



Schadstoffgehalte von Komposten und Vergärungsrückständen





Schadstoffgehalte von Komposten und Vergärungsrückständen

Impressum

Schadstoffgehalte von Komposten und Vergärungsrückständen
ISBN 978-3-940009-46-3

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 - 0
Fax: (0821) 90 71 - 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Eine Behörde im Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.

Bearbeitung/Text/Konzept:

Ref. 33 (Josef-Vogl-Technikum)/LfU

Auflage:

50, 2007

© Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2007

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck und Wiedergabe – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Untersuchungsprogramm, -methodik	5
3	Ergebnisse und Diskussion	7
3.1	Schwermetalle	7
3.2	Organische Schadstoffe	10
3.2.1	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	14
3.2.2	Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)	14
3.2.3	Polychlorierte Biphenyle (Indikator- und WHO-PCB)	15
3.2.4	Biphenyl	15
3.2.5	Hexachlorbenzol (HCB)	16
3.2.6	Pentachlorphenol (PCP)	16
3.2.7	ortho-Phenylphenol	17
3.2.8	Bisphenol A	17
3.2.9	Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP)	18
3.2.10	iso-Nonylphenol	18
3.2.11	Zinnorganische Verbindungen	19
3.2.12	Galaxolide [®] (HHCB), Tonalide [®] (AHTN)	20
3.2.13	Polybromierte Diphenylether (PBDE)	20
3.2.14	Thiabendazol	21
3.2.15	Lineare Alkylbenzolsulfonate (LAS)	21
3.2.16	Perfluorierte Tenside (PFT)	22
3.2.17	Triclosan, Methyl-Triclosan	22
4	Zusammenfassung und Bewertung	23
5	Danksagung	26
6	Literatur	27

1 Einleitung

Der stofflichen Verwertung von organischen Abfällen (v. a. Bioabfällen, Grüngut) über die etablierten und bewährten Verwertungswege Kompostierung und Vergärung kommt aufgrund der großen Massenströme eine hohe abfallwirtschaftliche Bedeutung [1] zu. Ein nachhaltiger Umgang mit Ressourcen und Sekundärrohstoffen erfordert, dass Schadstoffe sich in keinem Umweltkompartiment anreichern, sondern ausgeschleust werden.

In den 80er und 90er Jahren des 20. Jahrhunderts standen als Schadstoffe vor allem Schwermetalle und einige hochtoxische, persistente organische Verbindungen (z. B. polychlorierte Dioxine/Furane, polychlorierte Biphenyle) im Vordergrund des Interesses. Die weite Verbreitung von organischen Schadstoffen in der Umwelt macht es notwendig, die diesbezüglichen Daten für Komposte und Vergärungsrückstände auf dem aktuellen Stand zu halten und auch bislang weniger betrachtete Organika in die Untersuchungsliste mit aufzunehmen. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die Diskussion über Schadstoffe in Komposten und Vergärungsrückständen zu versachlichen und zeitliche Trends herauszuarbeiten.

Dazu soll die Fortführung der Untersuchungen aus den Jahren 2000 [2] und 2002 [3] des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz in erster Linie dienen. Für den Vergleich der aktuellen Untersuchungsergebnisse bayerischer Komposte stehen v. a. die veröffentlichten Daten aus Baden-Württemberg [4] und Daten einer Literaturstudie [5] zu Verfügung.

2 Untersuchungsprogramm, -methodik

Wie schon bei den Untersuchungen der Jahre 2000 [2] und 2002 [3] wurden im Herbst 2006 Bioabfall- und Grüngutkomposte aus bayerischen Anlagen beprobt. Zudem wurden erstmals Rückstände aus der Bioabfallvergärung (Gärrückstände nach der Nachrotte) mit untersucht. Aufgrund einer Landtagsanfrage [6] wurde auch ein Papierfaserkompost {Ausgangsmaterial: ca. 80 Mass.-% Faserabfälle, Faser-, Füller- und Überzugsschlämme (sog. Papierfangstoffe; AVV-Nr. 03 03 10) aus der Papierherstellung; Rest Strauch- und Baumschnitt} auf dessen Schadstoffgehalte analysiert.

Insgesamt wurden jeweils zwölf Bioabfall- und Grüngutkomposte sowie fünf Vergärungsrückstände aus ganz Bayern und ein Papierfaserkompost beprobt (Mischprobe aus den jeweiligen Lagerplätzen).

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden im September 2006 die Produkte Fertigkompost bzw. Vergärungsrückstand, wie sie zur weiteren Verwertung abgegeben werden, soweit möglich aus den gleichen Anlagen wie in den Vorjahren beprobt. Die Produkte wiesen Körnungsspektren von 0 bis 10 mm sowie von 0 bis 15 mm auf. Nach der Beprobung wurden die Proben bis zur weiteren Aufbereitung am LfU Josef-Vogl-Technikum im Kühlschrank aufbewahrt bzw. eingefroren.

Die Proben wurden auf Schwermetalle und diverse (potenziell) persistente organische Schadstoffe analysiert. Die Analytik erfolgte teilweise in eigenen, teilweise in externen Labors, siehe Tab. 1. Einen Überblick über die untersuchten Schadstoffe bzw. die angewandten Analyseverfahren inkl. Bestimmungsgrenzen geben die Tab. 1 und 2. Für die Analytik wurde Grobmaterial (Äste, Steine etc.) vorher aussortiert. Die gefriergetrockneten Proben wurden gemahlen (Planeten-Schnellmühle); analysiert wurde die ungesiebte Probe.

Tab. 1: Untersuchte Schadstoffe und zugehörige Untersuchungslabore

Schadstoff/-klasse <i>Einzelkomponenten</i>	Untersuchungslabor
Schwermetalle <i>Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn</i>	LfU Augsburg, Ref. 72
Summe polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) <i>Summe 16 Komponenten nach [7]</i>	LfU Josef-Vogl-Technikum, Ref. 33
Summe polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F) <i>Summe 17 Kongenere nach [8]</i>	LfU Augsburg, Ref. 74
Summe polychlorierte Biphenyle (Indikator-PCB) <i>Summe PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180</i>	LfU Augsburg, Ref. 74
Summe dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (WHO-PCB) <i>Summe PCB 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189</i>	LfU Augsburg, Ref. 74
Biphenyl	GALAB Laboratories, Geesthacht
Hexachlorbenzol (HCB)	LfU Augsburg, Ref. 74
Pentachlorphenol (PCP)	LfU Augsburg, Ref. 74
ortho-Phenylphenol	GALAB Laboratories, Geesthacht
Bisphenol A	GALAB Laboratories, Geesthacht
Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP)	GALAB Laboratories, Geesthacht
iso-Nonylphenol	GALAB Laboratories, Geesthacht
Zinnorganische Verbindungen <i>Mono-/Di-/Tri-/Tetra-butyl-, Mono-/Dioktyl-, Tricyclohexyl-, Triphenylzinn</i>	GALAB Laboratories, Geesthacht
Galaxolide® (HHCB), Tonalide® (AHTN)	GALAB Laboratories, Geesthacht
Summe polybromierte Diphenylether (PBDE) <i>Summe PBDE 28, 47, 99, 100, 153, 154, 183, 209</i>	LfU Augsburg, Ref. 74
Thiabendazol	GALAB Laboratories, Geesthacht

Tab. 1 (Forts.): Untersuchte Schadstoffe und zugehörige Untersuchungslabore

Schadstoff/-klasse Einzelkomponenten	Untersuchungslabor
Lineare Alkylbenzolsulfonate (LAS) ^{*)} <i>C₉- bis C₁₅-Alkylbenzolsulfonat</i>	GALAB Laboratories, Geesthacht
Perfluorierte Tenside (PFT) ^{**)} <i>Perfluorooctansäure (PFOA), Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)</i>	SGS Institut Fresenius, Bayreuth
Triclosan, Methyl-Triclosan ^{***)}	LfU München, Ref. 75

^{*)} analysierte Proben: ausschließlich Vergärungsrückstände

^{**)} analysierte Proben: drei Bioabfallkomposte, ein Vergärungsrückstand, ein Papierfaserkompost

^{***)} analysierte Proben: drei Bioabfallkomposte

Tab. 2: Eingesetzte Analysenverfahren und Bestimmungsgrenzen

Schadstoff/-klasse	Ausgangsmaterial	Extraktionsmittel	Detektion	Bestimmungsgrenze(n) ^{*)}
Schwermetalle <i>Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn</i> <i>Hg</i>	gefriergetrocknet gefriergetrocknet	Königswasser (Feststoffanalyse)	ICP-MS AAS	0,02 – 2 mg/(kg TS) ^{*)} 0,005 mg/(kg TS)
PAK	gefriergetrocknet	Toluol	GC-MS	0,01 – 0,09 mg/(kg TS) ^{*)}
PCDD/F	gefriergetrocknet	Toluol	GC-HRMS	0,02 – 0,5 ng/(kg TS) ^{*)}
Indikator-PCB	gefriergetrocknet	Toluol	GC-HRMS	0,01 – 0,02 µg/(kg TS) ^{*)}
WHO-PCB	gefriergetrocknet	Toluol	GC-HRMS	1 – 10 ng/(kg TS) ^{*)}
Biphenyl	ungetrocknet	Aceton/Wasser	GC-MS	10 µg/(kg TS)
HCB	gefriergetrocknet	Toluol	GC-HRMS	0,01 µg/(kg TS)
PCP	gefriergetrocknet	0,1 M Na ₂ CO ₃	GC-MS	5 µg/(kg TS)
ortho-Phenylphenol	ungetrocknet	Ethylacetat	GC-MS	10 µg/(kg TS)
Bisphenol A	ungetrocknet	tert-Butyl-methyl-ether	GC-MS	10 µg/(kg TS)
DEHP	ungetrocknet	Ethylacetat	GC-MS	0,05 mg/(kg TS)
iso-Nonylphenol	ungetrocknet	Ethylacetat	GC-MS	50 µg/(kg TS)
Zinnorganische Verbindungen	ungetrocknet	Methanol	GC-AED	1 µg Sn/(kg TS)
HHCB, AHTN	ungetrocknet	Toluol	GC-MS	1 µg/(kg TS)
PBDE	gefriergetrocknet	Toluol	GC-MS	0,001 – 0,3 µg/(kg TS) ^{*)}
Thiabendazol	ungetrocknet	Acetonitril	GC-MS	10 µg/(kg TS)
LAS	ungetrocknet	Methanol	LC-MS/MS	50 µg/(kg TS)
PFT	ungetrocknet	Methanol	LC-MS/MS	15 – 27 µg/(kg TS) ^{**)}
Triclosan, Methyl-Triclosan	ungetrocknet	Hexan/Dichlormethan	GC-MS	3 µg/(kg TS)

^{*)} in Abhängigkeit des/der untersuchten Parameters/Komponente

^{**)} in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehalts der untersuchten Probe

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung der Analysenergebnisse erfolgte getrennt nach Bioabfall- (BAK), Grüngutkomposten (GGK) und Vergärungsrückständen (VR), um Tendenzen zwischen den einzelnen Stoffströmen bzw. Behandlungsverfahren zu erkennen.

Die Schadstoffgehalte in den Komposten/Vergärungsrückständen sind grafisch in Form von Boxplots dargestellt. Diese geben statistische Informationen (Lage, Streuung und Schiefe) zur Verteilung der Werte wieder. Dargestellt sind jeweils das

- 25%- bzw. 75%-Quantil als unteres bzw. oberes Ende der Box {Rechteck; mit Median (schwarze Linie) und Mittelwert (Linie in Magenta)} – die Hälfte aller Werte liegen innerhalb der Box –,
- 10%- bzw. 90%-Quantil als unterer bzw. oberer Endpunkt der Whisker (senkrechte Linien) – vier von fünf Werten liegen innerhalb des Whisker-Bereichs –,
- 5%- bzw. 95%-Quantil als unterer bzw. oberer Punkt – neun von zehn Werten liegen zwischen den Punkten –.

Bei den Vergärungsrückständen (fünf Analysewerte) wird nur die Box mit 25%- bzw. 75%-Quantil, Median und Mittelwert dargestellt.

Für die Diskussion der zeitlichen Entwicklung der Schadstoffgehalte in den Komposten über die Untersuchungsjahre sind die Schadstoffgehalte in Form von Minimum, Median, Mittelwert, Maximum und Standardabweichung tabellarisch zusammengefasst; falls die Analysenergebnisse unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze lagen (bei einigen organischen Schadstoffen), werden nur Minimum, Median und Maximum angegeben.

Zur Diskussion der Schadstoffgehalte werden insbesondere die Mediane herangezogen, da diese – im Unterschied zum Mittelwert – weniger empfindlich gegenüber Ausreißern (hier v. a. Maximalwerte) einer Datenreihe sind. Das Lagemaß Median kennzeichnet die Lage einer Datenreihe realistischer. Der Vollständigkeit halber sind die Mittelwerte, die teilweise (bei nicht normalverteilten Datenreihen) deutlich von den Medianen abweichen, in den Abbildungen und Ergebnistabellen mit aufgeführt.

Eine Möglichkeit zu prüfen, ob sich die Mittelwerte zweier Datenreihen statistisch signifikant voneinander unterscheiden, bietet der t-Test für unabhängige Stichproben. Voraussetzungen für dessen Anwendbarkeit sind ein ausreichendes Datenkollektiv (i. d. R. $n \geq 10$) sowie normalverteilte und varianzhomogene Datensätze. Von einer Normalverteilung der Daten wurde ausgegangen, wenn die Abweichung des Medians vom Mittelwert gering war ($< 15\%$). Die Varianzhomogenität wurde anhand des Brown-Forsythe-Tests geprüft. Der t-Test erfolgte paarweise für die Datensätze der unterschiedlichen Kompostqualitäten bzw. Probenahmekampagnen für das Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ mit dem Softwarepaket *Statistica* [9].

3.1 Schwermetalle

Die Schwermetallgehalte in den Proben sind in Abb. 1 den zugehörigen Grenzwerten der Bioabfallverordnung [10] gegenübergestellt. Die statistischen Daten der aktuellen sowie der beiden vorangegangenen Untersuchungen [2, 3] fasst Tab. 3 zusammen.

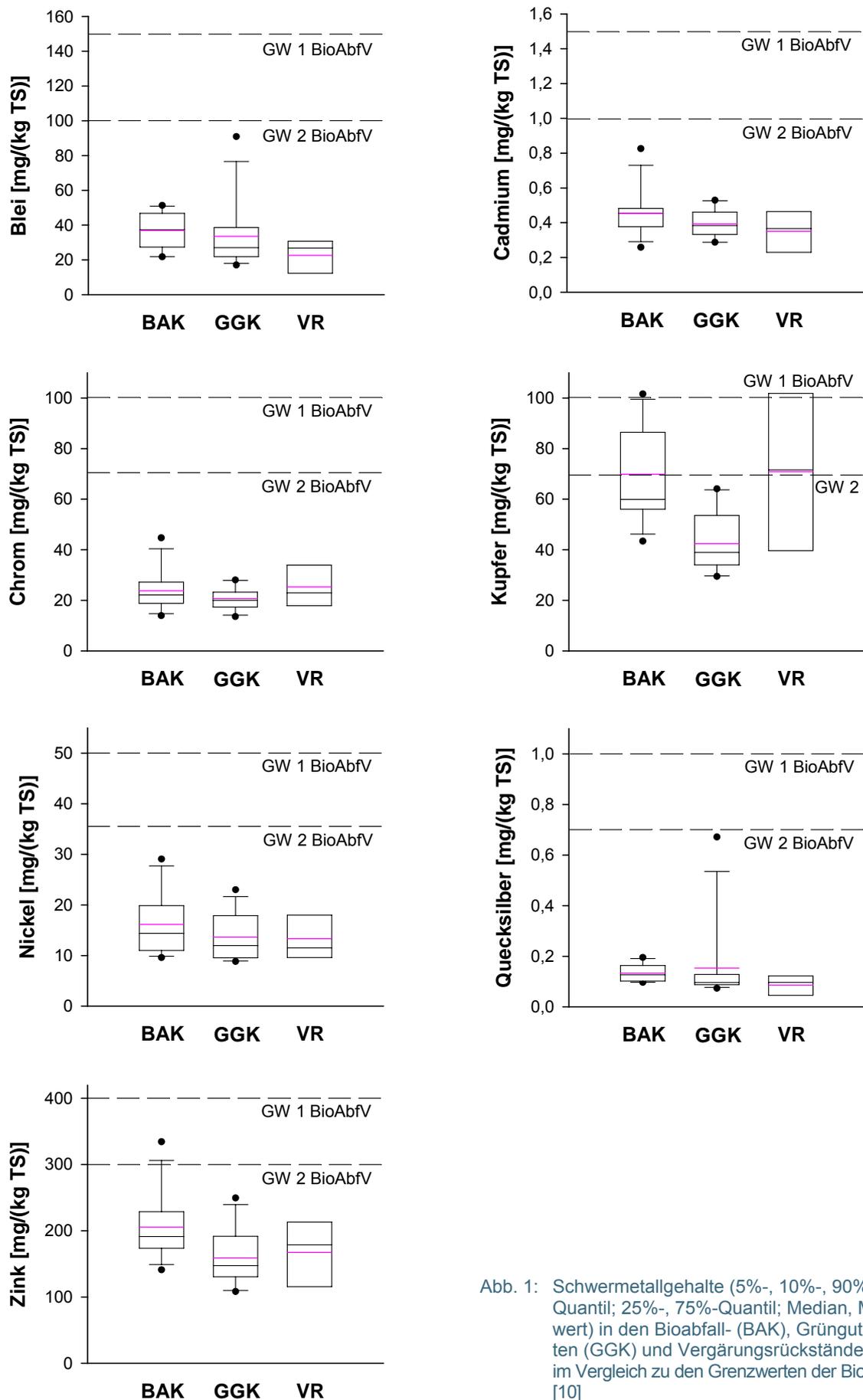


Abb. 1: Schwermetallgehalte (5%-, 10%-, 90%-, 95%-Quantil; 25%-, 75%-Quantil; Median, Mittelwert) in den Bioabfall- (BAK), Grüngutkomposten (GGK) und Vergärungsrückständen (VR) im Vergleich zu den Grenzwerten der BioAbfV [10]

Tab. 3: Schwermetallgehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) in den Bioabfall-, Grüngutkomposten und Vergärungsrückständen im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchungen aus den Jahren 2000 [2] und 2002 [3]; Werte in mg/(kg TS)

	Bioabfallkompost			Grüngutkompost			Vergärungsrückstand
Untersuchungsjahr	2006	2002	2000	2006	2002	2000	2006
Probenanzahl N	12	22	15	12	22	5	5
Blei							
Minimum	21,7	21,6	27,9	17,0	17,2	21,2	4,8
Median	37,4	36,9	44,2	27,0	24,9	23,3	26,8
Mittelwert	36,9	37,3	42,7	33,6	32,3	25,6	22,6
Maximum	51,4	50,2	69,7	90,9	82,8	31,3	33,9
<i>Standardabweichung</i>	10,2	8,2	12,6	19,7	17,4	4,9	11,1
Cadmium							
Minimum	0,259	0,333	0,350	0,287	0,261	0,250	0,146
Median	0,455	0,414	0,430	0,383	0,376	0,320	0,366
Mittelwert	0,454	0,426	0,445	0,393	0,375	0,332	0,351
Maximum	0,826	0,616	0,660	0,529	0,535	0,440	0,481
<i>Standardabweichung</i>	0,136	0,073	0,082	0,081	0,062	0,069	0,132
Chrom							
Minimum	13,9	18,2	20,4	13,5	15,9	20,0	16,6
Median	22,1	23,6	26,2	20,0	22,8	28,0	23,0
Mittelwert	23,8	26,0	27,2	20,7	23,4	26,6	25,3
Maximum	44,7	43,7	41,6	28,0	38,9	35,6	35,8
<i>Standardabweichung</i>	8,1	6,9	6,1	4,5	5,5	6,4	8,3
Kupfer							
Minimum	43,4	34,8	39,2	29,5	25,3	33,1	24,7
Median	59,9	52,5	65,5	38,9	35,9	34,4	71,5
Mittelwert	69,9	71,5	67,9	42,4	38,6	39,6	70,9
Maximum	101,6	223,2	130,0	64,0	72,5	51,8	112,2
<i>Standardabweichung</i>	18,9	46,0	21,6	12,2	11,7	8,2	33,7
Nickel							
Minimum	9,6	9,1	13,5	8,8	10,3	13,4	9,5
Median	14,4	14,9	16,6	12,0	15,2	16,8	11,5
Mittelwert	16,1	16,3	18,5	13,6	16,2	18,5	13,3
Maximum	29,1	25,8	38,5	23,0	31,6	30,8	19,1
<i>Standardabweichung</i>	6,1	4,4	6,7	4,6	4,9	7,2	4,4
Quecksilber							
Minimum	0,097	0,080	0,140	0,073	0,080	0,090	0,030
Median	0,126	0,135	0,170	0,096	0,120	0,130	0,097
Mittelwert	0,133	0,154	0,230	0,153	0,182	0,124	0,086
Maximum	0,195	0,360	0,980	0,671	0,700	0,150	0,122
<i>Standardabweichung</i>	0,033	0,064	0,210	0,168	0,167	0,024	0,040
Zink							
Minimum	141	139	159	108	109	98	88
Median	191	185	175	147	141	124	179
Mittelwert	205	191	195	159	152	126	167
Maximum	334	360	288	249	233	154	218
<i>Standardabweichung</i>	50	46	40	43	33	20	53

Die drei organischen Sekundärrohstoffe weisen für fünf (Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber) der sieben untersuchten Schwermetalle ähnliche, wenig streuende Gehalte auf. Die Werte liegen meist deutlich unter den „schärferen“ Grenzwerten (GW 2) der BioAbfV [10], wenn auch einzelne Werte (z. B. bei Blei, Quecksilber: jeweils ein Grüngutkompost) als Ausreißer diesen recht nahe kommen. Statistisch signifikante Unterschiede zwischen den drei Kompostqualitäten bestehen hinsichtlich der fünf Schwermetalle zwischen den Blei- sowie Quecksilbergehalten der Bioabfallkomposte und der Vergärungsrückstände (Vergärungsrückstände diesbezüglich stets geringer belastet als Bioabfallkom-

poste), obwohl beide Sekundärrohstoffe aus dem „gleichen“ Rohmaterial {(überwiegend) Bioabfälle} erzeugt werden.

Ausnahmen bilden die Schwermetalle Kupfer und Zink. Deren Gehalte liegen in den Grüngutkomposten statistisch signifikant niedriger als in den Bioabfallkomposten, was auch bei den vorangegangenen Untersuchungen der Fall war. Da bei der Kompostierung den Bioabfällen aus verfahrenstechnischen Gründen (bessere Durchlüftung des Haufwerks) i. d. R. Grüngut als Strukturmaterial untergemischt wird, müssen die Bioabfälle bzw. die in ihnen enthaltenen Störstoffe (Fehlwürfe) demnach deutlich stärker mit Kupfer und Zink belastet sein als Grüngut (immissionsbedingte Schwermetallgehalte). In [11] wurde für die im Restmüll enthaltenen Bioabfälle (Fraktion *Organik*: größtenteils Küchenabfälle) ein „typischer“ Kupfergehalt von 17 mg/(kg TS) und Zinkgehalt von 54 mg/(kg TS) (jeweils Medianwerte von 16 analysierten Proben) ermittelt.

Bei Kupfer überschreiten fünf (von zwölf) Bioabfallkomposten den niedrigeren {GW 2_{Cu} : 70 mg/(kg TS)}, und einer davon auch den höheren Grenzwert {GW 1_{Cu} : 100 mg/(kg TS)} [10]; bei den Vergärungsrückständen können drei der fünf untersuchten Proben den niedrigeren und eine davon auch den höheren Grenzwert nicht einhalten. Der Papierfaserkompost lag bei Kupfer deutlich oberhalb des niedrigeren und erreichte fast den höheren Grenzwert. Die hohen Kupfergehalte in Bioabfallkomposten und Vergärungsrückständen {Mediane: 59,9 mg/(kg TS) bzw. 71,5 mg/(kg TS)} lassen sich nicht ausschließlich durch den Kupfergehalt im Ausgangsmaterial Bioabfälle erklären, auch wenn sich die Schwermetalle aufgrund des mikrobiellen Abbaus organischer Substanz bei der Kompostierung bzw. Vergärung verfahrensbedingt im Substrat anreichern. Vielmehr könnte z. B. auch ein möglicher Kupfereintrag bei der Bioabfallbehandlung Ursache für die Belastungen der Sekundärrohstoffe sein. Bei Zink trat eine Grenzwertüberschreitung auf {GW 2_{Zn} : 300 mg/(kg TS); ein Bioabfallkompost}. Ähnlich wie beim Kupfer können auch die hohen Zinkgehalte in den Bioabfall-, Grüngutkomposten und Vergärungsrückständen {Mediane: 191 mg/(kg TS), 147 mg/(kg TS) bzw. 179 mg/(kg TS)} nicht allein durch die unterschiedlichen Zinkgehalte in den verschiedenen Inputmaterialien erklärt werden; wahrscheinlicher erscheint ein verfahrensbedingter Zinkeintrag während der Kompostierung/Vergärung. Die gegenüber den Grüngutkomposten höheren Belastungen der Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände sind inputbedingt durchaus plausibel.

Bei den Komposten (Bioabfall-, Grüngutkomposte) lässt sich kein deutlicher zeitlicher Trend der Schwermetallbelastung erkennen. Die Quecksilbergehalte scheinen in beiden Kompostarten leicht rückläufig zu sein, ebenso die Chrom- und Nickelgehalte in den Grüngutkomposten; hierbei ist zu beachten, dass die statistischen Daten für die Grüngutkomposte aus der Untersuchung im Jahr 2000 mit fünf untersuchten Proben beschränkt belastbar sind. Außer bei den Chromgehalten in den Grüngutkomposten der Jahre 2000 und 2006 waren keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der drei Kompostuntersuchungen [2, 3] belegbar.

3.2 Organische Schadstoffe

Für verschiedene organische Schadstoffgruppen (PAK, PCDD/F, Indikator-, WHO-PCB, PBDE) werden der Übersichtlichkeit wegen und wie in der (Fach-)Literatur üblich die Summengehalte angegeben; hierbei bleiben Einzelkomponenten, deren Gehalte unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze liegen, aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den früheren Untersuchungen unberücksichtigt. Die dadurch in Kauf genommene, tendenzielle Unterschätzung des „wahren“ Schadstoffgehalts ist vernachlässigbar, da bei den untersuchten Proben/Schadstoffgruppen aufgrund der eingesetzten hochauflösenden Analyseverfahren i. d. R. nur wenige analysierte Stoffe die Bestimmungsgrenze nicht erreichen.

Die Verteilungen der organischen Schadstoffgehalte in den Kompost- und Vergärungsrückstandsproben sind für die Schadstoffe dargestellt (siehe Abb. 2), deren Gehalte in allen untersuchten Proben oberhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze waren.

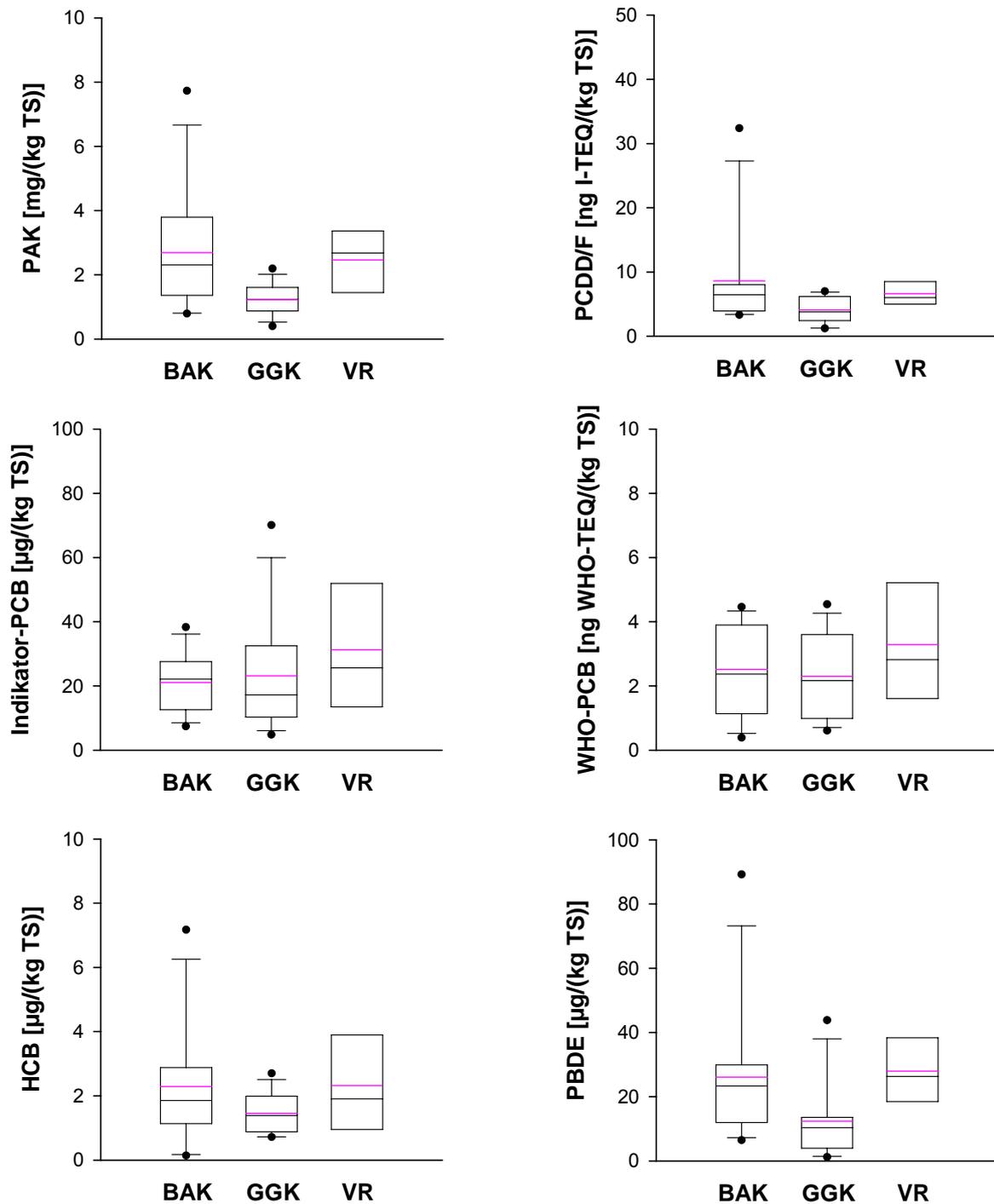


Abb. 2: Gehalte (5%-, 10%-, 90%-, 95%-Quantil; 25%-, 75%-Quantil; Median, Mittelwert) an PAK, PCDD/F, Indikator-, WHO-PCB, HCB und PBDE in den Bioabfall- (BAK), Grüngutkomposten (GGK) und Vergärungsrückständen (VR)

Die Tab. 4 und 5 enthalten die statistischen Daten der Gehalte an organischen Schadstoffen, die in den aktuell untersuchten Proben (zumindest teilweise) nachgewiesen und bestimmt werden konnten; zum Vergleich wurden diese Daten den entsprechenden Werten der vorangegangenen Untersuchungen [2, 3] gegenübergestellt.

Tab. 4: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an PAK, PCDD/F, Indikator-, WHO-PCB, Biphenyl, HCB, PCP und ortho-Phenylphenol in den Bioabfall-, Grüngutkomposten und Vergärungsrückständen im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchungen aus den Jahren 2000 [2] und 2002 [3]; n. b.: nicht bestimmt

	Bioabfallkompost			Grüngutkompost			Vergärungsrückstand
Untersuchungsjahr	2006	2002	2000	2006	2002	2000	2006
Probenanzahl N	12	22 ^{*)}	15	12	22 ^{*)}	5	5
Summe PAK [mg/(kg TS)]							
Minimum	0,79	1,12	1,41	0,40	1,02	1,69	0,34
Median	2,31	2,05	3,18	1,23	1,84	2,32	2,68
Mittelwert	2,69	2,50	3,86	1,22	2,20	2,32	2,46
Maximum	7,73	5,83	10,20	2,19	5,90	2,95	3,89
Standardabweichung	1,95	1,15	2,20	0,48	1,18	0,51	1,30
Summe PCDD/F [ng I-TEQ/(kg TS)]							
Minimum	3,33	4,36	8,63	1,22	5,05	3,70	4,82
Median	6,47	7,95	11,30	3,78	9,24	9,61	6,00
Mittelwert	8,63	9,19	12,46	4,11	9,09	8,84	6,61
Maximum	32,40	26,07	29,70	6,99	14,73	12,60	10,60
Standardabweichung	8,18	4,61	5,40	1,95	2,90	3,42	2,32
Summe Indikator-PCB [µg/(kg TS)]							
Minimum	7,4	9,9	15,0	4,8	16,5	19,0	4,6
Median	22,2	32,2	43,0	17,2	27,0	29,0	25,6
Mittelwert	21,1	34,7	64,7	23,1	41,0	31,8	31,3
Maximum	38,3	73,5	196,0	70,1	178,9	56,0	66,5
Standardabweichung	9,0	17,3	54,0	17,9	36,0	14,8	22,9
Summe WHO-PCB [ng WHO-TEQ/(kg TS)]							
Minimum	0,39	0,95	n. b.	0,61	2,15	n. b.	0,54
Median	2,37	2,61	n. b.	2,17	2,87	n. b.	2,82
Mittelwert	2,52	2,87	n. b.	2,30	4,22	n. b.	3,29
Maximum	4,46	5,78	n. b.	4,54	14,17	n. b.	5,65
Standardabweichung	1,40	1,34	n. b.	1,29	3,52	n. b.	2,00
Biphenyl [µg/(kg TS)]							
Minimum	< 10	n. b.	31	< 10	n. b.	24	< 10
Median	< 10	n. b.	79	< 10	n. b.	45	< 10
Mittelwert	n. b.	n. b.	82	< 10	n. b.	52	n. b.
Maximum	17	n. b.	144	< 10	n. b.	93	11
Standardabweichung	n. b.	n. b.	37	n. b.	n. b.	29	n. b.
HCB [µg/(kg TS)]							
Minimum	0,1	n. b.	< 1,0	0,7	n. b.	2,0	0,6
Median	1,9	n. b.	4,0	1,4	n. b.	2,0	1,9
Mittelwert	2,3	n. b.	n. b.	1,5	n. b.	3,0	2,3
Maximum	7,2	n. b.	13,0	2,7	n. b.	6,0	5,2
Standardabweichung	1,9	n. b.	n. b.	0,6	n. b.	1,7	1,8
PCP [µg/(kg TS)]							
Minimum	< 5	n. b.	4	< 5	n. b.	1	< 5
Median	15	n. b.	9	< 5	n. b.	6	15
Mittelwert	n. b.	n. b.	14	n. b.	n. b.	5	n. b.
Maximum	37	n. b.	41	25	n. b.	9	29
Standardabweichung	n. b.	n. b.	11	n. b.	n. b.	3	n. b.
ortho-Phenylphenol [µg/(kg TS)]							
Minimum	< 10	n. b.	10	< 10	n. b.	20	< 10
Median	< 10	n. b.	30	< 10	n. b.	20	11
Mittelwert	n. b.	n. b.	38	< 10	n. b.	28	n. b.
Maximum	21	n. b.	120	< 10	n. b.	40	293
Standardabweichung	n. b.	n. b.	28	n. b.	n. b.	11	n. b.

^{*)} Summe WHO-PCB: 11 Proben

Tab. 5: Gehalte (Minimum, Median, Mittelwert, Maximum, Standardabweichung) an Bisphenol A, DEHP, iso-Nonylphenol, Monobutyl-, -oktylzinn, HHCB, AHTN und PBDE in den Bioabfall-, Grüngutkomposten und Vergärungsrückständen im Vergleich zu den Daten der vorangegangenen Untersuchungen aus den Jahren 2000 [2] und 2002 [3]; n. b.: nicht bestimmt

	Bioabfallkompost			Grüngutkompost			Vergärungsrückstand
Untersuchungsjahr	2006	2002	2000	2006	2002	2000	2006
Probenanzahl N	12	11 ^{*)}	15	12	11 ^{*)}	5	5
Bisphenol A [µg/(kg TS)]							
Minimum	< 10	< 10	n. b.	< 10	< 10	n. b.	23
Median	336,5	105	n. b.	10,5	< 10	n. b.	563
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	1.193
Maximum	990	646	n. b.	43	59	n. b.	2.860
Standardabweichung	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	1.276
DEHP [mg/(kg TS)]							
Minimum	< 0,05	0,05	< 0,50	< 0,05	0,01	< 0,50	0,29
Median	1,15	0,15	2,30	0,20	0,09	2,10	1,76
Mittelwert	n. b.	0,49	n. b.	n. b.	0,12	n. b.	2,31
Maximum	2,69	2,38	20,90	0,55	0,25	6,60	4,75
Standardabweichung	n. b.	0,72	n. b.	n. b.	0,08	n. b.	1,91
iso-Nonylphenol [µg/(kg TS)]							
Minimum	< 50	83	n. b.	< 50	57	n. b.	< 50
Median	153,5	680	n. b.	< 50	147	n. b.	324
Mittelwert	n. b.	882	n. b.	n. b.	205	n. b.	n. b.
Maximum	331	2.580	n. b.	87	772	n. b.	421
Standardabweichung	n. b.	784	n. b.	n. b.	210	n. b.	n. b.
Monobutylzinn [µg Sn/(kg TS)]							
Minimum	< 1	< 1	n. b.	< 1	< 1	n. b.	3,4
Median	4,3	2,8	n. b.	< 1	< 1	n. b.	6,8
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	10,2
Maximum	8,6	5,8	n. b.	6,4	1,8	n. b.	19,7
Standardabweichung	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	7,7
Monooktylzinn [µg Sn/(kg TS)]							
Minimum	< 1	< 1	n. b.	< 1	< 1	n. b.	< 1
Median	< 1	< 1	n. b.	< 1	< 1	n. b.	4,8
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	< 1	< 1	n. b.	n. b.
Maximum	5,8	15,4	n. b.	< 1	< 1	n. b.	10,6
Standardabweichung	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
HHCB [µg/(kg TS)]							
Minimum	< 1	n. b.	n. b.	< 1	n. b.	n. b.	14,7
Median	13,7	n. b.	n. b.	1,5	n. b.	n. b.	62,2
Mittelwert	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	48,4
Maximum	46,3	n. b.	n. b.	5,5	n. b.	n. b.	69,8
Standardabweichung	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	25,4
AHTN [µg/(kg TS)]							
Minimum	3,6	n. b.	n. b.	< 1	n. b.	n. b.	6,1
Median	8,7	n. b.	n. b.	2,1	n. b.	n. b.	9,2
Mittelwert	9,2	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	10,0
Maximum	16,1	n. b.	n. b.	7,7	n. b.	n. b.	16,8
Standardabweichung	3,8	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	4,3
Summe PBDE [µg/(kg TS)]							
Minimum	6,5	n. b.	n. b.	1,2	n. b.	n. b.	17,9
Median	23,4	n. b.	n. b.	10,4	n. b.	n. b.	26,3
Mittelwert	26,1	n. b.	n. b.	12,4	n. b.	n. b.	28,0
Maximum	89,2	n. b.	n. b.	43,8	n. b.	n. b.	41,4
Standardabweichung	21,9	n. b.	n. b.	11,8	n. b.	n. b.	10,2

^{*)} Summe PBDE: 5 Proben

3.2.1 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Die PAK-Gehalte aller drei Sekundärrohstoffe liegen im einstelligen mg/kg-Bereich und damit im Vergleich zu den anderen untersuchten organischen Schadstoffen um Größenordnungen höher. Die Konzentrationen in den Bioabfallkomposten und Vergärungsrückständen erreichten Werte bis knapp über 4 mg/(kg TS); ein Bioabfallkompost streute mit einem Gehalt knapp unter 8 mg/(kg TS). Die Grüngutkomposte wiesen etwas niedrigere Konzentrationen bis knapp über 2 mg/(kg TS) auf. Ein statistisch signifikanter Unterschied lag zwischen den Gehalten in den Grüngutkomposten und den Vergärungsrückständen vor. Dies spricht dafür, dass über die Bioabfälle bzw. die in ihnen enthaltenen Störstoffe mehr PAK in das Substrat eingetragen werden als über das Grüngut (i. d. R. immissionsbedingte Belastung). Allein durch Schadstoffeintrag über das Ausgangsmaterial und -anreicherung aufgrund des Abbaus organischer Bestandteile lassen sich die ermittelten PAK-Konzentrationen {Median Bioabfallkompost: 2,31 mg/(kg TS), Grüngutkompost: 1,23 mg/(kg TS), Vergärungsrückstand: 2,68 mg/(kg TS)} zumindest für die Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände nicht erklären: hierfür sind die „typischen“ Gehalte im Bioabfall aus Restmüll mit 0,32 mg/(kg TS) (Median von 15 Analysen, [11]) zu gering.

Die Ergebnisse der aktuellen Beprobungen bestätigen die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen [2, 3]. Die Gehalte in den Bioabfallkomposten scheinen sich auf einem im Vergleich zu den Grüngutkomposten geringfügig höheren Niveau einzupendeln, während die Grüngutkompostgehalte statistisch signifikant (Vergleich Datensätze 2000 / 2006) rückläufig sind.

Die ermittelten PAK-Gehalte stimmen mit den Werten älterer Untersuchungen überein; die Belastungen scheinen in der Reihenfolge Grüngutkompost < Bioabfallkompost < Vergärungsrückstand tendenziell leicht anzusteigen. So ergab eine Auswertung von 25 Untersuchungen verschiedener Arbeitsgruppen aus den Jahren 1990 bis 2003 [5] – darunter auch die beiden früheren LfU-Untersuchungen der Jahre 2000 [2] und 2002 [3] – für Bioabfallkomposte (Probenanzahl N = 78) einen Median von 1,92 mg/(kg TS) und für Grüngutkomposte (N = 23) von 1,72 mg/(kg TS). Eine (Doppel-)Beprobung von zehn Bioabfall-, drei Grüngutkompostierungsanlagen und drei Vergärungsanlagen in Baden-Württemberg im Herbst 2005 und Frühjahr 2006 [4] lieferte etwas höhere Werte: bei den untersuchten Bioabfallkomposten (N = 19) lag der Median bei 2,66 mg/(kg TS), bei den Grüngutkomposten (N = 5) bei 2,03 mg/(kg TS); die Vergärungsrückstände (N = 5) wiesen einen relativ hohen Median von 3,50 mg/(kg TS) auf.

3.2.2 Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)

Hinsichtlich der PCDD/F zeigen die Grüngutkomposte insgesamt eine etwas geringere Belastung als die Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände. In den Bioabfallkomposten lag die Mehrzahl der PCDD/F-Gehalte in einem Bereich von 3 ng I-TEQ/(kg TS) bis 8 ng I-TEQ/(kg TS), zwei „Ausreißer“ mit 15 ng I-TEQ/(kg TS) bzw. 32 ng I-TEQ/(kg TS) allerdings deutlich darüber. Die PCDD/F-Gehalte in den Grüngutkomposten und Vergärungsrückständen erreichten Werte bis 7 ng I-TEQ/(kg TS), ein Vergärungsrückstand knapp 11 ng I-TEQ/(kg TS). Wie bei den PAK unterschieden sich Grüngutkomposte und Vergärungsrückstände in ihren PCDD/F-Konzentrationen statistisch signifikant. Weder dieser Umstand noch die Höhe der PCDD/F-Gehalte in den Bioabfallkomposten und Vergärungsrückständen {Mediane: 6,5 ng I-TEQ/(kg TS) bzw. 6,0 ng I-TEQ/(kg TS)} lassen sich durch die Belastung des Rohmaterials erklären: in [11] wurde der Median für die PCDD/F-Konzentration in Bioabfällen (10 untersuchte Proben) zu 0,4 ng I-TEQ/(kg TS) angegeben. Dieser deutliche Anstieg der PCDD/F-Belastung während der Kompostierung (I-TEQ-Zunahme entweder durch Neubildung oder Dechlorierung von PCDD/F) stimmt mit den Ergebnissen der Literaturstudie [5] überein und scheint bei der Kompostierung von Grüngut nicht ganz so ausgeprägt zu sein {Median Grüngutkompost: 3,8 ng I-TEQ/(kg TS)}.

Der zeitliche Vergleich der PCDD/F-Gehalte scheint sowohl bei den Bioabfall- als auch bei den Grüngutkomposten eine Abnahme der Konzentrationen über den Betrachtungszeitraum erkennen zu las-

sen. Insbesondere die aktuelle Grüngutkompostbelastung liegt statistisch signifikant niedriger als in den Jahren 2000 [2] und 2002 [3].

Die Auswertung der Ergebnisse verschiedener Arbeitsgruppen aus den Jahren 1990 bis 2003 [5] bestätigt die gegenüber den Bioabfallkomposten niedrigeren Gehalte in den Grüngutkomposten sowie das höhere Konzentrationsniveau früherer Untersuchungen. Mit Medianen von 9,6 ng I-TEQ/(kg TS) für die Bioabfallkomposte (N = 124) bzw. von 8,5 ng I-TEQ/(kg TS) für die Grüngutkomposte (N = 61) [5] liegen die Werte eher in den in den Jahren 2000 [2] und 2002 [3] ermittelten Bereichen. Die aktuellen Konzentrationen sind insbesondere bei den Grüngutkomposten deutlich niedriger.

3.2.3 Polychlorierte Biphenyle (Indikator- und WHO-PCB)

Indikator-PCB

Die Gehalte an den Indikator-PCB unterscheiden sich in den untersuchten Kompostqualitäten geringfügig. In allen drei Sekundärrohstoffen waren die Konzentrationen unter 40 µg/(kg TS); Ausnahmen bilden ein Grüngutkompost sowie ein Vergärungsrückstand, deren Gehalte bei (knapp) 70 µg/(kg TS) lagen. Den höchsten Gehalt an Indikator-PCB wies mit 88 µg/(kg TS) der untersuchte Papierfaserkompost auf. Im Unterschied zu den PAK und PCDD/F lagen die PCB-Konzentrationen {Median Bioabfallkompost: 22,2 µg/(kg TS), Grüngutkompost: 17,2 µg/(kg TS), Vergärungsrückstand: 25,6 µg/(kg TS)} im Bereich des für Bioabfälle ermittelten Medians (sieben untersuchte Proben) von 19,0 µg/(kg TS) [11].

Hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs zeigen die Indikator-PCB einen ähnlichen Rückgang der Gehalte in beiden Kompostarten wie die PCDD/F. Statistisch signifikant ist insbesondere die Konzentrationsabnahme bei Bioabfallkomposten seit dem Jahr 2002 [3].

Die Auswertung älterer Untersuchungen [5] weist für die Bioabfallkomposte {N = 124; Median: 39,8 µg/(kg TS)} höhere Indikator-PCB-Gehalte aus als für die Grüngutkomposte {N = 55; Median: 30,6 µg/(kg TS)}. Dieser Umstand und auch die jeweiligen Konzentrationsniveaus entsprechen den Untersuchungsergebnissen aus den Jahren 2000 [2] und 2002 [3]. Die aktuellen, deutlich niedrigeren Werte werden in ihrer Höhe teilweise durch die baden-württembergischen Ergebnisse {Median Bioabfallkompost (N = 19): 33,4 µg/(kg TS), Grüngutkompost (N = 5): 20,8 µg/(kg TS), Vergärungsrückstand (N = 5): 31,9 µg/(kg TS) [4]} bestätigt; der weit verbreitete Trend einer gegenüber den Grüngutkomposten höheren Belastung der Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände scheint auch bei den Indikator-PCB zu bestehen.

WHO-PCB

Auch die Gehalte an WHO-PCB differieren zwischen den Kompostqualitäten kaum. Es wurden Maximalwerte von 4,5 ng WHO-TEQ/(kg TS) (Komposte) bzw. 5,7 ng WHO-TEQ/(kg TS) (Vergärungsrückstände) ermittelt; die Mediane lagen bei 2,4 ng WHO-TEQ/(kg TS) für Bioabfallkomposte, 2,2 ng WHO-TEQ/(kg TS) bei Grüngutkomposten sowie 2,8 ng WHO-TEQ/(kg TS) für Vergärungsrückstände.

Für die Diskussion der zeitlichen Entwicklung der jeweiligen Belastungen mit WHO-PCB stehen Werte ab der Untersuchung 2002 [3] zur Verfügung. Die Gehalte sind leicht rückläufig, statistisch abgesicherte Trends lassen sich nicht feststellen.

3.2.4 Biphenyl

Das Fungizid Biphenyl wird hauptsächlich zur Behandlung von Zitrusfrüchten eingesetzt.

Biphenyl ist in den untersuchten Komposten/Vergärungsrückständen kaum enthalten; es wurde in drei der insgesamt 30 untersuchten Proben gefunden: die Gehalte lagen in zwei Bioabfallkomposten mit 15 bzw. 17 µg/(kg TS) und in einem Vergärungsrückstand mit 11 µg/(kg TS) knapp oberhalb der Be-

stimmungsgrenze von 10 µg/(kg TS). In den Grüngutkomposten konnte kein Biphenyl bestimmt werden. Dementsprechend lagen die Mediane für alle drei „Kompostarten“ bei < 10 µg/(kg TS).

Bei den beiden früheren Untersuchungen wurden die Proben im Jahr 2000 auf Biphenyl analysiert. Für die 15 untersuchten Bioabfallkomposte wurden Konzentrationen zwischen 31 µg/(kg TS) und 144 µg/(kg TS), für die fünf Grüngutkomposte Konzentrationen von 24 µg/(kg TS) bis 93 µg/(kg TS) ermittelt [2]. Inwieweit dieser offensichtliche Rückgang der Biphenylbelastung um eine Größenordnung innerhalb von sechs Jahren der Wirklichkeit entspricht oder eine Folge der Analytik in unterschiedlichen Analysenlabors ist, bleibt offen.

Zwei der 25 ausgewerteten Untersuchungen verschiedener Arbeitsgruppen aus den Jahren 1990 bis 2003 in [5] enthielten Daten zu Biphenyl: der Median von insgesamt 28 untersuchten Komposten – darunter die 15 Bioabfall- und fünf Grüngutkomposte der LfU-Untersuchung des Jahres 2000 [2] – lag, ohne weiter nach der Kompostart zu differenzieren, bei 48,5 µg/(kg TS).

3.2.5 Hexachlorbenzol (HCB)

Hexachlorbenzol (HCB) ist ein Ausgangsprodukt für die Herstellung chlororganischer Verbindungen, es wurde in Deutschland bis in die 1970er Jahre intensiv als Fungizid bei der Saatbeize eingesetzt und wird insbesondere bei Verbrennungs- und metallurgischen Prozessen gebildet. HCB gehört wie die PCDD/F und PCB zu den POP (persistent organic pollutants) der Stockholmer Konvention Anhang A (Produktionsstopp, Import/Export-Verbot) [12].

Die HCB-Gehalte in den drei Sekundärrohstoffen sind vergleichbar: die Werte lagen in den Bioabfallkomposten i. d. R. unter 3 µg/(kg TS) {zwei „höhere“ Belastungen mit 4,1 µg/(kg TS) und 7,2 µg/(kg TS)}, in den Grüngutkomposten bis knapp über 2 µg/(kg TS) {ein „erhöhter“ Wert mit 2,7 µg/(kg TS)} und bei den Vergärungsrückständen bis 2,6 µg/(kg TS) {ein „erhöhter“ Wert mit 5,2 µg/(kg TS)}. Die Mediane ergaben sich zu jeweils 1,9 µg/(kg TS) für Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände sowie 1,4 µg/(kg TS) für Grüngutkomposte.

Die Ergebnisse aus der Untersuchung im Jahr 2000 zeigten Werte bis 13 µg/(kg TS) bei den Bioabfallkomposten und 6 µg/(kg TS) bei den Grüngutkomposten und waren damals geringfügig höher [2].

Die aktuellen Werte stimmen mit dem Median der Auswertung der Literaturstudie [5] (N = 142) von 1,2 µg/(kg TS) (Median ohne Differenzierung nach Kompostart) überein. Demgegenüber zeigten die aktuellen Untersuchungen in Baden-Württemberg [4] etwas höhere HCB-Belastungen bei den Bioabfallkomposten {N = 19; Median: 2,9 µg/(kg TS)} und Vergärungsrückständen {N = 5; Median: 3,8 µg/(kg TS)} sowie leicht geringere Konzentrationen bei den Grüngutkomposten {N = 5; Median: 0,8 µg/(kg TS)}.

3.2.6 Pentachlorphenol (PCP)

Pentachlorphenol (PCP) als weitere Organochlorverbindung ist ein Holzschutzmittel mit fungiziden und bakteriziden Eigenschaften.

Hinsichtlich PCP weisen Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände höhere Gehalte auf als Grüngutkomposte. Von den zwölf untersuchten Bioabfallkomposten waren vier Proben unter der Bestimmungsgrenze für PCP von 5 µg/(kg TS); bei sechs Proben wurden Gehalte bis zu 21 µg/(kg TS) ermittelt, die restlichen zwei lagen darüber {29 µg/(kg TS) und 37 µg/(kg TS)}. Die Grüngutkomposte zeigen ein niedrigeres Konzentrationsniveau: sieben Proben mit Gehalten unter der Bestimmungsgrenze, vier Komposte mit Werten bis 14 µg/(kg TS), Maximalwert bei 25 µg/(kg TS). Die Gehalte in den Vergärungsrückständen wiesen eine Bandbreite von unter Bestimmungsgrenze (zwei Proben) bis 29 µg/(kg TS) auf. Mit Medianen von jeweils 15 µg/(kg TS) für Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände sowie < 5 µg/(kg TS) für Grüngutkomposte lagen die Gehalte unter der für Bioabfälle aus dem Restmüll ermittelten Belastung (Median: 23 µg/(kg TS) [11] bei neun untersuchten Proben). Der PCP-

Eintrag über die Bioabfälle in den Kompost macht die deutlich niedrigeren Gehalte in den Grüngutkomposten plausibel.

Vergleichswerte liegen aus der Untersuchung des Jahres 2000 vor. Die damaligen Daten sind den aktuellen Werten ähnlich: Bioabfallkomposte wiesen Gehalte zwischen 4 µg/(kg TS) und 41 µg/(kg TS), Grüngutkomposte von 1 µg/(kg TS) bis 9 µg/(kg TS) auf [2].

Der Übersichtsbeitrag [5] nennt, ohne nach der Kompostart zu differenzieren, einen Medianwert von 14 µg/(kg TS) (N = 100), der mit den aktuellen Untersuchungsergebnissen zumindest für die Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände gut übereinstimmt.

3.2.7 ortho-Phenylphenol

Ortho-Phenylphenol ist ein Zitrusfungizid.

Bei ortho-Phenylphenol liegen ähnliche Verhältnisse wie bei Biphenyl vor: in der Mehrzahl der Proben (23 von 30: neun Bioabfallkomposte, alle Grüngutkomposte, zwei Vergärungsrückstände) konnte kein ortho-Phenylphenol bestimmt werden {Bestimmungsgrenze: 10 µg/(kg TS)}. In den drei restlichen Bioabfallkomposten wurden geringe Gehalte bis 21 µg/(kg TS) ermittelt, ebenso in einem Vergärungsrückstand {11 µg/(kg TS)}. Die anderen beiden Vergärungsrückstände wiesen mit knapp 200 µg/(kg TS) bzw. 300 µg/(kg TS) vergleichsweise hohe Gehalte auf. Die Mediane lagen somit bei den Bioabfall- und Grüngutkomposten bei < 10 µg/(kg TS) sowie bei den Vergärungsrückständen bei 11 µg/(kg TS).

Die bei der Kompostuntersuchung [2] ermittelten Gehalte an ortho-Phenylphenol lagen etwas höher als bei der aktuellen Untersuchung. Für die Bioabfallkomposte wurde ein Bereich von 10 µg/(kg TS) bis 120 µg/(kg TS), für die Grüngutkomposte Werte zwischen 20 µg/(kg TS) und 40 µg/(kg TS) ermittelt [2].

Da in die Auswertung von [5] hauptsächlich die 20 Analysenergebnisse der Kompostuntersuchung aus dem Jahr 2000 [2] eingingen, spiegelt der dort angegebene Median (für alle Kompostarten) mit 20 µg/(kg TS) (N = 28, aus zwei ausgewerteten Untersuchungen) die damalige Belastung wider und überschreitet die aktuellen Werte {Median Bioabfall-, Grüngutkompost: jeweils < 10 µg/(kg TS); Vergärungsrückstand: 11 µg/(kg TS)}.

3.2.8 Bisphenol A

Bisphenol A ist als Grundchemikalie der chemischen Industrie ein Ausgangsprodukt für die Kunststoffherstellung, insbesondere die Produktion von Polycarbonaten, Epoxidharzen und Phenoplasten. Bisphenol A ist endokrin wirksam.

Die Gehalte an Bisphenol A zeigen bei den Bioabfallkomposten und Vergärungsrückständen eine sehr große Bandbreite (größer zwei Größenordnungen). Die Proben beider Sekundärrohstoffe wiesen Konzentrationen i. d. R. bis 570 µg/(kg TS) auf {darunter zwei Bioabfallkomposte unter der Bestimmungsgrenze von 10 µg/(kg TS)}, jeweils zwei Proben lagen noch deutlich höher {Bioabfallkomposte: über 800 µg/(kg TS) bzw. knapp 1.000 µg/(kg TS); Vergärungsrückstände: 2.250 µg/(kg TS) bzw. 2.860 µg/(kg TS)}. Demgegenüber waren die Grüngutkomposte wesentlich geringer mit Bisphenol A belastet: bei der Hälfte aller Proben konnten keine Gehalte bestimmt werden {< 10 µg/(kg TS)}, die andere Hälfte wies Konzentrationen bis knapp über 40 µg/(kg TS) auf. Dementsprechend unterschieden sich die ermittelten Mediane deutlich voneinander: zwischen dem niedrigsten {Grüngutkompost: 10,5 µg/(kg TS)} und dem höchsten Median {Vergärungsrückstand: 563 µg/(kg TS)} liegt der Faktor 54 {Median Bioabfallkompost: 336,5 µg/(kg TS)}.

Die Kompostbeprobung des Jahres 2002 lieferte ähnliche Ergebnisse: bei den Bioabfallkomposten eine sehr große Bandbreite mit Werten von unter Bestimmungsgrenze {< 10 µg/(kg TS)} bis knapp

650 µg/(kg TS); bei den Grüngutkomposten wesentlich geringere Konzentrationen: eine von elf Proben wies einen Gehalt {59 µg/(kg TS)} über der Bestimmungsgrenze auf [3].

3.2.9 Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP)

Di-(2-ethylhexyl)-phthalat (DEHP) ist einer der am häufigsten verwendeten Weichmacher (z. B. Einsatz in Weich-PVC) aus der Klasse der Phthalsäureester. Des Weiteren wird es u. a. in Farben und Lacken, Klebstoffen, Dichtmassen und Fußbodenbelägen verwendet. DEHP ist eine endokrin wirksame Substanz.

Die DEHP-Gehalte in den Komposten/Vergärungsrückständen zeigen eine große Bandbreite. Bei den Bioabfallkomposten reichten die Werte von kleiner Bestimmungsgrenze {< 0,05 mg/(kg TS), eine Probe} bis knapp 2,7 mg/(kg TS). Die Gehalte in den Grüngutkomposten lagen insgesamt deutlich niedriger, i. d. R. unter 0,38 mg/(kg TS) {darunter eine Probe unter der Bestimmungsgrenze}; bei zwei Grüngutkomposten wurden Konzentrationen um 0,55 mg/(kg TS) ermittelt. Die höchsten DEHP-Belastungen der drei „Komposte“ (Bioabfall-, Grüngutkompost, Vergärungsrückstand) wurden bei den Vergärungsrückständen gefunden: drei Rückstände wiesen Gehalte bis 1,8 mg/(kg TS) auf, die beiden restlichen lagen bei 3,8 mg/(kg TS) bzw. 4,8 mg/(kg TS). Die zugehörigen Mediane betragen 1,15 mg/(kg TS) bei den Bioabfallkomposten, 0,20 mg/(kg TS) bei den Grüngutkomposten sowie 1,76 mg/(kg TS) bei den Vergärungsrückständen. Mit 12,5 mg/(kg TS) wies der untersuchte Papierfaserkompost nahezu das Dreifache des in den Vergärungsrückständen ermittelten Maximalgehalts auf.

Der Vergleich der DEHP-Gehalte aus der aktuellen Untersuchung mit den Werten aus den vorangegangenen Beprobungen wird dadurch erschwert, dass die Analytik im Jahr 2000 von einem anderen Analysenlabor durchgeführt wurde als in den Jahren 2002 und 2006. So liegen z. B. die Mediane im Jahr 2000 um den Faktor 15 (Bioabfallkomposte) bzw. 23 (Grüngutkomposte) höher als zwei Jahre später [2, 3]. Andererseits zeigen auch die Werte aus dem gleichen Analysenlabor (Vergleich Datensätze 2002 / 2006) teilweise deutliche Unterschiede (Bioabfallkomposte: Faktor 8, bezogen auf die jeweiligen Mediane). Dies legt zumindest bei den Bioabfallkomposten die Annahme nahe, dass die Gehalte zeitlich oder lokal stark schwanken.

Diese Schwankungsbreite wird durch Literaturangaben bestätigt. Einen vergleichsweise niedrigen Median (für alle Kompostproben; N = 79, davon insgesamt 42 Werte aus [2, 3]) von 0,3 mg/(kg TS) nennt [5], wobei die Belastung in den Bioabfallkomposten {N = 51, davon 26 Werte aus [2, 3]; Median: 1,3 mg/(kg TS)} signifikant höher ist als die Gehalte in den Grüngutkomposten {N = 28, davon 16 Werte aus [2, 3]; Median: 0,084 mg/(kg TS)}. Die aktuellen Angaben aus Baden-Württemberg [4] liegen mit Medianen von 1,4 mg/(kg TS), 1,5 mg/(kg TS) bzw. 3,5 mg/(kg TS) für 19 Bioabfall-, fünf Grüngutkomposte bzw. fünf Vergärungsrückstände teilweise deutlich (insbesondere bei den Grüngutkomposten, auch bei den Vergärungsrückständen) höher als die aktuellen bayerischen Werte.

3.2.10 iso-Nonylphenol

Nonylphenole sind Ausgangsprodukte für die Herstellung von Alkylphenolharzen (Kunststoffe) und Alkylphenoethoxylaten (nichtionische Tenside) sowie deren Abbauprodukte. Sie weisen eine hohe aquatische Toxizität auf, hemmen das Wachstum von Bodenbakterien und wirken estrogenartig.

Wie bei vielen anderen organischen Schadstoffen sind auch beim iso-Nonylphenol in den Bioabfallkomposten und Vergärungsrückständen deutlich höhere Gehalte als in den Grüngutkomposten zu verzeichnen. In den Bioabfallkomposten wurden Gehalte von unter Bestimmungsgrenze {< 50 µg/(kg TS); drei Proben} bis 330 µg/(kg TS) ermittelt; bei den Vergärungsrückständen war die Spannweite vergleichbar zwischen kleiner Bestimmungsgrenze (eine Probe) und 420 µg/(kg TS). Demgegenüber lag bei neun Grüngutkomposten die Konzentration unter der Bestimmungsgrenze; die restlichen drei Proben wiesen Gehalte bis knapp 90 µg/(kg TS) auf. Die Mediane ergaben sich zu 153,5 µg/(kg TS) bei den Bioabfallkomposten, < 50 µg/(kg TS) bei den Grüngutkomposten bzw. 324 µg/(kg TS) bei den Vergärungsrückständen. Im Papierfaserkompost war der Gehalt an iso-Nonylphenol mit 618 µg/(kg

TS) deutlich höher als in den drei untersuchten „Komposten“ (Bioabfall-, Grüngutkompost, Vergärungsrückstand).

Die Vergleichsuntersuchung vier Jahre davor lieferte für die untersuchten Komposte die gleiche Aussage hinsichtlich der Lage von Bioabfall- und Grüngutkomposten zueinander, allerdings auf einem durchweg höheren Konzentrationsniveau: Bioabfallkomposte zeigten Gehalte zwischen 83 µg/(kg TS) und 2.580 µg/(kg TS), Grüngutkomposte zwischen 57 µg/(kg TS) und 772 µg/(kg TS) [3].

Die aktuellen Untersuchungen in Baden-Württemberg [4] lieferten gleiche Verhältnisse hinsichtlich der Belastungen von Bioabfall-, Grüngutkomposten und Vergärungsrückständen im Vergleich zueinander, allerdings insgesamt (bei den Vergärungsrückständen deutlich) höhere Schadstoffgehalte, vergleichbar mit den Werten [3]. Die Mediane liegen bei 560 µg/(kg TS) (Bioabfallkompost; N = 19), 129 µg/(kg TS) (Grüngutkompost; N = 5) bzw. 3.743 µg/(kg TS) (Vergärungsrückstand; N = 5).

3.2.11 Zinnorganische Verbindungen

Zinnorganische Verbindungen finden als Biozide insbesondere in Antifoulingfarben, Holz-, Textil- und Lederschutzmitteln Verwendung. Sie sind endokrin wirksam.

Monobutylzinn

Monobutylzinn ist die einzige der untersuchten zinnorganischen Verbindungen, die in etlichen Proben bestimmt werden konnte {Bestimmungsgrenze für alle zinnorganischen Verbindungen: 1 µg Sn/(kg TS)}. So wiesen bei den Bioabfallkomposten neun Proben Gehalte unter 5 µg/(kg TS) (davon drei Proben unter der Bestimmungsgrenze), die restlichen drei Proben Gehalte zwischen 7 µg/(kg TS) und 9 µg/(kg TS) auf. Bei den Grüngutkomposten lagen sieben Proben unter der Bestimmungsgrenze, die restlichen fünf Proben unter 7 µg/(kg TS). Die Vergärungsrückstände zeigten im Vergleich der drei Sekundärrohstoffe die höchsten Werte: für drei Rückstände wurden Gehalte bis 7 µg/(kg TS), für die beiden anderen Proben Gehalte von über 17 µg/(kg TS) bzw. knapp 20 µg/(kg TS) ermittelt. Hieraus ergaben sich Mediane von 4,3 µg/(kg TS) bei den Bioabfallkomposten, < 1 µg/(kg TS) bei den Grüngutkomposten sowie 6,8 µg/(kg TS) bei den Vergärungsrückständen.

Die Kompostuntersuchung aus dem Jahre 2002 lieferte ein vergleichbares Bild, allerdings waren die damaligen Konzentrationen geringfügig niedriger als heute. Die Bioabfallkomposte erreichten Werte bis zu 6 µg/(kg TS), die Grüngutkomposte bis 2 µg/(kg TS) [3].

Monooktylzinn

In einem Bioabfallkompost wurde neben Monobutyl- auch Monooktylzinn mit einem Gehalt von knapp 6 µg/(kg TS) gefunden {Bestimmungsgrenze: 1 µg Sn/(kg TS)}. In den Grüngutkomposten ist Monooktylzinn nicht, in den Vergärungsrückständen in drei (von fünf) Proben mit Gehalten bis 11 µg/(kg TS) vertreten. Dementsprechend lagen die Mediane für die beiden Komposte unter der Bestimmungsgrenze {< 1 µg Sn/(kg TS)}, bei den Vergärungsrückständen bei 4,8 µg Sn/(kg TS).

Im Jahr 2002 waren die Bioabfallkomposte sowohl hinsichtlich Anzahl der „positiven“ Proben (knapp die Hälfte) als auch der darin ermittelten Konzentrationen {bis über 15 µg/(kg TS)} etwas stärker mit Monooktylzinn belastet. Die Grüngutkomposte waren auch damals unbelastet [3].

Di-/Tri-/Tetrabutyl-, Dioktyl-, Tricyclohexyl-, Triphenylzinn

Weitere zinnorganische Verbindungen konnten weder in den Bioabfall- noch in den Grüngutkomposten bestimmt werden {Bestimmungsgrenze: 1 µg Sn/(kg TS)}. Die Vergärungsrückstände, die auch schon für Monobutyl- und -oktylzinn höhere Belastungen als die Komposte zeigten, enthielten noch

- Dibutylzinn in zwei Proben mit Gehalten bis knapp über 10 µg/(kg TS),

- Tributylzinn in einer Probe mit einem Gehalt von 12 µg/(kg TS) sowie
- Dioktylzinn in einer Probe mit einem Gehalt von 4 µg/(kg TS).

Tetrabutyl-, Tricyclohexyl- und Triphenylzinn konnten in den Vergärungsrückständen nicht bestimmt werden.

Bei der Vergleichsuntersuchung 2002 wurden in den Komposten neben Monobutyl- und -oktylzinn Dibutylzinn (zwei Bioabfall-, drei Grüngutkomposte) und Dioktylzinn (ein Bioabfallkompost) mit maximalen Gehalten knapp über 1 µg/(kg TS) gefunden [3].

3.2.12 Galaxolide[®] (HHCB), Tonalide[®] (AHTN)

Die Verbindungen HHCB (1,3,4,6,7,8-Hexahydro-4,6,6,7,8,8-hexamethyl-cyclopenta-γ-2-benzopyran, Galaxolide[®]) und AHTN (7-Acetyl-1,1,3,4,4,6-hexamethyl-tetralin, Tonalide[®]) sind synthetische Duftstoffe, die natürliche Moschusverbindungen (Duftkomponenten, z. B. in Wasch- und Reinigungsmitteln, Weichspülern und Kosmetika) substituieren. Beide Verbindungen sind endokrin wirksame Substanzen.

HHCB

HHCB erreicht in den Vergärungsrückständen die höchsten und in den Grüngutkomposten die mit Abstand niedrigsten Gehalte. In den Bioabfallkomposten streuten die Konzentrationen mit Werten unter der Bestimmungsgrenze {< 1 µg/(kg TS), eine Probe} bis 46 µg/(kg TS) relativ stark. In den Grüngutkomposten lagen vier Proben unter der Bestimmungsgrenze, die restlichen acht Proben in einem Bereich bis zu 6 µg/(kg TS). Die Gehalte in den Vergärungsrückständen erreichten Werte bis 70 µg/(kg TS). Die Mediane betragen 13,7 µg/(kg TS) bei den Bioabfallkomposten, 1,5 µg/(kg TS) bei den Grüngutkomposten bzw. 62,2 µg/(kg TS) bei den Vergärungsrückständen.

AHTN

Die AHTN-Gehalte liegen in den Grüngutkomposten deutlich niedriger als in den Bioabfallkomposten und Vergärungsrückständen. In den Bioabfallkomposten ist AHTN weit verbreitet und wies bei der aktuellen Untersuchung Konzentrationen bis 16 µg/(kg TS) auf. Bei den Grüngutkomposten lagen drei Proben unter der Bestimmungsgrenze {1 µg/(kg TS)}; acht der restlichen Proben enthielten AHTN in Konzentrationen unter 4 µg/(kg TS), ein „Ausreißer“ erreichte knapp 8 µg/(kg TS). Die Gehalte in den Vergärungsrückständen lagen i. d. R. unter 11 µg/(kg TS); bei einer Probe wurde eine Konzentration von knapp 17 µg/(kg TS) ermittelt. Aus diesen Werten resultierten Mediane von 8,7 µg/(kg TS) bei den Bioabfallkomposten, 2,1 µg/(kg TS) bei den Grüngutkomposten sowie 9,2 µg/(kg TS) bei den Vergärungsrückständen. Nahezu den dreifachen Gehalt des in den drei Sekundärrohstoffen ermittelten Maximalwerts zeigte mit 46,3 µg/(kg TS) der untersuchte Papierfaserkompost.

In Baden-Württemberg wurden für Bioabfall- und Grüngutkomposte ähnliche, für Vergärungsrückstände deutlich höhere AHTN-Gehalte als in Bayern ermittelt [4]: der Median von Bioabfallkomposten liegt bei 6 µg/(kg TS) (N = 19), in Grüngutkomposten konnte AHTN nicht nachgewiesen werden (keine Angabe der Nachweisgrenze). Die Vergärungsrückstände wiesen in Baden-Württemberg einen Median von 68 µg/(kg TS) (N = 5) auf.

3.2.13 Polybromierte Diphenylether (PBDE)

Polybromierte Diphenylether (PBDE) werden als Flammschutzmittel z. B. in Kunststoffen und Textilien eingesetzt.

Auch bei den weit verbreiteten PBDE weisen Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände ähnliche Belastungen auf, die über der der Grüngutkomposte liegen. Nahezu alle Bioabfallkompostproben enthielten PBDE in Konzentrationen bis zu 36 µg/(kg TS); ein „Ausreißer“ lag bei knapp 90 µg/(kg TS).

Die Grüngutkomposte zeigen i. d. R. Gehalte bis zu 14 µg/(kg TS); zwei Proben überschritten mit knapp 25 µg/(kg TS) bzw. 44 µg/(kg TS) diesen Wertebereich deutlich. Die Gehalte in den Vergärungsrückständen lagen bei bis zu 42 µg/(kg TS). Die daraus resultierenden Mediane (Summe 8 PBDE) betragen 23,4 µg/(kg TS) bei den Bioabfallkomposten, 10,4 µg/(kg TS) bei den Grüngutkomposten bzw. 26,3 µg/(kg TS) bei den Vergärungsrückständen. Auffallend hoch war der PBDE-Gehalt im Papierfaserkompost: mit 527 µg/(kg TS) betrug er nahezu das Sechsfache der in den drei Kompostqualitäten ermittelten Maximalkonzentration.

Diese aktuellen Werte sind mit den im Jahr 2002 bestimmten Kompostgehalten [3] nicht direkt vergleichbar, da bei den beiden Untersuchungen unterschiedliche Kongenere analysiert wurden (2002: 13 Kongenere; 2006: acht Kongenere). Betrachtet man die sieben Kongenere, die bei beiden Untersuchungen bestimmt wurden (= Kongenere der aktuellen Untersuchung ohne das Kongener PBDE 209), ergeben sich für die im Jahr 2002 untersuchten (fünf) Bioabfallkomposte ähnliche Gehalte {Median Summe 7 PBDE 2002: 10,7 µg/(kg TS), 2006: 9,2 µg/(kg TS)} und für die (fünf) Grüngutkomposte höhere Belastungen {Median Summe 7 PBDE 2002: 11,4 µg/(kg TS), 2006: 3,4 µg/(kg TS)} als bei den aktuellen Komposten.

Obwohl bei der entsprechenden Untersuchung von Komposten und Vergärungsrückständen in Baden-Württemberg zwölf Kongenere (gegenüber acht bei der aktuellen bayerischen Untersuchung) bestimmt wurden – die Konzentration der vier zusätzlich analysierten Kongenere betrug in Summe kleiner 1,8 µg/(kg TS) –, liegen deren Summengehalte bei ca. der Hälfte der für bayerische Sekundärrohstoffe ermittelten Gehalte [4]: Medianen (Summe 12 PBDE) für Bioabfall-, Grüngutkomposte bzw. Vergärungsrückstände von 13,0 µg/(kg TS) (N = 19), 5,4 µg/(kg TS) bzw. 13,7 µg/(kg TS) (jeweils N = 5) stehen Werte (Summe 8 PBDE) für Bayern von 23,4 µg/(kg TS), 10,4 µg/(kg TS) bzw. 26,3 µg/(kg TS) gegenüber.

3.2.14 Thiabendazol

Thiabendazol ist wie Biphenyl und ortho-Phenylphenol ein Zitrusfungizid.

Thiabendazol ist in den Komposten/Vergärungsrückständen nicht enthalten; es wurde in keiner der 30 Proben nachgewiesen. Die Gehalte lagen sowohl bei den Komposten als auch bei den Vergärungsrückständen unter der Bestimmungsgrenze von 10 µg/(kg TS).

Das gleiche Ergebnis lieferte die Untersuchung der Komposte im Jahr 2000; damals betrug die Bestimmungsgrenze 50 µg/(kg TS) [2].

In Übereinstimmung mit diesen Befunden steht das Ergebnis der Literaturstudie [5], die für 23 untersuchte Komposte einen Median von 7,1 µg/(kg TS) nennt.

3.2.15 Lineare Alkylbenzolsulfonate (LAS)

Lineare Alkylbenzolsulfonate (LAS) sind die quantitativ wichtigste Komponente in Wasch- und Reinigungsmitteln; sie weisen endokrine Wirksamkeit auf.

Da bei der Kompostuntersuchung des Jahres 2002 LAS in den Bioabfallkomposten nur in untergeordneten Gehalten {i. d. R. unter Bestimmungsgrenze, nur drei Proben mit Gehalten von maximal 216 µg Einzel-LAS/(kg TS)} und in den Grüngutkomposten gar nicht {Konzentrationen < 50 µg/(kg TS)} festgestellt wurden [3], wurden ausschließlich die Vergärungsrückstände auf LAS analysiert. Dabei konnten in den Vergärungsrückständen keine LAS festgestellt werden; alle Gehalte lagen unter der Bestimmungsgrenze von 50 µg/(kg TS).

3.2.16 Perfluorierte Tenside (PFT)

Perfluorierte Tenside (PFT) werden insbesondere bei der Oberflächenbehandlung (z. B. bei Textilien, Lederartikeln), Papierveredlung (auch bei Verpackungen) und in der Spezialchemie eingesetzt. Hauptkomponenten sind die Perfluorooctansäure (PFOA) sowie die Perfluorooctansulfonsäure (PFOS).

Auf perfluorierte Tenside (PFOA, PFOS) wurden (neben dem Papierfaserkompost) drei Bioabfallkomposte und ein Vergärungsrückstand untersucht. In den drei Bioabfallkomposten und dem Vergärungsrückstand konnten PFOA und PFOS nicht bestimmt werden; die Bestimmungsgrenzen lagen – je nach Trockensubstanzgehalt der vier Proben – zwischen 15 µg/(kg TS) und 23 µg/(kg TS). Auch im Papierfaserkompost war der Gehalt an PFOA unter der Bestimmungsgrenze von 19 µg/(kg TS); die Analytik hinsichtlich PFOS ergab eine Belastung von 40 µg/(kg TS).

Im Februar 2007 wurde der Papierfaserkompost noch einmal beprobt (Doppelbeprobung). Eine der beiden Proben wies hinsichtlich PFOA eine Belastung von 43 µg/(kg TS) auf; die PFOA-Konzentration der anderen Probe sowie die PFOS-Gehalte beider Proben lagen unter den jeweiligen Bestimmungsgrenzen von 25 µg/(kg TS) bzw. 27 µg/(kg TS).

3.2.17 Triclosan, Methyl-Triclosan

Triclosan {5-Chlor-2-(2,4-dichlorphenoxy)-phenol} ist ein Desinfektionsmittel mit breitem antimikrobiellen Wirkungsspektrum. Es wird deshalb in steigendem Ausmaß in kosmetischen, pharmazeutischen und Haushaltsprodukten als antiseptischer, desodorierender bzw. konservierender Wirkstoff eingesetzt. Wegen der großen Anwendungsbreite der Verbindung besteht die Gefahr zur Ausbildung von Resistenzen.

Die Gehalte an Triclosan und Methyl-Triclosan wurden in drei Bioabfallkomposten bestimmt: Triclosan wurde in einer Probe mit einer Konzentration von 6 µg/(kg TS) gefunden, die Gehalte in den anderen beiden Bioabfallkomposten sowie die Gehalte an Methyl-Triclosan in allen drei Proben lagen unter der Bestimmungsgrenze {3 µg/(kg TS)}.

In Baden-Württemberg wurde Triclosan in vier (von 19 untersuchten) Bioabfallkompostproben (von zwei Bioabfallkompostierungsanlagen) in Konzentrationen zwischen 1,5 µg/(kg TS) und 11,6 µg/(kg TS) bestimmt [4]. In einem (von fünf) Vergärungsrückstand(en) trat es mit einer Konzentration von 10,3 µg/(kg TS) auf. In den restlichen (15) Bioabfallkomposten bzw. (vier) Vergärungsrückständen sowie in den (fünf) Grüngutkomposten war Triclosan nicht nachweisbar (Nachweisgrenze: 0,5 µg/(kg TS)).

4 Zusammenfassung und Bewertung

Im Herbst 2006 beprobte das Bayerische Landesamt für Umwelt jeweils zwölf Bioabfall- und Grüngutkomposte sowie fünf Vergärungsrückstände und einen Papierfaserkompost, um einen Überblick über die Schadstoffgehalte dieser Sekundärrohstoffe zu erhalten. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit früheren Untersuchungen [2, 3] wurden die gleichen Bioabfall- und Grüngutkompostierungsanlagen beprobt wie in den Jahren 2000 und 2002.

Die 30 Proben wurden auf die sieben Schwermetalle der BioAbfV [10] und diverse organische Schadstoffe untersucht: polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, polychlorierte Dibenzodioxine/-furane, polychlorierte Biphenyle, Biphenyl, Hexachlorbenzol, Pentachlorphenol, ortho-Phenylphenol, Bisphenol A, Di-(2-ethylhexyl)-phthalat, iso-Nonylphenol, zinnorganische Verbindungen, Galaxolide[®], Tonalide[®], polybromierte Diphenylether, Thiabendazol; einzelne Proben wurden zusätzlich auf lineare Alkylbenzolsulfonate, perfluorierte Tenside, Triclosan und Methyl-Triclosan analysiert.

Im Folgenden sind für die analysierten Schadstoffe die ermittelten Wertebereiche (über alle untersuchten Proben, gerundet) angegeben.

Schwermetalle

<i>Blei:</i>	5 – 90 mg/(kg TS)
<i>Cadmium:</i>	0,15 – 0,8 mg/(kg TS)
<i>Chrom:</i>	15 – 45 mg/(kg TS)
<i>Nickel:</i>	9 – 30 mg/(kg TS)
<i>Quecksilber:</i>	0,03 – 0,7 mg/(kg TS)

Die Gehalte an diesen fünf Schwermetallen sind in den untersuchten Kompostarten/Vergärungsrückständen ähnlich; sie streuen im Vergleich zu den Gehalten an organischen Schadstoffen wenig und liegen meist deutlich unter den „schärferen“ Grenzwerten der BioAbfV [10]. Die Quecksilbergehalte scheinen in den Bioabfall- und Grüngutkomposten leicht rückläufig zu sein; die gleiche Aussage gilt für die Chrom- und Nickelgehalte in den Grüngutkomposten.

<i>Kupfer:</i>	25 – 110 mg/(kg TS)
<i>Zink:</i>	90 – 330 mg/(kg TS)

Hinsichtlich Kupfer und Zink weisen die Grüngutkomposte niedrigere Belastungen auf als die Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände. Die Grenzwerte der BioAbfV [10] werden teilweise überschritten: fünf Bioabfallkomposte (5× Cu, 1× Zn), drei Vergärungsrückstände (3× Cu) und der Papierfaserkompost (Cu) halten die jeweiligen schärferen Grenzwerte nicht ein, davon liegen ein Bioabfallkompost und ein Vergärungsrückstand auch über dem höheren Grenzwert (jeweils Cu). Gegenüber den letzten Untersuchungen verändern sich die Gehalte in den Bioabfallkomposten kaum, die in den Grüngutkomposten nehmen tendenziell zu.

Organische Schadstoffe

<i>Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe:</i>	0,3 – 8 mg/(kg TS)
--	--------------------

Im Vergleich zu den anderen untersuchten organischen Schadstoffen liegt die Belastung mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen im einstelligen mg/kg-Bereich um Größenordnungen höher. Wie bei der Mehrzahl der untersuchten organischen Schadstoffe sind die Bioabfallkomposte und insbesondere die Vergärungsrückstände stärker belastet als die Grüngutkomposte. Die Gehalte an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in den Grüngutkomposten sind in den letzten Jahren rückläufig.

<i>Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane:</i>	1 – 32 ng I-TEQ/(kg TS)
---	-------------------------

Auch bei den polychlorierten Dibenzodioxinen/-furanen weisen die Grüngutkomposte geringere Konzentrationen auf als die Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände. Die Kompostgehalte haben insbesondere bei den Grüngutkomposten gegenüber den Untersuchungen 2000/2002 deutlich abgenommen.

<i>Indikator-PCB:</i>	5 – 90 µg/(kg TS)
<i>WHO-PCB:</i>	0,4 – 6 ng WHO-TEQ/(kg TS)
Sowohl hinsichtlich der Indikator- als auch der WHO-PCB liegen in den Komposten/Vergärungsrückständen ähnliche Gehalte vor; die höchste Belastung (Indikator-PCB) weist der Papierfaserkompost auf. Die Kompostkonzentrationen beider Schadstoffgruppen sind rückläufig, am deutlichsten bei den Indikator-PCB-Gehalten der Bioabfallkomposte.	
<i>Biphenyl:</i>	< 10 – 17 µg/(kg TS)
Biphenyl wurde in drei von 30 Proben gefunden; in den Grüngutkomposten war es nicht bestimmbar. Im Vergleich zur Untersuchung aus dem Jahr 2000 liegen deutlich niedrigere Gehalte vor.	
<i>Hexachlorbenzol:</i>	0,1 – 7 µg/(kg TS)
Ähnlich den polychlorierten Biphenylen unterscheiden sich die Gehalte in den untersuchten Kompostarten/Vergärungsrückständen kaum. Sie liegen geringfügig niedriger als im Jahr 2000.	
<i>Pentachlorphenol:</i>	< 5 – 40 µg/(kg TS)
In Bezug auf Pentachlorphenol weisen die Grüngutkomposte eine niedrigere Belastung auf als die Bioabfallkomposte und Vergärungsrückstände. Die Untersuchungsergebnisse aus dem Jahr 2000 lagen auf einem ähnlichen Konzentrationsniveau.	
<i>ortho-Phenylphenol:</i>	< 10 – 300 µg/(kg TS)
Wie bei Biphenyl konnte in der Mehrzahl der Proben (23 von 30, darunter alle untersuchten Grüngutkomposte) kein ortho-Phenylphenol bestimmt werden. Damit liegen die Gehalte niedriger als sechs Jahre zuvor.	
<i>Bisphenol A:</i>	< 10 – 2.900 µg/(kg TS)
Bisphenol A zeigt die größte Bandbreite der ermittelten Konzentrationen, dies sowohl innerhalb der einzelnen Kompostarten/Vergärungsrückstände als auch im Vergleich untereinander. Auch für diese Substanz wurden in den Grüngutkomposten deutlich niedrigere Belastungen gefunden als in den Bioabfallkomposten; am höchsten sind die Gehalte bei den Vergärungsrückständen. Die Konzentrationen sind gegenüber dem Jahr 2002 angestiegen.	
<i>Di-(2-ethylhexyl)-phthalat:</i>	< 0,05 – 12,5 mg/(kg TS)
Ähnliche Verhältnisse hinsichtlich Bandbreite und Lage der Konzentrationsniveaus der drei Sekundärrohstoffe zueinander liegen beim Di-(2-ethylhexyl)-phthalat vor; die höchste Belastung weist der untersuchte Papierfaserkompost auf. Die Gehalte schwanken (lokal oder zeitlich) stark, ein eindeutiger zeitlicher Trend ist nicht feststellbar.	
<i>iso-Nonylphenol:</i>	< 50 – 600 µg/(kg TS)
Auch bei iso-Nonylphenol steigen die Konzentrationen in der Reihenfolge Grüngut- < Bioabfallkompost < Vergärungsrückstand an; der Papierfaserkompost besitzt analog zu Di-(2-ethylhexyl)-phthalat die höchste Belastung. Die Gehalte sind sowohl in den Bioabfall- als auch in den Grüngutkomposten rückläufig.	
<i>Monobutylzinn:</i>	< 1 – 20 µg Sn/(kg TS)
<i>Dibutylzinn:</i>	< 1 – 10 µg Sn/(kg TS)
<i>Tributylzinn:</i>	< 1 – 12 µg Sn/(kg TS)
<i>Tetrabutylzinn:</i>	< 1 µg Sn/(kg TS)
<i>Monooktylzinn:</i>	< 1 – 11 µg Sn/(kg TS)
<i>Dioktylzinn:</i>	< 1 – 4 µg Sn/(kg TS)
<i>Tricyclohexylzinn:</i>	< 1 µg Sn/(kg TS)
<i>Triphenylzinn:</i>	< 1 µg Sn/(kg TS)
Von den acht untersuchten zinnorganischen Verbindungen wurden in den Grüngut- und Bioabfallkomposten nur Monobutyl- und in geringerem Umfang Monooktylzinn gefunden; die Konzentrationen waren in den Grüngutkomposten am niedrigsten, in den Vergärungsrückständen am höchsten. Zusätzlich konnten in den Vergärungsrückständen noch Dibutyl-, Tributyl- und Dioktylzinn bestimmt werden. Die Gehalte haben sich gegenüber der Untersuchung 2002 kaum verändert.	

Galaxolide[®]: < 1 – 70 µg/(kg TS)

Tonalide[®]: < 1 – 50 µg/(kg TS)

Die Konzentrationen von Galaxolide[®] (HHCB) und Tonalide[®] (AHTN) steigen in der Reihenfolge Grün- gut- < Bioabfallkompost < Vergärungsrückstand an; besonders auffällig sind die Konzentrationsunter- schiede bei HHCB. Den höchsten AHTN-Gehalt zeigt der untersuchte Papierfaserkompost.

Polybromierte Diphenylether: 1 – 530 µg/(kg TS)

Grüngutkomposte weisen niedrigere Konzentrationen an polybromierten Diphenylethern auf als Bioab- fallkomposte und Vergärungsrückstände; der Papierfaserkompost ist mit Abstand am höchsten be- lastet. Die Gehalte scheinen insbesondere bei den Grüngutkomposten rückläufig zu sein.

Thiabendazol: < 10 µg/(kg TS)

Thiabendazol konnte in keiner Probe bestimmt werden.

C₉- bis C₁₅-Alkylbenzolsulfonat: jeweils < 50 µg/(kg TS)

Ausschließlich die Vergärungsrückstände wurden auf lineare Alkylbenzolsulfonate (LAS) analysiert; dabei konnten keine LAS festgestellt werden.

Perfluorooctansäure: < 15 – 43 µg/(kg TS)

Perfluorooctansulfonsäure: < 15 – 40 µg/(kg TS)

Auf Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) wurden drei Bioabfallkomposte, ein Vergärungsrückstand und der Papierfaserkompost untersucht. In den Bioabfallkomposten und dem Vergärungsrückstand konnten PFOA und PFOS nicht gefunden werden. Im Papierfaserkompost wurde PFOS festgestellt; bei einer Nachbeprobung des Papierfaserkompostes wies eine der beiden Proben einen Gehalt an PFOA auf.

Triclosan: < 3 – 6 µg/(kg TS)

Methyl-Triclosan: < 3 µg/(kg TS)

Die Gehalte an Triclosan und Methyl-Triclosan wurden in drei Bioabfallkomposten untersucht. Triclo- san wurde in einer Probe gefunden, Methyl-Triclosan konnte nicht bestimmt werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass

- man in den untersuchten Komposten fast alle ausgewählten Schadstoffe (Ausnahme: Alkylbenzol- sulfonate, Thiabendazol, einzelne zinnorganische Verbindungen) findet,
- die Konzentrationen mit Ausnahme von Kupfer, Zink und polyzyklischen aromatischen Kohlenwas- serstoffen meist niedrig sind,
- die Grüngutkomposte gegenüber den Bioabfallkomposten und Vergärungsrückständen i. d. R. ge- ringere Schadstoffkonzentrationen aufweisen,
- die Schadstoffbelastungen gegenüber den Untersuchungen 2000 und 2002 tendenziell rückläufig sind.

Für einen nachhaltigen Umgang mit den Sekundärrohstoffen Kompost bzw. Vergärungsrückstand als Dünger ist aus fachlicher Sicht eine regelmäßige Erhebung der Schadstoffgehalte im mehrjährigen Abstand wünschenswert.

5 Danksagung

Dank gebührt

- dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, das die Durchführung der Untersuchungen finanziert und die Weiterführung vorangegangener Kompostanalysen aus den Jahren 2000 und 2002 ermöglicht hat,
- den Betreibern der Kompostierungs- und Bioabfallvergärungsanlagen, die durch ihre kooperative Mitarbeit die Untersuchungen erst ermöglicht haben.

Besonderer Dank gilt den Kollegen der Referate 72, 74 und 75 für die Durchführung der umfangreichen und aufwändigen Bestimmungen auf anorganische und organische (Ultra-)Spurenschadstoffe.

6 Literatur

- [1] Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.):
Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2005.
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2006
- [2] Marb, C.; Scheithauer, M.; Köhler, R.:
Kompostierung von Bioabfällen mit anderen organischen Abfällen. Teil A: Untersuchung von Bio- und Grünabfallkomposten auf ihren Gehalt an Schwermetallen und organischen Schadstoffen.
Zwischenbericht des BayStMLU-Projektmittelvorhabens Nr. L4 zum 30.04.2001.
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg, 2001
- [3] Marb, C.; Scheithauer, M.; Bittl, T.; Köhler, R.; Veit, N.:
Kompostierung von Bioabfällen mit anderen organischen Abfällen.
Abschlussbericht des BayStMLU-Projektmittelvorhabens Nr. L4 zum 30.04.2003.
Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg, 2003
- [4] Kuch, B.; Rupp, S.; Fischer, K.; Kranert, M.; Metzger, J.W.:
Untersuchungen von Komposten und Gärsubstraten auf organische Schadstoffe in Baden-
Württemberg.
Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, Förderkennzeichen BWR 24026.
Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007
- [5] Brändli, R.C.; Bucheli, T.D.; Kupper, T.; Furrer, R.; Stadelmann, F.X.; Tarradellas, J.:
Persistent organic pollutants in source-separated compost and its feedstock materials – a review
of field studies.
J. Environ. Qual. 34 (2005) 3, S. 735–760
- [6] Paulig, Ruth:
Schriftliche Anfrage der Abgeordneten Ruth Paulig, Bündnis 90/Die Grünen, an die Bayerische
Staatsregierung vom 14.09.2006: Untersuchungen zu PFT (perfluorierte Tenside) in Bayern.
Breitbrunn, 2006
- [7] U.S. Environmental Protection Agency:
EPA Test Methods: Polynuclear Aromatic Hydrocarbons – Method 610.
Environmental Monitoring and Support Laboratory, Cincinnati OH 45268, USA, 1982
- [8] Anonym:
Klärschlammverordnung (AbfKlärV). Vom 15. April 1992.
BGBl. I (1992), S. 912; zuletzt geändert am 20.10.2006, BGBl. I (2006), S. 2298
- [9] StatSoft, Inc.:
STATISTICA für Windows. Software-System für Datenanalyse, Version 6 (2001).
www.statsoft.com
- [10] Anonym:
Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und
gärtnerisch genutzten Böden (BioAbfV – Bioabfallverordnung). Vom 21. September 1998.
BGBl. I (1998), S. 2955; zuletzt geändert am 20.10.2006, BGBl. I (2006), S. 2298
- [11] Weigand, H.; Marb, C.:
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Restmüll aus Haushaltungen – Teil III: Physika-

lich-chemische Eigenschaften und Schadstoffgehalte.
Müll und Abfall 38 (2006) 5, S. 236 – 246

- [12] Anonym:
Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (Stockholmer Konvention).
http://www.pops.int/documents/convtext/convtext_en.pdf

