Gärgut und ihre Verwendung entsprechen dem Grundsatz der Nachhaltigkeit, indem Stoffkreisläufe geschlossen werden. Die Düngewirkung und die Verbesserung der Bodeneigenschaften zählen zu den wichtigsten agronomischen Eigenschaften dieser Produkte.

Kompost und Gärgut können jedoch Schadstoffe enthalten, deren Eintrag in die Böden nicht unbedenklich und daher unerwünscht ist. Die Probleme im Zusammenhang mit Schwermetallen wurden erkannt, untersucht und entsprechende Massnahmen ergriffen (Candinas et al. 1989; Plahl et al. 2002). In den 1990er Jahren wurde erkannt, dass auch organische Schadstoffe im Kompost vorkommen können (z. B. Berset und Holzer 1995; Fricke et al. 1989, 1994). Die wichtigsten Eintragspfade sind die atmosphärische Deposition und direkte Einträge. Letztere beinhalten unsachgemässe oder unsorgfältige Trennung der Abfälle, Fehlwürfe, Applikation von Pflanzenschutzmitteln auf Pflanzen und Kontamination von pflanzlichem Material durch den Verkehr (z. B. trockene und nasse Verfrachtung von Partikeln: Staub bzw. Gischt). Daten über organische Schadstoffe in Kompost aus getrennter Sammlung sind nur begrenzt verfügbar (Brändli et al. 2005). Dies betrifft sogar Stoffe der Stockholmer Konvention über persistente organische Schadstoffe (POPs). Daten zu Gärgut und Presswasser fehlen vollständig. Neuere organische Schadstoffe (sog. «emerging organic pollutants») sind bisher kaum untersucht worden. Man muss davon ausgehen, dass diese eine ähnliche Bedeutung haben, da sie den POPs vergleichbare Produktionsmengen und Eigenschaften wie ubiquitäres Vorkommen, Toxizität, Persistenz und endokrine Wirkungen aufweisen (Alcock et al. 1999; Giesy und Kannan 2002; Jones und de Voogt 1999). Die Kenntnisse über organische Schadstoffe in Kompost, Gärgut und Presswasser sind ungenügend für eine möglichst umweltverträgliche Verwertung dieser Produkte und insbesondere für eine Risikoabschätzung und die Anwendung eines Qualitätsmanagementsystems. Die Dringlichkeit zur Verbesserung der Datenlage wurde durch das Verbot der Verwendung von Klärschlamm in der schweizerischen Landwirtschaft ab 2006 erhöht, indem der Ausstieg massgeblich mit dem Vorkommen von organischen Schadstoffen begründet wurde (BUWAL 2003).

Der Gehalt von Schadstoffen in einer Matrix allein erlaubt keine abschliessenden Hinweise auf deren Schadwirkungen. Dabei spielt die Form, in welcher der Schadstoff

vorliegt, eine entscheidende Rolle, denn sie bestimmt im Wesentlichen die biologische Verfügbarkeit. Deshalb müssen chemische Analysen mit ökotoxikologischen Studien ergänzt werden, wenn die Auswirkungen eines Schadstoffs auf die Umwelt beurteilt werden sollen. Ökotoxikologische Testsysteme werden beispielsweise für die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln verbreitet eingesetzt (Fountain und Hopkin 2005; Becker-van Slooten und Tarradellas 2000). Dabei werden Testorganismen (z. B. Regenwürmer, Collembolen, Wasserflöhe) meist unter Laborbedingungen den zu überprüfenden Stoffen ausgesetzt. Ein analoges Vorgehen für die Überprüfung der Kompostverwertung wurde von Kapanen und Itavaara (2001) postuliert.

Das Bundesamt für Umwelt und das Bundesamt für Energie erkannten die beschriebene Problematik. Deshalb wurde im Jahr 2002 der Antrag der Arbeitsgemeinschaft bestehend aus dem Laboratorium für Umwelchemie und Ökotoxikologie (CECOTOX) der ETH Lausanne und der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) zur Durchführung des Projekts «Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz» angenommen und diese mit dessen Realisierung beauftragt. Parallel zum vorliegenden Projekt wurde eine Studie über Nutzwirkungen von Kompost und Gärgut durchgeführt (Fuchs et al. 2004). Die Resultate der beiden Projekte sollten eine umfassende Beurteilung dieser Produkte und ein Abwägen von deren Nutz- und Schadwirkungen erlauben.

Das «Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz» hatte zum Ziel, die Kenntnisse über organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut und deren Auswirkungen auf den Boden zu verbessern im Hinblick auf eine umweltfreundliche und nachhaltige Wiederverwertung von getrennt gesammelten organischen Abfällen. Die Zielsetzung im Einzelnen war wie folgt:

- a) Bestimmung der Konzentrationen von organischen Schadstoffen in Kompost und Gärgut der Schweiz und der wichtigsten Parameter, welche die Schadstoffbelastung beeinflussen,
- b) Studium des Verhaltens von organischen Schadstoffen während Kompostierung und Vergärung,
- c) Untersuchung der Auswirkungen der Verwendung von Kompost und Gärgut auf Bodenorganismen.

In einem ersten Schritt wurde eine Literaturstudie über organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut aus getrennt gesammelten organischen Abfällen (Modul 1) sowie eine ökotoxikologische Risikoabschätzung basierend auf der verfügbaren Literatur durchgeführt (Modul 5a). Die in Kompost, Gärgut und Presswasser zu analysierenden organischen Schadstoffe wurden priorisiert (Modul 1), entsprechende Analysemethoden erarbeitet (Modul 2) sowie eine Monitoringstudie konzipiert, durchgeführt und ausgewertet (Module 1, 3, 4, 6 und 9). Diese Arbeiten wurden mit einer Feldstudie zum Verhalten organischer Schadstoffe während der Kompostierung und der Vergärung (Modul 8) sowie mit ökotoxikologischen Studien (Modul 5b) ergänzt. Verschiedene betroffene und interessierte Kreise wurden mittels Publikationen, Postern und Referaten über die Resultate informiert. Die Arbeiten wurden weitgehend im Rahmen einer Dissertation (R. Brändli) und in Form von Masterarbeiten (M. Pohl, F. Niang) durchge-

führt. Ein Überblick über die Publikationen, Berichte, Kongressbeiträge und Präsentationen sind in den Anhängen 2 bis 4 aufgeführt.

Der vorliegende Synthesebericht enthält eine kurze Beschreibung der Versuchskonzeption und der angewendeten Methoden (Kap. 2) und fasst die Resultate (Kap. 3) und die Schlussfolgerungen (Kap. 4) des Projekts zusammen. Weiter werden Möglichkeiten zur Optimierung des aktuellen Systems der Kompostierung und Vergärung von getrennt gesammelten organischen Abfällen diskutiert sowie Empfehlungen, Massnahmen, Strategien und Perspektiven skizziert (Kap. 5).

2 > Material und Methoden

2.1 Monitoringstudie

2.1.1 Versuchsanlage

Proben von Kompost, Gärgut und Presswasser aus getrennt gesammelten organischen Abfällen wurden auf 32 Kompostier- und 7 Vergärungsanlagen der Schweiz entnommen (Brändli et al. 2007a,b). Die auf den Anlagen angewendeten Verfahren umfassten offene Mietenkompostierung (Dreieckmieten: 19 Anlagen; Tafelmieten: 3 Anlagen), thermophile Vergärung (6 Anlagen), kombinierte Vergärung und Kompostierung (5 Anlagen), Boxenkompostierung (3 Anlagen), Hallenkompostierung (2 Anlagen), mesophile Vergärung und Wurmkompostierung (je 1 Anlage). Das Versuchskonzept berücksichtigte die Parameter, welche gemäss Hypothesen der Literaturstudie die Belastung von Kompost und Gärgut beeinflussen (Brändli et al. 2005):

- a) Behandlung: aerobe und anaerobe Behandlung mit Kompost und Gärgut/Presswasser als Endprodukte. Gärgut wird in den meisten Fällen aerob nachbehandelt.
- b) Ausgangsmaterialien: die mengenmässig wichtigsten Ausgangsmaterialien sind Grünabfall (organische Abfälle von privaten Gärten und öffentlichen Grünflächen) und Küchenabfälle (ungekochte organische Abfälle, die in Küchen von privaten Haushalten anfallen; Hügi und Kettler 2004). Küchenabfallkompost wird immer aus einer Mischung von Küchen- und Grünabfällen hergestellt. Sämtliche Gärprodukte enthielten Küchenabfälle. Weitere organische Abfälle der Industrie, Landwirtschaft oder aus dem Unterhalt von Strassenflächen waren in einigen Produkten enthalten. Papier und Karton waren als Ausgangsmaterialien nicht erlaubt.
- c) Region, in der das Ausgangsmaterial gesammelt wurde: städtisch und ländlich.
- d) Saison, in der das Ausgangsmaterial gesammelt wurde: Frühling/Sommer, Herbst, Winter.

Der Einfluss dieser Parameter wurde mittels nicht-parametrischer statistischer Tests erfasst. Diese Tests erfordern keine Normalverteilung der Datensätze und sind unempfindlich gegen Ausreisser. Die Parameter konnten nicht für alle Stoffgruppen ausreichend berücksichtigt werden. Bei kleineren Datensätzen ($n \leq 12$; vgl. Tab. 1) enthielten beispielsweise fast alle Proben aus städtischen Gebieten Küchenabfälle. Die Auswirkungen der Parameter «Ausgangsmaterialien» und «Region» auf den Schadstoffgehalt konnten deshalb in diesen Fällen nicht abschliessend zugeordnet werden.

2.1.2 **Untersuchte Stoffe**

Die im Rahmen der Monitoringstudie untersuchten Stoffgruppen, ihre wichtigsten Quellen und Anwendungen sowie die Anzahl der untersuchten Proben sind in Tab. 1 aufgeführt. Die analytischen Methoden sind in Brändli et al. (2006, 2007b) beschrieben. Diese Proben wurden zudem auf Standardparameter (Trockensubstanz (TS), Organische Substanz, pH Wert, elektrische Leitfähigkeit, Fremdstoffe, Nährstoffe und Schwermetalle) untersucht.

2.2 **Verhalten von organischen Schadstoffen während Kompostierung und Vergärung**

Das Verhalten von PAK und PCB während Kompostierung und Vergärung wurde auf zwei Anlagen (Kompostierung auf Dreiecksmieten) und auf einer Vergärungsanlage (thermophiler Prozess) untersucht (Brändli et al. 2007cc) Auf der Vergärungsanlage wurde zuerst das Ausgangsmaterial beprobt, d.h. getrennt gesammelte organische Abfälle, Presswasser und Gärgut zur Verflüssigung und Animpfung des Materials. Anschliessend erfolgte entsprechend der Aufenthaltszeit des Materials im Fermenter (12 Tage) die Beprobung der Endprodukte Gärgut und Presswasser. Das Gärgut wurde anschliessend aerob nachbehandelt. Auf den Kompostieranlagen wurden Proben des Ausgangsmaterials und des kompostierten Materials nach 3, 7, 14, 28, 56 und 112 Tagen Rottezeit entnommen. Zur aeroben Nachbehandlung wurde das Gärgut kompostiert und dessen Beprobung wie für Kompost durchgeführt.

Tab. 1 > **Untersuchte Stoffgruppen im Rahmen der Monitoringstudie, ihre wichtigsten Quellen und Anwendungen sowie Probenanzahl***Die im Text verwendeten Abkürzungen sind fett gedruckt.*

	Quellen und Anwendungen	n _(P) [*]	n _(A) [*]
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAK (Total der 15 PAK ¹ : Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthren, Pyren, Benz[<i>a</i>]anthracen, Chrysen, Benzo[<i>b</i>]fluoranthren, Benzo[<i>k</i>]fluoranthren, Benzo[<i>a</i>]pyren, Indeno[1,2,3- <i>cd</i>]pyren, Benzo[<i>ghi</i>]perylen)	Fossile Brennstoffe, Verbrennungsprozesse (Heizung, Heizkraftwerke, KVA), offene Feuer, Motorfahrzeuge (Abgase, Abrieb von Reifen und Strassenbelägen)	85	39
Ortho-substituierte polychlorierte Biphenyle, PCB (Total der 7 Kongeneren 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) ²	Öl von Transformatoren, Hydraulikflüssigkeiten, Schmiermittel, Weichmacher, Verbot in den 1970er Jahren	85	39
Dioxin-ähnliche polychlorierte Biphenyle, DL PCB (Total der Kongeneren 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189) ²		20	12
Polychlorierte Dibenzo- <i>p</i> -dioxine und -furane, PCDD/Fs ^{2, 3}	Verbrennungsprozesse	20	12
Polybromierte Diphenylether, PBDE , pentaBDE ⁴ , octaBDE ⁵ , DecaBDE (Kongeneren 28, 47, 99, 100, 153, 154, 183, 209)	Bromierte Flammschutzmittel (Plastik, Textilien, Materialien für Fahrzeuge und Baumaterialien, elektrische und elektronische Apparate)	20	12
Hexabromcyclododecan, HBCD		20	12
Tetrabrombisphenol A, TBBPA		20	12
Perfluorierte Alkyl-Verbindungen, PFAS : Total der 6:2 Fluorotelomer Sulfonate + der gesättigten/ungesättigten Fluorotelomer Carboxylate, 6:2 FTS/FT(U)CA ; Total der perfluorierten Sulfonate, PFS ; Total der perfluorierten Carboxylate, PFCA ; Total der Fluoroktan Sulfonamide und Sulfonamidoethanole, FOSA/FOSE ³	Oberflächenbehandlung von Textilien, Teppichen, Leder und Papieren, Schäume zur Brandbekämpfung, Schmiermittel, Insektizide	18	11
Pflanzenschutzmittel, PSM : Total von 271 Verbindungen, 86 Fungizide, 86 Herbizide, 92 Insektizide, 5 Akarizide, 1 Nematizid, 1 Wachstumsregulator ³	Pflanzenschutz in Landwirtschaft und urbanen Grünflächen, Materialschutz	22	12
Chlorierte Paraffine, CP (Total der kurzkettigen (C ₁₀ -C ₁₃) und mittelkettigen (C ₁₄ -C ₁₇) Verbindungen) ⁴	Metallbearbeitungs- u. Schmieröle, Farben, Beschichtungen, Dichtungs- u. Flammschutzmittel, Weichmacher	3	3
Phthalate: Di-2-Ethylhexylphthalat, DEHP ; Dibutylphthalat, DBP	Weichmacher	6	6
Nonylphenol, NP	Metabolit von Nonylphenolpolyethoxylaten ⁵ , Emulgator (z. B. in PSM)	6	6

* n(P): Anzahl der analysierten Proben, n(A): Anzahl der beprobten Anlagen

¹ Normalerweise wird das Total der 16 PAK nach EPA inkl. Dibenz[*a,h*]anthracen rapportiert.Infolge von Problemen bei der Quantifizierung dieser Verbindung ist das Total von 15 PAK angegeben (Dibenz[*a,h*]anthracen beträgt nur 1–2 % der Σ16 EPA PAK)² In der der Stockholmer Konvention über persistente organische Schadstoffe (POPs) aufgeführt³ Die vollständige Liste der untersuchten Einzelverbindungen ist in Brändli et al. (2007b) enthalten⁴ Verwendung eingeschränkt in der EU⁵ Verwendung eingeschränkt in der EU und der Schweiz

2.3 Ökotoxikologische Untersuchungen

2.3.1 Literatur basierte ökotoxikologische Risikoabschätzung

Im Rahmen der Literatur basierten ökotoxikologischen Risikoabschätzung wurden siebzehn chemische Stoffe überprüft (Aldrich und Daniel 2003): PAK, PCB, PCDD, PBDE, Bisphenol A (Ausgangssubstanz zur Herstellung von Kunststoffen), Phthalate sowie 11 PSM: Atrazin, Captan, Cyprodinil, Chlorpyrifos, Folpet, Iprodion, Metolachlor, Procymidon, Thiabendazol, Trifluralin, Vinclozolin. Sämtliche der untersuchten Substanzen wurden im Rahmen der Monitoringstudie analysiert mit Ausnahme von Bisphenol A. PAK, PCB, PCDD, Cyprodinil und Thiabendazol wurden gefunden, die andern lagen in Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze von 1 µg/kg TS vor. Von Atrazin wurde ein Abbauprodukt gefunden. Das Vorgehen der Risikoabschätzung war wie folgt:

- a) Abschätzung der Konzentration des Stoffs im Boden nach Ausbringung von Kompost («predicted environmental concentration» PEC). Dabei wurden fünf Szenarien unterstellt: reiner Kompost (worst case), 100 t TS Kompost/ha und Einarbeitungstiefe von 5 cm, 100 t TS Kompost/ha und Einarbeitungstiefe von 20 cm, 10 t TS Kompost/ha und Einarbeitungstiefe von 20 cm, 10 t TS Kompost/ha und Einarbeitungstiefe von 5 cm.
- b) Recherche von toxikologischen Endpunkten (z. B. LC₅₀: «Lethal Concentration causing 50 % mortality»; NOEC: «No Observed Effect Concentration») von Bodenorganismen aus der Literatur. Bei Vorliegen mehrerer Datensätze wurden die empfindlichsten Organismen zur Bestimmung von LC₅₀ oder NOEC ausgewählt.
- c) Berechnen der Quotienten von toxikologischen Endpunkten und der Konzentration des Stoffs im Boden (z. B. LC₅₀/PEC). Einfügen von Korrekturfaktoren je nach Qualität der Datensätze bzw. für chronische oder akute Wirkungen.

2.3.2 Ökotoxikologische Tests

Im Rahmen einer Vorstudie wurde die Eignung verschiedener Testmethoden mit mehreren Testorganismen (Springschwänze, auch Collembolen genannt: *Folsomia candida*, *Folsomia fimetaria*, Wasserflöhe *Daphnia magna*, Leuchtbakterien *Vibrio fischeri*) für Kompost und Gärgut geprüft (Stämpfli et al. 2005). *Folsomia candida* haben im Vergleich zu andern Testorganismen am empfindlichsten reagiert. Collembolen sind ein wichtiger Teil der Lebensgemeinschaft im Boden. *Folsomia candida* kommen nahezu überall auf der Welt vor, weisen einen kurzen Reproduktionszyklus auf und sind im Labor leicht zu züchten (Fountain und Hopkin 2005). Für 18 Proben wurden Überlebens- und Reproduktionsrate von *Folsomia candida* nach 28 Tagen Exposition in einem Kompost- bzw. Gärgut-Boden Gemisch von 1:7,5 untersucht, was einer Ausbringungsmenge von 100 t TS/ha in einer Bodenschicht von 5 cm entspricht (Pohl 2006). Die beobachteten Effekte wurden mit einem Kontrollverfahren (der reine, in der Mischung verwendete Boden) verglichen. Die gestesteten Proben wurden im Rahmen der Monitoringstudie (Kap. 2.1) analysiert.

3 > Resultate und Diskussion

3.1 Monitoringstudie

3.1.1 Belastung von Kompost, Gärgut und Presswasser

Alle untersuchten Stoffklassen wurden gefunden mit Ausnahme von Nonylphenol (NP). Die Gehalte lagen meist im Bereich von $\mu\text{g}/\text{kg}$ TS (Tab. 2). Die höchsten Gehalte wiesen polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) auf mit Gehalten zwischen 600 und 12'470 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TS (Brändli et al. 2007a). Etwa 25 % der Proben lagen über dem Richtwert von 4000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TS gemäss ChemRRV (Anonym 2005). Die Gehalte waren höher im Vergleich zu den Werten aus der Literatur und nur wenig tiefer als die Konzentrationen in Klärschlamm (Median: 6688 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TS, Bereich: 1006–22'641 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TS; Berset und Holzer 1999). Ortho-substituierte polychlorierte Biphenyle (PCB) und polychlorierte Dibenzo-*p*-dioxine und -furan (PCDD/F) zeigten niedrigere Gehalte im Vergleich zu vorhandenen Daten (Brändli et al. 2005). Die rückläufigen PCB Konzentrationen dürften generell auf abnehmende Umweltkonzentrationen aufgrund des Verbots von PCB in den 1970er Jahren zurückzuführen sein (Sweetman und Jones 2000). Die Abnahme von PCDD/Fs wurde auch in Matrices wie Klärschlamm beobachtet (Rappe et al. 1997) und kann durch technologische Verbesserungen bei Kehrlichtverbrennung und industriellen Verfahren erklärt werden. Phthalate wurden in ähnlichen Konzentrationen wie in früheren Studien beobachtet (Brändli et al. 2005). Hexabromcyclododecan (HBCD), Tetrabrombisphenol A (TBBPA), perfluorierte Alkyl-Verbindungen (PFAS), decabromierte Diphenylether (decaBDE) und verschiedene Pflanzenschutzmittel (PSM) wurden in Kompost und Gärgut erstmals nachgewiesen (Brändli et al. 2007b). Die Konzentrationen lagen im niedrigen ppb Bereich (d.h. $\mu\text{g}/\text{kg}$ TS) mit Ausnahme von HBCD und der chlorierten Paraffine (CP) mit Gehalten zwischen 17 und 384 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TS. Das Vorkommen der untersuchten Stoffe in Kompost und Gärgut überrascht nicht, da sie in etlichen Matrices nachgewiesen wurden und sich in der Umwelt ausbreiten. Die Gehalte von PSM lagen für die einzelnen Wirkstoffe im niedrigen ppb Bereich. Fungizide und davon neuere Wirkstoffe wie Triazole waren die prominentesten Vertreter. Die Organochlorpestizide Endosulfan, DDT und Lindan wurden dagegen nicht gefunden, was auf die Wirksamkeit von Verboten und Verwendungseinschränkungen hinweist.

Die Gehalte in den verschiedenen Proben variierten für die meisten Stoffgruppen stark, d.h. in der Regel um Faktor 10 bis Faktor 50. Dies ist höher als die Schwankungsbreite von Schwermetallen in Kompost. Nur einzelne der untersuchten Schadstoffklassen korrelierten untereinander (Anhang 1) und mit weiteren untersuchten Parametern (z. B. Nährstoffe, Schwermetalle). Dies trifft auch auf die Fremdstoffe zu, was bedeutet, dass

die beobachteten Fremdstoffgehalte (totale Gehalte: 0 bis 2,5 %, Plastik: 0 bis 0,9 %) die Belastung von Kompost und Gärgut nicht beeinflussten (Anhang 1).

Die Gehalte von PAK, PCB, PCDD/F und PBDE in Kompost und Gärgut lagen über normalen Konzentrationen in Böden von Acker- und Grasland (Bucheli et al. 2004; Schmid et al. 2005; Sellström et al. 2006). DEHP weist eher höhere Gehalte in Böden als in Kompost auf (Langenkamp und Part 2001). In städtischen Gebieten oder an kontaminierten Standorten können aber die Böden gleich oder stärker belastet sein als Kompost und Gärgut. Gärgut wies tendenziell höhere Gehalte an organischen Schadstoffen im Vergleich zu Kompost auf (Ausnahmen: PCB, PCDD/Fs, PFAS). Die Konzentrationen in Presswasser waren in der Regel höher als diejenigen in Gärgut ausser für PCB und einzelne bromierte Flammschutzmittel.

3.1.2 Quellen von organischen Schadstoffen

Kompost aus urbanen Gebieten enthielt statistisch signifikant höhere Konzentrationen an PCB im Vergleich zu ländlichen Regionen. Die Gehalte der andern Stoffgruppen mit Ausnahme von PAK und HBCD waren in Kompost städtischer Herkunft ebenfalls höher (Unterschiede statistisch nicht signifikant; vgl. auch Bemerkung bezüglich Parameter in Kap. 2.1.1). Dies erscheint als plausibel, da diese Stoffe zu grossen Anteilen in Erzeugnissen und Bauten von urbanen Gebieten enthalten sind und freigesetzt werden, was zu höheren Emissionen im Vergleich zu ländlichen Regionen führt. Für diese Stoffe dürfte die atmosphärische Deposition ein wichtiger Eintragspfad sein.

Die Analyse von Markern und statistische Methoden wiesen auf Verbrennungsprozesse als Ursache der PAK Belastung hin. Diese können via atmosphärische Deposition oder Verfrachtung von Partikeln aus dem Strassenbereich in das Ausgangsmaterial von Kompost und Gärgut gelangen. Kompost mit Küchenabfällen wies statistisch signifikant höhere Gehalte an PSM auf. Dies ist mit grösster Wahrscheinlichkeit auf Rüstabfälle von behandeltem Gemüse und Früchten zurückzuführen (Taube et al. 2002). Eine weiter gehende Bezeichnung von Schadstoffquellen war aufgrund der verfügbaren Informationen zur Zusammensetzung der beprobten Chargen nicht möglich.

Tab. 2 > Gehalte der untersuchten Stoffe in Kompost, Gärgut und Presswasser in µg/kg TS

MW: Mittelwert; Med: Medianwert; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert

DL PCB in ng WHO-TEQ/kg TS und PCDD/F als ng I-TEQ (I-TEQ: International Toxicological Equivalents)

n: Anzahl der untersuchten Proben

	Kompost*				Gärgut**				Presswasser			
	MW	Med	Min-Max	n	MW	Med	Min-Max	n	MW	Med	Min-Max	n
PAK	3098	2750	600–10'047	56	5925	4202	2337–12'470	13	6565	5780	5445–9310	5
PCB	30	25	9–102	55	32	31	20–52	13	26	25	21–35	5
DL PCB	3,1	2,7	0,4–6,3	13	4,1	3,7	2,4–6,8	5	4,2	4,2	3,1–5,3	2
PCDD/F	5,6	4,0	0,5–21,0	13	3,2	2,7	1,3–6,6	5	6,1	6,1	3,8–8,5	2
pentaBDE	2,1	1,9	0,2–3,6	13	2,7	1,9	1,2–4,9	5	2,0	2,0	1,5–2,5	2
octaBDE	0,4	0,2	0,1–3,6	13	0,3	0,3	0,2–0,5	5	0,3	0,3	0,2–0,4	2
decaBDE	7,0	6,9	0,6–13,9	13	13,8	10,0	1,7–30,8	5	12,8	12,8	7,0–18,5	2
HBCD	83	47	17–234	13	187	174	98–372	5	43	43	30–56	2
TBBPA	0,6	0,5	0,1–2,3	13	0,9	1,0	0,4–1,5	5	1,6	1,6	1,0–2,3	2
6:2FTS/FT(U)CA	1,2	1,4	0,4–1,5 ¹	13	0,2	0,0	nd-0,9 ²	5	-	-	-	-
PFS	4,3	2,2	1,0–23,6	13	3,9	2,3	2,0–8,6	5	-	-	-	-
PFCA	3,5	2,2	1,3–9,9	13	4,1	3,1	2,4–6,6	5	-	-	-	-
FOSA/FOSE	0,1	0,2	0,0–0,3 ³	13	0,3	0,3	0,2–0,4 ⁴	5	-	-	-	-
PSM	57	40	18–171	13	105	82	30–257	7	169	169	155–182	2
CP	242	194	142–384	3	-	-	-	-	-	-	-	-
DEHP	240	212	145–395	4	1140	1140	295–1985	2	-	-	-	-
DBP	nd ⁵	nd	nd	4	nd	nd	nd-105	2	-	-	-	-
NP	nd	nd	nd	4	nd	nd	nd	2	-	-	-	-

* Komposte mit hohen Anteilen anderer Ausgangsmaterialien ausser Küchenabfällen und Grüngut (z. B. Hofdünger) sind nicht eingeschlossen.

Resultate dieser Proben: PAK (n=8): Median: 978 µg/TS (Bereich: 625–2954 µg/TS); PCB (n=9): Median: 16 µg/TS (Bereich: 6–536 µg/TS)

** Aufgeführt sind Resultate von Gärgut aus thermophilen Verfahren.

Gehalte von Gärgut aus mesophilen Verfahren (n=3): PAK: Median: 2314 µg/TS (Bereich: 947–3784 µg/TS); PCB: Median: 10 µg/TS (Bereich: 6–74 µg/TS)

¹ gefunden in 7 Proben; ² gefunden in 2 Proben; ³ gefunden in 7 Proben; ⁴ gefunden in 4 Proben; ⁵ nd: nicht gefunden

3.1.3 Frachten der Stoffe in die Böden

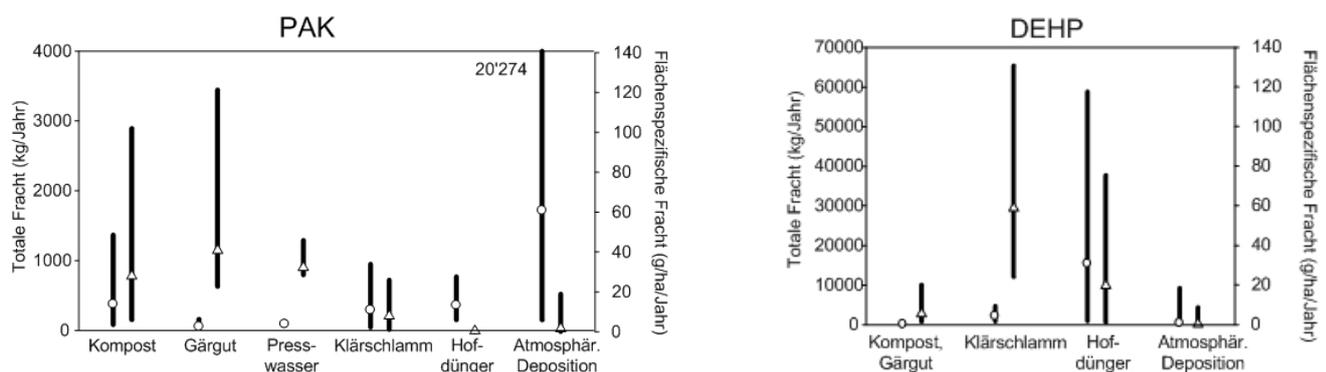
Die Bedeutung des Eintrags von organischen Schadstoffen in die Böden kann abgeschätzt werden, indem die Frachten in Kompost und Gärgut mit andern Quellen (Klärschlamm, Hofdünger, atmosphärische Deposition) verglichen werden. Dabei werden zwei Ansätze verfolgt: (a) die Gesamtfracht, welche in die landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz eingetragen wird und (b) die flächenspezifische Fracht (Fracht pro Hektare landwirtschaftliche Nutzfläche bei üblichen Ausbringungsmengen (normiert auf 70 kg P₂O₅), was für Kompost einer Menge von ca. 8 bis 10 t TS entspricht; die Berechnungsmethode ist in Brändli et al. (2007a,b) beschrieben). Im Folgenden werden die Resultate von PAK und DEHP diskutiert.

Die atmosphärische Deposition war die wichtigste Quelle von PAK für die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz (ca.1700 kg pro Jahr; Abb. 1). Die Fracht

in Kompost und Gärgut von 570 kg pro Jahr lag deutlich höher im Vergleich zu den andern Düngern und betrug ca. 20 % der Gesamtfracht. Die niedrige Fracht im Klärschlamm ist durch die abnehmende Verwertung in der Landwirtschaft im Zusammenhang mit dem Ausbringungsverbot ab Herbst 2006 zu erklären (für 2002: 21 % der gesamten Menge). Kompost und Gärgut verursachten bei weitem die höchste flächenspezifische Fracht. Dies ist auf den verhältnismässig hohen Gehalt in Kompost und Gärgut (z. B. 30–50 % der Konzentration im Klärschlamm; Berset und Holzer 1999) und verhältnismässig hohe Ausbringungsmengen zurückzuführen. Gärgut führte zu deutlich, Presswasser zu leicht höheren flächenspezifischen PAK Einträgen im Vergleich zu Kompost.

Abb. 1 > Frachten pro Jahr von PAK und DEHP aus der Anwendung von Kompost, Gärgut, Presswasser (für PAK) Klärschlamm, Hofdünger sowie atmosphärische Deposition

«○» entspricht der mittleren totalen Fracht in die landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz in kg/Jahr und «△» der mittleren flächenspezifischen Fracht (Fracht pro Hektare landwirtschaftlicher Nutzfläche bei üblichen Ausbringungsmengen -normiert auf 70 kg P₂O₅) in g/ha/Jahr. Die Säulen zeigen den Bereich (Minimum und Maximum) an.



Für DEHP, einer der wichtigsten Weichmacher, präsentiert sich ein anderes Bild. Die Frachten in Klärschlamm und Hofdünger waren höher im Vergleich zu Kompost und Gärgut. Ähnlich wie bei PAK dürfte die atmosphärische Deposition eine wichtige Eintragsquelle darstellen. Für Hofdünger wurde in der Studie von Fromme et al. (2002) Beschichtungen der Hofdüngerlagereinrichtungen als Quelle von DEHP vermutet. Infolge der Auswaschung von Weichmachern aus Kunststoffen spielen bei Klärschlamm Abwässer aus privaten Haushalten und aus der Industrie sowie der Abfluss von befestigten Flächen eine wichtige Rolle (Berset und Holzer 2001). Zudem ist DEHP unter aeroben Bedingungen gut abbaubar (Madsen et al. 1999; Staples et al. 1997) und es ist davon auszugehen, dass der Abbau während der Kompostierung höher ist als während der Behandlung von Klärschlamm bzw. der Lagerung von Hofdüngern.

Die beiden präsentierten Stoffe widerspiegeln die Spannweite des Beitrags von Kompost und Gärgut bezüglich Bodenbelastung. Bei PAK ist der Beitrag sehr hoch und bei DEHP niedrig. Die übrigen untersuchten Stoffe lagen dazwischen. Oft war aber die Datengrundlage ungenügend für einen Vergleich der Frachten.

3.2 Verhalten von organischen Schadstoffen während Kompostierung und Vergärung

Die Untersuchung zeigte, dass ein Abbau von PCB während der Kompostierung kaum stattfand (Brändli et al. 2007c). Dies wurde durch die Enantiomeren-Verhältnisse der chiralen PCB (PCB 95, 149 und 132) in Kompost und Gärgut bestätigt (Bucheli und Brändli 2006). Eine Verminderung der Gehalte während der Kompostierung wurde für die niedermolekularen PAK beobachtet. Die Resultate stimmen mit früheren Studien überein (z. B. Hund et al. 1999). Von den PSM wurden ca. 60 bis 90 % der einzelnen Stoffe zu mindestens 50 % eliminiert. Die Studie lieferte keine Informationen, ob die Elimination auf Verflüchtigung oder Abbau zurückzuführen war. Aufgrund von früheren Untersuchungen bzw. aufgrund der chemisch-physikalischen Eigenschaften der Stoffe ist davon auszugehen, dass ein Abbau von PAK und PSM zumindest teilweise stattfindet. Die Elimination der Substanzen während der Kompostierung wurde durch das Substrat (Grüngut mit/ohne Küchenabfälle, Gärgut) kaum beeinflusst. Das Verhalten der Stoffe in der Vergärung lieferte keine eindeutigen Befunde.

3.3 Ökotoxikologische Untersuchungen

3.3.1 Literatur basierte ökotoxikologische Risikoabschätzung

Für drei Substanzen (PCDD, PAK, PCB) waren genügend Daten vorhanden, um ein unannehmbares Risiko auszuschliessen (Aldrich und Daniel 2003). Für Atrazin oder Captan war bei Einarbeitung von Kompost in den Boden trotz gewisser Datenlücken kein erhöhtes Risiko zu erwarten. Für Bisphenol A war aufgrund fehlender Analysedaten von Kompost keine Berechnung der Konzentration im Boden möglich. Für diesen Stoff und für die weiteren 11 Substanzen (Chlorpyrifos, Cyprodinil, Folpet, Iprodion, Metolachlor, Phthalate, PBDE, Procymidon, Thiabendazol, Trifluralin, Vinclozolin) waren die Daten bezüglich ihrer ökotoxikologischen Wirkung für eine zuverlässige Risikoabschätzung nicht ausreichend.

3.3.2 Ökotoxikologische Tests

Verschiedene der geprüften Testmethoden erwiesen sich für ökotoxikologische Untersuchungen von Kompost und Gärgut als geeignet. Im Rahmen der Monitoringstudie zeigten 16 Proben eine hemmende und 13 Proben eine stimulierende Wirkung auf die Reproduktion von *Folsomia candida* (Pohl 2006). Statistisch signifikante Effekte wurden für 4 bzw. 5 Proben gefunden. Die Mortalität der adulten Tiere war in 14 Proben höher als 20 % (davon für 3 Proben statistisch signifikant). Zwischen Reproduktion und Mortalität der adulten Tiere bestand keine Korrelation. Die beobachteten Effekte korrelierten nicht mit den gefundenen Schadstoffgehalten. Möglicherweise können andere nicht untersuchte Stoffe (ev. auch «natürliche» Stoffe) Auswirkungen haben.

Für die Beurteilung der Toxizität der Proben wurde das Schema von Achazi et al. (2000) angewendet. Vier Proben wurden als wenig toxisch und die übrigen als nicht toxisch beurteilt. Dies stimmt mit Feld- und Laborstudien überein, die über positive Effekte für Collembolen (Petersen et al. 2003) oder andere Bodenorganismen (Hund et al. 1999) im Zusammenhang mit der Einbringung von organischer Substanz in die Böden mittels Verwendung von Klärschlamm oder Kompost berichtet haben.

In der Literatur wurden stimulierende Effekte auf die Reproduktion von Bodenorganismen im Zusammenhang mit einer geringen Belastung von Schadstoffen beschrieben (z. B. Erstfeld und Snow-Ashbrook 1999). Es ist allerdings noch nicht klar, ob diese Effekte positiv oder als Zeichen von Stress zu bewerten sind. In aquatischen Systemen wurden bei Mischungen von Schadstoffen und Vorliegen von Abbauprodukten bereits bei geringen Konzentrationen schädigende Wirkungen beobachtet (Junghans et al. 2006). Für solche Mechanismen fehlen die Kenntnisse bezüglich terrestrischer Systeme allerdings noch weitgehend.

Gesamthaft wiesen die Resultate der ökotoxikologischen Tests darauf hin, dass die Ausbringung von organischen Schadstoffen mittels Verwendung von Kompost und Gärgut kein unmittelbares Risiko für den Boden darstellt. Negative Auswirkungen können jedoch aufgrund der grossen Artenvielfalt und der Kenntnislücken bezüglich der terrestrischen Ökosysteme nicht vollständig ausgeschlossen werden.

3.4 Weitere Arbeiten

Verschiedene Untersuchungen sind noch im Gange: Statistische Auswertung der Schwermetalldaten (Agroscope ART), Verhalten von polybromierten Flammschutzmitteln während der Kompostierung (Empa Dübendorf) sowie Auswertung der FTIR Analysen und der Gehalte an organischen Schadstoffgehalten mittels Hauptkomponentenanalyse (BOKU Wien).

4 > Schlussfolgerungen

Die Resultate des vorliegenden Projekts liefern die bisher umfassendste Übersicht bezüglich organischer Schadstoffe in Kompost. Verschiedene Stoffe und Stoffklassen (PFAS, HBCD, TBBPA, decaBDEs und PSM) wurden erstmals nachgewiesen. Für Gärgut und Presswasser lagen bisher noch kaum Analysedaten von organischen Schadstoffen vor. Die meisten Verbindungen wurden in den Produkten von Kompostier- und Vergärungsanlagen in verhältnismässig niedrigen Konzentrationen gefunden. PAK, PCB und PCDD/F wiesen aber ähnlich hohe Konzentrationen wie etwa Klärschlamm auf. Die Gehalte waren für die meisten Stoffe höher als in landwirtschaftlich genutzten Böden, wo die Produkte eingebracht werden. Die Resultate zeigen, dass Kompost und Gärgut ähnlich wie Klärschlamm, dessen Ausbringungsverbot die Diskussion über organische Schadstoffe in Recyclingdüngern in Gang gebracht hat, mit einer grossen Vielfalt an Schadstoffen belastet sind. Zwei wesentliche Unterschiede zwischen Kompost/Gärgut und Klärschlamm sind jedoch zu betonen:

1. Für Kompost und Gärgut sind nur die atmosphärische Deposition und direkte Einträge als Pfade relevant, wogegen der Wasserpfad eine vergleichsweise deutlich höhere Stoffvielfalt in Klärschlamm verursacht. Stoffe wie Tenside, Arzneimittel oder Duftstoffe sind in Klärschlamm vorhanden, nicht aber in Kompost und Gärgut oder höchstens in geringsten Spuren zu erwarten (Marb et al. 2003).
2. Die Qualität von Kompost und Gärgut kann aufgrund von konzeptionellen und organisatorischen Massnahmen (z. B. Optimierung der Getrenntsammlung, gezielte Auswahl bzw. Ausschluss einzelner Chargen auf den Anlagen) weiter optimiert werden. Für Klärschlamm wäre eine vergleichbare Optimierung bei der heutigen Struktur der Siedlungsentwässerung nicht möglich.

Für einzelne Stoffe wie PAK beträgt die Fracht in Kompost und Gärgut rund 20 % des gesamten Eintrags in die landwirtschaftlichen Nutzflächen und ist daher nicht vernachlässigbar. Ein grosser Teil von Kompost und Gärgut dürfte auf Flächen in der näheren Umgebung der Anlagen ausgebracht werden. Es ist deshalb davon auszugehen, dass solche Parzellen verhältnismässig höheren Einträgen unterliegen (in der Grössenordnung der flächenspezifischen Frachten, vgl. Kap. 3.1.3). Kompost und Gärgut basieren weitgehend auf Abfällen aus urbanen Gebieten und werden grösstenteils auf landwirtschaftliche Nutzflächen ausgebracht¹. In urbanen Gebieten sind die Schadstoffemissionen generell höher als in ländlichen Regionen, was einen erhöhten Schadstoffgehalt von organischen Abfällen selbst bei getrennter Sammlung zur Folge hat. Dieser Zusammenhang konnte für verschiedene Stoffe im Rahmen der vorliegenden Studie

¹ Der Anteil der Fraktionen «Gartenbau» und «öffentlich Dienste» betrug für die Proben der vorliegenden Studie über 50 %. Sie stammen überwiegend von urbanen Flächen. Die Fraktionen «Grünabfuhr» und «Industrie» (55 % bzw. 16 % des gesamten Ausgangsmaterials) dürften insgesamt maximal zur Hälfte aus Material von landwirtschaftlich genutzten Flächen (z. B. Küchenabfälle) stammen. Man kann also davon ausgehen, dass rund 75 % des in Kompost und Gärgut enthaltenen Materials aus urbanen Gebieten stammt. Mehr als 70 % der gesamten Menge an Kompost und Gärgut werden in der Landwirtschaft eingesetzt (Estermann, Bartha-Pichler, 2005).

zumindest im Grundsatz bestätigt werden. Die heute praktizierte Verwertung von organischen Abfällen mittels Kompostierung und Vergärung hat daher zwangsläufig einen Nettofluss von Schadstoffen aus urbanen Gebieten in landwirtschaftliche Nutzflächen zur Folge.

Damit stellt sich die Frage nach den Auswirkungen der Schadstoffe im Boden. Dabei kann (a) auf der Grundlage von Stoffflüssen und Anreicherung der Stoffe im Boden sowie (b) von ökotoxikologischen Untersuchungen argumentiert werden:

- a) Stoffflüsse: Das Risiko betreffend Akkumulierung von organischen Schadstoffen im Boden wurde im Rahmen verschiedener Studien untersucht. Je nach Modell und Zielrichtung der Studien sind die Schlüsse unterschiedlich: Null-Anreicherung oder mittelfristige Überschreitung von Bodenrichtwerten (z. B. Amlinger et al. 2006; Brändli et al. 2007a,b). Die Resultate von verschiedenen Langzeitstudien haben bisher keine Hinweise gegeben auf Akkumulierung von Stoffen wie PAK, DEHP und NP im Boden (Hund et al. 1999; Petersen et al. 2003). Meist wurde postuliert, dass der biologische Abbau der Stoffe ihrer Anreicherung entgegenwirkt. Die Prozesse Eintrag und Abbau der Stoffe sind jedoch nicht allein entscheidend für die Anreicherung im Boden. Neben Parametern wie Austrag durch Erosion, Auswaschung, Verflüchtigung oder Export mit dem Erntegut, können weitere Faktoren wie Bioturbation oder präferenzielle Fliesswege zur Elimination von Stoffen aus dem Oberboden führen (McLachlan et al. 2002). Gewisse Bodenfraktionen (z. B. «Black carbon») haben eine hohe Affinität, die Stoffe zu binden, und somit deren Verfügbarkeit für die Bodenorganismen zu vermindern (Cornelissen et al. 2005). Es ist allerdings nicht ausreichend geklärt, ob sich so genannt sequestrierte Schadstoffe im Boden anreichern, mit der Zeit wieder freigesetzt und zu einem späteren Zeitpunkt toxikologisch wirksam oder abgebaut werden.
- b) Ökotoxikologische Untersuchungen gaben bisher keine unmittelbaren Hinweise auf ein Risiko. Auch Feldstudien zeigten keine oder nur geringe Auswirkungen infolge der Ausbringung von Recyclingdüngern (Bartl et al. 2002; Traulsen et al. 1997). Dennoch können Schadwirkungen nicht *a priori* ausgeschlossen werden. Im aquatischen Bereich wird das verbreitete Auftreten von Schadstoffen als eines der zentralen Probleme der Zukunft betrachtet (Schwarzenbach et al. 2006). Es gibt Hinweise, dass die Problematik für terrestrische Ökosysteme vergleichsweise niedriger ist (geringere Verfügbarkeit der Stoffe, höheres Abbaupotential aufgrund biologischer Aktivität etc.). Der Kenntnisstand für den Boden ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch begrenzt. Mit ökotoxikologischen Tests wird nur ein Teil der Bodenorganismen erfasst. Auswirkungen auf empfindliche Arten und auf Lebensgemeinschaften sind nicht bekannt. Zudem sind die Auswirkungen für Böden gravierend, sollten sie bezüglich Belastung einen kritischen Zustand erreicht haben, da sich die Schadstoffe aus dem Boden kaum oder höchstens sehr langfristig eliminieren lassen.

Nach Abwägung der Düngewirkung und weiterer nutzbringender Wirkungen (Amlinger et al. 2006; Fuchs et al. 2004) gegen bekannte und potentielle Schadeffekte unter Berücksichtigung der Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Bewertung erscheint ein Ausstieg aus der Verwertung von Kompost und Gärgut aus getrennt gesammelten Abfällen

urbaner Herkunft als weder nötig noch verhältnismässig. Das System sollte jedoch aufgrund folgender Faktoren weiter optimiert werden:

- a) Grosse Spannbreite der Gehalte von organischen Schadstoffen (Faktor 10 bis 50). Ein unmittelbarer Handlungsbedarf besteht für PAK aufgrund der häufigen Überschreitung des Richtwerts gemäss ChemRRV.
- b) Netto-Stoffflüsse von urbanen Gebieten in landwirtschaftliche Nutzflächen.
- c) Unvollständig geschlossener Stoffkreislauf innerhalb der Landwirtschaft (z. B. Verlagerung von Stoffen aus Südeuropa nach Mitteleuropa durch den Import von tropischen Früchten).
- d) Kenntnislücken bezüglich Auswirkungen der Schadstoffe (z. B. mögliche additive Wirkung der Vielzahl von Schadstoffen, begrenzte Anzahl getesteter Organismen in Ökotoxizitätstests, Langzeitverhalten der Stoffe im Boden).

Die Notwendigkeit zur Optimierung basiert also nicht auf einem unmittelbar nachweisbaren Risiko sondern auf dem offensichtlich vorhandenen Potential zur Minimierung der Schadstoffbelastung (a), der suboptimalen Konzeption des Systems (b, c) und potentieller Risiken, die heute nicht ausreichend beurteilt werden können (d). Zudem dient die Optimierung des bestehenden Systems auch der Imagepflege der Produkte. Ein Konzept zur Qualitätssicherung von Produkten wie Kompost und Gärgut aus getrennt gesammelten Abfällen sollte grundsätzlich Aspekte wie weitestgehend mögliche Absenz von Schadstoffen einbeziehen, auch wenn diese gesetzlich nicht reguliert sind.

Im Hinblick auf eine möglichst umweltfreundliche und nachhaltige stoffliche Verwertung von getrennt gesammelten organischen Abfällen werden im folgenden Kapitel Empfehlungen bzw. kurz- bis mittelfristige Massnahmen, Strategien und Perspektiven zur Optimierung des Systems zur Produktion und der Verwendung von Kompost und Gärgut aus getrennt gesammelten Abfällen skizziert. Die Co-Vergärung sowie Stoffflüsse im Zusammenhang mit der energetischen Verwertung von Biomasse werden aufgrund ihrer zunehmenden Bedeutung in die Empfehlungen integriert.

5 > Empfehlungen

Aus den Schlussfolgerungen können folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

1. Reduktion der PAK-Belastung von Kompost, Gärgut und Presswasser,
2. Monitoring von organischen Schadstoffen zur Reduktion der Risiken bezüglich Auswirkungen auf den Boden,
3. Verbesserung der Kenntnisse der relevanten Prozesse für die Bodenbelastung und der Auswirkungen von Schadstoffen (Stoffflüsse, Verhalten und ökotoxikologische Effekte von organischen Schadstoffen in Böden),
4. Verbesserung der Kenntnisse von Ausgangsmaterialien, die zur Verwendung als Substrate in Co-Vergärungsanlagen in Frage kommen.

5.1 Kurzfristige Massnahmen

Im Folgenden werden Massnahmen zur Umsetzung der Empfehlungen aufgeführt. Die Massnahmen sind gegliedert in Zielsetzung, Zielgruppen, Vorgehen, geschätzte Kosten, erwarteter Nutzen und Zeithorizont.

5.1.1 PAK-Gehalte von Kompost, Gärgut und Presswasser

- | | |
|--|-------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> > Oberziel: Risikominderung bezüglich Bodenbelastung > Projektziel: Verminderung PAK-Belastung von Kompost, Gärgut und Presswasser | Zielsetzung |
| <ul style="list-style-type: none"> > Anlagenbetreiber, Branche und Verbände > Behörden (Bund und Kantone: vgl. ChemRRV, Anhang 2.6., Ziff. 4, Abs. 2) | Zielgruppen |
| <ul style="list-style-type: none"> > Abklärung der Faktoren, welche erhöhte PAK Gehalte in Kompost, Gärgut und Presswasser verursachen. > Bezeichnung von belasteten Ausgangsmaterialien. > Erarbeiten von Massnahmen zur Verminderung der Belastung. > Die Untersuchung kann auf Endprodukte und/oder Ausgangsmaterialien basieren. Bei Untersuchung der Endprodukte ist eine detaillierte Erfassung sämtlicher Chargen von Ausgangsmaterialien erforderlich, die im Endprodukt enthalten sind. Denkbar ist eine Etappierung der Studie. > Diese Studie sollte mit einer Weiterentwicklung der analytischen Methoden kombiniert werden. Die vorliegende Studie zeigte, dass Analysewerte von PAK in Abhängigkeit der Probenvorbereitung und Analyse stark schwankten. Mehrfachbestimmungen von identisch aufbereiteten und analysierten Proben wiesen Abweichungen von bis zu mehreren 100 % auf (bei solchen Proben wurden die Konzentrationen durch Mehrfachbestimmungen und statistischer Methoden bestimmt). Dies deutet darauf hin, dass auch (vermeintlich) sachgerecht behandelte Proben hinsichtlich ihres Schadstoffgehaltes (PAK und Schwermetalle) heterogen sein können. Des Weiteren sind Analysewerte von der gewählten Methode abhängig, insbesondere von der Extraktion. Analytische Methoden, welche für Böden, Klärschlamm oder andere feste Proben entwickelt wurden, sind für Kompost nur beschränkt tauglich insofern, als dass sie in der Regel nicht die beste Extraktionseffizienz aufweisen. Zu den Punkten Probenaufbereitung und Analyse gesellt sich als Drittes die Problematik der reproduzierbaren Probenahme. Diese ist schlecht untersucht und deren Einfluss auf Datenvariabilität deshalb schwer abzuschätzen. Für die Qualitätskontrolle und den Vollzug sind die Kenntnisse in diesem Bereich ungenügend. Die Problematik ist für die Schwermetalle grundsätzlich dieselbe, spielt im Vollzug aber eine geringere Rolle, da die Gehalte in der Regel weit unterhalb der Grenzwerte liegen. Da bei PAK rund 25 % der Proben über dem Richtwert gemäss ChemRRV liegen, sind Optimierung und Standardisierung der analytischen Methoden sehr wichtig für zukünftige Untersuchungen. > Im Rahmen dieser Studie sollten zudem weitere Proben von Presswasser analysiert werden. Begründung: Presswasser weist höhere Gehalte von Nähr- als auch von Schadstoffen (Schwermetalle und organische Schadstoffe) als Kompost und Gärgut auf. Wegen der relativ grossen Menge von Presswasser sind weitere Analysen zu empfehlen. | Vorgehen |
| <ul style="list-style-type: none"> > Verbesserung der Endproduktqualität > Risikominderung bezüglich Bodenbelastung > Verbesserung der Positivliste > Imagepflege bezüglich Endprodukte | Erwarteter Nutzen |

5.1.2 Periodisches Monitoring von organischen Schadstoffen

- > Oberziel: Risikominderung bezüglich Bodenbelastung
- > Projektziele:
 - Kenntnis der aktuellen Situation der Belastung von Kompost, Gärgut und Presswasser mit organischen Schadstoffen
 - Verminderung Belastung von Kompost, Gärgut und Presswasser
 - Erkennen von stärker belasteten Ausgangsmaterialien
 - Früherkennung möglicher Probleme und neuer potentieller Problemstoffe

Zielsetzung

- > Anlagenbetreiber, Branche und Verbände
- > Abnehmer
- > Behörden (Bund und Kantone: vgl. ChemRRV, Anhang 2.6., Ziff. 4, Abs. 2)

Zielgruppen

Gemäss ChemRRV, Anhang 2.6., Ziff. 4, Abs. 1 untersucht das BAFU in den fachlich gebotenen Zeitabständen den PAK-, Dioxin- und Furangehalt von Kompost, Gärgut und Presswasser. Ein fachlich gebotener Zeitabstand dürfte höchstens 5 Jahre betragen. Es wird empfohlen, ca. alle 10 Jahre eine erweiterte Palette von organischen Schadstoffen zu untersuchen. Dazu gehören die im vorliegenden Projekt untersuchten Stoffklassen. Aufgrund der geringen Anzahl signifikanter Korrelationen zwischen verschiedenen Schadstoffklassen können die Untersuchungen nur sehr begrenzt auf einzelne «Marker» reduziert werden. Einzelstoffanalysen dürften auch in Zukunft erforderlich sein. Der Einbezug weiterer Stoffklassen ist aufgrund des künftigen Kenntnisstands zu diskutieren. Das periodische Monitoring sollte auf einem Beobachtungsnetz basieren soweit möglich. Die Vorteile von Beobachtungsnetzen für Monitoringzwecke wurden im Rahmen der nationalen Bodenbeobachtung Nabo (www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/fachgebiete/fg_boden/nabo/index.html) und des Monitorings basierend auf Klärschlamm Projekt SEA (<http://www.sea.eawag.ch/>) beschrieben. Kompostier- und Vergärungsanlagen sind einer grösseren Dynamik unterworfen als etwa Kläranlagen oder Bodenbeobachtungsstandorte. Trotzdem dürfte es sich lohnen, Untersuchungen möglichst an den gleichen Standorten durchzuführen (Vorteile: Optimierung des Aufwands für die Beprobungskampagnen, Möglichkeit der Erstellung von Zeitreihen, Zusammenarbeit mit Anlagebetreibern etc.). Als Grundlage für die Erstellung eines Beobachtungsnetzes (Anlagen, Klassierung der Anlagen) können die im vorliegenden Projekt untersuchten Anlagen verwendet werden.

Vorgehen

Vorgängig ist ein Konzept für ein periodisches Monitoring zu erstellen, welche die folgenden Elemente beinhaltet:

- > Definition des fachlich gebotenen Zeitabstands gemäss ChemRRV, Anhang 2.6., Ziff. 4, Abs. 2
- > Anzahl der zu untersuchenden Proben
- > Auswahl der zu beprobenden Anlagen und Produkte
- > Auswahl der zu untersuchenden Stoffe
- > Verbesserung der Endproduktqualität
- > Risikominderung bezüglich Bodenbelastung
- > Imagepflege bezüglich Endprodukte

Erwarteter Nutzen

5.1.3 Netto-Stoffflüsse in landwirtschaftliche Nutzflächen

- > Oberziel: Risikominderung bezüglich Bodenbelastung
- > Projektziele:
 - Verbesserung der Kenntnisse von Stoffflüssen zwischen urbanen Gebieten/weiterer Flächen (z. B. Wald) und landwirtschaftlichen Nutzflächen
 - Abschätzung des Risikos von verhältnismässig stärker belasteten Flächen

Zielsetzung

- > Branchen und Verbände
- > Behörden (Bund und Kantone)

Zielgruppen

Das Verständnis der Stoffflüsse zwischen urbanen Gebieten und landwirtschaftlichen Nutzflächen im Zusammenhang mit der Verwertung von Kompost und Gärgut aus getrennt gesammelten Abfällen sollte verbessert werden. Der Einbezug weiterer aktueller oder zukünftig relevanter Stoffe wird empfohlen: z. B. Rückstände der energetischen Verwertung von Biomasse (z. B. Wald oder Naturschutz-Flächen etc.). Ferner sollte die räumliche Verteilung der Stoffflüsse besser untersucht werden (z. B. Nutzung der Möglichkeiten von GIS-Methoden; vgl. auch Keller et al. 2001, 2002). Das Vorgehen kann wie folgt skizziert werden:

Vorgehen

- > Erhebung der Abfallfraktionen und Stoffmengen von urbanen Gebieten
- > Abschätzung der künftigen Stoffflüsse aus der energetischen Verwertung von Biomasse
- > Erhebung der Ausbringungsflächen
- > Darstellung und Interpretation der regionalen Stoffflüsse

- > Grundlage für verbessertes Risikomanagement
- > Risikominderung bezüglich Bodenbelastung

Erwarteter Nutzen

5.1.4 Qualität von Substraten für die Co-Vergärung und von deren Endprodukten

- > Oberziel: Risikominderung bezüglich Bodenbelastung
- > Projektziele:
 - Inventar der für die Co-Vergärung verwendeten Substrate und der dazu vorhandenen Informationen
 - Kenntnis der Stoffflüsse
 - Früherkennung möglicher Risiken bezüglich Schadstoffe

Zielsetzung

- > Anlagenbetreiber, Branche und Verbände
- > Abnehmer
- > Behörden (Bund und Kantone)

Zielgruppen

Vorprojekt: Literaturstudie

Vorgehen

- > Erstellung eines Inventars bereits heute auf Co-Vergärungsanlagen verwendeter und weiterer potentieller Substrate

- > Abschätzung der Belastung der Substrate mittels Literaturstudie und Erhebungen auf Betriebsstufe
- > Beschreibung der Stoffflüsse
- > Erstellung eines Konzepts betreffend Monitoring (ev. Einbezug in Monitoringkampagnen gemäss Kap. 5.1.2)
- > Risikominderung bezüglich Bodenbelastung
- > Qualitätssicherung der Co-Vergärung auf landwirtschaftlichen Betrieben

Erwarteter Nutzen

5.1.5 Langzeitverhalten und Auswirkungen von organischen Schadstoffen in Böden

- > Oberziel:
 - Risikominderung bezüglich Bodenbelastung
- > Projektziele:
 - Verbesserung der Kenntnisse von Langzeitverhalten (Sorption, Desorption, Abbau, Verlagerung etc.) von organischen Schadstoffen in Böden
 - Verbesserung der Kenntnisse bezüglich Auswirkungen von organischen Schadstoffen in Böden
- > Behörden (Bund und Kantone)
- > Wissenschaft
- > Branche und Verbände

Zielsetzung

Zielgruppen

Wie in Kap. 4 beschrieben sind die Kenntnisse bezüglich Langzeitverhalten von organischen Schadstoffen in Böden gering. Verschiedene Prozesse (z. B. Sorption, Desorption) können deren Verhalten beeinflussen. Zudem kann die Form, in der die Stoffe eingetragen werden eine Rolle spielen. So dürften sich etwa Stoffe, die in Kompost enthalten sind (Sorption an eine organische Matrix oder an Tonmineralien), anders verhalten als Substanzen, welche an Partikel wie z. B. Russ gebunden via atmosphärische Deposition in Böden gelangen. Diese Zusammenhänge sollten eingehender abgeklärt werden. Bezüglich Auswirkungen von organischen Schadstoffen sollten die ökotoxikologischen Testmethoden weiter verbessert werden. Insbesondere sollten weitere Testorganismen einbezogen werden. Das Vorgehen müsste im Rahmen eines Vorprojekts ausgearbeitet werden.

Vorgehen

- > Grundlage für verbessertes Risikomanagement
- > Risikominderung bezüglich Bodenbelastung

Erwarteter Nutzen

5.2 Mittelfristige Massnahmen, Strategien und Perspektiven

5.2.1 Grundsätze

Grundsätzlich sollten Abfälle bei der Wiederverwendung möglichst wenig abgewertet werden. Dies bedeutet, dass etwa für Speisereste die Verwendung als Futtermittel Priorität hat. Biogene organische Abfälle werden nach Möglichkeit als Dünger in den Boden zurückgeführt. Es ist plausibel und allgemein anerkannt, dass bei Einhaltung dieser Grundsätze am ehesten Energie und Rohstoffe eingespart werden können².

Daraus ergibt sich die folgende Priorisierung:

1. Stoffliche Verwertung als Futtermittel oder Rohstoff für die Industrie soweit geeignet
2. Stoffliche Verwertung als Dünger, Bodenverbesserer und ähnliche Erzeugnisse oder kombinierte energetische Verwertung und stoffliche Verwertung des Rückstands
3. Energetische Verwertung (Verbrennung u.ä. mit Deponierung des Rückstands)³.

Diese Priorisierung ist aus stofflicher und energetischer Sicht sinnvoll. Bezüglich Schadaspekte sind weitere Grundsätze zu beachten. Insbesondere ist bei der Verwendung von Produkten, die aus Abfällen hergestellt werden, dem Schutz der Umwelt und insbesondere des Bodens Priorität einzuräumen. Dies bedeutet, dass solche Erzeugnisse nur abgegeben und verwendet werden sollen, wenn Eignung und Umweltverträglichkeit bei fachgerechter Verwendung sichergestellt sind und ein Bedarf im Pflanzenbau vorhanden ist. Die Eignung der Produkte ist gegeben, wenn sie (Anonym 1999):

- > der Pflanzenernährung dienen, eine Verbesserung der physikalischen, chemischen oder biologischen Eigenschaften des Bodens bewirken oder andere Nutzwirkungen für den Pflanzenbau aufweisen,
- > zur Einsparung von nicht erneuerbaren Rohstoffen und von Energie sowie zum Schliessen von Stoffkreisläufen beitragen.

Die Umweltverträglichkeit von Produkten, die aus Abfällen hergestellt werden, ist gegeben, wenn bei ihrer Verwendung eine Gefährdung der Umwelt und insbesondere eine Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit im Sinne der VBBo (Anonym 1998) ausgeschlossen werden kann. Dies setzt nach heutigem Wissensstand voraus, dass die Böden nicht weiter mit Schadstoffen angereichert werden. Dazu muss der Schadstoffeintrag in die Böden minimiert werden, so dass mittelfristig ein Gleichgewicht zwischen dem Eintrag von bekannten und potentiellen Schadstoffen und dem Austrag (z. B. durch Ernteprodukte, Auswaschung, Abbau) nahezu oder vollständig erreicht wird (Candinas et al. 1999).

² Diese Prinzipien können aufgrund von Sachzwängen oft nicht umgesetzt werden (z. B. Verfütterungsverbot von Speiseabfällen an Schweine in der EU aufgrund Veterinär-hygienischer Vorgaben).

³ Die Entsorgung in KVA ist eine Form der energetischen Verwertung. Die Beseitigung durch Deponierung hat heute in der Schweiz nur noch eine sehr geringe Bedeutung.

5.2.2 Umsetzung

Ein gewisser Schadstoffeintrag (z. B. über atmosphärische Deposition) ist momentan unvermeidbar. Um die Böden möglichst zu entlasten, sollten Stoffe, die nicht aus dem landwirtschaftlichen Stoffkreislauf oder aus einem unvollständig geschlossenen landwirtschaftlichen Stoffkreislauf stammen, hohe Anforderungen bezüglich Schadstoffbelastung erfüllen. Ob dies heute für organische Schadstoffe gewährleistet ist, lässt sich trotz grossen Fortschritten bezüglich Endproduktqualität, Qualitätssicherung und Prozesskontrolle auf den Anlagen nicht mit Sicherheit bejahen. Anlagenbetreiber, deren Ertrag weitgehend aus der Annahme und Verarbeitung von Abfällen resultiert, sind an einer möglichst hohen Verarbeitungsmenge interessiert. Dabei besteht ein gewisses Risiko, dass auch Materialien behandelt werden, welche die Qualität der hergestellten Produkte bezüglich Schadstoffbelastung vermindert. Diese Tendenz könnte sich in Zukunft verstärken, wenn sich die Nachfrage nach organischem Material für die Einspeisung in Co-Vergärungsanlagen erhöht. Zudem kann die Aufbereitung von Abfällen zu Düngern die kostengünstigere Lösung als andere Arten der Verwertung oder als die Verbrennung in KVA darstellen. Eine mittel- bis langfristige Optimierung des bestehenden Systems kann mit folgenden Massnahmen erreicht werden:

- a) Konsequenterer Auswahl von qualitativ hochwertigen Chargen für die stoffliche Verwertung. Weniger hochwertige und/oder effektiv oder potenziell stärker belastete Materialien (z. B. Material aus dem Strassenbereich) könnten statt für die stoffliche zur energetischen Verwertung genutzt werden⁴. Die Triage auf den bestehenden Kompostier- und Vergärungsanlagen, welche über Einrichtungen und Know-how bereits weitgehend verfügen, wäre denkbar.
- b) Verbesserte Überprüfung der Inputmaterialien. Gerade bei Stoffen aus der Industrie ist eine gute Kenntnis von Produktionsprozessen notwendig, um die Belastung beurteilen zu können. Vielfach dürfte auch eine verbesserte Abklärung der Herkunft der Stoffe notwendig sein⁵.

Die tolerierbare Schadstoffbelastung könnte in einem bestimmten Ausmass der Notwendigkeit bezüglich Nutzwirkungen angepasst werden. Dies würde bedeuten, dass eine höhere Toleranz besteht bei hohem Bedarf an Nutzwirkungen (z. B. Bodenverbesserung im Falle von degradierten Böden). Bei niedrigem Bedarf bezüglich Nutzwirkungen wie in Schweiz wären die Toleranz geringer bzw. die Anforderungen strenger.

In Zukunft ist mit einer starken Zunahme der energetischen Nutzung von Biomasse zu rechnen. Die Verwertung der Rückstände als Dünger oder Bodenverbesserungsmittel dürfte eine wichtige Rolle spielen, was zu bedeutenden Netto-Stoffflüssen in Richtung

⁴ In der energetischen Nutzung von Biomasse läuft momentan eine dynamische Entwicklung ab, welche zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit dieses Verwertungspaths führen dürfte.

⁵ Die Einschleusung von stark belasteten Materialien in die Herstellung von Düngern kann auch heute nicht vollständig ausgeschlossen werden, wie ein Beispiel aus Nordrhein Westfalen dieses Jahr gezeigt hat. Hier wurde ein Produkt, das stark mit perfluorierten Verbindungen (PFAS) belastet war, auf landwirtschaftlich genutzte Böden ausgebracht. Die gut löslichen PFAS wurden ausgewaschen und verschmutzten das Oberflächen und Trinkwasser eines grösseren Gebiets. Das Produkt enthielt eine Mischung aus Abwasserschlämmen aus der Nahrungs- und Genussmittelindustrie und Gesteinsmehl. Deren Aufbringung auf landwirtschaftliche Flächen nach der Bioabfallverordnung und deren Inverkehrbringen nach Düngemittelverordnung sind zulässig (weitere Informationen unter <http://www.munlv.nrw.de/sites/presse/titel.htm>).

landwirtschaftlicher Nutzflächen führen würde. Die Umweltverträglichkeit müsste vorgängig sorgfältig diskutiert und geprüft werden.

5.2.3 **Zukünftige Zusammenarbeit und Stakeholderplattformen**

Eine möglichst umfassende und selbstkritische Reflexion von Handlungen und Strategien ist die beste Voraussetzung zur Optimierung und damit einer langfristigen und nachhaltigen Sicherung der stofflichen Verwertung von organischen Abfällen. Im Rahmen der beiden Projekte über Nutz- und Schadaspekte von Kompost und Gärgut wurden die Kompetenzen von Exponenten und Institutionen der beiden Richtungen in der Schweiz vereinigt. Eine fruchtbare Zusammenarbeit wurde lanciert, die in Zukunft weiter vertieft werden sollte. Die bisher involvierten Disziplinen Kompostwirtschaft, Pflanzenbauwissenschaften, Umweltchemie und Ökotoxikologie sind durch die Fachbereiche Bodenwissenschaften und Stoffhaushalt zu ergänzen. Dadurch ist es möglich, den Kenntnisstand weiter zu verbessern und potentielle Probleme frühzeitig zu erkennen. Dieselben Grundsätze sollten auch für den aufstrebenden Bereich der Energiegewinnung aus Biomasse angewendet werden.

Generell scheinen bisher die Prozesse zur Entscheidungsfindung im Bereich der Verwertung von organischen Abfällen aus der getrennten Sammlung eher von der Angebotsseite bzw. von den Betreibern der Anlagen und ihren Verbänden geprägt zu sein. Ein verstärkter Einbezug der Abnehmerseite, insbesondere der Landwirtschaft, sowie von Bodenschutz und Stoffhaushalt zwecks Erweiterung der Kenntnisse, Ausgleichs der verschiedenen Interessen und breiterer Abstützung der Entscheidungen ist zu empfehlen.

> Anhang

A1 Korrelationen

Korrelationen zwischen den verschiedenen Klassen der untersuchten organischen Schadstoffe, Schwermetallen, Nährstoffen, organischer Substanz und Fremdstoffen

*Aufgrund zu geringer Anzahl Analysewerte bzw. nicht detektierbar Korrelationen nicht bestimmt: CP, NP.
Fett gedruckt: statistisch signifikant $p < 0,05$.*

	PAK	PCB	DL PCB	PCDD/F	PBDE	Penta BDE	Octa BDE	HBCD	TBBPA	PFAS	PSM	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Org. Substanz	P	K	Ca	Mg	Fremdst. total	Fremdst. Plastik
PAK	1,00	0,07	0,07	-0,33	0,01	-0,16	0,38	0,38	0,05	-0,21	0,40	-0,01	-0,25	-0,10	-0,07	-0,25	0,04	0,00	0,31	0,21	0,26	0,01	-0,05	0,22	0,21
PCB	0,07	1,00	0,71	0,00	0,23	0,12	-0,05	0,20	0,13	0,34	-0,01	-0,05	-0,10	-0,01	0,34	-0,09	0,13	0,14	-0,07	0,04	-0,13	0,00	-0,12	-0,01	-0,09
DL PCB	0,07	0,71	1,00	0,42	0,60	0,48	-0,11	0,13	0,40	0,56	0,17	0,28	-0,03	0,15	0,54	0,06	0,25	0,34	0,06	0,01	-0,28	0,04	-0,16	-0,23	-0,22
PCDD/F	-0,33	0,00	0,42	1,00	0,36	0,59	-0,12	-0,31	0,13	0,44	-0,17	0,15	0,27	0,25	0,39	0,34	0,24	0,34	-0,09	-0,01	-0,02	-0,27	-0,03	-0,06	-0,01
PBDE	0,01	0,23	0,60	0,36	1,00	0,86	-0,03	-0,13	0,26	0,59	0,08	0,02	0,22	0,53	0,34	-0,12	0,10	0,16	0,34	0,21	-0,01	-0,22	-0,07	-0,11	-0,05
PentaBDE	-0,16	0,12	0,48	0,59	0,86	1,00	-0,04	-0,25	0,30	0,49	-0,01	0,03	0,12	0,41	0,24	-0,14	0,03	0,07	0,29	0,07	-0,01	-0,24	-0,12	-0,20	-0,12
OctaBDE	0,38	-0,05	-0,11	-0,12	-0,03	-0,04	1,00	0,11	-0,02	-0,08	0,12	0,17	0,08	-0,12	0,03	-0,05	0,24	0,27	0,21	0,56	0,69	0,16	-0,21	-0,06	-0,06
HBCD	0,38	0,20	0,13	-0,31	-0,13	-0,25	0,11	1,00	-0,13	-0,34	0,64	0,21	-0,34	-0,22	-0,21	-0,41	0,02	-0,13	-0,29	-0,07	-0,20	0,68	0,23	-0,11	-0,10
TBBPA	0,05	0,13	0,40	0,13	0,26	0,30	-0,02	-0,13	1,00	0,49	0,17	-0,05	-0,25	-0,12	0,03	-0,12	-0,18	-0,16	0,34	-0,24	-0,34	0,25	-0,36	-0,14	-0,16
PFAS	-0,21	0,34	0,56	0,44	0,59	0,49	-0,08	-0,34	0,49	1,00	-0,12	-0,04	0,42	0,65	0,56	0,56	0,04	0,24	-0,06	0,19	-0,06	-0,14	-0,02	0,24	0,27
PSM	0,40	-0,01	0,17	-0,17	0,08	-0,01	0,12	0,64	0,17	-0,12	1,00	0,07	-0,48	-0,38	-0,33	-0,48	0,13	-0,12	0,10	-0,18	-0,15	0,55	-0,30	0,02	0,12
Cd	-0,01	-0,05	0,28	0,15	0,02	0,03	0,17	0,21	-0,05	-0,04	0,07	1,00	0,05	-0,04	0,17	0,03	0,76	0,65	-0,02	-0,10	0,02	-0,12	-0,13	-0,39	-0,44
Co	-0,25	-0,10	-0,03	0,27	0,22	0,12	0,08	-0,34	-0,25	0,42	-0,48	0,05	1,00	0,73	0,18	0,63	0,19	0,25	-0,33	0,34	0,26	-0,47	0,20	0,11	0,12
Cr	-0,10	-0,01	0,15	0,25	0,53	0,41	-0,12	-0,22	-0,12	0,65	-0,38	-0,04	0,73	1,00	0,42	0,50	0,01	0,17	-0,28	0,39	0,09	-0,36	0,50	0,30	0,30
Cu	-0,07	0,34	0,54	0,39	0,34	0,24	0,03	-0,21	0,03	0,56	-0,33	0,17	0,18	0,42	1,00	0,53	0,34	0,66	-0,03	0,45	0,21	-0,24	0,31	0,02	-0,02
Ni	-0,25	-0,09	0,06	0,34	-0,12	-0,14	-0,05	-0,41	-0,12	0,56	-0,48	0,03	0,63	0,50	0,53	1,00	0,20	0,38	-0,43	0,22	0,15	-0,34	0,14	0,41	0,39
Pb	0,04	0,13	0,25	0,24	0,10	0,03	0,24	0,02	-0,18	0,04	0,13	0,76	0,19	0,01	0,34	0,20	1,00	0,88	0,24	0,27	0,36	-0,39	-0,22	-0,06	-0,09
Zn	0,00	0,14	0,34	0,34	0,16	0,07	0,27	-0,13	-0,16	0,24	-0,12	0,65	0,25	0,17	0,66	0,38	0,88	1,00	0,16	0,49	0,52	-0,44	-0,01	-0,05	-0,10
Org.Subst.	0,31	-0,07	0,06	-0,09	0,34	0,29	0,21	-0,29	0,34	-0,06	0,10	-0,02	-0,33	-0,28	-0,03	-0,43	0,24	0,16	1,00	0,20	0,28	-0,28	-0,50	0,02	-0,02
P	0,21	0,04	0,01	-0,01	0,21	0,07	0,56	-0,07	-0,24	0,19	-0,18	-0,10	0,34	0,39	0,45	0,22	0,27	0,49	0,20	1,00	0,84	-0,29	0,29	0,31	0,27
K	0,26	-0,13	-0,28	-0,02	-0,01	-0,01	0,69	-0,20	-0,34	-0,06	-0,15	0,02	0,26	0,09	0,21	0,15	0,36	0,52	0,28	0,84	1,00	-0,32	0,00	0,17	0,16
Ca	0,01	0,00	0,04	-0,27	-0,22	-0,24	0,16	0,68	0,25	-0,14	0,55	-0,12	-0,47	-0,36	-0,24	-0,34	-0,39	-0,44	-0,28	-0,29	-0,32	1,00	-0,02	-0,16	-0,11
Mg	-0,05	-0,12	-0,16	-0,03	-0,07	-0,12	-0,21	0,23	-0,36	-0,02	-0,30	-0,13	0,20	0,50	0,31	0,14	-0,22	-0,01	-0,50	0,29	0,00	-0,02	1,00	0,12	0,06
Fremdstoffe total	0,22	-0,01	-0,23	-0,06	-0,11	-0,20	-0,06	-0,11	-0,14	0,24	0,02	-0,39	0,11	0,30	0,02	0,41	-0,06	-0,05	0,02	0,31	0,17	-0,16	0,12	1,00	0,97
Fremdstoffe Plastik	0,21	-0,09	-0,22	-0,01	-0,05	-0,12	-0,06	-0,10	-0,16	0,27	0,12	-0,44	0,12	0,30	-0,02	0,39	-0,09	-0,10	-0,02	0,27	0,16	-0,11	0,06	0,97	1,00

> Verzeichnisse

Literatur

- Achazi R.K., Römke J., Riepert F. 2000: Collembolen als Testorganismen. In: Toxikologische Beurteilung von Böden (Heiden S., Erb R., Dott W., Eisenträger A., eds.), Spektrum Verlag, Heidelberg, Germany, pp 83–103.
- Alcock R.E., Sweetman A., Jones K.C. 1999: Assessment of organic contaminant fate in waste water treatment plants I: Selected compounds and physicochemical properties. *Chemosphere* 38(10): 2247–2262.
- Aldrich A., Daniel O. 2003: Literature based risk assessment. Final report on module 5a of the project «organic pollutants in compost and digestates in Switzerland». Agroscope FAL Reckenholz, Swiss Federal Institute for Agroecology and Agriculture, Zürich, Switzerland.
- Amlinger F., Peyr S., Geszti J., Dreher P., Weinfurter K., Nortcliff S. 2006: Evaluierung der nachhaltig positiven Wirkung von Kompost auf die Fruchtbarkeit und Produktivität von Böden. Literaturstudie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien. 246 Seiten.
- Anonym 1998: Verordnung über Belastungen des Bodens, VBBo vom 1.7.1998, Stand am 28.3.2000. Der Schweizerische Bundesrat, Bern.
- Anonym 1999: Wegleitung zur Bewertung und Zulassung von Düngern und diesen gleichgestellten Erzeugnissen. Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft IUL.
- Anonym 2005: Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV vom 18 Mai 2005. Der Schweizerische Bundesrat, Bern.
- Bartl B., Hartl W., Horak O. 2002: Long-term application of biowaste compost versus mineral fertilization: Effects on the nutrient and heavy metal contents of soil and plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.-Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 165(2): 161–165.
- Becker-van Slooten K., Tarradellas J. 2000: Soil biotests and indicators. In *Biological Resource Management. Connecting Science and Policy* (Balazs E., Galante E., Lynch J.M., Schepers J.S., Toutant J.-P., Werner D., Werry P.A.T.J., eds), Springer-INRA Editions, pp 57–65.
- Berset J.D., Holzer R. 2001: Determination of phthalates in crude extracts of sewage sludges by high-resolution capillary gas chromatography with mass spectrometric detection. *J. AOAC Intern.* 84(2): 383–391.
- Berset J.D., Holzer R. 1999: Quantitative determination of polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in sewage sludges using supercritical fluid extraction and mass spectrometric detection. *J.Chromatogr. A* 852: 545–558.
- Berset J.D., Holzer R. 1995: Organic micropollutants in Swiss agriculture: Distribution of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH) and polychlorinated biphenyls (PCB) in soil, liquid manure, sewage sludge and compost samples, a comparative study. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 59: 145–165.
- Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Furrer G., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2005: Persistent organic pollutants in source-separated compost and its feedstock materials – a review of field studies. *J. Environ. Qual.* 34(3): 735–760.
- Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2006: Optimized accelerated solvent extraction of PCB and PAK from compost. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 86(7): 505–525.
- Brändli R.C., Kupper T., Bucheli T.D., Zennegg M., Huber S., Ortelli D., Müller J., Schaffner C., Iozza S., Schmid P., Berger U., Edder P., Oehme M., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007b: Organic pollutants in Swiss compost and digestate; 2. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, and-furans, dioxin-like polychlorinated biphenyls, brominated flame retardants, perfluorinated alkyl substances, pesticides, and other compounds. *J. Environ. Monit.* 9: 465–472.
- Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Furrer R., Stahel W., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007a: Organic pollutants in Swiss compost and digestate; 1. Polychlorinated biphenyls, polycyclic aromatic hydrocarbons and molecular markers, determinant processes, and source apportionment. *J. Environ. Monit.* 9: 456–464.
- Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Mayer J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007c: Fate of PCBs, PAHs and their source characteristic ratios during composting and digestion of source-separated organic waste in full-scale plants. *Environ. Pollut.* 148(2): 520–528.
- Bucheli T.D., Blum F., Desaulles A., Gustafsson O. 2004: Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, and molecular markers in soils of Switzerland. *Chemosphere* 56(11): 1061–1076.
- Bucheli T.D., Brändli R.C. 2006: Two-dimensional gas chromatography coupled to triple quadrupole mass spectrometry for the unambiguous determination of atropisomeric PCB in environmental Proben. *J. Chromatogr. A* 1110: 156–164.

BUWAL 2003: Faktenblatt zum Klärschlammverbot, Fragen und Antworten zum Klärschlamm. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Candinas T., Besson J.-M., Humbel S. 1989: Erhebung über die Qualität von Kompost aus getrennt gesammelten Siedlungsabfällen. Sonderdruck aus dem Tätigkeitsbericht FAC 1987–1988. Landw. Jahrbuch Schweiz 103: 145–170.

Candinas T., Kupper T., Chassot G.M., Besson J.-M. 1999: Informationen zur Wegleitung zur Bewertung und Zulassung von Düngern und diesen gleichgestellten Erzeugnissen. Interner Bericht. Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft IUL.

Cornelissen G., Gustafsson O., Bucheli T.D., Jonker M.T.O., Koelmans A.A., and Van Noort P.C.M. 2005: Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: Mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation. *Environ. Sci. Technol.* 39(18): 6881–6895.

Erstfeld K.M., Snow-Ashbrook J. 1999: Effects of chronic low-level PAH contamination on soil invertebrate communities. *Chemosphere* 39(12): 2117–2139.

Estermann R., Bartha-Pichler B. 2005: Kompostier- und Vergärungsanlagen in der Schweiz, Jahresbericht 2005: Suhr, CH: Sondernummer des Compost magazins, ARGE Inspektorat.

European Communities 2005: Waste generated und treated in Europe 1995–2003: Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. Brussel.

Fountain M.T., Hopkin S.P. 2005: *Folsomia candida* (Collembola): A «standard» soil arthropod. *Annu. Rev. Entomol.* 50: 201–222.

Fricke K., Vogtmann H. 1994: Compost quality: physical characteristics, nutrient content, heavy metals and organic chemicals. *Toxicol. Environ. Chem.* 43: 95–114.

Fricke K., Vogtmann H., Jager J., Wilken M. 1989: Organische Schadstoffe in Bioabfallkomposten. *Müll und Abfall* 9: 472–481.

Fromme H., Küchler T., Otto T., Pilz K., Müller J., Wenzel A. 2002: Occurrence of phthalates und bisphenol A und F in the environment. *Water Res.* 36(6): 1429–1438.

Fuchs J., Berner A., Bieri M., Galli U., Mayer J., Schleiss K. 2004: Auswirkungen von Komposten und von Gärgut auf die Umwelt, Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit. Zusammenfassende Übersicht der aktuellen Literatur. Forschungsinstitut für biologischen Landbau, FiBL, Frick, Switzerland.

Giesy J.P., Kannan K. 2002: Perfluorochemical surfactants in the environment. *Environ. Sci. Technol.* 36(7): 146A–152A.

Hügi M., Kettler R. 2004: Abfallstatistik 2002: Mit Daten der KVA-Planung 2003. Umwelt-Materialien Nr. 186. Abfall. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL.

Hund K., Kurth H.H., Wahle U. 1999: Entwicklung einer Untersuchungs- und Bewertungsstrategie zur Ableitung von Qualitätskriterien für Komposte. Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Schmallenberg, Germany.

Jones K.C., de Voogt P. 1999: Persistent organic pollutants (POP's): state of the science. *Environ. Pollut.* 100(1–3): 209–221.

Junghans M., Backhaus T., Faust M., Scholze M., Grimme L.H. 2006: Application und validation of approaches for the predictive hazard assessment of realistic pesticide mixtures. *Aquat. Toxicol.* 76(2): 93–110.

Kapanen A., Itavaara M. 2001: Ecotoxicity tests for compost applications. *Ecotox. Environ. Safe.* 49(1): 1–16.

Keller A., Abbaspour K.C., Schulin R. 2002: Assessment of uncertainty and risk in modeling regional heavy-metal accumulation in agricultural soils. *J. Environ. Qual.* 31(1): 175–187.

Keller A., von Steiger B., van der Zee S.E.A.T.M., Schulin R. 2001: A stochastic empirical model for regional heavy-metal balances in agroecosystems. *J. Environ. Qual.* 30(6): 1976–1989.

Langenkamp H., Part P. 2001: Organic contaminants in sewage sludge. European Commission Joint Research Centre Institute for Environment und Sustainability Soil und Waste Unit.

Madsen P.L., Thyme J.B., Henriksen K., Moldrup P., Roslev P. 1999: Kinetics of di-(2-ethylhexyl)phthalate mineralization in sludge amended soil. *Environ. Sci. Technol.* 33(15): 2601–2606.

Marb C., Scheithauer M., Bittl T., Köhler R., Veit N. 2003: Kompostierung von Bioabfällen mit anderen organischen Abfällen. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Josef-Vogel Technikum, Augsburg.

McLachlan M.S., Czub G., Wania F. 2002: The influence of vertical sorbed phase transport on the fate of organic chemicals in surface soils. *Environ. Sci. Technol.* 36(22): 4860–4867.

Petersen S.O., Henriksen K., Mortensen G.K., Krogh P.H., Brandt K.K., Sorensen J., Madsen T., Petersen J., Gron C. 2003: Recycling of sewage sludge und household compost to arable land: fate und effects of organic contaminants, und impact on soil fertility. *Soil Tillage Res.* 72(2): 139–152.

Plahl F., Rogalski W., Gilnreiner G., Erhart E. 2002: Vienna's biowaste compost – quality development und effects of input materials. *Waste Manage. Res.* 20(2): 127–133.

Pohl M. 2006: Side effects of two insect growth regulators and compost on the non-target soil organisms *Folsoma fimetaria* and *Folsoma candida* (Collembola, Isotornidas), Master Thesis EPF Lausanne

Rappe C., Andersson R., Studer C., Karlaganis G. 1997: Decrease in the concentration of PCDDs und PCDFs in sewage sludge from Switzerland. *Organohalogen Compd.* 33: 82–87.

Schmid P., Gujer E., Zennegg M., Bucheli T., Desaulles A. 2005: Correlation of PCDD/F und PCB concentrations in soil Proben from the Swiss soil monitoring network (NABO) to specific parameters of the observation sites. *Chemosphere* 58(3): 227–234.

Schwarzenbach R.P., Escher B.I., Fenner K., Hofstetter T.B., Johnson A.C., von Gunten U., Wehrli B. 2006: The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science* 313: 1072–1077.

Sellström U., De Wit A.A., Lundgren N., Tysklind M. 2005: Effect of sewage-sludge application on concentrations of higher-brominated diphenyl ethers in soils und earthworms. *Environ. Sci. Technol.* 39(23): 9064–9070.

Stämpfli C., Niang F., Becker van Slooten K., Kupper T., Bachmann H.J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2005: Impact écotoxicologique de l'épandage de compost sur des sols agricoles. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Staples C.A., Peterson D.R., Adams W.J. 1997: The environmental fate of phthalate esters: a literature review. *Chemosphere* 35(4): 667–749.

Sweetman A.J., Jones K.C. 2000: Declining PCB concentrations in the UK atmosphere: evidence und possible causes. *Environ. Sci. Technol.* 34(5): 863–869.

Taube J., Vorkamp K., Forster M., Herrmann R. 2002: Pesticide residues in biological waste. *Chemosphere* 49(10): 1357–1365.

Traulsen B.D., Schonhard G., Pestemer W. 1997: Risk assessment of the application of biological waste compost on agricultural land use. *Agribiol. Res.* 50(2): 102–106.

Publikationen

Brändli R.C. 2006: Organic pollutants in Swiss compost and digestate. Thesis No 3599. EPF Lausanne.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Furrer G., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2005: Persistent organic pollutants in source-separated compost and its feedstock materials – a review of field studies. *J. Environ. Qual.* 34(3): 735–760.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Furrer R., Stahel W., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007a: Organic pollutants in swiss compost and digestate. 1. Polychlorinated biphenyls, polycyclic aromatic hydrocarbons and molecular markers, determinant processes, and source apportionment. *J. Environ. Monit.* 9: 456–464.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Mayer J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007: Fate of PCBs, PAHs and their source characteristic ratios during composting and digestion of source-separated organic waste in full-scale plants. *Environ. Pollut.* 148(2) 520–528.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2006: Optimized accelerated solvent extraction of PCBs and PAHs from compost. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 86(7): 505–525.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2006: Can sources of environmental contamination with PAHs be identified in recipient matrices by concomitant analysis of molecular markers? *Organohalogen Compd.* 68: 292–295.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Zennegg M., Berger U., Edder P., Oehme M., Müller J., Schaffner C., Furrer R., Schmid P., Huber S., Ortelli D., Iozza S., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2006: Organic pollutants in source-separated compost. *Organohalogen Compd.* 68: 863–866.

Brändli R.C., Kupper T., Bucheli T.D., Zennegg M., Huber S., Ortelli D., Müller J., Schaffner C., Iozza S., Schmid P., Berger U., Edder P., Oehme M., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2007: Organic pollutants in swiss compost and digestate; 2. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, and -furans, dioxin-like polychlorinated biphenyls, brominated flame retardants, perfluorinated alkyl substances, pesticides, and other compounds. *J. Environ. Monit.* 9: 465–472.

Bucheli T.D., Brändli R.C. 2006: Two-dimensional gas chromatography coupled to triple quadrupole mass spectrometry for the unambiguous determination of atropisomeric PCBs in environmental samples. *J. Chromatogr. A* 1110: 156–164.

Bucheli T.D. 2006: Jahresbericht 2006. Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART (März 2007).

Kettler R., Fuchs J., Kupper T. 2005: Nutzen und Risiken von Kompost und Gärgut. In: Estermann R., Bartha-Pichler B. *Kompostier- und Vergärungsanlagen in der Schweiz, Jahresbericht 2005.* Suhr, CH: Sondernummer des Compost magazins, ARGE Inspektorat. 22–23.

Kupper T., Brändli R.C., Bucheli T.D., Staempfli C., Zennegg M., Berger U., Edder P., Pohl M., Niang F., Iozza S., Mueller J., Schaffner C., Schmid P., Huber S., Ortelli D., Becker van Slooten K., Oehme M., Mayer J., Bachmann H.J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2006: Organic pollutants in compost and digestate: occurrence, fate and impacts. In: Kraft E., Bidlingmaier W., de Bertoldi M., Diaz L.F., Barth J., (eds.). Proceedings of the International Conference ORBIT 2006 Biological Waste Management – From Local to Global, 13th to 15th of September 2006; Weimar. 1147–1156.

Pohl M., Staempfli C., Niang F., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J., Becker-van Slooten K. Ecotoxicological tests applied to compost: observation of inhibiting und stimulating effects. Appl. Soil Ecol. (in Vorbereitung).

Zennegg M., Brändli R., Kupper T., Bucheli T.D., Gujer E., Schmid P., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2005: PCDD/Fs, PCBs, PBDEs, TBBPA and HBCD in compost and digestate. Organohalogen Compd. 67: 1040–1043.

Berichte

Aldrich A., Daniel O. 2003: Literature based risk assessment. Final report on module 5a of the project «Organic pollutants in compost and digestates in Switzerland». Agroscope FAL Reckenholz, Swiss Federal Institute for Agroecology and Agriculture.

Brändli R., Kupper T., Bucheli T., Mayer J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2004: Occurrence and relevance of organic pollutants in compost, digestate and organic residues. Literature review. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Agroscope FAL Reckenholz, Swiss Federal Institute for Agroecology and Agriculture, Zürich.

Pohl M. 2006: Side effects of two insect growth regulators and compost on the non-target soil organisms *Folsomia fimetaria* and *Folsomia candida* (Collembola, Isotomidae). Master Thesis EPF Lausanne.

Stämpfli C., Niang F., Becker van Slooten K., Kupper T., Bachmann H.J., Stadelmann F.X., Tarradellas J. 2005: Impact écotoxicologique de l'épandage de compost sur des sols agricoles. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Konferenzbeiträge, Vorträge und Poster

Referate an internationalen Konferenzen

Brändli R.C.: PCBs and PAHs in compost and digestate. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Agroscope FAL Reckenholz, Swiss Federal Institute for Agroecology and Agriculture, Zürich. Platform presentation. SETAC Europe 15th Annual meeting, Lille, France, 22.–26. Mai 2005.

Zennegg M.: PCDD/Fs, PCBs, PBDEs, TBBPA and HBCD in compost and digestate. Swiss Federal Institute for Materials Science and Technology (EMPA), Laboratory of Organic Chemistry, Dübendorf. Platform presentation. 25th International Symposium on Halogenated Environmental Organic Pollutants and Persistent Organic Pollutants (POPs) – DIOXIN 2005, Toronto, 21.–26. August 2005.

Brändli R.C.: Can sources of environmental contamination with PAHs be identified in recipient matrices by concomitant analysis of molecular markers? Platform presentation. 26th International Symposium on Halogenated Environmental Organic Pollutants and Persistent Organic Pollutants (POPs) – DIOXIN 2006, Oslo, 21.–25. August 2006.

Brändli R.C.: Organic pollutants in source-separated compost. Platform presentation. 26th International Symposium on Halogenated Environmental Organic Pollutants and Persistent Organic Pollutants (POPs) – DIOXIN 2006, Oslo, 21.–25. August 2006.

Kupper T.: Organic pollutants in compost and digestate: occurrence, fate and impacts. Orbit Conference 2006, Weimar. 13.–15. September 2006.

Poster präsentiert an internationalen Konferenzen

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Tarradellas J.: Accelerated solvent extraction of PAH and PCB in compost, digestate and input material. Poster. 9th FECS (Federation of Chemical Societies and Professional Institutions) Conference und 2nd SFC (Société Française de Chimie) meeting on Chemistry and the Environment: Behaviour of Chemicals in the Environment. Bordeaux, F, 29. August – 1. September 2004.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Stadelmann F.X., Tarradellas J.: Persistent organic pollutants in compost and its input materials – a review of field studies. Poster. 9th FECS (Federation of Chemical Societies and Professional Institutions) Conference und 2nd SFC (Société Française de Chimie) meeting on Chemistry and the Environment: Behaviour of Chemicals in the Environment. Bordeaux, F, 29. August – 1. September 2004.

Aldrich A., Daniel O.: Literature based ecotoxicological risk assessment of compost use for Soil organisms. Agroscope FAL Reckenholz, Swiss Federal Institute for Agroecology and Agriculture, Zürich. Poster. SETAC Europe 15th Annual meeting, Lille, F, 22.–26. Mai 2005.

Stämpfli C., Niang F., Kupper T., Brändli R., Bachmann H.J., Stadelmann F.X., Tarradellas J., Becker van Slooten K.: Ecotoxicological Risk Assessment of Compost and Digestates in Switzerland. Poster. SETAC Europe 15th Annual meeting, Lille, F, 22.–26. Mai 2005.

Brändli R.C., Bucheli T.D., Kupper T., Furrer R., Stahel W., Stadelmann F.X., Tarradellas J. Source apportionment of POPs in Swiss compost and digestate. Poster. SETAC Europe 16th Annual meeting, Den Haag, NL, 07.–11. Mai 2006.

Kupper T., Brändli R.C., Zennegg M., Berger U., Edder P., Iozza S., Mueller J., Schaffner C., Bucheli T.D., Schmid P., Huber S., Ortelli D., Oehme M., Mayer J., Bachmann H.J., Stadelmann F.X., Tarradellas J.: Occurrence and sources of organic pollutants in compost and digestate. Poster. SETAC Europe 16th Annual meeting, Den Haag, NL, 07.–11. Mai 2006.

Weitere Referate und Präsentationen

Kupper T.: Projekt Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz. Referat. Informationstagung Abfall des BUWALs und der Kantone, Zürich, 18. Juni 2003.

Kupper T.: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut. Referat. Herbstanlass des VKS. Diegten, 20. November 2003.

Brändli R.C.: Projekt Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz. Referat MARSEP und VBBO Tagung, Liebefeld, 25. Mai 2004.

Brändli R.: Organische Schadstoffe im Kompost und in dessen Ausgangsmaterial. Referat. Kolloquium der FAL Zürich-Reckenholz, 6. Dezember 2004.

Brändli R.C.: PAH und PCB Analysen in Kompost und Gärgut: Probenaufbereitung, Lagerung und Extraktion mittels ASE. Referat. Dionex Seminar. Olten, 16. November 2004.

Becker van Slooten K.: Verbleib, Verhalten und Auswirkungen von organischen Schadstoffen in Böden. Referat. Düngerseminar: Stoffflüsse, Bodenqualität und Nahrungsmittelsicherheit WS 2004/05 des Instituts für Pflanzenwissenschaften, Gruppe für Pflanzenernährung der ETH. Zürich, 28. Oktober 2004.

Kupper T.: Organische Schadstoffe: Belastung von Recyclingdüngern und Eintrag in die landwirtschaftlichen Böden unter besonderer Berücksichtigung von Kompost. Referat. Düngerseminar: Stoffflüsse, Bodenqualität und Nahrungsmittelsicherheit WS 2004/05 des Instituts für Pflanzenwissenschaften, Gruppe für Pflanzenernährung der ETH. Zürich, 28. Oktober 2004.

Stadelmann F.X.: Nutzen und Risiken von Kompost: Erfahrungen aus der Klärschlamm-Leidensgeschichte. Referat. Düngerseminar: Stoffflüsse, Bodenqualität und Nahrungsmittelsicherheit WS 2004/05 des Instituts für Pflanzenwissenschaften, Gruppe für Pflanzenernährung der ETH. Zürich, 28. Oktober 2004.

Brändli R.C.: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut. Referat. Begleitende Expertengruppe (BEG) der Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), 8. Treffen in Zürich-Reckenholz. 4. November 2005.

Brändli R.C. Persistent Organic Pollutants (POPs) in Swiss Compost. Referat. Annual Symposium of the PhD Program for Sustainable Agriculture (ASPSA), Zürich 4. November 2005.

Kupper T.: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut in der Schweiz: Aktuelle Resultate der laufenden Untersuchungen und neueste Erkenntnisse. Referat. Herbstanlass des VKS. Malters, 24. November 2005.

Brändli R.: Organic pollutants in Swiss compost, digestate and presswater. Referat. MARSEP und VBBO Tagung, Liebefeld, 30. Mai 2006.

Brändli R. Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut in der Schweiz. Referat. Jahresversammlung der Schweizerischen Gesellschaft für Lebensmittel- und Umweltchemie (SGLUC), Solothurn, 15. September 2006.

Kupper T.: Schadstoffe in Kompost und Gärgut: neueste Erkenntnisse und Kenntnislücken bezüglich Produkten aus landwirtschaftlichen Co-Vergärungsanlagen. Referat. Düngerseminar: Aktuelle Aspekte von Nährstoffkreisläufen in Agrarökosystemen WS 2006/07 des Instituts für Pflanzenwissenschaften, Gruppe für Pflanzenernährung der ETH. Zürich, 3. November 2006.

Brändli R.C.: Pollutants in compost and digestate from Switzerland and from developing countries. Referat. Sandec Seminar, Eawag, Dübendorf 2006.

> Studie 2

**Auswirkungen von Kompost
und Gärgut auf die Umwelt,
die Bodenfruchtbarkeit sowie
die Pflanzengesundheit**

> Inhalt

1	Zusammenfassung	50			
2	Einleitung	51			
2.1	Ziel des Projektes	51			
3	Projektbeschreibung	53			
4	Material und Methoden	54			
4.1	Wahl der Kompostproben	54			
4.2	Chemische und physikalische Analysen	56			
4.2.1	Humusstabilität	56			
4.3	Biologische Analysen	56			
4.3.1	Enzymaktivitäten	56			
4.3.2	Phytotoxizitäts-Tests	57			
4.3.3	Suppressivitäts-Tests	57			
4.3.4	Bestimmung der Stickstoffmineralisierung im Boden	58			
5	Eigenschaften von Gärgut und Kompost in der Schweiz: Ergebnisse	59			
5.1	Physikalisch-chemische Eigenschaften von Kompost	60			
5.2	Bestimmung der Reife und der Stabilität von Kompost und Gärgut	72			
5.3	Biologische Aktivität von Kompost und Gärgut	77			
5.4	Einfluss von Kompost und Gärgut auf die Stickstoffdynamik des Bodens	81			
5.5	Einfluss von Kompost und Gärgut auf Pflanzenwachstum und -gesundheit	84			
5.6	Einfluss des Herstellungsverfahrens von Kompost auf die chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften	88			
6	Nachbehandlung von Gärgut: Ergebnisse	95			
7	Mittelfristige Versuche der Anwendung von Gärgut und Kompost auf den Feldern	105			
7.1	Einfluss von Kompost auf das Maiswachstum	106			
7.2	Einfluss von Kompost auf die Bodeneigenschaften	108			
8	Empfehlungen für die Praxis	114			
8.1	Empfehlungen für die Mitarbeiter von Vergärungs- und Kompostierungsanlagen	114			
8.1.1	Wahl der Ausgangsmaterialien	114			
8.1.2	Problem der Stickstoffblockierung in den Feldern	115			
8.1.3	Einfluss der Rotteführung auf die biologische Qualität von Kompost	116			
8.1.4	Humusstabilität	116			
8.1.5	Nachbehandlung von Gärgut	117			
8.1.6	Herstellung von Kompost gemäss der gewünschten Wirkung	117			
8.2	Empfehlungen an den Anwender von Kompost und Gärgut	118			
8.2.1	Bestimmung von Verwendungszweck und gewünschten Wirkungen	118			
8.2.2	Wahl des Komposts und Grundregeln für die Verwendung	118			
8.3	Empfehlungen zur Bestimmung der Komposteigenschaften	119			
8.3.1	Chemische Basisanalysen	119			
8.3.2	Humusstabilität	120			
8.3.3	Biologische Qualität von Kompost	120			
8.4	Zukünftige Forschungsarbeiten: vorrangig zu schliessende Lücken	121			
8.4.1	Einschätzung der Gefahr einer Stickstoffblockierung im Feld durch die Kompost- oder Gärgutapplikation	121			
8.4.2	Optimierungsmassnahmen bei der Rotteführung zur Verbesserung der biologischen Qualität von Kompost	121			
8.4.3	Langfristige Auswirkungen von Kompost und Gärgut auf die Bodenfruchtbarkeit und die Pflanzengesundheit	122			
9	Schlussfolgerungen	124			

1 > Zusammenfassung

In der Schweiz werden jährlich rund 800'000 Tonnen organische Abfälle recycelt. Längerfristig werden jedoch nur Kompost und Gärgut abgesetzt werden können, die eine Wertsteigerung der Böden bewirken. Vor diesem Hintergrund haben das BAFU, das BFE und der Kanton Zürich das vorliegende Projekt «Auswirkungen von Kompost und von Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit» finanziert, das mit dem von Thomas Kupper (SHL) geleiteten Projekt «Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz» der EPFL/ART koordiniert ist.

Sechs Monate nach der Kompostapplikation war immer noch ein deutlich erhöhter pH-Wert festzustellen. Hinsichtlich der Krankheitsanfälligkeit wiesen die Böden jedoch keine Unterschiede auf. Dies liegt möglicherweise daran, dass diese Kulturflächen bereits seit mehreren Jahren gemäss dem biologischen Landbau bewirtschaftet werden und ein nahezu optimales mikrobiologisches Gleichgewicht erreicht haben.

Durch die Nachbehandlung von Gärgut lässt sich Kompost von guter Qualität herstellen. Dabei ist vor allem auf die Feuchtigkeit im Rottekörper zu achten, um zu vermeiden, dass Stickstoff in Form von Ammoniakgas verloren geht. Besonders eignet sich dazu die Beigabe von Häckselgut oder Frischkompost.

Zusammenfassend konnte die Studie deutlich machen, dass Kompost und Gärgut in der Schweiz generell von guter Qualität sind. Allerdings trägt der Kompostproduzent eine grosse Verantwortung, da die Qualität des Endproduktes stark von der Rotteführung beeinflusst wird. Hinsichtlich der Kompostverwendung ist besonders darauf zu achten, dass für den gewünschten Zweck das jeweils richtige Produkt gewählt wird. Sind die Produkte besser bekannt, so können sie auch erfolgreicher eingesetzt werden. Daher wäre ein besserer Dialog zwischen Kompostproduzent und -anwender wünschenswert. Um die Zukunft der Kompostierung und Vergärung zu sichern, sollte die Priorität bei der Ausbildung der Akteure dieser Branche liegen, und zwar sowohl auf der Seite der Verfahren selbst als auch auf der Seite der Verwendung der Endprodukte.

2 > Einleitung

In der Schweiz werden jedes Jahr rund 800'000 Tonnen organische Abfälle kompostiert oder vergärt. Das Recycling von organischen Substanzen ist ökologisch sinnvoll. Die Endprodukte dieser Verfahren, nämlich Kompost und Gärgut, haben jedoch bei den potenziellen Anwendern kein gutes Image, obwohl in der Schweiz nur an der Quelle sortierte organische Abfälle kompostiert oder vergärt werden dürfen. Die Kompostierung von Müll gibt es in der Schweiz schon seit praktisch dreissig Jahren nicht mehr. In der Praxis wird jedoch häufig immer noch gezögert, Kompost und Gärgut zu verwenden, da die schlechte Qualität von Müllkompost und Klärschlamm den Kompost in Verruf gebracht hat. Die Behörden haben also verständlicherweise als erstes die notwendigen Massnahmen getroffen, um den eventuellen Schadstoffgehalt von Kompost und Gärgut auf ein Minimum zu reduzieren. Allerdings konnte bei der Bevölkerung dadurch aber auch der Eindruck entstehen, die Produkte seien potenziell gefährlich.

Durch diese zwar insgesamt durchaus sinnvollen Massnahmen sind aber die positiven Eigenschaften von Kompost und Gärgut für die Bodenfruchtbarkeit, die Ertragsstabilität und die Pflanzengesundheit in den Hintergrund getreten. In manchen Fällen, war man sich über diese Werte gar nicht mehr bewusst. Es ist also höchste Zeit, die positiven Auswirkungen von Kompost und Gärgut zu identifizieren, und sie bei den potenziellen Anwendern bekannt zu machen. Das bedeutet aber auch, dass die Produzenten von Kompost und Gärgut ausschliesslich Kompost herstellen müssen, die eine Wertsteigerung der Böden bewirken. Die Qualitätsparameter müssen in diese Richtung erweitert werden, was die Erarbeitung der dazu notwendigen Kenntnisse und Grundlagen voraussetzt. Nur so wird es langfristig möglich sein, den Absatz von Kompost und Gärgut zu sichern und ein wirtschaftlich und ökologisch sinnvolles Recycling von organischen Substanzen zu garantieren, das von der Gesellschaft angenommen wird.

2.1 Ziel des Projektes

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, die Auswirkungen von Kompost- und Gärgutapplikationen auf Pflanzenwachstum und -gesundheit, die Bodenparameter und die Umwelt zu evaluieren. Zunächst ist eine Grundlage auszuarbeiten. Anschliessend folgen:

- a) die Erfassung und Beurteilung der Nachhaltigkeit von Kompost- und Gärgutapplikationen anhand von wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Kriterien.
- b) die Optimierung diverser Produkte (Gärgut, Frisch-, Reifkompost)
- c) die Optimierung der Herstellungsverfahren (Qualitätssicherung)
- d) die Durchführung von Öffentlichkeitsarbeit über die Risiken und Vorteile der Verwendung von Kompost und Gärgut.

Bei diesem Projekt war die praktische Anwendung von Kompost und Gärgut ein besonders wichtiges Anliegen. Daher sind die meisten während des Projektes gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar in der Praxis anwendbar.

Dieses Projekt wurde mit dem Projekt «Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz» der EPFL/ART koordiniert (Projektleiter: Thomas Kupper).

3 > Projektbeschreibung

Das Projekt «Auswirkungen von Kompost und von Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit» besteht aus mehreren Modulen. Im ersten Modul wurde eine Literaturstudie zur Erhebung des aktuellen Wissensstands durchgeführt. Sie wurde 2004 vom FiBL veröffentlicht (Fuchs J.G., Bieri M., Chardonnens M. 2004. Auswirkungen von Kompost und von Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit. Zusammenfassende Übersicht der aktuellen Literatur.)

Bei den vier darauf folgenden Modulen ging es im Wesentlichen um die Definition und Evaluation des landwirtschaftlichen Nutzens von rund hundert repräsentativen Kompost in der Schweiz (siehe Kapitel 5). Diese Arbeiten wurden mit dem von Thomas Kupper der EPFL geleiteten Projekt «Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz» der EPFL/ART koordiniert.

Darauf folgte die Untersuchung von bestimmten Aspekten in getrennten Modulen: Möglichkeiten der Nachbehandlung von Gärgut (Kapitel 6), mittelfristige Wirkung von verschiedenem Kompost auf zwei verschiedene landwirtschaftliche Böden (Kapitel 7) und Ausarbeitung eines Konzepts für mehrjährige Versuche zur Erfassung langfristiger Wirkungen von Kompost und Gärgut auf den Boden und die Pflanzengesundheit.

Ergänzend zu dieser Studie wird derzeit ein Modul durchgeführt, mit dem geklärt werden soll, wie sich der Nutzen von Kompost und Gärgut für Pflanzenwachstum und -gesundheit und für die Bodenfruchtbarkeit in Ökobilanzen integrieren lässt.

4 > Material und Methoden

4.1 Wahl der Kompostproben

Zur Definition und Evaluierung der agronomischen Qualität des in der Schweiz produzierten Komposts und Gärguts wurden Proben von hundert repräsentativen Produkten aus der ganzen Schweiz beschafft. Die Kriterien sowie die Einteilung des Komposts und des Gärguts sind in Tab. 1 dargestellt.

Da es zahlreiche verschiedene Arten von Kompost gibt, die mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien und Verfahren hergestellt werden, verschiedene Reifegrade aufweisen usw., ist eine repräsentative Auswahl der auf dem Schweizer Markt angebotenen Produkte entscheidend.

Um den Anforderungen der beiden Projekte «Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz» und «Auswirkungen von Kompost und von Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit» gerecht zu werden, wurde bei der Auswahl der Proben ein Kompromiss gefunden. So stammen die Proben aus allen geographischen Regionen der Schweiz, wenn auch ein grosser Teil im Mittelland beschafft wurde, da die Kompostierung in Bergregionen nicht sehr verbreitet ist. Auch wurden die meisten in der Schweiz existierenden Kompostierungsverfahren berücksichtigt, einschliesslich der Feldrandkompostierung und der Kompostierung in geschlossenen Hallen. Bei der Auswahl der Proben bestand das Ziel unter anderem darin, über eine den Markt widerspiegelnde Palette von Kompost zu verfügen. So sind von den Proben rund die Hälfte für die Landwirtschaft, ein Drittel für den Gartenbau und ein Sechstel für den gedeckten Pflanzenbau bestimmt. Das Ergebnis der Auswahl ist in Tab. 1 dargestellt.

Foto 1 > Entnahme einer repräsentativen Kompostprobe in einem Komposthaufen



Die Probenahme erfolgte gemäss den Weisungen der FAC 1995 (Kompost und Klärschlamm. Weisungen und Empfehlungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC) im Bereich der Abfalldünger. EDMZ Art.-Nr. 730.920.d).

Jede Probenahme bestand in der Regel aus vier Einzelproben. Dazu wurde mit einer Gabel ein Senkrechprofil gegraben. Je nach Höhe des Haufens wurde eine zwischen zwei und zehn Zentimeter gleichmässig dicke Schicht entfernt und in einen Kunststoffbehälter gegeben. An jeder Entnahmestelle wurden maximal 2 Schaufeln entnommen.

Tab. 4.1 > Kriterien für die Auswahl der untersuchten Kompostproben und Anzahl der pro Kategorie analysierten Komposte

a) Herkunft der Ausgangsmaterialien	<ul style="list-style-type: none"> • Stadt: 59 • Land: 42
b) Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien	<ul style="list-style-type: none"> • ohne Küchenabfälle: 52 • mit Küchenabfällen: 49
c) Analytierte Produkte (gemäss der VKS-Richtlinie 2001: Fuchs J., Galli U., Schleiss K., Wellinger A. 2001: VKS-Richtlinie 2001: Qualitätseigenschaften von Kompost und Gärgut aus der Grüngutbewirtschaftung. Herausgegeben vom Verband Kompostwerke Schweiz (VKS), Schönbühl (Schweiz), 13 S.)	<ul style="list-style-type: none"> • Gärgut, fest: 11 • Gärgut, flüssig (Presswasser): 4 • Kompost für die Landwirtschaft: 34 • Kompost für den Gartenbau: 36 • Kompost für den gedeckten Pflanzenbau/Hobbybereich 16
d) Kompostierungssysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Thermophile Vergärung: 15 • Mesophile Vergärung: 5 • Dreiecksmieten < 2m hoch: 16 • Dreiecksmieten > 2m hoch: 25 • offene Tafelmieten: 7 • Belüftete Boxen: 5 • Kanalrotte / Hallen mit Belüftung: 4 • Feldrand: 9 • Kombination Vergärung-Kompostierung: 10 • Kombination Boxen – Mieten: 2 • Wurmkompostierung: 3
e) Umsetzverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • kein Umsetzen: 3 • mit Radlader: 39 • mit Umsetzer: 52 • Kombination Radlader und Umsetzer: 2
f) Häufigkeit des Umsetzens	<ul style="list-style-type: none"> • nie: 3 • < 1x pro Woche: 44 • 1x pro Woche: 20 • 2–3x pro Woche: 29 • > 3x pro Woche: 0
g) Hygienisierung	<ul style="list-style-type: none"> • gesetzliche Bestimmungen nicht erfüllt: 3 • mindestens 3 Wochen > 55 °C: 38 • mindestens 1 Woche > 65 °C: 47
h) Zwangsbelüftung	<ul style="list-style-type: none"> • keine: 66 • in der Hitzeperiode: 26 • im Lager: 3 • in der Hitzeperiode und im Lager: 4
i) Feuchtigkeitsregulierung	<ul style="list-style-type: none"> • zu trocken: 48 • optimal: 40 • zu feucht: 8

4.2 Chemische und physikalische Analysen

Die chemischen und physikalischen Analysen wurden gemäss den Referenzmethoden der Eidgenössischen Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten durchgeführt⁶. Die Analysen der Komposte selbst (Atmung, Selbsterhitzung, usw.) erfolgten gemäss den Methoden der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.⁷.

4.2.1 Humusstabilität

Zur Bestimmung der Stabilität wurden verschiedene Extraktionsverfahren eingesetzt.

Zur Ermittlung der Humuszahl wird der wässrige Extrakt (2:1) verwendet, der für die Bestimmung des Salzgehalts gewonnen wurde, und die Absorption bei 550 nm gemessen.

Wassereextraktion

Extraktion von 0,5 g Kompost oder Gärgut, an der Luft getrocknet und auf 0,5 mm gemahlen, während 18 Stunden mit einer Pyrophosphat-Lösung (11,15 g $\text{Na}_4\text{O}_7\text{P}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ in 1 Liter entmineralisiertem Wasser). Nach dem Filtern wird die Pyrophosphatzahl durch Messung der Absorption des Extrakts bei 550 nm bestimmt.

Pyrophosphat-Extraktion

Diese Extraktion findet wie die Pyrophosphat-Extraktion bei einem basischen pH-Wert statt. Extraktion von 5 g Kompost oder Gärgut, an der Luft getrocknet und auf 0,5 mm gemahlen, während 1 Minute mit 20 ml NaOH/ Na_2EDTA -Lösung (15 g Na_2EDTA + 2 g NaOH in 1 Liter entmineralisiertem Wasser). Nach dem Filtern wird die NaOH-Zahl bestimmt, indem die Absorption des Extrakts bei 550 nm gemessen wird.

NaOH-Extraktion

4.3 Biologische Analysen

4.3.1 Enzymaktivitäten

Diese Methode beruht auf der Bestimmung der freigesetzten reduzierten Zucker nach 24 Stunden Inkubation von Kompost oder Gärgut bei 50° mit CMC (Natriumsalz-Carboxymethylcellulose). Mit dieser Methode lassen sich die Endoglucanase- sowie die β -Glucosidase- nicht jedoch die Exoglucanase-Aktivität ermitteln. Die Methode wurde von Alef und Nannipieri beschrieben⁸. Die Anwendung erfolgte mit 1 g auf 2 mm gesiebttem Kompost in 15 ml Acetat-Pufferlösung und 15 ml CMC. Die Cellulaseaktivität wird in [μg GLC/g TS/ 24h] angegeben (GLC: Glucoseäquivalent).

Cellulaseaktivität

Nach einer Inkubation von Kompost oder Gärgut bei 30° während 24 Stunden wird die durch Dehydrogenase reduzierte Menge Triphenyltetrazolium-Formazan (TTF) in einer Triphenyltetrazoliumchlorid-Lösung (TTC) ermittelt. Nach der Extraktion von TTF mit

Dehydrogenase-Aktivität

⁶ FAL 1997: Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Band 1, Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngeberatung, FAL, RAC, FAW. Jährliche Aktualisierung

⁷ Kehres B. & Pohle A. 1998: Methodenbuch zur Analyse von Kompost, 4. ergänzte und überarbeitete Auflage Juli 1998, veröffentlicht beim Verlag Abfall Now e.V., Stuttgart

⁸ Alef K., Nannipieri P. 2002: Practical Use of Quality Compost for Plant Health and Vitality Improvement. In: Insam H, Riddech N, Klammer S (eds.): Microbiology of Composting, Springer Verlag, Heidelberg, S. 345–347.

Aceton wird die Menge durch photometrische Messung bei 546 nm bestimmt. Die Dehydrogenase-Aktivität wird in [$\mu\text{g TTF/g TS/h}$] angegeben.

Diese Methode beruht auf der Bestimmung von Fluorescein, das im Kompost durch den Zerfall von Fluoresceindiacetat entsteht. Die Analyse erfolgt gemäss der Methode von Inbar et al.⁹. Die FDA-Aktivität wird in [$\mu\text{g FDA hydrolysiert/g TS/min}$] angegeben.

FDA-Aktivität
(Fluoresceindiacetat)

Diese Methode beruht auf der Bestimmung der Aminosäuren, die bei einer Inkubation von Kompost oder Gärgut während zwei Stunden bei 50° in Natriumkaseinat freigesetzt werden. Angewandt wurde die von Alef und Nannipieri (2002) beschriebene Methode mit 0,5 g auf 2 mm gesiebttem Kompost in 12,5 ml Pufferlösung plus 12,5 ml Natriumkaseinat. Die Protease-Aktivität wird in [$\mu\text{g Tyrosin/g TS/ 2h}$] angegeben.

Protease-Aktivität

Bei dieser Methode geht es um die Bestimmung der Menge Ammonium, das bei einer Inkubation von Kompost oder Gärgut während zwei Stunden bei 37° in einer Urea-Lösung abgespalten wird (4,8 g Urea pro Liter entmineralisiertem Wasser). Angewandt wurde die von Alef und Nannipieri (2002) beschriebene Methode mit 1 g auf 2 mm gesiebttem Kompost in 2,5 ml Urealösung plus 50ml KCl-Lösung (74,6 g KCL + 10ml HCl 1M in 1 Liter entmineralisiertem Wasser). Die Urease-Aktivität wird in [$\mu\text{g NH}_4\text{-N/g TS/ 2h}$] angegeben.

Urease-Aktivität

4.3.2 Phytotoxizitäts-Tests

Die Pflanzenverträglichkeitstests erfolgten gemäss Fuchs und Bieri¹⁰. Folgende Tests wurden durchgeführt: offener Kressetest, geschlossener Kressetest, Salatetest, Bohnentest und Raygrastest. Vor der Durchführung der Tests wurden Komposte und Gärgut auf 10 mm gesiebt. Das Testergebnis wird in Prozent des Pflanzenwachstums im Kompost oder Gärgut im Verhältnis zum Wachstum im Referenzsubstrat BRS-200 (Biophyt AG, CH-5465 Mellikon) angegeben.

Pflanzenverträglichkeitstest

4.3.3 Suppressivitäts-Tests

Um das Krankheitsunterdrückungspotenzial von Kompost und Gärgut zu testen, wurden 20 % Kompost oder Gärgut von 10 mm Siebgrösse mit der «Einheitserde® Typ 0» (Einheitserde Werkverband, D-36391 Sinnatal-Jossa) gemischt und mit 0,56 g Thomasphosphat, 1,33 g Kaliumchlorid mit Magnesium und 2,3 g Hornmehl pro Liter Substrat gedüngt. Beide Unterdrückungstests wurde auf der Grundlage der Arbeiten von Fuchs durchgeführt (¹¹).

Von den zehn Tage alten auf Hirse gezogenen *Pythium ultimum* wurden drei verschiedene Mengen unter das Substrat gemischt: 0, 0,25 und 3 g pro Liter Substrat. Für jede

Unterdrückungstest von *Pythium ultimum* bei Gurkenpflanzen

⁹ Inbar Y., Boehm M.J. and Hoytink H.A.J. 1991: Hydrolysis of Fluorescein Diacetate in Sphagnum peat container media for predicting suppressiveness to damping-off caused by *Pythium ultimum*; Soil Biology and Biochemistry. 23, 479–483.

¹⁰ Fuchs J.G., Bieri M. 2000. Neue Pflanzentests, um die Kompostqualität zu charakterisieren. Agrarforschung 7: 314–319.

¹¹ Fuchs J.G. 2002: Practical Use of Quality Compost for Plant Health and Vitality Improvement. S. 435–444 in: Insam H, Riddech N, Klammer S (eds.), Microbiology of Composting, Springer Verlag, Heidelberg, 641 S.

Variante wurden 6 Kunststofföpfe à 9 cm Durchmesser mit der Mischung gefüllt. In jeden Topf wurden fünf Gurkensamen der Sorte «Chinesische Schlangen» gesät. Nach rund zwei Wochen wird die Anzahl gekeimter Pflanzen bestimmt. Die Ergebnisse werden in % des Schutzes angegeben, d.h. als Verhältnis zwischen der durch den Krankheitserreger verringerten Keimung im Substrat mit Kompost und der verringerten Keimung durch den Krankheitserreger im Substrat ohne Kompost.

Pro Variante werden 6 Kunststofföpfe à 9 cm Durchmesser verwendet. Über die etwa 1 cm dicke Schicht Substrat-Kompost-Mischung auf dem Boden der Töpfe werden drei verschiedene Mengen auf Hirse gezogene *Rhizoctonia solani* ergänzt: 1 g feiner Sand ohne Krankheitserreger, 1 g einer Mischung aus 0,25 g *R. solani* + 48,75 g feinem Sand, und 1 g einer Mischung aus 5 g *R. solani* + 45 g feinem Sand. Jeder Topf wird anschliessend mit zwanzig Samen grossblättrigem Basilikum eingesät. Nach rund 10, 17 und 21 Tagen wird die Anzahl gekeimter Pflanzen bestimmt. Die Pflanzensterblichkeit pro Topf wird festgestellt. Die Ergebnisse werden in % des Schutzes angegeben, d.h. als Verhältnis zwischen der durch den Krankheitserreger erhöhten Sterblichkeit im Substrat mit Kompost und der Sterblichkeit durch den Krankheitserreger im Substrat ohne Kompost.

Unterdrückungstest von
Rhizoctonia solani bei Basilikum

4.3.4 Bestimmung der Stickstoffmineralisierung im Boden

Um die Entwicklung des mineralisierten Stickstoffs im Boden nach der Beigabe von Kompost oder Gärgut zu ermitteln, wurde die leicht abgeänderte B-ND-BA-Inkubationsmethode aus den «Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten» (FAL 1996) verwendet.

Zur Untersuchung der Stickstoffmineralisierung aus organischen Düngern darf die Dosis von mineralisierbarem Stickstoff nicht über 100 mg N/150g FS Boden liegen, da sonst der Sauerstoffbedarf zu hoch ist. Je nach Stickstoffgehalt im Kompost wurden dem Referenzsubstrat zwischen 5 und 15 g Kompost hinzugefügt und in Inkubationskästen platziert. Pro Untersuchungswoche wurden drei Kästen gefüllt, d.h. dass für die Wochen 2, 4, 6 und 8 insgesamt 12 Inkubationskästen pro Kompost notwendig sind, plus einem Kasten für die Bestimmung des mineralisierten Stickstoffs zu Beginn des Versuchs. Dieselbe Anzahl Kästen muss mit 165 g Referenzsubstrat gefüllt werden (Kontrollgruppe). Auf die Prüfung des richtigen Wassergehalts in den Substrat-Kompost-Mischungen folgt die Inkubation der Kästen bei 25 °C. Alle 14 Tage werden pro Variante 3 Inkubationskästen entnommen, sofort extrahiert und ihr Stickstoffgehalt untersucht.

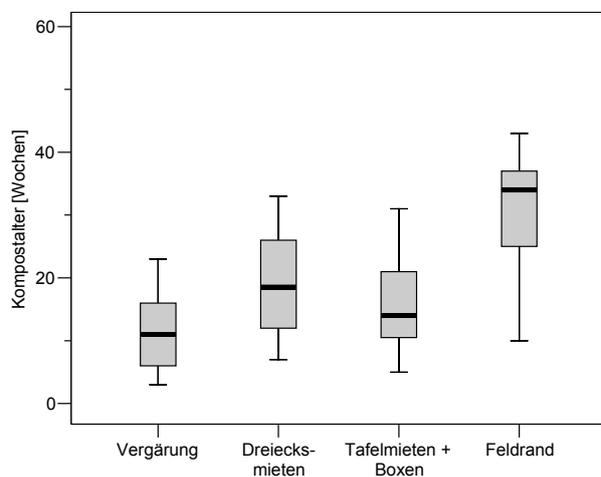
Von den drei Wiederholungen wird das Durchschnittsergebnis errechnet, um die Abweichungen im Stickstoffgehalt bei den Substrat-Kompost-Mischungen zu ermitteln. Die durchschnittliche Abweichung von Ammonium-Stickstoff und Nitrat-Stickstoff wird in mg Stickstoff pro kg TS Substrat angegeben. Die Mineralisierung (oder Immobilisierung) des Stickstoffs in Kompost wird als Differenz zwischen dem Wert mg N/kg Substrat-Kompost und dem Wert mg N/kg Substrat berechnet.

5 > Eigenschaften von Gärgut und Kompost in der Schweiz: Ergebnisse

Aufgrund seiner besonderen Beschaffenheit konnten für Presswasser nicht alle Parameter untersucht werden. Zu erwähnen ist ausserdem, dass nur vier Presswasserproben beschafft und analysiert wurden, weshalb die Ergebnisse für dieses Produkt mit grosser Vorsicht auszulegen sind.

Interessant ist, dass die Komposthaufen bei der Feldrandkompostierung gewöhnlich länger liegen bleiben (Abb. 5.1). Da die Platzfrage bei diesem Verfahren keine entscheidende Rolle spielt, bleibt der Kompost in der Regel am Feldrand liegen, bis er verwendet werden kann (Felder abgeerntet, geeignete Witterungsbedingungen, usw.). Bei anderen Kompostierungsverfahren muss der Kompost geliefert oder anders gelagert werden, um für neue Chargen Platz zu machen.

Abb. 5.1 > Alter von Gärgut und Kompost in der Schweiz nach Kompostierungsmethode

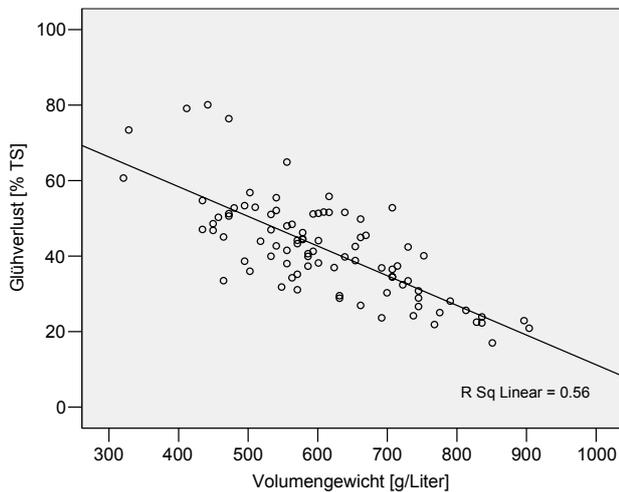


5.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften von Kompost

Generell nimmt das Volumengewicht der Produkte mit zunehmender Reife zu (Tab. 1): Kompost für den gedeckten Pflanzenbau sind im Durchschnitt schwerer als Kompost für die Landwirtschaft oder Gärgut. Dies liegt nicht an der Siebung, sondern an der fortgeschrittenen Reife der Produkte. So wurde ein klarer Zusammenhang zwischen dem Gehalt an organischer Substanz in Kompost oder Gärgut und dem Volumengewicht festgestellt (Abb. 5.2).

Abb. 5.2 > Bestimmung des Gehalts an organischer Substanz bei 100 Schweizer Kompost, angegeben als Glühverlust und Volumengewicht

Gehalt an organischer Substanz im Verhältnis zum Volumengewicht



Gehalt an organischer Substanz nach Produktklasse

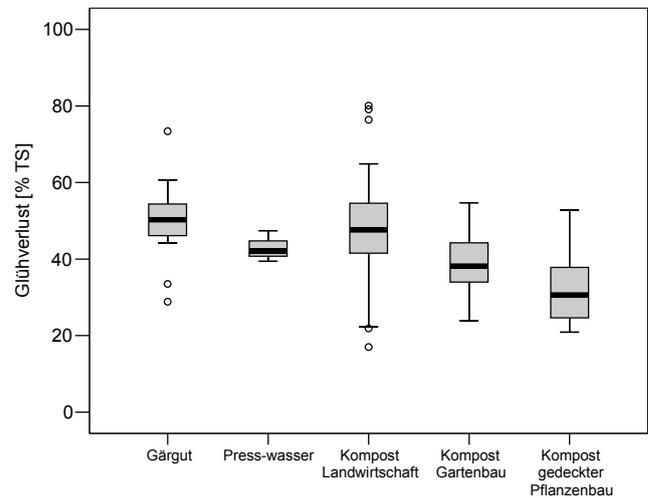


Foto 2 > Unterschiedliche Struktur verschiedener Produkte

Gärgut



Kompost für den gedeckten Pflanzenbau



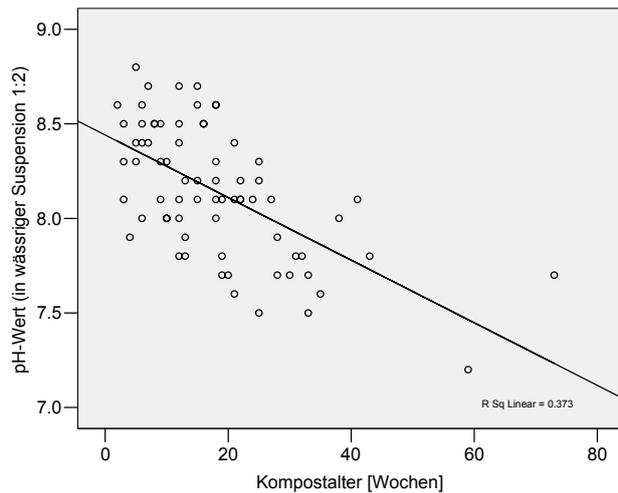
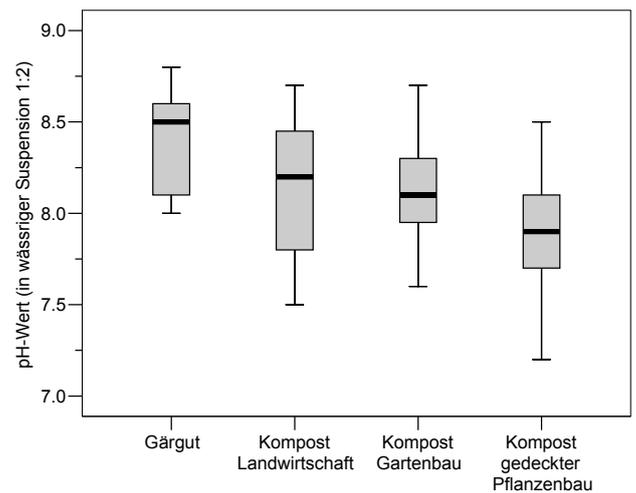
Tab. 5.1 > Physikalisch-chemische Eigenschaften von Kompost und Gärgut in der Schweiz

Klassifizierung gemäss der VKS Richtlinie 2001		Volumengewicht [g/l]	Trockensubstanz [% FS]	Glühverlust [% TS]	Wasserhaltekapazität [%]	Salzgehalt (wässriger Extrakt 1:10) [µS]	pH-Wert (im Wasserfiltrat 1:2)	pH-Wert (in wässriger Suspension 1:2)	pH-Wert (im Wasserfiltrat 1:10)	pH-Wert (in wässriger Suspension 1:10)
Gärgut (n=11)	Median	468	53,1	50,3	58,1	2930	8,5	8,5	9,1	9,2
	10 % Perzentile	328	48,1	33,5	49,6	1965	8,2	8,0	8,5	8,6
	90 % Perzentile	577	69,1	60,7	63,0	3435	8,6	8,7	9,3	9,3
	Minimum	321	45,4	28,9	49,6	1220	8,1	8,0	8,4	8,5
	Maximum	631	75,2	73,4	67,2	3920	8,6	8,8	9,3	9,3
	Mittelwert	472	55,9	49,7	57,2	2829	8,4	8,4	9,0	9,0
	Standardabweichung	98	9,7	12,2	5,4	720	0,2	0,3	0,3	0,3
Presswasser (n=4)	Median	nicht bestimmt	15,2	42,1	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt
	10 % Perzentile		9,0	39,9						
	90 % Perzentile		15,4	46,3						
	Minimum		7,5	39,4						
	Maximum		15,5	47,4						
	Mittelwert		12,7	43,0						
	Standardabweichung		4,5	4,1						
Kompost für die Landwirtschaft (n=34)	Median	556	50,8	47,7	57,5	3343	8,4	8,2	8,9	9,1
	10 % Perzentile	472	40,0	32,6	48,7	1634	8,1	7,7	8,3	8,7
	90 % Perzentile	669	61,0	64,1	63,6	4376	8,6	8,5	9,2	9,3
	Minimum	412	28,2	17,0	36,4	920	7,8	7,5	8,2	8,5
	Maximum	851	73,4	80,1	76,6	5260	8,7	8,7	9,3	9,4
	Mittelwert	570	50,7	48,2	56,8	3114	8,4	8,1	8,8	9,1
	Standardabweichung	101	9,5	14,4	7,1	1085	0,2	0,4	0,4	0,3
Kompost für den Gartenbau (n=36)	Median	609	56,7	38,1	58,0	2653	8,4	8,1	8,9	9,0
	10 % Perzentile	499	47,1	26,8	48,9	1774	8,1	7,8	8,4	8,7
	90 % Perzentile	745	66,2	49,3	63,4	4240	8,5	8,5	9,1	9,2
	Minimum	434	40,8	23,9	23,8	675	7,8	7,6	7,5	8,3
	Maximum	836	71,1	54,7	64,8	7575	8,7	8,7	9,4	9,5
	Mittelwert	624	55,9	38,4	56,3	2957	8,3	8,1	8,8	9,0
	Standardabweichung	101	7,7	8,1	7,8	1327	0,2	0,3	0,4	0,3
Kompost für den gedeckten Pflanzenbau (n=16)	Median	715	56,3	30,5	57,5	3090	8,3	7,9	8,6	8,9
	10 % Perzentile	658	41,3	22,7	54,5	1458	7,8	7,6	8,1	8,3
	90 % Perzentile	862	61,9	46,1	66,9	4500	8,4	8,3	9,0	9,2
	Minimum	631	32,2	20,9	39,8	1316	7,4	7,2	7,7	7,7
	Maximum	904	64,5	52,8	74,5	6215	8,5	8,5	9,3	9,5
	Mittelwert	742	54,0	32,7	58,5	3076	8,2	7,9	8,5	8,8
	Standardabweichung	82	9,2	9,6	7,4	1356	0,3	0,3	0,4	0,4

Der Anteil an organischer Substanz wird durch den Glühverlust bestimmt und nimmt mit dem Ausreifungsgrad der Produkte ab (Tab. 5.1, Abb. 5.2). Die in der Landwirtschaft eingesetzte Kompost enthält im Durchschnitt 48 % organische Substanz, die für den gedeckten Pflanzenbau im Durchschnitt 33 %. Daran zeigt sich, dass die Mineralisierung der organischen Substanz während der Kompostierung normal verläuft. Interessanterweise ist der Gehalt an organischer Substanz bei Feldrandkompost wesentlich geringer als bei den übrigen, was vermutlich auf die Kombination zweier Faktoren zurückzuführen ist: Zum einen die bereits fortgeschrittenere Verrottung des Ausgangsmaterials aufgrund des längeren Prozesses und zum anderen der höhere Gehalt an Erde, die vom Boden unterhalb der Mieten kommt und beim Umsetzen mit dem Komposthaufen vermischt wird.

Der **pH-Wert** von Kompost und Gärgut nimmt mit dem Ausreifungsgrad der Produkte ab (Tab. 5.1, Abb. 5.3). Allerdings ist festzustellen, dass auch innerhalb derselben Produktklasse die pH-Werte stark voneinander abweichen. Ausschlaggebender Faktor für den pH-Wert ist die Zusammensetzung des mineralisierten Stickstoffs. In jungem Kompost tritt Stickstoff hauptsächlich in Form von Ammonium auf, das als Base wirkt. Erst durch die Ausreifung, bei der über die Nitrifizierung Nitrat entsteht, sinkt der pH-Wert wieder. Dies wird bestätigt durch die Tatsache, dass der pH-Wert mit dem Ammoniumgehalt des Komposts positiv, mit dem Nitratgehalt und dem $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis hingegen negativ korreliert (Abb. 5.4).

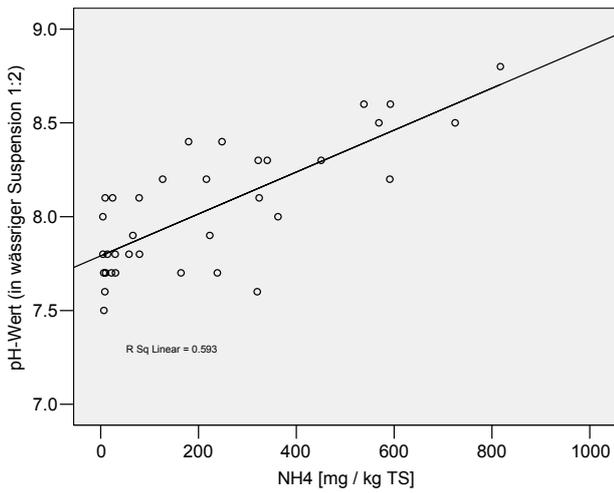
Zum pH-Wert ist wichtig zu betonen, dass dieser durch die Extraktionsmethode des Komposts und durch das Messverfahren beeinflusst wird. So weisen Extraktionen mit wässrigen Extrakten im Verhältnis 1:10 durchschnittlich einen 0,5 Einheiten höheren pH-Wert auf als mit Extrakten im Verhältnis 1:2 (Tab. 5.1). Das Messergebnis hängt ebenfalls davon ab, ob der pH-Wert in der Suspension vor der Filterung oder im Extrakt nach der Filterung gemessen wird. Das Abnehmen des pH-Werts mit fortschreitendem Ausreifungsgrad ist bei einer Messung in der Suspension des wässrigen Extraktes im Verhältnis 1:2 deutlich zu beobachten (Abb. 5.3), bei einer Messung des pH-Werts im filtrierte Extrakt hingegen kaum (Tab. 5.1). Derzeit werden an der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART ergänzende Arbeiten durchgeführt, um eine offizielle Methode zur Messung der Formen von mineralischem Stickstoff in Kompost und Gärgut zu entwickeln.

Abb. 5.3 > pH-Werte in der wässrigen Suspension (1:2) von 100 Schweizer Kompost*pH-Wert im Verhältnis zur Kompostreife**pH-Werte nach Produktklassen*

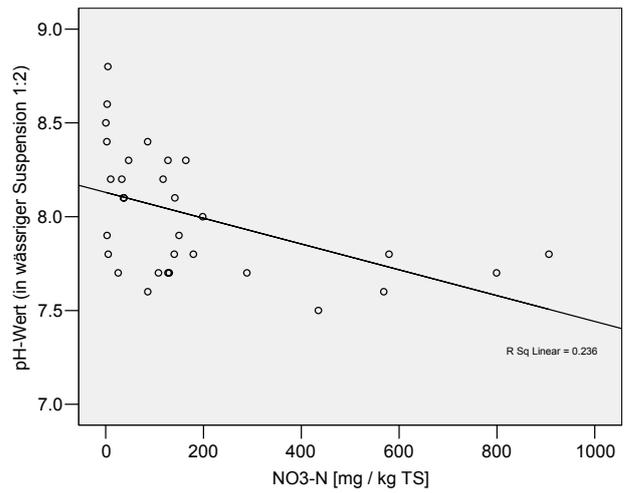
Der **Salzgehalt** ist in den verschiedenen Kompost- und Gärgutproben sehr unterschiedlich (Tab. 5.1) und hängt nicht vom Ausreifungsgrad ab. Generell wird der Salzgehalt in den Endprodukten vor allem von den Ausgangsmaterialien bestimmt, während die Rotteführung selbst kaum eine Rolle spielt. Dies erklärt auch die grossen Unterschiede beim Salzgehalt innerhalb derselben Produktklasse (Tab. 5.1). Der Einfluss der Ausgangsmaterialien auf den Salzgehalt ist deutlich erkennbar, wenn man prüft, zu welchem Zeitpunkt die Ausgangsmaterialien gesammelt wurden (Abb. 5.5). Kompost aus Materialien, die in den Wintermonaten gesammelt wurden (viele Blätter und Holz), enthält wesentlich weniger Salz als Produkte aus Sommermaterialien (viel Rasen und Grünabfälle).

Abb. 5.4 > Verhältnis zwischen dem $\text{NH}_4\text{-N}$ - und dem $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt von Kompost und dem pH-Wert

pH-Wert im Verhältnis zum $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt



pH-Wert im Verhältnis zum $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt



pH-Wert im Verhältnis zum $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis.

Analyse der $\text{NH}_4\text{-N}$ - und $\text{NO}_3\text{-N}$ -Werte in einem wässrigen Extrakt im Verhältnis 2:1

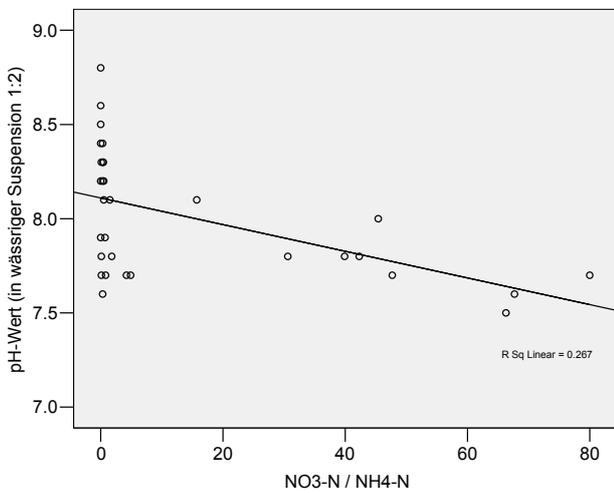
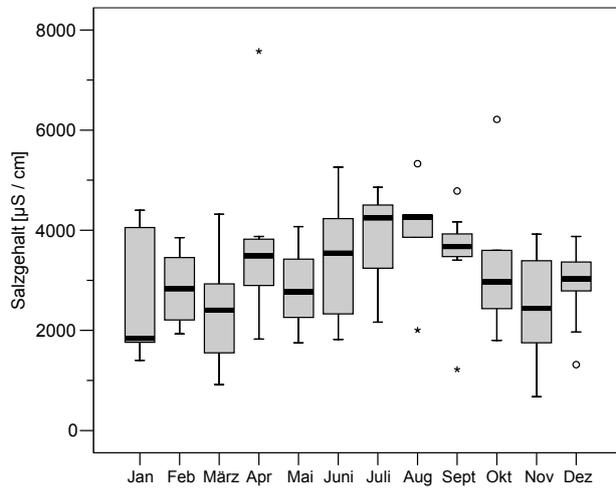
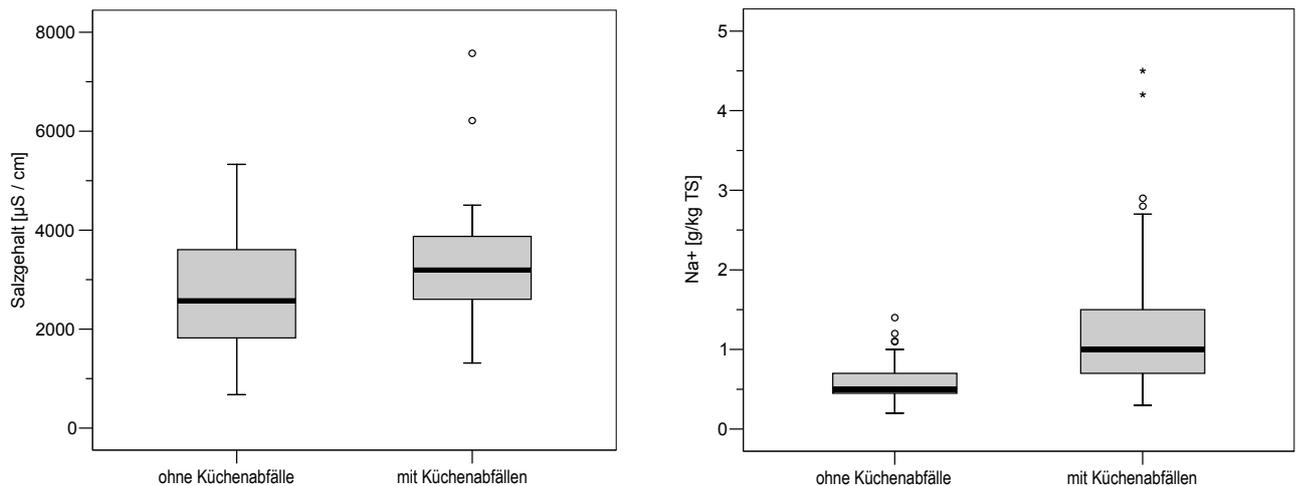


Abb. 5.5 > Verhältnis zwischen dem Sammelzeitpunkt der Ausgangsmaterialien und dem Salzgehalt der Endprodukte



Der Salzgehalt wird ebenfalls von Küchenabfällen beeinflusst, jedoch auf selektivere Art und Weise (Abb. 5.6): Der Salzgehalt von Kompost, die auch Küchenabfälle enthalten, ist im Durchschnitt nur 18% höher (geringfügige Erhöhung), der Natriumgehalt hingegen um 59% höher.

Abb. 5.6 > Einfluss von Küchenabfällen in den Ausgangsmaterialien auf den gesamten Salzgehalt von Kompost und Gärgut (links) und auf den Natriumgehalt (rechts)

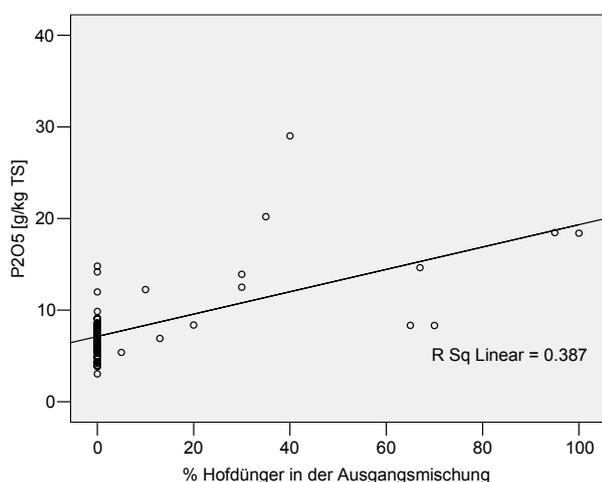


Der **Nährstoffgehalt** von Kompost und Gärgut wird in Tabelle 5.2 dargestellt. Der Phosphor-, Kali-, Magnesium- und Kalziumgehalt von Kompost und Gärgut ist praktisch identisch, wobei die Abweichungen innerhalb derselben Produktklasse deutlich grösser sind als zwischen den einzelnen Klassen. Das liegt daran, dass diese Werte in erster Linie durch die Ausgangsmaterialien beeinflusst werden. Besonders deutlich zu erkennen ist dies am Verhältnis zwischen der Menge Hofdünger in den Ausgangsmaterialien und dem Phosphorgehalt der Endprodukte (Abb. 5.7). Auch in Bezug auf den **Gesamtstickstoff**-Gehalt von Kompost und Gärgut ist zwischen den verschiedenen Produktklassen kein Unterschied festzustellen (Tab. 5.3).

Gärgut enthält im Durchschnitt mehr **Natrium** als Kompost (Tab. 5.2), was daran liegt, dass sich unter den Ausgangsmaterialien für Vergärungsanlagen mehr Küchenabfälle befinden.

Presswasser hat eine andere Zusammensetzung als Kompost und Gärgut. Im Vergleich zur Trockensubstanz enthält es mehr Kali, Phosphor, Stickstoff, Magnesium, Mangan und Eisen (Tab. 5.3). Dagegen enthält Presswasser nur etwa halb so viel Kalzium als Kompost und Gärgut, da das Kalzium im festen Teil des Gärguts bleibt.

Abb. 5.7 > Verhältnis zwischen der Menge Hofdünger in der Ausgangsmischung und dem Phosphatgehalt in Kompost und Gärgut der Schweiz



Für den Verwender von Kompost und Gärgut ist weniger der Gesamtstickstoff-Gehalt von Bedeutung, als dessen Verfügbarkeit für die Pflanzen. Ein wichtiger Faktor ist die Menge an **mineralisiertem Stickstoff** in Kompost und Gärgut, der aus **Ammonium (NH₄-N)**, **Nitrit (NO₂-N)** und **Nitrat (NO₃-N)** besteht. Festzustellen ist, dass diese Werte innerhalb derselben Produktklasse sehr unterschiedlich sind, was vor allem an den enormen Standardabweichungen bei Nitrit zu erkennen ist. Dieser Wert wird in erster Linie von den Prozessbedingungen und von der Lagerung des Endproduktes beeinflusst. Der Gehalt an Ammonium und Nitrat hingegen ist je nach Produktklasse sehr unterschiedlich (Tab. 5.3). So enthält Gärgut durchschnittlich mehr mineralisierten

Stickstoff als Kompost (Abb. 5.8), und zwar vorwiegend in Form von Ammonium. Darauf ist besonders zu achten, da Ammonium beim Austrocknen des Gärguts gasförmig entweicht und somit verloren geht. Die verschiedenen Komposte enthalten etwa dieselbe Menge an mineralisiertem Stickstoff, jedoch in unterschiedlicher Form (Abb. 5.8). Kompost für die Landwirtschaft enthält vorwiegend Ammonium, Kompost für den gedeckten Pflanzenbau vorwiegend Nitrat. Kompost für den Gartenbau liegt in der Mitte und enthält sowohl Ammonium, als auch Nitrit und Nitrat. Diese Werte spiegeln den Nitrifizierungsprozess während der Rotteführung deutlich wider.

Die Ergebnisse spiegeln die biologischen Abbauprozesse der organischen Substanz gut wider. Aus dem Eiweissabbau wird Stickstoff zunächst in Form von Ammoniakgas freigesetzt und anschliessend in Nitrat umgesetzt (Nitrifizierung). Nitrit ist eine während des Prozesses entstehende Zwischenverbindung. Damit die Nitrifizierung stattfinden kann, braucht es genügend Sauerstoff. Tritt während des Abbauprozesses der organischen Substanz Sauerstoffmangel auf, kann Ammonium nicht nitrifiziert werden und bleibt in Form von Ammonium bestehen.

Aus diesen Gründen enthält frisches Gärgut praktisch nur Ammonium in recht grossen Mengen, denn zum einen sind Gärprodukte relativ stickstoffhaltig und zum anderen löst sich Ammonium im stark wasserhaltigen Gärgut, so dass praktisch kein Ammonium gasförmig entweicht und nichts verloren geht. Der kritische Moment tritt ein, wenn das Gärgut mit der Luft in Berührung kommt. Die Nitrifizierung setzt normalerweise sehr schnell ein. Doch sobald die Feuchtigkeit des Gärguts abnimmt, geht ein Teil des mineralisierten Stickstoffs in Form von Ammoniakgas in der Luft verloren. Je trockener das Gärgut ist, desto mehr geht verloren. Eine falsche Behandlung des Gärguts nach dessen Entnahme aus der Vergärungsanlage kann dazu führen, dass ein ursprünglich stickstoffreiches Produkt zu einem Produkt wird, das den Nährstoff bei der Verwendung sogar blockiert.

Ein recht guter Indikator für die Prozessbedingungen ist Nitrit. Wie bereits erwähnt wurde, handelt es sich um eine Zwischenverbindung, die bei der Nitrifizierung von Ammonium entsteht. Daher ist es normal, Nitrit in einem relativ jungen Kompost zu finden, der sich in der Nitrifizierungsphase befindet. Nitrit hingegen in einem Kompost zu finden, der praktisch kein Ammonium mehr enthält, ist ein Hinweis darauf, dass der Komposthersteller bei der Rotteführung einen Fehler gemacht hat. Wenn nämlich ein nitrathaltiger Kompost aufgrund ungenügender Belüftung an Sauerstoffmangel leidet, wird Nitrat durch bestimmte Mikroorganismen im Kompost in Nitrit umgewandelt. Daran lässt sich die Qualität der Lagerung der Endprodukte beurteilen.

Da die Werte der verschiedenen Formen von mineralisiertem Stickstoff je nach Stadium des biologischen Prozesses und je nach Bedingungen stark abweichen, ist Stickstoff ein hervorragender Indikator für die Kompostqualität und lässt insbesondere abschätzen, ob der betreffende Kompost beim Einsatz den Stickstoff eher freisetzen oder blockieren wird. Dazu dient insbesondere das $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis. Bei einem biologisch jungen Kompost liegt das $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis unter 1, bei einem Kompost in biologisch fortgeschrittenerem Stadium deutlich über 1. In Kapitel 5.4 befinden sich noch mehr Informationen zu diesem Thema.

Tab. 5.2 > Nährstoffgehalt von Kompost und Gärgut in der Schweiz (ohne Stickstoff)

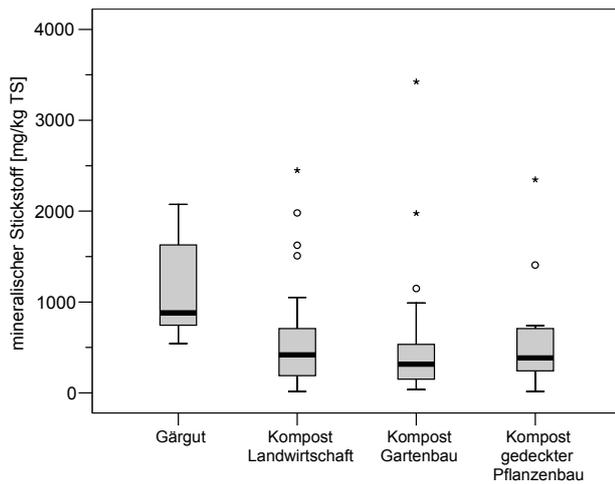
Klassifizierung gemäss der VKS Richtlinie 2001		Gesamt-P ₂ O ₅ [g/kg TS]	Gesamt-P [g/kg TS]	Gesamt-K ₂ O [g/kg TS]	Gesamt-K [g/kg TS]	Na [g/kg TS]	Mg [g/kg TS]	Ca [g/kg TS]	Fe [g/kg TS]	Mn [mg/kg TS]
Gärgut (n=11)	Median	8,2	3,6	15,0	12,5	1,3	6,8	60,3	8,9	412,2
	10 % Perzentile	6,4	2,8	10,2	8,5	1,1	5,7	38,4	5,4	347,8
	90 % Perzentile	14,6	6,7	18,6	16,4	1,7	8,0	149,1	9,7	1264,5
	Minimum	4,7	2,0	7,7	6,4	0,5	3,7	23,0	3,7	267,0
	Maximum	18,5	8,0	25,1	20,8	2,0	9,7	152,3	12,3	1436,6
	Mittelwert	9,0	3,9	15,1	12,6	1,3	6,8	71,4	8,0	574,2
	Standardabweichung	4,0	1,8	4,7	4,0	0,4	1,5	41,5	2,5	390,6
Presswasser (n=4)	Median	14,2	6,2	37,2	30,9	2,8	9,1	32,3	15,5	634,3
	10 % Perzentile	12,4	5,4	33,0	27,3	2,7	8,6	31,3	13,5	621,2
	90 % Perzentile	14,7	6,4	39,2	32,5	3,9	10,4	36,4	18,6	769,9
	Minimum	12,0	5,2	31,9	26,5	2,7	8,5	31,1	13,0	618,0
	Maximum	14,8	6,5	39,6	32,9	4,2	10,8	37,5	19,3	803,8
	Mittelwert	13,7	6,0	36,3	30,1	3,2	9,5	33,6	15,9	685,4
	Standardabweichung	1,5	0,6	4,0	3,3	0,9	1,2	3,4	3,2	102,9
Kompost für die Landwirtschaft (n=34)	Median	6,9	3,0	13,9	12,0	0,7	4,8	53,2	8,8	385,3
	10 % Perzentile	4,7	2,0	8,6	7,3	0,5	3,9	32,5	5,9	286,6
	90 % Perzentile	8,6	3,8	20,3	16,8	1,5	7,2	72,0	12,4	471,9
	Minimum	3,9	1,7	6,9	5,7	0,3	3,6	23,1	2,9	212,2
	Maximum	13,9	6,1	30,3	25,2	4,5	10,3	83,7	16,7	773,6
	Mittelwert	7,1	3,1	14,7	12,2	0,9	5,4	54,2	9,0	395,3
	Standardabweichung	2,1	0,9	5,5	4,5	0,8	1,5	15,6	3,0	106,9
Kompost für den Gartenbau (n=36)	Median	6,8	3,0	14,0	11,6	0,6	6,5	65,7	10,1	446,7
	10 % Perzentile	5,0	2,2	8,2	6,8	0,3	5,0	50,1	8,0	329,7
	90 % Perzentile	8,7	3,8	18,3	15,2	1,1	10,1	81,9	12,4	655,2
	Minimum	3,0	1,3	2,6	2,2	0,2	4,4	35,0	5,4	244,9
	Maximum	29,0	12,6	24,9	20,7	1,9	10,7	91,5	14,6	1000,3
	Mittelwert	7,3	3,2	13,7	11,4	0,7	7,1	65,9	10,1	480,3
	Standardabweichung	4,0	1,7	4,5	3,7	0,4	1,9	12,9	1,9	157,8
Kompost für den gedeckten Pflanzenbau (n=16)	Median	7,6	3,3	12,6	10,7	0,6	6,5	61,4	12,0	566,9
	10 % Perzentile	5,4	2,4	7,9	6,8	0,3	4,7	38,6	10,2	459,6
	90 % Perzentile	15,3	6,7	17,6	14,6	1,1	11,7	74,4	14,4	721,1
	Minimum	4,8	2,1	6,6	5,5	0,3	4,4	29,5	6,1	289,3
	Maximum	20,2	8,8	33,6	27,8	1,4	13,3	82,8	15,8	788,2
	Mittelwert	8,9	3,9	13,8	11,5	0,7	7,4	58,2	12,0	566,4
	Standardabweichung	4,4	1,9	6,2	5,1	0,3	2,9	14,9	2,2	119,9

Tab. 5.3 > Gehalt der Stickstoffformen in Kompost und Gärgut der Schweiz

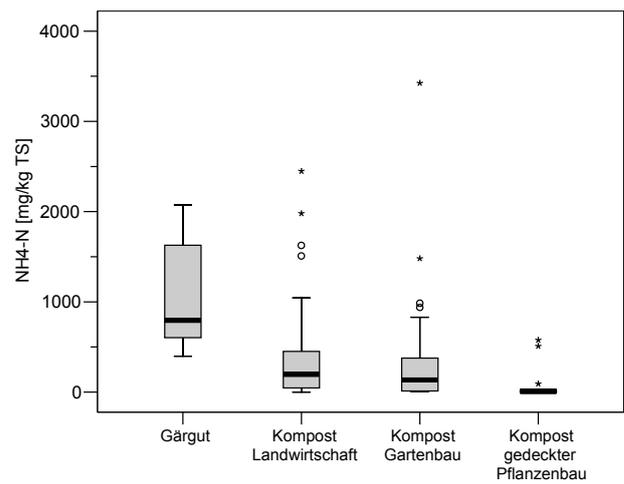
Klassifizierung gemäss der VKS Richtlinie 2001		Gesamt-N [g/kg TS]	Wässriger Extrakt 1:2					CaCl ₂ -Extrakt 1:10				
			NH ₄ -N [mg/kg TS]	NO ₂ -N [mg/kg TS]	NO ₃ -N [mg/kg TS]	Nmin [mg/kg TS]	NO ₂ -N / NH ₄ -N	NH ₄ -N [mg/kg TS]	NO ₂ -N [mg/kg TS]	NO ₃ -N [mg/kg TS]	Nmin [mg/kg TS]	NO ₂ -N / NH ₄ -N
Gärgut (n=11)	Median	15,3	428	0,0	86	592	0,3	797	0	4	879	0,0
	10 % Perzentile	11,9	294	0,0	21	330	0,1	455	0	0	600	0,0
	90 % Perzentile	18,3	762	0,0	108	764	0,3	2019	110	229	2019	0,5
	Minimum	9,4	248	0,0	4	324	0,0	398	0	0	542	0,0
	Maximum	20,3	817	160,6	114	822	0,3	2075	133	348	2075	0,9
	Mittelwert	15,1	450	14,6	68	552	0,2	1106	26	80	1181	0,2
	Standardabweichung	3,1	215	48,4	57	209	0,2	641	48	130	575	0,3
Presswasser (n=4)	Median	23,0	nicht bestimmt					nicht bestimmt				
	10 % Perzentile	21,6										
	90 % Perzentile	24,7										
	Minimum	21,2										
	Maximum	25,1										
	Mittelwert	23,1										
	Standardabweichung	2,0										
Kompost für die Landwirtschaft (n=34)	Median	16,6	151	0,0	10	315	0,0	200	0	2	417	0,0
	10 % Perzentile	11,3	15	0,0	0	45	0,0	16,2	0	0	45,4	0,0
	90 % Perzentile	21,5	682	103,6	550	916	29,0	1369	82	534	1372	12,7
	Minimum	8,7	6,6	0,0	0	13,7	0,0	0,0	0	0	15,8	0,0
	Maximum	26,0	1239	243,7	906	1240	66,3	2449	198	841	2449	67,2
	Mittelwert	16,7	263	22,0	135	419	7,5	440	20	115	575	4,4
	Standardabweichung	4,0	343	53,7	261	343	17,0	611	50	238	573	13,4
Kompost für den Gartenbau (n=36)	Median	14,6	75	0,0	89	245	1,1	135	0	53	316	0,4
	10 % Perzentile	10,6	5,3	0,0	7	60,8	0,1	7,1	0	0	69,4	0,0
	90 % Perzentile	18,7	529,4	27,7	455	588	37,3	884	26	358	909	28,6
	Minimum	9,2	3,7	0,0	0	38	0,0	4,4	0	-1	36,6	0,0
	Maximum	27,6	955,4	53,2	569	1543	67,7	3424	59	551	3424	72,0
	Mittelwert	14,9	173,2	7,5	147	332	9,2	349	9	119	477	7,7
	Standardabweichung	3,7	245,3	14,1	171	334	17,9	625	15	155	629	16,2
Kompost für den gedeckten Pflanzenbau (n=16)	Median	15,1	10,0	0,0	198	414	45,4	8,4	0	319	384	32,5
	10 % Perzentile	10,9	5,4	0,0	111	182	0,3	0,0	0	99	159,	0,4
	90 % Perzentile	22,9	320,8	4,1	821	831	80,8	301	12	1004	1073,	76,5
	Minimum	8,6	4,4	0,0	86	150	0,3	0,0	0	8	14,6	0,2
	Maximum	25,2	321,9	40,0	854	865	82,0	577	35	2338	2347	273,7
	Mittelwert	15,8	97,4	3,0	356	461	38,8	79	4	504	587	49,0
	Standardabweichung	4,9	152,8	10,1	328	282	34,6	183	10	586	577	72,1

Abb. 5.8 > Gehalt an mineralischem Stickstoff in den 100 Schweizer Kompost- und Gärgutproben.
Messung von mineralischem Stickstoff mit einem CaCl₂-Extrakt im Verhältnis 1:10

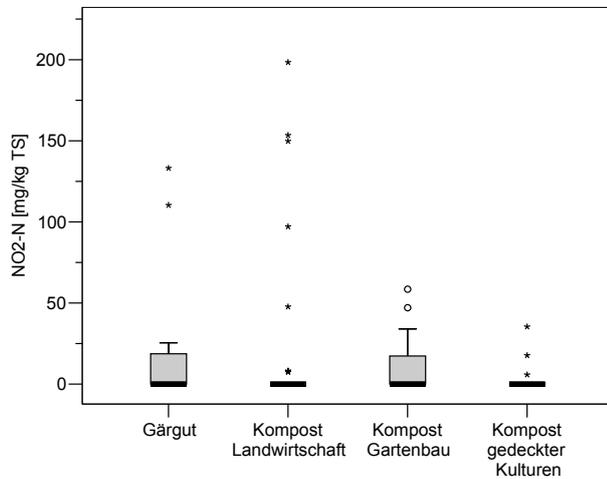
Gesamt-Stickstoffgehalt



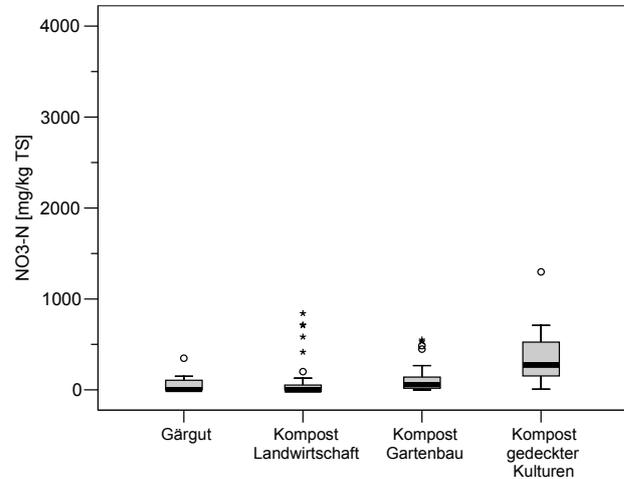
Ammonium



Nitrit



Nitrat



Was den Gehalt an **Schwermetallen** in Kompost und Gärgut angeht, so liegen die meisten Proben weit unterhalb der Grenzwerte (Tab. 5.4). In einigen Fällen wurden die Grenzwerte für Kupfer und Blei jedoch überschritten. Presswasser enthält im Vergleich zur Trockensubstanz generell mehr Schwermetalle als Kompost, obwohl auch hier die Grenzwerte nicht überschritten werden. Einzige Ausnahme ist Nickel, das bei Presswasser durchschnittlich über dem Grenzwert liegt. Allerdings darf der Grenzwert von 30 [mg/kg TS] durchaus in Frage gestellt werden, da dieser im Gegensatz zu jenen für alle anderen Schwermetalle niedriger ist, als der Richtwert für Böden (50 [mg/kg TS]).

Tab. 5.4 > Schwermetallgehalte von Kompost und Gärgut in der Schweiz

Klassifizierung gemäss der VKS Richtlinie 2001		Cd [mg/kg TS]	Co [mg/kg TS]	Cr [mg/kg TS]	Cu [mg/kg TS]	Hg [mg/kg TS]	Mo [mg/kg TS]	Ni [mg/kg MS]	Pb [mg/kg MS]	Zn [mg/kg MS]
Gärgut (n=11)	Median	0,1	2,8	21,0	49,8	< Bestimmungsgrenze	< Bestimmungsgrenze	13,7	22,4	116,4
	10 % Perzentile	0,0	2,0	10,9	29,4			9,1	8,1	79,19
	90 % Perzentile	0,2	3,6	24,2	63,8			16,5	42,0	134,7
	Minimum	0,0	1,4	8,0	21,3			8,2	6,6	60,39
	Maximum	0,3	5,3	31,1	68,5			17,0	282,1	157,5
	Mittelwert	0,1	2,9	19,6	47,3			12,8	45,9	113,3
	Standardabweichung	0,1	1,0	6,7	14,7			3,1	79,0	27,55
Presswasser (n=4)	Median	0,2	6,1	39,8	77,0	< Bestimmungsgrenze	< Bestimmungsgrenze	30,7	59,6	263,3
	10 % Perzentile	0,2	5,7	37,7	73,2			27,5	57,6	254,4
	90 % Perzentile	0,4	7,6	47,6	95,1			37,4	70,5	324,9
	Minimum	0,2	5,6	37,2	72,3			26,7	57,2	252,2
	Maximum	0,5	8,0	49,5	99,6			39,0	73,3	340,3
	Mittelwert	0,3	6,6	42,2	83,0			32,1	63,3	285,3
	Standardabweichung	0,2	1,3	6,5	14,6			6,3	8,7	47,97
Kompost für die Landwirtschaft (n=34)	Median	0,1	3,5	16,4	48,5	< Bestimmungsgrenze	< Bestimmungsgrenze	14,3	34,0	140,5
	10 % Perzentile	0,0	2,2	10,5	31,9			8,3	14,8	94,83
	90 % Perzentile	0,3	5,2	25,3	85,1			23,8	68,8	214,5
	Minimum	0,0	1,0	2,3	21,3			2,9	5,1	72,19
	Maximum	0,5	6,4	29,1	295,8			27,8	298,1	259,6
	Mittelwert	0,2	3,5	17,6	63,6			14,8	46,0	148,3
	Standardabweichung	0,1	1,2	6,2	54,1			6,1	49,9	47,32
Kompost für den Gartenbau (n=36)	Median	0,1	4,2	19,9	57,3	< Bestimmungsgrenze	< Bestimmungsgrenze	15,9	40,0	149,2
	10 % Perzentile	0,0	3,2	16,0	41,6			12,4	27,0	121,3
	90 % Perzentile	0,3	5,1	23,9	80,8			19,6	64,0	183,5
	Minimum	0,0	2,7	10,5	33,9			10,3	8,7	108,7
	Maximum	0,5	6,0	35,1	105,4			25,1	1016,3	272,7
	Mittelwert	0,1	4,1	20,0	58,4			15,8	69,7	155,4
	Standardabweichung	0,1	0,7	4,3	15,3			3,1	163,3	34,97
Kompost für den gedeckten Pflanzenbau (n=16)	Median	0,1	4,8	22,5	52,5	< Bestimmungsgrenze	< Bestimmungsgrenze	18,0	37,1	161,4
	10 % Perzentile	0,1	3,1	17,0	37,1			13,6	14,6	116,9
	90 % Perzentile	0,3	5,7	26,3	65,8			21,8	64,1	220,4
	Minimum	0,1	2,3	10,3	34,4			8,8	11,2	109,9
	Maximum	0,5	6,2	40,5	334,8			22,4	111,3	252,2
	Mittelwert	0,2	4,7	22,5	68,9			17,6	41,4	167,3
	Standardabweichung	0,1	1,1	6,3	71,5			3,5	24,6	44,53

5.2 Bestimmung der Reife und der Stabilität von Kompost und Gärgut

Zur Bestimmung des Ausreifungsgrades und der Stabilität der aus den Kompostierungs- und Vergärungsanlagen hervorgehenden Produkte wurden verschiedene Analysen durchgeführt. Zunächst wurde das $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis untersucht. Wie in Kapitel 5.1 bereits erwähnt wurde, verändert sich das Verhältnis zwischen Ammonium und Nitrat mit zunehmender Ausreifung, da Ammonium nitrifiziert wird. Dieser Prozess ist deutlich zu beobachten (Abb. 5.9), insofern als das $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis bei Komposten für den gedeckten Pflanzenbau höher ist. Dies zeigt, dass die VKS-Richtlinien 2001 (Fuchs et al. 2001) in diesem Punkt von den Kompostproduzenten eingehalten werden.

Abb. 5.9 > $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis von 100 Schweizer Kompost

Messung von mineralischem Stickstoff in einem CaCl_2 -Extrakt im Verhältnis 1:10

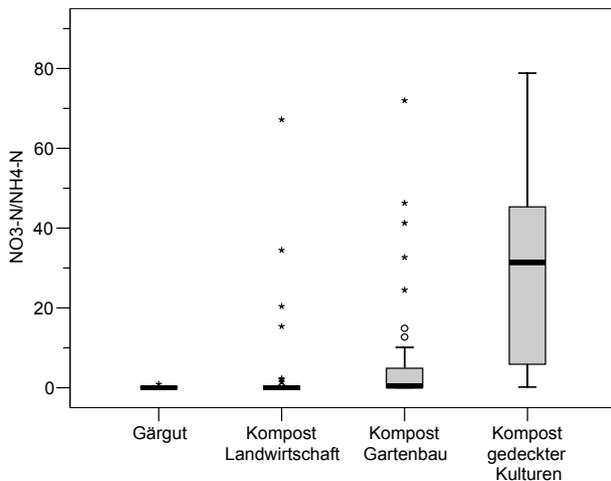
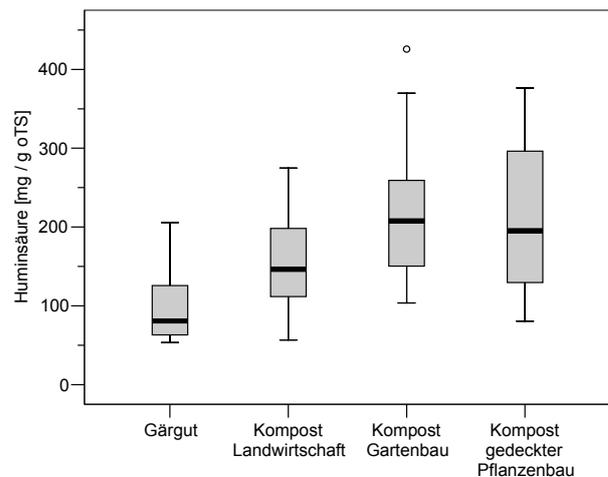


Abb. 5.10 > Huminsäuregehalt der 100 Schweizer Kompost- und Gärgutproben



Ein weiterer Faktor, der sich mit fortschreitendem Kompostierungsprozess verändert, ist der Gehalt des Komposts an Huminsäuren. Diese stabilisierte Form organischer Substanz ist für die Wirkung des Komposts auf die physikalischen Eigenschaften des Bodens von Bedeutung. Gärgut enthält generell weniger Huminsäuren als Kompost (Abb. 5.10). Es ist ebenfalls ein Unterschied zwischen den verschiedenen Kompostklassen zu beobachten: Kompost für die Landwirtschaft enthält weniger Huminsäuren als die beiden anderen reiferen Kompostklassen (Abb. 5.9).

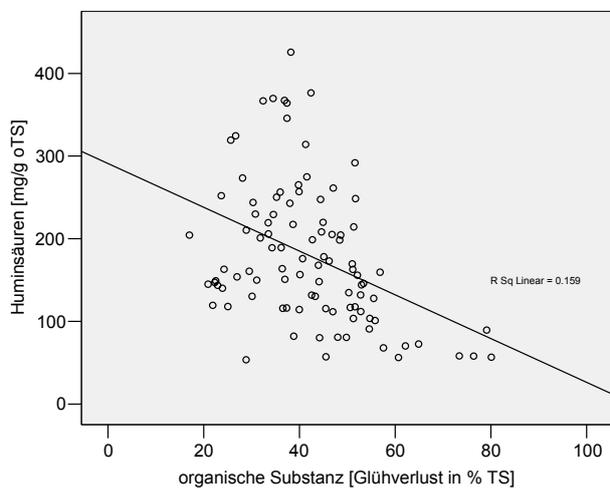
Wichtig festzuhalten ist die Tatsache, dass zwischen dem Anteil an Huminsäuren im Kompost und dem Gehalt an organischer Substanz keinerlei Korrelation besteht, ganz gleich, ob diese Parameter insgesamt für alle analysierten Kompost- und Gärgutproben (Abb. 5.11) oder nach Produktklassen verglichen werden (Beispiele von Kompost für den Gartenbau und solchen für den gedeckten Pflanzenbau in Abb. 5.11). Die Feuchtigkeitsregulierung im Rottekörper während des Kompostierungsprozesses könnte für

die Entstehung von Huminsäuren eine wichtige Rolle spielen. Es scheinen sich nämlich weniger Huminsäuren zu bilden, wenn während des Prozesses zu viel Feuchtigkeit vorhanden ist (Abb. 5.12), was wiederum auf die verringerte Aktivität aerober Mikroorganismen zurückzuführen sein könnte. Angesichts der relativ geringen Anzahl analysierter Proben sind jedoch zur Klärung dieses Punktes weitere Untersuchungen notwendig.

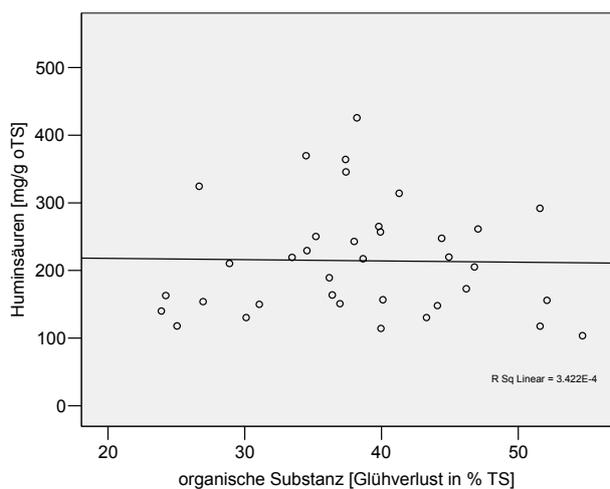
Abb. 5.11 > Verhältnis zwischen Huminsäuregehalt und Gehalt an organischer Substanz im Gärgut und Kompost der Schweiz

Gesamtanalyse aller Produkte

(Gärgut, Kompost für die Landwirtschaft, Kompost für den Gartenbau, Kompost für den gedeckten Pflanzenbau)



Analyse von Kompost für den Gartenbau



Kompost für den gedeckten Pflanzenbau

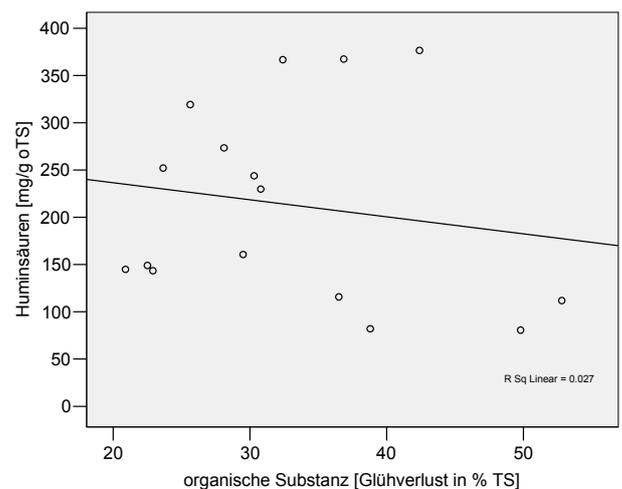
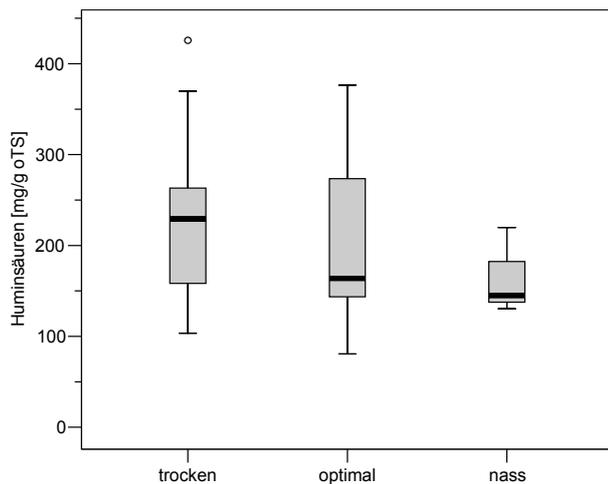


Abb. 5.12 > Verhältnis zwischen der Feuchtigkeit im Rottekörper während des Kompostierungsprozesses und dem Huminsäuregehalt von 51 für den Gartenbau und den gedeckten Pflanzenbau bestimmten Schweizer Kompost

Der Wassergehalt von Kompost wurde mit der Auspressmethode bestimmt.



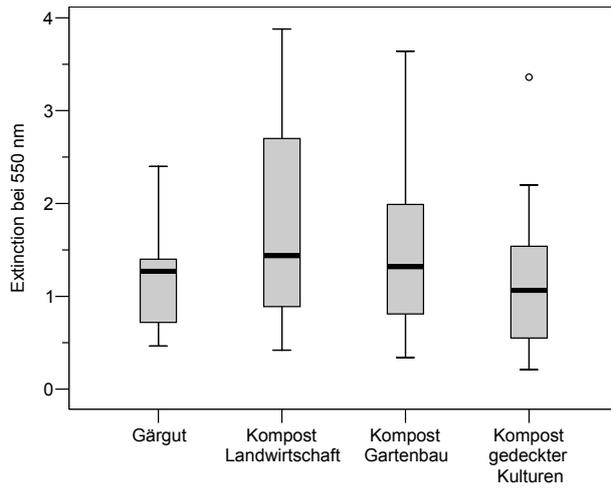
Der Huminsäuregehalt ist ein wichtiges Merkmal für die Qualität und die Stabilität von Kompost. Um eine schnellere, weniger komplizierte und kostengünstigere Methode für die Praxis zu entwickeln, wurden zwei Extraktionen in basischem Milieu getestet: die **NaOH-Extraktion** (zur Bestimmung der Intensität der Extraktfarbe durch photometrische Messung der Extinktion bei 550 nm) und die **Pyrophosphatzahl** (zur Bestimmung der Stabilität von Torf).

Während sich bei der NaOH-Extraktion die verschiedenen Produktklassen nicht unterscheiden (Abb. 5.13, links), verändert sich die Pyrophosphatzahl mit zunehmendem Ausreifungsgrad (Abb. 5.13, rechts). Ferner korreliert die Pyrophosphatzahl besser mit dem Huminsäuregehalt des Komposts als die NaOH-Extraktion (Abb. 5.14).

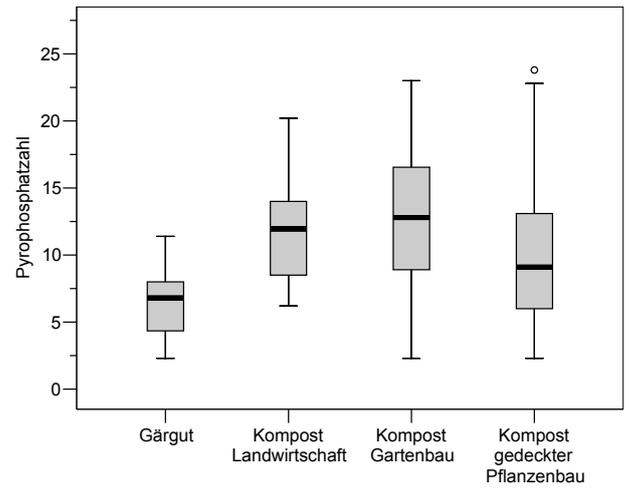
Bei der praktischen Anwendung von Kompost insbesondere für Trog- und Topfpflanzen ist die Farbe des **wässrigen Extrakts** von Kompost und Gärgut besonders wichtig, da z. B. das Giessen von Geraniumtöpfen, denen Kompost beigelegt wurde, beträchtlichen Schaden an Häuserfassaden anrichten kann. Die Farbe rührt von den wasserlöslichen Vorläufern der Huminstoffe her. Im Laufe des Reifungsprozesses werden diese Vorläufer in komplexere Moleküle integriert, die nicht mehr wasserlöslich sind. Somit nimmt die Farbintensität des wässrigen Extrakts mit fortschreitender Reifung des Komposts ab (Abb. 5.15). Mit reiferem Kompost verringert sich daher das Risiko einer Beschädigung der Hauswand. Festzuhalten ist, dass kein direkter Zusammenhang zwischen der Farbe des wässrigen Extrakts und dem Huminsäuregehalt des Komposts besteht (Abb. 5.15).

Abb. 5.13 > Bestimmung der Farbintensität von Extraktionen in basischem Milieu der 100 Schweizer Kompost- und Gärgutproben

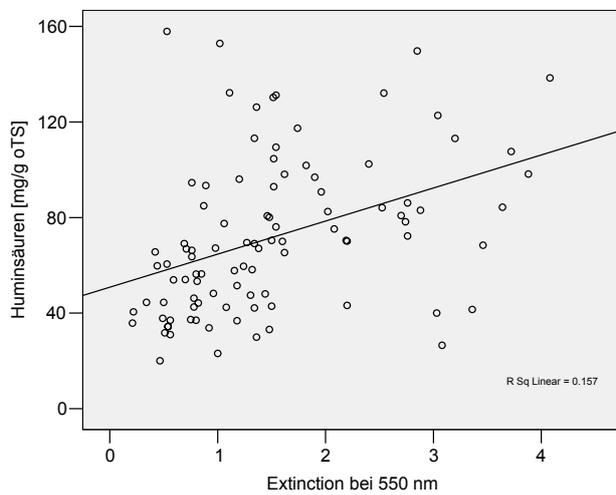
NaOH-Extraktion



Pyrophosphat-Extraktion

**Abb. 5.14** > Verhältnis zwischen der Farbintensität des Kompostextrakts (in basischem Milieu) und dem Huminsäuregehalt

NaOH-Extraktion



Pyrophosphat-Extraktion

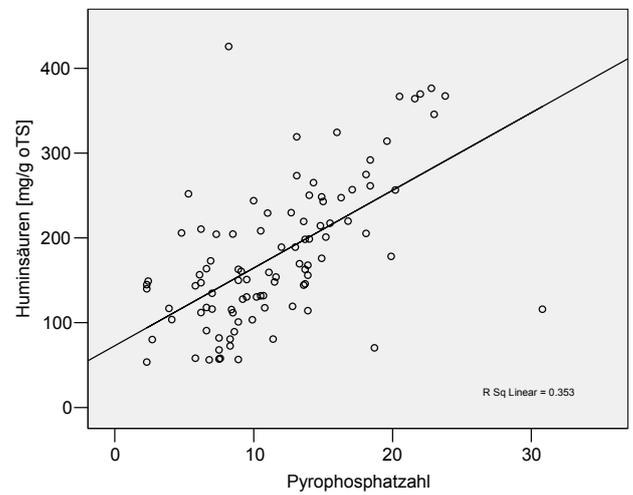
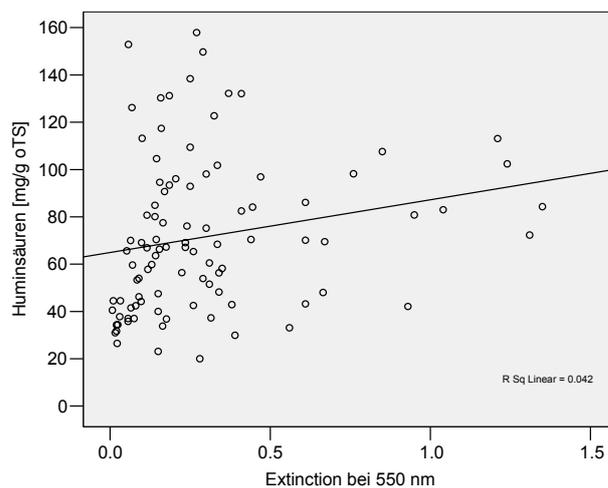
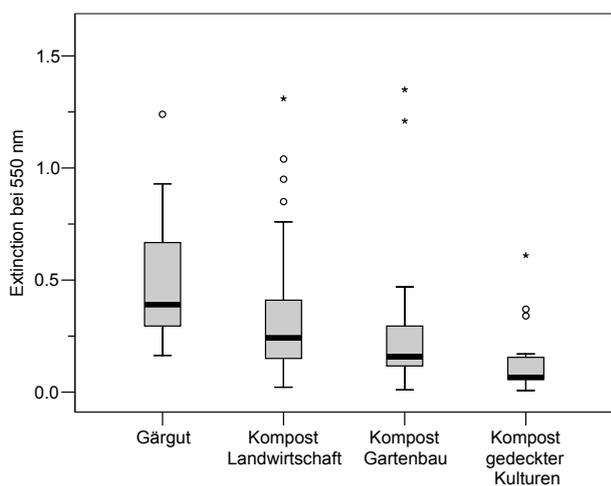


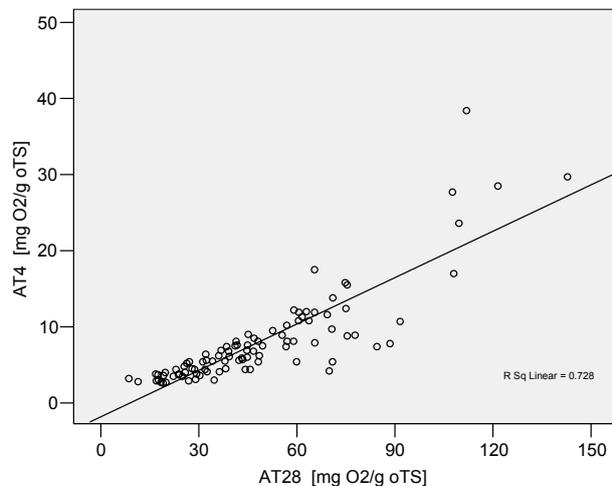
Abb. 5.15 > Bestimmung der Farbintensität der wässrigen Extrakte der 100 Schweizer Kompost- und Gärgutproben (links) und Zusammenhang zwischen Farbintensität und Huminsäuregehalt im Kompost (rechts)



5.3 Biologische Aktivität von Kompost und Gärgut

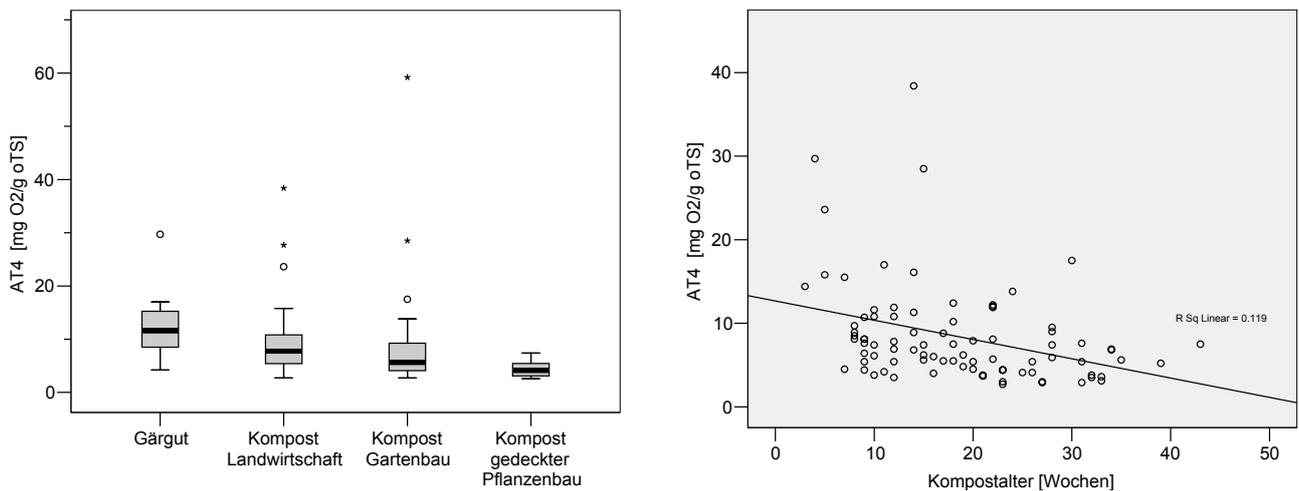
Kompost und Gärgut unterscheiden sich von den übrigen Bodenverbesserern und Düngern unter anderem durch ihre biologische Aktivität. Diese ist ein wichtiges Merkmal für die Qualität des Komposts und des Gärguts. Generell ist zu Beginn des Kompostierungsprozesses eine sehr intensive mikrobiologische Aktivität zu beobachten, da leicht abbaubare Substanzen zersetzt werden. Anschliessend lässt die Gesamtaktivität im Kompost quantitativ nach und wechselt zu einer qualitativen Aktivität, die mit der Reifung des Komposts einhergeht. Als erster Parameter wird dazu die Atmung der Mikroorganismen gemessen. Dabei wurden zwei Messungen durchgeführt: AT4 (Messung der mikrobiellen **Atmung** eines Komposts während 4 Tagen) und AT28 (Messung während 28 Tagen). Beide Messungen korrelieren deutlich miteinander (Abb. 5.16), so dass in Zukunft die weit günstigere AT4-Messung verwendet werden kann.

Abb. 5.16 > Korrelation zwischen der Messung der mikrobiellen Atmung von Kompost und Gärgut während 4 Tagen (AT4) und während 28 Tagen (AT28)



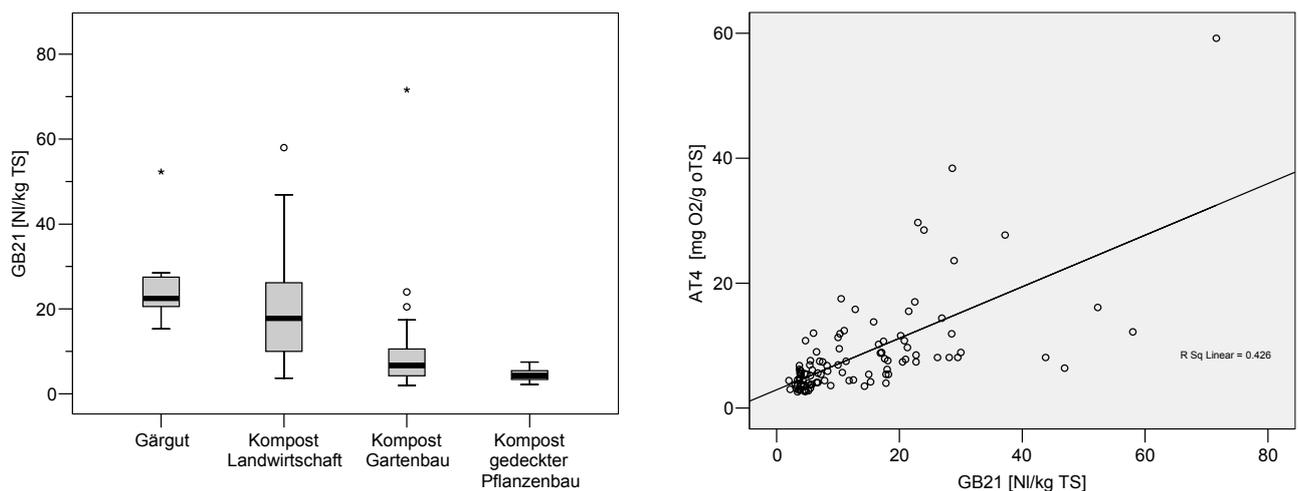
Je weiter der Verrottungsprozess fortschreitet, desto mehr lässt die Intensität der mikrobiellen Atmung nach (Abb. 5.17, links). Die abnehmende Atmung korreliert jedoch nicht mit dem Kompostalter (Abb. 5.17, rechts), was deutlich darauf hinweist, dass der Prozess stark variiert, je nachdem wie intensiv die Kompostierung ist und welche Ausgangsmaterialien verarbeitet werden. Anhand des absoluten Alters des Komposts lässt sich also keine Aussage über dessen Ausreifungsgrad machen.

Abb. 5.17 > Bestimmung der mikrobiellen Atmung der 100 Schweizer Kompost- und Gärgutproben (links) und Zusammenhang zwischen Atmungsintensität und Kompostalter (rechts)



Im Gegensatz zum dem mit der AT₄-Messung ermittelten Atmungspotenzial von Kompost wurde auch das Gasbildungspotenzial in anaerobem Milieu bestimmt (Abb. 5.18).

Abb. 5.18 > Bestimmung des Gasbildungspotenzials in anaerobem Milieu der 100 Schweizer Kompost- und Gärgutproben (links) und Zusammenhang zwischen dieser Intensität und dem mikrobiellen Atmungspotenzial (rechts)

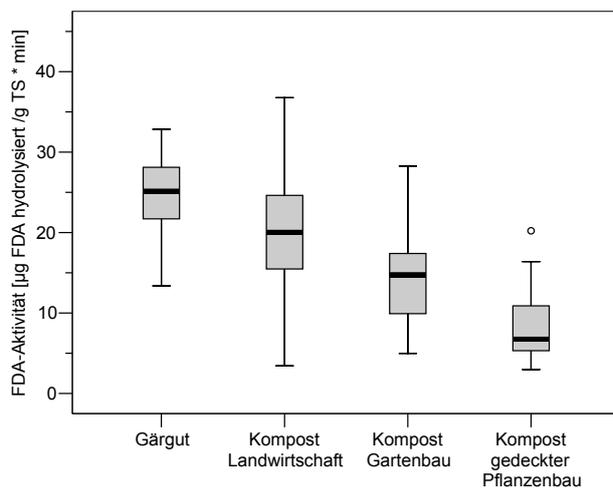


Zur Bestimmung der mikrobiellen Aktivität von Kompost wurden ausserdem vier Enzymaktivitäten untersucht (Abb. 5.19). Generell nehmen diese vier Enzymaktivitäten mit fortschreitendem Ausreifungsgrad ab. Sie entwickeln sich jedoch unterschiedlich. Mit der FDA-Aktivität lassen sich die vier Produktklassen am besten unterscheiden (Abb. 5.19, oben links) während die Dehydrogenase-Aktivität am wenigsten

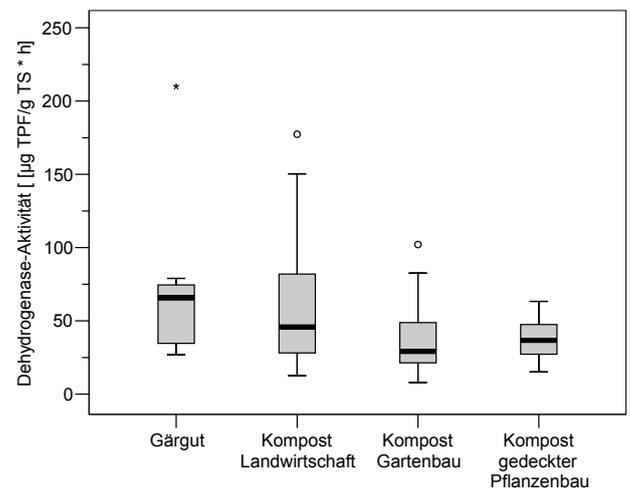
empfindlich ist (Abb. 5.19, oben rechts). Die Cellulase-Aktivität bleibt relativ lange konstant und weist bei Kompost für die Landwirtschaft und Kompost für den Gartenbau praktisch identische Werte auf. Bei fortgeschrittenerem Reifungsprozess (Kompost für den gedeckten Pflanzenbau) ist die Cellulase-Aktivität weniger intensiv (Abb. 5.19, unten rechts). Im Gegensatz dazu ist die Protease-Aktivität in jungen Produkten hoch, geht aber schnell zurück und stabilisiert sich schliesslich (Abb. 5.19, unten rechts). Zwischen den verschiedenen Enzymaktivitäten konnte keinerlei Korrelation festgestellt werden, was darauf hinweist, dass sich die einzelnen Mechanismen nicht parallel entwickeln sondern jeweils ihre Eigendynamik haben.

Abb. 5.19 > Bestimmung von vier Enzymaktivitäten der 100 Kompost- und Gärgutproben

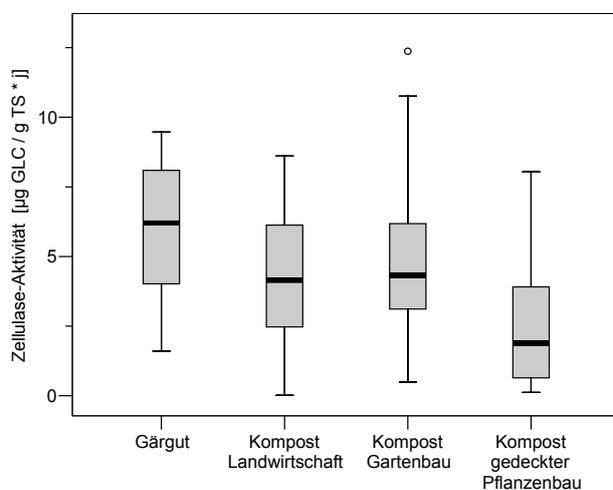
FDA-Aktivität



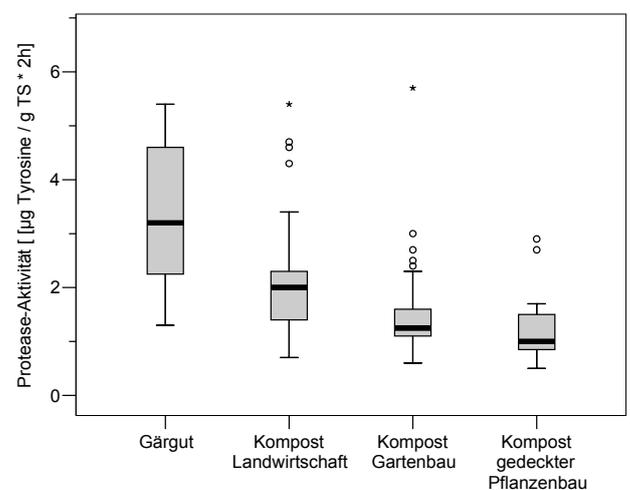
Dehydrogenase-Aktivität



Cellulase-Aktivität

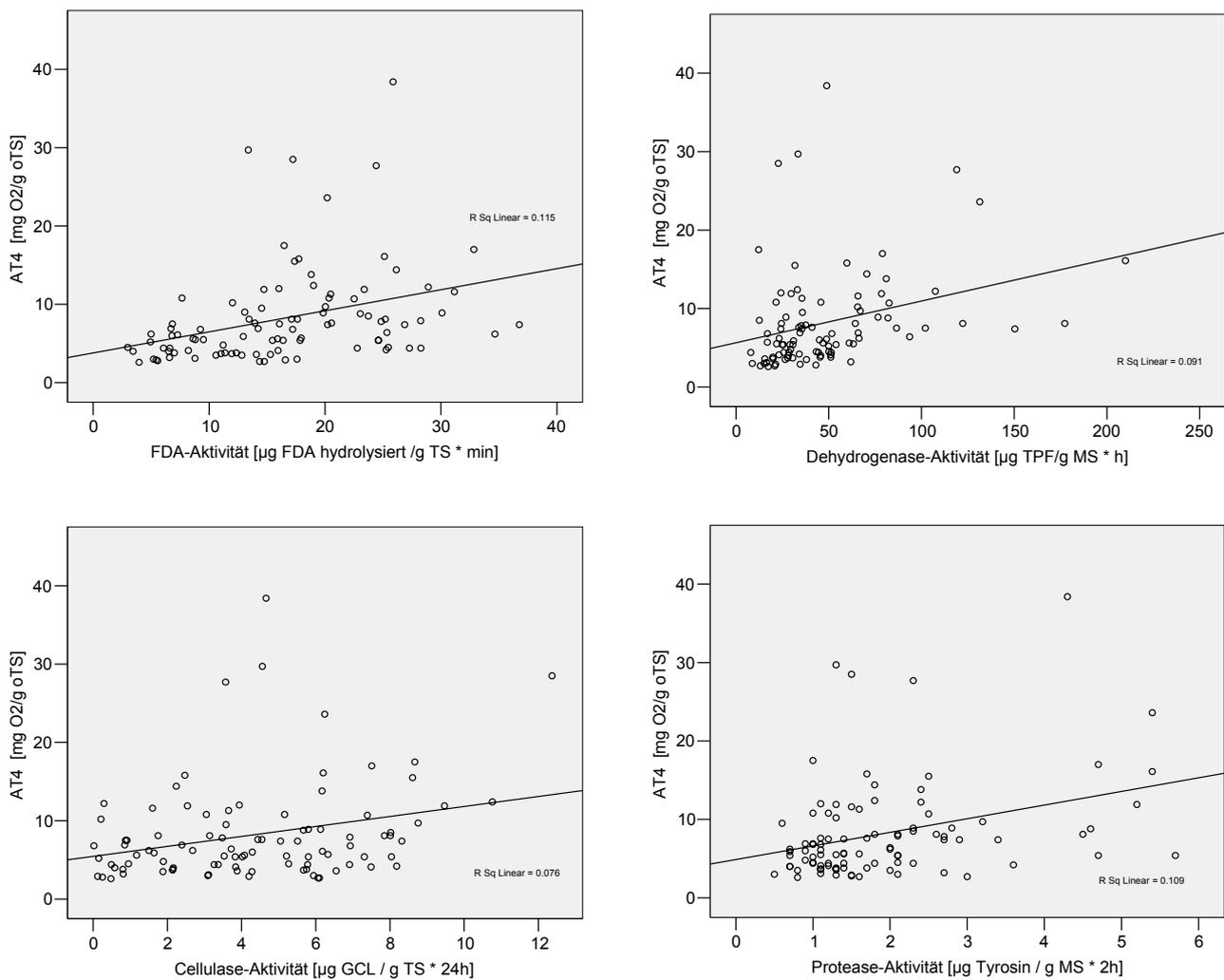


Protease-Aktivität



Ebenfalls festzustellen ist, dass die mikrobielle Atmung von Kompost nicht mit den verschiedenen untersuchten Enzymaktivitäten korreliert (Abb. 5.20), selbst wenn die Gesamttendenz aller Parameter, nämlich die Abnahme mit fortschreitendem Ausreifeungsgrad, die gleiche ist.

Abb. 5.20 > Wechselwirkung zwischen der mikrobiellen Atmung der 100 Schweizer Kompost- und Gärgutproben und den Enzymaktivitäten



5.4 Einfluss von Kompost und Gärgut auf die Stickstoffdynamik des Bodens

Aus der Sicht des Anwenders ist der Einfluss von Kompost und Gärgut auf die Stickstoffdynamik in den Feldern von ausschlaggebender Bedeutung. Eine eventuelle Stickstoffblockierung im Boden kann nämlich sehr rasch zu bedeutenden Ertrags-einbussen auf den Feldern führen, die mit dem betreffenden Produkt gedüngt wurden. Um diese Auswirkung zu beurteilen, wurden verschiedene Kompost- und Gärgutproben mit Referenzerde gemischt, die Mischung einer achtwöchigen Inkubationszeit unter kontrollierten Bedingungen unterzogen und die Entwicklung des mineralischen Stickstoffs regelmässig analysiert.

Bei den meisten Gärgutproben wurde der mineralisierte Stickstoff in den Boden abgegeben, was sich anhand der positiven Entwicklung des Stickstoffs innerhalb des achtwöchigen Versuchs zeigte (Abb. 21, oben links). Angesichts der grossen Mengen mineralischen Stickstoffs im Gärgut (Tab. 5.3) war dies auch zu erwarten.

Überraschend ist jedoch die Tatsache, dass das Gärgut in manchen Fällen nicht nur keinen Stickstoff freisetzt, sondern diesen sogar blockiert! Bei näherer Betrachtung hat sich herausgestellt, dass es sich um Gärgut handelte, bei dem im Nachbehandlungsprozess gravierende Fehler aufgetreten waren, nämlich das nach dem Pressen bei zu starker Belüftung getrocknet wurde. Dabei geht der im Gärgut vorwiegend in Form von Ammonium vorhandene mineralische Stickstoff in Form von Ammoniakgas verloren. Der Behandlungsfehler des Gärguts verwandelt somit ein Produkt, das viel verfügbaren Stickstoff enthält, in ein Produkt, das den Stickstoff im Feld immobilisiert.

Was Kompost angeht, so ist hinsichtlich der Gefahr einer Stickstoffblockierung im Feld eine Abstufung zu beobachten. Ein grosser Anteil des Komposts für den Einsatz in der Landwirtschaft, die physiologisch jung sind, immobilisieren den mineralischen Stickstoff im Boden (Abb. 5.21, oben rechts). Doch nicht jeder Kompost für die Landwirtschaft hat diese Wirkung. Dabei spielt der Anteil an ligninhaltigen Substanzen eine wichtige Rolle. Dies wird besonders deutlich, wenn man untersucht, zu welchem Zeitpunkt das Ausgangsmaterial gesammelt wurde: Kompost, der den Stickstoff im Boden immobilisiert, ist jener, der vorwiegend mit Ausgangsmaterialien aus den Wintermonaten hergestellt wurden und viel ligninhaltige Substanz aufweisen, während Kompost, dessen Ausgangsmaterial im Sommer gesammelt wurden, eine positive Stickstoffbilanz hat (Abb. 5.22).

Bei Kompost für den Gartenbau und für den gedeckten Pflanzenbau sinkt die Gefahr der Stickstoffblockierung im Boden beträchtlich, da der Ausreifungsgrad weiter fortgeschritten ist.

Abbildung 5.23 zeigt, dass das $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis ein interessanter Indikator für eine drohende Stickstoffimmobilisierung im Boden darstellt. Liegt das Verhältnis über 2, so ist die Immobilisierungsgefahr praktisch ausgeschlossen. Bei einem Verhältnis unter 2 hingegen blockieren nur ein Teil des Komposts den Stickstoff im Boden. Stellte man also den Bezug zwischen $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis und Anteil an ligninhaltiger Substanz im Kompost her, so könnte man präziser beurteilen, wie gross die Gefahr der Stickstoffblockierung im Boden bei der Anwendung des betreffenden Komposts tatsächlich ist.

Foto 3 > Durchführung des Versuchs zur Überprüfung des Einflusses von Kompost und Gärgut auf die Entwicklung des Stickstoffgehalts im Boden



Abb. 5.21 > Einfluss von Kompost und Gärgut auf die Entwicklung des Stickstoffgehalts im Boden

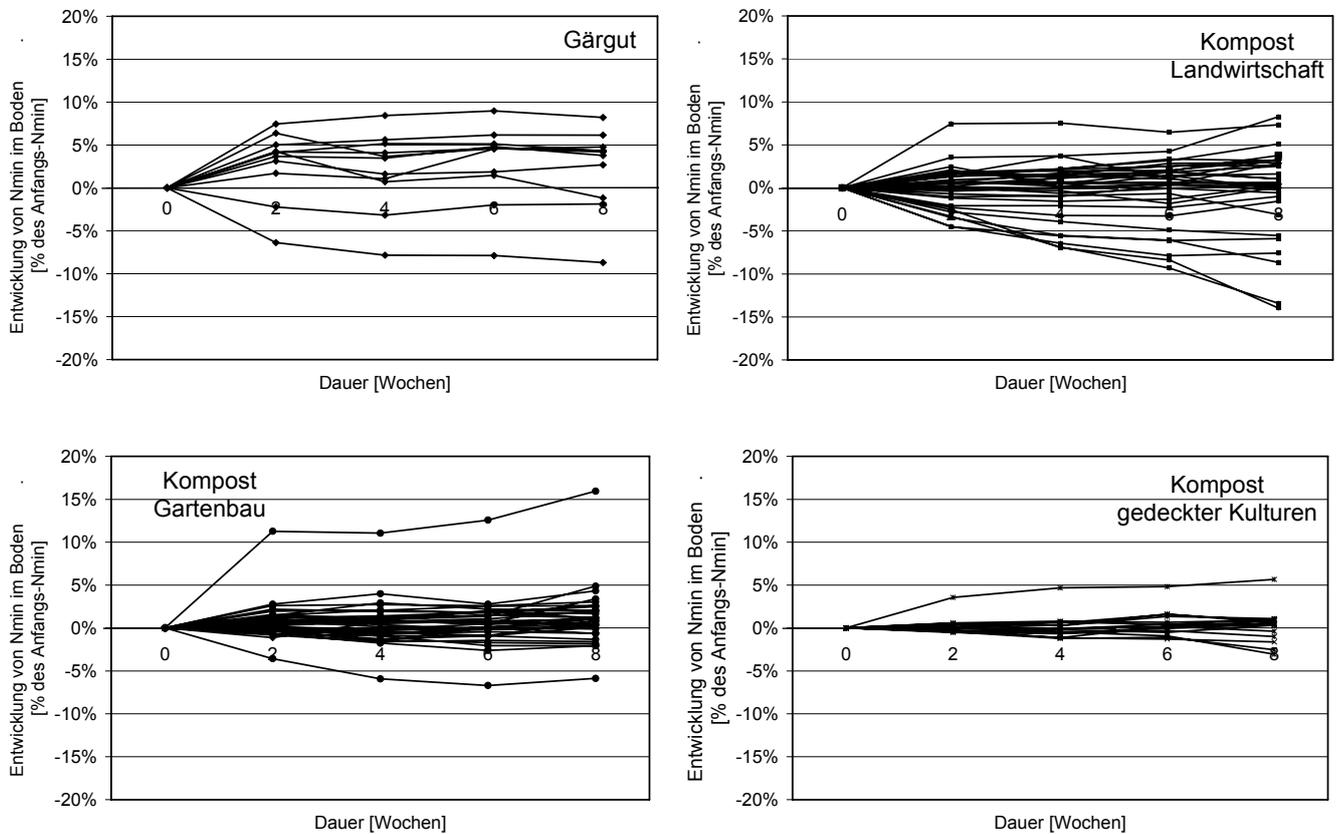


Abb. 5.22 > Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt, zu dem das Ausgangsmaterial gesammelt wurde, und der Gefahr der Stickstoffblockierung im Boden nach dem Einsatz des landwirtschaftlichen Komposts

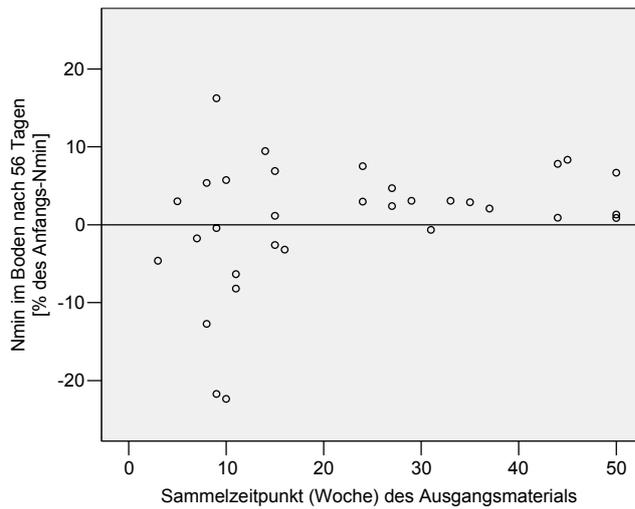
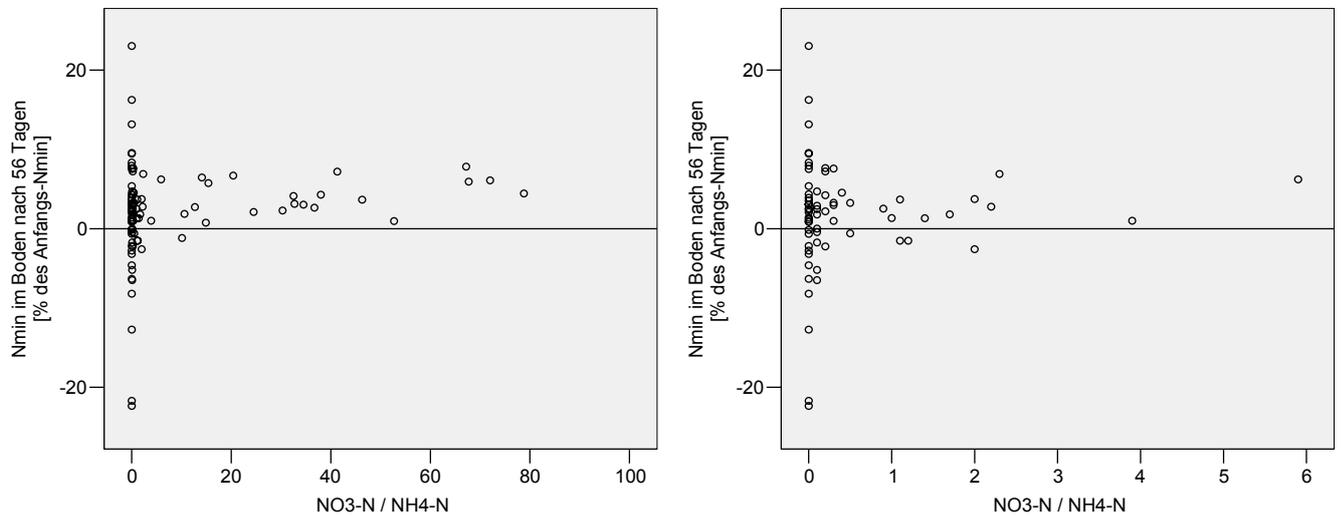


Abb. 5.23 > Zusammenhang zwischen dem $\text{NO}_3\text{-N} / \text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis und der Gefahr der Stickstoffimmobilisierung im Boden



5.5

Einfluss von Kompost und Gärgut auf Pflanzenwachstum und -gesundheit

Der Einfluss von Kompost auf das Wachstum und die Gesundheit der Pflanzen ist ein besonders wichtiger Faktor für die Qualität. Um die **Verträglichkeit der verschiedenen Komposte und des Gärguts mit dem Pflanzenwachstum** zu bestimmen, wurden fünf Biotests durchgeführt (Abb. 5.24). Generell ist anhand des geringeren Pflanzenwachstums deutlich zu beobachten, dass Gärgut eine höhere Phytotoxizität aufweist als Kompost, und zwar selbst bei dem wenig empfindlichen offenen Kressetest. Alle Tests zeigen, dass die Pflanzenverträglichkeit mit fortschreitendem Ausreifungsgrad zunimmt, und dass die reifsten Produkte in der Regel auch die geringste Phytotoxizität aufweisen (Abb. 5.24). Allerdings ist festzuhalten, dass innerhalb einer Produktklasse bei der Pflanzenverträglichkeit erhebliche Unterschiede auftreten, was wiederum zeigt, wie wichtig die Rotteführung für die Qualität des Endproduktes ist.

Foto 4 > Analyse der Phytotoxizität mit dem offenen Kressetest (links) und dem geschlossenen Kressetest (rechts)



Ebenfalls interessant festzustellen ist, dass die einzelnen Testpflanzen auf die verschiedenen Kompost unterschiedlich reagiert und jeder für den einen oder anderen Parameter der Kompostqualität empfindlich ist. Aus diesem Grunde besteht keine Korrelation zwischen den verschiedenen Phytotoxizitäts-Tests. Die Ergebnisse müssen also kombiniert betrachtet werden, um die biologische Qualität der Produkte besser beurteilen und für anspruchsvollere Anwendungen wie beispielsweise die Substratherstellung die richtige Auswahl treffen zu können.

Ein weiterer interessanter Faktor im Zusammenhang mit dem Pflanzenwachstum ist das **Krankheitsunterdrückungspotenzial** der verschiedenen Produkte. Dazu wurden zwei Tests durchgeführt. Beim ersten Test wurde der Einfluss des Komposts und des Gärguts auf die Keimlingsumfallkrankheit untersucht, die durch den Krankheitserreger *Pythium ultimum* bei der Gurkenpflanze verursacht wird. *P. ultimum* ist ein Pilz, der die Gurkensamen befällt und die Keimung beeinträchtigt. Im Allgemeinen richtet der Erreger bei bereits gekeimten Pflanzen keinen Schaden an, so dass der Schutzeffekt des

Komposts nur ein bis zwei Tage zu dauern braucht. Beim zweiten Biotest wurde *Rhizoctonia solani*, der Erreger der Wurzelfäule bei Basilikum, untersucht. *R. solani* befällt die Pflanzen später als *P. ultimum*. Nach der Keimung werden die jungen Pflanzen am Stengelende von *R. solani* angegriffen und fallen um. Um Basilikum gegen den Erreger zu schützen, ist daher einer längere Wirkungsdauer notwendig.

Insgesamt haben Kompost und Gärgut eine höhere und homogenere Schutzwirkung gegen *P. ultimum* bei Gurkenpflanzen als gegen *R. solani* bei Basilikum (Abb. 5.25). Der Schutz vor *P. ultimum* ist für alle Produktklassen gleich, während jüngere und reifere Produkte gegen *R. solani* tendenziell weniger wirksam sind als Produkte mit einem mittleren Reifegrad (Abb. 5.25). Das liegt möglicherweise daran, dass ein wichtiger Antagonist zum Schutz der Pflanzen vor *R. solani* ein ligninabbauender Pilz ist, und diese Aktivität am meisten bei Kompost mittlerer Reife stattfindet. Da aber innerhalb der einzelnen Produktklassen starke Wirkungsunterschiede auftreten, lassen sich diese Wechselwirkungen nicht eingehender analysieren. Wie für die Phytotoxizität von Kompost scheint auch hier die Rotteführung einen grossen Einfluss auf die Produktqualität zu haben, was eine Erklärung für die grossen Unterschiede innerhalb der einzelnen Produktklassen sein könnte.

Gemäss anderen Untersuchungen, die nicht im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführt wurden, hängt die biologische Qualität der Endprodukte in erster Linie von der Feuchtigkeitsregulierung und der Belüftung von Kompost während des Ausreifungsprozesses ab.

Abb. 5.24 > Bestimmung der Phytotoxizitäts-Gefahr der 100 Schweizer Kompost- und Gärgutproben anhand des Wachstums verschiedener Pflanzen im reinen Produkt

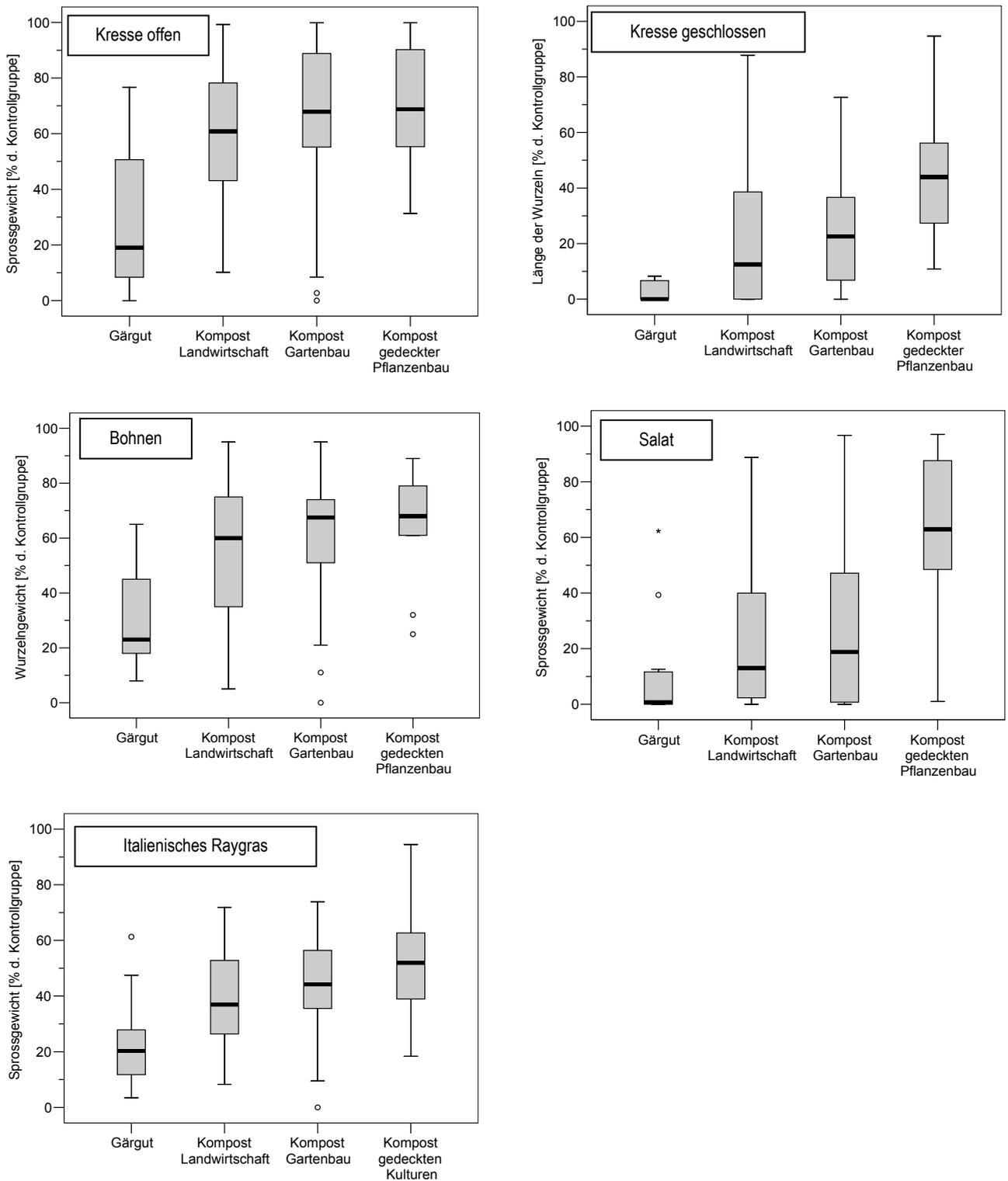
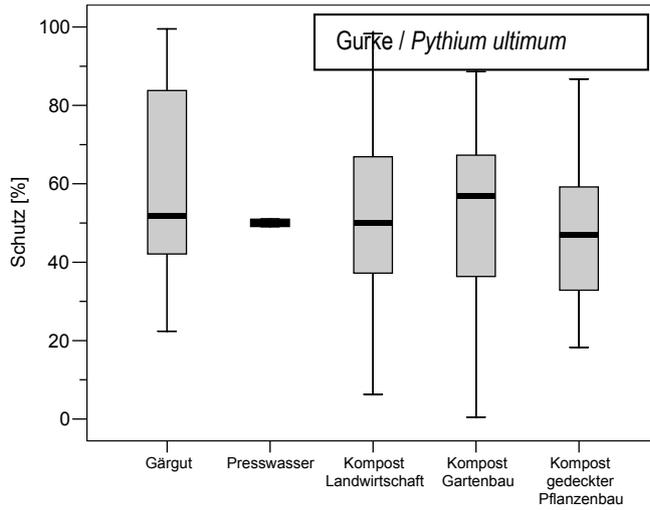
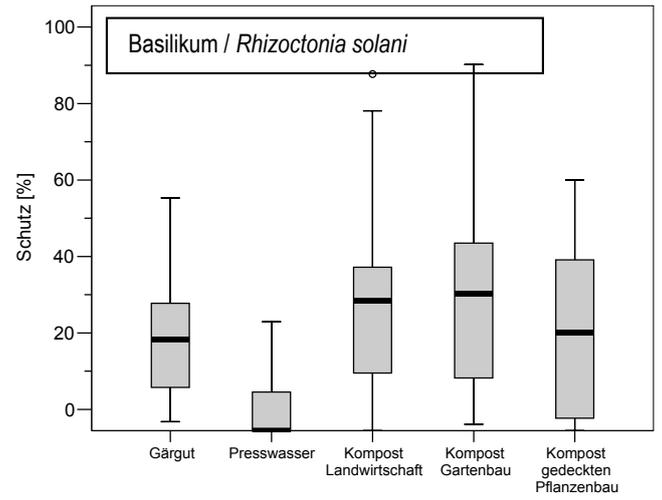


Abb. 5.25 > Krankheitsunterdrückungsfähigkeit der 100 Schweizer Kompost- und Gärgutproben

*Schutz der Gurkenpflanzen vor der durch *Pythium ultimum* verursachten Keimlingsumfallkrankheit*



*Schutz der Basilikumpflanzen vor der durch *Rhizoctonia solani* verursachten Wurzelfäule*



5.6 Einfluss des Herstellungsverfahrens von Kompost auf die chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften

Es ist natürlich normal, dass die verschiedenen auf dem Ausreifungsgrad von Kompost beruhenden Produktklassen sich in den einzelnen Qualitätsparametern für Kompost unterscheiden, denn die Klassifizierung dient ja genau dazu, das für den gewünschten Verwendungszweck geeignete Produkt auswählen zu können. In diesem Zusammenhang stellt sich immer wieder die wichtige Frage, ob das Kompostierungsverfahren für die Qualität des Komposts oder des Gärguts ausschlaggebend ist.

Um diese Frage zu beantworten, wurde der in der Schweiz produzierte Kompost nach seiner Herkunft in vier Klassen eingeteilt: Vergärung, Dreiecksmieten, Tafelmieten und Feldrandkompostierung. Produkte aus Vergärungsanlagen werden nach der Entnahme aus dem Reaktor mit oder ohne Zwangsbelüftung gelagert. Es findet aber keine Nachkompostierung statt, da die Produkte sonst nicht mehr als Gärgut sondern als Kompost bezeichnet werden. Dreiecksmieten und Tafelmieten unterscheiden sich vor allem durch ihre Grösse; bei Tafelmieten ist aufgrund der Form praktisch nur die passive Belüftung per Konvektion möglich. Feldrandmieten entsprechen in ihrer Form kleinen Dreiecksmieten, doch gibt es keine klare Grenze zwischen Komposthaufen und Untergrund. Generell ist Feldrandkompost wesentlich älter als die übrigen Produkte (Abb. 5.1), da die Haufen bis zu ihrem Einsatz vor Ort liegen bleiben. Die Tatsache, dass der Kompostierungsprozess länger ist, wirkt sich natürlich auf die verschiedenen Parameter der Endprodukte aus.

Der durchschnittliche Gehalt an organischer Substanz ist bei Feldrandkompost wesentlich geringer als bei den übrigen Kompost und Gärgut (Abb. 5.26). Dies ist sicherlich auf die längere Dauer des Prozesses zurückzuführen. Darüber hinaus wird aufgrund der fehlenden Trennung zwischen Boden und Komposthaufen beim Umsetzen eine nicht unerhebliche Menge Erde unter das kompostierte Material gemischt, was ebenfalls einen geringeren Gehalt an organischer Substanz zur Folge hat. Zwischen den drei anderen Produktionsverfahren unterscheidet sich der Gehalt an organischer Substanz kaum.

Foto 5 > Präsentation der verschiedenen Kompostierungsverfahren
Mesophile Co-Vergärung

Dreiecksmieten

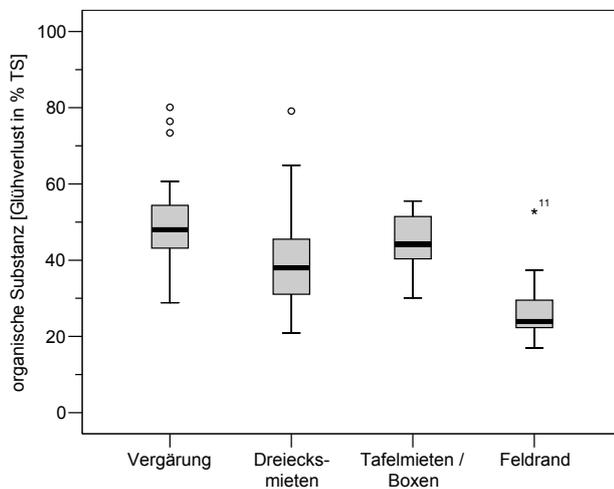
Feldrandkompostierung

Thermophile Vergärung

Tafelmieten


Hinsichtlich der Qualität der organischen Substanz hingegen sind Unterschiede festzustellen. So ist zunächst die Farbe des wässrigen Extrakts bei Produkten aus Vergärungsanlagen dunkler (Abb. 5.27), was daran liegt, dass bei aeroben Verfahren die Zusammenfügung der Humusstoffe noch nicht stattgefunden hat. Der wässrige Extrakt von Feldrandkompost ist heller, was wahrscheinlich auf die kombinierte Wirkung des höheren Gehalts an Erde und der fortgeschrittenen Ausreifung zurückzuführen ist.

Abb. 5.26 > Gehalt an organischer Substanz von Gärgut und Kompost aus den verschiedenen Kompostierungsverfahren



Bei eingehender Untersuchung der Qualität der organischen Substanz in den verschiedenen Produkten, kam es in Bezug auf den Huminsäuregehalt zu einer äusserst überraschenden Beobachtung. Die Huminsäuren stellen den stabilsten Teil der organischen Substanz dar und verfügen über das höchste Potenzial, die Bodenstruktur nachhaltig zu verbessern. Auch ist es nur normal, dass Produkte aus Vergärungsanlagen proportional weniger Huminsäuren enthalten als die übrigen Komposte (Abb. 5.28), denn sie sind physiologisch jünger. Hingegen überrascht es sehr, dass Feldrandkompost, der ansonsten über sämtliche Eigenschaften von reiferem Kompost verfügt, einen niedrigeren Huminsäuregehalt aufweist, als die mit traditionellen Kompostierungsverfahren hergestellten Produkte (Abb. 5.28). Allem Anschein nach konnte die Entstehung von stabilen Huminstoffen nicht normal vonstatten gehen, was möglicherweise an einer problematischen Feuchtigkeitsregulierung im Rottekörper liegt, einer der grössten Schwierigkeiten bei der Feldrandkompostierung.

So ist zunächst die Farbe des wässrigen Extrakts bei Produkten aus Vergärungsanlagen dunkler (Abb. 5.27), was daran liegt, dass bei aeroben Verfahren die Zusammenfügung der Humusstoffe noch nicht stattgefunden hat. Der wässrige Extrakt von Feldrandkompost ist heller, was wahrscheinlich auf die kombinierte Wirkung des höheren Gehalts an Erde und der fortgeschrittenen Ausreifung zurückzuführen ist.

Abb. 5.27 > Farbindensität des wässrigen Extrakts von Gärgut und Kompost aus verschiedenen Kompostierungsverfahren

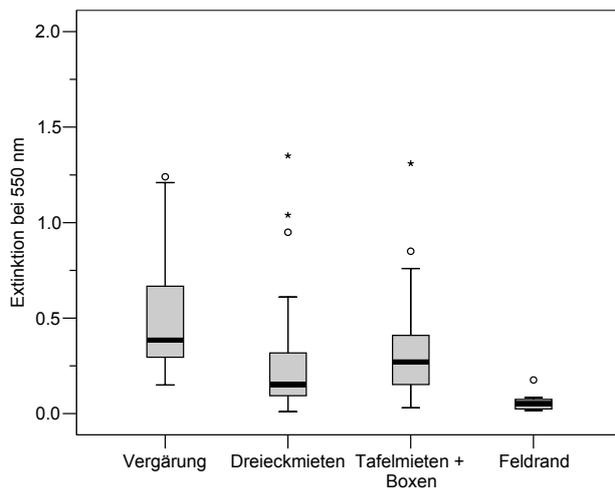
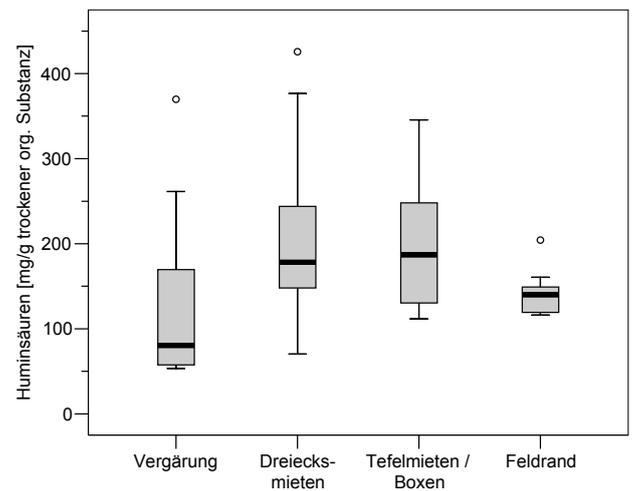


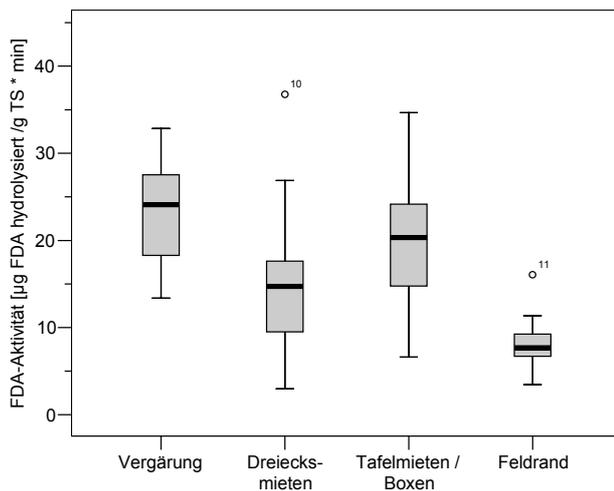
Abb. 5.28 > Gehalt an Huminsäuren in Schweizer Gärgut und Kompost aus den verschiedenen Kompostierungsverfahren



In Bezug auf die mikrobielle Gesamtaktivität des Komposts ist wiederum eine Abstufung von Produkten aus Vergärungsanlagen bis hin zu Produkten aus der Feldrandkompostierung zu beobachten (Abb. 5.29). Letztere sind aufgrund ihres fortgeschrittenen Ausreifungsgrades mikrobiologisch wesentlich weniger aktiv.

Ähnliches ist auch beim Phytotoxizitäts-Test festzustellen (Abb. 5.30). Die Tatsache, dass Feldrandkompost eine geringere Phytotoxizität aufweist, liegt sicher am Alter der Produkte und an ihrem Erdanteil. Interessant festzustellen ist hingegen, dass das Kompostierungsverfahren selbst kaum einen Einfluss auf die Krankheitsunterdrückungsfähigkeit von Kompost hat, ausser dass Gurkenpflanzen durch Feldrandkompost etwas weniger gut vor *P. ultimum* geschützt werden als durch anderen Kompost (Abb. 5.31). Auch das liegt wahrscheinlich daran, dass der Kompost reifer ist und daher über eine geringere mikrobielle Aktivität verfügt.

Abb. 5.29 > FDA-Aktivität von Schweizer Gärgut und Kompost aus verschiedenen Kompostierungsverfahren



Zum hygienischen Zustand von Kompost ist festzuhalten, dass mancher Feldrandkompost sowie Regenwurmkompost Unkraut enthält, was darauf hinweist, dass der natürliche Hygienisierungsprozess nicht überzeugend ist. Für den Anwender dieses Komposts bedeutet das, dass die Produkte auch Krankheitserreger enthalten können, zumal diese in der Regel widerstandsfähiger sind als Unkraut. Bei der Anwendung dieser Produkte im Gartenbau und vor allem im Gemüseanbau und im gedeckten Pflanzenbau ist daher grosse Vorsicht geboten. Nicht jeder Feldrandkompost enthielten jedoch lebensfähiges Unkraut, was bedeutet, dass es sicherlich möglich ist, das Risiko zu begrenzen. In diesem Punkt sind das Know-how und die Professionalität des Produzenten von grösster Bedeutung.

Man kann also sagen, dass das Herstellungsverfahren selbst kaum einen Einfluss auf die Qualität von Kompost hat, da die festgestellten Unterschiede vorwiegend auf den unterschiedlichen Reifegrad der verschiedenen Produkte zurückzuführen sind. Die einzige Ausnahme ist die geringere Entstehung von Huminsäuren in Feldrandkompost. Sicher ist hingegen, dass Produkte aus Vergärungsanlagen definitionsgemäss immer biologisch weniger reif sind, wenn keine Nachkompostierung des Gärguts stattfindet.

Ein letzter wichtiger Punkt sind die grossen Qualitätsunterschiede innerhalb der einzelnen Herstellungsklassen, die in der Regel grösser sind als die Unterschiede zwischen den Klassen. Das macht deutlich, dass mit allen untersuchten Verfahren Produkte von guter Qualität hergestellt werden können, das Know-how des Kompostmeisters jedoch ausschlaggebend ist, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Produkte von optimaler Qualität lassen sich nur mit einwandfreier Rotteführung herstellen.

Abb. 5.30 > Phytotoxizität von Schweizer Gärgut und Kompost aus verschiedenen Kompostierungsverfahren

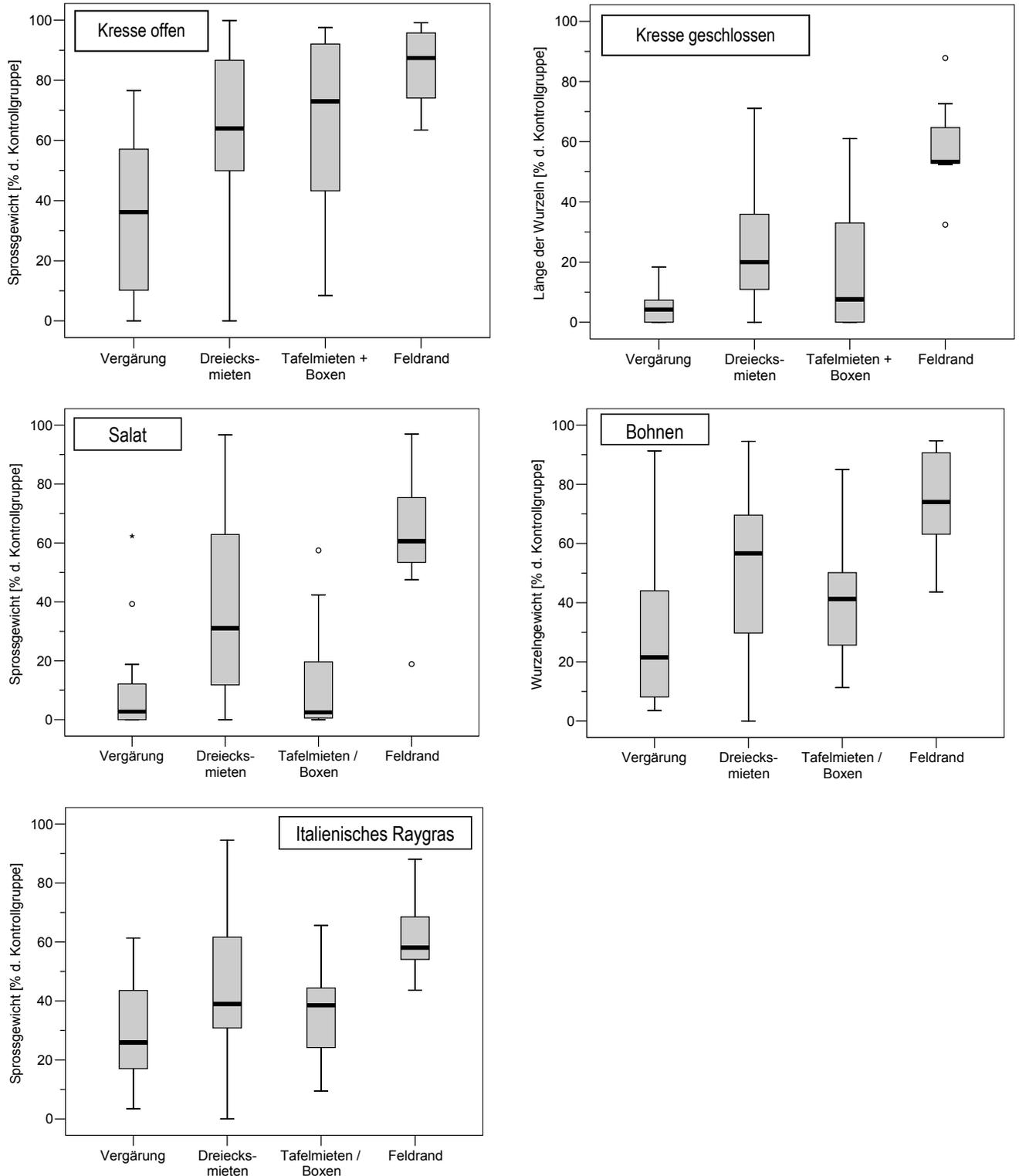
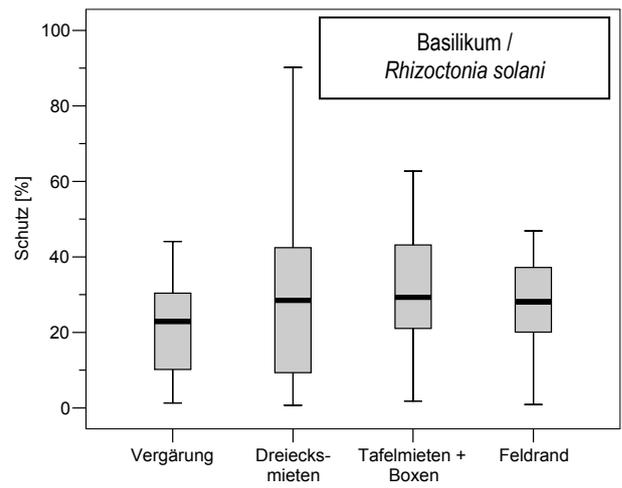
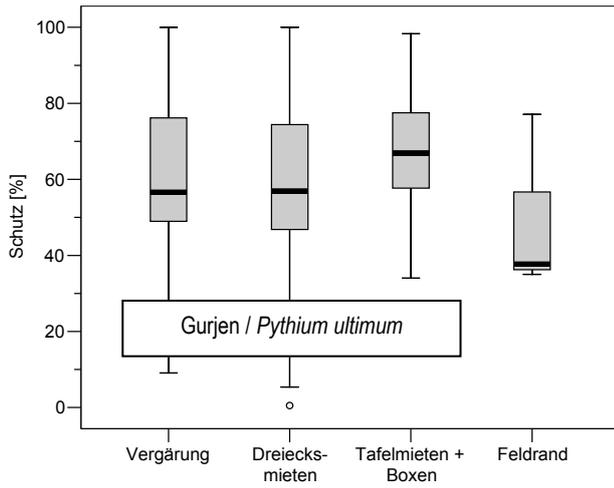


Abb. 5.31 > Krankheitsunterdrückungsfähigkeit von Schweizer Gärgut und Kompost aus verschiedenen Kompostierungsverfahren

Schutz der Gurkenpflanzen vor der durch Pythium ultimum verursachten Keimlingsumfallkrankheit

Schutz der Basilikumpflanzen vor der durch Rhizoctonia solani verursachten Wurzelfäule



6 > Nachbehandlung von Gärgut: Ergebnisse

Die Nachbehandlung von Gärgut wurde in zwei praktischen Versuchen untersucht. Die Kompostierungsversuche wurden in Fehraltorf mit einem intensiven Dreiecksmietenverfahren durchgeführt (ca. 1,5 Meter hohe Mieten, tägliches Umsetzen des Rottekörpers während der ersten Kompostierungsphase). Während der gesamten Versuchsdauer wurde den Mieten besondere Aufmerksamkeit geschenkt, um möglichst optimale Kompostierungsbedingungen insbesondere in Bezug auf die Feuchtigkeit des Materials zu garantieren. Die technische und praktische Verantwortung für die Versuche lag bei Nedzadin Asani, Kompostmeister der Kompostierungsanlage Gerber in Fehraltorf. Die Zusammensetzung der verschiedenen Mieten ist in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tab. 6.1 > Zusammensetzung der Mieten bei den beiden Versuchen der Nachbehandlung von Gärgut

Versuch Nr. 1			
Mieten 1A	70 % Gärgut	30 % Siebreste	
Mieten 1B	30 % Gärgut	10 % Siebreste	60 % frisches Häckselgut
Mieten 1C	30 % Gärgut	10 % Siebreste	60 % junger Kompost (6 Wochen in Boxen)
Versuch Nr. 2			
Mieten 2A	100 % Gärgut		
Mieten 2B	70 % Gärgut	30 % Siebreste	
Mieten 2C	30 % Gärgut	10 % Siebreste	60 % junger Kompost (6 Wochen in Boxen)

Foto 6 > Durchführung der Nachbehandlungsversuche von Gärgut: Aufbau, Beobachtung des Prozesses, Probenahme

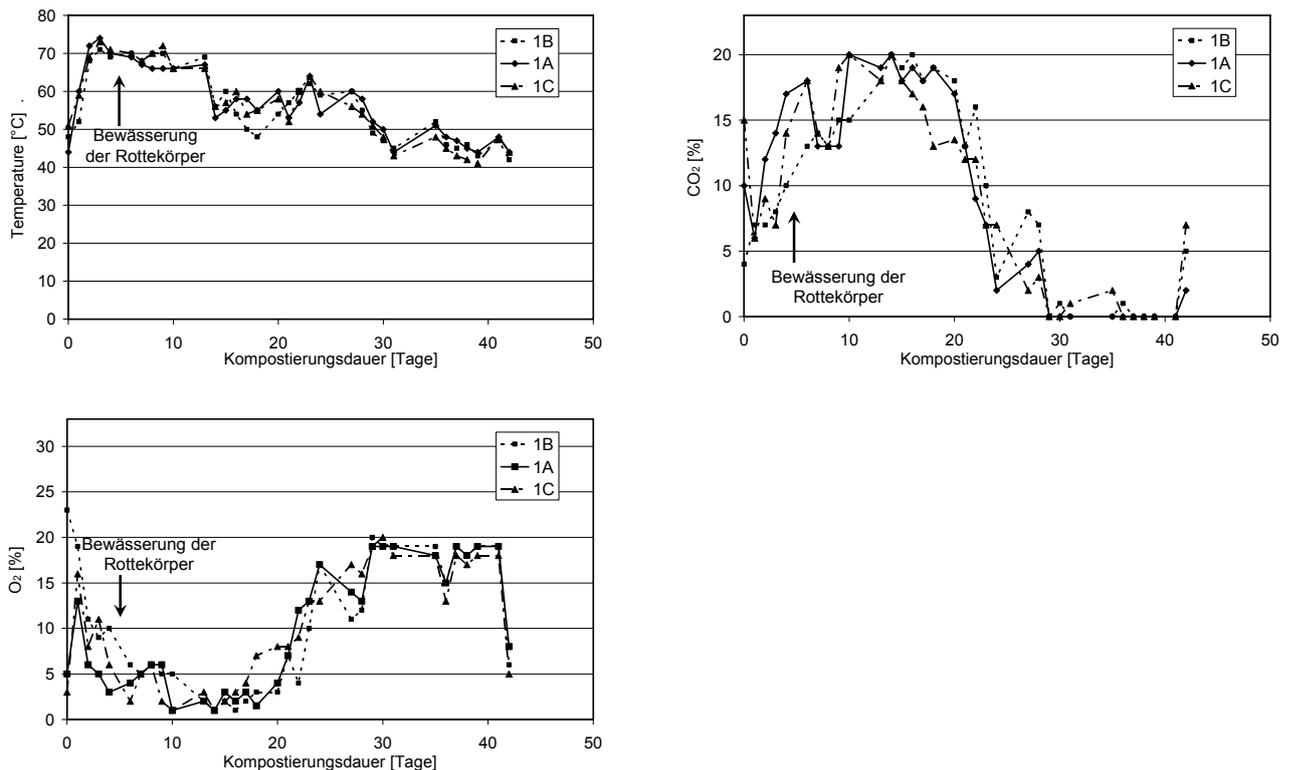
Was die Entwicklung der einzelnen Parameter des Kompostierungsprozesses angeht (Temperatur, Sauerstoff- und Kohlenstoffgehalt in den Mieten) unterscheiden sich die verschiedenen Varianten kaum. Der Kompostierungsprozess läuft sehr schnell an, wobei die durch den starken aeroben Abbau der organischen Substanz entstehende äusserst intensive bakterielle Aktivität die Temperatur in den verschiedenen Rottekörpern sehr schnell auf 65 bis 75 °C ansteigen lässt. Nach zwei bis drei Wochen intensiver Kompostierung nimmt die biologische Aktivität ab, was sich durch den Temperaturrückgang in den Rottekörpern, die Abnahme des CO₂-Gehalts (der durch mikrobielle Atmung entsteht) und die Zunahme des O₂-Gehalts in der Mietenmitte äussert.

Abb. 6.1 > Entwicklung der Kompostierungsparameter während des ersten Nachbehandlungsversuchs

Mischung 1A: 70 % Gärgut + 30 % Siebreste

Mischung 1B: 30 % Gärgut + 10 % Siebreste + 60 % frisches Häckselgut

Mischung 1C: 30 % Gärgut + 10 % Siebreste + 60 % junger Kompost (6 Wochen in Boxen)



Anhand der Laboranalysen der Proben, die während des Prozesses entnommen wurden (Abb. 6.4 und 6.5), lässt sich auch beobachten, dass der Abbauprozess der Substanzen in den verschiedenen Mieten ähnlich verläuft. Je nach Gärgutgehalt sind jedoch gewisse Unterschiede in den Mieten zu Beginn der Kompostierung festzustellen. Generell ist zu beobachten, dass die Verrottung umso langsamer einsetzt, je mehr Gärgut die Anfangsmischung enthält. Bei Mischungen, die zu 70 oder 100 % aus Gärgut bestehen (Abb. 6.3), braucht der mit Frischsubstanz durchgeführte Selbsterhitzungstest länger und ist weniger intensiv. In Bezug auf die chemischen Eigenschaften unterscheiden sich die Ausgangsmischungen mit höherem Gärgutanteil von den übrigen Mischungen im Wesentlichen durch einen geringeren Gehalt an gelöstem organischen Kohlenstoff und einen höheren pH-Wert. Dies gleicht sich jedoch nach Beginn des Kompostierungsprozesses rasch aus (Abb. 6.3, 6.4 und 6.5).

Für die Abnahme der Gesamtmenge an mineralischem Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) während der Kompostierung (Abb. 6.5) gibt es zwei Gründe: Zum einen geht während des Kompostierungsprozesses ein Teil des Stickstoffs in Form von Ammoniakgas verloren, zum anderen wird ein Teil des mineralischen Stickstoffs verarbeitet und in der mikrobiellen Biomasse gelagert.

Abb. 6.2 > Temperaturentwicklung während des zweiten Nachbehandlungsversuchs

Mischung 2A: 100 % Gärgut

Mischung 2B: 70 % Gärgut + 30 % Siebreste

Mischung 2C: 30 % Gärgut + 10 % Siebreste + 60 % junger Kompost (6 Wochen in Boxen)

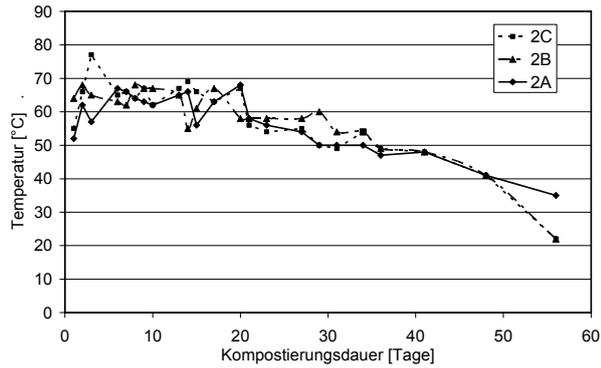


Foto 7 > Struktur der Produkte nach zwei Wochen Kompostierung

70 % Gärgut + 30 % Siebreste

30 % Gärgut + 10 % Siebreste + 60 % frisches Häckselgut



30 % Gärgut + 10 % Siebreste + 60 % junger Kompost (6 Wochen in Boxen)

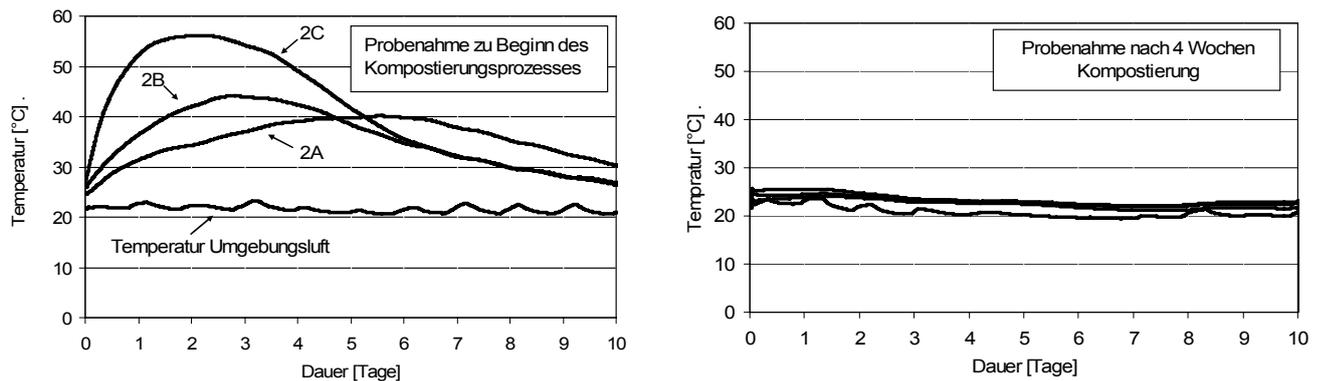


Abb. 6.3 > Einfluss der Ausgangsmischung auf das Selbsterwärmungspotenzial während der Nachkompostierung von Gärgut

2A: 100 % Gärgut;

2B: 70 % Gärgut + 30 % Siebreste;

2C: 30 % Gärgut + 10 % Siebreste + 60 % junger Kompost (6 Wochen in Boxen)



Die Gefahr der Stickstoffblockierung nach der Kompostapplikation im Feld hängt stark von der Ausgangsmischung des Gärguts ab. Bei beiden Nachkompostierungsversuchen wurde beobachtet, dass Kompost mit mehr als 50 % Gärgut die am ungünstigste Stickstoffbilanz im Boden aufweist (Abb. 6.6). Es scheint, dass das Gärgut den Stickstoff während des Kompostierungsprozesses nicht von selbst behalten kann. Durch die Zugabe von ligninhaltigen Substanzen lässt sich diesbezüglich ein ausgewogeneres Produkt erzielen. Im vorliegenden Versuch konnte diesbezüglich keine Unterschiede zwischen frische oder vorkompostierte Produkte beobachtet werden (Abb. 6.6).

Wie in Kapitel 5.5 erläutert wurde, weist frisches Gärgut eine relativ hohe Phytotoxizität auf. Nach einigen Wochen Nachkompostierung ändert sich die Situation jedoch drastisch (Abb. 6.7). Die Zugabe von frischer Mischung oder Frischkompost hat die Pflanzenverträglichkeit von Kompost kaum verbessert. Beim ersten Versuch hat sich die Zugabe von Frischkompost (6 Wochen in Boxen kompostiert) sogar eher negativ auf das Pflanzenwachstum ausgewirkt (Abb. 6.7). Allerdings ist zu betonen, dass dieser Kompost nicht von optimaler Qualität war, was sich durch Probleme bei der Vorbereitung der Boxen bemerkbar gemacht hatte. Die Ergebnisse zeigen also, dass für alle Bestandteile der Mischung ganz besonders auf die Qualität zu achten ist.

Auch die Krankheitsunterdrückungsfähigkeit der verschiedenen Produkte wurde untersucht. Während alle alten Produkte einen mittlerer Schutz der Gurkenpflanzen vor der Keimlingsumfallkrankheit bieten (Abb. 6.8, links), ist deren Schutzpotenzial vor *Rhizoctonia solani* bei Basilikumpflanzen mittelmässig bis schwach. Dies wird auch nicht wesentlich durch die unterschiedliche Zusammensetzung der geprüften Ausgangsmischungen beeinflusst.

Abb. 6.4 > Einfluss der Ausgangsmischung auf die Entwicklung der Trockensubstanz, den Gehalt an organischer Substanz, den pH-Wert und den Salzgehalt bei der Nachkompostierung

Erster Versuch: 1A: 70% Gärgut + 30% Siebreste; 1B: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% frisches Häckselgut; 1C: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% junger Kompost (6 Wochen in Boxen)
 Zweiter Versuch: 2A: 100% Gärgut; 2B: 70% Gärgut + 30% Siebreste; 2C: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% junger Kompost (6 Wochen in Boxen).

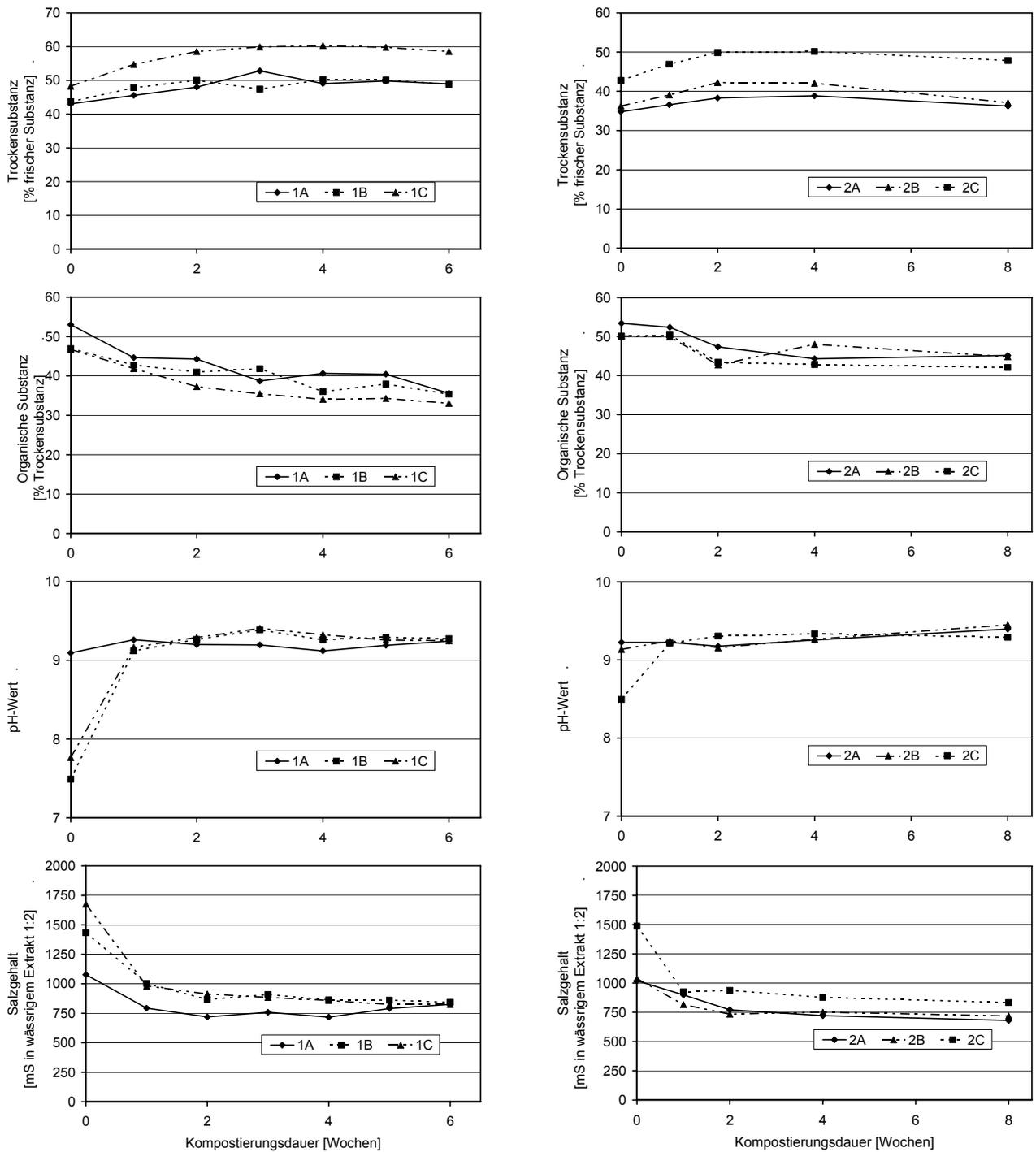


Abb. 6.5 > Einfluss der Ausgangsmischung auf die Gefahr der Stickstoffblockierung in den Feldern bei der Nachkompostierung von Gärgut

Erster Versuch (Probenahmen nach 6 Wochen Kompostierung): 1A: 70 % Gärgut + 30 % Siebreste; 1B: 30 % Gärgut + 10 % Siebreste + 60 % frisches Häckselgut; 1C: 30 % Gärgut + 10 % Siebreste + 60 % junger Kompost (6 Wochen in Boxen)
Zweiter Versuch (Probenahmen nach 2 und nach 8 Wochen Kompostierung): 2A: 100 % Gärgut; 2B: 70 % Gärgut + 30 % Siebreste; 2C: 30 % Gärgut + 10 % Siebreste + 60 % junger Kompost (6 Wochen in Boxen)

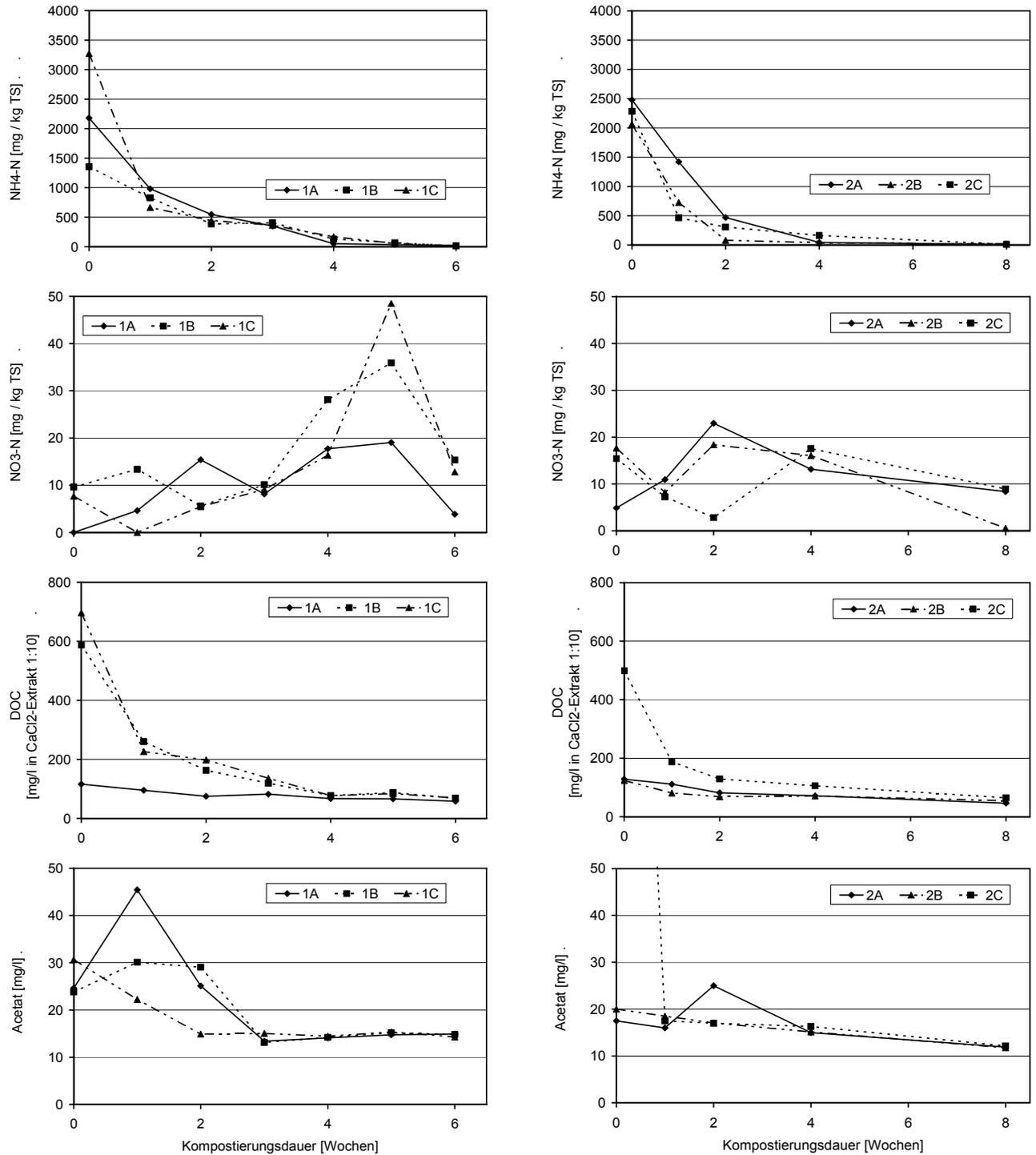


Abb. 6.6 > Einfluss der Ausgangsmischung auf die Gefahr der Stickstoffblockierung in den Feldern bei der Nachkompostierung von Gärgut

Erster Versuch (Probenahmen nach 6 Wochen Kompostierung): 1A: 70% Gärgut + 30% Siebreste; 1B: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% frisches Häckselgut; 1C: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% junger Kompost (6 Wochen in Boxen)
 Zweiter Versuch (Probenahmen nach 2 und nach 8 Wochen Kompostierung): 2A: 100% Gärgut; 2B: 70% Gärgut + 30% Siebreste; 2C: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% junger Kompost (6 Wochen in Boxen)

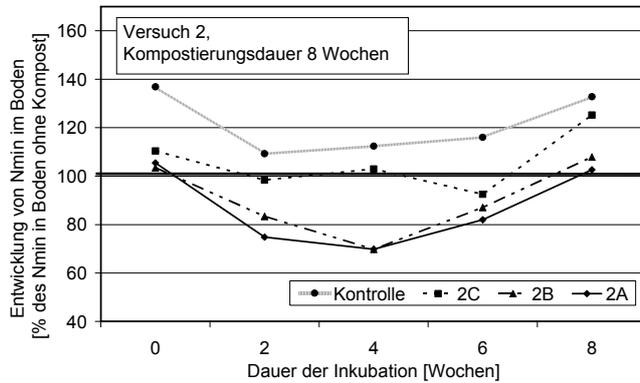
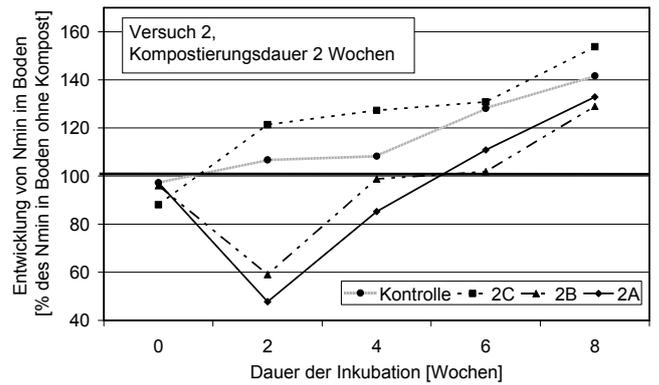
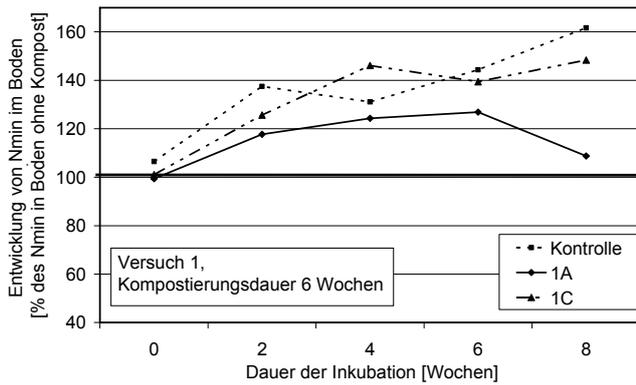


Abb. 6.7 > Einfluss der Mischung auf die Phytotoxizität bei der Nachkompostierung von Gärgut

Erster Versuch (Probenahme nach 6 Wochen Kompostierung): 1A: 70% Gärgut + 30% Siebreste; 1B: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% frisches Häckselgut; 1C: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% junger Kompost (6 Wochen in Boxen)
Zweiter Versuch (Probenahmen nach 2 und nach 8 Wochen Kompostierung): 2A: 100% Gärgut; 2B: 70% Gärgut + 30% Siebreste; 2C: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% junger Kompost (6 Wochen in Boxen)

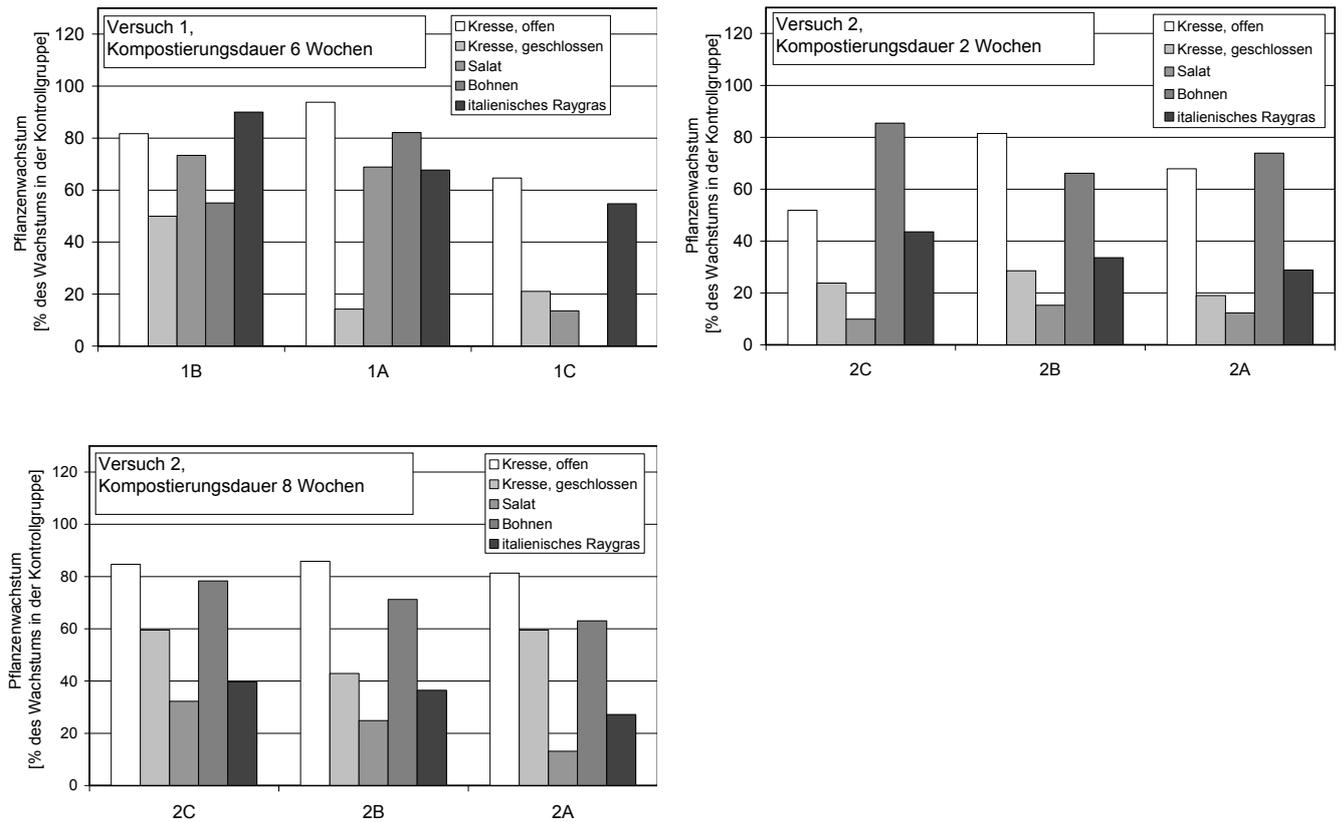
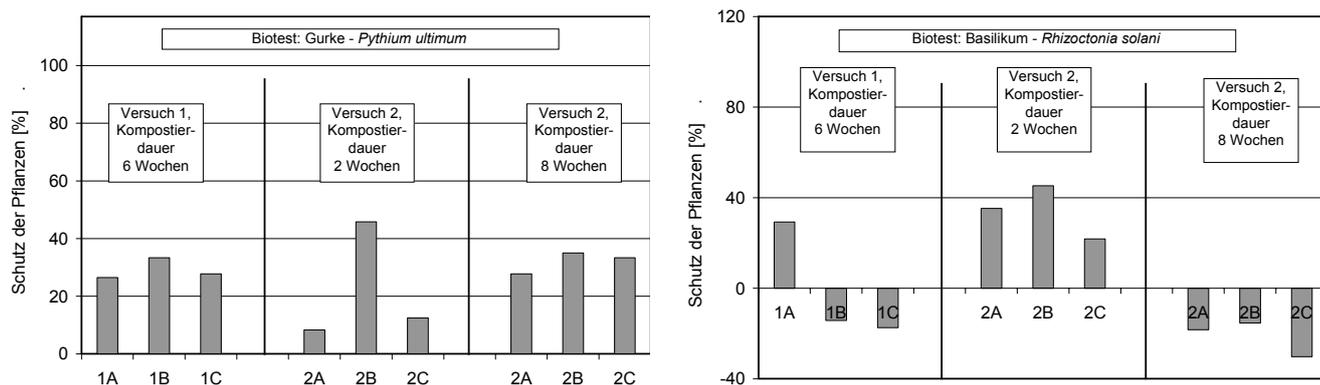


Abb. 6.8 > Einfluss der Mischung auf die Krankheitsunterdrückungsfähigkeit bei der Nachkompostierung von Gärgut

Erster Versuch (Probenahme nach 6 Wochen Kompostierung): 1A: 70% Gärgut + 30% Siebreste; 1B: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% frisches Häckselgut; 1C: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% junger Kompost (6 Wochen in Boxen)
 Zweiter Versuch (Probenahmen nach 2 und nach 8 Wochen Kompostierung): 2A: 100% Gärgut; 2B: 70% Gärgut + 30% Siebreste; 2C: 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% junger Kompost (6 Wochen in Boxen)

**Foto 8** > Phytotoxizität der Produkte nach 6 Wochen Kompostierung. Geschlossener Kressetest

Von links nach rechts: 70% Gärgut + 30% Siebreste; 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% frisches Häckselgut; 30% Gärgut + 10% Siebreste + 60% junger Kompost (6 Wochen in Boxen)



Zusammenfassend haben die Nachkompostierungsversuche von Gärgut gezeigt, dass es durchaus möglich ist, aus Gärgut hochwertigen Kompost herzustellen, vorausgesetzt, die Kompostierungsbedingungen werden gut beherrscht, insbesondere in Bezug auf die Feuchtigkeit im Rottekörper. Ein zu grosser Anteil an Gärgut in der Mischung wirkt bei der Anwendung des Komposts negativ auf das Stickstoffverhalten aus. Bei der Ausgangsmischung ist besonders auf die Qualität der Bestandteile zu achten.

7 > Mittelfristige Versuche der Anwendung von Gärgut und Kompost auf den Feldern

In Mellikon (AG) wurden zwei Freilandversuche durchgeführt, einer 2004 in schwerem Boden und einer 2005 in leichtem Boden. Bei beiden Versuchen wurden dem Boden im Frühjahr acht Arten von Kompost und Gärgut (zwei Arten Gärgut, zwei Komposte für die Landwirtschaft, zwei Komposte für den Gartenbau und zwei Komposte für den gedeckten Landbau) im Verhältnis von 100 m³ pro Hektar beigelegt und anschliessend Mais angebaut. Im Herbst wurde der Mais geerntet und pro Parzelle rund dreissig Liter Erde entnommen, um die Auswirkungen der verschiedenen Komposte auf die biologischen Bodeneigenschaften zu untersuchen.

Foto 9 > Durchführung der Freilandversuche



7.1 Einfluss von Kompost auf das Maiswachstum

Der erste aus agronomischer Sicht beobachtete Unterschied zwischen den verschiedenen Arten von Kompost und Gärgut betraf deren Einfluss auf den für die Pflanzen verfügbaren Stickstoff im Boden. Der Kompost für die Landwirtschaft hat sehr schnell eine Stickstoffblockierung im Boden verursacht, und zwar sowohl in schwerem (Abb. 7.1, links) als auch in leichtem Boden (Abb. 7.2, links). Die Stickstoffblockierung war auch anhand des Wachstums der Maispflanzen deutlich zu erkennen, insofern als die Pflanzen in den Parzellen, denen landwirtschaftlicher Kompost beigemischt worden war, ein paar Wochen nach der Aussaat kleiner und vor allem wesentlich kümmerlicher waren (Abb. 7.1 und 7.2, rechts). Dies wurde etwa sieben Wochen nach der Aussaat durch Zugabe von Stickstoffdünger in Form von Federmehl korrigiert. Danach konnten sich die Maispflanzen schnell erholen und die Verspätung fast gänzlich aufholen, so dass der Ernteertrag der Parzellen mit landwirtschaftlichem Kompost kaum (schwerer Boden 2004) oder gar nicht (leichter Boden 2005) vom Ertrag der Kontrollparzelle abwich.

Abb. 7.1 > Einfluss der Zugabe von 100 m³ Gärgut oder Kompost auf den Stickstoffgehalt im Boden nach der Aussaat (links) und auf die Höhe der Maispflanzen 7 Wochen nach der Aussaat (rechts) in schwerem Boden (Versuch 2004)

T: Kontrollparzelle, D1, D2: Gärgut; Ca1, Ca2: Kompost für die Landwirtschaft; Ch1, Ch2: Kompost für den Gartenbau; Cc1, Cc2: Kompost für den gedeckten Pflanzenbau

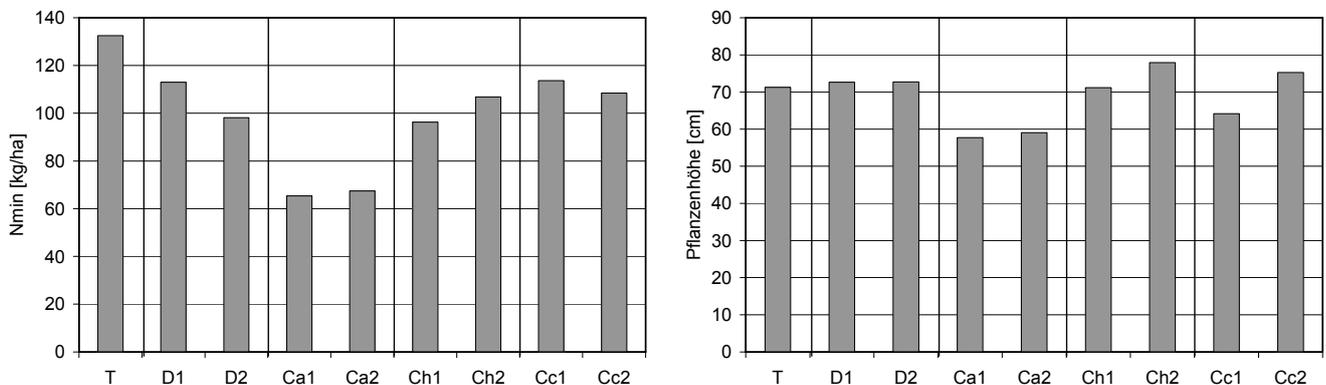
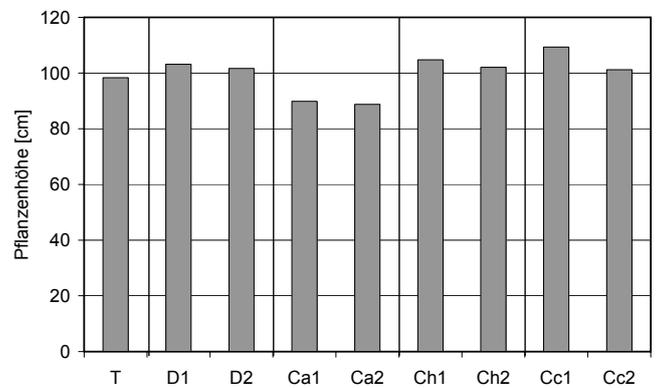
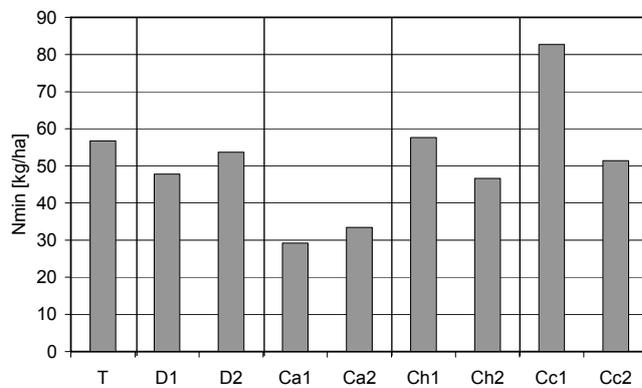


Foto 10 > Auswirkung der Stickstoffblockierung durch einen jungen, für die Landwirtschaft bestimmten Kompost auf das Wachstum der Maispflanzen 2004 in schwerem Boden (links) und 2005 in leichtem Boden (rechts)



Abb. 7.2 > Einfluss der Zugabe von 100 m³ Gärgut oder Kompost auf den Stickstoffgehalt im Boden 4 Wochen nach der Aussaat (links) und auf die Höhe der Maispflanzen 7 Wochen nach der Aussaat (rechts) in leichtem Boden (Versuch 2005)

T: Kontrollparzelle, D1, D2: Gärgut; Ca1, Ca2: Kompost für die Landwirtschaft; Ch1, Ch2: Kompost für den Gartenbau; Cc1, Cc2: Kompost für den gedeckten Pflanzenbau



7.2 Einfluss von Kompost auf die Bodeneigenschaften

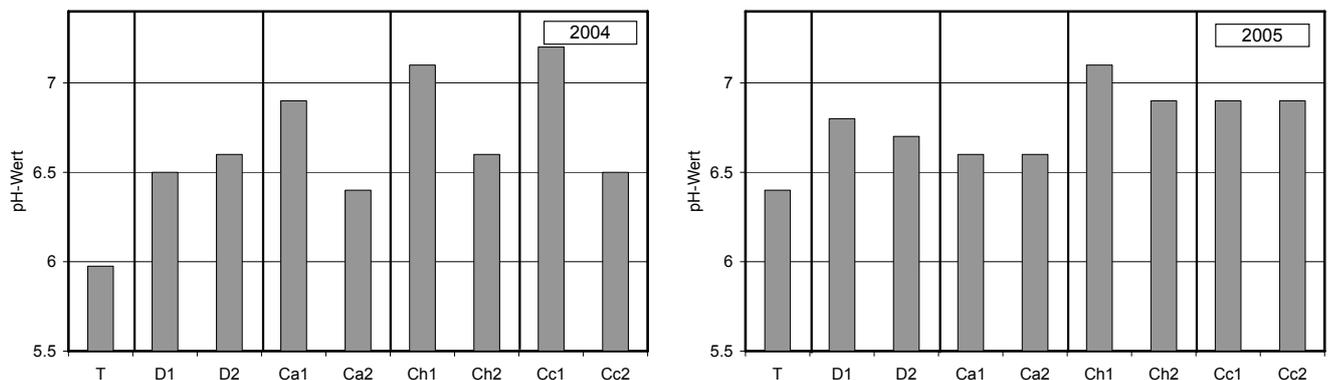
Nach der Maisernte wurde den verschiedenen Versuchspartellen Proben entnommen und analysiert.

Die verschiedenen verwendeten Arten von Kompost und Gärgut haben den Gehalt an Phosphor, Kali und Magnesium im Boden nicht auf konstante Weise beeinflusst (Tab. 7.1 und 7.2). Der Kalziumgehalt im Boden hingegen wurde durch alle Arten von Gärgut und Kompost deutlich gesteigert, und zwar in den beiden analysierten Böden (Tab. 7.1 und 7.2).

Auch der Einfluss von Kompost und Gärgut auf den pH-Wert konnte bei beiden Versuchen beobachtet werden, insofern als der pH-Wert der Partellen, denen Kompost oder Gärgut beigesetzt worden war, im Durchschnitt um 0,5 bis 1 Einheit höher lag (Abb. 7.3). Der Einfluss war in schwerem Boden aufgrund dessen niedrigeren Ausgangs-pH-Werts ausgeprägter. Reiferer Kompost hat tendenziell stärkere Auswirkungen als weniger reife. Nun stellt sich die Frage, ob diese Auswirkungen nur mittelfristig oder von Dauer sind.

Abb. 7.3 > Einfluss der Zugabe von 100 m³ Gärgut oder Kompost auf den nach der Maisernte gemessenen pH-Wert in schwerem Boden (Versuch 2004) und in leichtem Boden (Versuch 2005)

T: Kontrollparzelle, D1, D2: Gärgut; Ca1, Ca2: Kompost für die Landwirtschaft; Ch1, Ch2: Kompost für den Gartenbau; Cc1, Cc2: Kompost für den gedeckten Pflanzenbau



Tab. 7.1 > Einfluss der Zugabe von 100 m³ Gärgut oder Kompost auf die Maisernte und die nach der Maisernte ermittelten Bodeneigenschaften in schwerem Boden (Versuch 2004)

Verwendetes Produkt		Ernteertrag [kg TS/m ²]	pH-Wert	Gesamt-P [mg/kg]	Gesamt-K [mg/kg]	Gesamt-Mg [mg/kg]	Ca [g/kg]
Kontrollparzelle	Mittelwert	1,10	6,0	51,4	152,3	162,7	2068,8
	Standardabweichung	0,06	0,2	11,0	59,1	17,9	161,3
Gärgut 1	Mittelwert	1,00	6,5	44,8	136,6	160,2	2804,5
	Standardabweichung	0,11	0,1	12,6	34,9	9,8	459,0
	% der Kontrollparzelle	91,1	108,4	87,2	89,6	98,5	135,6
Gärgut 2	Mittelwert	1,02	6,6	86,1	177,6	196,6	2658,5
	Standardabweichung	0,12	0,1	27,6	62,5	17,2	232,2
	% der Kontrollparzelle	93,1	110,0	167,5	116,6	120,9	128,5
Kompost für die Landwirtschaft1	Mittelwert	1,01	6,9	60,5	169,9	170,9	3167,5
	Standardabweichung	0,16	0,1	17,5	59,9	17,0	264,9
	% der Kontrollparzelle	91,6	115,9	117,8	111,5	105,0	153,1
Kompost für die Landwirtschaft2	Mittelwert	1,07	6,4	45,6	137,9	168,4	2493,5
	Standardabweichung	0,20	0,1	12,4	58,8	13,6	180,3
	% der Kontrollparzelle	96,9	106,3	88,7	90,5	103,5	120,5
Kompost für den Gartenbau 1	Mittelwert	1,09	7,1	70,1	204,5	194,4	4219,5
	Standardabweichung	0,07	0,2	18,7	68,0	18,3	1108,1
	% der Kontrollparzelle	98,6	119,2	136,4	134,2	119,5	204,0
Kompost für den Gartenbau 2	Mittelwert	1,15	6,6	64,8	215,5	191,6	2859,3
	Standardabweichung	0,16	0,1	20,5	76,5	13,3	246,8
	% der Kontrollparzelle	104,3	110,0	126,1	141,4	117,7	138,2
Kompost für den gedeckten Pflanzenbau 1	Mittelwert	1,07	7,2	70,5	139,2	159,6	3572,3
	Standardabweichung	0,08	0,1	31,5	42,7	27,5	1057,5
	% der Kontrollparzelle	97,7	119,7	137,1	91,4	98,1	172,7
Kompost für den gedeckten Pflanzenbau 2	Mittelwert	1,14	6,5	62,7	180,5	179,8	2770,5
	Standardabweichung	0,12	0,1	18,8	51,3	8,5	164,5
	% der Kontrollparzelle	104,7	109,2	122,0	118,5	110,5	133,9

Pro Variante wurden jeweils vier Parzellen à 12 m² angebaut. Jeder Wert in der Tabelle oben ist somit der Mittelwert von vier Einzelwerten

Tab. 7.2 > Einfluss der Zugabe von 100 m³ Gärgut oder Kompost auf den Maisertrag und die nach der Maisernte ermittelten Eigenschaften des leichten Bodens (Versuch 2005)

Verwendetes Produkt		Ernteertrag [kg TS/m]	pH-Wert	Gesamt-P [mg/kg]	Gesamt-K [mg/kg]	Gesamt-Mg [mg/kg]	Ca [g/kg]
Kontrollparzelle	Mittelwert	0,82	6,4	46,0	110,4	153,1	2349,5
	Standardabweichung	0,22	0,0	11,9	25,9	27,9	235,4
Gärgut 1	Mittelwert	0,83	6,8	27,3	92,5	129	2839,5
	Standardabweichung	0,08	0,2	14,3	14,3	27,1	779,4
	% der Kontrollparzelle	101,1	105,4	59,4	83,8	84,2	120,9
Gärgut 2	Mittelwert	0,86	6,7	44,3	113,6	148,9	2409,8
	Standardabweichung	0,13	0,1	15,4	23,0	27,0	228,2
	% der Kontrollparzelle	104,3	103,5	96,2	102,9	97,3	102,6
Kompost für die Landwirtschaft1	Mittelwert	0,82	6,6	41,5	98,1	130,0	2653,0
	Standardabweichung	0,36	0,1	23,6	22,8	23,4	253,0
	% der Kontrollparzelle	100,2	103,1	90,2	88,8	84,9	112,9
Kompost für die Landwirtschaft2	Mittelwert	0,82	6,6	28,1	95,6	138,7	2547,3
	Standardabweichung	0,23	0,1	8,9	11,4	21,5	207,4
	% der Kontrollparzelle	99,9	102,3	61,1	86,5	90,6	108,4
Kompost für den Gartenbau 1	Mittelwert	0,89	7,1	52,8	113,0	140,6	3241,8
	Standardabweichung	0,11	0,2	14,3	29,2	30,4	740,3
	% der Kontrollparzelle	109,0	109,7	114,6	102,4	91,9	138,0
Kompost für den Gartenbau 2	Mittelwert	0,81	6,9	33,5	117,4	148,7	2704,5
	Standardabweichung	0,11	0,1	7,1	30,3	30,7	255,9
	% der Kontrollparzelle	99,3	107,0	72,7	106,3	97,2	115,1
Kompost für den gedeckten Pflanzenbau 1	Mittelwert	0,91	6,9	38,1	117,0	141,0	2598,0
	Standardabweichung	0,32	0,1	5,7	30,8	32,0	263,0
	% der Kontrollparzelle	111,1	106,6	82,7	106,0	92,1	110,6
Kompost für den gedeckten Pflanzenbau 2	Mittelwert	0,90	6,9	30,0	95,1	148,3	2568,3
	Standardabweichung	0,14	0,2	2,4	14,9	19,5	199,0
	% der Kontrollparzelle	110,3	107,0	65,1	86,2	96,9	109,3

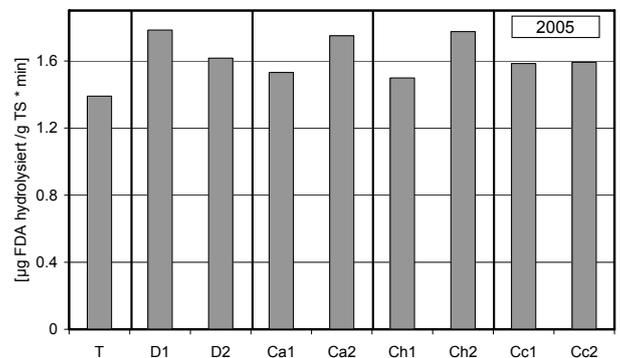
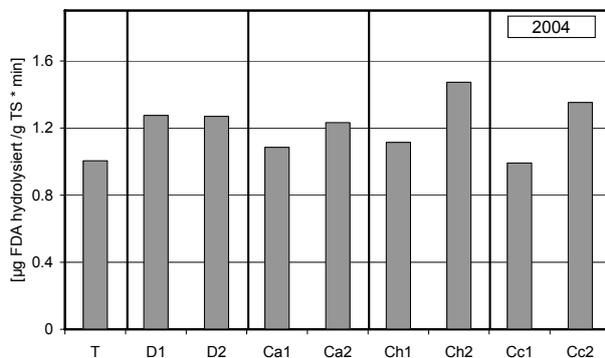
Pro Variante wurden jeweils vier Parzellen à 12 m² angebaut. Jeder Wert in der Tabelle oben ist somit der Mittelwert von vier Einzelwerten

Bei beiden Freilandversuchen ging es vor allem darum festzustellen, ob die mikrobielle Aktivität im Boden durch die Zugabe von Kompost und Gärgut mittelfristig beeinflusst wird. Dazu wurde zunächst die allgemeine Bodenaktivität durch Messung der FDA-Enzymaktivität bestimmt. Mit einer Ausnahme wiesen alle Böden, denen im Frühjahr Kompost oder Gärgut beigesetzt worden war, im Herbst eine um 10 bis 25 % höhere FDA-Enzymaktivität auf (Abb. 7.4). Die gesteigerte Enzymaktivität war bei den verschiedenen Produktklassen praktisch identisch (Abb. 7.4).

Foto 11 > Maisernte und Probenahme der Böden für die Topfversuche

Abb. 7.4 > Einfluss der Zugabe von 100 m³ Gärgut oder Kompost auf die nach der Maisernte ermittelte mikrobiologische Aktivität in schwerem Boden (Versuch 2004) und in leichtem Boden (Versuch 2005)

T: Kontrollparzelle, D1, D2: Gärgut; Ca1, Ca2: Kompost für die Landwirtschaft; Ch1, Ch2: Kompost für den Gartenbau; Cc1, Cc2: Kompost für den gedeckten Pflanzenbau



Die gesteigerte mikrobiologische Aktivität äussert sich jedoch nicht durch eine erhöhte Widerstandsfähigkeit der Pflanzen gegen Krankheiten. Was den Einfluss von Kompost und Gärgut auf die Krankheitsanfälligkeit der Böden angeht, so liess sich zwischen den nach der Maisernte entnommenen Bodenproben beim Wirt-Erreger-System kein wesentlicher Unterschied feststellen, weder bei der Gurkenpflanze (*Pythium ultimum*, Abb. 7.5) noch beim Basilikum (*Rhizoconia solani*, Abb. 7.6). Die in den betreffenden Böden wachsenden Tomatenpflanzen weisen auch keine gesteigerte Widerstandsfähigkeit gegen Krautfäule auf (Krankheitserreger: *Phytophthora infestans*). Dafür können zwei Gründe verantwortlich sein. Zum einen ist möglicherweise mehr Zeit notwendig, um die Auswirkungen von Kompost auf die Bodenfruchtbarkeit und die Pflanzengesundheit besser zu beobachten. Zum anderen ist die Krankheitsanfälligkeit der Böden der verschiedenen Varianten wahrscheinlich daher praktisch identisch, dass die beiden für die Versuche verwendeten Felder bereits von Anfang an über eine gute biologische Aktivität verfügten, da sie zuvor gemäss dem biologischen Landbau und mit einer guten Fruchtfolge bewirtschaftet worden waren.

Abb. 7.5 > Einfluss der Zugabe von 100 m³ Gärgut oder Kompost auf die Entwicklung im Boden der Keimlingsumfallkrankheit bei Gurkenpflanzen – Krankheitserreger: *Pythium ultimum* – nach dem Maisanbau in schwerem Boden (Versuch 2004) und in leichtem Boden (Versuch 2005)

T: Kontrollparzelle, D1, D2: Gärgut; Ca1, Ca2: Kompost für die Landwirtschaft; Ch1, Ch2: Kompost für den Gartenbau; Cc1, Cc2: Kompost für den gedeckten Pflanzenbau

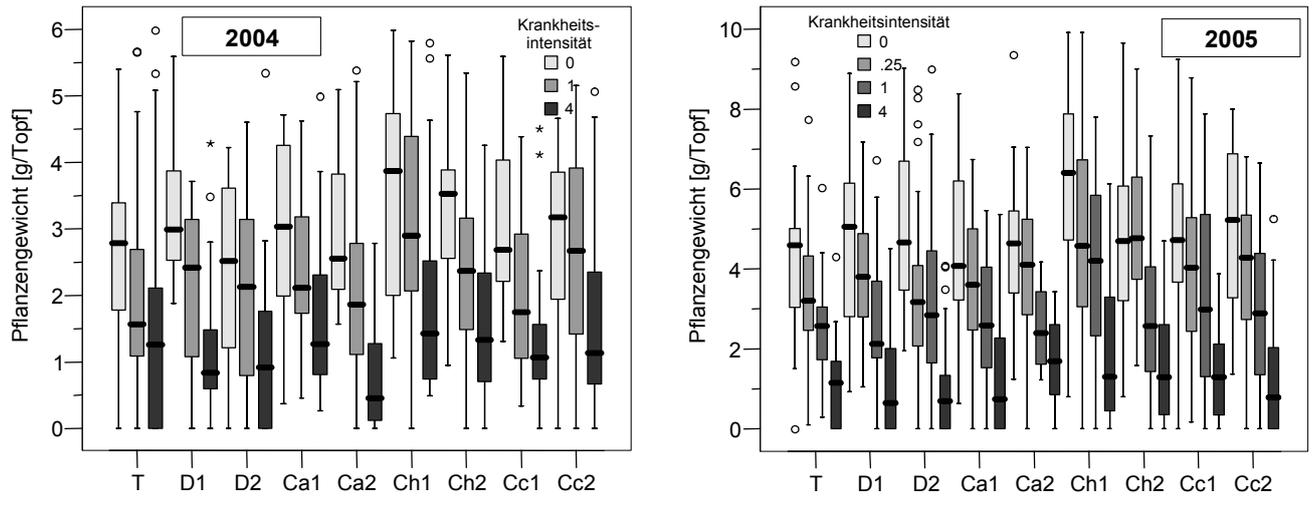


Abb. 7.6 > Einfluss der Zugabe von 100 m³ Gärgut oder Kompost auf die Entwicklung im Boden der Wurzelfäule bei Basilikum – Krankheitserreger: *Rhizoctonia solani* – nach dem Maisanbau in schwerem Boden (Versuch 2004) und in leichtem Boden (Versuch 2005)

T: Kontrollparzelle, D1, D2: Gärgut; Ca1, Ca2: Kompost für die Landwirtschaft; Ch1, Ch2: Kompost für den Gartenbau; Cc1, Cc2: Kompost für den gedeckten Pflanzenbau

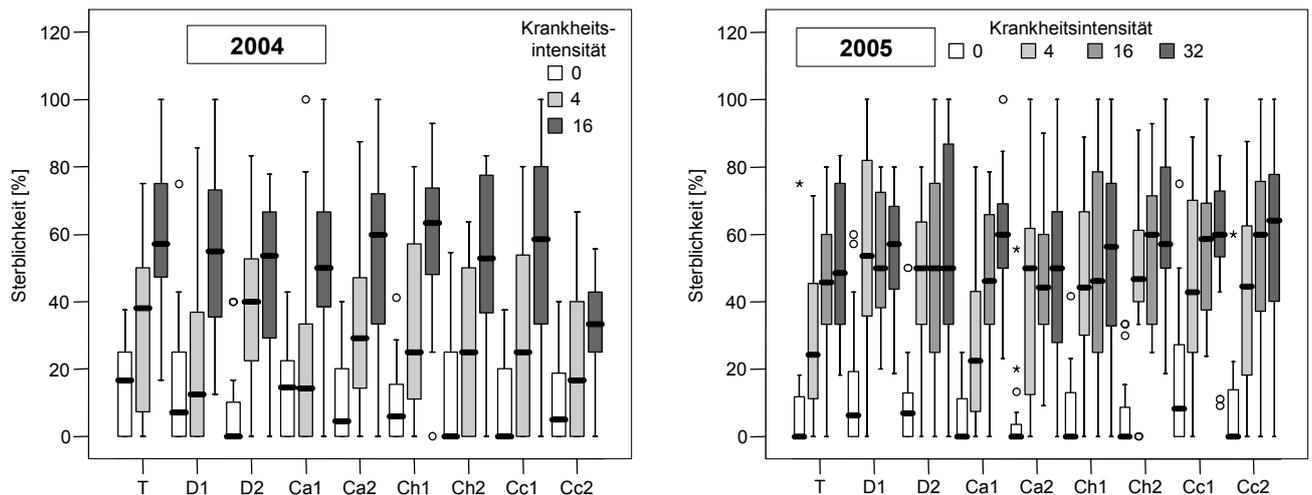


Foto 12 > Beispiele für die Anfälligkeit der Böden für *Pythium ultimum* (links) und für *Rhizoctonia solani* (rechts)

Von oben nach unten: Zunehmende Menge Krankheitserreger

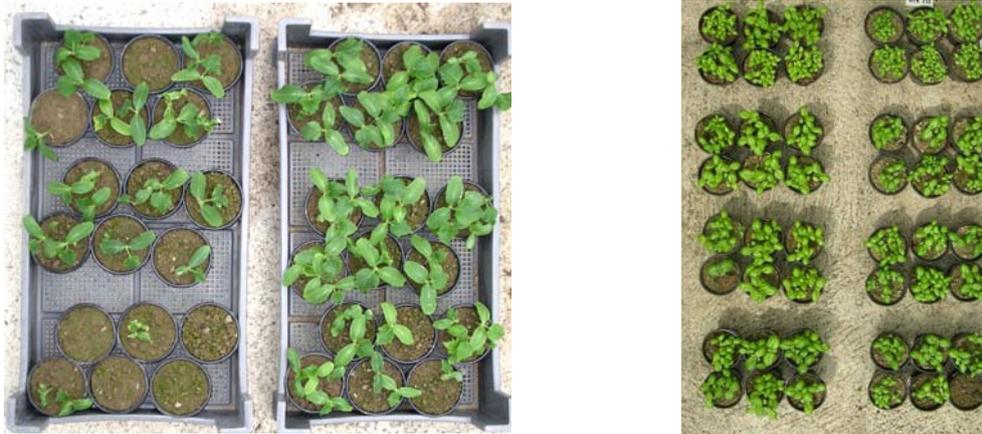
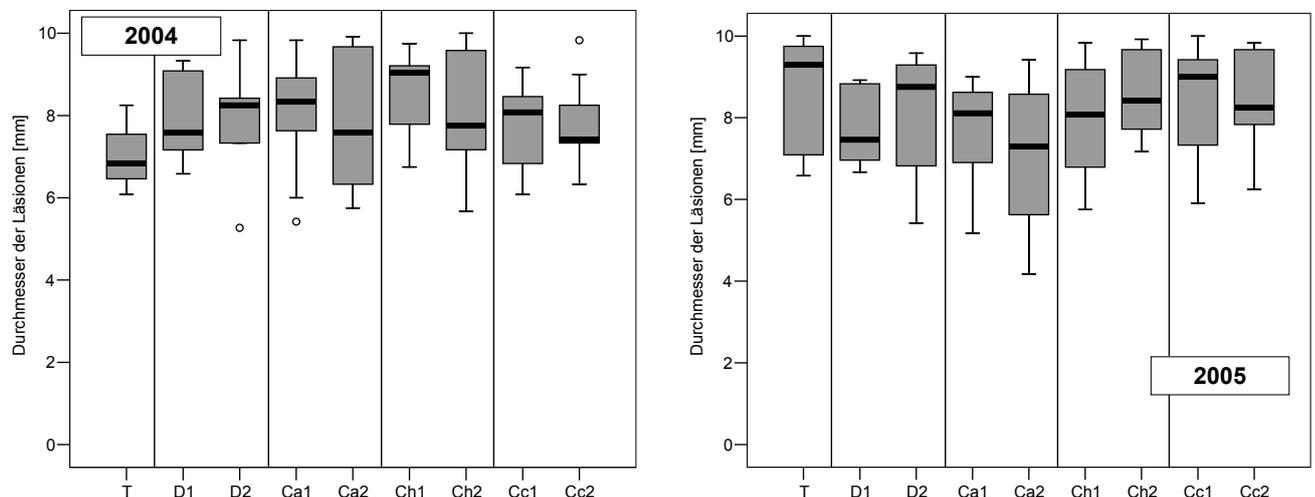


Abb. 7.7 > Einfluss der Zugabe von 100 m³ Gärgut oder Kompost auf den Widerstand gegen Krautfäule bei Tomatenpflanzen, die in dem nach der Maisernte entnommenen Boden wachsen (Versuch 2004: schwerer Boden; Versuch 2005: leichter Boden)

T: Kontrollparzelle, D1, D2: Gärgut; Ca1, Ca2: Kompost für die Landwirtschaft; Ch1, Ch2: Kompost für den Gartenbau; Cc1, Cc2: Kompost für den gedeckten Pflanzenbau



Schliesslich haben die mittelfristigen Freilandversuche ebenfalls gezeigt, wie wichtig die Wahl des Komposts für die Verfügbarkeit des mineralischen Stickstoffs im Boden ist. Kompost und Gärgut haben sich eindeutig positiv auf den pH-Wert der beiden Felder ausgewirkt und in beiden Versuchen die mikrobiologische Aktivität des Bodens gesteigert. Hingegen konnte in diesen mittelfristigen Versuchen keine Wirkung von Kompost und Gärgut auf die Suppressivität festgestellt werden.

Zur Verfeinerung der Ergebnisse und um herauszufinden, ob die beobachteten Auswirkungen von Dauer sind oder sich mit der Zeit abschwächen bzw. verstärken, sind längerfristig angelegte Versuche notwendig.

8 > Empfehlungen für die Praxis

Die im Rahmen dieses Projektes erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Mehrheit des Kompost und Gärguts in der Schweiz von guter Qualität ist. Je nach Ausgangsmaterial, Reifegrad und Regulierung der Rotteführung weisen sie jedoch unterschiedliche Eigenschaften auf. Der Kompostproduzent kann die Eigenschaften seiner Produkte durch die Wahl der Ausgangsmaterialien und die Rotteführung beeinflussen, während der Anwender die Wirkung des Komposts auf seine Kulturen optimieren kann, indem er das für den gewünschten Zweck geeignete Produkt wählt und das Anwendungsverfahren anpasst.

8.1 Empfehlungen für die Mitarbeiter von Vergärungs- und Kompostierungsanlagen

Die Kompostierungsmethode ist für die Qualität der Produkte nicht entscheidend. Die beiden wichtigsten Faktoren für die Eigenschaften von Kompost und Gärgut sind die Wahl der Ausgangsmaterialien und die Rotteführung.

8.1.1 Wahl der Ausgangsmaterialien

Die Qualität der Ausgangsmaterialien spielt natürlich eine wesentliche Rolle für den Anteil an unerwünschten Substanzen, insbesondere an Kunststoff, in dem erzeugten Kompost. Technische Hilfsmittel wie Siebter können zum Teil Abhilfe schaffen. Um einen Kompost ohne jegliche Fremdkörper herzustellen, werden am besten nur Ausgangsmaterialien verarbeitet, die keine dieser Substanzen enthalten.

Daneben haben die Ausgangsmaterialien hauptsächlich einen Einfluss auf den Nährstoff- und Salzgehalt von Kompost und Gärgut. Beim Salzgehalt ist ein klarer Unterschied festzustellen, je nachdem, zu welchem Zeitpunkt die Ausgangsmaterialien geliefert werden, insofern als Sommerkompost salzhaltiger ist als Winterkompost. Generell enthält Presswasser mit Ausnahme von Kalzium wesentlich mehr Nährstoffe und Salz als Kompost und Gärgut.

Es lassen sich also folgende Empfehlungen abgeben:

- > Die Ausgangsmischung gemäss dem vorgesehenen Verwendungszweck des Komposts auswählen. Für Kompost für den gedeckten Pflanzenbau lieber ligninhaltige z. B. während des Winters gelieferte Ausgangsmaterialien wählen. Insbesondere sind Ausgangsmaterialien, die Küchenabfälle enthalten, für die Herstellung solchen

Komposts kaum geeignet, da ihr Natriumgehalt den Salzgehalt noch zusätzlich erhöht, was den Pflanzen abträglich ist.

- > Kompost aus Ausgangsmaterialien, mit nur wenig ligninhaltigem Material, z. B. im späten Frühjahr oder Sommer gelieferte Materialien sowie Lieferungen aus den Städten oder mit einem höheren Anteil an Küchenabfällen, weist einen höheren Salz- und Nährstoffgehalt auf. Dieser Kompost ist also vor allem für Freilandkulturen geeignet.

Was die Düngerbilanz angeht, so hat Kompost mit Hofdünger einen höheren Phosphorgehalt als die anderen. Darauf ist zu achten, damit bei der Düngung der Felder die Phosphorbilanz ausgewogen bleibt.

8.1.2 Problem der Stickstoffblockierung in den Feldern

Ein wichtiges Problem bei der Anwendung von Kompost ist dessen Auswirkung auf die Verfügbarkeit von Stickstoff für die Pflanzen. Dabei spielen sowohl die Ausgangsmischung als auch die Ausreifungsdauer und die Rotteführung eine Rolle.

Um zu verhindern, dass mineralischer Stickstoff während der Kompostierung verloren geht, muss insbesondere während der Hitzeperiode für ausreichend Feuchtigkeit im Rottekörper gesorgt werden.

Die Gefahr der Stickstoffblockierung ist bei jungem Kompost (Kompost für die Landwirtschaft) und solchem, der viel ligninhaltiges Material enthält (vorwiegend Ausgangsmaterialien aus dem Winter), am grössten.

Die Gefahr der Stickstoffblockierung ist bei Kompost mit einem $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis unter 2 am grössten, vor allem wenn der Anteil an ligninhaltigem Material hoch ist.

Für Kulturen, die viel Stickstoff benötigen (wie z. B. Mais) ist von Kompost mit einer hohen Gefahr der Stickstoffblockierung abzuraten. Es empfiehlt sich, die Entwicklung des mineralischen Stickstoffs im Boden zu beobachten (Bodenanalyse bei 4 bis 5 Wochen alten Kulturen). Dadurch kann eine eventuelle Zusatzdüngung rechtzeitig in Betracht gezogen werden.

Wird ein Kompost verwendet, bei dem die Gefahr der Stickstoffblockierung besteht, so sollte zum Zeitpunkt der Aussaat eine korrigierende Stickstoffdüngung vorgenommen werden (rund 20 Einheiten).

Um die Gefahr der Stickstoffblockierung zu reduzieren, wird eine längere Ausreifungsdauer dieses Komposts empfohlen. Damit die Ausreifung erfolgreich ist, muss für ausreichend Feuchtigkeit und damit für eine gute mikrobielle Aktivität im Rottekörper gesorgt werden. Ausserdem kann sich die Zugabe von Material als notwendig erweisen, das reich an verfügbarem Stickstoff ist (Gülle, Gärgut, Rasen, ...).

8.1.3 Einfluss der Rotteführung auf die biologische Qualität von Kompost

Im Gegensatz zum Nährstoffgehalt hängt die Parameter für die biologische Qualität des Komposts unmittelbar vom Kompostierungsprozess ab. Besonders deutlich zeigt sich dies an den Biotests, bei denen zwischen den Produkten derselben Klasse grosse Unterschiede auftreten.

Generell besitzt Gärgut eine höhere Phytotoxizität als die übrigen Produkte. Dieser Aspekt muss also bei der Anwendung berücksichtigt werden, insofern als die verwendeten Mengen der jeweiligen Situation anzupassen sind.

Eine wichtige Rolle für die biologische Qualität der Produkte spielt die Belüftung des Rottekörpers. Je reifer der Kompost, desto geringer die mikrobiologische Aktivität und der Sauerstoffbedarf. Dennoch brauchen Mikroorganismen immer ausreichend Sauerstoff. Ein Ersticken selbst während der Lagerung des Endproduktes führt zu einer deutlich verminderten biologischen Qualität des Komposts.

8.1.4 Humusstabilität

Die Wirkung von Kompost und Gärgut auf die physikalischen Eigenschaften des Bodens hängt in hohem Masse davon ab, in welcher Form die organische Substanz in den verschiedenen Produkten vorkommt. So haben vorwiegend stabile Humusverbindungen (Huminsäuren) eine langfristige Auswirkung auf die Bodenstruktur und -stabilität. Für bestimmte Anwendungen ist es aber auch wichtig, den Gehalt an weniger stabilen Humusverbindungen in den Produkten zu kennen, wie beispielsweise den Anteil an wasserlöslichen Huminstoffen, die für die Farbe des Kompostsafte verantwortlich sind.

Bei der Verwendung von Kompost in Substrat oder Pflanzenkästen ist es wichtig, Produkte mit hellem wässrigem Extrakt zu wählen.

Will man hingegen mittel- oder langfristig die Bodenstruktur verbessern, so ist ein Kompost mit höherem Huminsäuregehalt vorzuziehen. Mit der Analyse der Pyrophosphatzahl lässt sich ein Produkt relativ leicht darauf hin untersuchen (siehe Kapitel 8.3).

Stabile Humusverbindungen entstehen vorwiegend während der Reifungsphase des Produktes. Mit zunehmendem Reifegrad steigt daher der Huminsäuregehalt. Dieser Prozess wird aber sowohl von den Ausreifungsbedingungen als auch von der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials stark beeinflusst. Am wichtigsten sind ausreichend Feuchtigkeit und Sauerstoff im Rottekörper, damit die Humifizierung des Produktes durch Mikroorganismen stattfinden kann.

8.1.5 Nachbehandlung von Gärgut

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass es durchaus möglich ist, aus Gärgut einen Kompost von guter Qualität herzustellen. Dazu müssen allerdings einige Voraussetzungen erfüllt sein:

Wichtigster Aspekt ist die Feuchtigkeitsregulierung. Wenn frisches Gärgut austrocknet, entweicht der in Form von Ammonium vorhandene Stickstoff in die Luft (Ammoniakgas). Um dies zu vermeiden, muss unbedingt für ausreichend Feuchtigkeit im Produkt gesorgt werden.

Durch die Zugabe von zusätzlichem Material (Häckselgut, junger Kompost, Erde) lässt sich die Qualität des Komposts verbessern, insbesondere was die Freisetzung respektive die Immobilisierung von mineralischem Stickstoff angeht. Empfehlenswert ist beispielsweise das Vermischen von 30 bis 50 % Gärgut mit jungem Kompost oder einer Mischung aus frischem Häckselgut und Siebrückständen.

Die Nachbehandlung von Gärgut dauert sechs bis acht Wochen. Die für die Kompostierung notwendige Zeit wird demnach durch die Vergärung nicht verringert, da bei diesem Prozess nur leicht abbaubare Moleküle zersetzt werden. Bei der Planung einer Vergärungsanlage ist also auch ausreichend Platz für die Nachbehandlung des Gärguts vorzusehen.

8.1.6 Herstellung von Kompost gemäss der gewünschten Wirkung

Kompost und Gärgut weisen je nach Ausgangsmaterialien, Ausreifungsgrad, Lagerungsbedingungen usw. unterschiedliche Eigenschaften auf. Die verschiedenen Eigenschaften sind für den jeweiligen Verwendungszweck mehr oder weniger geeignet. Indem der Verwendungszweck der verschiedenen Kompostchargen im Voraus bestimmt wird, können die geeigneten Ausgangsmaterialien gewählt und die Prozessbedingungen so gestaltet werden, dass die gewünschten Wirkungen erzielt werden. Die Eigenschaften der verschiedenen Kompostarten und ihre jeweilige Verwendung sind in Kapitel 8.2 beschrieben.

Um zu überprüfen, ob der hergestellte Kompost auch tatsächlich die gewünschten Eigenschaften besitzt, empfiehlt es sich, am Kompostierungsort selbst einige einfache Analysen durchzuführen, die darauf schliessen lassen, wie der Kompost vermutlich mit Boden und Pflanzen reagieren wird. Die zur Optimierung der Kompostanwendung wichtigsten Analysen betreffen den Salzgehalt, den pH-Wert, die vorhandenen Stickstoffverbindungen, die Farbe des wässrigen Extrakts, die Pyrophosphatzahl und die Biotests. Dieses Thema wird in Kapitel 8.3 ausführlicher behandelt.

8.2 Empfehlungen an den Anwender von Kompost und Gärgut

8.2.1 Bestimmung von Verwendungszweck und gewünschten Wirkungen

Jede Kompostanwendung unterliegt bestimmten Sachzwängen. In manchen Fällen braucht man Kompost, der viele schnell verfügbare Nährstoffe enthält, in anderen Fällen soll der Salzgehalt möglichst niedrig sein oder der Kompost soll eine stark strukturverbessernde Wirkung auf den Boden entfalten. Daher ist es wichtig, dass der Anwender vor der Bestellung des Komposts bestimmt, wofür und mit welcher Wirkung der Kompost eingesetzt werden soll. Nur so wird ihn der Komposthersteller optimal beraten können. Damit der am besten geeignete Kompost gewählt werden kann, müssen vor allem folgende Aspekte definiert werden:

- > Art der Kultur
- > Produktionsmodus
- > Zeitpunkt der Anwendung

Erwünschte Wirkung: kurzfristige Düngung, Wirkung auf die Pflanzengesundheit, mittel- und langfristige Auswirkung auf die Bodenstruktur, Auswirkung auf den Humusgehalt im Boden, ...

Nachdem diese Faktoren bestimmt wurden, kann das richtige Produkt gewählt werden (siehe Kapitel 8.2.2).

8.2.2 Wahl des Komposts und Grundregeln für die Verwendung

Wie unter 8.1.2 bereits erwähnt wurde, ist die Wechselwirkung zwischen Kompost und mineralischem Stickstoff im Boden ganz besonders zu beachten. Diese Frage und die entsprechenden Empfehlungen wurden in Kapitel 8.1.2 ausführlich behandelt.

Vorauszuschicken ist, dass natürlich nur Kompost und Gärgut verwendet werden darf, welche den vom Gesetzgeber erlassenen Mindestqualitätsanforderungen genügen. Mit diesen Anforderungen wird sichergestellt, dass der Kompost und das Gärgut hygienisch einwandfrei sind und die Grenzwerte für Schwermetalle nicht überschreiten. Ist diese Voraussetzung erfüllt, lassen sich folgende Empfehlungen abgeben:

Gärgut und Presswasser enthalten viele rasch für die Pflanzen verfügbare Nährstoffe. Sie eignen sich also besonders für die Anwendung im Freiland, wenn eine kurzfristige Düngung erwünscht ist.

Gärgut und Presswasser sind jedoch biologisch nicht sehr stabil und weisen eine gewisse Phytotoxizität auf, wenn sie in grösseren Mengen eingesetzt werden. Sie eignen sich also nicht für konzentriertere Anwendungen (z. B. am Fuss der Pflanze im Gartenbau) oder als Bestandteil zu Herstellung von Substrat.

Kompost für die Landwirtschaft ist physiologisch jung und noch nicht stabilisiert. Die grossflächige Anwendung im Freiland bereitet jedoch keine Schwierigkeiten, sofern keine Stickstoffblockierung auftritt. Wenn im Frühjahr auf den Feldern ein Kompost ausgebracht wird, der aus Wintermaterialien besteht, empfiehlt sich die Zugabe von Stickstoffdünger.

Physiologisch reifer Kompost ist stabilisiert und ihre Humusverbindungen tragen mittel- und langfristig zu Verbesserung der Bodenstruktur bei. Dieser Kompost eignet sich also besonders für sehr schwere Böden mit beeinträchtigter Struktur oder für sandige Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität.

Als Substratbestandteil ist reifer, ligninhaltiger Kompost am besten geeignet. Dabei muss allerdings auf ein hohes $\text{NO}_3\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$ -Verhältnis geachtet werden, damit das Produkt keine Stickstoffimmobilisierung verursacht.

Im Sommer nach der Ernte ist junger Kompost geeignet. In manchen Fällen kann es nämlich von Vorteil sein, den Reststickstoff nach der Ernte vorübergehend zu fixieren. Bei hohen Sommertemperaturen wird die junge organische Substanz relativ schnell abgebaut, so dass der Stickstoff den Pflanzen im Herbst wieder zur Verfügung steht.

8.3 Empfehlungen zur Bestimmung der Komposteigenschaften

In diesem Kapitel wird beschrieben, mit welchen Methoden sich am besten bestimmen lässt, welcher Kompost oder welches Gärgut für die jeweilige Anwendung geeignet ist. Dabei wurde jedoch auf Richtwerte verzichtet, da eine aus Forschern, Kompostherstellern und -anwendern bestehende Arbeitsgruppe damit beauftragt ist, die VKS-Richtlinie 2001 auf der Grundlage der Ergebnisse dieses Projektes zu aktualisieren. Um keine Verwirrung zu stiften, wurde daher beschlossen, die Schlussfolgerungen der Arbeitsgruppe abzuwarten, bevor Richtwerte bezüglich der Anwendung der verschiedenen Produkte angegeben werden.

8.3.1 Chemische Basisanalysen

Zur Erstellung einer Düngerbilanz sind die gemäss den Referenzmethoden der Forschungsanstalt Agroscope ART definierten Nährstoffanalysen von Bedeutung. Diese Werte reichen jedoch nicht aus, um die verschiedenen Kompost- und Gärgutprodukte erfolgreich einzusetzen. Wichtig sind ausserdem der *Salzgehalt* der Produkte, ihr *pH-Wert* sowie ihr *Ammonium-, Nitrit- und Nitratgehalt*. Letztere sind zusammen mit den verwendeten Ausgangsmaterialien wichtig, um die Gefahr der Stickstoffimmobilisierung nach der Kompostapplikation im Feld abschätzen zu können.

Gegenwärtig gibt es keine offiziellen Methoden zur Bestimmung und Auslegung dieser Werte. Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Studie, bei der der Schweizer Kompost von der Forschungsanstalt Agroscope ART Reckenholz mit verschiedenen Me-

thoden analysiert wurden, sowie den Ergebnissen aus den Nachbarländern, sind noch offizielle, in der Praxis anwendbare Methoden von der Forschungsanstalt Agroscope ART Reckenholz zu entwickeln. Diese Arbeiten dürften in den kommenden Monaten abgeschlossen sein.

8.3.2 Humusstabilität

Aufgrund unserer Ergebnisse erweisen sich zur Bestimmung der Humusstabilität zwei Analysen als wichtig:

Bestimmung der Farbe des wässrigen Extraktes. Für die Praxis ist dieser Wert wichtig, um den richtigen Kompost für Tröge, Kästen, Substrate, usw. zu wählen.

Bestimmung der Pyrophosphatzahl. Sie gibt Aufschluss über die Humusstabilität, was wichtig ist, um die langfristige Auswirkung des Komposts auf die Bodenstruktur und den Gehalt an stabilen Humusverbindungen im Boden abschätzen zu können.

Diese Tests müssen noch weiterentwickelt werden, so dass sie als Routine-Tests direkt am Kompostierungsort eingesetzt werden können.

8.3.3 Biologische Qualität von Kompost

Als Ergänzung zu den übrigen Analysen (siehe 8.1.2 und 8.1.3) empfiehlt es sich, Biotests durchzuführen. Damit lässt sich nämlich feststellen, ob bei relativ anspruchsvollen Anwendungen von Kompost (Gartenbau, Gemüseanbau, Herstellung von Substraten,...) Probleme zu erwarten sind. Mit den beiden Kressetests und dem Salattest lässt sich die Gefahr der Phytotoxizität zuverlässig ermitteln. Diese Tests haben den Vorteil, dass sie vor Ort von den Mitarbeitern der Kompostierungsanlage selbst durchgeführt werden können.

Für besondere Anwendungen wie den gedeckten Pflanzenbau und die Herstellung von Substraten sind auch die Tests zur Feststellung des Unterdrückungspotenzials von Pflanzenkrankheiten von Interesse. Am wichtigsten ist dabei der Test des Schutzes der Basilikumpflanze vor *Rhizoctonia solani*, da er für die Praxis aussagekräftiger ist. Da bei diesen Tests mit Krankheitserregern gearbeitet wird, sind sie jedoch nicht am Ort der Kompostierung möglich, sondern müssen durch spezialisierte Labors durchgeführt werden. Angesichts ihrer relativ hohen Kosten sind sie nur für Kompostchargen mit hohem Mehrwert zu empfehlen.

8.4 **Zukünftige Forschungsarbeiten: vorrangig zu schliessende Lücken**

Im Rahmen dieses Projektes konnten zahlreiche interessante und wichtige Aspekte für die Praxis geklärt werden. Die Stärke des Projektes besteht in der breiten Palette der untersuchten Daten und Kompostproben. Damit konnten wichtige Qualitätsmerkmale identifiziert werden. Zum besseren Verständnis und zur klareren Abgrenzung der einzelnen Merkmale, müssen diese als nächstes weiter vertieft werden. Im folgenden Kapitel werden drei Forschungsbereiche beschrieben, die für die Praxis besonders wichtig sind.

8.4.1 **Einschätzung der Gefahr einer Stickstoffblockierung im Feld durch die Kompost- oder Gärgutapplikation**

Die zentrale Frage bei der Kompost- und Gärgutapplikation auf den Feldern ist die Verfügbarkeit des Stickstoffs für die Pflanzen. Diesbezüglich treten in der Praxis die meisten Probleme auf, wenn z. B. ein ungeeigneter Kompost ausgebracht oder keine ausreichenden Begleitmassnahmen ergriffen wurden.

Die Ergebnisse dieser Studie machen deutlich, dass manch junger Kompost zu Beginn eine relativ starke Blockierung des mineralischen Stickstoffs verursachen kann, wodurch dieser den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung steht. Um jegliche Blockierungsgefahr auszuschliessen, kann man sich auf Kompost beschränken, dessen Nitrat-Ammonium-Verhältnis über 2 liegt. Andererseits gibt es aber auch Kompost und Gärgut, die trotz eines Verhältnisses unter 2 keine Stickstoffblockierung verursachen. Diese Reaktion hängt also auch noch von anderen Faktoren ab. Durch eine gezieltere Auswahl des Komposts sollte sich die Blockierungsgefahr genauer bestimmen lassen. Es sollte also zum einen möglich sein, den Kompost leichter zu wählen, und zum anderen die Intensität und Dauer der Blockierung vorausszusehen, damit Gegenmassnahmen eingeleitet werden können (beispielsweise durch Stickstoffdüngung).

Darüber hinaus wäre es wichtig, die Reaktion des Komposts mit dem Bodenstickstoff je nach Situation zu bestimmen (Temperatur, Art des Bodens, Bodenfeuchtigkeit, ...). Der Anwender hätte somit die Möglichkeit, ohne die Gefahr der Überdüngung den Pflanzen den Stickstoff zur Verfügung zu stellen, den sie für ein optimales Wachstum brauchen.

8.4.2 **Optimierungsmassnahmen bei der Rotteführung zur Verbesserung der biologischen Qualität von Kompost**

Das Projekt hat deutlich gemacht, dass die Wahl der Ausgangsmaterialien primär für die chemische Qualität von Kompost und Gärgut verantwortlich ist, während die Rotteführung vor allem die biologische Qualität beeinflusst. Beides zusammen ist wahrscheinlich verantwortlich für die Entstehung von stabilen Humusverbindungen

und damit für die langfristige Auswirkung von Kompost und Gärgut auf die Bodenstruktur.

Eine der interessanten Erkenntnisse aus diesem Projekt ist die Tatsache, dass sich mit allen untersuchten Kompostierungsverfahren hochwertiger Kompost herstellen lässt, jedoch keine Methode in der Praxis vollkommen beherrscht wird. Während beispielsweise die Entstehung von stabilen Humusverbindungen bei der Feldrandkompostierung zu wünschen übrig lässt, geht bei anderen Systemen wie zwangsbelüfteten Mieten häufig zu viel Stickstoff verloren.

Da diese Zusammenhänge sehr komplex sind, war es nicht möglich im Detail zu untersuchen, welche Rolle die einzelnen Faktoren im Laufe des Prozesses für die biologische Qualität des Endproduktes genau spielen (Phytotoxizität, Krankheitsunterdrückungsfähigkeit, Nitrifizierungsfähigkeit, usw.). Allem Anschein nach sind Belüftung und Feuchtigkeitsregulierung die wichtigsten Faktoren, doch sind deren Rolle und Grenzen in den einzelnen Phasen des Kompostierungsprozesses nicht bekannt.

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Studie könnten klar abgesteckte Kompostierungsversuche, bei denen nur ein oder zwei Faktoren variiert werden, dem Kompostierer Referenzdaten liefern, die es ihm erlauben würden, seinen Prozess besser zu verstehen und zu kontrollieren und damit die Qualität der Endprodukte zu steigern.

Eine solche Untersuchung dürfte es ferner erlauben, die Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Verarbeitungssysteme für organische Abfälle je nach Art der Abfälle und des gewünschten Produktes zu kennen.

8.4.3 **Langfristige Auswirkungen von Kompost und Gärgut auf die Bodenfruchtbarkeit und die Pflanzengesundheit**

Die bis jetzt durchgeführten Arbeiten erlauben es, die Qualität von in der Schweiz hergestelltem Kompost und Gärgut zu bestimmen. Die grösste noch bestehende Lücke betrifft die Frage, wie sich die verschiedenen Eigenschaften bei der Applikation der Produkte auf den Boden auswirken. Neben der Bestimmung der Eigenschaften von Schweizer Kompost und Gärgut wurden kurzfristige Freilandversuche durchgeführt (eine Saison Maisanbau). Die Ergebnisse sind zwar interessant und ermutigend, doch reichen sie noch nicht aus, um die langfristigen Auswirkungen der verschiedenen Komposte auf die Bodenstruktur und -fruchtbarkeit beurteilen zu können. Genau das ist aber ein entscheidender Aspekt im Hinblick auf den ökologischen Sinn der Anwendung von Kompost und Gärgut.

Zahlreiche Fragen sind noch offen. Nach einer Saison konnten zwischen den verschiedenen Qualitäten von Kompost und Gärgut keine grossen Unterschiede festgestellt werden. Für die Praxis ist es jedoch wichtig zu wissen, ob sich dies auch langfristig bestätigt. Davon hängt nämlich die Wahl des eingesetzten Komposts und insbesondere seiner Reife ab. Sollte nämlich ein junger Kompost langfristig dieselben Auswirkungen haben wie ein reifer, bräuchte nicht so viel in die Herstellung von reifem Kompost

investiert werden. Wenn hingegen ein Kompost mit grosser Menge an Huminsäuren nach einigen Jahren die Bodenstruktur und ihren Gehalt an stabiler organischer Substanz wesentlich wirksamer verbessert, könnte ein Landwirt durchaus geneigt sein, ein paar Franken mehr für einen solchen hochwertigen Kompost auszugeben. Weltweit gibt es nur sehr wenig Daten zu diesem Thema. Ein weiterer wichtiger aber wenig erforschter Faktor ist die Tatsache, dass die Wahl des optimalen Komposts wahrscheinlich auch von der Art des Bodens und den vorherrschenden Witterungsbedingungen abhängt. Auch zur Klärung dieser Wechselwirkungen besteht noch Forschungsbedarf.

Diese für die optimale Anwendung von Kompost und Gärgut entscheidenden Fragen können nur durch langfristig angelegte Versuche beantwortet werden. Ein hochwissenschaftlicher detaillierter Versuch wäre äusserst interessant, um mehr Erkenntnisse über die Wechselwirkung zwischen Kompost und Boden zu gewinnen. Bei einem solchen Versuch kann allerdings immer nur ein Boden und ein Klima berücksichtigt werden. Angesichts der Kosten und der notwendigen Ressourcen, ist es nicht realistisch, mehrere Parallelversuche zu planen. Aus diesem Grunde muss ein solcher Versuch unbedingt durch ein Netzwerk von praktischen und koordinierten Versuchen ergänzt werden, die wesentlich einfacher angelegt sind, aber für die Praxis Informationen über die Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Arten von Kompost und Gärgut in unterschiedlichen Böden, unterschiedlichem Klima und mit verschiedenen Kulturen liefern.

Damit die gewonnenen Daten auch verwertbar sind, müssen diese praktischen Versuche, die von den Anwendern selbst durchgeführt werden können, wissenschaftlich begleitet werden. Ferner müssen die Parzellen und eingesetzter Kompost nach einem klaren Protokoll festgelegt werden und die Versuchsanordnung muss überall gleich konzipiert sein. Dabei müssen sich aber nicht unbedingt alle Versuche auf dieselbe Frage konzentrieren. Dies ist je nach Situation zu entscheiden. Wichtig ist aber, dass sich die gewonnenen Daten in das Gesamtkonzept der Versuche integrieren lassen.

9 > Schlussfolgerungen

In der Schweiz werden grosse Anstrengungen zur Qualitätsverbesserung von Kompost und Gärgut unternommen und die Ergebnisse zeigen, dass dies der richtige Weg ist. Das endgültige Ziel ist aber noch nicht erreicht, denn vieles lässt sich noch verbessern. Um auch weiterhin Fortschritte in die richtige Richtung zu machen, müssen alle Beteiligten verstärkt zusammenarbeiten. So muss insbesondere der Dialog zwischen den Herstellern und Anwendern von Kompost und Gärgut vertieft werden. Die Anwender müssen ihre Bedürfnisse besser definieren und die Möglichkeiten und Grenzen des Komposts besser kennen, während die Produzenten ihre verschiedenen Produkte besser voneinander abgrenzen und ein grösseres Verständnis darüber gewinnen müssen, wie die verschiedenen Kulturen auf die verschiedenen Komposte reagieren. Es ist unerlässlich, dass sich die Hersteller- und die Anwendergruppe als Partner verstehen. Das Misstrauen, das zuweilen noch zwischen ihnen besteht, muss unbedingt einer fruchtbaren Zusammenarbeit weichen. Die in Kapitel 8.1.3 erwähnten langfristig angelegten Versuche könnten die Grundlage für die Zusammenarbeit und das gegenseitige Verständnis bilden. Mit der Unterstützung der Wissenschaft, sollten bei der Optimierung der Verwendung von Kompost und Gärgut schnelle Fortschritte möglich sein, insbesondere angesichts der ausgezeichneten technischen Voraussetzungen, die in der Schweiz bestehen.

Auf technischer Ebene müssen natürlich noch verschiedene Analysemethoden klar definiert werden (siehe Kapitel 8.3), um den Dialog zwischen den diversen Gesprächspartnern zu erleichtern. Derzeit arbeitet die Forschungsanstalt Agroscope ART Reckenholz zusammen mit anderen europäischen Einrichtungen an diesem Thema, so dass in Bälde neue Richtlinien für die Analysemethoden zu erwarten sind.

Darüber hinaus sind bei der Ausbildung der beteiligten Personen noch Fortschritte zu machen. In diesem sich rasch weiterentwickelnden Bereich sollte vor allem die Weiterbildung intensiviert werden. Komposthersteller sollten nicht nur in der Handhabung der Maschinen und der Führung des Kompostierungsprozesses ausgebildet werden, sondern auch vertiefte Kenntnisse über die Wirkung ihrer Produkte auf die Pflanzen und den Boden erwerben, damit sie die Anwender ihrer Produkte besser beraten können. Auf der anderen Seite verfügen aber auch viele Landwirte, Gärtner, Obst- und Gemüsebauern nur über sehr begrenzte zuweilen sogar falsche Kenntnisse über Kompost und Gärgut, da sie von Jahrzehnte alten Vorurteilen beeinflusst sind. Diese Wissenslücken zu füllen hätte den grossen Vorteil, dass sie die für ihre Kulturen äusserst gewinnbringenden Produkte angemessener einsetzen könnten.

Die Zukunft von Kompost und Gärgut steht und fällt mit der Zusammenarbeit zwischen Herstellern und Anwendern. Dadurch liesse sich nicht nur der Absatz der Produkte garantieren sondern auch den Anwendern Produkte zur Verfügung stellen, mit denen sich neue Perspektiven für ihre Kulturen eröffnen.